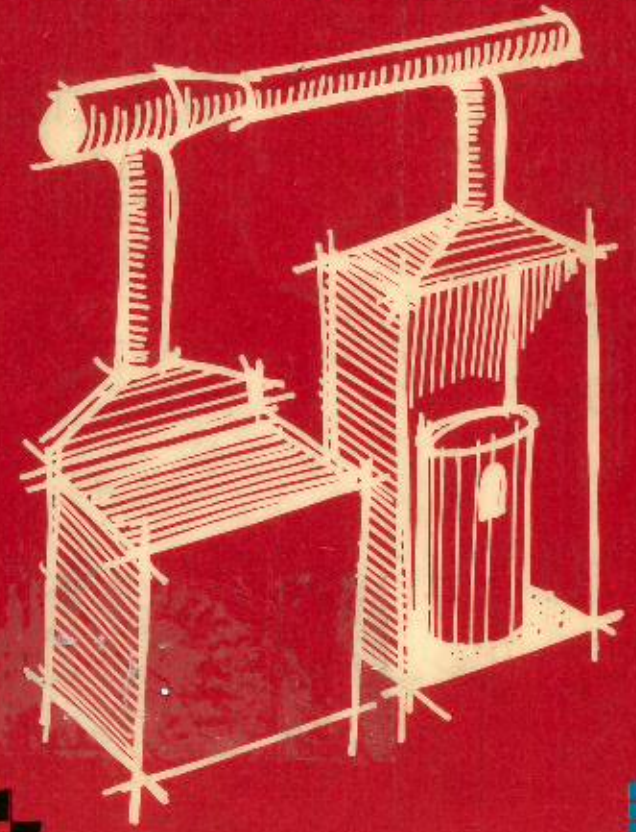


ENGENHARIA DE VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

A. L. MESQUITA
F. A. GUMARães
N. NEFUSSI



EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA.



RFR

ENGENHARIA DE VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - INSTITUTO DE TECNOLOGIA
BIBLIOTECA
AV. PROF. FREDERICO HERRMANN JR, S/N - CP. 05509 - PINHEIROS
SÃO PAULO - BRASIL

FICHA CATALOGRÁFICA

(Preparada pelo Centro de Catalogação-na-fonte,
Câmara Brasileira do Livro, SP)

M543e Mesquita, Armando Luís de Sousa, 1943—
. Engenharia de ventilação industrial [por] Armando Luiz
de Souza Mesquita, Fernando de Araújo Guimarães [e]
Nélson Nefussi. São Paulo, Edgard Blücher, CETESB, 1977.

Bibliografia.

1. Ar — Poluição 2. Controle de qualidade do ar 3. Fá-
bricas — Calefação e ventilação 4. Ventilação I. Guimarães,
Fernando de Araújo, 1943— II. Nefussi, Nélson, 1940—
III. Título.

77-0534

CDD-628.53
-697.92

Índices para catálogo sistemático:

1. Poluição do ar : Saneamento industrial : Engenharia sanitária 628.53
2. Ventilação industrial : Engenharia 697.92

Impresso no Brasil *Printed in Brazil*

A. L. S. MESQUITA

Engenheiro Mecânico - FEI

Mestre de Ciência em Engenharia Ambiental - Universidade de Carolina do Norte

Sanitarista - Universidade de São Paulo

Professor da Faculdade de Saúde Pública da USP

F. A. GUIMARÃES

Engenheiro Mecânico - FEI

Mestre de Ciência em Higiene e Poluição do Ar - Universidade de Pittsburgh

Sanitarista - Universidade de São Paulo

Professor da Faculdade de Saúde Pública - USP

N. NEFUSSI

Engenheiro Químico - FEI

Mestre de Ciência em Higiene e Poluição do Ar - Universidade de Pittsburgh

Sanitarista - Universidade de São Paulo

Professor da Faculdade de Saúde Pública - USP

ENGENHARIA DE VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

Co-edição



CETESB

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental



EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA.

1.^a edição - 1977

São Paulo - Brasil

EDITADO - EM - DE - TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

11449
8802/M562e

CLASS	8802
AUTOR	M562e
LUMBO	11449

9211
M562e
011449
Ex. 2

CAPA: Ariel Severino Fernando Rios

Direitos reservados pela
CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
São Paulo, Brasil, 1977

É proibida a reprodução total ou parcial,
por quaisquer meios,
sem a autorização escrita da CETESB

CETESB
Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345
CEP-05459 - São Paulo, Brasil
7-35.001.09
1977

EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA.
01000 Caixa Postal 5450
End. Telegráfico: Blucherlivro
São Paulo - SP. - Brasil

Obra publicada pela
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental,
em co-edição com a
Editora Edgard Blücher Ltda.,
e realizada pela Superintendência de Treinamento da CETESB.



CETESB

São Paulo, 1977

Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345

CEP 05459 - S.P. - Brasil

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

Às nossas esposas,
Mabel, Virgínia e Maria do Carmo

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
BIBLIOTECA

Agradecemos aos nossos primeiros professores,
Engenheiro César Macher
Engenheiro Silas Fonseca Redondo

APRESENTAÇÃO

Esta obra compõe-se de oito capítulos e um apêndice, onde uma série de informações e dados estão condensados de maneira a facilitar seu uso.

Apesar de entrar em detalhes técnicos essenciais, a obra foi projetada e escrita de forma a ser de simples compreensão, permitindo a leitura de cada capítulo independentemente da leitura dos demais, pois as referências ao conteúdo dos outros é feita de forma clara e explícita.

Os quatro capítulos iniciais dedicam-se à exposição de todos os conceitos básicos de ventilação industrial e dos assuntos correlatos que são de importância para seu entendimento e manuseio. Neles, além dos princípios de ventilação industrial em si, são, numa profundidade adequada, apresentados os princípios básicos da mecânica dos fluidos, da aerodinâmica dos aerodispersóides e da toxicologia industrial.

Os capítulos seguintes tornam-se específicos e dedicam-se diretamente a abordar as técnicas e a utilização prática da ventilação industrial, incluindo tópicos relativos à ventilação geral de ambientes de trabalho, sistemas de ventilação local exaustora, ventiladores e outros aspectos mais específicos.

O apêndice condensa dados adicionais de uso corriqueiro no projeto de sistemas de ventilação.

Por se tratar de tema inédito na literatura técnica nacional, a CETESB, ao incluir esta obra em seu Programa Editorial, ampliou a esfera de alcance dos conhecimentos específicos e conceitos básicos expostos no livro a todos os interessados no combate à poluição da atmosfera.

Luiz Augusto de Lima Pontes
Diretor de Pesquisa, Engenharia,
Tecnologia e Treinamento
São Paulo, 1977

PREFÁCIO

Quando, em 1968, a extinta Comissão Intermunicipal de Controle de Poluição das Águas e do Ar, CICIPAA, realizou o Curso de Ventilação Industrial, com apoio da Organização Pan-americana da Saúde, os manuais do referido curso deixaram de ser disponíveis quase que de imediato, face à grande procura que se seguiu. Desde essa época, um novo manual para cursos de ventilação industrial se faz necessário, e a Superintendência de Saneamento Ambiental, que anexou a CICIPAA em 1971, através de seus dirigentes, vinham providenciando a elaboração do mesmo. Havendo a CETESB recentemente anexado a SUSAM, cumpre-lhe executar essa tarefa.

Surge então, agora, o manual *Engenharia de ventilação industrial*, com o objetivo de preencher a lacuna deixada pelo esgotamento do manual publicado pela CICIPAA, encontrando sua maior e melhor aplicação junto aos profissionais que militam no campo da engenharia de segurança do trabalho e controle da poluição do ar, podendo, porém, trazer valiosas informações àqueles que exercem outras atividades relacionadas com essas áreas.

Não é nosso propósito, obviamente, apresentar uma obra completa, que esgote definitivamente o assunto, mas acreditamos que será de grande valia na resolução de problemas usuais e corriqueiros de ventilação industrial.

Comentários e sugestões objetivando o aprimoramento qualitativo e quantitativo do corpo do texto, para futuras publicações do manual, serão bem-recebidos.

Respirar um ar compatível com suas necessidades psicofisiológicas é um direito inalienável de cada trabalhador e de cada ser de uma comunidade. A todos cabe a responsabilidade de garantir esse direito e, aos técnicos, o dever de colocar seus melhores conhecimentos a serviço desse nobre objetivo. E a eles dedicamos nossa pequena contribuição.

Os Autores

CONTEÚDO

Capítulo 1 VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

Introdução	1
Controle de riscos ambientais	1
Introdução	1
Os serviços médicos no controle de riscos	1
Exames médicos sistemáticos	2
Assistência médica	3
Higiene dos locais, materiais, métodos e condições de trabalho	4
Educação sanitária	4
Medidas de engenharia de prevenção e proteção contra doenças profissionais ..	4
Adequado projeto, construção e manutenção da maquinaria e equipamentos industriais	4
Substituição de materiais nocivos por outros menos nocivos ou inócuos	5
Modificação de processos e métodos de trabalho	6
Umectação	6
Enclausuramento	6
Isolamento	7
Equipamentos individuais de proteção	7
Ordem, limpeza e conservação	8
Ventilação	8
Considerações gerais sobre ventilação industrial	8
Aspectos gerais	8
Classificação dos sistemas de ventilação	9
Ventilação geral	9
Ventilação local	10
Necessidades humanas de ventilação	10
Composição do ar	10
O dióxido de carbono como um índice das necessidades de ventilação	11
Efeito do tamanho do ambiente ocupado em função das necessidades de ventilação	11

Capítulo 2 PRINCÍPIOS DE MECÂNICA DOS FLUIDOS APLICADOS À VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

Introdução	13
Esforços sobre corpos fluidos	13
Pressão estática	13
Viscosidade	15

Algumas definições importantes	17
Densidade	17
Peso específico	17
Viscosidade cinemática	17
Gravidade específica	17
Pressão de velocidade	18
Pressão total	18
Tipos de fluxos de fluidos	18
Equação da hidrostática	19
Equações de movimento	21
Equação da continuidade	21
Equação da conservação da energia	22
Exercícios de aplicação	24

→ Capítulo 3 TOXICOLOGIA INDUSTRIAL

Generalidades sobre toxicologia	27
Agentes tóxicos	28
Introdução	28
Conceito de toxicidade	28
Sinergismo e antagonismo	29
Risco e segurança	30
Ocorrência dos agentes tóxicos	30
* Poeiras	30
Fumos	30
Névoas	31
Classificação fisiológica dos agentes tóxicos	31
Irritantes	31
Asfixiantes	31
Narcóticos	32
Tóxicos sistêmicos	32
Material particulado que não seja tóxico sistêmico	32
Classificação das substâncias pelos seus efeitos tóxicos	32
Não-venenos	32
Venenos por concentração	32
Venenos crônicos	33
Venenos cumulativos	33
Venenos aditivos	33
Toxicidade aguda, subaguda e crônica	33
Toxicidade aguda	33
Toxicidade subaguda	33
Toxicidade crônica	33
Toxicidade seletiva e associada	33
Toxicidade seletiva	33
Toxicidade associada	34
Relação dose-resposta	34
Introdução	34
Importância atual do tema	35
Apresentação tridimensional da relação dose-resposta	36
Dimensões da dose	36
Dimensões da resposta	39
Suscetibilidade	41
Determinação de limites de tolerância	41

Vias de penetração no organismo	42
Introdução	42
Penetração através da pele	42
Generalidades	42
Ação dos agentes tóxicos sobre a pele	42
Dermatoses ocupacionais	43
Penetração através do trato digestivo	44
Penetração através do aparelho respiratório	45
Generalidades	45
Mecanismo da respiração	45
Regulação e controle da respiração	46
Função da hemoglobina	46
Circulação e sua regulação	47
Absorção de gases e vapores pela via respiratória	47
Generalidades	47
Papel da solubilidade na absorção de gases e vapores	48
Saturação do organismo	49
Concentrações relativas de vapor no sangue, tecidos e ar expirado	50
Mecanismos de ação das substâncias tóxicas	51
Introdução	51
Mecanismos físicos de ação	51
Mecanismos de ação químicos ou fisiológicos	52
Generalidades	52
Mecanismos enzimáticos primários	53
Mecanismos de ação das substâncias tóxicas	56
Mecanismos não-enzimáticos	56
Combinação química direta	56
Liberação de constituintes corporais	56
Quelação	56
Estímulo de mecanismos de imunidade	57
Mecanismos tóxicos secundários	57
Introdução	57
Mecanismos de desintoxicação	57
Complicações secundárias	59
Transporte, armazenamento e eliminação dos agentes tóxicos	60
Transferência de substâncias químicas através de membranas do organismo	60
Transporte	62
Armazenamento	64
Eliminação ou excreção	64
Padrões higiênicos de inalação diária	66
Introdução	66
Restrições quanto aos agentes químicos no ar dos ambientes de trabalho	67
Categorias de ação ofensiva de substâncias inaladas	68
"Threshold limit values" (TLV)	71

Capítulo 4 PROPRIEDADES DOS AERODISPERSÓIDES

Classificação dos aerossóis	91
Propriedades das partículas em relação ao tamanho	93
Introdução	93
Definição de tamanho de partícula	94

Propriedades das partículas	95
Características superficiais e fenômenos interfaciais	95
Densidade	97
Fatores de forma das partículas	98
Aspectos gerais do movimento de partículas num fluido	99
Introdução	99
Resistência de um fluido ao movimento de partículas	100
Velocidade terminal	102
Resistência oferecida por um meio não-contínuo	103
Resistência oferecida quando várias partículas estão presentes	105
Resistência ao movimento de partículas em um fluido limitado	105
Resistência ao movimento de partículas não-esféricas	105
Mecanismos aerodinâmicos de captura de partículas	107
Introdução	107
Impactação inercial	107
Intercepção	109
Difusão	110
Combinação da impactação inercial, da intercepção e da difusão	112
Efeito da temperatura sobre os mecanismos básicos	112
Deposição por sedimentação gravitacional	113
Forças eletrostáticas	113
Coletores múltiplos	114
Movimento num gradiente térmico	116
Representação gráfica de tamanho de partícula	116
Capítulo 5 VENTILAÇÃO GERAL	
Introdução	121
Infiltração e ventilação natural	121
Considerações gerais	121
Ventilação natural	122
Movimento devido aos ventos	123
Movimento devido à diferença de temperaturas	123
Efeito de aberturas desiguais	123
Movimento devido à combinação de ventos e efeito de chaminé	124
Tipos de aberturas	125
Regras gerais	125
Ventilação para conforto térmico	126
Introdução	126
Calor e conforto térmico	126
Introdução	126
Fisiologia da termorregulação	127
Mecanismos termorregulatórios em climas quentes	127
Mecanismos de troca de calor	128
Trocas de calor entre o corpo e o ambiente	128
Índices de carga térmica	137
Psicrometria	144
Introdução	144
Propriedades termodinâmicas do ar úmido	144
Renovação do ar ambiente	151
Requisitos de ventilação	151
Cálculo da carga calórica	159
Exemplos de aplicação	168
Reposição de ar ambiente e recirculação	175

Ventilação geral diluidora	176
Introdução	176
Utilização de ventilação geral diluidora	177
Comportamento de gases e vapores	177
Taxa de ventilação	178
Ventilação diluidora para misturas de substâncias	181
Taxa de alteração da concentração de uma substância em um ambiente ventilado	181

Capítulo 6 VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA

Introdução	189
Captorez	190
Classificação dos captorez	190
Requisitoz de vazão dos diversoz tipoz de captorez	192
Dimensionamento de captorez	198
Sistema de dutoz	205
Dimensionamento de dutoz	205
Perda de carga em trechoz retoz	206
Perda de carga em expansõez	207
Perda de carga em contrações	215
Perda de carga em cotoveloz	215
Perda de carga em junções	218
Perda de carga em outroz singularidadez	218
Ventilação de processoz, operaçãoz e equipamentoz industriaiz	227
Introdução	227
Ventilação – casoz especializ	228
Introdução	228
Ventilação de processoz quentez	228
Ventilação tipo sopro-exaustão	238
Exercícioz de aplicação	242
Ventilação de operaçãoz de transporte e manipulação de material fragmentado	248
Introdução	248
Vazão de ar induzido	249
Comentárioz sobre a teoria apresentada	257
Exercícioz de aplicação	258
Ventilação de tanquez	261
Sistemaz de baixa vazão e alta pressão	276
Ventiladorez	278
Introdução	278
Principaiz tipoz – vantagemz e desvantagemz	279
Leiz dos ventiladorez	282
Teste de ventiladorez	285
O sistema e sua resistência	285
Consideraçõez iniciais	285
Variação da resistência do sistema com a vazão	286
Conjunto sistema-ventilador	287
A influência do tipo de ventilador em sua curva característica	288
Controle de vazõez	294
Ventiladorez em série e em paralelo	296
Utilização de ventiladorez em série	296
Utilização de ventiladorez em paralelo	296
Efeitoz dos parâmetroz intervenientez	298
Escolha de ventiladorez	301

Instalação, operação e manutenção de ventiladores	303
Exercícios de aplicação	305
Balanceamento de sistemas de ventilação local exaustora	306
Introdução	306
Métodos de balanceamento	307
Método de balanceamento estático	307
Balanceamento com registros	308
Balanceamento com plenum	309
Considerações sobre os três métodos de balanceamento	310
Exercício de aplicação	311
→ Capítulo 7 ESCOLHA DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE	
Introdução	337
Estado físico do poluente	337
Grau de limpeza desejado	337
Propriedades do gás carreador	338
Propriedades do contaminante	339
Custo do sistema	344
↔ Equipamentos de controle de partículas	346
Coletores gravitacionais	346
Princípio de funcionamento	346
Classificação	346
Características gerais	347
Fatores que afetam a utilização e o rendimento de coleta	347
Principais utilizações	348
Coletores inerciais	348
Princípio de funcionamento	348
Características gerais	348
Fatores que afetam a utilização e o rendimento de coleta	348
Principais utilizações	349
Coletores sônicos	349
Princípio de funcionamento	349
Classificação	350
Características gerais	350
Precipitadores térmicos	351
Princípio de funcionamento	351
Características principais	352
Fatores que influenciam a utilização e a eficiência de coleta	352
Principais utilizações	352
Coletores centrífugos	352
Princípio de funcionamento	352
Classificação	353
Teoria e principais equações	354
Características gerais	354
Fatores que afetam a utilização e o rendimento de coleta	357
Principais utilizações	358
Coletores úmidos	359
Princípio de funcionamento	359
Classificação	359
Características gerais	359
Fatores que afetam a utilização e o rendimento de coleta	369
Principais usos	369

Filtros	369
Princípio de funcionamento	369
Classificação	370
Teoria e principais equações	370
Características gerais	370
Materiais utilizados	376
Métodos de limpeza	376
Fatores que afetam a utilização e a eficiência de filtros de tecido	377
Principais utilizações	377
Precipitadores eletrostáticos	377
Princípio de funcionamento	377
Classificação	378
Características principais	378
Fatores que afetam a utilização	378
Efeito de resistividade elétrica	379
Vantagens e desvantagens	381
Principais utilizações	381
* Controle de gases e vapores	381
Introdução	381
Absorção de gases e vapores	381
Princípios	381
Torres de enchimento	382
Torres de prato	383
Torres de "spray" e absorvedores tipo ventúri	385
Adsorção	386
Incineração de resíduos gasosos	389
Introdução	389
Tipos principais	392
Vantagens e limitações de pós-queimadores catalíticos	396
Controle de vapores através de condensação	397
Condensadores de superfície	398
Condensadores de mistura	398
Vantagens e desvantagens dos dois tipos de condensadores	398
Utilização de condensadores	399

Capítulo 8 VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

Introdução	401
Medidores de velocidade e de vazão	401
Espirômetro	401
Gasômetros úmido e seco	403
Medidores de turbina	403
Medidores de bolha de sabão	403
Rotâmetros	404
Tubo de Pitot	406
Medidor de orifício	411
Medidor ventúri	413
Medidor de boquilha	414
Anemômetro rotatório	415
Velômetros	415
Termoanemômetro	416
Outros medidores	417

Verificação propriamente dita	417
Introdução	417
Verificação de sistemas de ventilação local exaustora	417
Exemplo de verificação de um sistema de ventilação local exaustora	418

APÊNDICE

Outros dados e informações técnicas	421
Abreviações empregadas	435
Referências bibliográficas	441

1 VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

INTRODUÇÃO

A ventilação de operações, processos e equipamentos, dos quais emanam contaminantes, tem se tornado, mais modernamente, uma importante ferramenta no campo do controle da poluição do ar. O controle adequado da poluição do ar tem início com uma adequada ventilação das operações e processos poluidores da atmosfera, seguindo-se uma escolha adequada de um equipamento para a coleta dos poluentes captados pelo sistema de ventilação. A ventilação tem sido utilizada tradicionalmente no campo da higiene do trabalho não só para evitar a dispersão de contaminantes no ambiente industrial como também para promover a diluição das concentrações de poluentes e para a manutenção e promoção de conforto térmico. Em qualquer dos campos de utilização, a importância da ventilação industrial é de grande amplitude, e seus conceitos básicos devem ser bem conhecidos e sedimentados para possibilitar sua adequada utilização.

CONTROLE DE RISCOS AMBIENTAIS

INTRODUÇÃO

O controle de riscos de doenças profissionais é, basicamente, uma função conjunta da engenharia e da medicina. O reconhecimento da existência de doenças atribuíveis ao ambiente de trabalho, o exercício da supervisão médica e o início de estudos para prevenir e erradicar as condições perigosas, são ações pertinentes aos médicos e seus colaboradores; aos engenheiros e seus colaboradores cabem o reconhecimento preliminar dos ambientes de trabalho, a avaliação dos riscos, a indicação e o projeto dos métodos e equipamentos para o controle dos riscos, e a supervisão periódica da eficiência dos mesmos.

É essencial, portanto, que os diferentes profissionais responsáveis pelo controle dos riscos compreendam claramente as funções dos outros, e que encontrem a solução dos problemas de higiene do trabalho num esforço unido, cooperando entre si em toda amplitude possível.

OS SERVIÇOS MÉDICOS NO CONTROLE DE RISCOS — OBJETIVOS, FUNÇÕES E PROCEDIMENTOS EMPREGADOS

Objetivando a promoção da saúde e bem-estar físico dos trabalhadores, os serviços médicos devem atuar nos seguintes setores:

- a) prevenção das doenças ocupacionais, estabelecendo uma supervisão médica adequada dos materiais e procedimentos utilizados, do ambiente de trabalho e de seus trabalhadores;
- b) conservação da saúde dos trabalhadores, por meio da supervisão física e da educação;
- c) restabelecimento da saúde e da capacidade produtiva dos trabalhadores, após os acidentes ou doenças profissionais, através de cuidados médico-cirúrgicos.

Toda e qualquer indústria, por menor que seja, deve e pode prover-se de serviços médicos adequados, como já se tem demonstrado, em forma definitiva, em muitos países, através de procedimentos cooperativistas, onde um conjunto de indústrias pequenas pode pôr-se em condições para empregar um ou mais médicos, ou para contar com os préstimos de um grupo de médicos na comunidade, num plano de turnos de serviços.

Sem essa organização e supervisão médicas, há perdas adicionais de tempo por lesões acidentais, aumentam-se os encargos pelas compensações médicas, e a indústria, por si mesma, carece da supervisão e dos conselhos que lhe permitiriam implantar medidas adequadas para a conservação da saúde de seus empregados. Evidentemente, a intensidade e a extensão de um serviço médico dependerão principalmente do tipo de indústria e do número de trabalhadores da mesma, senão, quando, inclusive, de sua localização, como acontece em comunidades isoladas onde pode ser necessário estabelecer serviços médicos e hospitalares suficientemente completos, para atenção dos trabalhadores e de suas famílias.

O controle de riscos realizado por um serviço médico é atualizado através da prevenção e do tratamento das incapacidades ocupacionais e não-ocupacionais, e de investigações dos riscos ocupacionais da saúde. Esses serviços são mais adequadamente prestados quando o departamento médico está subordinado diretamente à gerência. Apresentamos a seguir os procedimentos que devem ser empregados pelos serviços médicos.

Exames médicos sistemáticos

No passado, e ainda hoje em alguns casos, os exames médicos sistemáticos, tanto de admissão como periódicos, verificavam-se a pedido dos patrões, como uma precaução contra litígios por indenizações e como um meio de reduzir os prêmios de seguros. Por outro lado, as organizações de trabalhadores têm insistido na adoção de estipulações contratuais ou de leis que protejam os trabalhadores contra o uso injusto de exames, mas tem sido esquecido o valor destes para a saúde do trabalhador. O objeto dos exames de admissão e periódicos é, antes de tudo, a utilização de cada trabalhador disponível.

EXAMES DE ADMISSÃO AO TRABALHO

Esses exames são básicos para conservar a saúde do trabalhador. Um dos objetivos importantes é a colocação adequada do trabalhador e, por essa razão, o médico examinador procede com maior acerto quando está bem familiarizado com a indústria a que serve e com os riscos inerentes; o médico obtém

tal familiaridade pela inspeção periódica do estabelecimento industrial, inspeção que também lhe serve para determinar as condições perigosas da atividade que possam necessitar correção.

Através da seleção médica dos candidatos a emprego, protege-se a saúde e a segurança dos empregados, excluindo-se os portadores de doenças contagiosas, de doenças mentais e de doenças e lesões de incapacidade. Esses exames devem incluir aspectos como a história clínica do trabalhador e de sua família (anamnese geral) e a história ocupacional (anamnese profissional); esta última é extremamente importante, pois pode proporcionar uma idéia da condição física atual do trabalhador, que pode ter sido danificada por trabalhos perigosos anteriores.

Além do exame físico geral, devem ser realizados exames físicos especiais, particularmente visão, audição, aparelho cardiovascular, hérnias, varizes, força muscular e defeitos físicos; os exames subsidiários (radiológicos, sorológicos e outros) e as provas de capacidade funcional completam a etapa dos exames clínicos à admissão do trabalhador em determinada atividade.

EXAMES PERIÓDICOS

O propósito dos exames periódicos é ajudar a conservar a saúde do trabalhador, assegurando que sua condição física é compatível com as exigências do trabalho; por essas razões, devem ser praticados com suficiente amplitude e freqüência, para que permitam o reconhecimento precoce de uma doença, enquanto se encontra em seu estado incipiente. Para os trabalhadores não-expostos a situações perigosas, é suficiente um exame físico anual. Por outro lado, há muitas operações e exposições industriais que exigem exames mais freqüentes. Ainda que a freqüência desses exames dependa, em grande parte, do critério médico examinador, que, supõe-se, tem um conhecimento completo das condições e exposições da indústria, certas experiências têm conduzido a uma prática uniforme no aspecto dos exames físicos para trabalhadores expostos a substâncias tóxicas.

EXAMES EVENTUAIS

Exames médicos para a concessão de licenças, transferências de serviço, volta ao trabalho após ausência prolongada, etc.

Assistência médica

O tratamento dos casos de emergência de incapacidades ocupacionais é uma função básica do serviço médico, e o tratamento de casos de ambulatórios, que não são de emergência, pode ficar total ou parcialmente a seu cargo, dependendo de vários fatores. Somente em circunstâncias excepcionais justifica-se a cirurgia maior como uma das funções do serviço médico, ainda que o médico da indústria deva manter um íntimo contato com os operários que a sofram.

Outra função básica do serviço médico é o tratamento dos casos de emergência de incapacidades não-ocupacionais, ainda que, como nos casos de emergência de doenças, a amplitude dos cuidados para enfermos não-ocupacionais varie muito de uma indústria para outra. Facilidades de hospitalização

e encaminhamento a especialistas, visitas domiciliares e assistência médica à família dos trabalhadores devem ser, também, funções de serviço médico.

Higiene dos locais, materiais, métodos e condições de trabalho

Ainda que o controle de prevenção das doenças ocupacionais seja primordialmente uma função de engenharia, o serviço médico desempenha um papel importante na questão. A administração da indústria deve consultá-lo com respeito à introdução de novos materiais ou procedimentos, ou sobre alterações importantes no ambiente da fábrica. Também deve verificar se estão sendo feitas inspeções periódicas sobre os materiais e processos potencialmente perigosos, e se na indústria existe uma comissão de saúde e segurança. Tal serviço deve tomar parte dela e ajudar na prevenção dos riscos ocupacionais, pela análise dos registros de incapacidade e pelo estudo dos casos comprovados ou suspeitos de incapacidades ocupacionais.

Educação sanitária

Com base nos dados das avaliações individuais de saúde, o departamento médico deve promover no indivíduo uma verdadeira compreensão de seu estado de saúde, fazendo com que encare seus aspectos débeis e fortes, estimulando-o para que melhore sua condição geral. Deve-se aconselhar o trabalhador sobre suas necessidades de nutrição, descanso, recreio e limpeza pessoal e estimulá-lo na adoção de atitudes ou hábitos, relacionados com suas outras atividades diárias, que favoreçam um estado ótimo de saúde.

Uma ótima condição para desenvolver a prática de educação sanitária é quando o trabalhador está enfermo, porquanto se encontra numa atitude receptiva para reter as boas práticas sanitárias.

MEDIDAS DE ENGENHARIA DE PREVENÇÃO E PROTEÇÃO CONTRA DOENÇAS PROFISSIONAIS

Avaliando os riscos e contando com informações sobre a toxicidade dos materiais que estão sendo manipulados, o engenheiro está apto a implantar medidas de prevenção e proteção contra as doenças profissionais. Não existem regras pré-estabelecidas para a indicação das medidas ou dos métodos que devem ser estabelecidos para controlar os riscos sanitários industriais; as condições específicas de cada indústria determinam o tipo de proteção a ser empregado. De um modo geral, esses métodos visam à eliminação do agente nocivo ou redução de sua intensidade e/ou quantidade, a prevenção da dispersão do agente nocivo e a proteção do trabalhador. O controle de um agente nocivo raramente é efetuado através de uma única medida; ele usualmente envolve a utilização de uma combinação de métodos ou medidas.

Apresentamos a seguir os princípios básicos mais importantes para prevenir e proteger os trabalhadores dos riscos industriais.

Adequado projeto, construção e manutenção da maquinaria e equipamentos industriais

Obviamente a mais satisfatória medida de controle de riscos de doenças profissionais consiste na adoção de medidas preventivas no próprio projeto

e construção da maquinaria e equipamentos industriais. Muitos equipamentos de controle instalados em máquinas "não-preparadas", mesmo que cuidadosamente projetados, são paliativos e têm todos os defeitos de uma adaptação. Provavelmente o modo mais interessante de melhorar os ambientes de trabalho consista na educação dos fabricantes de máquinas e equipamentos industriais, de tal forma que, pelo menos os elementos básicos de controle e de prevenção de agentes nocivos estejam incluídos como parte integrante de cada máquina ou equipamento que conhecidamente acarretam riscos para a saúde e segurança dos operários. Do mesmo modo que não se vende um automóvel sem faróis, buzina, limpador de pára-brisas, etc., porque o mesmo não pode ser utilizado sem esses acessórios, não se justifica a colocação à venda de uma máquina que possa causar riscos ao trabalhador. Felizmente, hoje em dia, muitas novas indústrias têm se instalado visando à proteção do trabalhador. Algumas indústrias já existentes também estão, embora vagarosamente, mecanizando e modernizando suas instalações, para aumentar a produção, eliminar trabalhos árduos, e reduzir os riscos de doenças e acidentes profissionais.

A manutenção da maquinaria ou equipamentos é tão importante quanto seu projeto e construção. Deterioração, desgaste, corrosão, abrasão e choque resultam em operação deficiente, e se devem a uma inadequada manutenção.

Substituição de materiais nocivos por outros menos nocivos ou inócuos

Na realidade, todo e qualquer material pode ser manipulado com segurança, independentemente do risco que represente. Uma prova concludente dessa afirmativa são as atividades que utilizam energia atômica com segurança, para as mais variadas finalidades.

Entretanto, quando é possível, o método mais simples e recomendável para eliminar-se um risco químico é substituir uma substância tóxica por uma atóxica ou menos tóxica. A possibilidade de substituição deve ser o primeiro princípio de controle considerado, para evitar que se instalem medidas de controle mais elaboradas e desnecessariamente custosas. Evidentemente esse método tem limitações, devido a dificuldades técnico-industriais (utilização de sulfeto de carbono no processo de fabricação de raíom-viscose), interesses econômicos, e algumas vezes devido a rotinas e preconceitos. Entre outros, podemos citar os seguintes exemplos onde esse método foi aplicado satisfatoriamente:

- a) substituição do carbonato básico de chumbo, nos trabalhos de pintura, pelos compostos de titânio e zinco, como óxido de zinco, dióxido de titânio e litopônio (mistura de sulfato de bário e sulfeto de zinco);
- b) substituição do benzeno como diluente, na indústria, por tolueno, gasolina e outros derivados do petróleo;
- c) substituição do nitrato de mercúrio, na feltragem de peles, por sulfato de sódio e peróxido de hidrogênio;
- d) utilização, em fundições, de granalhas de aço substituindo o jato de areia;
- e) utilização de abrasivos artificiais, ao invés de pedras naturais que desprendem pó de sílica.

Modificação de processos e métodos de trabalho

Se um risco não pode ser controlado pela substituição dos materiais, esse objetivo pode ser possível modificando-se o procedimento ou o sistema de operação. A substituição de métodos manuais por métodos mecanizados pode resultar na eliminação de um risco, como sucedeu nas fábricas de baterias, no ajuste mecânico da pasta de óxido de chumbo para a manufatura das placas; quando a operação era manual, o excesso caía e, depois de seco, produzia poeira de óxido de chumbo.

Entretanto é necessário advertir que, em alguns casos, a mecanização pode agravar uma condição perigosa. Por exemplo, a poeira que se cria na condução mecânica de materiais é geralmente mais intensa que a produzida por métodos manuais e, da mesma forma, a vibração mecânica dos "vazados" de fundições produz muito mais poeira que a vibração manual.

Podemos citar ainda como outro exemplo da aplicação desse método, a redução de evaporação de solventes nos tanques de desengraxamento, mediante regulagem da temperatura do banho, método de imersão e emersão das peças e proteção contra correntes de ar.

Ao se modificar um método de fabricação, a eliminação de um risco pode provocar o surgimento de um outro. Assim, exemplificando, a substituição da operação de remanchar pela soldadura eliminou um problema de ruídos, mas deu lugar à exposição de gases tóxicos.

Umectação

A umectação de poeiras com água é provavelmente o mais antigo método de controle. Ele foi utilizado na indústria cerâmica inglesa há 250 anos. A eficiência desse método depende de dois fatores: do umedecimento da poeira e de sua adequada disposição depois de molhada. Mesmo que a poeira seja molhável, é necessário coletar e dispor o material úmido antes que o líquido evapore e a poeira seja novamente dispersa pelas correntes de ar, ou outras causas.

Como aplicações clássicas desse método, podemos citar a utilização de água nas operações de perfuração em minas, e a aspersão de água sobre as mandíbulas de britadores; neste último caso, devido ao tipo de operação, devem-se praticar observações para que haja segurança de que se logrou um controle adequado, uma vez que as gotículas expelidas para o ar podem conter poeiras. Nas fiações e tecelagens, por imposição tecnológica, a umidade relativa do ar ambiente deve ser mantida entre 60 e 70% para que o fio não arrebente. Ocasionalmente há o perigo de explosão, devido à eletricidade estática; a umidificação do ambiente evita isso, pois as partículas finas de algodão, adquirindo peso, devido à umidade, precipitam mais rapidamente.

Enclausuramento

O enclausuramento é um princípio de controle muito importante. Muitas operações podem ser enclausuradas ou encerradas, impedindo, portanto, o escape dos poluentes. A trituração, a moagem e o peneiramento são operações pulverulentas suscetíveis de encerramento e, da mesma forma, podem-se enclausurar os condutores de materiais, apesar de isso resultar algumas vezes em

elevados custos. A limpeza de peças com jato de areia é outra operação suscetível de encerramento.

É freqüente, em indústrias, tanques destampados contendo solventes orgânicos, que são bastante voláteis e podem rapidamente formar concentrações perigosas no ambiente — como, por exemplo, tetracloreto de carbono, contidos em recipientes pequenos destampados. É verdade que, devido a constante manipulação, alguns tanques não podem estar cobertos; contudo muitos deles poderiam estar tampados a maior parte do tempo, senão a totalidade.

O enclausuramento não é utilizado com a freqüência que deveria, em particular por erros de desenho ou projeto. Quando se empregam tampas móveis, deve-se considerar o elemento humano. Por indiferença, maldade ou falta de entendimento, não se pode ter a segurança de que as tampas sejam recolocadas; a instalação de coberturas auto-selantes, ou dispositivos similares, pode apresentar resultados satisfatórios.

Isolamento

Muitas indústrias têm operações que produzem considerável poluição do ambiente de trabalho, porém requerem atenção imediata de apenas um pequeno número de trabalhadores. Se localizada indiscriminadamente dentro da fábrica ou se efetuada em certos horários, tais operações expõem desnecessariamente muitos outros trabalhadores a uma quantidade de poluentes. Segregando ou isolando essas operações, somente alguns trabalhadores estariam expostos, os quais poderiam ser protegidos por medidas complementares.

Por exemplo, com freqüência, pode-se instalar uma trituradora num edifício separado ou num andar diferente daquele onde trabalham os operários; dessa forma, ninguém é exposto à poeira, exceto o operário encarregado de comprovar sua operação, que teria exposições breves e intermitentes.

O princípio do isolamento também se verifica quando algumas operações excessivamente poluidoras são efetuadas fora de turnos; como exemplo, temos a recuperação das areias de fundição por peneiramento fora do horário de trabalho. Outro exemplo é a varredura dos locais de trabalho, que deveria ser feita no fim do período de trabalho. Nas indústrias onde o piso deve ser mantido limpo, pode-se proceder a essa limpeza com aspiradores.

Equipamentos individuais de proteção

Entre os elementos e equipamentos individuais de proteção encontramos alguns que são empregados por motivos de segurança do trabalho, ou seja, têm o objetivo de prevenir acidentes, e outros cujo objetivo é prevenir doenças profissionais, isto é, são usados por motivos de higiene do trabalho. No primeiro grupo, cujo objetivo é a segurança, encontramos as seguintes categorias:

- vestuário protetor;
- protetores dos órgãos visuais.

Os elementos para a prevenção de doenças profissionais podem ser divididos como segue:

- protetores das vias respiratórias;
- protetores dos ouvidos;
- luvas e cremes protetores.

Sob o aspecto de higiene industrial, os equipamentos individuais de proteção devem ser considerados como um recurso defensivo de ordem secundária, cuja utilização jamais poderá ter preferência sobre o emprego das medidas de proteção coletiva; eles constituem a última linha de defesa e podem, a rigor, ser renunciados. Contudo, onde deveriam ser usados, como deveriam ser selecionados, e como deveriam ser utilizados e mantidos, é compreendido adequadamente somente por um pequeno número de técnicos. Devido a seu relativo baixo custo, quando comparado com a maioria das outras medidas de controle, e pelo fato de poderem ser empregados de imediato, encontram uso abusivo.

Ordem, limpeza e conservação

Além da importância que têm por si mesmo como recursos preventivos, a ordem, a limpeza e a conservação dos locais, máquinas e equipamentos constituem a base geral indispensável ao rendimento eficiente dos métodos descritos, e a prática tem demonstrado que dão, na maioria das indústrias, um bom índice do programa de higiene do trabalho.

Uma boa ordem, limpeza e conservação, significa limpeza dos pisos, das máquinas e de quaisquer superfícies horizontais, prevenção de depósitos para materiais nocivos e de métodos adequados a seu transporte e emprego, conservação da maquinaria para impedir vibrações desnecessárias ou escapes de material, disposição das operações de modo a limitar o número de operários expostos a um risco, e a aplicação de métodos de limpeza que, por si mesmos, não provoquem a agitação de grandes concentrações de poeira.

A execução de um programa de ordem, limpeza e conservação da planta requer um planejamento cuidadoso e um esforço contínuo e regular, unido a atividades educativas, para lograr a cooperação de cada trabalhador.

Ventilação

Por fim, a ventilação de processos e operações que emitem contaminantes e a ventilação de ambientes em geral constituem um dos mais importantes métodos de controle, e sua apresentação representa o principal objetivo deste trabalho. Consiste na movimentação do ar por meios naturais ou mecânicos, quer introduzindo-o num ambiente (insuflação), quer retirando-o desse ambiente (exaustão).

O ar entra e sai continuamente de todo recinto ou edifício através das portas, janelas, fendas e outras aberturas. Se essa troca de ar é causada por condições naturais, diz-se que a ventilação é natural; se é efetuada por ventiladores ou outros meios mecânicos, a ventilação é chamada de mecânica ou artificial. Dentro de recintos e edifícios, o ar é mantido em circulação por diferenças de pressão, diferenças de temperatura, pela movimentação dos ocupantes e equipamentos, e/ou por ventiladores.

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

ASPECTOS GERAIS

A importância da presença do ar em todos os ambientes de trabalho está além de sua conhecida, mas esquecida, importância como fonte de oxigênio

para o metabolismo do homem. Inicialmente o ar é o elemento que, de maneira contínua e permanente, independentemente de meios artificiais, mantém o contato direto entre o ambiente ocupacional e o meio ambiente geral. Contendo vapor d'água e estabelecendo a temperatura natural do ambiente, é responsável pela sensação de conforto térmico; sendo o meio material de propagação das ondas sonoras, tem sua importância no conforto acústico; é um veículo que transporta as impurezas nele suspensas e dispersas até as vias de penetração e absorção do organismo; transporta essas mesmas impurezas do ambiente externo ao ocupacional e vice-versa.

Devido a esses fatos, sua movimentação no ambiente de trabalho, conhecida como ventilação, quer provocada por meios naturais, quer por meios artificiais, deve ser criteriosamente planejada, executada e alterada quando necessário, a fim de que sejam prevenidos danos à saúde, segurança e bem-estar dos trabalhadores, e inclusive danos à propriedade. Essa movimentação do ar entre dois pontos, por meios naturais ou mecânicos, processa-se pelo estabelecimento de uma diferença de pressão entre os dois pontos.

Evidentemente o ar pode ser condicionado artificialmente. Segundo definição da American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE. "ar condicionado é o processo de tratamento do ar de modo a controlar simultaneamente a temperatura, a umidade, a pureza e a distribuição, para atender as necessidades do recinto condicionado", ocupado ou não pelo homem. As aplicações do ar condicionado são inúmeras, podendo ser citadas, entre outras, as seguintes:

- a) processos de fabricação de certos produtos que devem ser feitos em recintos com umidade, temperatura e pureza controladas; por exemplo, fabricação de produtos farmacêuticos, impressão de cores, salas de desenho de precisão, etc.;
- b) conforto do indivíduo e produtividade;
- c) hospitais — salas de operação e de recuperação, quartos para tratamento de doentes alérgicos.

CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

Silas Fonseca classifica os sistemas de ventilação, segundo as principais finalidades a que se destinam, conforme segue.

Ventilação geral (por insuflação, por exaustão, ou por insuflação-exaustão)

VENTILAÇÃO PARA MANUTENÇÃO DO CONFORTO E EFICIÊNCIA DO HOMEM

É conseguida através:

- a) do restabelecimento das condições atmosféricas alteradas pela presença do homem;
- b) da refrigeração do ar ou do homem;
- c) do aquecimento do ar no inverno.

CONSEP - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

VENTILAÇÃO PARA MANUTENÇÃO DA SAÚDE E SEGURANÇA DO HOMEM

É conseguida através:

a) da redução da concentração de aerodispersóides nocivos até que baixe a valores compatíveis com a saúde;

b) da manutenção da concentração de gases, vapores e poeiras, inflamáveis ou explosivos, fora das faixas de inflamabilidade ou de explosão.

VENTILAÇÃO PARA CONSERVAÇÃO DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS (POR IMPOSIÇÃO TECNOLÓGICA)

Ventilação local (por exaustão do ar, junto à fonte de produção de um poluente nocivo à saúde, antes de sua dispersão na atmosfera ambiente)

A ventilação local visa, basicamente, à manutenção da saúde e da segurança do trabalhador, embora tenha influência, até certo ponto, nas condições relacionadas a seu conforto e eficiência.

NECESSIDADES HUMANAS DE VENTILAÇÃO

A ventilação de residências, espaços comerciais e escritórios, é necessária para controlar odores corporais, fumaça de cigarro, odores de cozinha e outras impurezas odoríferas, e não para manter a quantidade necessária de oxigênio ou remover o dióxido de carbono produzido pela respiração. Isso é verdadeiro, pois a construção-padrão de edifícios para ocupação humana não pode prevenir a infiltração ou a saída de substâncias e de quantidades de ar, mesmo quando todas as janelas, portas e aberturas no forro estiverem fechadas. Dados publicados sobre as quantidades de ar normalmente disponíveis pela ventilação natural ou infiltração indicam que a sufocação por deficiência de oxigênio ou excesso de gás carbônico, como resultantes da respiração humana, é potencialmente impossível em construções não-subterrâneas.

Composição do ar

A composição aproximada do ar sob três diferentes condições é dada na Tab. 1.1. Simples cálculos, demonstrarão que o homem não requer mais do que algumas centenas de pés cúbicos de ar por hora para satisfazer suas demandas de oxigênio e diluir o dióxido de carbono em concentrações não-nocivas. Um homem, mesmo em trabalhos pesados, respira cerca de 40 litros de ar por minuto, consome cerca de 2 litros de oxigênio, e produz cerca de 1,7 litros de dióxido de carbono.

Mackey oferece uma interessante hipótese sobre as alterações físicas e químicas que ocorrem com o ar interno num ambiente, como resultado da ocupação humana, como segue. Um adulto em repouso usa, em um minuto, cerca de 240 ml de oxigênio e produz cerca de 200 ml de dióxido de carbono. A 70 °F, ele perde, em uma hora, cerca de 300 Btu de calor sensível e 0,1 libras de vapor d'água. Admitindo, para simplificação, que essas taxas permaneçam constantes (o que não acontece na realidade), se um adulto estiver confinado

TABELA 1.1 Composição do ar (porcentagem em volume)

Componente	Ar externo (seco)	Ar interno (21 °C, U. R. 50%)	Ar expirado (36 °C, U. R. 100%)
Gases inertes	79,00	78,00	75,00
Oxigênio	20,97	20,69	16,00
Vapor d'água	0,00	1,25	5,00
Dióxido de carbono	0,03	0,06	4,00

a um ambiente completamente vedado e termicamente isolado, com 1 000 pés³ de volume, inicialmente a 70 °F (ignorando-se a umidade), a temperatura aumentará para 100 °F, em menos de duas horas, enquanto que serão necessárias 75 h para reduzir o oxigênio para 16% e aumentar o dióxido de carbono para 5%. Nesse caso extremo, a alteração física é mais perigosa do que a alteração química.

O dióxido de carbono como um índice das necessidades de ventilação

Experiências já há muito realizadas (1963) concluíram que a concentração de dióxido de carbono no ar de ambientes ocupados não é um índice adequado das necessidades de ventilação, sob o ponto de vista de suprimento de ar exterior e intensidade de odor.

TABELA 1.2 Quantidades recomendadas de ar externo por pessoa no ambiente

Ar externo (pés ³ /min-pessoa)	Tipo de espaço ou ocupação
5-10	Bancos, auditórios, igrejas, teatros, grandes lojas, espaços onde não se fuma, etc.
10-15	Apartamentos, barbearias, institutos de beleza, quartos de hotel, espaços onde se fuma pouco
15-20	Lanchonetes, restaurantes, quartos de hospitais, espaços onde se fuma moderadamente
20-30	Bares, escritórios privados, espaços onde se fuma bastante
30-60	Salas de reuniões, boates, espaços onde se fuma demasiadamente

Efeito do tamanho do ambiente ocupado em função das necessidades de ventilação

Grandes salas têm uma vantagem sobre as pequenas, pois agem como reservatórios, permitindo que os odores do corpo desapareçam com um mínimo suprimento de ar exterior e que haja máxima eficiência de ventilação. Uma pequena sala requererá um maior suprimento de ar por pessoa, para controle de odores. A Tab. 1.3 apresenta as necessidades de ar para diluição de odores corporais, mostrando o que foi anteriormente mencionado.

TABELA 1.3 Necessidades de ar externo para diluição de odores corporais

Volume do espaço (pés ³ /pessoa)	Suprimento de ar exterior (pés ³ /min-pessoa)	Tipo de ocupante
100	29	Escolas de crianças
100	25	Adultos sedentários
200	21	Escolas de crianças
200	16	Adultos sedentários
300	17	Escolas de crianças
300	12	Adultos sedentários
500	11	Escolas de crianças
500	7	Adultos sedentários

2 PRINCÍPIOS DE MECÂNICA DOS FLUIDOS APLICADOS À VENTILAÇÃO INDUSTRIAL

INTRODUÇÃO

Um corpo qualquer pode ser classificado como rígido e não-rígido. Entre os rígidos, temos os sólidos e, entre os não-rígidos, temos os sólidos elásticos e os fluidos. Em ventilação industrial, estaremos lidando com gases (muitas vezes, o ar atmosférico), os quais são corpos fluidos. Por esse motivo, convém que os princípios físicos de interesse para a ventilação industrial que governam os movimentos e transformações desses fluidos sejam aqui recordados.

ESFORÇOS SOBRE CORPOS FLUIDOS

Os esforços que podem agir sobre um corpo qualquer são:

tração,
compressão,
cisalhamento.

Sobre os corpos fluidos gasosos o esforço de tração não pode subsistir, ocorrendo, portanto, apenas os esforços de compressão e de cisalhamento.

Pressão estática

Para corpos gasosos, o esforço externo de compressão define a proximidade entre as moléculas do gás. Em outras palavras, uma determinada massa de gás, a uma dada temperatura, ocupará um volume que é função do esforço de compressão a que está submetido. Quanto maior o esforço de compressão, menor será o volume ocupado. Um exemplo é mostrado na Fig. 2.1.

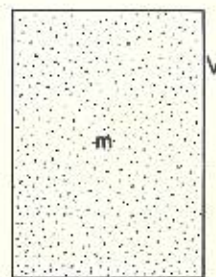


FIGURA 2.1 Cilindro contendo gás. V , volume do cilindro; m , massa do gás

Devido à grande mobilidade das moléculas do gás, este tende a ocupar um volume maior que o permitido pelo cilindro. Isso significa que as paredes do cilindro aplicam ao corpo gasoso de massa m um esforço de compressão. Na verdade, o esforço de compressão ocorre sempre, em um corpo gasoso, mesmo sem a presença do cilindro, como se observa na atmosfera.

Uma vez que um corpo gasoso está submetido sempre a um esforço de compressão, ele reage sobre todos os demais corpos que estão em contato com ele e em todas as direções. Essa reação é denominada de *pressão estática*.

Portanto a pressão estática é a força por unidade de área exercida por um gás sobre um corpo qualquer em contato com esse gás.

UNIDADES DE PRESSÃO ESTÁTICA

As unidades de pressão (unidades de esforço), força/área, são kgf/m^2 , lbf/pé^2 , etc. Devido aos manômetros de líquido utilizados para medir pressão estática, é usual utilizar-se a unidade *altura de coluna de líquido* para se expressar a pressão estática. Em ventilação industrial, altura de coluna de água é a mais utilizada. Por exemplo, se dissermos que a pressão estática do gás contido no cilindro da Fig. 2.1 é igual a 10 pol de água, estaremos querendo dizer que a força por unidade de área exercida por aquele gás é igual ao peso de uma coluna de água de 10 pol de altura.

SISTEMAS DE REFERÊNCIA

A pressão estática pode ser medida a partir do zero absoluto, ou seja, a partir do vácuo absoluto. Teríamos, então, o sistema de pressões absolutas, mostrado na Fig. 2.2.

Uma vez que os sistemas sobre os quais vamos estar interessados estão envoltos pela atmosfera, a qual também exerce pressão, é conveniente medir pressões a partir da pressão da atmosfera, ou seja, podemos utilizar a pressão atmosférica como o valor inicial do nosso sistema de referências, dando a esse ponto o valor zero. Esse é o sistema efetivo de medida de pressões, mostrado na Fig. 2.2.

Conforme se constata da Fig. 2.2, a pressão absoluta é sempre positiva, enquanto que a pressão efetiva pode ser positiva ou negativa. O sistema efetivo de pressões é particularmente conveniente para o uso de medidores de pressão (manômetros).

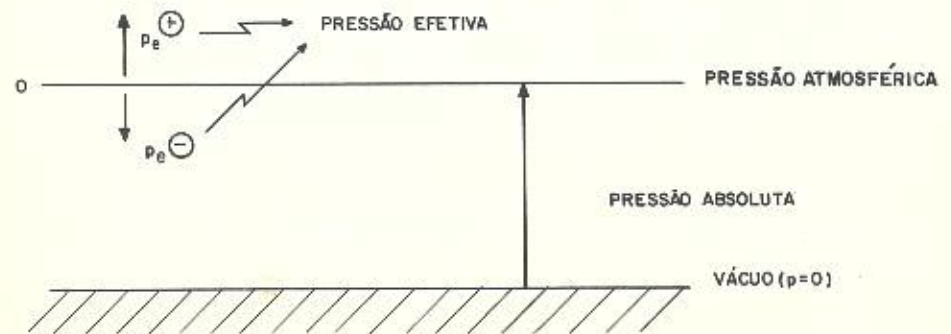


FIGURA 2.2 Sistemas de referência para medidas de pressão

Viscosidade

Devido ao esforço de cisalhamento que ocorre nos corpos fluidos, aparece o conceito de viscosidade. O esforço de cisalhamento ocorre internamente no fluido quando este é submetido a um esforço tangencial externo. A Fig. 2.3 mostra, esquematicamente, o que ocorre quando um corpo fluido é submetido a um esforço tangencial externo.

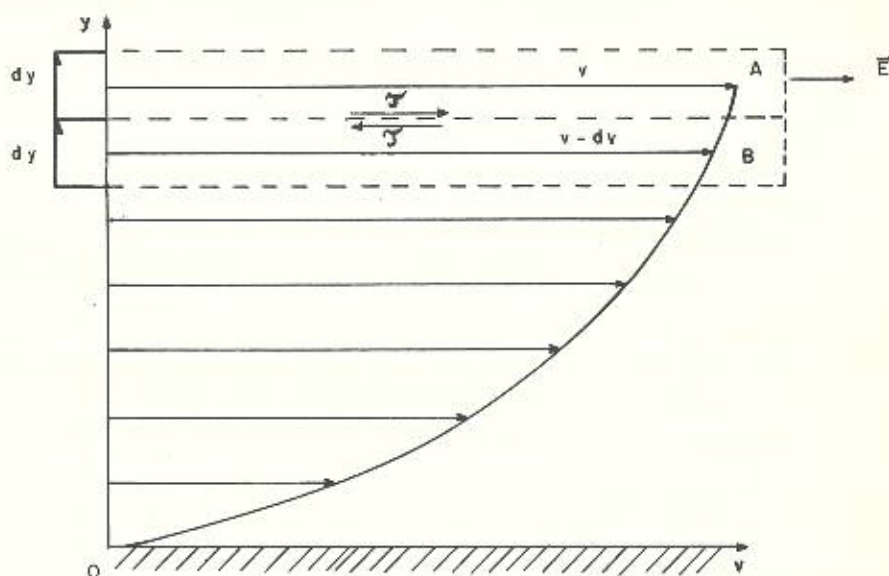


FIGURA 2.3 Variação de velocidade em um corpo fluido

Se, na camada de fluido A, de espessura elementar dy , aplicarmos um esforço externo tangencial \vec{E} , o fluido fará uma concessão em termos de movimento (característica dos corpos fluidos); em outras palavras, a camada elementar A adquirirá uma velocidade v . Esse movimento será transmitido às camadas adjacentes na direção y , isso indica que há esforços agindo nas superfícies de contato de camadas adjacentes. Esses esforços são os esforços internos de cisalhamento, τ . A velocidade transmitida de uma camada para a camada adjacente não tem a mesma magnitude, isto é, a velocidade decresce à medida que nos afastamos da camada na qual o esforço externo (\vec{E}) foi aplicado, até atingir o valor zero na fronteira do corpo fluido. Na Fig. 2.3 a fronteira do corpo fluido está representada por uma superfície sólida coincidente com o eixo das velocidades.

O esforço interno de cisalhamento (τ) está relacionado com o gradiente de velocidades na direção $Y(dv/dy)$, pela Eq. (2.1), para fluidos newtonianos. Água, ar e outros gases são considerados geralmente como fluidos newtonianos,

$$\tau = k \frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

Observação. No caso de se utilizar um sistema de unidades prático, onde são definidas quatro unidades fundamentais (massa, tempo, força e comprimento),

é necessário introduzir uma constante dimensional na expressão (2.1), ou seja,

$$\tau k_d = k_p \frac{dv}{dy}, \quad (2.1a)$$

onde τ é o esforço interno de cisalhamento entre camadas adjacentes de fluido, dv/dy o gradiente de velocidades na direção de y , k_d a constante dimensional,

$$9,8 \frac{\text{kg} \times \text{m/s}^2}{\text{kgf}},$$

para o sistema métrico, e

$$32,2 \frac{\text{lbn} \times \text{pé/s}^2}{\text{lbf}},$$

para o sistema inglês, e k_p a constante de proporcionalidade. A constante de proporcionalidade é chamada de coeficiente de viscosidade ou, simplesmente, viscosidade.

VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE COM A TEMPERATURA E A PRESSÃO

O esforço de cisalhamento entre camadas e, portanto, a viscosidade, é decorrente de dois fenômenos:

forças de adesão intermoleculares;

transferência de momento entre camadas adjacentes, devido ao movimento molecular perpendicular à direção do movimento.

Para um fluido líquido, a força de adesão intermolecular predomina sobre a transferência de momento, sendo o primeiro fenômeno, portanto, o maior responsável pelo esforço interno de cisalhamento. Uma vez que essas forças de adesão intermoleculares decrescem rapidamente com aumento de temperatura, τ decresce com aumento de temperatura. Portanto, para fluidos líquidos, a viscosidade decresce com a temperatura, uma vez que esta é diretamente proporcional ao esforço de cisalhamento, como se verifica pela Eq. (2.1).

Para fluidos gasosos, as moléculas estão bastante distantes uma das outras para que a força de adesão intermolecular tenha efeito sensível. Por outro lado, a mobilidade molecular em um gás é bem maior do que em um líquido. Portanto, para um gás, o segundo fenômeno, transferência de momento, é o maior responsável pelo esforço interno de cisalhamento. Uma vez que a movimentação molecular aumenta com o aumento de temperatura, o esforço de cisalhamento (τ) aumenta com a temperatura. Dessa forma, para fluidos gasosos, a viscosidade aumenta com um aumento de temperatura, uma vez que a viscosidade é diretamente proporcional a τ , como se verifica pela Eq. (2.1).

Para um gás, a variação de viscosidade com a temperatura pode ser dada pela equação

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left[\frac{T}{273,1} \right]^n, \quad (2.2)$$

onde μ é a viscosidade à temperatura T , μ_0 a viscosidade a 0°C , T a temperatura absoluta (em K), e n um expoente empírico ($n = 0,768$ para o ar). Para a grande maioria dos problemas práticos, podemos considerar a viscosidade invariável com a pressão, embora a viscosidade aumente levemente com o aumento de pressão.

UNIDADES DE VISCOSIDADE

Da Eq. (2.1) e utilizando o sistema CGS, temos

$$\left| \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right| = \left| \mu \right| \left| \frac{\text{cm/s}}{\text{cm}} \right|.$$

Portanto

$$|\mu| = \frac{\text{dyn} \times \text{s}}{\text{cm}^2} = \text{P}.$$

Utilizando um sistema de quatro unidades fundamentais, por exemplo, massa (lbm), força (lbf), comprimento (pés) e tempo (s), e a Eq. (2.1a),

$$\left| \frac{\text{lbf}}{\text{pé}^2} \right| \left| \frac{\text{lbm} \times \text{pé}}{\text{lbf} \times \text{s}^2} \right| = \left| \mu \right| \left| \frac{\text{pé}}{\text{s} \times \text{pé}} \right|,$$

$$|\mu| = \frac{\text{lbm}}{\text{pé} \times \text{s}}.$$

ALGUMAS DEFINIÇÕES IMPORTANTES*Densidade*

É a relação entre a massa (m) de uma substância e o volume (V) ocupado por essa massa,

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (2.3)$$

A densidade varia com a temperatura e a pressão, isto é, decresce com aumento de temperatura e aumenta com o aumento de pressão.

Peso específico

É a relação entre o peso (P) de uma substância e o volume ocupado por essa substância

$$P_e = \frac{P}{V} = \rho g, \quad (2.4)$$

sendo g a aceleração da gravidade.

Viscosidade cinemática

É a relação entre a viscosidade de uma substância em uma determinada temperatura e pressão e a densidade desta substância na mesma temperatura e pressão,

$$v = \frac{\mu}{\rho}. \quad (2.5)$$

Gravidade específica

É a relação entre a densidade de uma substância a uma determinada pressão e temperatura e a densidade da água a 4°C e 1 atm se o fluido é líquido, ou a

densidade do ar a 0 °C e 1 atm se o fluido é gasoso.

$$g_e = \frac{\rho(pT)}{\rho(4\text{ °C } 1\text{ atm})_{\text{água}}}, \quad (2.6)$$

$$g_e = \frac{\rho(pT)}{\rho(0\text{ °C } 1\text{ atm})_{\text{ar}}}. \quad (2.6a)$$

Pressão de velocidade

Quando uma certa massa de fluido está em movimento com velocidade \vec{v} , ela possui, além da energia potencial referente a sua pressão estática, uma parcela de energia cinética. Se um corpo qualquer for colocado em contato com esse fluido e em oposição ao movimento, agirá sobre sua face, além da pressão estática, também uma outra força, referente à energia cinética que o fluido tinha quando em movimento e que perdeu, uma vez que teve de parar ao encontrar a face do corpo.

A energia cinética por unidade de massa é dada por

$$E_c = \frac{v^2}{2g}. \quad (2.7)$$

Como o fluido pára ao encontrar a face do corpo, toda a energia cinética é transferida ao corpo sobre a forma de força. Uma vez que a unidade da equação anterior é de comprimento e, como vimos, podemos representar pressão com a unidade de comprimento (altura de coluna do fluido), podemos definir pressão cinética como sendo

$$p_c = \frac{v^2}{2g}, \quad (2.8)$$

onde v é a velocidade do fluido, g a aceleração da gravidade, e p_c a pressão cinética em altura de coluna do fluido que está escoando.

Observação. A pressão cinética é sempre positiva ou nula. Ao contrário da pressão estática, que se manifesta em todos os sentidos, a pressão cinética manifesta-se somente no sentido do movimento.

Pressão total

Define-se pressão total como a soma algébrica das pressões estática e cinética:

$$p_t = p_e + p_c,$$

onde p_e é a pressão estática, p_c a pressão cinética, e p_t a pressão total.

Observação. A pressão total, sendo uma soma algébrica, pode ser positiva, negativa ou nula.

TIPOS DE FLUXOS DE FLUIDOS

Um fluido em movimento pode estar em regime laminar, turbulento ou num regime de transição entre os dois mencionados. O regime laminar, como o próprio nome indica, pode ser considerado como ocorrendo em lâminas ou

camadas, entre as quais há uma variação de velocidades. É caracterizado pela ausência de variação macroscópica de velocidades em um determinado ponto do fluido. Nesse regime, os esforços de cisalhamento que ocorrem devem-se a forças viscosas. No regime turbulento, temos grande variação de velocidade em um ponto determinado do fluido. Essa variação de velocidade é resultado de redemoinhos seguidos por parcelas de fluido, além de mistura entre parcelas, o que provoca transferência de momento. Essa transferência de momento torna-se o principal fator pelo esforço de cisalhamento entre parcelas adjacentes de fluido. Em outras palavras, as forças de inércia (característica da transferência de momento) são as responsáveis pelo esforço de cisalhamento.

O regime de um fluxo de fluido é dado pelo número de Reynolds desse fluxo. O número de Reynolds é adimensional e representa a relação entre as forças de inércia e forças viscosas. A Eq. (2.9) mostra uma típica força de inércia por unidade de volume e a Eq. (2.10) mostra uma típica força viscosa por unidade de volume:

$$\text{força de inércia} = \frac{\rho v^2}{g_c L}, \quad (2.9)$$

$$\text{força viscosa} = \frac{\mu v}{g_c L^2}. \quad (2.10)$$

Logo, o número de Reynolds fica

$$\text{Re} = \frac{\text{força de inércia}}{\text{força viscosa}} = \frac{v L \rho}{\mu}, \quad (2.11)$$

onde v é a velocidade do fluido, L comprimento característico do movimento, ρ a densidade do fluido, e μ a viscosidade do fluido. Quanto maior o número de Reynolds, maior a predominância das forças de inércia e, inversamente, quanto menor Re , maior a predominância de forças viscosas. Isto é, Re determina se o movimento é laminar (predominam forças viscosas) ou turbulento (predominam forças de inércia).

Determinações práticas para condutos circulares, onde o comprimento característico do movimento é o diâmetro do duto, determinaram que, para Re menor que 2 000, o movimento é laminar e que, para Re maior que 2 500, movimento é turbulento. Entre esses dois valores, teremos o regime intermediário, ou de transição.

EQUAÇÃO DA HIDROSTÁTICA

Essa equação demonstra que a variação de pressão estática entre dois pontos quaisquer de um corpo fluido é função da diferença de cotas entre esses dois pontos.

Imaginemos que, entre as seções 1-1 e 2-2 (Fig. 2.4) temos uma parcela de fluido em repouso. Imaginemos também um eixo z arbitrário, para contagem de cotas. Na parcela de fluido entre as seções 1-1 e 2-2, tomemos um elemento cilíndrico de fluido de volume dV , ou seja, área da base (ds) e altura (dz). O peso desse elemento de fluido é dP e age na direção e no sentido indicado na Fig. 2.4. Como o fluido está em repouso entre as seções 1-1 e 2-2, também o elemento de volume dV está em repouso; logo, as forças que agem sobre esse elemento

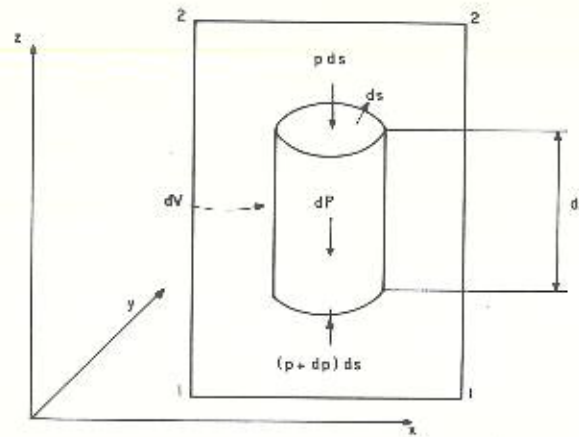


FIGURA 2.4 Variação de pressão entre dois pontos de um fluido

devem se equilibrar, ou seja, o somatório de todas as forças que agem sobre o elemento deve ser igual a zero. As forças que agem sobre o elemento são:

- dP , força-peso;
- $p ds$, pressão na base superior do cilindro multiplicada pela área da base;
- $(p + dp)ds$, pressão na base inferior do cilindro multiplicada pela área da base.

Admitamos haver uma variação de pressão (dp) entre as duas bases, que é exatamente o que queremos determinar. Logo, fazendo o somatório das forças igual a zero, temos

$$\begin{aligned}(p + dP)ds - dP - p ds &= 0, \\ p ds + dp ds - p ds &= dP, \\ dp ds = P_e dv = P_e ds dz, \\ dp &= P_e dz.\end{aligned}\tag{2.12}$$

Integrando a equação entre as seções 1-1 e 2-2, ou seja, entre a pressão p_2 reinante na seção 2-2 e a pressão p_1 reinante na seção 1-1, e as cotas z_1 e z_2 das seções 1-1 e 2-2 respectivamente, teremos

$$\int_{p_2}^{p_1} dp = \int_{z_1}^{z_2} P_e dz\tag{2.12a}$$

Para procedermos à integração, necessitamos saber como varia o peso específico (P_e) com a pressão. Para fluidos incompressíveis, P_e é constante com a variação de pressão; para fluidos compressíveis, P_e é função da pressão. Os gases são fluidos compressíveis, porém, para as variações de pressão usualmente encontradas em ventilação industrial, cerca de 20 a 30 pol H_2O , podemos admitir os gases como incompressíveis, sem grande erro e com sensível simplificação dos cálculos. Nessas condições, podemos integrar a Eq. (2.12a), lembrando que admitimos o decréscimo da pressão com aumento de z , ou seja, os limites de integração do primeiro termo da Eq. (2.12a) são de p_2 até p_1 , enquanto que os limites do segundo termo são de z_1 até z_2 .

Observação. Isso não altera a equação, pois, se houvésssemos admitido o inverso, também seria inverso o sinal da equação,

$$p_1 - p_2 = P_s(z_2 - z_1). \quad (2.13)$$

Essa equação, que é a equação da hidrostática, permite-nos calcular a variação de pressão entre dois pontos de um fluido, a qual é função do peso específico do fluido e da diferença de cotas entre os dois fluidos.

Observação. Se fizermos o mesmo tipo de análise para as direções x e y , verificaremos que a pressão não varia, nessas direções, para z constante.

EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

O movimento de um fluido em uma dada seção ficará perfeitamente determinado se conhecermos as três componentes da velocidade na seção e duas propriedades termodinâmicas do fluido.

A expressão "velocidade na seção" é, em verdade, "velocidade média na seção", uma vez que a velocidade varia em cada ponto de uma dada seção. A distribuição das velocidades em uma dada seção é definida pelo tipo de regime de fluxo, ou seja, regime laminar ou turbulento. A Fig. 2.5 apresenta esquematicamente os perfis de velocidades para o regime laminar e turbulento, respectivamente.

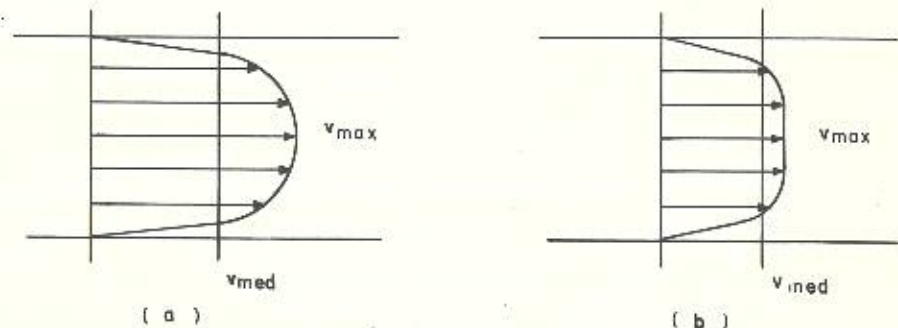


FIGURA 2.5 Perfis de distribuição de velocidades

No regime laminar, o perfil de velocidades é parabólico e a relação entre a velocidade média e a velocidade máxima vale

$$v_{max} = 1,2v_{med} \quad (2.14)$$

No regime turbulento, o perfil de velocidades tem a forma de uma parábola achatada, e a relação da velocidade média com a velocidade máxima é uma função do número de Reynolds, da rugosidade média da parede do duto (r) e do diâmetro (d) do duto.

$$\frac{v_{med}}{v_{max}} = f\left(\text{Re}, \frac{r}{d}\right). \quad (2.15)$$

Equação da continuidade (equação da conservação da massa)

Se um fluido está escoando entre duas seções 1-1 e 2-2 (em regime permanente) como na Fig. 2.6 e não há saída nem entrada de fluido entre essas duas

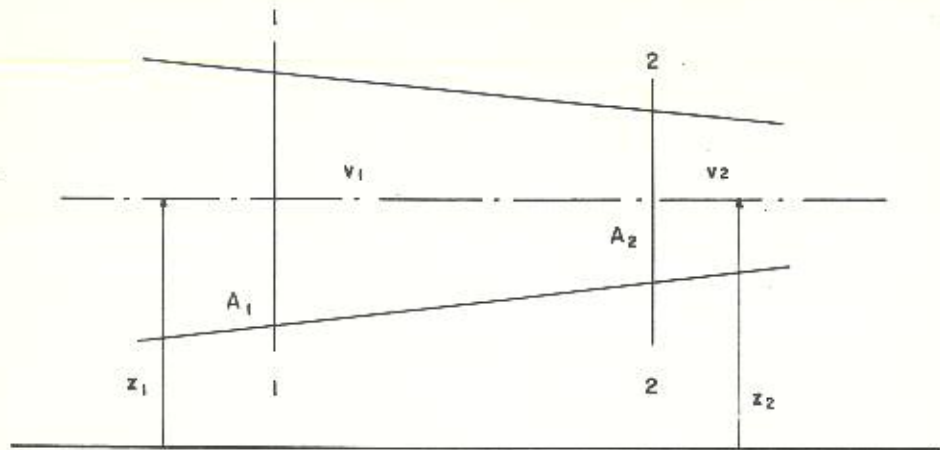


FIGURA 2.6 Escoamento de um fluido entre duas seções

seções, a massa que passa por 1-1 na unidade de tempo é igual à massa que passa na seção 2-2, ou seja, a derivada da massa com relação ao tempo é zero, ou, ainda, a vazão em massa (\dot{m}) é constante,

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = 0, \quad (2.16)$$

$$\dot{m} = \text{constante}. \quad (2.17)$$

Mas

$$\dot{m} = \rho Q = \rho \times A \times v,$$

onde Q é a vazão em volume, A a área da seção transversal, e v a velocidade média na seção. Logo,

$$\dot{m} = \rho_1 \times A_1 \times v_1 = \rho_2 \times A_2 \times v_2 = \text{constante}, \quad (2.18)$$

que é a equação da continuidade. Para fluidos incompressíveis, a densidade não é função da pressão; logo,

$$\rho_1 = \rho_2 = \text{constante}.$$

Dessa forma, a equação da continuidade se reduz a

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = \text{constante}. \quad (2.19)$$

Equação da conservação da energia

No mesmo escoamento representado na Fig. 2.6 poderíamos aplicar também o princípio da conservação da energia, ou seja, se não houvesse perda ou ganho de energia entre as seções 1-1 e 2-2, a energia que o fluido possui na seção 1-1 seria igual à energia do fluido na seção 2-2. Não havendo máquina (bomba, ventilador) entre as seções 1-1 e 2-2, não haveria ganho de energia e, se considerássemos o fluido ideal, não teríamos perdas. Nessas condições, teríamos a soma das energias potencial e cinética em 1-1, e, em 2-2, seriam iguais. A energia potencial do fluido é dada por duas parcelas, a energia referente à pressão estática e a energia de posição. Se representarmos a energia de pressão por

altura de fluido que está escoando, teremos a equação de Bernouilli:

$$z_1 + \frac{p_1}{P_e} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{P_e} + \frac{v_2^2}{2g} = \text{constante}, \quad (2.20)$$

onde z_1 e z_2 são as cotas das seções 1-1 e 2-2, respectivamente; p_1 e p_2 as pressões nas seções 1-1 e 2-2, respectivamente; P_e o peso específico do fluido; e v_1 e v_2 as velocidades médias nas seções 1-1 e 2-2, respectivamente.

Para um fluido real, como existem perdas de energia quando o fluido escoar entre duas seções quaisquer, podemos introduzir, na Eq. (2.20), um termo (Δp) referente a essas perdas, ou seja,

$$\frac{p_1}{P_e} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{P_e} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta p, \quad (2.21)$$

onde Δp representa a perda de energia do fluido quando este flui da seção 1-1 para a 2-2. Essa perda de energia é decorrente de uma soma de perdas, ou seja,

perda por atrito: entre o fluido e as paredes do duto e entre as camadas de fluido;

perda devido a singularidades: isto é, quando entre as duas seções consideradas houver cotovelos, orifícios, registros, etc., esses elementos (singularidades) oporão uma resistência à passagem do fluido, fazendo com que este gaste parte de sua energia para vencer essa resistência.

A perda de energia pelo escoamento de um fluido em duto reto é dada por

$$\Delta p_L = f \frac{Lv^2}{2gD}, \quad (2.22)$$

onde Δp_L é a perda de energia em duto reto, L o comprimento do duto, v a velocidade média do fluido, D o diâmetro do duto, e f o coeficiente de fricção.

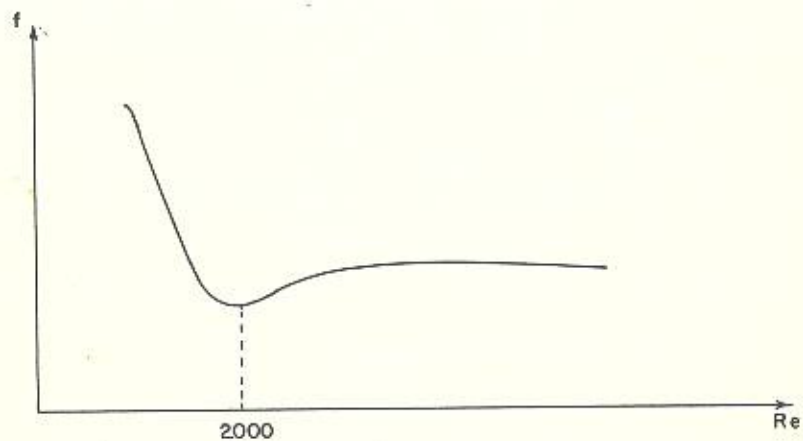


FIGURA 2.7 Variação do coeficiente de fricção com o número de Reynolds

O coeficiente de fricção é função do número de Reynolds, e sua variação é mostrada na Fig. 2.7. A perda de energia em duto reto e as perdas devido a singularidades encontram-se tabeladas para a maioria dos casos de ventilação industrial, e serão vistas em outro capítulo.

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO

2.1 No manômetro inclinado esquematizado na Fig. E-2.1, calcule a pressão em B, sendo o lado direito aberto para a atmosfera. [Dado: a gravidade específica do óleo é 0,87.]

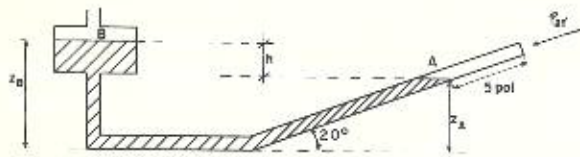


FIGURA E-2.1

Solução

$$\frac{p_B}{\rho_{\text{óleo}}} + z_B = \frac{p_A}{\rho_{\text{óleo}}} + z_A,$$

mas

$$p_A = 0 \text{ (efetivo);}$$

$$p_B = (z_A - z_B)\rho_{\text{óleo}} \quad | \quad z_A - z_B = h = 5 \text{ pol} \sin 20^\circ = 1,7 \text{ pol ou } 0,0432 \text{ m,}$$

$$g_e = \frac{\rho_{\text{óleo}}}{\rho_{\text{água}}} = 0,87,$$

$$\therefore \rho_{\text{óleo}} = 0,87 \times \rho_{\text{água}} = 870 \text{ kgf/m}^3;$$

$$p_B = -0,0432 \text{ m} \times 870 \text{ kgf/m}^3 = -37,58 \text{ kgf/m}^2 \quad \text{(efetiva),}$$

ou

$$p_B = -7,701 \text{ lbf/pé}^2,$$

ou

$$p_B = -0,053480 \text{ lbf/pol}^2.$$

2.2 Para o arranjo mostrado na Fig. E-2.2, calcule a diferença de pressão entre os pontos A e B. [Dado: a densidade do óleo é 0,85 g/cm³.]

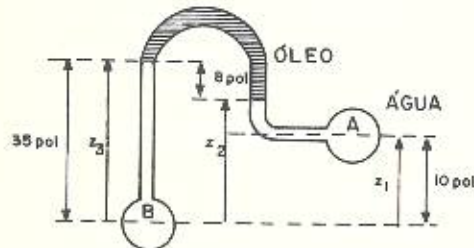


FIGURA E-2.2

Solução. Pela figura, partindo de A, temos

$$p_A + (\cancel{z_2 - z_1})\rho_{\text{óleo}} + (z_3 - z_2)\rho_{\text{óleo}} - (z_3 - z_2)\rho_{\text{óleo}} - (\cancel{z_2 - z_1})\rho_{\text{óleo}} - (z_1)\rho_{\text{óleo}} - p_B = 0,$$

$$p_A - p_B + 8 \text{ pol } \rho_{\text{óleo}} - 8 \text{ pol } \rho_{\text{óleo}} - 10 \text{ pol } \rho_{\text{óleo}} = 0,$$

$$p_A - p_B = 10 \text{ pol } \rho_{\text{óleo}} + 8 \text{ pol } \rho_{\text{óleo}} - 8 \text{ pol } \rho_{\text{óleo}} = 18 \text{ pol } \rho_{\text{óleo}} - 8 \text{ pol } \rho_{\text{óleo}}.$$

Passando para metros e trabalhando no MKS*,

$$\rho_{\text{óleo}} = 10^3 \text{ kgf/m}^3 \quad \text{e} \quad \rho_{\text{água}} = 850 \text{ kgf/m}^3;$$

$$p_A - p_B = 0,4572 \times 10^3 - 0,2032 \times 850 = 457,2 - 172,72 = 284,48 \text{ kgf/m}^2,$$

ou $0,405 \text{ lbf/pol}^2$,
 ou $58,27 \text{ lbf/pé}^2$.

2.3 A velocidade do ar num duto de 12 pol é 1 500 pés/min. Calcule o correspondente Re a 760 mm de Hg e 70 °F. Qual é o regime do fluxo?

Solução

$$\begin{aligned} \varnothing &= 12 \text{ pol (ou 1 pé)} \Rightarrow A = 0,7854 \Rightarrow v = 1\,500 \text{ pés/min,} \\ \rho &= 0,0748 \text{ lb/pé}^3, \\ \mu &= 0,0445 \text{ lb/pé h,} \\ \text{Re} &= \frac{1\,500 \times 1 \times 0,0748}{0,0445/60} = 151\,280. \end{aligned}$$

O regime é turbulento.

2.4 No sistema da Fig. E-2.4, o ar flui em regime permanente entre as seções 1-1 e 2-2. Calcular a vazão de ar em 2-2 e a perda de energia entre 1-1 e 2-2. [Dados:

velocidade em 1-1 (v_1) = 3 000 pés/min;
 diâmetro do duto em 1-1 (\varnothing_1) = 12 pol;
 pressão estática em 1-1 (p_1) = 5 pol de água;
 pressão estática em 2-2 (p_2) = 2 pol de água;
 diâmetro do duto em 2-2 (\varnothing_2) = 20 pol;
 cota de 1-1 (z_1) = 1 pé;
 cota de 2-2 (z_2) = 2 pés.]

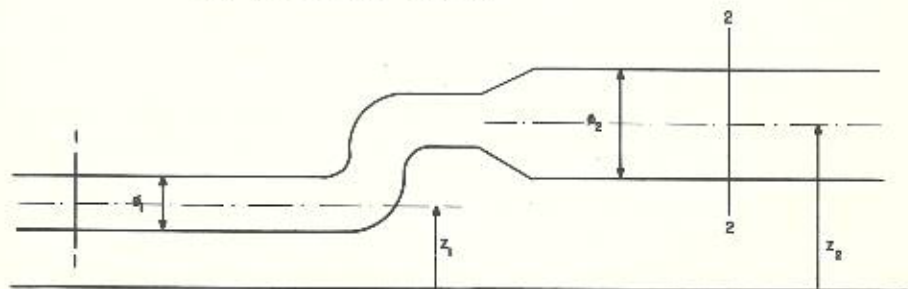


FIGURA E-2.4

Solução. a) Vazão em 1-1 (Q_1)

$$\begin{aligned} Q_1 &= v_1 \times A_1, \\ A_1 &= f(\varnothing 12 \text{ pol}) = 0,7854 \text{ pé}^2, \\ v_1 &= 3\,000, \\ Q_1 &= 3\,000 \text{ pés/min} \times 0,7854 \text{ pé}^2 = 2\,356,2 \text{ pés}^3/\text{min}. \end{aligned}$$

b) Vazão em 2-2 (Q_2).

Como o regime é permanente, $Q_1 = Q_2 = 2\,356,2 \text{ pés}^3/\text{min}$.

c) Perda de energia entre 1-1 e 2-2

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta p.$$

Temos z_1 e z_2 , porém da forma como são dados representam pés de coluna de ar, sendo necessário, portanto, transformar para altura de coluna de água, a fim de tornar essas unidades coerentes com as usadas nos demais membros. Transformando, temos

$$z_2 - z_1 = 1 \text{ pé de coluna de ar,}$$

ou

$$z_2 - z_1 = 0,0144 \text{ pol H}_2\text{O}$$

(o que é desprezível para problemas práticos de ventilação industrial).

p_1/P_e é dado já em polegadas de água (= 5 pol);

p_2/P_e é dado já em polegadas de água (= 2 pol);

$v_1^2/2g$, podemos calcular:

$$\frac{(3\,000/60)^2}{2 \times 32,2} = 38,8 \text{ pés de ar,}$$

ou 0,56 pol de água;

$v_2^2/2g$, devemos calcular inicialmente v_2 :

$$v_2 = \frac{Q_2}{A_2(\varnothing 20 \text{ pol})} = \frac{2\,356,2}{2,182} = 1\,080 \text{ pés/min;}$$

logo,

$$\frac{v_2^2}{2g} = \frac{(1\,080/60)^2}{2 \times 32,2} = 5 \text{ pés de ar, ou } 0,072 \text{ pol de água.}$$

Assim, podemos determinar Δp , que é a perda entre 1-1 e 2-2:

$$\begin{aligned} \Delta p &= z_1 - z_2 + \frac{p_1}{P_e} - \frac{p_2}{P_e} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} = \\ &= -0,0144 + 5 - 2 + 0,56 - 0,072 = 3,474 \text{ pol água.} \end{aligned}$$

3 TOXICOLOGIA INDUSTRIAL

GENERALIDADES SOBRE TOXICOLOGIA

A toxicologia pode ser definida como o estudo das ações nocivas de produtos químicos sobre mecanismos biológicos. Evidentemente o toxicologista, na procura de informações relacionadas com essas ações nocivas, adquire também informações relevantes, quanto ao grau de segurança no uso desses produtos.

A toxicologia moderna é um campo multidisciplinar, e depende do conhecimento e do desenvolvimento de uma série de ciências básicas como a física, a química, a físico-química, a biologia e, em particular, a bioquímica. Para adequada compreensão dos problemas toxicológicos são necessários conhecimentos de fisiologia, de estatística, e de saúde pública. A patologia é considerada parte da toxicologia, pois um efeito nocivo de um produto químico sobre uma célula, tecido ou órgão, deve manifestar-se necessariamente sob a forma de anormalidades grosseiras, microscópicas e submicroscópicas. O campo mais intimamente ligado com a toxicologia é a farmacologia, pois o farmacologista deve compreender não somente os efeitos benéficos das substâncias químicas, mas também os efeitos nocivos dessas substâncias com fins terapêuticos.

A toxicologia tem se desenvolvido em três aspectos principais, dependendo do interesse presente: toxicologia ambiental, toxicologia econômica (utilitária), e toxicologia forense, conforme a Fig. 3.1.

A toxicologia ambiental é o ramo da toxicologia que trata da exposição casual do tecido biológico e, mais especificamente, do homem a produtos químicos basicamente poluentes de seu ambiente e de seus alimentos. É o estudo das causas, condições, efeitos e limites de segurança para tais exposições.



FIGURA 3.1 Desenvolvimento da toxicologia

A toxicologia econômica é o ramo da toxicologia que trata dos efeitos nocivos de produtos químicos intencionalmente administrados ao tecido biológico, com o propósito de obter-se um efeito específico.

A toxicologia forense é o ramo da toxicologia que trata dos aspectos médico-legais de efeitos nocivos de substâncias químicas sobre os seres humanos. A toxicologia forense envolve as condições de exposição aos agentes tóxicos, quer acidentais, quer intencionais.

AGENTES TÓXICOS

INTRODUÇÃO

O homem, desde o início da civilização, em sua procura por alimentos, deve ter tentado comer uma variedade de materiais de origem vegetal e animal. É provável que, através dessa experiência, ele tenha determinado que certas substâncias, principalmente vegetais, quando ingeridas, produziam doenças ou causavam a morte, ou serviam como uma forma desejável de alimento. Por isso, parece razoável conceber que o homem logo reconheceu que havia consequências danosas ou benéficas associadas com a ingestão de materiais pelo seu organismo. Todos os materiais podiam ser colocados em duas classes: seguros ou nocivos. Assim, a palavra "veneno" seria o termo utilizado para descrever os materiais ou produtos químicos que fossem distintamente nocivos ao organismo, e "alimento" seria o termo utilizado para os materiais que fossem benéficos e necessários para que o organismo funcionasse.

Esse conceito, envolvendo a divisão dos produtos químicos em duas categorias, tem persistido até hoje e, como tal, serve um propósito útil na sociedade. Ele prontamente coloca certas substâncias animais e vegetais, e todos os produtos químicos distintamente nocivos, numa categoria, para a qual é dado o devido respeito. Contudo, num sentido estritamente científico, tal classificação não é segura. Reconhece-se, atualmente, que não é possível estabelecer uma rigorosa linha de separação entre materiais benéficos e materiais nocivos. A experiência tem mostrado que é mais razoável considerar a existência de graus de segurança e de graus de risco, na utilização de um determinado material. Mesmo a mais inócua das substâncias, quando absorvida pelo organismo humano em quantidades suficientemente elevadas pode ocasionar efeitos indesejáveis, ou mesmo distintamente nocivos. Do mesmo modo, o mais nocivo de todos os produtos químicos, pode ser absorvido, em quantidade suficientemente pequena, sem causar nenhum dano ao organismo.

CONCEITO DE TOXICIDADE

Toxicidade é uma propriedade inerente a toda matéria. Manifesta-se num ambiente fisiológico vivo, produzindo uma alteração indesejável do mesmo, que, se suficientemente intensa, é chamada de dano. O dano é produzido em resposta a alguma dose de uma substância. A dose é a quantidade da substância experimentada num dado intervalo de tempo. Algebricamente, a dose pode ser expressa pela regra de Haber, em sua forma mais simples,

$$Ct = K = \text{algum ponto final, usualmente morte.}$$

onde C é a concentração e t o tempo. A constante K é usualmente LD_{50} ou LC_{50} ; LD_{50} é a dose de um agente tóxico que matará 50% de um grupo de animais de teste; LC_{50} é a concentração de uma dada substância que, quando inalada num determinado período de tempo, matará 50% dos animais sob o teste.

A toxicidade pode também ser entendida como o efeito líquido de duas reações opostas: (1) substâncias tóxicas agindo sobre o organismo, e (2) o organismo agindo sobre as substâncias tóxicas. O efeito líquido é uma redução no potencial tóxico. Isso pode ser observado na Fig. 3.2. O reconhecimento dessas duas reações opostas permite diversos prognósticos com relação à toxicidade: (a) a toxicidade observada será sempre menor que a verdadeira, ou toxicidade potencial; (b) a toxicidade *in vivo* será sempre menor que a toxicidade *in vitro*; e (c) outros prognósticos com relação ao sinergismo e antagonismo.

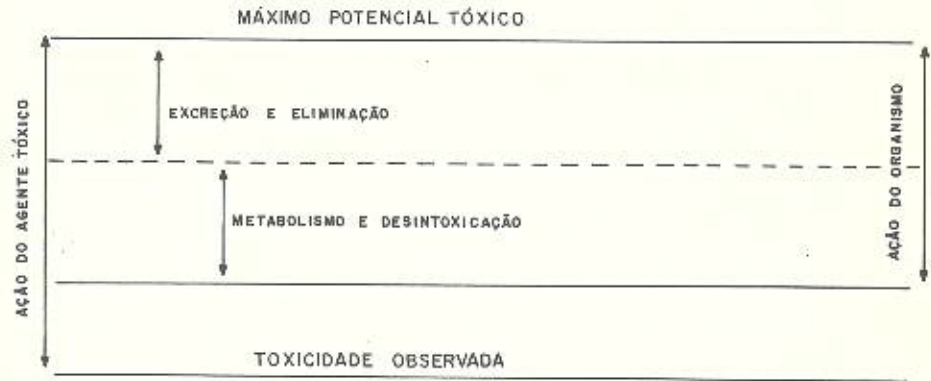


FIGURA 3.2 Diagrama do conceito de toxicidade

A Fig. 3.2 mostra que diversas reações ocorrem em combinação para reduzir a concentração do agente tóxico através de uma série de vias de excreção e eliminação. Os processos metabólicos reduzem ainda mais a concentração efetiva do agente tóxico no organismo; contudo, muitas vezes, os produtos resultantes da desintoxicação podem aumentar a toxicidade.

Pelo fato de uma substância poder ser tóxica para um determinado espécime biológico e, ao mesmo tempo, inócua para outro, ao serem usados os termos tóxico e toxicidade, é necessário identificar o mecanismo biológico sobre o qual o efeito danoso é produzido.

SINERGISMO E ANTAGONISMO

Sinergismo pode ser definido como o aumento da toxicidade acima daquela comumente expressada, quando o agente tóxico é utilizado em combinação com outras substâncias. Antagonismo é a expressão oposta à toxicidade, quando duas ou mais substâncias estão presentes no organismo; o antagonismo pode resultar na completa eliminação dos efeitos tóxicos, ou a toxicidade pode ser parcialmente reduzida.

RISCO E SEGURANÇA

Pode-se conceituar risco como a probabilidade de ocorrência de um dano quando se utiliza a substância de um determinado modo e numa particular quantidade; e segurança como a certeza prática de que um dano não irá ocorrer quando a substância for utilizada de um determinado modo e numa particular quantidade.

Observação. Toxicidade de uma substância; risco ou segurança no uso da substância.

Os elementos básicos a serem considerados na avaliação de um risco no uso de uma substância são:

- a) toxicidade da substância usada;
- b) propriedades físicas da substância;
- c) probabilidade de absorção da substância pelo indivíduo;
- d) a extensão e a intensidade de exposição a essa substância
- e) medidas de controle utilizadas.

OCORRÊNCIA DOS AGENTES TÓXICOS

Os agentes tóxicos, especificamente designados em saúde ocupacional como agentes químicos de doenças profissionais, podem ocorrer nos estados sólido, líquido ou gasoso. Quando no estado sólido ou líquido, podem apresentar-se finamente divididos e suspensos no ar como material particulado, com importante significado higiênico.

Os agentes que se apresentam no estado gasoso são constituídos pelos gases e vapores, sendo que estes últimos representam o estado gasoso de materiais que são sólidos ou líquidos nas condições normais de pressão e temperatura. Uma das propriedades mais importantes desses agentes é sua capacidade de misturar-se intimamente com o ar, tornando-se parte do mesmo; inicialmente pode haver uma certa estratificação, devida às diferenças de densidade. Contudo, uma vez misturados, não há uma separação importante, apesar dessas diferenças.

As partículas sólidas e líquidas suspensas no ar podem ser classificadas de acordo com sua formação em poeiras, fumos e névoas.

Poeiras

São partículas sólidas, em geral com diâmetros maiores que $1 \mu\text{m}$, resultantes da desintegração mecânica de substâncias orgânicas ou inorgânicas, seja pelo simples manuseio, seja em consequência de operações de trituração, moagem, peneiramento, broqueamento, polimento, detonação, etc. Como exemplos, podemos citar as poeiras de sílica, asbestos e carvão.

Fumos

São partículas sólidas, em geral com diâmetros menores que $1 \mu\text{m}$, resultantes da condensação de vapores, geralmente após volatilização de metais fundidos, e quase sempre acompanhada de oxidação. Ao contrário das poeiras, os fumos tendem a flocular. Os fumos podem formar-se também pela volati-

lização de matérias orgânicas sólidas ou pela reação de substâncias químicas, como na combinação de ácido clorídrico e amoníaco.

Névoas

São partículas líquidas (gotículas), comumente com diâmetros entre 0,1 e 100 μm , resultantes da condensação de vapores sobre certos núcleos, ou da dispersão mecânica de líquidos, conseqüente a operações ou ocorrências como a nebulização, borbulhamento, respingo, etc. Como exemplos podemos citar névoas de ácido crômico, de ácido sulfúrico e de tinta pulverizada.

CLASSIFICAÇÃO FISIOLÓGICA DOS AGENTES TÓXICOS

O tipo de ação fisiológica de um agente tóxico sobre o organismo depende da concentração na qual está presente. Por exemplo, um vapor, numa determinada concentração, pode exercer sua principal ação como anestésico, enquanto que uma menor concentração do mesmo vapor pode, sem efeito anestésico, danificar o sistema nervoso, o sistema hematopoético, ou algum órgão visceral. Por esse motivo, é impossível, freqüentemente, colocar-se um agente tóxico numa única classe. Patty sugere a classificação que segue.

Irritantes

São corrosivos e vesicantes em sua ação. Têm essencialmente o mesmo efeito sobre homens e animais, e o fator concentração é muito mais importante que o fator tempo de exposição. Alguns irritantes representativos são:

- a) irritantes que afetam principalmente o trato respiratório superior – aldeídos (aldeído acético, acroleína, aldeído fórmico), poeiras e névoas alcalinas, amônia, ácido crômico, óxido de etileno, ácido clorídrico, fluoreto de hidrogênio, dióxido de enxofre;
- b) irritantes que afetam o trato respiratório superior e os pulmões – bromo, cloro, óxidos clorados, flúor, iodo, ozona, cloretos de enxofre, tricloreto de fósforo;
- c) irritantes que afetam principalmente o trato respiratório inferior – dióxido de nitrogênio, fogsênio, tricloreto de arsênio.

Asfixiantes

Exercem sua ação interferindo com a oxidação dos tecidos. Podem ser divididos em asfixiantes simples e químicos. Os asfixiantes simples são fisiologicamente gases inertes que agem principalmente por diluição do oxigênio atmosférico abaixo da pressão parcial necessária para manter uma saturação de oxigênio do sangue suficiente para a respiração normal do tecido. Os asfixiantes químicos, por outro lado, através de uma ação química, impedem o transporte do oxigênio pelo sangue ou impedem a oxigenação normal dos tecidos, mesmo que o sangue esteja bem oxigenado. Seguem-se exemplos de asfixiantes.

- a) Asfixiantes simples: dióxido de carbono, etano, hélio, hidrogênio, metano, nitrogênio, óxido nitroso.

b) **Asfixiantes químicos:** monóxido de carbono, que combina com a hemoglobina; cianogênio, cianeto de hidrogênio e nitrilas, que inibem a oxidação do tecido pela combinação com catalisadores celulares; anilina, metilanilina, dimetanilina e toluidina, que formam metaemoglobina; nitrobenzeno, que forma metaemoglobina, baixa a pressão sanguínea, disturba e, finalmente, faz cessar a respiração; e sulfeto de hidrogênio, que causa paralisia respiratória.

Narcóticos (anestésicos em seu estágio extremo de ação)

Esse grupo exerce sua principal ação como simples anestesia, sem sérios efeitos sistêmicos, e seus membros têm uma ação depressiva sobre o sistema nervoso central, governada por suas pressões parciais no sangue que abastece o cérebro. Por exemplo, hidrocarbonetos acetilênicos, hidrocarbonetos olefínicos, éter etílico, éter isopropílico, hidrocarbonetos parafínicos, cetonas alifáticas, álcoois alifáticos.

Tóxicos sistêmicos

a) **Materiais que causam danos a um ou mais órgãos viscerais:** a maioria dos hidrocarbonetos halogenados.

b) **Materiais que causam danos ao sistema hematopoético:** benzeno, fenóis e, num certo grau, tolueno, xilol e naftaleno.

c) **Materiais que causam danos ao sistema nervoso:** dissulfeto de carbono, álcool metílico, tiófeno.

d) **Metais tóxicos:** chumbo, mercúrio, cádmio, antimônio, manganês, berílio etc.

e) **Não-metais tóxicos inorgânicos:** compostos de arsênio, fósforo, selênio e enxofre, fluoretos.

Material particulado que não seja tóxico sistêmico

a) Poeiras que produzem fibrose: sílica, asbesto.

b) Poeiras inertes: carborundo, carvão.

c) Poeiras que causam reações alérgicas: pólen, madeira, resinas e muitas outras poeiras orgânicas.

d) Irritantes: ácidos, álcalis, fluoretos, cromatos.

e) Bactérias e outros microrganismos.

CLASSIFICAÇÃO DAS SUBSTÂNCIAS PELOS SEUS EFEITOS TÓXICOS

Não-venenos

São substâncias que não podem ser absorvidas pelos fluidos do organismo. Por exemplo, metilcelulose e altos polímeros. A maioria dos produtos comerciais contém baixos polímeros ou impurezas absorvíveis.

Venenos por concentração

São substâncias que produzem um efeito proporcional à quantidade presente no organismo, num dado instante. Podem ser:

- a) fisicamente tóxicos — óxido nitroso, éter etílico, narcóticos em geral;
- b) farmacologicamente (ou bioquimicamente) tóxicos — compostos orgânicos fosforados, que atuam como inibidores irreversíveis da colinesterase, permitindo, como consequência, a acumulação de grandes quantidades de acetilcolina (Parathon, Pirazoxon, etc.)
- c) fisiologicamente tóxicos — Butil Cellosolve, que causa anemia hemolítica (aumenta a fragilidade dos glóbulos vermelhos).

Venenos crônicos

São substâncias que, sempre que a concentração nos fluidos do organismo passa um limite, causa um dano que não é reparado antes da próxima absorção. Por exemplo, o tetracloreto de carbono, que causa cirrose do fígado.

Venenos cumulativos

São substâncias que se armazenam no organismo, quando acima do nível de tolerância no sangue (chumbo, flúor, DDT).

Venenos aditivos

São substâncias tais que cada molécula das mesmas que entra no organismo produz um efeito permanente irreversível. Por exemplo, substâncias que causam câncer (?).

TOXICIDADE AGUDA, SUBAGUDA E CRÔNICA

Toxicidade aguda

Refere-se a efeitos produzidos por uma única penetração de um produto químico nos fluidos do organismo — uma engolida, 8 h de inalação, até 24 h de contato com a pele.

Toxicidade subaguda

Refere-se a efeitos produzidos por penetrações diárias ou frequentes no organismo, durante poucos dias ou até mesmo um ano.

Toxicidade crônica

Refere-se a efeitos produzidos pela penetração do agente tóxico durante pelo menos dois anos.

TOXICIDADE SELETIVA E ASSOCIADA

Toxicidade seletiva

Os agentes danificam certas células, órgãos e espécies, e não outros, na mesma dosagem. Os compostos que constituem os pesticidas são planejados para matar insetos, por exemplo, e não danificar o homem. Por exemplo, a seletividade do DDT está baseada no tamanho do animal e não no peso.

Toxicidade associada

Quando dois ou mais agentes estão presentes, pode haver:

a) efeitos independentes,

$$A \rightarrow \text{efeito A}; B \rightarrow \text{efeito B};$$

b) efeitos aditivos – quando as ações tóxicas são similares,

$$\text{efeito (A + B)} = \text{efeito A} + \text{efeito B};$$

c) efeitos sinérgicos, quando as ações tóxicas são mais que aditivas,

$$\text{efeito (A + B)} > \text{efeito A} + \text{efeito B};$$

d) efeitos antagônicos, quando as ações tóxicas são menos que aditivas,

$$\text{efeito (A + B)} < \text{efeito A} + \text{efeito B}.$$

Exemplo. Qual é a mais provável LD_{50} para ratos de um fluido para freio cuja fórmula é:

etileno-glicol (LD_{50} : 8 g/kg) 20% em peso,
 glicerina (LD_{50} : 30 g/kg) 30% em peso,
 óleo de rícino (LD_{50} : 100 g/kg) 50% em peso;

média harmônica,

$$\frac{\%A}{LD_{50}A} + \frac{\%B}{LD_{50}B} + \frac{\%C}{LD_{50}C} = \frac{1}{LD_{50}X}$$

$$\frac{0,2}{8} + \frac{0,3}{30} + \frac{0,5}{100} = \frac{1}{LD_{50}} \therefore LD_{50} = 25 \text{ g/kg.}$$

RELAÇÃO DOSE-RESPOSTA

INTRODUÇÃO

O entendimento quantitativo da relação entre a *dose* de um agente tóxico que penetrou no organismo e o tipo e o grau de *resposta* requer claramente que a magnitude da dose seja expressa em termos da *taxa de dosagem efetiva* no *local crítico* dentro do organismo, onde é iniciada a *resposta* do tecido.

Exemplificando, no caso de uma poeira inalada, não é suficiente, meramente, conhecer a concentração da poeira no ar do ambiente de trabalho e a taxa volumétrica da respiração. O produto dessas duas grandezas fornece, unicamente, a quantidade total de poeira que penetra no sistema respiratório, quando levamos em conta, também, o tempo de exposição. Esse valor assim obtido não é suficiente para explicar, de um modo quantitativo, que o sistema respiratório tem propriedades seletivas na retenção das poeiras inaladas de diferentes tamanhos, e que possui diferentes eficiências de limpeza para as várias poeiras nele depositadas. Objetivando estabelecer, quantitativamente, uma relação dose-resposta no local crítico, deve-se estimar:

a) quanto da poeira é inicialmente depositado no sistema respiratório, e em que porções do mesmo;

b) com que rapidez e em que grau as poeiras depositadas são removidas pelos mecanismos de limpeza do trato respiratório e dos pulmões; e

c) qual a fração da poeira retida que atinge o local crítico dentro dos pulmões, ou outras partes do organismo, para causar o dano. Somente através dessa estimativa quantitativa é possível traduzir a concentração da poeira no ar do ambiente de trabalho, a taxa volumétrica de respiração e o tempo de exposição, numa medida útil da dose efetiva.

A dose efetiva de poeira de quartzo, em suspensão no ar de um ambiente de trabalho, necessária para produzir silicose é, aparentemente, não mais do que um a dois por cento da quantidade total de poeira inalada durante muitos anos de exposição necessária para produzir essa doença. Essa pequena fração residual é também uma fração selecionada, no sentido de que ela não pode ter as mesmas características da poeira original, quer quanto à distribuição de tamanho de partículas, quer quanto à relativa composição de diferentes minerais.

O estudo das dimensões significativas da relação dose-resposta enfatiza certos pontos de importância na aplicação da informação toxicológica, para a manipulação de materiais nocivos na ocupação. Deve-se levar em conta não só as propriedades tóxicas gerais do agente nocivo, mas também fatores adicionais modificadores, que intervêm no problema quando o trabalhador encontra o agente sob as condições peculiares de seu trabalho. Esses fatores podem alterar, significativamente, diferentes situações, envolvendo o mesmo agente, mas sob condições diversas, de tal modo que o resultado final (magnitude e natureza do efeito — doença) pode ser perfeitamente diferente para cada caso. Isso está implicado, naturalmente, nas considerações dos problemas de saúde na ocupação, quando se faz a distinção entre a toxicidade básica de uma substância e o grau de dano à saúde criado pelo contato do trabalhador com a mesma. Consideremos como exemplo uma fábrica que armazena lingotes de chumbo: desde que esse chumbo permaneça como lingote, a toxicidade potencial nunca será atualizada, simplesmente porque as circunstâncias não o permitem. Um exemplo mais sofisticado é visto na eliminação do processo de fabricação de fritas na indústria cerâmica. A oportunidade para contato com chumbo está assim limitada para uma forma relativamente insolúvel de silicato de chumbo, com partículas de tamanho grosseiro na frita final. Por essa e por outras razões, o risco ao chumbo foi eliminado desse tipo de indústria, apesar de continuar existindo uma teórica toxicidade potencial.

IMPORTÂNCIA ATUAL DO TEMA

Há um reconhecimento do crescente interesse atual pela seguinte questão básica: pode o homem, verdadeiramente, encontrar um modo de viver, com êxito, com o número sem-fim de novos produtos químicos e tensões físicas, que nossa ciência e tecnologia tem criado (as recompensas dos quais são tão obviamente benéficas, sob outros aspectos) e equacionar os conseqüentes problemas de saúde, com sucesso, na vida real?

Uma importante necessidade para o sucesso de um programa de controle dos agentes nocivos na ocupação é existir disponível uma medida quantitativa da relação entre a magnitude da exposição ao agente e o tipo e grau de resposta numa população exposta a esse agente. É somente com base nessa relação que se pode, seguramente, permitir uma dose tolerável do agente nocivo, em algum nível acima de zero, de tal modo que uma fração significativa do grupo exposto

não experimente um indesejável efeito sobre a saúde. Está aumentando a necessidade de se estabelecer, cada vez mais minuciosamente, essas relações. Com a introdução de novos agentes nos ambientes ocupacionais, os conceitos em que foram baseadas as relações dose-resposta estão sendo desafiados, e dúvidas estão sendo expressadas quanto à aceitabilidade de qualquer limite de tolerância acima de zero.

Os critérios para definir um estado doentio estão se tornando nebulosos sob o ponto de vista público e, mesmo entre grupos profissionais e científicos; o simples encontro de uma quantidade mensurável de uma substância tóxica, em algum tecido do organismo é entendido como evidência suficiente de envenenamento existente ou esperado. De acordo com essa posição, pareceria não haver modo de se evitarem riscos à saúde, a não ser pela completa eliminação da substância potencialmente tóxica de nosso ambiente; ou seja, interrompendo a produção e o uso de tais substâncias. É de particular responsabilidade dos toxicologistas industriais, médicos e outros profissionais da saúde ocupacional, mostrar quando essas medidas extremas não são necessárias e estabelecer condições sólidas para a segura produção e manipulação dos agentes nocivos à ocupação.

APRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL DA RELAÇÃO DOSE-RESPOSTA

A Fig. 3.3 mostra a relação dose-resposta numa apresentação tridimensional. As duas coordenadas sobre o plano horizontal representam as magnitudes da dose e da resposta, sendo que a última varia, ao longo da escala, em grau e não em tipo. No plano vertical está representada a escala da suscetibilidade relativa do agente tóxico pelo organismo atingido. Sabe-se como os indivíduos variam em sua suscetibilidade a um dado tipo de *stress*, de modo que, dentro de uma população exposta, pode-se encontrar uma larga faixa das respostas individuais a uma mesma dose. Assim, a relação dose-resposta deve apresentar as probabilidades variantes, dentro de um grupo de indivíduos expostos, dos que respondem, com diferentes graus do efeito ao agente, encontrado a diferentes doses.

Para uma completa delineação da relação, deve-se distinguir entre a apresentação básica da característica fundamental da dose-resposta, no local primário da ação tóxica no organismo atingido, e a apresentação de uma relação prática, sobre a qual se estabelece um programa de controle do agente nocivo. Entre essas duas há muitos fatores que intervêm para complicar o movimento de um conjunto de escalas para outro, como está sugerindo na Fig. 3.3.

DIMENSÕES DA DOSE

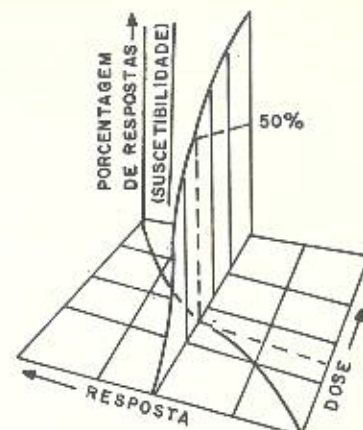
O que se entende por dose? Ela não somente deve ser determinada de acordo com uma apropriada escala quantitativa, mas, para ser básica, deve ser uma expressão da dose efetiva no local crítico, dentro do organismo, estabelecida em termos da forma ativa do agente, como ela opera nesse local. Numa série de casos, o real agente danificante é diferente do agente externo, do qual ele provém, sendo conseqüência de um processo metabólico, ou de alguma reação bioquímica ou biofísica, que se desenvolve quando o organismo luta

ESCALA DA RESPOSTA DA POPULAÇÃO

- 1) Para a relação-teste. Dose $x\%$ de indivíduos respondendo ao teste, usando suficiente número de indivíduos adequados para uma análise estatística válida.
- 2) Aplicação dos resultados de uma população (ou espécie) para outra.
- 3) Para a relação prática dose-resposta-população. Dose versus probabilidade de indivíduos que respondem em diferentes níveis de efeito para particular população exposta ao risco.

ESCALA DA RESPOSTA

- 1) Para a relação básica dose-resposta. Escala quantitativa da resposta expressa em termos do mais básico evento no local crítico; incrementos de resposta de igual valor sobre toda a escala.
- 2) Eventos conseqüentes que levam à doença.
- 3) Para a relação prática dose-resposta. Magnitude do risco à saúde (imediate ou potencial) ao indivíduo exposto.



ESCALA DA DOSE

- 1) Para a relação básica dose-resposta. Escala quantitativa da dose no local crítico, no organismo, expressa em termos da forma ativa do agente no local.
- 2) Eventos que intervêm entre a via de entrada no organismo e o local crítico, que provocam a diferença entre o nível externo de exposição e a dose efetiva no local crítico.
- 3) Para a relação prática dose-resposta. Magnitude da exposição às condições externas que determinam o *stress*, medida em termos adequados para transferência em dose efetiva.

FIGURA 3.3 Relação dose-(população) resposta, com distinção entre escalas básicas (toxicológicas) e práticas (saúde) sobre três eixos. A curva ilustrativa sobre o plano horizontal retrata a relação dose-resposta para a metade (50%) da população exposta; a curva sobre o plano vertical mostra as porcentagens de resposta da população do grau indicado, em relação a toda a escala de doses. A linha vertical da escala da dose indica a magnitude da dose necessária para produzir o indicado grau de resposta em 50% da população. [Hatch, T. F., "Significant dimensions of the dose-response relationship", *Arch. Envir. Health*, 16: 4, 1968]

contra o agente externo. O efeito biológico da radiação (RBE*) parece ser proporcional ao grau de ionização no local crítico, e o RBE é um fator que tenta converter os diferentes tipos de exposições à radiação, sendo medido externamente em doses efetivas equivalentes biologicamente em termos de ionização nos locais apropriados. O efeito fisiológico do monóxido de carbono (CO) está relacionado com a magnitude e a duração de deficiência de oxigênio nos tecidos, e não com o nível de CO no sangue, e este pode não ser diretamente

**Relative biological effectiveness*. Trata-se de uma estimativa grosseira da quantidade relativa de dano que 1 R (roentgen) de radiação produzirá no tecido.

proporcional à concentração externa de CO na atmosfera. A resposta deletéria do trabalhador a um ambiente quente não está relacionada diretamente com a carga calórica externa, mas é consequência de uma restrição à descarga do calor corporal. Uma variedade de substâncias gasosas, quimicamente diferentes, produz o mesmo tipo de irritação pulmonar, sugerindo que a reação básica não é específica do produto químico, mas uma alteração fisiológica comum nos tecidos pulmonares, em consequência de uma variedade de reações químicas iniciais. Assim, as doses básicas de gases como ozona, fosgênio e bióxido de nitrogênio podem ser expressas em termos de "unidades de irritação" fisiologicamente equivalentes.

Na fixação da escala da dose efetiva no local crítico, o aspecto quantitativo é importante. Pergunta-se: estaria a resposta relacionada com a intensidade do agente tóxico no local crítico (concentração por grama de tecido), ou com a taxa de dosagem (taxa de chegada do agente tóxico ao local), ou depende da quantidade acumulada que chegou ao local durante um certo tempo, independente de quanto chegou por vez? Indubitavelmente não há resposta a essa questão, e alguma característica particular do mecanismo de intoxicação determina a relação significativa em cada caso. Parece ser razoável esperar que, numa resposta aguda e reversível, a mesma seja proporcional à taxa de dosagem, enquanto que, numa resposta que aparece depois de um determinado tempo, a mesma esteja intimamente relacionada com a dose acumulada. Numa situação prática, raramente será possível medir a dose real do agente nocivo no local crítico; deve-se aceitar, como um indicador razoável da dose, a magnitude do agente nocivo encontrado em algum ponto mais acessível no corpo (sangue ou urina) ou, mais comumente, no ambiente externo. Isso leva à questão da validade da correlação entre o nível de *stress* e a dose real.

Apresentamos a seguir os principais itens de interesse no estabelecimento da relação entre o nível de contato externo com o agente nocivo e a dosagem interna.

a) Características das várias vias de penetração dos agentes nocivos no organismo, e como elas variam sua aceitação com as propriedades físicas e químicas dos agentes:

é o aparelho respiratório a via de penetração mais efetiva, devido à grande área interfacial, e à pequena espessura da membrana alveolar, que separa o sangue do ar nos pulmões?

ou é o trato gastrointestinal, devido à possibilidade de maior taxa de solubilidade no estômago, do que nos pulmões, para certos materiais particulados?

ou, finalmente, é a pele, que, estando em contato com uma quantidade maior do agente nocivo, sofre uma pressão maior, que move o agente através da mesma, compensando uma área mais limitada?

qual a importância dos mecanismos limitantes de deposição e limpeza do aparelho respiratório com relação ao material particulado inalado?

qual a importância da capacidade de troca gasosa em diferentes profundidades do aparelho respiratório, e da solubilidade dos gases nos fluidos corporais?

qual a importância da inalação simultânea de gases e partículas (sinergismo)? Etc.

b) Eventos ocorridos entre a penetração inicial de um agente nocivo e a dose efetiva no local crítico — transporte, biotransformações, armazenamento e eliminação:

qual a importância da solubilidade do gás no sangue e nas gorduras, e a influência da taxa de suprimento de sangue (por unidade de peso do tecido) no equilíbrio dos vários depósitos de agentes nocivos armazenados no organismo?

qual a taxa de dissolução do material particulado nos pulmões e qual a taxa de transferência para o sangue? e como isso pode ser comparado com a taxa de limpeza mecânica realizada pelo movimento do muco que cobre os caminhos aéreos?

qual a probabilidade relativa de ocorrer um dano sistêmico pela penetração de substâncias dissolvidas no estômago, resultantes da ação dos mecanismos de limpeza no aparelho respiratório, quando comparada com a dissolução e transferência direta no sangue através dos pulmões?

como essas taxas variam com a solubilidade e o tamanho das partículas de material particulado?

quais são as correlações entre os níveis do agente tóxico no sangue e na urina e a carga no pulmão, ou a quantidade armazenada nos ossos, ou outros importantes depósitos no organismo?. Etc.

c) Relação entre os estados físico e químico do agente no ambiente externo e a dose efetiva:

que alterações podem ocorrer entre o ponto de geração e emissão do agente nocivo, e o ponto do contato humano? os gases não podem reagir com outros componentes do ar ambiente? as partículas não podem sedimentar, reduzindo, assim, em tempo e a distância, o tamanho das partículas que permanecem em suspensão? as partículas não podem agir como núcleos, coletando substâncias condensadas?

DIMENSÕES DA RESPOSTA

O mesmo tipo de distinção entre os valores das escalas básica e prática aplica-se à representação da resposta, bem como à da dose. Na prática, onde a preocupação fundamental é prevenir doenças nos trabalhadores, a escala da resposta deve estar em termos de efeitos danosos reais, como os revelados pela perda de integridade de todo o organismo como o aparecimento de doença, ou como no aumento do potencial para a doença. Para uma relação básica, contudo, a resposta deve ser expressa em termos do evento mais significativo no local crítico, como a reflexão direta do distúrbio provocado pelo agente. Essa resposta não precisa ser má, mas deve servir como um indicador do início de um efeito danoso, que poderá ocorrer se o agente atingir um certo nível. Do mesmo modo que a escala da dose, a escala da resposta deve ser quantitativa, de forma que iguais incrementos na resposta terão o mesmo significado.

Historicamente, há uma grosseira correlação entre o tipo de evento registrado como resposta ao agente nocivo e a velocidade de evolução das técnicas analíticas e de diagnóstico. Alterações cronológicas no evento selecionado como índice efetuaram-se segundo o seguinte modelo:

morte — patologia grosseira e doença visível — patologia microscópica — perda de função fisiológica — alterações bioquímicas — dano psicofisiológico — distúrbio psicológico e subjetivo — incômodo transitório.

Num extremo dessa escala aparece a mais desastrosa perda de saúde, a morte; no outro, uma resposta sutil, além dos limites do significado de dano à saúde. Não há uma linha clara dividindo esses índices ou separando a escala básica, que é um resultado direto da ação tóxica, daqueles que pertencem a uma segunda categoria como indicadores da consequência dos distúrbios básicos.

Na Fig. 3.4, procura-se retratar a diferença entre as escalas, básica e prática, de resposta. O evento básico, como direta consequência do agente, foi chamado de dano, e está representado no eixo horizontal. Como um resultado desse dano básico, a integridade do organismo, como um todo, é ameaçada, e vários níveis de doença podem desenvolver-se, como está representado sobre o eixo vertical. Iniciando com mínimo dano e máxima saúde, o indivíduo move-se na escala do dano como a inevitável consequência da vida. Sua velocidade de movimento será determinada em parte pelos *stresses* ambientais, aos quais ele está submetido. Até um certo nível de dano, devido às capacidades homeostáticas e compensatórias do organismo, a consequência do mesmo está limitada. Após esse nível, alcançado o limite dos processos compensatórios, incrementos do dano são acompanhados por crescentes aumentos da incapacidade, até a morte. Índices básicos de resposta têm de ser encontrados ao longo do eixo do dano, mas esses devem ainda ser trasladados, nas respostas consequentes, para o eixo vertical, para fornecer uma base sólida na fixação de limites de tolerância.

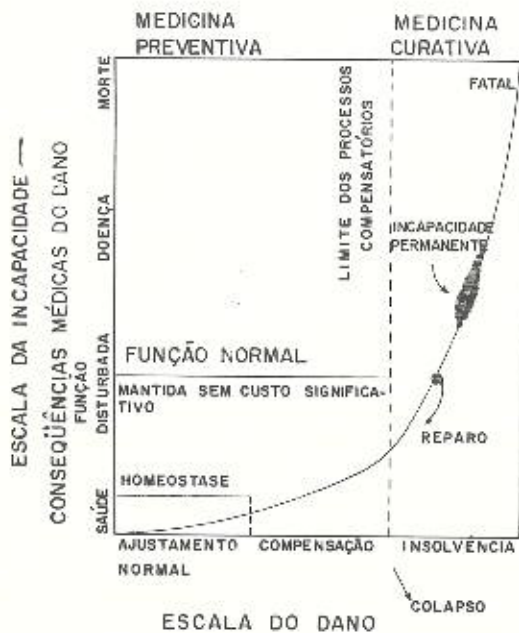


FIGURA 3.4 Relação entre o dano e a incapacidade. Considerável deslocamento ao longo da escala do dano é acompanhado de pequena incapacidade. [Hatch, T. F., "Changing Objectives in Occupational Health", *Amer. Industr. Hyg. Assoc. J.*, 23: 1, 1962]

SUSCETIBILIDADE

O terceiro cixo da Fig. 3.3 leva em conta a suscetibilidade variante entre os membros do grupo exposto. Para o desenvolvimento de uma relação básica, deve-se utilizar um adequado grupo para o teste, com características definidas, que serão razoavelmente reproduzidas em diferentes amostras do mesmo universo. Os toxicologistas pesquisadores escolhem espécies animais adequadas, procurando padronizá-las e protegê-las, de modo a assegurar, com o auxílio de estatísticas, uma população estável, que leve a resultados dignos de confiança. As mesmas necessidades aplicam-se quando os seres humanos são utilizados no teste. Tais grupos são um tanto artificiais, e a principal necessidade é selecionar um grupo de teste, de modo que se tenha uma base razoável para transladar os resultados assim obtidos, em relações práticas aplicáveis à situação real. Aqui, novamente, o problema é complicado pela sutileza da resposta selecionada para representar a relação básica. A variação na suscetibilidade inerente dos diversos membros de um grupo de teste não é a mesma diferença na habilidade para resistir a um dado *stress*, devido aos graus variantes de dano na população, provenientes de outras causas não-relacionadas com o agente tóxico sob estudo. Um baixo grau de dano pode ter pequeno efeito sobre a relação dose-resposta, quando a resposta é medida em níveis relativamente grosseiros, mas ele pode dominar o quadro quando a relação é investigada no nível básico. Isso pode resultar numa relação falsa, na qual a resposta observada é atribuída a uma ação única do agente, quando, de fato, é a condição do hospedeiro que determina o resultado. Uma infecção pulmonar leve nos animais de teste pode interferir seriamente com o estabelecimento de uma relação dose-resposta para um irritante pulmonar com o foscênio.

Alguns dos mais valiosos estudos sistemáticos sobre relação entre exposição aos agentes nocivos e conseqüentes efeitos sobre a saúde têm sido realizados na indústria, com uso de adequados procedimentos estatísticos e epidemiológicos, para relacionar níveis e duração das exposições ambientais com a magnitude e a natureza dos efeitos doentios nos trabalhadores expostos. As considerações dimensionais em tais campos de estudos são necessariamente maiores que nos estudos de laboratório, onde muitos fatores são deliberadamente mantidos constantes, para evitar complicações distúrbias.

DETERMINAÇÃO DE LIMITES DE TOLERÂNCIA

Uma apresentação da dose-resposta estatisticamente digna de confiança que retrate a relação numa faixa de respostas desde zero até um nível de distúrbio, que é claramente inaceitável, fornece a base para a fixação de um limite de exposição tolerável, abaixo do qual um nível indesejável de distúrbio não ocorrerá, num grupo de indivíduos expostos, com uma frequência acima de uma probabilidade estabelecida. Há três importantes decisões envolvidas na fixação desse limite:

- que tipo de resposta deve ser restringida?
- qual o grau máximo da resposta do tipo estabelecido que deve ser aceito?
- qual a probabilidade de ocorrência que deverá ser permitida para respostas em excesso do limite estabelecido?

VIAS DE PENETRAÇÃO NO ORGANISMO

INTRODUÇÃO

Todas as vias naturais de penetração dos agentes tóxicos no organismo retardam a entrada dos mesmos, e exercem determinada ação seletiva. A penetração somente será instantânea quando atingir diretamente a corrente sanguínea, como nas lesões da pele ou na aplicação de medicamentos através de injeção intravenosa. As propriedades físicas e químicas de cada composto determinam grandemente a via pela qual ocorre a exposição.

Através de uma exposição ocupacional, os agentes tóxicos penetram no organismo do trabalhador, principalmente através da pele e pelos aparelhos respiratório e digestivo; há possibilidade de penetração, porém com importância bastante secundária, também através da mucosa (membrana que forra as cavidades do organismo e que segrega muco), de outras cavidades do organismo como pálpebras dos olhos, lábios da vulva, vagina, prepúcio, ânus, lábios, ou através da córnea, dos tímpanos e do orifício urinário.

PENETRAÇÃO ATRAVÉS DA PELE

Generalidades

A pele é o maior órgão do corpo humano. Representa 1/15 de seu peso, e é constituída por 6,5 a 11% de água. A pele provê o corpo com uma cobertura impermeável à água, que é contínua em toda a superfície corporal até a mucosa das cavidades. Está constituída por duas zonas distintas, uma mais externa, em contato com o meio ambiente, chamada epiderme, e a outra, conhecida como derme ou córion, e por apêndices cutâneos, quais sejam, unhas, glândulas sudoríparas e unidades pêlo-sebáceas (pêlos e glândulas sebáceas).

Sobre a epiderme, cuja espessura média é de 0,1 mm, existe uma emulsão superficial constituída por gordura e suor, que se torna espessa no verão e delgada no inverno. Essa emulsão impede a entrada rápida de água e de produtos químicos solúveis em água, podendo ser danificada por sabão, solvente, álcalis e água quente. Abaixo dessa emulsão existe uma camada mais externa da epiderme, queratinizada (células mortas), que resiste à água, aos ácidos, ao ultravioleta e danos físicos, podendo ser danificadas por álcalis, detergentes, solventes, e ação prolongada de água quente. A epiderme não possui capilares.

Na derme encontramos os capilares, os pêlos, as glândulas sebáceas e as glândulas sudoríparas. Os orifícios dos pêlos permitem a entrada de produtos químicos solúveis em lipídeos, gorduras e óleos.

Ação dos agentes tóxicos sobre a pele

A pele é normalmente uma barreira efetiva para a proteção dos tecidos que estão sob ela, e relativamente poucas substâncias são absorvidas através dela, em quantidades perigosas. Contudo podem ocorrer envenenamentos fatais, por exposições breves de áreas da pele, que não necessitam ser muito grandes. A pele, como via de contato, pode ser também importante quando é penetrada por agentes extremamente tóxicos, projetados contra ela, ou que ingressam

através de feridas abertas. Resumindo, quando um agente químico põe-se em contato com a pele, pode ocorrer o que segue.

1. A pele e a película de suor e gordura que a cobre podem atuar como uma barreira efetiva, que o agente não é capaz de perturbar, danificar ou penetrar.

2. O agente pode reagir com a superfície da pele e causar uma irritação primária. O irritante primário é uma substância que, se permanecer em contato com a pele, em dose suficiente, produzirá um efeito visível sobre a pele, no local do contato. Um irritante primário afetará a pele de qualquer trabalhador de um modo quase idêntico. A maioria dos irritantes primários tem uma ação clínica direta sobre a pele, através de um dos seguintes meios:

a) solventes de queratina — hidróxido de sódio, hidróxido de potássio e outros materiais alcalinos;

b) desidratação — ácidos inorgânicos e anidridos; como resultado, a pele torna-se seca, racha-se ficando tão sujeita a uma infecção secundária;

c) solventes de óleos e gorduras — solventes orgânicos; podem causar uma inflamação severa da pele;

d) precipitantes de proteína — arsênico, cromo e outros metais pesados alteram a estrutura química da pele e causam ulceração;

e) oxidantes — excessiva exposição a branqueadores, como os peróxidos e cloro, causa distúrbio e alteração no balanço fluido da camada de queratina;

f) redutores — ácido salicílico, ácido oxálico; reduzem quimicamente a camada mais externa da pele, levando a uma irritação das camadas mais internas.

g) estimulantes da queratina — certos compostos do petróleo e produtos de destilação do alcatrão, certos hidrocarbonetos clorados, arsênico podem levar à formação de tumores na pele.

3. O agente pode penetrar na pele, combinar-se com a proteína dos tecidos e produzir sensibilizações da pele. O sensibilizador é uma substância que não causa alteração visível na pele, num primeiro contato, mas pode conduzir a determinadas alterações na pele, que, após um período de incubação (de cinco dias para mais), após contato sobre a mesma, causará uma dermatite. A dermatite causada por um irritante primário usualmente ocorre após algumas horas ou em poucos dias. Exemplo de materiais que exercem uma potente ação sensibilizante são: aminas alifáticas, maleatos, resinas epóxicas, níquel, platina, diisocianatos.

4. O agente pode penetrar na pele através da via películo-sebácea, ingressar na corrente sanguínea, e atuar como um tóxico generalizado, afetando todo o organismo. Os agentes tóxicos que penetram através da pele devem ser solúveis em água e gordura, para penetrar bem. Os compostos iônicos, por exemplo, não penetram através da pele; a gasolina não penetra completamente. Substâncias como fenol, anilina, fenil-hidrazina, etileno-cloridrina, salicilato de metil, que são solúveis na água e em gordura, penetram através da pele.

Dermatoses ocupacionais

Uma dermatose ocupacional é definida como uma inflamação ou anormalidade da pele produzida diretamente, ou agravada, pelo ambiente de trabalho. O termo dermatose pode representar uma descoloração, uma mancha, um calo,

uma cicatriz, uma erupção inflamatória, ou mesmo um tumor. Por outro lado, o termo dermatite ocupacional refere-se somente a um tipo inflamatório agudo de dermatose ocupacional.

Numerosos fatores indiretos contribuem para o desenvolvimento de uma dermatose ocupacional: idade, raça, sexo, estação do ano, tipo de pele, pré-existência de outras doenças da pele, transpiração e higiene pessoal deficientes.

PENETRAÇÃO ATRAVÉS DO TRATO DIGESTIVO

A intoxicação ocupacional por essa via é muito menos comum, já que a frequência e o grau de contato com os agentes tóxicos depositados nas mãos, alimentos e cigarros é muito menor do que na inalação. Por isso, somente substâncias altamente tóxicas como o chumbo, o arsênio e o mercúrio podem causar preocupação nesse sentido.

O trato gastrointestinal pode ser visto como um tubo através do corpo, começando na boca e terminando no ânus. Apesar de estarem dentro do organismo, seus conteúdos estão essencialmente externos aos fluidos do corpo (sangue e linfa). Por isso, os agentes tóxicos no trato gastrointestinal podem produzir um efeito na superfície da mucosa que o reveste ou ser absorvido através dessa mucosa. Álcalis e ácidos fortes ou fenóis, em adequada concentração, podem causar um efeito necrosante sobre a mucosa do trato.

Substâncias solúveis em água poderão ser absorvidas através da mucosa bucal se permanecerem um tempo adequado na boca; álcool e nitroglicerina são exemplos. Em condições normais, não há absorção através das mucosas da boca e do esôfago, pois o tempo de residência de um agente tóxico, nessas porções do trato digestivo, é muito curto.

No estômago, o agente tóxico entra em contato com substâncias estomacais pré-existentes (partículas de alimentos e mucinas gástricas) e secreções (pepsina, lipase gástrica), além do ácido clorídrico (pH 0-1). São absorvidos somente os parcialmente solúveis em água, e a absorção será tanto mais rápida quanto menos alimento houver no estômago.

No duodeno, onde o pH varia de 12 a 14, dada a presença de soda cáustica (NaOH) e sais biliares, os agentes tóxicos solúveis em água, e cujas moléculas não são grandes, podem ser absorvidos. A saponificação de substâncias no duodeno pode levar a uma parcial absorção.

No intestino grosso, as substâncias solúveis em água podem ser absorvidas, e a ação de bactérias pode levar à formação de moléculas absorvíveis.

A via digestiva contribui, em forma passiva, para a ingestão de substâncias tóxicas inaladas. A porção que se deposita na parte superior do trato respiratório é arrastada para cima pela ação ciliar, e é posteriormente engolida, ingressando no organismo.

Resumindo, a absorção de um tóxico pelo sangue através do trato gastrointestinal é baixa, devido aos seguintes fatores:

- a) os alimentos e líquidos misturados com o tóxico contribuem para diluí-lo, e reduzem a absorção, devido à formação de material insolúvel;
- b) o intestino possui certa seletividade que tende a impedir a absorção de substâncias, ou a limitar a quantidade absorvida;

c) depois de ser absorvido pela corrente sanguínea, o material tóxico vai diretamente ao fígado, que, metabolicamente, altera, degrada e torna inócua a maior parte das substâncias.

PENETRAÇÃO ATRAVÉS DO APARELHO RESPIRATÓRIO

Generalidades

O trato respiratório é a via mais importante pela qual os agentes químicos entram no organismo. A grande maioria das intoxicações ocupacionais que afetam a estrutura interna do corpo é ocasionada por se respirarem substâncias contidas no ar. Essas substâncias podem ficar retidas nos pulmões ou outras partes do trato respiratório e podem afetar esse sistema, ou passar através dos pulmões a outras partes do organismo, levadas pelo sangue, à linfa ou às células fagocitárias.

A relativamente enorme superfície do pulmão (90 m² de superfície total e 70 m² de superfície alveolar), em conjunto com a superfície da rede capilar (140 m²), com seu fluxo sanguíneo contínuo, exerce uma ação extraordinária de absorção de determinadas substâncias presentes no ar inspirado. Apesar dessa ação, existem diversas substâncias industriais importantes que, mediante uma combinação firme com os componentes do tecido pulmonar, evitam sua solubilização pelo sangue ou a remoção fagocitária. Por exemplo, sílica e berílio. Nesses casos de resistência à solubilização ou à remoção, pode-se apresentar irritação, inflamação, fibrose, alterações malignas e sensibilização alérgica.

Mecanismo da respiração

Durante a inspiração, o ar, forçado pela pressão atmosférica, entra pelas aberturas nasais, passa pela faringe, laringe, traquéia, brônquios e bronquíolos, através dos bronquíolos terminais, os bronquíolos respiratórios e os dutos alveolares, entrando nos alvéolos ou sacos de ar, preenchendo o vazio criado pela expansão muscular involuntária, da cavidade torácica. A expiração pode ser ou por esforço muscular ou por contração elástica do tecido pulmonar, mas a contração respiratória normal parece ser inteiramente passiva. A função normal da respiração é fornecer oxigênio atmosférico, através das paredes alveolares, ao sangue, que o distribuirá para os tecidos e removerá o dióxido de carbono resultante da oxidação dentro das células. A troca de oxigênio e dióxido de carbono nos tecidos é, algumas vezes, referida como respiração interna ou do tecido, para distinguir da aeração dos pulmões ou respiração externa.

A árvore traqueobronquial é suportada por cartilagem, constituindo-se a traquéia numa série de anéis cartilagosos abertos ou crescentes, conectados na parte posterior por feixes de músculos. Os anéis estão unidos um ao outro por uma densa camada de tecido conjuntivo. O resultado é um tubo rígido capaz de determinados ajustamentos no diâmetro. Esse tubo divide-se em dois brônquios principais, esquerdo e direito. Os brônquios estão divididos e subdivididos em passagens bronquiais cada vez menores, até os bronquíolos terminais (0,5 mm de diâmetro). Esses bronquíolos terminais conectam-se com bronquíolos respiratórios que se ramificam nos dutos alveolares, terminando

CETESB - DIR. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL

BIBLIOTECA

nos alvéolos. Esses bronquíolos têm cerca de 1,5 a 0,2 mm de comprimento e cerca de 0,2 a 0,4 mm de diâmetro.

Normalmente os pulmões preenchem cerca de 80% da cavidade total do tronco. Um homem médio pode inalar cerca de 3,5 litros de ar por esforço, após uma exalação normal; do mesmo modo ele pode, esforçando-se, exalar 1 litro após uma inalação normal. A soma destes, cerca de 4,5 litros, é chamada capacidade vital. Há, além destes, de 1 a 1,5 litros de ar residual, que não pode ser expelido pela exalação forçada, mas que permanece nos pulmões para acriar o sangue, durante a exalação. Assim, há mais de 5,5 litros como volume total, dos quais menos que 10% é usado na respiração normal. Os aproximados 500 ml de ar inalado e exalado durante a respiração normal são chamados *tidal air* e, desses 500 ml, cerca de 150 ml é requerido para preencher a árvore tráqueo-bronquial ou espaço anatômico morto (porção do trato respiratório que consiste em passagens de paredes espessas, através das quais não há troca de gases entre o ar e o sangue). Durante uma inspiração normal de 500 ml, 150 ml de ar inalterado preenche o espaço morto, enquanto que 350 ml entram nos alvéolos. Então, durante a expiração, o ar alveolar, contendo de 5 a 6% de dióxido de carbono e de 12 a 14% de oxigênio, é forçado dos alvéolos através do espaço morto, deixando o espaço morto cheio com ar alveolar. A primeira parte da exalação é essencialmente ar atmosférico, e a parte final, ar alveolar. Durante a expiração, o ar alveolar não diluído pode ser obtido somente através de uma exalação forçada, no fim de uma respiração normal.

Regulação e controle da respiração

Os movimentos respiratórios são regulados e controlados quimicamente, bem como pelo sistema nervoso voluntário e involuntário. O dióxido de carbono age como um estimulante do centro respiratório, e a tensão de dióxido de carbono no sangue é o fator de controle mais significativo. O dióxido de carbono parece agir aumentando a concentração hidrogeniônica do centro respiratório. O ácido láctico, resultante de um esforço físico extremo, tem um efeito similar. A falta de oxigênio é também um estimulante, porém, sob condições normais, não é um fator significativo, pois a pressão parcial de oxigênio no ar alveolar deve cair marcadamente antes que a tensão do oxigênio do sangue arterial seja afetada significativamente.

A tensão ou pressão parcial do oxigênio no ar atmosférico, nas CNPT, é 20,95% de 1 atm, ou seja 159,2 mm Hg ao nível do mar. Sintomas significativos de perigo não ocorrem até que essa porcentagem atinja menos de 16%; a falta de consciência pode ocorrer em concentrações inferiores a 11%, enquanto que a respiração pára quando o oxigênio cai abaixo de 6%.

Função da hemoglobina

O transporte de oxigênio dos pulmões para os tecidos é realizado por meio de hemoglobina nas células vermelhas do sangue. Do mesmo modo, é transportado o dióxido de carbono removido dos tecidos. Cada 100 ml de sangue arterial contém cerca de 15 g de hemoglobina, que se combinam com 19 ou 20 g de oxigênio. No sangue que está em equilíbrio com o ar nas CNPT, cerca de 1% do oxigênio total está em solução no plasma. O sangue venoso normal

contém de 12 a 14 ml de oxigênio por 100 ml de sangue, e cerca de 1% deste está dissolvido no plasma. Na volta aos pulmões, o sangue venoso carrega 55 a 60% em volume de dióxido de carbono e deposita cerca de 10% deste, conforme ele se abastece com oxigênio.

Circulação e sua regulação

É evidente que a circulação é um fator importante na respiração. O volume de sangue é em geral um pouco maior que a capacidade pulmonar. Para um homem normal é de, aproximadamente, 6 a 7 litros.

O tempo requerido para um circuito completo do sangue varia com o exercício físico, a parte do corpo abastecida, e muitos outros fatores; contudo, em média, é realizado em menos de 1 min. O coração bombeia cerca de 4 a 5 litros de sangue por minuto, estando o homem em repouso (pulsação de 68 a 72/min). O exercício físico pode elevar ao dobro esse volume (pulsação 170 a 180). A temperatura do ambiente acima de 30 °C aumenta de 5 a 30% o volume por minuto. A digestão de alimentos e "as tensões" emocionais são fatores que também podem elevar esse volume.

ABSORÇÃO DE GASES E VAPORES PELA VIA RESPIRATÓRIA

GENERALIDADES

O sistema respiratório serve como principal via do organismo para absorção de substâncias tóxicas gasosas, presentes no ar dos ambientes ocupacionais. É necessário, portanto, ter um conhecimento dos fatores que governam a taxa respiratória de tomada e transporte interno do gás absorvido, durante o decorrer do tempo de exposição, e que determina a relação final de equilíbrio entre o gás no ambiente externo e as quantidades armazenadas nos vários compartimentos do organismo. É importante enfatizar que a magnitude da intoxicação está somente indiretamente relacionada com a concentração da substância tóxica no ar externo; ou seja é a taxa e o nível da dosagem, num determinado ponto crítico dentro do organismo, que determinam o grau de dano. A efetiva taxa de dosagem no órgão crítico está, naturalmente, relacionada com a concentração no ar ambiente, mas a relação varia de uma substância gasosa para outra, dependendo das solubilidades no sangue e nas substâncias que constituem os tecidos, e das taxas de reação física e química da substância com os componentes do corpo. Depende também da capacidade do sistema cárdio-respiratório, que funciona como um dispositivo de troca de gases, operando entre a atmosfera externa e o organismo, e do modelo de circulação sanguínea em relação aos vários compartimentos de armazenamento da substância absorvida dentro do corpo. Desse modo, diferentes níveis de concentração atmosférica podem ser necessários para produzir iguais graus de intoxicações, por substâncias com a mesma toxicidade inerente, mas com diferentes solubilidades, ou sob diferentes condições de desempenho respiratório e/ou circulatório do indivíduo exposto.

A Fig. 3.5 representa em diagrama, os fatores fisiológicos relacionados com a absorção de gases e vapores: a circulação do sangue, a respiração e os tecidos do organismo. Nesse diagrama, a câmara superior representa os pulmões.

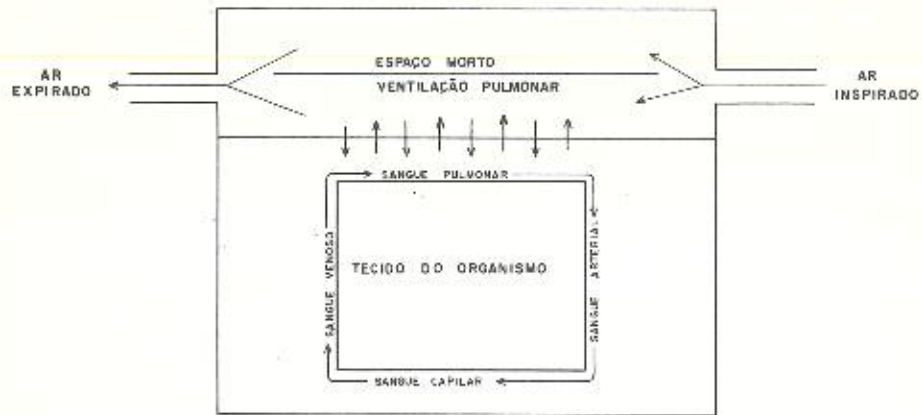


FIGURA 3.5 Diagrama do trato respiratório para mostrar as relações de espaço morto, ventilação pulmonar, circulação sanguínea e tecido orgânico

Por conveniência, a ventilação é considerada como um fluxo contínuo de ar — o ar inspirado entrando pela direita e o ar expirado saindo pela esquerda. A separação através da câmara divide o fluxo de ar, de modo que a porção acima da divisão não entra em contato com o sangue. Este representa o espaço morto; através dele o ar passa da inspiração para a expiração, sem apreciável difusão de algum gás que possa estar contido no sangue. O restante do ar é a ventilação pulmonar efetiva e entra em livre difusão com o sangue pulmonar.

PAPEL DA SOLUBILIDADE NA ABSORÇÃO DE GASES E VAPORES

A lei de Henry estabelece que a concentração de um gás que se dissolverá num líquido é diretamente proporcional a sua concentração no espaço livre sobre o líquido, podendo ser expressa por:

$$C_1/C_2 = K_s,$$

onde C_1 é a concentração molar do gás no líquido, C_2 a concentração molar do gás na fase-vapor, e K_s o coeficiente de solubilidade. Esse coeficiente é diferente para cada gás, cada líquido e cada temperatura.

Henderson e Haggard sugerem uma forma mais conveniente de expressar essa lei, quando aplicada na absorção de gases no sangue, através dos pulmões:

$$C/C_1 = K_d,$$

onde C é a concentração do gás no sangue, C_1 a concentração do gás no ar alveolar, e K_d o coeficiente de distribuição.

Exemplos

Solvente	K_d $\frac{\text{mg de solvente por litro sangue}}{\text{mg de solvente por litro ar}}$
álcool metílico	1 700
álcool etílico	1 300
álcool isoamílico	836

acetona	330
dictilcetona	157
éter etílico	15
benzeno	6,58
dissulfeto de carbono	5

O coeficiente de distribuição é constante para o mesmo vapor e líquido, numa dada temperatura, independente da concentração de vapor na atmosfera.

SATURAÇÃO DO ORGANISMO

Do exposto, é evidente que qualquer gás ou vapor presente no ar respirado tende a passar, através dos pulmões, para o fluxo sanguíneo, e ser distribuído pelo organismo. O tecido respiratório nos pulmões age como uma superfície trocadora entre o sangue e o ar. O sangue nos capilares está separado do ar nos alvéolos, por duas membranas com a espessura de uma célula, de forma que o equilíbrio entre o sangue nos pulmões e o ar alveolar é alcançado rapidamente. A acumulação do agente tóxico no organismo, como já foi mencionado, depende de uma série de fatores: concentração no ar, taxa de respiração, taxa de circulação, reatividade do material e outros.

Se um gás for muito solúvel no sangue, a saturação do organismo será lenta (requerendo dias), sendo muito dependente da ventilação dos pulmões, e levemente influenciada pelas alterações na circulação; por outro lado, num gás levemente solúvel, tal como o nitrogênio, a saturação é muito rápida (quase completa dentro de poucos minutos), sendo muito dependente da taxa de circulação, e levemente influenciada pela taxa de respiração.

No caso de gases e vapores que são solúveis em água e pouco ou nada reativos no organismo, como a acetona e o álcool metílico, a absorção e a distribuição pelo organismo são dependentes do conteúdo de água dos tecidos. Apesar dos vapores solúveis em gordura poderem ser transportados principalmente pelo conteúdo aquoso do sangue, eles tendem a concentrar-se nos tecidos gordurosos.

Com qualquer vapor não-reativo, apesar de as concentrações no sangue e no tecido serem proporcionais à concentração de vapor e função do tempo de exposição, a taxa de saturação para circulação e respiração constantes é uma relação peculiar para cada vapor, e independente da concentração do vapor. Em outras palavras, o mesmo tempo é requerido para o vapor atingir uma dada porcentagem de saturação no organismo, independentemente da concentração de vapor na atmosfera respirada.

Não é prático mencionar o tempo exato requerido para saturação completa, pois este é uma variável indefinida. É, contudo, prático, estabelecer um tempo para uma determinada porcentagem de saturação, como 50, 60, 70, 80 ou mesmo 90% de saturação. Após 90% de saturação, a curva de absorção para um gás ou vapor de baixa reatividade tornar-se assintótica. Com um vapor relativamente insolúvel em água, como o benzeno, a saturação do sangue ocorre tão rapidamente que, mesmo o sangue venoso pode atingir 70 a 80% da saturação dentro de 30 min, apesar de que uma saturação relativamente completa pode requerer de 2 a 3 dias. Isso pode ser explicado pelo fato de o tecido gorduroso, que tem uma afinidade maior pelo benzeno, remover e armazenar o

benzeno transportado pelo sangue; esse tecido gorduroso tem, em muitos casos, um insuficiente abastecimento de sangue e, por isso, requer um período maior para atingir o equilíbrio.

O álcool metílico é um típico vapor, altamente solúvel na água. São necessárias cerca de 24 h de inalação do mesmo, para o sangue atingir 70% de saturação (cerca de cinquenta vezes mais tempo que o necessário para o benzeno atingir a mesma porcentagem da saturação); contudo, para uma saturação relativamente completa, o metanol requer um pouco mais do tempo que o benzeno, pois, no caso do metanol, os tecidos gordurosos, com insuficiente abastecimento de sangue, não são reservatórios para o metanol, e a distribuição pelo corpo no equilíbrio é diretamente proporcional ao conteúdo de água de cada tecido. Tanto o benzeno como o metanol são exemplos de vapores pouco reativos.

O dissulfeto de carbono pode ser citado como um exemplo de vapor relativamente insolúvel na água e moderadamente reativo; aproximadamente 90% de dissulfeto de carbono é encontrado, no organismo, metabolizado.

A diferença na concentração de vapor entre o sangue arterial e o venoso depende da solubilidade ou do coeficiente de distribuição do vapor. Com um vapor muito solúvel, a diferença é desprezível, enquanto que, para um vapor levemente solúvel, a diferença é marcante, como é o caso do benzeno. Isso acontece porque o sangue, passando pelos pulmões, não é suficiente para absorver uma porcentagem apreciável de vapor alveolar. Isso é importante, no caso de breves exposições a concentrações altas de vapores levemente solúveis.

É grande a quantidade de sangue arterial fornecido ao cérebro; por isso, breves exposições a altas concentrações de gases ou vapores anestésicos, de baixa solubilidade, produzem rápidos efeitos, mesmo que seja baixo o grau de saturação do organismo. A administração de éter etílico é um bom exemplo desse fato. Moderadas concentrações podem ser administradas, causando inconsciência após 30 min ou mais, com relativa duração; administrando-se altas concentrações, a indução à inconsciência é rápida, e o tempo de recuperação ocorre rapidamente, após remover a exposição, supondo que a mesma não tenha sido prolongada. É, por isso, importante conhecer as concentrações média e máxima do vapor presente no ambiente ocupacional.

CONCENTRAÇÕES RELATIVAS DE VAPOR NO SANGUE, TECIDOS E AR EXPIRADO

A concentração de um vapor no sangue é controlada pela concentração do vapor no ar inspirado, pela duração da exposição e pela solubilidade do vapor no sangue.

Henderson e Haggard estabeleceram que a concentração de qualquer vapor na urina é regulada pela concentração do vapor no sangue arterial, que passa através do rim no momento da secreção, diferindo da concentração no sangue somente pela relação de solubilidade do vapor nos dois líquidos, que é aproximadamente 1:1 para a maioria dos vapores. Essa relação seria esperada, do ponto de vista físico, e parece ser verdadeira para diversos vapores; contudo a concentração de benzeno na urina é vinte vezes maior do que no sangue. Essa concentração pode indicar que os rins têm o poder de extrair benzeno do sangue em circulação.

Para os tecidos, em geral, as quantidades relativas de um vapor contidas nos mesmos, em equilíbrio, são diretamente proporcionais à solubilidade do vapor nos diversos tecidos; contudo os tecidos com maior suprimento de sangue e menor capacidade de saturação atingem o equilíbrio antes dos tecidos com maior capacidade de saturação e menor suprimento de sangue. Do mesmo modo, os tecidos com maior suprimento de sangue e menor capacidade de saturação, dessaturam-se mais rapidamente.

A concentração de vapor no ar alveolar, durante acumulação, equilíbrio ou dessaturação, regula a concentração do vapor no sangue arterial no momento em que deixa os pulmões e, por isso, pode ser utilizada como uma indicação da concentração do sangue arterial. Em saturação relativamente completa, a concentração de vapor no ar alveolar é a mesma que no ar ambiente, com as devidas correções para temperatura e umidade relativa. Com os vapores mais solúveis, a concentração do ar alveolar, em qualquer ponto, durante a acumulação, pode ser usada para estimar a concentração média no ar ambiente, sendo dados o tempo de exposição, a curva de saturação do vapor e seu coeficiente de distribuição.

MECANISMOS DE AÇÃO DAS SUBSTÂNCIAS TÓXICAS — MECANISMOS FÍSICOS E ENZIMÁTICOS

INTRODUÇÃO

As substâncias tóxicas exercem seu efeito por meios físicos, por meios químicos ou fisiológicos (enzimáticos), ou por uma combinação de ambos. A maioria das substâncias não exerce habitualmente seu potencial tóxico total, devido às ações destrutivas do organismo, de seus mecanismos de eliminação mediante a urina, o suor, as fezes e o ar exalado, ou porque se depositam em forma inativa em certos tecidos como ossos, pele, pêlos e unhas.

Deve-se aceitar que uma classificação dos mecanismos tóxicos se baseie necessariamente no conhecimento existente, e que varie consideravelmente de uma disciplina para outra. Em enzimologia, por exemplo, está ao nível molecular e, em alguns casos, submolecular. Tal situação permite, obviamente, uma definição mais exata desses mecanismos, que, em outros casos, onde o conhecimento está a um nível celular ou orgânico. Um mecanismo considerado atualmente como físico poderá ser reconhecido, no futuro, como químico ou enzimático, refletindo a aquisição de novos e mais profundos conhecimentos. Quando todos os mecanismos puderem ser explicados ao nível submolecular, a classificação resultante será inteiramente diferente.

MECANISMOS FÍSICOS DE AÇÃO

As substâncias nocivas, que têm uma ação solvente ou emulsionante, podem produzir, por meio de contato repetido ou prolongado, uma dermatite seca e escamosa. Esse efeito é atribuído comumente à remoção física dos lipídeos superficiais, mas pode ser também causado pela desnaturação da queratina ou por lesão da barreira aquosa da pele. Os gases, os vapores e os líquidos alcalinos

ou ácidos solúveis podem dissolver-se na película aquosa protetora do olho, nas mucosas do nariz e da garganta, e na transpiração, produzindo irritação. Podem ainda corroer os dentes e produzir alterações na estrutura capilar.

Nas superfícies internas do corpo, os pulmões e o trato gastrointestinal, o contato físico com quantidades não-fisiológicas das substâncias produz irritação. Isso pode conduzir à inflamação ou contração, como na constrição reflexa das passagens respiratórias, depois da inalação de um gás irritante, com produção de tosse, sufocação ou asfixia. O efeito sobre o trato gastrointestinal superior pode incluir vômitos e, em pontos mais profundos, movimentos peristálticos e defecação.

Os gases inertes podem ocasionar efeitos sérios e, com freqüência, fatais, simplesmente por deslocamento físico de oxigênio, o que conduz à asfixia. Sob pressão, gases inertes como o nitrogênio podem produzir a enfermidade do ar comprimido, ao se dissolverem em quantidades não-fisiológicas no sangue, linfa e espaços interceculares, ou podem romper membranas delicadas como o tímpano do ouvido. Uma diminuição repentina ou demasiada rápida da pressão produz danos por descompressão. Os menos inertes como dióxido de carbono e o oxigênio, a pressões sobre atmosférica, podem ocasionar narcose e outros efeitos mais sérios como danos aos nervos e cérebro.

A adsorção física de gases ou vapores sobre partículas sólidas ou líquidas pode, após inalação, produzir efeitos fisiológicos desproporcionais aos que poderiam ser previstos por sua concentração antes da adsorção. Para explicar essa ação sinérgica, foi desenvolvida uma teoria física que se baseia nas propriedades moleculares dos gases; postula-se que se produzem capas de gás adsorvidas sobre as partículas e que, ao serem inaladas, levam ao tecido pulmonar concentrações enormemente superiores do gás, transformando-se em fontes puntiformes e localizadas de contato. Produz-se sinérgismo quando a velocidade de desprendimento do gás das partículas é rápida, e antagonismo quando esse desprendimento é muito lento ou inexistente.

Um exemplo de sinérgismo é a inalação de uma mistura de anidrido sulfuroso e cristais de cloreto de sódio, cujos efeitos de bronquiocontração são maiores que os produzidos pela inalação de óxidos de nitrogênio e ferro dos fumos da solda; a redução do efeito explica-se postulando-se a formação de uma capa de óxido de nitrogênio firmemente combinada sobre as partículas de óxido de ferro.

As partículas radioativas produzem deslocamento e ruptura das uniões cromosômicas, aparentemente devido ao desprendimento local de energia.

MECANISMOS DE AÇÃO QUÍMICOS OU FISIOLÓGICOS

Generalidades

As substâncias que atuam quimicamente para produzir efeitos nocivos aos órgãos ou tecidos do corpo apresentam duas modalidades básicas, a depressão ou o estímulo das vias normais do metabolismo. Esses dois efeitos são produzidos por uma variedade de mecanismos que, na maioria dos casos, são conhecidos somente de uma maneira geral, apesar de que, para algumas substâncias importantes como o monóxido de carbono, cianeto, arsênico e urânio, os mecanismos de ação são conhecidos detalhadamente. Em outros casos, esse conhecimento é parcial.

Pode ocorrer igualmente que uma substância tenha mais de uma modalidade de ação, ou que atue por estímulo de um sistema enzimático a concentrações baixas, e por depressão a uma concentração maior. Essa é uma característica de muitos tóxicos, sendo os exemplos mais conhecidos o arsênico, o cobalto, o vanádio, o clorofórmio e o benzol.

Stokinger considerou conveniente agrupar os mecanismos químicos que produzem dano sob as seguintes categorias:

a) mecanismos primários originados na interação do tóxico a um nível enzimático;

b) interações não-enzimáticas que envolvem a substituição ou uma combinação química mais ou menos direta das substâncias tóxicas com um constituinte corporal, sem intervenção de enzimas;

c) mecanismos secundários que podem implicar ações, tanto enzimáticas como não-enzimáticas, as que produzem danos somente indiretamente, e como consequência da presença da substância tóxica.

Mecanismos enzimáticos primários

CONSIDERAÇÕES GERAIS

A maior parte da atividade metabólica do organismo é o resultado da atividade das enzimas, que são catalisadores biológicos formados em todo o corpo por células vivas; é razoável supor que a maior parte dos mecanismos tóxicos corresponda a alguma forma de interferência com a atividade enzimática normal.

As ações enzimáticas ocorrem em todo o corpo sem se restringirem a qualquer ponto em particular, apesar de as células do fígado efetuarem uma proporção maior da atividade metabólica do organismo. Igualmente ativos, sem dúvida, apesar de menos diversificados, são outros tecidos como o pulmão, rins, intestino, cérebro e tecidos nervosos, da mesma forma que os ossos. Disso podemos inferir que podem apresentar-se mecanismos enzimáticos nos quais a enzima se situa nos terminais nervosos, dentro da célula nervosa ou em sua superfície.

Pode-se observar que dois grupos de enzimas, as fosfatases e as desidrogenases, intervêm habitualmente na maioria dos mecanismos de intoxicação. Isso se deve ao fato de esses dois grupos estarem inclusos em numerosos e importantes sistemas enzimáticos do corpo. É importante enfatizar que, ao metabolizar uma substância tóxica, a enzima está simplesmente efetuando sua função normal de metabolização dos alimentos naturais; não existem enzimas especiais para os tóxicos. Ainda que as substâncias sejam tóxicas por uma variedade de causas, uma delas é a freqüente inabilidade das enzimas em metabolizá-las completamente e destruí-las.

As enzimas são proteínas, em cadeias entrelaçadas e altamente complexas de aminoácidos, que possuem uma notória e específica orientação espacial de seus constituintes químicos, orientação esta que permite que se amoldem no substrato, com o qual se combinam para modificá-lo. Reconhece-se atualmente que certas enzimas, até agora consideradas homogêneas em composição e ação,

podem consistir em vários componentes diferentes que atuam, sem dúvida, sobre o mesmo substrato; esses componentes são chamados de isoenzimas.

Os substratos sobre os quais as enzimas atuam com maior eficiência são os que possuem a estrutura e configuração química dos alimentos naturais. As substâncias estranhas, tóxicas, não possuem esses requisitos espaciais, e a isso se deve o fato de serem metabolizadas de forma incompleta.

Muitas enzimas têm necessidades adicionais de especificidade, e necessitam de um metal ou de uma vitamina, ou ambos, como ativadores. Por exemplo, a enzima carboxilase, que rompe o anidrido carbônico de certos ácidos orgânicos, necessita de vitamina B₁ e de íons de magnésio, como constituintes indispensáveis, para poder funcionar.

Como as enzimas são proteínas, possuem as propriedades químicas e físicas destas, e são desnaturizadas por: (a) calor, como nas queimaduras; (b) alterações marcadas na acidez ou na alcalinidade, como, por exemplo no contato com agentes corrosivos; (c) agentes químicos desnaturizantes, como a uréia em altas concentrações. Esses agentes causam igualmente alterações estruturais e configuracionais da proteína, que perde sua especificidade característica e, com ela, sua atividade catalítica. Contudo as enzimas podem inativar-se, em diversos graus, por métodos menos drásticos. As que necessitam de um metal específico como ativador, serão inativadas por qualquer agente que elimine ou inative esse metal (cianeto sobre o ferro da enzima). Outra forma habitual de inibição enzimática produz-se pela competição com outra substância cuja estrutura é suficientemente similar ao substrato natural, mas que não satisfaz totalmente suas necessidades espaciais.

Como outros catalisadores, as enzimas teoricamente não sofrem alterações durante as reações em que participam. Os aspectos fundamentais da atividade enzimática em relação à toxicidade podem ser resumidos como segue. A enzima combina-se com a substância tóxica. Essa combinação pode ser inibida parcial ou completamente pelo tóxico, ou a enzima pode atuar sobre este de uma forma mais ou menos incompleta, possivelmente com produção de outras substâncias ainda mais tóxicas. Se for bloqueada a atividade de uma enzima crítica, poderá interromper-se alguma função vital que ocasione alteração dos constituintes celulares, em quantidade ou tipo ou, ainda, a morte da célula.

Os mecanismos enzimáticos atualmente conhecidos são: (a) combinação direta; (b) inibição competitiva; (c) síntese letal; (d) enzimas tóxicas; (e) enzimas induzidas.

COMBINAÇÃO DIRETA

A combinação direta com os grupos ativos da estrutura enzimática é o modo mais simples pelo qual um agente tóxico pode modificar a ação de uma enzima. Por exemplo, a ação do mercúrio e do arsênico. Havendo a combinação direta, a atividade da enzima é bloqueada, produzindo um dano à célula, ao órgão e ao hospedeiro. Os cianetos também podem bloquear a ação de enzimas que possuem uma quantidade elevada de metal, devido à formação de uma enzima cianeto-metálica inativa. O bloqueio desse sistema em um grau significativo produz o conhecido envenenamento fatal por cianeto. O ozona e o dióxido de nitrogênio destroem as enzimas por oxidação de seus grupos funcionais, produzindo sua desnaturação e inativação.

Um dos mecanismos de inibição mais comumente encontrados em exposições ocupacionais é o da inibição da colinesterase, que regula a ação nervo-muscular por destruição da acetilcolina, substância que excita os músculos, e que, se não destruída, pode atuar como veneno. Numerosos pesticidas, principalmente os fosfatos orgânicos, atuam bloqueando essa ação enzimática e permitindo a acumulação de quantidades excessivas de acetilcolina, o que conduz à paralisia.

INIBIÇÃO COMPETITIVA

Produz-se pela competição entre os metabólitos normais e a substância tóxica, ou entre ativadores essenciais e a substância tóxica. Um exemplo é o aumento da toxicidade que ocorre depois de uma exposição simultânea a dois pesticidas de estrutura similar, o malathion e o EPN (etil-P-nitrofeniltiobenzeno fosfatado). O EPN é altamente tóxico, e a toxicidade do malathion é muito menor. Quando ambos estão presentes concomitantemente no organismo, o malathion se iguala ao EPN em toxicidade, que, em ação conjunta, é muito maior do que a esperada. Como as duas substâncias têm estruturas químicas similares, o EPN compete com êxito para atuar sobre a mesma enzima que hidrolisa, e que reduziria a toxicidade do malathion.

SÍNTESE LETAL

Corresponde à síntese de um novo produto capaz de exercer um efeito tóxico ao interferir com processos metabólicos normais. Por exemplo, ao ser absorvido o veneno para ratos 1080 (flúor-acetato de sódio), uma enzima transfere átomos de flúor do veneno ao ácido cítrico, que é um intermediário importante no ciclo metabólico. O flúor-citrato originado rompe a cadeia metabólica de atividade, detendo a respiração dos tecidos e produzindo a morte.

ENZIMAS TÓXICAS

Um mecanismo pouco usual que ocorre é uma enzima tóxica. Conhecem-se alguns exemplos associados à introdução no organismo de substâncias como venenos de cobras e de abelhas, e toxinas bacterianas. Essas substâncias possuem enzimas (fosfatidases) que afetam a capacidade de transporte de oxigênio pelo sangue, ou outras (proteolíticas) que impedem a coagulação do sangue.

ENZIMAS INDUZIDAS

Os outros mecanismos apresentados têm uma ação depressiva, as enzimas induzidas, ou seja, as quantidades adicionais de enzimas produzidas por síntese fisiológica, como resposta à presença de um agente indutor (substância tóxica), atuam como estimulantes da ação enzimática. Um bom exemplo desse mecanismo constitui o aumento de produção de α -globulinas no soro, produzido pelo cobalto absorvido em quantidades relativamente baixas.

MECANISMOS DE AÇÃO DAS SUBSTÂNCIAS TÓXICAS — MECANISMOS NÃO-ENZIMÁTICOS E TÓXICOS SECUNDÁRIOS

MECANISMOS NÃO-ENZIMÁTICOS

Combinação química direta

Está entre os mecanismos de intoxicação melhor conhecidos e compreendidos. Por exemplo, o monóxido de carbono combina-se rapidamente com a hemoglobina, formando um novo composto, a carboxiemoglobina, incapaz de desempenhar a função normal de transporte de oxigênio aos tecidos.

Liberação de constituintes corporais

Trata-se de um mecanismo não tão bem entendido, mas para o qual existe uma enorme quantidade de evidência indireta; é a liberação de substâncias tóxicas, em quantidades anormais, dos constituintes naturais do corpo, que produzem dano, e mesmo a morte. Os casos são numerosos e incluem substâncias tão comuns como os alergênicos da febre do feno, e outros alergênicos como os diisocianatos. A introdução dessas substâncias produz a liberação local de histamina ou seus similares em quantidades elevadas, com o característico desenvolvimento de inflamação, de edemas e de outros sintomas.

Existe também evidência acumulada de que o mecanismo comum pelo qual numerosas substâncias químicas exercem sua ação tóxica, pode ser a liberação de hormônios dos nervos. Por exemplo, tem-se demonstrado que o tetracloreto de carbono causa a descarga maciça nos nervos simpáticos centrais de epinefrina. Essa descarga, possivelmente auxiliada por uma ação enzimática, produz um estímulo do fornecimento nervoso aos vasos sanguíneos do fígado, ocasionando: (1) restrição do fluxo sanguíneo do fígado, redução do transporte de oxigênio e, em última instância, a característica necrose centrilobular do fígado e (2) liberação de ácidos graxos não-esterificados e sua acumulação no fígado, com produção do bem conhecido "fígado graxo" do tetracloreto de carbono.

Quelação

Um mecanismo cada vez mais aceito como via de ação tóxica é a quelação, termo aplicado à combinação química de uma estrutura orgânica com um metal, na qual este fica atado muito firmemente à substância orgânica, mediante ligações iônicas ou não-iônicas. Por exemplo, o agente terapêutico EDTA (ácido etilenodiaminotetracético) liga os metais por quelação. Atualmente se acredita que muitas drogas e antibióticos atuam por quelação, exercendo seu efeito de diversos modos:

a) pela remoção de metais biologicamente ativos, normalmente unidos à célula ou a seus componentes, produzindo inativação e dano à célula; por exemplo, o tratamento do envenenamento por chumbo mediante o EDTA pode remover outros metais também, como o zinco requerido para funções importantes de certas enzimas do rim;

- b) pela reação com metais intracelulares;
- c) pela quelação firme com um constituinte fixo dos tecidos; acredita-se que este seja o mecanismo pelo qual o boro exerce sua ação em forma de borato.
- d) pelo aumento da absorção de um agente tóxico; conhecem-se exemplos de intoxicação produzida por um aumento anormal da absorção na corrente sanguínea, ocasionado por um composto quelante; o ferro, normalmente inócuo, quando absorvido pelos mecanismos reguladores habituais, pode, sob circunstâncias pouco usuais, alcançar níveis tóxicos ao quelar-se para formar uma substância solúvel de fácil absorção.

Estímulo de mecanismos de imunidade

Apesar de esse fenômeno ser conhecido há muito, ainda não se determinou completamente o significado tóxico do estímulo dos mecanismos de imunidade, que tem como efeito a produção de uma nova estrutura antigênica, pela combinação de uma substância tóxica com constituintes do corpo, geralmente proteínas. Acredita-se que essa seja a base da sensibilidade da pele, que se produz pelo contato com certos reativos orgânicos como, por exemplo, os cloronitrobenzenos.

Outro exemplo importante desse mecanismo são diisocianatos, que, inalados, manifestam uma avidéz pouco usual a se combinarem com as proteínas do corpo, produzindo a sensibilização alérgica do trato respiratório.

MECANISMOS TÓXICOS SECUNDÁRIOS

Introdução

Agrupam-se nessa categoria os processos metabólicos e os mecanismos tóxicos que não correspondem à ação direta de uma substância, mas que se desenvolvem, seja

- a) como resultado de sua alteração metabólica após a entrada no organismo;
- b) como consequência de uma acumulação de subprodutos tóxicos produzidos pela ação direta inicial. Nesse caso, o maior dano produz-se em um lugar do corpo que não o da ação tóxica original.

A maioria desses mecanismos é desenvolvida por enzimas.

Mecanismos de desintoxicação (metabólicos)

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Estão incluídas todas as atividades metabólicas com que o organismo atua sobre uma substância tóxica, em contraposição, às ações que essas substâncias desenvolvem sobre o organismo, e que já foram consideradas nos mecanismos enzimáticos primários e nos mecanismos não-enzimáticos. Os mecanismos de desintoxicação são aqueles desenvolvidos pelo organismo para eliminação dos tóxicos e incluem oxidação, redução e síntese, principalmente.

Aparentemente o organismo não atua sempre em seu próprio favor, ao manipular uma substância estranha e geralmente inócua. Essas reações, especial-

mente desvantajosas, produzem-se simplesmente porque seu metabolismo se desenvolve de um modo bem definido, derivado do passado aproveitamento dos componentes alimentícios. Estes são os únicos recursos com que enfrenta as substâncias não-alimentícias, e os utiliza na medida em que eles podem atuar sobre substâncias estranhas, que têm estruturas químicas similares, em alguns aspectos, às dos alimentos. Para que essa ação indiscriminada tenha um resultado, favorável ou desfavorável, para o organismo, depende unicamente da natureza do produto resultante, e não de uma ação seletiva ou guiada das enzimas.

OXIDAÇÃO

É uma das atividades metabólicas contra substâncias estranhas mais habituais. Inclui a oxidação de álcoois a aldeídos, de aldeídos a ácidos, de hidrocarbonetos aromáticos a fenóis e quinonas, de grupos alquílicos a álcoois e ácidos, a remoção oxidativa do amoníaco das aminas, a oxidação dos compostos orgânicos de enxofre, a oxidação destrutiva dos compostos carbônicos cíclicos, a remoção de halogênios de hidrocarbonetos halogenados e outras reações, incluindo oxidação de certos íons metálicos.

Um exemplo bem conhecido é o do álcool metílico, no qual se acredita que os mecanismos secundários de oxidação desempenhem um papel dominante na toxicidade de um álcool. O álcool metílico exerce seu efeito nocivo sobre o nervo óptico, chegando a produzir cegueira, mediante sua oxidação a aldeído fórmico, que interfere com a síntese oxidante das enzimas. O álcool etílico, e presumivelmente outros álcoois, oxidam-se por via metabólica ao aldeído correspondente, que é responsável em parte pelos efeitos tóxicos:



Talvez um dos exemplos mais importantes e interessantes no qual os mecanismos de oxidação desempenham um papel decisivo na resposta tóxica final, constitua a oxidação do hidrocarboneto cancerígeno 3,4-benzopireno. As teorias atuais sobre carcinogêneses consideram que algum produto oxidado, e não o hidrocarboneto original, é uma etapa do processo que conduz ao desenvolvimento de um tumor. Foram identificados no organismo vários produtos oxidados do 3,4-benzopireno, incluindo produtos fenólicos e várias quinonas.

De modo similar, supõe-se que os efeitos sérios do benzol sejam o resultado da oxidação do núcleo benzênico, primeiro a fenol (monoidroxibenzol), e logo a diidroxí e triidroxifenol, que são considerados responsáveis pela toxicidade do benzol. Se a oxidação continuar, poderá formar-se quinona e, numa etapa mais avançada, a ruptura do anel benzênico, formando o inócuo ácido múcico $\{\text{COOH}(\text{CH}_2)_6\text{COOH}\}$.

O Parathion constitui um exemplo notório do papel dos mecanismos de oxidação no desenvolvimento da toxicidade de uma substância orgânica. Esse pesticida, que contém enxofre na molécula, é relativamente inócuo até que o oxigênio substitua o enxofre, formando o Paraoxon, extremamente tóxico, que inibe por completo a colinesterase.

REDUÇÃO

É muito menos comum que a oxidação, mas diversos tipos de substâncias orgânicas estranhas metabolizam-se nessa forma, produzindo substâncias mais nocivas que a primitiva. Os nitrogrupos orgânicos reduzem-se a aminas. Alguns aldeídos reduzem-se a álcoois. Uniões insaturadas podem adicionar hidrogênio, reduzindo-se.

Em geral, a redução, ao contrário que a oxidação, tende a produzir substâncias menos tóxicas que a original, como ocorre na redução dos aldeídos a álcool. Por outro lado, a redução metabólica do nitrobenzeno dá origem a numerosos produtos, entre os quais o paraminafenol, que é cerca de oitenta vezes mais tóxico que o nitrobenzol.

Entre os íons inorgânicos, o arsênio pentavalente é relativamente inativo no organismo, até que se reduz ao estado trivalente; o manganês é inativo no estado tetravalente, pois sua forma fisiologicamente ativa é a trivalente.

SÍNTESE

A síntese, na qual o organismo contribui com algum constituinte do tecido para a conversão de uma substância estranha, é um dos métodos habituais de eliminação de um agente tóxico. Conhece-se uma dezena de mecanismos capazes disso: a adição, a uma substância tóxica, de outras, como sulfatos, enxofres, glucose e derivados protéicos, produz em geral uma verdadeira desintoxicação e diminui o efeito nocivo da substância estranha:



Deve-se enfatizar que a desintoxicação por síntese não está inteiramente livre de danos ao organismo, que, ao proporcionar alguns de seus constituintes, poderá privar-se de quantidades vitais dessas substâncias se a síntese for prolongada.

Complicações secundárias

Um mecanismo secundário, de natureza muito geral e de considerável importância toxicológica, corresponde à ação indireta de um agente, de seus produtos metabólicos, ou de ambos, que, após ocasionar um dano primário dá origem à produção ou acumulação de substâncias deletérias capazes de afetar um ponto secundário.

A ação do urânio hexavalente constitui um exemplo claro desse mecanismo secundário. Começa afetando os rins, impedindo a eliminação normal de resíduos como a uréia, o amoníaco e outros. Estes se acumulam na corrente sanguínea e danificam o fígado, produzindo a degeneração gordurosa desse órgão. O coração sofre um dano indireto similar quando o pulmão, pela ação direta de algum tóxico, restringe o fluxo sanguíneo, exigindo-lhe um esforço indevido.

Há numerosos outros exemplos. Com efeito, a função do corpo está tão organizada que muito poucas alterações significativas de um órgão, ou parte

de um tecido, carecem de repercussão de algum outro órgão, mesmo num ponto muito remoto. As atividades entrelaçadas das glândulas endócrinas, com seus respectivos hormônios e sua dependência das vitaminas e minerais para sua função normal, formam a base desse grupo de mecanismos secundários.

Um exemplo interessante de complicação desses sistemas sensíveis endócrinos entrelaçados é encontrado na simples inalação de concentrações não-letais de ozona, o que altera a atividade das glândulas supra-renais e perturba o consumo normal de iodo da glândula tireóide, que, por sua vez, altera a atividade do hormônio tireóideo, estimulante da pituitária.

TRANSPORTE, ARMAZENAMENTO E ELIMINAÇÃO DOS AGENTES TÓXICOS

TRANSFERÊNCIA DE SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS ATRAVÉS DE MEMBRANAS DO ORGANISMO

A absorção e a excreção de substâncias químicas requerem a transferência dessas moléculas através de diversas membranas, tais como o epitélio gastrointestinal, os túbulos renais, o parênquima hepático, a pele, a placenta, e mesmo as estruturas membranosas intracelulares. Essa transferência de substâncias químicas através de membranas biológicas pode resultar de quatro mecanismos:

- a) simples difusão, devido à existência de um gradiente de concentração;
- b) filtração através dos poros da membrana — esse mecanismo é importante na transferência de moléculas hidrófilas como a uréia;
- c) pinocitose — resultado da formação de invaginação da membrana celular, que engloba as gotículas do fluido extracelular;
- d) transporte ativo — esse procedimento faz intervir substâncias carregadoras, que transportam o corpo químico mesmo de encontro a um gradiente de concentração.

Para as substâncias estranhas, a transferência resulta geralmente de uma simples difusão. A velocidade de difusão da substância química será função:

- a) do gradiente de concentração existente através da membrana, $C_1 - C_2$;
- b) da superfície disponível da membrana para a transferência, A ;
- c) da espessura da membrana, d ;
- d) da constante de difusão da substância transferida, K .

A constante de difusão (K) é função do peso molecular da substância considerada, da forma da molécula, do grau de ionização da substância e da solubilidade em lipídeos da substância (considera-se que as membranas biológicas comportam-se como um filme lipídico). A velocidade de difusão é dada pela lei de Fick:

$$v = \frac{KA(C_1 - C_2)}{d}$$

Somente as substâncias orgânicas lipossolúveis não-ionizadas passam facilmente através das membranas. Do mesmo modo, as substâncias orgânicas não-ionizáveis serão transportadas em função da sua lipossolubilidade, e as

substâncias ionizáveis em função de seu grau de ionização e da lipossolubilidade da forma não-ionizada.

O grau de ionização de um eletrólito orgânico é função de sua constante de ionização (K_a) e do pH do meio. Pode-se calcular, através da equação de Henderson-Hasselbach:

a) para os ácidos,

$$pK_a - \text{pH} = \log \left(\frac{\text{forma não-ionizada}}{\text{forma ionizada}} \right);$$

b) para as bases,

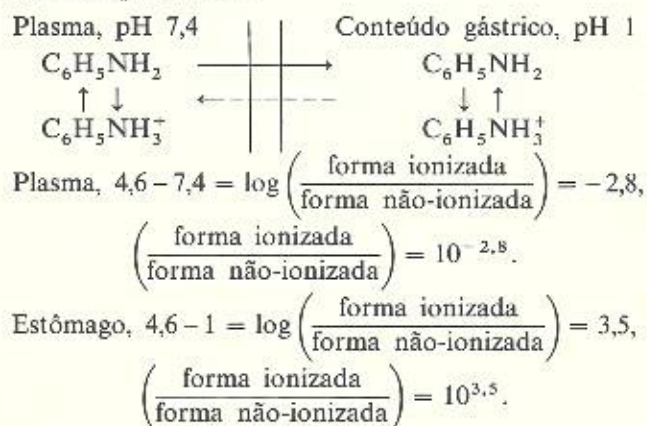
$$pK_a - \text{pH} = \log \left(\frac{\text{forma ionizada}}{\text{forma não-ionizada}} \right).$$

Lembremos que um ácido com baixo pK_a ($pK_a = -\log K_a$) é um ácido forte, e um ácido com um pK_a elevado é um ácido fraco. Uma base com um pequeno pK_a é uma base fraca. Desse modo, uma substância ácida com um pK_a elevado (ácido fraco) existirá essencialmente sob a forma não-dissociada no estômago (pH 1), mas será largamente ionizada no plasma (pH 7,4); a absorção pelo estômago far-se-á facilmente.

Inversamente, uma base fraca (anilina, pK_a 4,6) permanecerá no estômago sob a forma ionizada, mas permanecerá não-ionizada no plasma. A anilina vai então difundir-se do plasma para o estômago, até que a concentração da forma não-ionizada seja a mesma dos dois lados da barreira gástrica. No intestino, pelo contrário (pH, 5,3), ela estará presente sobretudo sob a forma não-ionizada, e difundir-se-á do intestino para o plasma.

Para as substâncias com mesmo pK_a , sua lipossolubilidade determinará sua passagem preferencial através das membranas biológicas.

Exemplo. Anilina, pK_a 4,6 (base)



As substâncias absorvidas na boca não estão sujeitas à influência do suco digestivo e não devem passar primeiro pelo fígado (lugar importante do metabolismo) antes de atingir a circulação em geral. Numerosas substâncias químicas, como, por exemplo, os ácidos fracos, serão rapidamente absorvidas no estômago, pois elas estarão principalmente sob a forma ionizada no plasma.

Os ácidos fortes e as bases ionizadas não serão absorvidos pelo estômago. A velocidade de absorção das substâncias que se difundem através da parede intestinal é também determinada por suas constantes de ionização e suas lipossolubilidades.

Além da constante de ionização e da lipossolubilidade, outros fatores influenciam a absorção gastrointestinal; por exemplo, a solubilidade ao pH do estômago e do intestino; a estabilidade das substâncias a esses pH; a natureza do solvente; o grau de dispersão dos corpos sólidos pouco solúveis, que influenciará a velocidade de solubilização; a influência do conteúdo do trato intestinal sobre as substâncias químicas (alterações enzimáticas como a hidrólise); a formação de compostos insolúveis (quelação com o cálcio, o ferro, o fosfato), etc.

Uma vez presente na circulação sanguínea, a substância química deve ainda atravessar diferentes membranas, para atingir seu lugar de ação. A parede capilar oferece, em geral, pouca resistência à passagem das substâncias químicas. Ela é suficientemente porosa para permitir a passagem de substâncias polarizadas de grande dimensão.

As membranas celulares apresentam as características de uma membrana lipóide. Como conseqüência, as substâncias lipossolúveis penetrarão mais rapidamente do que as substâncias fracamente lipossolúveis. Finalmente, mesmo no interior das células, existem ainda barreiras à transferência dos corpos químicos orgânicos. Duas barreiras merecem ser ressaltadas, a barreira cérebro-espinal e a placenta.

A barreira cérebro-espinal (entre o plasma e o espaço extracelular do sistema nervoso central) comporta-se como uma simples membrana lipóide, através da qual as substâncias orgânicas estranhas difundir-se-ão a uma velocidade proporcional a seu grau de dissociação e à solubilidade lipídica da forma não-ionizada. Também as substâncias altamente ionizadas penetrarão com grande dificuldade no sistema nervoso central.

A placenta também é permeável a numerosas substâncias químicas que a atravessam por simples difusão. A velocidade de transferência depende em parte do peso molecular e da lipossolubilidade da substância considerada. As substâncias ionizadas no sangue dificilmente atravessarão a placenta. Deve-se assinalar que a placenta pode também metabolizar certas substâncias.

TRANSPORTE

Os agentes tóxicos, bem como qualquer produto químico que entra no organismo através da pele, do trato respiratório e do trato digestivo, atingem o sistema ou parte do organismo que pode ser danificado, através da circulação. Para atingirem a circulação, passam através de membranas, fluidos intercelulares e através das paredes dos vasos circulatórios. Há duas circulações, sistemas de vasos sanguíneo e linfático.

O sangue está constituído por um fluido chamado plasma, no qual se encontram em suspensão os glóbulos vermelhos, os glóbulos brancos e as plaquetas. O glóbulo vermelho é formado por um pigmento vermelho chamado hemoglobina que contém ferro, o que torna possível sua combinação com o oxigênio nos pulmões, para distribuição por todo o organismo. Os glóbulos brancos têm a função específica de atacar enfermidades. As plaquetas sanguíneas

servem primordialmente para obturar pequenas rupturas nos capilares ou vasos sangüíneos pequenos, aglutinando-se no lugar das feridas, e atuando como um obstáculo intransponível até que o tecido se cicatrize. O plasma é composto de aproximadamente 90% de água, 7% de várias proteínas, e uma fração de vários tipos de sais e outras matérias-primas necessárias ao organismo. O sangue constitui aproximadamente 9% do peso do corpo. Um homem que pesa 65 kg terá aproximadamente 6 litros de sangue. Os vasos sangüíneos são constituídos pelas veias, artérias e capilares. Em cerca de um minuto todo o sangue realiza o seguinte circuito:

$$\text{coração direito} \xrightarrow[\text{venoso}]{\text{sangue}} \text{pulmões} \xrightarrow[\text{arterial}]{\text{sangue}} ;$$

coração esquerdo → artérias → órgãos e tecidos → veias →.
(exceto córnea)

O sistema linfático tem por objetivo transportar para o sangue o excesso de fluido constituído nos tecidos. Esse fluido, exceto pela concentração de proteínas, tem a mesma composição do plasma do sangue. As paredes finas dos capilares são permeáveis a quase todos os constituintes do sangue; somente as pequenas moléculas de proteína penetram através das paredes, enquanto que as moléculas maiores ocasionalmente escapam para os tecidos devido à pressão do sangue dentro dos capilares, não podendo ser diretamente reabsorvidas pelo sangue. A maior parte da proteína extravascular somente pode ser removida pela via linfática. Em geral, onde há capilares sangüíneos, há também capilares linfáticos. Estes se unem para formar vasos linfáticos maiores. Da região abaixo do coração todos os vasos linfáticos reúnem-se em dois grandes vasos, o duto linfático direito e o duto torácico, ou duto linfático esquerdo. Esses dutos esvaziam-se em veias que estão trazendo sangue venoso dos braços direito e esquerdo, respectivamente. Os vasos linfáticos menores sobre o coração reúnem-se também em dois vasos, que desembocam nas veias citadas. No decurso de vasos linfáticos maiores, há alargamentos, que se chamam nodos linfáticos.

O fluido do tecido dentro dos vasos linfáticos é chamado de linfa. O fluxo da linfa é muito lento (não existe uma bomba, tal como o coração para o sistema sangüíneo), devido aos movimentos do corpo.

As substâncias que penetram no organismo através do trato respiratório, pelos alvéolos pulmonares, vão para o coração esquerdo, e são levadas pelo sangue aos órgãos e tecidos através das artérias, antes de qualquer biotransformação pelo fígado.

Quando as substâncias penetram no organismo através da pele, da membrana mucosa e dos olhos, entram na corrente venosa, passam pelo coração direito, pelos pulmões, pelo coração esquerdo e, finalmente, atingem os órgãos e tecidos.

Penetrando através do trato digestivo, quando são substâncias lipossolúveis, atingem os vasos linfáticos, percorrem a veia porta, entrando no fígado, onde podem ser biotransformadas; se forem substâncias solúveis em água, vão direto à veia porta.

ARMAZENAMENTO

O armazenamento de substâncias no organismo não é comum. Depende da solubilidade e dos produtos de sua biotransformação. Nos ossos pode ocorrer armazenamento de elementos como chumbo, estrôncio e rádio, na forma de fosfatos insolúveis, e de flúor na forma de fluoreto de cálcio insolúvel. Quelação e acidose podem mobilizar o chumbo e o estrôncio armazenados.

Os pesticidas organoclorados, muito lipossolúveis, não-voláteis e vagorosamente biotransformáveis, concentram-se no tecido adiposo e, devido a sua estabilidade química, persistem durante muitos anos; suas concentrações nos tecidos atingem eventualmente um nível constante, resultado de um equilíbrio entre a quantidade ingerida, metabolizada, e excretada. O DDT constitui um exemplo.

Os iodetos armazenam-se nas glândulas tireóides; a prata, na pele; o mercúrio, o chumbo (como sulfeto) e o cádmio, nas gengivas. Substâncias químicas podem também ligar-se às proteínas sangüíneas. Sob essa forma, elas não podem atravessar facilmente as membranas biológicas. Também essa ligação pode reduzir a velocidade de transformação metabólica dessas substâncias, do mesmo modo que sua velocidade de excreção renal. Essas ligações podem ser reversíveis e irreversíveis. Na maioria dos casos, a ligação é com a albumina, e é reversível. O mercúrio é um exemplo de substância que se liga à proteína.

ELIMINAÇÃO OU EXCREÇÃO

A remoção de substâncias estranhas ou de seus produtos de transformação, do organismo, realiza-se principalmente através do trato respiratório, do trato intestinal, e do trato urinário. Outras vias de excreção são o suor, a saliva, o leite, os cabelos e as unhas.

ELIMINAÇÃO PELO TRATO RESPIRATÓRIO

O trato respiratório, através do ar expirado, é a principal via de eliminação de gases e vapores voláteis e não-reativos; também é importante via de excreção para produtos biotransformados eliminados por difusão passiva (gradiente de concentração), como nos casos de éter após a anestesia, álcool metílico proveniente da oxidação de álcool etílico.

ELIMINAÇÃO PELA URINA

É a principal via de excreção de substâncias, ou de seus produtos da biotransformação, ionizadas ou polares. Também vapores de baixa volatilidade, especialmente compostos solúveis em água, como o metanol, podem ser eliminados, principalmente através da urina. Outros vapores, como o benzeno e o tolueno, são convertidos a produtos não-voláteis por oxidação, os quais são excretados pela urina. A excreção urinária comporta três processos distintos: filtração glomerular, transporte tubular passivo e transporte tubular ativo.

A filtração glomerular produz um ultrafiltrado do plasma contendo substâncias estranhas, ou seus metabólitos, na mesma concentração que no plasma.

No processo chamado transporte tubular passivo, o epitélio tubular, particularmente no tubo distal, comporta-se como uma membrana lipóide, permi-

tindo a transferência de substâncias lipossolúveis não-ionizadas. Conseqüentemente, (a) as substâncias lipossolúveis presentes no filtrado glomerular, sob a forma não-ionizada, serão reabsorvidas na circulação sangüínea, enquanto que os compostos pouco lipossolúveis serão parcialmente reabsorvidos; (b) as substâncias cujas formas ionizadas existem em maior concentração na urina do que no sangue difundir-se-ão através do epitélio tubular do sangue para o filtrado glomerular. Desse modo, quando a urina for mais alcalina que o plasma, os ácidos fracos se difundirão facilmente do sangue para a urina e, inversamente, as bases fracas se difundirão quando a urina tubular for mais ácida que o plasma.

Existem dois mecanismos de transporte ativo localizados no túbulo proximal, para a excreção de ácidos e bases. Os compostos excretados por esses mecanismos são, pois, substâncias ionizadas lipófbas, que podem ser transportadas contra um gradiente de concentração. Em geral, as substâncias orgânicas polarizadas, lipófbas, são menos facilmente reabsorvidas por simples difusão e mais facilmente secretadas pelos mecanismos de transporte ativo do que os corpos químicos não-polarizados, lipossolúveis. Essa é a razão por que as transformações enzimáticas das substâncias estranhas tendem a produzir metabólitos menos lipossolúveis e mais polarizados, que poderão ser excretados mais facilmente que o composto original. Se o composto original lipossolúvel não for metabolizado em derivados mais polarizados, ele jamais será excretado, porque será sempre mais ou menos completamente reabsorvido pelo epitélio tubular por simples difusão.

EXCREÇÃO BILIAR

O fígado é o principal órgão de transformação das substâncias químicas estranhas. Os produtos da transformação (metabólitos ou conjugados) são logo transportados pela circulação sangüínea e pela bÍlis. Para certas substâncias, a concentração sangüínea é igual à concentração biliar, mas certos corpos altamente polares são preferencialmente excretados na bÍlis, por um processo de transporte ativo. A excreção biliar parece aumentar com o peso molecular das substâncias excretadas.

EXCREÇÃO GÁSTRICA

As bases orgânicas ionizadas ao pH do estômago (anilina, por exemplo) serão secretadas do plasma para o estômago. Essas substâncias poderão eventualmente ser reabsorvidas no intestino.

EXCREÇÃO INTESTINAL

Os corpos químicos ionizados ao pH do intestino (5,3) difundir-se-ão do plasma para o intestino em função do gradiente de concentração.

EXCREÇÃO PELOS CABELOS E UNHAS

Exemplo: arsênico e mercúrio.

EXCREÇÃO PELO SUOR

Exemplo: chumbo.

EXCREÇÃO PELA SALIVA

Exemplo: mercúrio.

PADRÕES HIGIÊNICOS DE INALAÇÃO DIÁRIA

Introdução

A sociedade, desde tempos imemoriais, tem se cercado com restrições. Estas têm tido, geralmente, de origens empíricas, de caráter moral, ético, estético, econômico, espiritual, social ou científico. Todas elas têm tido como base comum a obtenção de um benefício, pretendido pela particular sociedade, que as estabelece. Conforme as sociedades se foram tornando mais complexas e sofisticadas, os esforços para a padronização e restrição foram sendo mais freqüentes, mais necessários, e, presumivelmente, menos empíricos.

No campo da saúde pública, diversos critérios têm sido utilizados para proteger o ser humano de exposições ambientais; entre eles, podem-se citar os que seguem.

CRITÉRIO PROIBITIVO

Estabelece que uma determinada substância não pode estar presente no ambiente, por mínima que seja a quantidade. Esse critério pode ter possibilidade de aplicação no campo dos alimentos, de exposições ocupacionais e da água, mas seria difícil aplicá-lo ao ar, onde evitar o consumo é impossível. Por exemplo, devido à alta incidência de câncer, quer no ser humano, quer nos animais, não deve ser permitida a exposição ou o contato por via respiratória, digestiva ou através da pele, dos seguintes compostos: 4-dimetilaminoazo-benzeno; benzidina e seus sais; dicloro-benzidina; 4-aminodifenil; β -naftilamina; 4-nitrodifenil; *N*-nitrodimetilamina; β -propiolactona.

CRITÉRIO PERMISSOR

Estabelece que uma determinada substância pode estar presente no ambiente, numa certa concentração, por um determinado período de tempo, e que tal exposição é permitida, tolerada ou segura. Esse critério torna-se atrativo quando alguma quantidade da substância deve estar presente e se deseja saber quanto da mesma seria tolerado sem necessidade de uma ação protetora. A segurança conseguida é sempre relativa; nunca absoluta.

CRITÉRIO RESTRITIVO

Estabelece uma restrição sobre certos atos e desempenhos. Determinados padrões de qualidade de água, de efluentes líquidos e de emissões atmosféricas, são baseados nesse critério. Os padrões de qualidade de água, por exemplo, protegem os usuários de possíveis riscos de doença, mas também estabelecem gosto, odor e aparência, que são conseguidos através de práticas adequadas de controle. Em síntese, "não há razão para que uma substância esteja presente acima de uma certa quantidade, quando as condições de operação e manutenção são razoáveis".

CRITÉRIO PROGNOSTICADOR

Estabelece que, se uma dada exposição ocorre por um dado período de tempo, para um específico grupo de pessoas, então, com base numa evidência disponível, pode ser prognosticado que ocorrerá um específico tipo de reação. Esse critério é aquele que tem a base científica mais sólida, pois o ato de prognosticar é um critério para conclusões científicas. Os padrões prognosticadores não contêm qualquer elemento de segurança, nem devem ser confundidos com níveis recomendados, ou níveis nos quais não ocorre nenhum efeito.

CRITÉRIO ESPECULATIVO

É sempre derivado ou de experiências com animais ou por analogia. Um exemplo seria estabelecer que, se uma dada concentração de uma substância é nociva para animais, então o ser humano não sofrerá efeitos nocivos se exposto a 1/10 ou 1/100 da mesma quantidade.

RESTRIÇÕES QUANTO AOS AGENTES QUÍMICOS NO AR DOS AMBIENTES DE TRABALHO

Um dos mais importantes instrumentos do profissional de saúde ocupacional é a coleção de julgamentos sobre concentrações aceitáveis de contaminantes nas atmosferas do ambiente de trabalho. Essa coleção, por exemplo, nos Estados Unidos, começou a ter um caráter de unanimidade em 1943, quando publicada pelo United States Public Health Service; Cook a estendeu em 1945. Essas concentrações receberam, naquele país, as mais diferentes designações, tais como:

- toxic limits* (limites tóxicos), United States Public Health Service (USPHS);
- maximum acceptable concentration*, MAC (concentração máxima aceitável), American Standards Association (ASA);
- maximum allowable concentration*, MAC, (concentração máxima permissível), Dr. Hervey B. Elkins;
- recommended maximum concentration* (concentração máxima recomendada) Dr. Frank Patty e American Industrial Hygiene Association (AIHA);
- threshold limit values*, TLV (limites de tolerância), American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH);
- hygienic standard for daily inhalation* (padrões higiênicos para a inalação diária), Dr. Henry Field Smyth Jr.

Todos esses padrões, que objetivam a proteção da saúde do trabalhador, estão baseados, em parte, em experiência prática de campo, com reais exposições de trabalhadores a uma variedade de condições ambientais; em parte, em dados obtidos de experiências controladas com animais; em parte, de estudos com voluntários; e em combinação dos três. Todos esses padrões são periodicamente reavaliados e são feitas alterações; tem sido uma tendência geral tornar os padrões mais severos com o passar dos anos, devido não só a uma maior experiência com o controle dos riscos à saúde no ambiente de trabalho, como também às metas avançadas de saúde e bem-estar. Esses padrões têm sido desenvolvidos para serem usados meramente como guias para o controle dos riscos ocupa-

cionais, e estão sujeitos a alterações conforme a disponibilidade de novos dados. Por isso, eles não devem ser incorporados, de um modo geral, em leis trabalhistas, regulamentos industriais, ou quaisquer outros dispositivos legais. As necessidades legislativas são inflexíveis e são com freqüência aplicadas literal e rotineiramente por inspetores ou por pessoal inadequado, para interpretação dos padrões.

Qualquer publicação de padrões para manutenção da saúde deve incluir referência sobre os mesmos. Somente quando os fatos, sob os quais uma decisão está baseada, são fornecidos para um escrutínio geral e uma avaliação, a decisão pode ser considerada fundamentada, mesmo tentativamente; todos os fatos toxicológicos devem ser publicados, e todas as decisões sobre os fatos devem ser acompanhadas por um resumo do raciocínio sob os quais elas foram derivadas.

Um aspecto importante é a nomenclatura que vem sendo adotada para esses padrões. Os termos "limites de tolerância" ou "concentrações máximas permissíveis", por exemplo, podem levar a decisões errôneas, pois implicam que abaixo da concentração especificada, a resposta humana é desprezível, e que, acima dela, há perigo; o termo "padrão higiênico para inalação diária" é mais adequado, não levando a impressões erradas por aqueles que não estão familiarizados com os problemas de saúde ocupacional.

É certamente imperativo que a inalação de substâncias durante o dia de trabalho não deva ser permitida quando resultar em qualquer dano ao bem-estar físico do trabalhador. É, além disso, imperativo que a inalação não aumente a probabilidade de acidentes. É desejável que a inalação não provoque qualquer grau de desconforto. Por outro lado, quando é impraticável evitar todo desconforto, então a inalação é certamente justificada, desde que não resulte em dano ao trabalhador e não aumente a probabilidade de acidentes.

As tabelas de padrões publicadas não apresentam indicações da natureza e da magnitude dos efeitos que podem ser esperados da inalação de maiores concentrações. Somente através de um exaustivo estudo dos danos disponíveis é que se pode decidir se uma particular substância pode, com segurança, ser inalada a uma maior concentração do que a padrão. Com a maioria das substâncias, é perfeitamente prático estabelecer dois padrões: um nível inofensivo, e outro, uma concentração que não pode, com segurança, ser excedida sob nenhuma circunstância prática. Essas duas concentrações devem vir acompanhadas de uma descrição da resposta humana esperada. Uma concentração deve ser suficientemente baixa, de tal modo que nenhum efeito danoso ocorra ao trabalhador, mas que possa causar um odor detetável, ou uma detetável irritação aos olhos, nariz ou garganta. A segunda concentração deve produzir efeitos mais severos, mas ainda reversíveis e não-progressivos.

CATEGORIAS DE AÇÃO OFENSIVA DE SUBSTÂNCIAS INALADAS

Julgamentos devem ser feitos para determinar quais padrões higiênicos de inalação diária devem ser cuidadosamente observados, e quais poderão ser excedidos quando for impraticável atingi-los. Esses julgamentos serão mais consistentes se for decidida, para cada substância, qual a ação ofensiva que o padrão está procurando evitar, ou "proteger contra". As decisões podem ser

divididas, com base na natureza da resposta humana, nas nove categorias apresentadas a seguir.

TOXICIDADE CRÔNICA

O mais perigoso efeito de algumas substâncias é um dano sistêmico progressivo, cuja severidade aumenta, continuando a inalação. Benzeno, dissulfeto de carbono, tetracloreto de carbono e chumbo são os exemplos mais familiares. O menor padrão para essas substâncias deve ser uma concentração que não produza efeito algum sobre qualquer trabalhador, e considerações práticas não são suficientes para justificar inalação em excesso ao padrão. É necessária uma intensa supervisão médica para o uso seguro dessas substâncias. O padrão para substâncias cronicamente tóxicas deve referir-se a uma concentração média ponderada no tempo durante um dia de trabalho. Breves picos não são significativos, desde que não aumentem a média.

TOXICIDADE AGUDA

Algumas substâncias não produzem um dano progressivo com repetidas inalações. O dano sistêmico que elas podem causar resulta de uma excessiva inalação. Exemplos familiares são o monóxido de carbono e o gás cianídrico. Os padrões para substâncias agudamente tóxicas devem ser interpretados do mesmo modo que para as substâncias cronicamente tóxicas.

NARCOSE (ANESTESIA EM SEU ESTÁGIO EXTREMO)

As substâncias desse grupo, em baixas concentrações, induzem acidentes por danificar o julgamento e atrasar o tempo de reação. Exemplos são o álcool etílico o éter etílico e a gasolina. O menor padrão para uma substância narcótica deve ser uma concentração que não produza efeito detetável sobre o julgamento e o tempo de reação após oito horas de inalação. Deve referir-se a uma concentração média existente durante algum apreciável período de tempo, cuja duração pode ser estimada através dos dados de absorção e eliminação. Considerações de praticabilidade não podem justificar inalação em excesso ao padrão.

IRRITAÇÃO

O mais perigoso efeito de algumas substâncias é a irritação. Olhos, nariz e garganta são irritados em baixas concentrações; os brônquios em concentrações maiores. Um edema pulmonar fatal pode ser o resultado de inalação de concentrações extremas. Os aldeídos, halogênios e ácidos são exemplos familiares. Substâncias altamente odoríferas podem ser consideradas nessa categoria. O menor padrão para uma substância irritante deve ser uma concentração que é detetável, mas que não cause objeção irritativa para a maioria dos expostos durante uma substancial parte do dia de trabalho. O maior padrão deve ser estabelecido numa concentração que está bem abaixo daquela que possa danificar brônquios ou pulmões, e que é justificável, quando forem impraticáveis concentrações no menor padrão. Padrões para substâncias irritantes devem se referir a concentrações para mesmo um breve período durante um dia de trabalho.

ASFIXIA

Algumas substâncias são inertes no organismo e podem causar dano somente por asfixia em concentrações extremamente altas, excluindo-se o oxigênio da atmosfera. Exemplos são os refrigerantes flúor-clorados. O menor padrão para esses asfixiantes deve ser aquele que resulte de uma boa prática de engenharia, como 1 000 ppm, atualmente utilizado. As poeiras inertes incômodas podem ser colocadas nessa mesma categoria e o padrão de 15 mg/m³ parece ser um nível adequado. O padrão deve referir-se à concentração existente durante qualquer breve período, mas deve-se reconhecer que maiores concentrações são justificadas quando impraticável manter o padrão.

FEBRE DOS FUMOS

É uma condição passageira causada por fumos metálicos. Um exemplo familiar é o fumo de óxido de zinco. O menor padrão para um produtor de febre dos fumos deve ser uma concentração que não produzirá aquela condição, e deve ser aplicada por um apreciável período, como meia-hora. Considerações práticas não justificam que o padrão seja ultrapassado.

PIGMENTAÇÃO DOS OLHOS

O mais importante efeito da quinona e da hidroquinona parece ser uma pigmentação da esclerótica (membrana branca e fibrosa que reveste o globo ocular), que se desenvolve lentamente, podendo reduzir a acuidade visual, ou mesmo levar à cegueira. O menor padrão para essas substâncias deve ser uma concentração que não produza pigmentação, após anos de exposição, e deve referir-se à concentração média ponderada pelo tempo, durante um dia de trabalho. Às vezes, por alguns poucos dias, condições práticas podem justificar que o padrão seja ultrapassado.

CÂNCER

Uma substância é razoavelmente bem conhecida como uma causa do câncer do trato respiratório. Trata-se da níquel-carbonila. Parece provável que a mínima exposição cancerígena nunca será definida. Assim, no momento, é prudente estabelecer o padrão zero para uma substância cancerígena, e nenhuma consideração prática pode justificar permissão para inalação de qualquer concentração que seja evitável.

ALERGIA

Sabe-se que determinadas substâncias sensibilizam uma apreciável proporção dos trabalhadores expostos. Elas podem produzir perigo e ataques de asma, quando a pessoa sensível inala uma baixa concentração. Exemplos são a etilenodiamina e os diisocianatos. No momento não há uma base racional experimental para definir uma concentração que não sensibilizará um trabalhador sensível. O controle da exposição a substâncias alergênicas deve basear-se na medicina industrial. Até que seja demonstrado que um grupo particular não inclui trabalhadores suscetíveis, nenhuma consideração prática pode justificar inalação de qualquer concentração que seja evitável.

A Tab. 3.1 apresenta interpretação de alguns *threshold limit values* (TLV) propostos em 1969.

TABELA 3.1 Interpretação de alguns TLV (*threshold limit values*) propostos em 1969

Substâncias	TLV ppm	Mais importante efeito de inalação	Efeitos esperados da inalação diária (8 h/dia)		
			TLV	2 x TLV	10 x TLV
Aldeído acético	200	Irritação dos brônquios e dos pulmões; possíveis danos aos pulmões	Irritação marcante dos olhos, nariz e garganta; odor perceptível	Nenhum	Irritação dos brônquios e dos pulmões; danos aos pulmões
Acetona	1 000	Narcolese	Alguma irritação dos olhos, nariz e garganta; narcolese definida e odor perceptível	Nenhum	Narcolese marcante; tontura e até inconsciência
Acrlonitrila	20	Toxicidade aguda	Nenhum	Odor perceptível	Pequenos sintomas tóxicos
Anilina	5	Toxicidade crônica	Nenhum	Cianose pode ser evidente	Cianose pode ser marcante; pequenos sintomas tóxicos
Dicloro-diflúor-metano	1 000	Asfixia em altas concentrações	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Níquel-carbonila	0,001	Câncer e irritação dos brônquios e dos pulmões; possíveis danos aos pulmões	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Quinona	0,1	Pigmentação dos olhos	Nenhum	Pigmentação dos olhos	Perda da acuidade visual
Fumos metálicos	5 mg/m ³	Febre-do-fumo	Febre-do-fumo	Febre-do-fumo e alguma irritação dos olhos, nariz e garganta	Irritação dos brônquios e dos pulmões; possíveis danos aos pulmões
Etileno-diamina	10	Alergia e irritação dos brônquios e dos pulmões; possíveis danos aos pulmões	Odor perceptível	Alguma irritação dos olhos, nariz e garganta	Irritação severa dos olhos; o suficiente para requerer tratamento médico

THRESHOLD LIMIT VALUES (TLV)

Os *threshold limit values* (TLV), anualmente publicados pela American Conference of Governmental Industrial Hygienists, referem-se a concentrações de substâncias suspensas ou dispersas no ar dos ambientes de trabalho, e representam condições sob as quais se supõe que quase todos os trabalhadores possam estar expostos repetidamente, dia após dia, sem efeito adverso. Devido à suscetibilidade individual, contudo, uma pequena porcentagem dos trabalhadores pode sentir desconforto a algumas substâncias em concentrações iguais ou abaixo dos TLV, e uma menor porcentagem pode ser afetada mais seriamente, por agravamento de uma condição pré-existente, ou pelo desenvolvimento de uma doença ocupacional.

Os TLV, são publicados acompanhados por uma documentação que fornece a informação científica pertinente e dados com referência das fontes bibliográficas que foram utilizadas para estabelecer cada limite. A documentação contém uma proposição definindo o tipo de resposta contra a qual o limite protege o trabalhador. Para uma melhor compreensão dos TLV, é essencial que a documentação seja consultada, quando os mesmos forem utilizados.

Os TLV, referem-se em geral a concentrações ponderadas pelo tempo, para um dia de trabalho de 7 a 8 h, e uma semana de trabalho de 40 h. Eles devem ser utilizados como guias no controle dos riscos à saúde, e não devem ser utilizados como limites precisos entre concentrações seguras e perigosas. No caso de agentes de ação rápida (por exemplo, benzeno através da pele, trifluoreto de cloro, acetaldeído clorado, clorofórmio, *O*-dicloro-benzeno, 1,2-dibromoetano através da pele, formaldeído, cloreto de hidrogênio, iodo, manganês), os TLV referem-se a concentrações-limites e não-ponderadas, que não devem ser excedidas. Está implícito nessas definições que o modo de amostrar para determinar a concordância com os padrões para cada grupo deve diferir; uma única amostra breve, que é aplicada ao segundo grupo, não é apropriado para o primeiro grupo; nesse caso, um número suficiente de amostras é necessário para permitir uma concentração média ponderada pelo tempo, através de uma jornada de trabalho.

Médias ponderadas pelo tempo permitem exposições sobre os TLV, desde que haja, para compensação, exposições equivalentes abaixo dos TLV, durante o dia de trabalho. A quantidade na qual os TLV podem ser excedidos por curtos períodos, sem dano à saúde, depende de fatores tais como a natureza do poluente, o tipo de ação ofensiva, se há efeitos cumulativos, a frequência de ocorrência das altas concentrações e a duração de tais exposições. Todos os fatores devem ser levados em consideração para uma decisão.

Existe uma regra prática, dada a seguir, proposta pela própria entidade que publica os TLV, a ACGIH, e que não pode ser aplicada para todos os casos (nunca excedendo 15 min, e com equivalente exposição abaixo do limite):

Faixa TLV ppm ou mg/m ³	Fator para estimar o limite
0-1	3
1-10	2
10-100	1,5
100-1 000	1,25

Exemplo. O TLV para o ácido fluorídrico é 3 ppm; uma concentração de 6 ppm é permitida para períodos que não excedam 15 min, e com equivalente exposição abaixo do limite.

Os TLV estão baseados na melhor informação disponível da experiência industrial, de estudos experimentais com animais e seres humanos, e, quando possível, de uma combinação dos três. Apesar do fato de que não se espera sério dano à saúde, como resultado de exposição ao TLV, a melhor prática é manter as concentrações de todos os poluentes atmosféricos tão baixas quanto possível praticamente.

Os TLV, devem ser aplicados e interpretados somente por uma pessoa treinada em higiene industrial. Eles não devem ser usados, ou modificados para serem usados: (1) como um índice relativo de risco ou toxicidade; (2) na avaliação ou no controle de poluição do ar na comunidade; (3) na estimativa do potencial tóxico de exposições contínuas e ininterruptas; (4) como prova, favorável ou contrária, de uma doença existente; (5) para adoção por países cujas condições de trabalho difiram das dos Estados Unidos, e onde diferem as substâncias e os processos.

Especial consideração deve ser dada quando os TLV são aplicados em ambientes com a presença de mais de uma substância no ar. Como regra geral, na ausência de informações, ao contrário, os efeitos dos diferentes riscos devem ser considerados como aditivos. Isto é, se a soma das frações

$$\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \dots + \frac{C_n}{T_n}$$

exceder a unidade, então o TLV da mistura deve ser considerado excedente; C indica a concentração atmosférica observada, e T o correspondente TLV.

Exemplo. O ar de um ambiente de trabalho contém 5 ppm de tetracloreto de carbono (TLV 10 ppm) e 20 ppm de dicloro-etileno (TLV 50 ppm) e 10 ppm de dibromo-etileno (TLV 25 ppm):

$$\frac{5}{10} + \frac{20}{50} + \frac{10}{25} = \frac{65}{50} = 1,3,$$

∴ o TLV está excedido.

Quando os efeitos são independentes, o TLV é excedido somente quando pelo menos um membro da série ($C_1/T_1, C_2/T_2, \dots, C_n/T_n$) tem valor que excede a unidade.

Exemplo. O ar de um ambiente de trabalho contém 0,15 mg/m³ de chumbo (TLV 0,2 mg/m³) e 0,70 mg/m³ de ácido sulfúrico (TLV 1 mg/m³):




$$\frac{0,15}{0,20} = 0,75; \quad \frac{0,7}{1} = 0,7,$$

∴ o TLV não está excedido.

TABELA 3.2 Os TLV e a natureza do dano contra o qual se procura proteger o trabalhador
 Coluna 1: unidades em ppm (partes por milhão) quando não-especificada; m.p.p.c.f. (milhões de partículas por pé cúbico)
 Coluna 2: pele, risco através da pele; teto, limite que não deve ser excedido
 Colunas 3, 4, 5, 6, 7: O = olhos; N = nariz; G = garganta; B = brônquios; A = alvéolos; P.S. = pressão sangüinea; S.N.C. = sistema nervoso central; G.V. = glóbulos vermelhos.


Classe do produto químico	Substâncias	1	2	Dano mais próximo ao TLV			Dano em níveis diversas vezes acima do TLV
		TLV 1969	Teto Pele	Irritação	Nar-cose	Toxicidade	
I) Hidrocarbonetos alifáticos	Metano CH_4	—	—	—	—	—	Asfixia
	Etano C_2H_6	—	—	—	—	—	Asfixia
	Propano C_3H_8	1 000	—	—	x	—	—
	Butano C_4H_{10}	—	—	—	x	—	—
	G.L.P. (gás liquefeito de petróleo)	1 000	—	—	x	—	—
	Pentano C_5H_{12}	1 000	—	—	x	—	—
	Hexano C_6H_{14}	500	—	—	x	—	—
	Heptano C_7H_{16}	500	—	O.N.G.	x	—	Narcorese
	Octano C_8H_{18}	500	—	O.N.G.	x	—	Narcorese
	Etileno $CH_2=CH_2$	—	—	—	—	—	Asfixia
	Propileno $CH_2=CH-CH_3$	—	—	—	—	—	Asfixia, narcorese
	Butadieno $CH_2=CH-CH=CH_2$	1 000	—	—	x	—	Narcorese, asfixia
	Acetileno $CH \equiv CH$	—	—	—	—	—	Asfixia
	Metilacetileno $CH_2=C=CH$	1 000	—	O.N.G.B.	x	—	Asfixia
II) Hidrocarbonetos alifáticos	Ciclo-hexano C_6H_{12}	300	—	—	x	—	—
	Metilciclo-hexano $CH_2C_6H_{11}$	500	—	—	x	—	—
	Ciclo-hexeno C_6H_{10}	300	—	—	x	—	—
	Ciclopentadieno C_5H_6	75	—	—	x	—	—
	Terebentina $C_{10}H_{16}$	100	—	O.N.G.	—	—	Narcorese, rids

TABELA 3.2 (Continuação)

Classe do produto químico	Substâncias	TLV 1969	2 Teto Pele	3	Dano mais próximo ao TLV		6	7
					Irritação	Nar- cose		
	Cloreto de vinila $\text{CH}_2=\text{CHCl}$	500	Teto		x			
	1,2-Dicloroetileno $\text{CHCl}=\text{CHCl}$	200			x			
	Tricloroetileno $\text{CHCl}-\text{CCl}_2$	100			x			
	Percloroetileno $\text{CCl}_2-\text{CCl}_2$	100			x			
	Cloropreno $\text{CH}_2=\text{CClCH}=\text{CH}_2$	25	Pele	O.N.G.				Fígado
	Cloreto de alila $\text{CH}_2=\text{CHCH}_2\text{Cl}$	1		O.N.G.B.				Rins
	Clorobenzeno 	75		O.N.G.				Narcore
	O-Diclorobenzeno 	50	Teto	O.N.G.				Fígado
	p-Diclorobenzeno 	75		O.N.G.				Fígado
	Tricloronafaleno (46% Cl)	5 mg/m ³	Pele			Fígado		
	Tetracloronafaleno (53% Cl)	2 mg/m ³	Pele			Fígado		
	Pentacloronafaleno (59% Cl)	0,5 mg/m ³	Pele			Fígado		
	Hexacloronafaleno (64% Cl)	0,2 mg/m ³	Pele			Fígado		
	Octacloronafaleno (70% Cl)	0,1 mg/m ³	Pele			Fígado		
	Difenilclorido (42% Cl)	1 mg/m ³	Pele			Fígado		
	Difenilclorido (54% Cl)	0,5 mg/m ³	Pele			Fígado		
V) Hidrocarbonetos fluorados	Dicloromonofluoretano CHO_2F	1 000					Nenhum	Asfixia
	Diclorodifluoretano CCl_2F_2	1 000					Nenhum	Asfixia
	Fluortriclorometano CCl_2F	1 000					Nenhum	Asfixia
	Diclorotetrafluoretano $\text{CClF}_2\text{CClF}_2$	1 000					Nenhum	Asfixia

Triclorofluoretano CCl_2FCClF_2		1 000	x	Asfixia
Tetraclorodifluoretano CCl_2FCCl_2F		500	x	Edema pulmonar
Trifluoromonobromometano $CBrF_3$		1 000		Nenhum
Difluordibromometano CBr_2F_2		100	B.A.	Edema pulmonar
Brometo de metila CH_3Br		20		Paralisia Mental, irritação, B.A.
Bromo de etila CH_3CH_2Br		200		S.N.C. Irritação, B.A., fígado
1,2-Dibromoetano CH_2BrCH_2Br		25		S.N.C. Irritação, B.A., fígado
Bromofórmio $CHBr_3$		0,5		S.N.C. Fígado
Iodeto de metila CH_3I		5		S.N.C. Mental, irritação, B.A.
Alcool metílico CH_3OH		200	O.N.G.	Narcole
Alcool etílico C_2H_5OH		1 000	O.N.G.	Narcole
Alcool propílico C_3H_7OH		200	O.N.G.	Narcole
Alcool isopropílico C_3H_7OH		400	O.N.G.	Narcole
Alcool butílico C_4H_9OH		100	O.N.G.	Narcole
Alcool isobutílico C_4H_9OH		100	O.N.G.	Narcole
Alcool sec. butílico C_4H_9OH		150	O.N.G.	Narcole
Alcool terc. butílico C_4H_9OH		100	O.N.G.	Narcole
Alcool isomílico $C_5H_{11}OH$		100	O.N.G.	Narcole
Metilisobutilcarbinol C_4H_9OH		25		Narcole
Alcool alílico $CH_2=CHCH_2OH$		2		Necrose da córnea
Alcool propargílico $CH \equiv CCH_2OH$		1		
Ciclo-hexanol $C_6H_{11}OH$		50	O.N.G.	Fígado, rins
Metilciclo-hexanol $CH_3C_6H_{10}OH$		100	O.N.G.	Fígado, rins
Fenol C_6H_5OH		5		Fígado, rins
Cresol $C_6H_4(OH)CH_3$		5		Fígado, rins
Metilcelosolve $CH_3OCH_2CH_2OH$		25		Encefalopatia, G.V., rins
2-Etoxtetanol $C_2H_5OCH_2CH_2OH$		200		Rins

TABELA 3.2 (Continuação)

Classe do produto químico	Substâncias	1 TLV 1969	2 Teto Pele	5 Dano mais próximo ao TLV			7 Dano em níveis diversas vezes acima do TLV
				3 Irritação	4 Nar- cose	6 Toxi- dade Outros	
VIII Aldeídos- -cetonas	2-Butoxietanol $C_4H_9OCH_2CH_2OH$	50	Pele	O.N.G.			Rins, G.V.
	Dipropilenoglicolmetiléter $C_3H_7OC_3H_7OC_3H_7$	100	Pele	O.N.G.			Rins
	Éter etílico $(C_2H_5)_2O$	400		O.N.G.			Narcose
	Éter isopropílico $(C_3H_7)_2O$	500		O.N.G.			Narcose
	Metilal $(CH_3O)_2CH_2$	1 000		O.N.G.			Fígado, rins
	Éter fenílico (vapor) $(C_6H_5)_2O$	1		O.N.G.			
	Aldeído fórmico HCHO	5	Teto	O.N.G.B.			Alergia
	Aldeído acético CH_3CHO	200		O.N.G.B.			Edema pulmonar, rins
	Furfural 	5	Pele	O.N.G.B.			Alergia
	Acroleína $CH_2=CHCHO$	0,1		O.N.G.B.			Edema pulmonar
Aldeído crotonílico $CH_3CH=CHCHO$	2		O.N.G.B.			Edema pulmonar	
Acetona CH_3COCH_3	1 000		O.N.G.			Narcose	
2-Butanona $CH_3COC_2H_5$	200		O.N.G.			Narcose	
2-Pentanona $CH_3COC_3H_7$	200		O.N.G.				
2-Hexanona $CH_3COC_4H_9$	100		O.N.G.				
Hexona $CH_3COCH_2CH_2CH_2CH_3$	100		O.N.G.				
Metil-n-amilcetona $CH_3COC_5H_{11}$	100		O.N.G.				
Etilbutilcetona $C_2H_5COC_4H_9$	50		O.N.G.				
Etil-sec. amilcetona $C_2H_5COC_5H_{11}$	25		O.N.G.				
Diisobutilcetona $C_4H_9COC_4H_9$	50		O.N.G.				


Cetena	$\text{CH}_2 = \text{CO}$				
Oxido mesifílico	$(\text{CH}_2)_2\text{C} = \text{CHCOCH}_3$	0,5		O.N.G.B.	Edema pulmonar
Isoforona		25		O.N.G.	Narcole
$\text{CH}_2\text{CH}_2\text{C} = \text{CHCO}(\text{CH}_2)_2$		25		O.N.G.	Narcole, rins
Ciclo-hexanona	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{CO}$	50		O.N.G.	Figado, rins
Metilciclo-hexanona		100	Pele	O.N.G.	
$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_9\text{CO}$		2		O.N.G.	Rins
Cánfora	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}$				
Alcohol-diacetona	$(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CO}$	50		O.N.G.	Rins, figado
Ácido fórmico	HCOOH	5		O.N.G.	
Ácido acético	CH_3COOH	10		O.N.G.	
Ácido oxálico	HOOCCOOH	1 mg/m ³		O.N.G.	Rins
Anidrido acético	$(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$	5		O.N.G.B.	
Anidrido maléico	$\text{OCCH} = \text{CHCO}$	0,25		O	N.G., alergia
Anidrido ftálico		2		O.N.G.B.	Alergia
X) Ésteres de ácidos orgánicos					
Formiato de metila	HCOOCH_3	100		O.N.G.B.	Narcole
Formiato de etila	HCOOC_2H_5	100		O.N.G.	Narcole
Acetato de metila	$\text{CH}_3\text{COOCH}_3$	200		O.N.G.B.	Narcole
Acetato de etila	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$	400		O.N.G.	Narcole
Acetato de propila	$\text{CH}_3\text{COOC}_3\text{H}_7$	200		O.N.G.	Figado
Acetato de isopropila	$\text{CH}_3\text{COOC}(\text{CH}_3)_2$	250		O.N.G.	Figado
Acetato de butila	$\text{CH}_3\text{COOC}_4\text{H}_9$	150		O.N.G.	
Acetato de sec. butila	$\text{CH}_3\text{COOC}(\text{CH}_2)_2\text{CH}_3$	200		O.N.G.	

TABELA 3.2 (Continuação)

Classe do produto químico	Substâncias	1 TLV 1969	2 Teto Pele	Dano mais próximo ao TLV			7 Dano em níveis diversas vezes acima do TLV
				3 Irritação	4 Nar- cose	5 Toxi- dade	
	Acetato de terc. butila $\text{CH}_3\text{COOC}_4\text{H}_9$	200		O.N.G.			
	Acetato de isobutila $\text{CH}_3\text{COOC}_4\text{H}_9$	150		O.N.G.			
	Acetato de amila $\text{CH}_3\text{COOC}_5\text{H}_{11}$	100		O.N.G.			
	Acetato de sec. amila $\text{CH}_3\text{COOC}_5\text{H}_{11}$	125		O.N.G.			
	Acetato de isonrila $\text{CH}_3\text{COOC}_5\text{H}_{11}$	100		O.N.G.			
	Acetato de sec. hexila $\text{CH}_3\text{COOC}_6\text{H}_{13}$	50		O.N.G.			
	Metilacrilato $\text{CH}_2 = \text{CHCOOCH}_3$	10	Pele	O.N.G.			
	Bilacrilato $\text{CH}_2 = \text{CHCOOC}_2\text{H}_5$	25	Pele	O.N.G.			
	Dimetilftalato $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOCH}_3)_2$	5 mg/m ³		O.N.G.B.			Rins
	Di-2-etil-hexilftalato $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOC}_2\text{H}_5)_2$	5 mg/m ³		O.N.G.B.			Rins
	Dibutilftalato $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOC}_4\text{H}_9)_2$	5 mg/m ³		O.N.G.B.			Rins
	Acetato de metilcelosolve $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{COOCH}_3$	25	Pele	O.N.G.			Rins
	Acetato de 2-etoxietanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OCH}_2\text{COOCH}_3$	100	Pele	O.N.G.			Rins

XI) Ésteres de ácidos inorgânicos

Dimetilsulfato	$(\text{CH}_3\text{O})_2\text{SO}_2$					
Dibutilfosfato	$(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_2\text{POOH}$	1	Pele	O.N.G.B.A.		Edema pulmonar
Tributilfosfato	$(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_3\text{PO}$	1		O.N.G.B.		Anemia
Trifenilfosfato	$(\text{C}_6\text{H}_5\text{O})_3\text{PO}$	5 mg/m ³		O.N.G.B.A.		
Triortocresilfosfato	$(\text{C}_6\text{H}_4\text{O})_3\text{PO}$	3		O.N.G.		
Propilnitrito	$\text{C}_3\text{H}_7\text{ONO}_2$	0,1 mg/m ³				Paralisia
		25				Queda de pressão, dor de cabeça
Étilenoglicol de nitrato		0,2	Pele			Cardiovascular
	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{ONO}_2)_2$					
Nitroglicerina		0,2	Pele			Cardiovascular
	$\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$					
Metilsilicato	$(\text{CH}_3\text{O})_4\text{SiO}$	5	Teto	O.N.G.B.		Rins, necrose da córnea
Etilsilicato	$(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{SiO}$	100		O.N.G.B.		Rins

XII) Epóxi-compostos



Óxido de etileno	$\text{CH}_2=\text{O}-\text{CH}_2$	50		O.N.G.B.		Fígado, alergia
Óxido de propileno	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{O}-\text{CH}_2$	100		O.N.G.B.		Fígado
Glicido	$\text{CH}_2-\text{O}-\text{CHCH}_2\text{OH}$	50		O.N.G.		Narcolese
Éter glicidibutil	$\text{CH}_2-\text{O}-\text{CHCH}_2\text{OC}_4\text{H}_9$	50		O.N.G.		Depressão, S.N.C.
Éter glicidilpropil	$\text{CH}_2-\text{O}-\text{CHCH}_2\text{OC}_3\text{H}_7$	50		O.N.G.		Depressão, S.N.C.
Éter glicidifenil	$\text{CH}_2-\text{O}-\text{CHCH}_2\text{O}$ 	10		O.N.G.		Depressão, S.N.C.
Éter glicidialil	$\text{CH}_2-\text{O}-\text{CHCH}_2\text{OCH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$	10	Teto	O.N.G.		Depressão, S.N.C.
Dioxana		100	Pele			Narcolese
Éter diglicidil	$(\text{CH}_2-\text{O}-\text{CHCH}_2)_2\text{O}$	0,5	Teto	O.N.G.B.		Câncer da pele
						Rins




TABELA 3.2 (Continuação)

Classe do produto químico	Substâncias	1 TLV 1969	2 Teto Pele	Dano mais próximo ao TLV			7 Dano em níveis diversas vezes acima do TLV
				3 Irritação	4 Nar- cose	5 Toxicidade	
XIII) Compostos orgânicos oxigenados e clorados	Etileno clorídrico $\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{Cl}$	5	Pele	O.N.G.B.A.	Rins		Depressão, S.N.C.
	Epiclorídrico $\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Cl}$	5	Pele	O.N.G.	Fígado		Depressão, S.N.C.
	Cloroacetaldeído CH_2ClCHO	1	Teto	O.N.G.B.A.			S.N.C., coração
	Fluoracetato de sódio CH_2FCOONa	0,05	Pele				
	α -Clorocetofenona $\text{C}_6\text{H}_5\text{COCH}_2\text{Cl}$	0,05	Pele,	O.N.G.			Edema pulmonar
	Éter dicloroetil $(\text{CH}_2\text{ClCH}_2)_2\text{O}$	15	teto	O.N.G.B.			Rins
	Pentaclorofenol $\text{C}_6\text{Cl}_5\text{OH}$		Pele	O.N.G.			Rins, fígado
	Oxido diclorofenil	0,5 mg/m ³ 0,5 mg/m ³				Fígado	
XIV) Compostos orgânicos nitrogenados	Nitrometano CH_3NO_2	100		O.N.G.			Edema pulmonar, narcose
	Nitroetano $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NO}_2$	100		O.N.G.			Edema pulmonar, narcose
	1-Nitropropano $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NO}_2$	25		O.N.G.			Edema pulmonar, narcose
	2-Nitropropano $\text{CH}_3\text{CHNO}_2\text{CH}_3$	25		O.N.G.			Edema pulmonar, narcose
	Tetranitrometano $\text{C}(\text{NO}_2)_4$	1		O.N.G.			Edema pulmonar, narcose
	1,1-Dicloronitroetano $\text{CH}_2\text{CCl}_2(\text{NO}_2)$	10	Teto	O.N.G.B.A.			Fígado
	1-Cloro-2-nitropropano $\text{CH}_2\text{ClCH}(\text{NO}_2)\text{CH}_3$	20		O.N.G.B.A.			Edema pulmonar
	Cloropictina $\text{CCl}_3(\text{NO}_2)$	0,1		O.N.G.			

Nitrobenzeno	$C_6H_5NO_2$	1	Pele	Metaemo- globina	Figado, anemia, P.S.
Dinitrobenzeno	$C_6H_4(NO_2)_2$	1 mg/m ³	Pele	Metaemo- globina	Figado, anemia, P.S.
Nitrotolueno	$CH_3C_6H_4NO_2$	5	Pele	Metaemo- globina	Figado, anemia, P.S.
Trinitrotolueno	$CH_3(C_6H_2)(NO_2)_3$	1,5 mg/m ³	Pele	Metaemo- globina	Figado, anemia, P.S.
Dinitro-O-cresol	$CH_3C_6H_3(OH)(NO_2)_2$	0,2 mg/m ³	Pele	Estimulante metabólico	Figado
Acido pícrico	$C_6H_2(OH)(NO_2)_3$	0,1 mg/m ³	Pele		Figado, dermatite
Tetnil	$C_6H_3(NO_2)_2NNO_1CH_3$	1,5 mg/m ³	Pele		Dermatite
XV) Aminas alifáticas					
Metilamina	CH_3NH_2	10			Alergia
Dimetilamina	$CH_3(NH_2)_2$	5	Pele		Alergia
Etilamina	$C_2H_5NH_2$	10			Alergia
Diethylamina	$C_2H_5(NH_2)_2$	25			Alergia
Trietilamina	$C_2H_5(NH_2)_3$	25			Alergia
Isopropilamina	$C_3H_7NH_2$	5			Alergia
Diisopropilamina	$C_3H_7(NH_2)_2$	5	Pele		Alergia
Butilamina	$C_4H_9NH_2$	5	Pele, leto		Alergia
Etanolamina	$HOCH_2CH_2NH_2$	3			Figado
Diethylaminoetanol	$HOCH_2CH_2N(C_2H_5)_2$	10			Figado
Etilenodiamina					
$NH_2CH_2CH_2NH_2$		10			Alergia, figado
Diisocetilamina					
$NH_2CH_2CH_2NHCH_2CH_3$		10	Pele, leto		Alergia, figado
Dimetilformamida					
$HCON(CH_3)_2$		10	Pele	Rins, figado	
Dimetilacetamida					
$CH_3CON(CH_3)_2$		10	Pele	Figado	
Acrilamida	$CH_2=CHCONH_2$	0,3	Pele	Neurotó- xico	

	Difenilamina	10		S.N.C. paralisia	
	Benzidina		Pele	Metaemo-globina Câncer, bexiga	
	p-Fenilendiamina	0,1 mg/m ³	Pele	Metaemo-globina Alergia	
	2-Naftilamina		Pele	Câncer, bexiga	
	Fenil-hidrazina	5	Pele	Alergia, rins, figado	
XVII) Compostos orgânicos cianogenados	Acetonitrila CH_3CN	40		Agudo-HCN	
	Acrilonitrila $\text{CH}_2=\text{CHCN}$	20	Pele	Agudo-HCN	
	Tetrametilsuccinonitrila $\text{CNC}(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CN}$	0,5	Pele	Agudo-HCN	
	O-Clorobenzilideno malonitrila	0,05	Pele	Agudo-HCN	
	Metilisocianato CH_3NCO	0,02	Pele	Alergia pulmonar	
	Tolueno-2,4-disocianato $\text{CH}_3-\text{C}_6\text{H}_3(\text{NCO})_2$	0,02		Alergia pulmonar	
	Metileno-bis(isocianato)	0,02	Teto	Alergia pulmonar	
					O.N.G.B.
					O.N.G.B.
					O.N.G.B.
XVIII) Compostos orgânicos sulfurados	Metilmercaptana CH_3SH	100	Teto	Pulmão	
	Etilmercaptana $\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$	10	Teto	Pulmão	
	Butilmercaptana $\text{C}_4\text{H}_9\text{SH}$	10	Teto	Pulmão	
	Alilpropilidissulfeto $\text{CH}_2=\text{CHCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{S}_2$	2		Pulmão	
	Perclorometilmercaptana CCl_3SH	0,1		Pulmão	
	Dissulfeto de carbono CS_2	20	Pele	Narcole	
					S.N.C.
XIX) Outros compostos orgânicos	Diazometano $\text{CH}_3\text{N}=\text{N}$	0,2		Alergia	
	β -Propiolactona $\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{C}=\text{O}$			Rins, figado,	
	Tetraidrofurano	200		S.N.C. câncer	
				Narcole	

TABELA 3.2 (Continuação)

Classe do produto químico	Substâncias	1	2	3			6	7
				Dano mais próximo ao TLV				
		TLV 1969	Telo Pele	Irritação	Naricose	Toxicidade	Outros	Dano em níveis diversas vezes acima do TLV
XX) Pesticidas A) Hidrocarbonetos clorados	Péroxido de benzoinil ()	5 mg/m ³						
	Hidroquinona 	2 mg/m ³						
	Quinona 	0,1						
B) Organofosforados	Endrin	0,1 mg/m ³	Pele	O.N.G.B.		Rins	Pigmentação dos olhos	O.N.G.
	Audrin, Dieldrin	0,25 mg/m ³	Pele			Rins	Pigmentação dos olhos	O.N.G.
	Clordano, cufeno clorado (Toxafeno), Eptaclor, Lindano (BHC)	0,5 mg/m ³	Pele			Rins		
	DDT	1 mg/m ³	Pele			Rins		
	Metoxiclor	15 mg/m ³	Pele			Rins		
	Tetraetilpicrofosfato (TEPP)	0,05 mg/m ³	Pele			Colinesterase		Dor de cabeça, náusea
	Dematon, Paration, Fosdrin	0,1 mg/m ³	Pele			Colinesterase		Dor de cabeça, náusea
	Tetraetilidionopirofosfato (TEDP)	0,2 mg/m ³	Pele			Colinesterase		Dor de cabeça, náusea
	Etil-P-nitrofenilitionobenzeno fosfonado (EPN)	0,5 mg/m ³	Pele			Colinesterase		Dor de cabeça, náusea
	Dimetildiclorovinilfosfato (DDVP)	1 mg/m ³	Pele			Colinesterase		Dor de cabeça, náusea
Abate, Ronnel, Malation	15 mg/m ³	Pele			Colinesterase		Dor de cabeça, náusea	
C) Herbicidas clorados	2,4-D[2,4-ácido diclorofenoxiacético]	10 mg/m ³				S.N.C.		Paralisia
	2,4,5-T[ácido-2,4,5-triclorofenoxiacético]	10 mg/m ³				S.N.C.		Paralisia
	Herbicida Crag	15 mg/m ³				S.N.C.		Paralisia

D) Outros	15 mg/m ³ 5 mg/m ³	O.N.G.B.	Colinesterase reversível	Dermatite
Ferbam (ditiocarbamato)		O.N.G.B.	Hipertireoide	Edema pulmonar
Carbaril (carbamato)				
Sulfamato de amônio	15 mg/m ³			
Antu (α-naftilduréia)	0,3 mg/m ³		x	
Pival (indanona)	0,1 mg/m ³		x	
Titam (aminodissulfeto)	5 mg/m ³		x	
Parquat (piridina quaternária)	0,5 mg/m ³	Pele		
Estriquina (alcaloide)	0,15 mg/m ³			
Nicotina calcaloide	0,5 mg/m ³	Pele		Convulsões Convulsões, alergia
Piretro	5 mg/m ³		S.N.C.	Convulsões
Rotenona	5 mg/m ³		S.N.C.	Convulsões, alergia
			S.N.C.	Convulsões, alergia
			S.N.C.	Convulsões, alergia
			S.N.C.	Convulsões, alergia
			S.N.C.	Convulsões, alergia
XXI) Compostos metálicos (poeiras, fumos)				
Antimônio	0,5 mg/m ³		Ação sobre o corção e a estrutura	
Arsênico	0,5 mg/m ³		Distúrbio gástrico, pele, pigmentação	
Arseniato de cálcio	1 mg/m ³		Distúrbio gástrico, pele, pigmentação	
Arseniato de chumbo	0,15 mg/m ³		Ação do chumbo e do arsênico	
Bário (solúvel)	0,5 mg/m ³		Alta pressão sanguínea, tremores, paralisia	
Berílio	0,002 mg/m ³		Pneumonte, granuloma, pulmonar	
Óxido de boro	15 mg/m ³		Poeira inerte	
Cádmio (poeira e solúvel)	0,2 mg/m ³		Vômito, câibras abdominais	
Cádmio (fumos)	0,1 mg/m ³		Vômito, pneumonite, rins	
Óxido de cálcio	5 mg/m ³		Irritação O.N.G.	
Cromo (metal e insolúvel)	1 mg/m ³		Rins	
Sais cromoso e crômico	0,5 mg/m ³		Rins	
Ácido crômico, cromatos	0,1 mg/m ³		Irritação do nariz, rins, câncer pulmonar	
Cobalto (metal, poeira)	0,1 mg/m ³		Policitemia, pneumonite, rins	
Cobre (poeira, névua)	1 mg/m ³		Irritação do nariz, distúrbio gástrico, rins, anemia	
Cobre (fumos)	0,1 mg/m ³		Irritação do nariz, distúrbio gástrico, rins, anemia	
Fumos óxido de ferro	10 mg/m ³		Febre do fumo (depósito nos pulmões)	
Sais solúveis de ferro	1 mg/m ³		Irritação do nariz (depósitos nos pulmões)	
Poeira de ferro-vanádio	1 mg/m ³		Irritação do nariz (depósitos nos pulmões)	
Índio	0,1 mg/m ³		Pneumonite, edema pulmonar, rins	
Hálmio	0,5 mg/m ³		Fígado	
Chumbo	0,2 mg/m ³		Anemia, rins	
Hidroto de lítio	0,025 mg/m ³		Irritação nasal e brônquica	
Óxido de magnésio (fumos)	15 mg/m ³		Febre do fumo	
Manganes	5 mg/m ³	Teto	S.N.C., Parkinson, psicose	
Mercurio	0,1 mg/m ³	Pele	S.N.C., tremores, rins	
Mercurio orgânico	0,01 mg/m ³	Pele	S.N.C., tremores, rins	
Molibdênio (insolúvel)	1,5 mg/m ³		Anemia, fígado, rins	

TABELA 3.2 (Continuação)

Classe do produto químico	Substâncias	TLV 1969	Dano mais próximo ao TLV			Dano em níveis diversas vezes acima do TLV		
			2	3	4		5	6
			Teto Pele	Irritação	Nar- cose	Toxi- cidade	Outros	
	Molibdênio (solúvel)	5 mg/m ³						Anemia, fígado, rins
	Níquel (metal e insolúvel)	1 mg/m ³						Coração, rins, fígado
	Tetraóxido de ósmio	0,002 mg/m ³						Irritação: órbita e trato respiratório
	Platina (solúvel)	0,002 mg/m ³						Asma respiratória
	Rádio (metal, poeira)	0,1 mg/m ³						Asma respiratória
	Rádio (solúvel)	0,001 mg/m ³						Asma respiratória
	Compostos de selênio	0,2 mg/m ³						Fígado, distúrbio gástrico
	Prata (metal, solúvel)	0,01 mg/m ³						Depósitos negros na pele
	Tântalo	5 mg/m ³						Pneumonia
	Compostos de telúrio	0,1 mg/m ³						Gosto metálico, náuseas
	Chumbo tetraetila	0,075 mg/m ³	Pele					Anemia, rins
	Tálio (solúvel)	0,1 mg/m ³	Pele					S.N.C., distúrbio gástrico, perda de cabelo
	Estanho (inorgânico, exceto óxido)	2 mg/m ³						Depósitos nas pulmões
	Estanho (orgânico)	0,1 mg/m ³						Fígado
	Óxido de titânio	15 mg/m ³						Poeira inerte
	Tungstênio (insolúvel)	5 mg/m ³						Pneumonia (?)
	Tungstênio (solúvel)	1 mg/m ³						Pneumonia (?)
	Urânio	0,02 mg/m ³						Rins
	Vanádio (pentóxido)	0,1 mg/m ³						Pneumonia
	Vanádio (poeira) lúrio	0,5 mg/m ³ 1 mg/m ³						Pneumonia
	Cloreto de zinco	1 mg/m ³						Fígado
	Óxido de zinco	5 mg/m ³						Irritação, trato respiratório
	Zircônio	5 mg/m ³						Febre do fumo Depósito no pulmão
XXII) Gases e vapores inorgânicos	Ozono O ₃	0,1		O.N.G.B.A.				
	Óxido nítrico NO	25		O.N.G.B.A.				
	Dióxido de nitrogênio NO ₂	5	Teto	O.N.G.B.A.				
	Fosgênio COCl ₂	0,1		O.N.G.B.A.				
	Diborano B ₂ H ₆	0,1		O.N.G.B.A.				S.N.C.

Anemia

Amônia	NH ₃	50			O.N.G.B.
Hidrazina	NH ₂ NH ₂	1	Pele		O.N.G.B.
Monometilhidrazina	CH ₃ NHNH ₂	0,2	Teto, pele		O.N.G.B.
1,1-Dimetilhidrazina	(CH ₃) ₂ NNH ₂	0,5	Pele		O.N.G.B.
Cloro	Cl ₂	1			O.N.G.B.
Bromo	Br ₂	0,1			O.N.G.B.
Iodo	I ₂	0,1			O.N.G.B.
Fúvor	F ₂	0,1	Teto		O.N.G.B.
Cloreto de hidrogênio	HCl	5			O.N.G.B.
Brometo de hidrogênio	HBr	3	Teto		O.N.G.B.
Fluoreto de hidrogênio	HF	3			O.N.G.B.
Peróxido de hidrogênio (90%)	H ₂ O ₂				O.N.G.B.
Dióxido de cloro	ClO ₂	1			O.N.G.B.
Trifluoreto de cloro	ClF ₃	0,1			O.N.G.B.
Percloreto de flúor	ClO ₄ F	3	Teto		O.N.G.B.
Difluoreto de oxigênio	OF ₂	0,05			O.N.G.B.
Trifluoreto de nitrogênio	NF ₃	10			O.N.G.B.
Ácido nítrico	HNO ₃	2			O.N.G.B.
Dióxido de enxofre	SO ₂	5			O.N.G.B.
Monocloreto de enxofre	S ₂ Cl ₂	1			O.N.G.B.
Pentafluoreto de enxofre	SF ₅	0,025			O.N.G.B.
Fluoreto de sulfúria	SO ₂ F ₂	5			O.N.G.B.
Tricloreto de fósforo	PCl ₃	0,5			O.N.G.B.
Hexafluoreto de selênio	SeF ₆	0,05			O.N.G.B.
Hexafluoreto de telúrio	TeF ₆	0,02			O.N.G.B.
Tribrometo de boro	BBr ₃	1			O.N.G.B.
Trifluoreto de boro	BF ₃	1	Teto		O.N.G.B.
Pentafluoreto de boro	BF ₅	0,1			O.N.G.B.

Dióxido de carbono	CO ₂	5 000			Asfixia química
Monóxido de carbono	CO	50			Asfixia química
Cianeto de hidrogênio	HCN	10	Pele		Asfixia química
Cianogênio	C ₂ N ₂	10			Asfixia química
Sulfeto de hidrogênio	H ₂ S	10			Paralisia respiratória
Seleneto de hidrogênio	H ₂ Se	0,05			O.N.G.B.
Decaborano	B ₁₀ H ₁₄	0,05			S.N.C.
Pentaborano	B ₅ H ₉	0,005	Pele		S.N.C.
					Figado
					O.

Asfixia

Asfixia química

Figado

S.N.C.

S.N.C.

O.

Pele

5 000

50

10

10

10

0,05

0,05

0,005

CO₂

CO

HCN

C₂N₂

H₂S

H₂Se

B₁₀H₁₄

B₅H₉

TABELA 3.2 (Continuação)

Classe do produto químico	Substâncias	1	2	3	Dano mais próximo ao TLV			7
					TLV 1969	Teto Pele	Irritação	
	Fosfina PH_3	0.3						Dano em níveis diversas vezes acima do TLV
	Fósforo amarelo P	0.1 mg/m ³					Anemia Necrose dos ossos	
	Hexafluoreto de enxofre SF_6	1.000					Nada	
	Arsina AsH_3	0.05					Hemólise, G.V.	
	Estibina SbH_3	0.1					Hemólise, G.V.	
	Níquel-carbonila $\text{Ni}(\text{CO})_4$	0.001					Câncer	
XXIII) Partículas irritantes	Negro-de-fumo	3.5 mg/m ³						O.N.G.B.A.
	Ácido fosfórico	1 mg/m ³						
	Pentacloreto de fósforo	1 mg/m ³						
	Pentassulfeto de fósforo	1 mg/m ³						
	Hidróxido de sódio	2 mg/m ³						
	Ácido sulfúrico	1 mg/m ³						
XXIV) Poeiras de sílica	Cristalinas [Quartzo Cristobalita]	250 % SiO_2 + 5 mppcf						Fibrose pulmonar progressiva
	Amorfas - incluindo terras diatomáceas	20 mppcf						
	Silicato (menos de 1% sílica cristalina)	5 mppcf						
	- Asbesto	20 mppcf						
	- Pedra-sabão, talco e mica	5 mppcf						
	- Tremolita	50 mppcf						
	- Cimento Portland	15 mppcf						
XXV) Outras poeiras	Grafite	50 mppcf						Fibrose pulmonar progressiva, câncer
	Poeiras inertes: alumina, carbonato de cálcio, celulose, óleos vegetais, óxido de titânio, gesso, etc.	50 mppcf						

4 PROPRIEDADES DOS AERODISPERSÓIDES

CLASSIFICAÇÃO DOS AEROSSÓIS

Os aerossóis são sistemas dispersos cujo meio de dispersão é gasoso e cuja fase dispersa consistem em partículas sólidas ou líquidas. A classificação mais aceita é aquela que diferencia entre aerossóis formados por dispersão e condensação, distinguindo-se os sistemas de acordo com a fase, dispersa, sólida ou líquida.

Os aerossóis formados por dispersão, ou seja, como resultado da desintegração mecânica da matéria (pulverização ou atomização de sólidos ou líquidos, ou transferência de pós para o estado de suspensão, através da ação de correntes de ar ou vibração), são, na maioria dos casos, constituídos por partículas mais grosseiras do que as que constituem os formados por meio de condensação; além disso, contêm partículas com uma maior variação de tamanho.

Os aerossóis de condensação são formados pela condensação de vapores supersaturados, ou pela reação entre gases, que leva a um produto não-volátil. Nesses aerossóis, as partículas sólidas são freqüentemente agregados frouxos provenientes da coagulação de um grande número de partículas primárias de forma esférica ou cristalina regular. Por outro lado, nos aerossóis por dispersão, a fase dispersa sólida consiste em partículas individuais ou agregadas de formas completamente irregulares (fragmentos).

Nos aerossóis cuja fase dispersa é líquida, as partículas são esféricas e, quando colidem, podem fundir-se, produzindo uma única partícula esférica. Para distinguir os diversos aerossóis são utilizados diversos termos, conforme segue.

POEIRAS. Aerossóis formados por dispersão e constituídos por partículas sólidas, geralmente, com diâmetros maiores que $1\ \mu\text{m}$. Por exemplo, poeira de sílica, poeira de asbesto, poeira de algodão, etc.

NÉVOAS. Aerossóis constituídos por partículas líquidas, independentemente da origem e do tamanho das partículas. Por exemplo névoa de ácido sulfúrico, névoa de pintura, etc.

FUMOS. Aerossóis formados pela condensação, sublimação, ou reação química, e constituídos por partículas sólidas, geralmente, com diâmetros menores que $1\ \mu\text{m}$. Por exemplo, fumos metálicos, fumos de cloreto de amônio, etc.

FUMAÇAS. Aerossóis resultantes da combustão incompleta de materiais orgânicos. Estão constituídas geralmente por partículas com diâmetros inferiores a $1\ \mu\text{m}$.

Na Fig. 4.1 são apresentadas diversas características de partículas em aerossóis.

PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS EM RELAÇÃO AO TAMANHO

INTRODUÇÃO

O comportamento das partículas no ar é controlado pelo tamanho, pela forma, pela densidade e pela concentração das mesmas, associados ao movimento do ar. É necessário o conhecimento dessas características para prever o movimento da partícula.

Os aerossóis são constituídos por partículas com tamanhos variando de 10^{-3} a $10^3 \mu\text{m}$. As propriedades das partículas dependem de seus tamanhos e, dentro desse intervalo de tamanhos, certas propriedades sofrem uma transição. Na Fig. 4.2, as propriedades do grupo 1 estão associadas com o livre percurso médio das moléculas ($\lambda = 6,53 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ a 20°C e 760 mm Hg), enquanto que as propriedades do grupo 2 estão associadas com o comprimento de onda médio da luz visível ($0,55 \mu\text{m}$). Aerossóis com tamanhos de partículas no intervalo de $0,05$ a $0,1 \mu\text{m}$ apresentam as propriedades em transição.

Os aerossóis naturais ou produzidos artificialmente são, na maioria, polidispersos, ou seja, constituídos por partículas de mais de um tamanho. Devido à forte tendência existente entre as propriedades físicas dos aerossóis e o tamanho das partículas, um tamanho médio raramente é suficiente para caracterizar um sistema aerodisperso; deve-se conhecer a distribuição de tamanho das partículas, distribuição essa que pode ser expressa de diversos modos. A fração do número total de partículas (n_p) com raios entre r e $r + dr$ pode ser escrita

$$n_p = f(r) dr,$$

com a condição de que

$$\int_0^{\infty} f(r) dr = 1.$$

A curva representando a função $f(r)$ é chamada de curva de distribuição de frequência, ou curva diferencial de distribuição de tamanho de partículas.

Se o fenômeno de interesse está relacionado com as propriedades de dispersão da luz das partículas suspensas, deve ser estabelecida a distribuição de tamanho das partículas com relação a r^2 . Essa distribuição está relacionada com a área projetada da partícula (A), e é dada por

$$dA = f(r^2) dr,$$

com a condição de que

$$\int_0^{\infty} f(r^2) dr = 1.$$

Analogamente, se a propriedade de interesse do aerossol é o peso, então deve ser determinada a distribuição de frequência com respeito a r^3 . Essas distinções são importantes, pois, tanto a área como o peso das partículas estão relacionados com a retenção e o significado toxicológico de partículas de poeira inaladas pelo homem, e a deposição de partículas sobre superfícies.

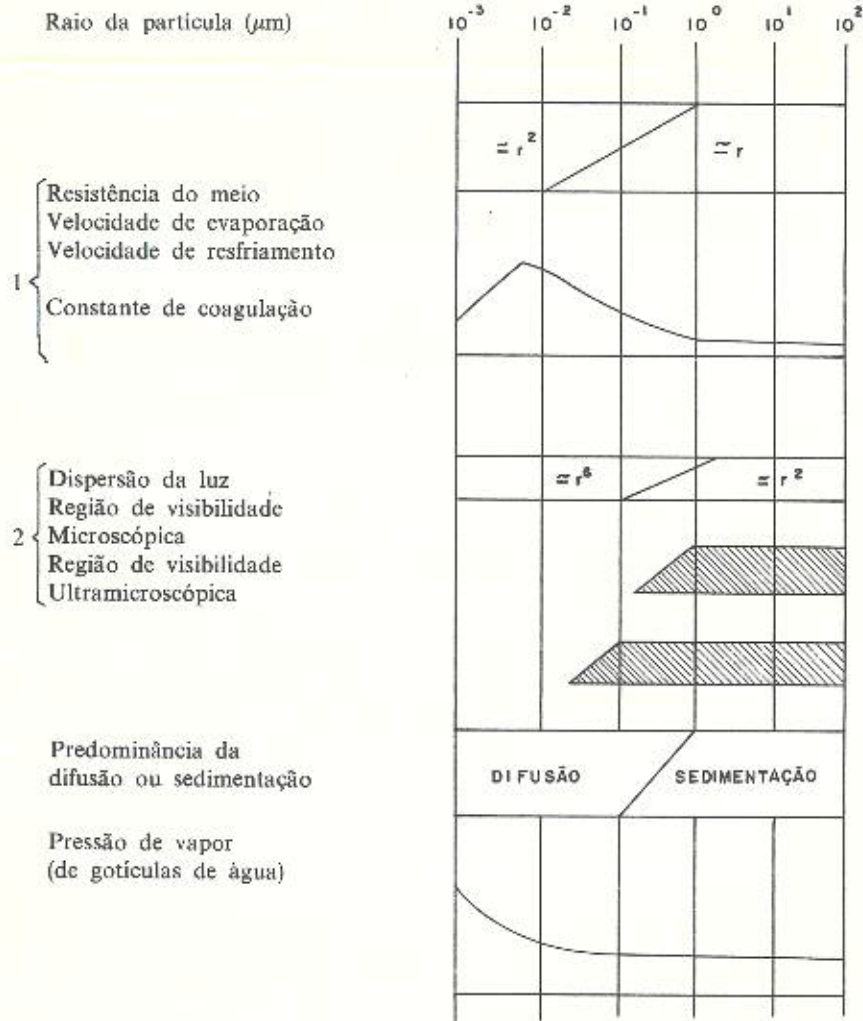


FIGURA 4.2 Algumas propriedades dos aerossóis em relação ao tamanho das partículas. [Fuchs, N. A., *The Mechanics of Aerosols*, pág. 4, Pergamon Press, Oxford, 1964]

DEFINIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULA

O exame de partículas com o auxílio de um microscópio óptico ou eletrônico envolve a medida de uma dimensão linear da silhueta de uma partícula, ou a comparação com áreas de círculos sobre a quadrícula de uma ocular, com a área da silhueta da partícula. O "tamanho da partícula" medido está relacionado com o perímetro da mesma ou com o diâmetro da área projetada da partícula, que é o diâmetro de um círculo tendo a mesma área da silhueta da partícula. Esse tipo de medida não leva em conta a variação na densidade e na forma da partícula. Desse modo, têm sido definidas outras quantidades, como uma medida do tamanho de partícula, baseadas no comportamento aerodinâmico da partícula.

O raio de Stokes (r_s) é definido como o raio de uma esfera que tem a mesma velocidade de queda da partícula, e uma densidade igual à do material com o qual a partícula é formada. Como as partículas atmosféricas são formadas de materiais de muitas densidades, esse parâmetro é difícil de ser usado.

O tamanho aerodinâmico equivalente (d_e ou r_e) é definido como diâmetro ou o raio de uma esfera tendo a mesma velocidade de queda da partícula e uma massa específica igual a 1 g/cm^3 .

PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS

As propriedades que controlam o comportamento físico e químico das partículas individuais num sistema aerossol incluem (1) o tamanho ou extensão espacial, (2) a distribuição de tamanho, (3) a forma, (4) a massa específica e (5) as características superficiais como pressão de vapor ou carga elétrica.

Muitas das propriedades físicas e químicas de substâncias líquidas e sólidas finamente divididas (por exemplo, ponto de fusão, dureza, calor latente e viscosidade) são independentes do tamanho da partícula, enquanto que outras (por exemplo, solubilidade, reatividade química, pressão de vapor e cor) variam em função do tamanho. Essas variações podem ser usadas como um índice do tamanho para materiais específicos.

Características superficiais e fenômenos interfaciais

As propriedades de pequenas partículas relacionadas com suas características superficiais incluem a área específica, taxa de evaporação e condensação, carga eletrostática, adsorção, adesão e dispersão da luz. Em certas circunstâncias, alterações de uma partícula durante amostragem e análise do tamanho, podem modificar seu tamanho ou estado de agregação, ou suas características superficiais. Tais alterações devem ser consideradas na seleção de um adequado dispositivo de amostragem ou método de análise do tamanho da partícula.

ÁREA SUPERFICIAL

Uma das características importantes das partículas pequenas é o rápido aumento na área superficial por unidade de massa, com o decréscimo do tamanho. Por exemplo, uma gota de água com um diâmetro de 1 cm (0,52 g) tem uma área superficial de aproximadamente $3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ($5,7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{g}$); quando subdividido em gotículas de 1 ou 0,1 μm , esse mesmo volume de água tem uma área superficial de 3 m^2 ($5,7 \text{ m}^2/\text{g}$) ou 30 m^2 ($57 \text{ m}^2/\text{g}$). Essa característica leva a um aumento da taxa de reação química e um aumento no risco de inalação.

EVAPORAÇÃO E CONDENSAÇÃO

São processos difusionais de transferência de massa que se realizam em proporção à área superficial exposta. A equação seguinte fornece o tempo requerido para que uma partícula pequena (por exemplo de água) evapore em ar parado:

$$t = \frac{\rho d^2}{D(\Delta p)} \frac{RT}{8M}$$

sendo

t o tempo para que uma gotícula esférica se evapore-se (s);

ρ a densidade (massa específica) da partícula (g/cm^3);

d o diâmetro da partícula (cm);

D o coeficiente de difusão do vapor da partícula (cm^2/s);

Δp a diferença entre as pressões parciais na superfície da gotícula e no fluido circunvizinho (dyn/cm^2);

R a constante dos gases ($8,3 \cdot 10^7 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^2 \cdot \text{g} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}$);

T a temperatura absoluta (K);

M o peso molecular do material particulado que se evapora.

Quando $\Delta p = 1 \text{ mm Hg}$, a taxa de evaporação de gotas de água de $10 \mu\text{m}$ de diâmetro, nas condições normais de pressão e temperatura, é igual a cerca de 10^{19} moléculas por segundo por centímetro quadrado. Partículas mais finas podem agir como centro para condensação de umidade, havendo um aumento em seus tamanhos.

CARGA ELETROSTÁTICA

Representa um excesso (-) ou deficiência (+) de elétrons sobre a partícula. A maioria das pequenas partículas têm carga adquirida naturalmente pela transferência de elétrons durante contato ou separação, ou devido à difusão de íons livres. Pode-se assumir que essa carga reside sobre a superfície da partícula num filme de umidade ou gás adsorvido. O número de cargas adquiridas pelas partículas é limitado, e depende do meio que envolve as partículas. No caso de ar seco, é cerca de $1,6 \times 10^{10}$ elétrons/ cm^2 ou $8 \text{ esu}/\text{cm}^2$. É possível criar cargas que excedam esse valor sob certas condições, mas os níveis usuais observados são consideravelmente menores.

Cargas de ambos os sinais podem aparecer quase que igualmente após dispersão de pequenas partículas numa nuvem, e a carga resultante do aerossol, como um todo, pode ser bem pequena mesmo que as partículas, individualmente, estejam altamente carregadas. A colisão e a aglomeração de partículas com cargas opostas afeta a sedimentação de nuvens de poeira e pode levar a dados falsos de análise, conforme o processo de medida utilizado. A presença de cargas eletrostáticas sobre uma partícula produz forças que influenciam seu comportamento aerodinâmico num campo elétrico. Classificadores têm sido dimensionados para aproveitar-se o fato de que pode ser colocada sobre uma partícula uma carga proporcional a seu tamanho.

DISPERSÃO DA LUZ

A dispersão de um raio luminoso provém da falta de homogeneidade, como poeiras ou gotículas d'água dispersadas, de um meio fluido. A dispersão é frequentemente acompanhada pela absorção e ambas removem energia do raio luminoso. A resposta quantitativa do raio atenuado pode servir para caracterizar o tamanho das partículas. Quando vista diretamente, a atenuação é chamada de extinção. Para partículas esféricas homogêneas, o coeficiente de dispersão é proporcional ao tamanho da partícula, ao índice de refração e ao comprimento de onda da luz incidente. Formas irregulares e dispersões não-homogêneas são mais difíceis de analisar teoricamente, mas relações empíricas

podem ser desenvolvidas para sistemas específicos. A luz dispersa de partículas individuais é aproximadamente proporcional à superfície, para partículas maiores que o comprimento de onda incidente; essa relação é usada em contadores de partículas suspensas.

A luz transmitida através de uma dispersão homogênea de partículas é atenuada de acordo com a lei de Lambert-Beer,

$$I = I_0 \exp(-C_e LcA),$$

sendo

- I a intensidade da luz emergente;
- I_0 a intensidade da luz incidente;
- C_e o coeficiente de extinção da partícula, adimensional;
- L o comprimento do trajeto através do dispersóide (cm);
- c a concentração das partículas (número/cm³);
- A a área projetada da partícula (cm²).

ADSORÇÃO

Pequenas partículas sólidas e líquidas são revestidas por um filme superficial de gás mantido por forças elétricas ou de valência química originada na superfície das moléculas. As moléculas de gás adsorvido podem estar presentes, em proporção a sua concentração na fase gasosa circunvizinha, até o ponto de saturação para uma completa camada monomolecular. A quantidade de gás ou vapor que pode ser adsorvido sobre a superfície da partícula é diretamente proporcional à superfície exposta, e esse fato pode ser usado para medir tamanho de partículas sobre certas condições. Muitas características superficiais de pequenas partículas incluindo carga elétrica, adesão, e evaporação, são modificadas pela presença de gases adsorvidos.

ADESÃO

Quando uma camada de líquido é espalhada entre superfícies em contato, ela produz forças de adesão em proporção à tensão superficial do líquido e ao raio de curvatura da superfície líquida molhante. A umidade do ar favorece a adesão. O fenômeno de adesão está relacionado com as forças de Van Der Waals, carga eletrostática, campos externos — como na precipitação eletrostática —, pontos de contato e rugosidade da superfície de aderência.

Densidade

A densidade de uma partícula formada por dispersão de um sólido será a mesma do material que a originou. Se ela, subsequentemente, sofrer oxidação superficial ou hidratação, ou se ela aglomerar-se, sua massa específica variará. Quando duas ou mais partículas sólidas não-porosas se juntam, a partícula resultante terá uma forma geométrica diferente que inclui espaços ociosos. Por isso, a massa específica da partícula resultante será menor do que a das partículas originais. A massa específica de um aglomerado pode ser dez vezes menor do que o material que o formou. Na Tab. 4.1 são apresentadas massas específicas de aglomerados de óxidos metálicos.

TABELA 4.1 Massas específicas de aglomerados de partículas

Material	Massa específica do floco (g/cm ³)	Massa específica verdadeira (g/cm ³)
Prata	0,94	10,5
Mercurio	1,70	13,6
Óxido de cádmio	0,51	6,5
Óxido de magnésio	0,35	3,6
Cloreto de mercúrio	1,27	5,4
Trióxido de arsênico	0,91	3,7
Óxido de chumbo	0,62	9,4
Trióxido de antimônio	0,63	5,6
Óxido de alumínio	0,18	3,7
Óxido estânico	0,25	6,7

Fatores de forma das partículas

A forma da partícula é influenciada pelo método de formação; se por dispersão, a partícula se assemelhará ao material que a originou; se por meio de condensação de um vapor (por exemplo, fumo metálico), a menor partícula unitária pode ser esférica ou cúbica. Em muitos casos, a condensação é seguida imediatamente por solidificação e formação de cadeias como agregados de partículas (por exemplo, fumos de óxido de ferro, negro de fumo). Após formação, alterações na forma da partícula podem ocorrer devido à cristalização, hidratação, aglomeração, etc. Líquidos formam esferas que podem coalescer em contato para formar maiores esferas.

Na maioria dos casos de interesse em higiene industrial, as partículas encontradas são irregulares. Às partículas irregulares, pode ser atribuída uma dimensão linear arbitrária de acordo com a definição de tamanho, como segue.

DIÂMETRO DE FERET

A distância normal entre duas tangentes paralelas aos pontos extremos sobre a partícula medida de uma maneira padronizada.

DIÂMETRO DE MARTIN

A distância entre lados opostos da partícula, medida numa direção padronizada de tal modo que o diâmetro bissecciona a área projetada.

DIÂMETRO PROJETADO

O diâmetro de um círculo de área igual ao perfil da área projetada da partícula.

Quando formas irregulares da partícula são caracterizadas por uma única dimensão que é medida de um modo padronizado, a área superficial da partícula e o volume podem ser admitidos como funções dessa mesma dimensão linear; e a área e o volume podem ser estimados aplicando-se adequados fatores de forma.

É encontrado empiricamente que a área superficial total de uma coleção de partículas (A_p) será aproximadamente igual a uma constante multiplicada pelo quadrado de algum diâmetro médio da coleção de partículas para um mesmo material, dentro de uma razoável faixa de tamanhos. Assim, o fator de proporcionalidade é definido como um fator de forma de superfície pela expressão

$$\alpha_s = A_p(\sum_i n_i d_{med,i}^2)^{-1}.$$

Uma similar relação empírica existe entre o volume total de uma coleção de partículas (V_p) e seu diâmetro médio (d_{med}) dentro de uma razoável faixa de tamanhos; assim, é possível definir um fator de forma de volume pela expressão:

$$\alpha_v = V_p(\sum_i n_i d_{med,i}^3)^{-1}.$$

Os valores de A_p , V_p e d_{med} (conseqüentemente α_s e α_v) dependem especificamente do método de medida.

Na Tab. 4.2 são apresentados típicos valores de fatores de forma, obtidos por vários investigadores, usando diferentes métodos. Como está indicado nessa tabela para partículas esféricas, $\alpha_s = \pi/6$ e $\alpha_v = \pi$. A relação α_s/α_v representa um índice da forma da partícula, sendo 6 para esferas e cubos. De acordo com Fair e Hatch, a relação para areias é cerca de 6,1 para partículas redondas, e 7,4 para partículas angulares.

Os fatores de forma são necessários para converter tamanhos de partículas obtidos por métodos diretos de análise em diâmetro aerodinâmico. Define-se coeficiente de esfericidade como a relação entre a área superficial de uma esfera com o mesmo volume da partícula e a área superficial da partícula. É definido também um fator dinâmico (W) como a relação entre os quadrados do raio equivalente aerodinâmico (r_e) e o raio de Stokes, r_{st} .

ASPECTOS GERAIS DO MOVIMENTO DE PARTÍCULAS NUM FLUIDO

INTRODUÇÃO

A remoção de moléculas de um fluxo gasoso depende unicamente da difusão. Por outro lado a remoção de partículas depende, além da difusão, de outros mecanismos mais importantes, como da separação centrífuga e da gravitacional, impactação inercial e interceptação, ou da ação de forças eletrostáticas, térmicas ou magnéticas.

Essencialmente, o dispositivo para a remoção de partículas é um sistema através do qual passa o fluxo gasoso, enquanto que as partículas sofrem ação de forças que as capacitam a deixar o fluxo gasoso. Essas forças, para serem efetivas, devem ser suficientemente grandes para retirar a partícula do fluxo gasoso durante o tempo de residência da partícula no sistema de limpeza. Assim, sob a ação dessas forças, a partícula adquire uma velocidade numa direção diferente da do fluxo gasoso e, em seu movimento, encontra a resistência do gás. Devido à complexidade do assunto, supõe-se que a resistência oferecida à partícula pelo fluido em movimento seja a mesma que a partícula sofreria se estivesse se movendo através de um fluido estacionário. O cálculo da resistência do fluido ao movimento da partícula é fundamental para determinar-se a eficiência de um particular mecanismo na remoção da partícula do fluxo gasoso.

TABELA 4.2 Valores de fatores de forma para várias partículas

Materiais granulares	α_s	α_v
Areias de filtros	2,7	—
Quartzo britado	2,0-2,5	0,27-0,28
Quartzo	—	0,140
Calcita	—	0,135
Granito	—	0,140
Areia branca	2,1-2,7	—
Feldspato	—	0,26
<i>Formas</i>		
Esférica	π	$\pi/6$
Cúbica/irregular	2-8	0,2-0,5
Flocosa	0,2-2	0,01-0,1
Fibrosa	π	$\pi/4$

RESISTÊNCIA DE UM FLUIDO AO MOVIMENTO DE PARTÍCULAS

Os cálculos mais simples com relação aos sistemas gás-partícula são aqueles para uma única esfera rígida em movimento permanente num fluido contínuo de extensão infinita. Contudo, mesmo para esse modelo, a relação entre a resistência do fluido e a velocidade da partícula é muito complexa. Os dados relacionando esses parâmetros podem ser apresentados numa única curva na Fig. 4.3.

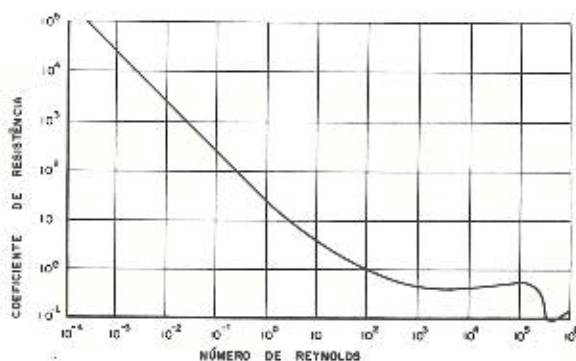


FIGURA 4.3 Relação entre o coeficiente de resistência [$\log_{10} C_R$] e o número de Reynolds [$\log_{10} Re$]

A abscissa é o logaritmo de uma função adimensional da velocidade relativa na forma do número de Reynolds da partícula,

$$Re = vd\rho/\mu, \quad (4.1)$$

onde v é a velocidade relativa entre a partícula e o fluido; d o diâmetro da partícula; ρ a massa específica do fluido; μ a viscosidade do fluido.

A ordenada é o logaritmo de uma função chamada coeficiente de resistência (C_R) ao movimento (coeficiente de arraste ou coeficiente de atrito) adimensional, que é dado por

$$C_R = \frac{F_R}{A \frac{1}{2} \rho v^2}, \quad (4.2)$$

onde F_R é a força de resistência ao movimento; A a área superficial da partícula, perpendicular à direção do movimento (área projetada); ρ e v , conforme definidos na equação anterior.

No caso de uma partícula esférica, A é igual a $\pi d^2/4$, e a Eq. (4.2) torna-se

$$C_R = \frac{8F_R}{\pi \rho v^2 d^2}. \quad (4.3)$$

A curva mostrada na Fig. 4.3 pode ser dividida em quatro seções cada uma associada com o regime de escoamento do fluido ao redor da partícula, e fórmulas específicas podem ser utilizadas para calcular C_R em cada seção.

Em velocidades muito baixas, associadas com Re até cerca de 0,1, o regime de escoamento do fluido ao redor da partícula é laminar, como pode ser observado na Fig. 4.4. Essa é a região da Lei de Stokes. Dessas condições, Stokes deduziu que a resistência do fluido podia ser calculada pela equação

$$F_R = 3\pi\mu d v. \quad (4.4)$$

Dessa equação obtém-se que o coeficiente de resistência para partículas esféricas é dado por

$$C_R = \frac{24}{Re}. \quad (4.5)$$

Quando $Re = 0,05$, F_R , calculada pela Eq. (4.4), concorda $\pm 1\%$ com valores obtidos experimentalmente; mas, para $Re = 1$, F_R é subestimada, divergindo cerca de 13% de valores obtidos experimentalmente.

Para Re um pouco maior que 0,1, começa a formar-se um pequeno torvelinho no fluido logo atrás da partícula em movimento. Para levar em conta esse efeito, Oseen propôs a seguinte equação para partículas esféricas:

$$C_R = \frac{24}{Re} (1 + 3/16 Re). \quad (4.6)$$

O coeficiente de resistência dado por essa equação é 3% maior do que o valor obtido experimentalmente para $Re = 1$.

Na faixa $30 < Re < 300$, considerada uma região de transição, há um aumento do turbilhonamento (Fig. 4.4) conforme aumenta a velocidade da partícula. Allen encontrou experimentalmente que

$$C_R \cong 10/Re. \quad (4.7)$$

Para propósitos práticos, pode-se considerar a região de transição até $Re = 1000$. Acima desse valor, C_R permanece constante na faixa de 0,38-0,50 e, por isso, também F_R é aproximadamente constante e, de acordo com a Eq. (4.2),

$$F_R = C_R (\text{constante}) A \cdot \frac{1}{2} \rho v^2. \quad (4.8)$$

Nessa região, o fluxo ao redor da partícula é completamente turbulento; a Eq. (4.8) foi inicialmente deduzida por Newton, que admitiu C_R igual à unidade.

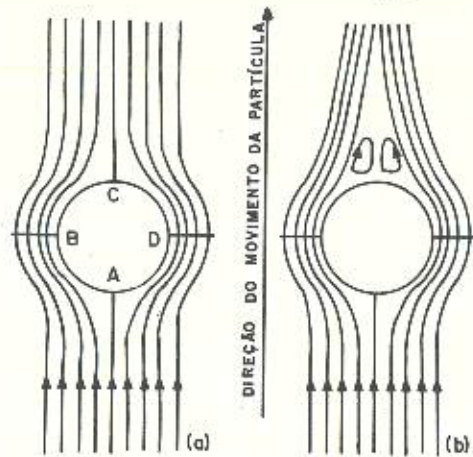


FIGURA 4.4 Linhas de fluxo ao redor de uma esfera em movimento permanente num fluido laminar. (a) Região da Lei de Stokes; (b) região de transição ($Re \approx 2$)

Quando as velocidades são grandes, nas vizinhanças de $Re = 2 \times 10^5$, a camada-limite frontal à partícula torna-se instável, sendo que, em velocidades ainda maiores, há um decréscimo em C_R de 0,4 a 0,1.

VELOCIDADE TERMINAL

A velocidade terminal alcançada por uma partícula é a velocidade que ela atinge quando a resistência do fluido iguala-se à força externa aplicada à partícula. Considerando-se F a força externa, segundo a Eq. (4.2), a velocidade terminal (v_t) será

$$v_t = \sqrt{\frac{2F}{C_R A \rho}} \quad (4.9)$$

Se a partícula for uma esfera movendo-se sob a ação da força da gravidade, teremos

$$v_t = \sqrt{\frac{4d(\rho_p - \rho)g}{3C_R \rho}} \quad (4.10)$$

sendo g a força da gravidade e ρ_p a massa específica da partícula. Se a esfera estiver se movendo na região da Lei de Stokes, a velocidade terminal de sedimentação será

$$v_t = \frac{d^2(\rho_p - \rho)g}{18\mu} \quad (4.11)$$

Por essa equação, que, na prática, pode ser utilizada até $Re = 2$, pode-se determinar o diâmetro-limite de uma partícula esférica caindo sob a ação da gravidade através de ar a 20°C e 760 mm Hg . Supondo $\rho_p = 1\text{ g/cm}^3$, considerando $Re = 2$, e tendo $\rho = 1,2 \times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$, $\mu = 1,8 \times 10^{-4}\text{ g/cm} \times \text{s}$, e $g = 980\text{ cm/s}^2$, temos $d \cong 100\ \mu\text{m}$.

Esse cálculo pode também ser feito na região da Lei de Newton, onde $Re > 1000$, conhecendo-se C_R , que, para esferas, tem um valor aproxima-

mente constante de 0,44. Nesse caso, supondo $\rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$, teremos um diâmetro-limite de $\cong 2000 \mu\text{m}$, aplicando Eq. (4.10).

Na região de transição, onde C_R é uma função de Re , a Eq. (4.10) pode ser resolvida somente por aproximações sucessivas. Esse problema pode ser superado expressando-se Re em função de $C_R \cdot Re^2$ e de C_R/Re . Para o caso em que conhecemos v_i e ρ_p e queremos determinar d , temos, para partículas esféricas,

$$\frac{C_R}{Re} = \frac{4g\mu(\rho_p - \rho)}{3\rho^2 v_i^3}. \quad (4.12)$$

Quando conhecemos d e ρ_p e queremos determinar v_i , temos, para partículas esféricas,

$$C_R Re^2 = \frac{4g\rho d^3(\rho_p - \rho)}{3\mu^2}. \quad (4.13)$$

Na Tab. 4.3 estão apresentados o coeficiente de resistência e as funções correlatas para partículas esféricas que podem ser plotadas em papel log-log, para usos práticos.

RESISTÊNCIA OFERECIDA POR UM MEIO NÃO-CONTÍNUO

Quando as partículas são muito pequenas, ou seja, da ordem do livre percurso médio das moléculas gasosas, ou menores, então a suposição de que o meio gasoso comporta-se como um meio contínuo não é completamente válida. Sob essas condições, as partículas tendem a se mover mais rapidamente do que o previsto pela Lei de Stokes, ou outras teorias que assumem um meio contínuo. Para levar em consideração esse "escorregamento" das partículas, foram propostos diversos fatores de correção, sendo que Davies apresentou a equação

$$Ch = 1 + \frac{2\lambda}{d} [1,257 + 0,400 \exp(-1,10 \cdot d/2\lambda)], \quad (4.14)$$

onde Ch é o fator de correção de Cunningham e λ o livre percurso médio das moléculas do gás, baseado na equação de Chapman-Enskog:

$$\lambda = \mu/0,499\rho v_{med}, \quad (4.15)$$

sendo v_{med} a velocidade média das moléculas, dada pela equação

$$v_{med} = \sqrt{\delta RT/\pi M}, \quad (4.16)$$

em que R é a constante universal dos gases, T a temperatura absoluta e M o peso molecular.

A equação modificada da Lei de Stokes, usualmente conhecida como equação de Stokes-Cunningham, é

$$F_R = 3\pi\mu d v / Ch. \quad (4.17)$$

A correção pelo escorregamento é menor que 1% para partículas de $20 \mu\text{m}$ de diâmetro (massa específica 1 g/cm^3) no ar ambiente, cerca de 5% para partículas de $5 \mu\text{m}$, 16% para partículas de $1 \mu\text{m}$ e quase 300% para partículas de $0,1 \mu\text{m}$ de diâmetro.

TABELA 4.3 Coeficiente de resistência e funções correlatas para partículas esféricas

Re	C_R	$C_R \cdot Re^2$	C_R/Re
0,1	240	2,4	2 400
0,2	120	4,8	600
0,3	80	7,2	267
0,5	49,5	12,4	99,0
0,7	36,5	17,9	52,1
1,0	26,5	26,5	26,5
2	14,6	58,4	7,3
3	10,4	93,7	3,47
5	6,9	173	1,38
7	5,3	260	0,757
10	4,1	410	0,410
20	2,55	$1,02 \times 10^3$	0,1275
30	2,00	1,80	0,0667
50	1,50	3,75	0,0300
70	1,27	6,23	0,0181
100	1,07	$1,07 \times 10^4$	0,0107
200	0,77	3,08	$3,85 \times 10^{-3}$
300	0,65	5,85	2,17
500	0,55	$1,38 \times 10^5$	1,10
700	0,50	2,45	$7,14 \times 10^{-4}$
1 000	0,46	4,60	4,60
2 000	0,42	$1,68 \times 10^6$	2,10
3 000	0,40	3,60	1,333
5 000	0,385	9,60	$7,70 \times 10^{-5}$
7 000	0,390	$1,91 \times 10^7$	5,57
10 000	0,405	4,05	4,05
20 000	0,45	$1,80 \times 10^8$	2,25
30 000	0,47	4,26	1,57
50 000	0,49	$1,23 \times 10^9$	$9,80 \times 10^6$
70 000	0,50	2,45	7,14
100 000	0,48	4,80	4,80
200 000	0,42	$1,68 \times 10^{10}$	2,10
300 000	0,20	1,80	$6,67 \times 10^{-7}$
400 000	0,084	1,34	2,10
600 000	0,10	3,60	1,667
1 000 000	0,13	$1,30 \times 10^{11}$	1,300
3 000 000	0,20	$1,80 \times 10^{12}$	$6,67 \times 10^{-8}$

Perry, *Chemical Engineers' Handbook*, págs. 5-61, quarta edição, McGraw-Hill

RESISTÊNCIA OFERECIDA QUANDO VÁRIAS PARTÍCULAS ESTÃO PRESENTES

Quase sempre, quando se trata da remoção de partículas de um fluxo gasoso, há um grande número de partículas presentes, de modo que as equações deduzidas para o movimento de partículas discretas devem ser modificadas, a fim de que as interações sejam levadas em consideração. Essas interações tornam-se apreciáveis mesmo em baixas concentrações, de forma que uma concentração volumétrica de partículas (relação entre o volume das partículas e o volume total) de 0,002 aumentará a resistência ao movimento em cerca de 1%.

O movimento de um grupo de partículas num fluido de extensão infinita resulta no movimento de fluido ao redor do grupo. Quando as partículas estão suficientemente juntas, o fluido entre as partículas move-se com as mesmas, e o grupo pode ser considerado uma "nuvem". Quando há paredes envolvendo o grupo de partículas ou as partículas estão suficientemente longe umas das outras, então o fluido se moverá entre as partículas. Em geral, as nuvens tendem a se mover mais rapidamente que partículas discretas, enquanto que grupos envolvidos por paredes tendem a se mover mais vagarosamente que partículas individuais.

RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO DE PARTÍCULAS EM UM FLUIDO LIMITADO

Quando o diâmetro da partícula torna-se apreciável com respeito às dimensões do recipiente que a contém, as paredes do recipiente exercerão um efeito adicional de retardamento, conhecido como "efeito de parede". No caso de partículas sedimentando-se, esse efeito pode ser corrigido multiplicando-se a velocidade terminal, conforme calculada pela Lei de Stokes, pelo fator K_w , conforme dado na Tab. 4.4. Quando o regime é turbulento, propõe-se que a velocidade terminal seja multiplicada por

$$K'_w = 1 - \beta^{1,5} \quad (4.18)$$

TABELA 4.4 Fator de correção para "efeito de parede" para partículas na região da Lei de Stokes

β^*	K_w	β^*	K_w
0,0	1,000	0,5	0,170
0,1	0,792	0,6	0,0945
0,2	0,596	0,7	0,0468
0,3	0,422	0,8	0,0205
0,4	0,279		

*Diâmetro da partícula dividido pelo diâmetro do recipiente

RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO DE PARTÍCULAS NÃO-ESFÉRICAS

A maioria das equações apresentadas aplica-se somente para esferas, e devem ser modificadas quando forem utilizadas para partículas com outras

formas. Além disso, também deve ser levada em consideração a orientação da partícula e sua alteração durante a translação.

A orientação da partícula depende do regime de escoamento do fluido. Para escoamento em regime laminar, as partículas com três planos perpendiculares de simetria reterão sua orientação inicial, enquanto que aquelas com somente dois planos de simetria tomarão orientação preferencial com as linhas da interseção dos planos na direção do fluxo. Partículas isométricas (cubos, tetraedros, octaedros) e algumas não-isométricas (cilindros) retêm sua orientação inicial, enquanto que discos redondos e lâminas triangulares tomam uma orientação preferencial.

Nos outros regimes de escoamento há uma tendência de as partículas se orientarem preferencialmente de acordo com a maior área projetada perpendicular à direção do movimento.

Um importante conceito é o chamado coeficiente de esfericidade, definido como a relação entre a área superficial de uma esfera que possui o mesmo volume de uma partícula considerada e a área superficial dessa partícula.

Além do fator de forma ψ , coeficiente de esfericidade, é também muito usado χ , o coeficiente de circularidade, definido como a relação entre a circunferência de um círculo tendo mesma área transversal que a partícula irregular e o perímetro da seção transversal da partícula irregular. Na Fig. 4.5, está apresentada uma correlação de C_R com partículas de diferentes esfericidades.

Para partículas isométricas, a velocidade pode ser obtida multiplicando-se a velocidade de uma esfera com diâmetro do volume equivalente (d_v) por um

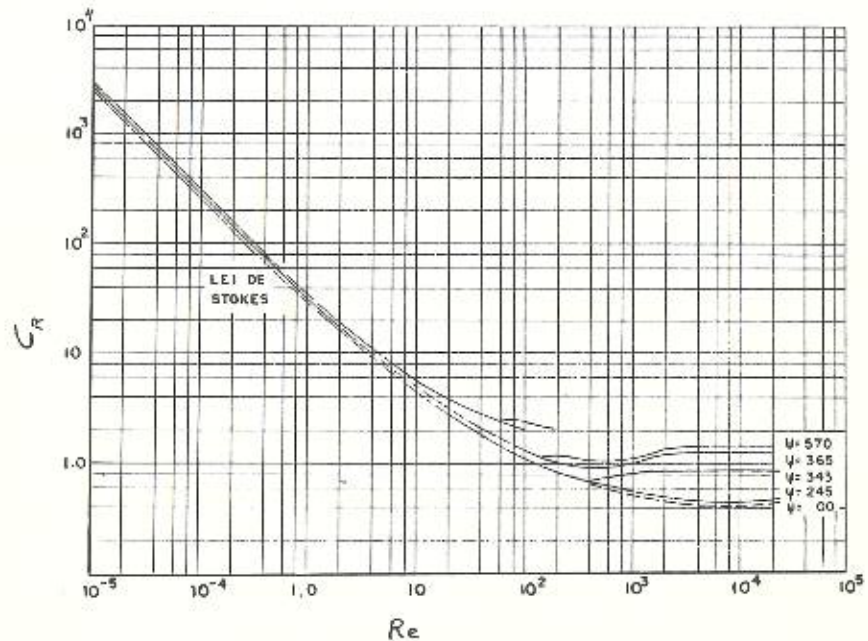


FIGURA 4.5 Correlação do coeficiente de resistência (C_R) para partículas isométricas com diferentes esfericidades. [Strauss, W., *Industrial Gas Cleaning*, p. 142, Pergamon Press, 1966]

fator empírico de correção (K), dado por

$$K = 0,843 \log_{10}(\psi/0,065),$$

válido para a região da Lei de Stokes.

MECANISMOS AERODINÂMICOS DE CAPTURA DE PARTÍCULAS

INTRODUÇÃO

A coleta de partículas por filtros de fibra e por lavadores é essencialmente uma captura de partículas por corpos coletores. O fluxo gasoso, passando através do filtro ou lavador, leva as partículas junto a esses corpos coletores, onde uma série de mecanismos realiza a coleta das mesmas. Em qualquer caso, a importância relativa desses mecanismos varia com o tamanho e a velocidade relativa das partículas, com o corpo coletor e com a presença de forças eletrostáticas, gravitacionais ou térmicas. Os mecanismos básicos são:

impactação inercial;
intercepção;
difusão.

Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para cada mecanismo individualmente, e as soluções são geralmente obtidas por métodos numéricos. A combinação de dois ou mais desses mecanismos tem sido solucionada apenas para alguns casos especiais. Felizmente, predomina um único mecanismo na maioria dos casos, simplificando as suposições a serem feitas.

IMPACTAÇÃO INERCIAL

Quando um fluxo gasoso em movimento aproxima-se de um cilindro infinitamente longo, colocado perpendicularmente ao fluxo, ou de uma esfera, as linhas de fluxo espalham-se ao redor do corpo. A configuração das linhas de fluxo depende da velocidade do fluido. Em altas velocidades, as linhas de fluxo divergem repentinamente junto do corpo, enquanto que, em baixas velocidades, a divergência começa a uma considerável distância a montante do corpo.

Pode ser definido um número de Reynolds como uma função das dimensões do corpo coletor e da velocidade relativa do fluido,

$$Re_c = \frac{v_0 \rho d_c}{\mu}, \quad (4.19)$$

onde v_0 é a velocidade do fluido tranqüilo, a montante do corpo coletor; d_c o diâmetro do corpo coletor; ρ a densidade do fluido; e μ a viscosidade do fluido. Quando $Re_c = 2$, ocorre um distúrbio de 3% a uma distância de $100d_c$ a montante, enquanto que, para $Re_c = 2000$, não há praticamente distúrbio do fluido a uma distância de $2d_c$ a montante do corpo.

Se um aerossol for introduzido num fluxo gasoso que passa através de um corpo coletor, as partículas seguirão as linhas de fluxo do gás até o ponto em que elas divergem ao redor do coletor. As partículas, devido a sua massa, terão suficiente momento para continuar a mover-se contra o coletor (Fig. 4.6).

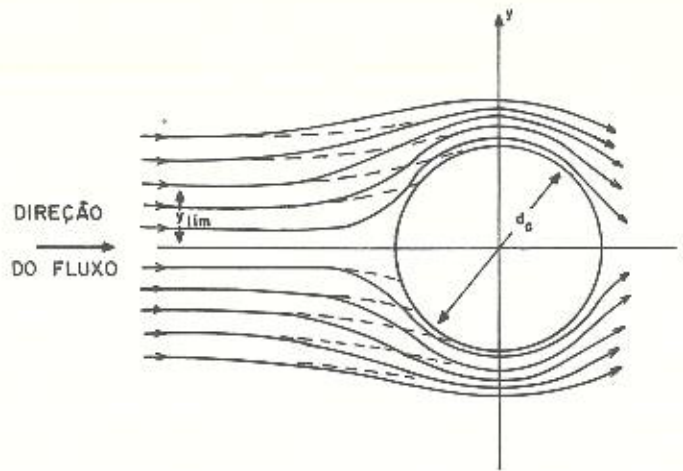


FIGURA 4.6 Modelo de fluxo ao redor de um cilindro; as linhas tracejadas indicam as trajetórias tomadas pelas partículas coletadas por impactação. —, linhas de fluxo de fluido; ---, trajetórias das partículas

Para a região da Lei de Stokes, pode-se definir um parâmetro de impactação inercial como

$$\varphi = \frac{Ch(\rho_p - \rho)d^2v_0}{18\mu d_c} \quad (4.20)$$

Fisicamente, φ é a distância de parada, num fluido imóvel, de uma partícula com uma velocidade inicial de $2v_0/d_c$, supondo-se que a resistência do fluido esteja na região da Lei de Stokes. As curvas de eficiência para impactação inercial em cilindros e esferas, usando-se $\sqrt{\varphi}$ como a abscissa, estão apresentadas nas Figs. 4.7 e 4.8.

A eficiência de captura por impactação inercial é definida pela fração de partículas que pode ser coletada pelo cilindro ou esfera de uma área transversal

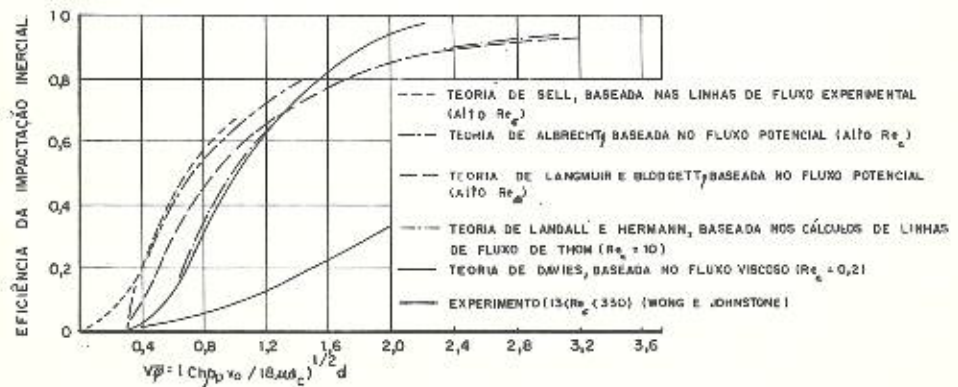


FIGURA 4.7 Eficiência de impactação inercial de esferas em cilindros, baseada em várias teorias e experiências de Ranz, Wong e Johnstone. [Strauss, W., *Industrial Gas Cleaning*, p. 219, Pergamon Press, 1966]

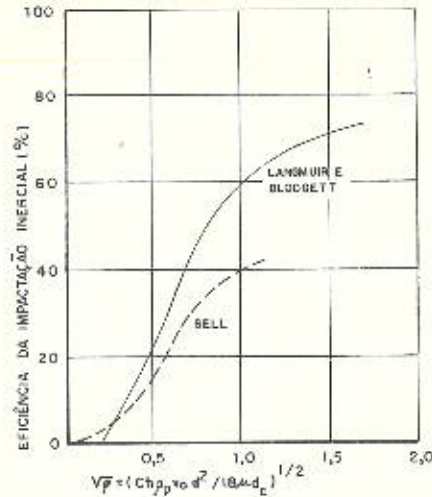


FIGURA 4.8 Eficiência de impactação inercial de esferas em esferas, baseada nas teorias de Sell e de Langmuir-Blodgett. [Strauss, W., *Industrial Gas Cleaning*, p. 219, Pergamon Press, 1966]

normal do fluxo gasoso igual à área frontal do coletor. Por isso é necessário, para obtenção dessa eficiência, determinar a trajetória das partículas na seção do fluxo gasoso e, particularmente, a trajetória da partícula que irá tocar exatamente a extremidade do corpo coletor. A eficiência de coleta por impactação inercial é

$$\eta_i = \frac{y_{lim}}{d/2} \tag{4.21}$$

INTERCEPÇÃO

No modelo considerado para impactação inercial admitiu-se que as partículas tinham massa e, daí, inércia, mas não tamanho. O mecanismo de intercepção somente leva em conta o tamanho das partículas, de forma que se supõe que elas sigam as linhas de fluxo, ao redor do coletor. Serão interceptadas somente as partículas que estiverem nas linhas de fluxo que se aproximam do coletor a uma distância menor que $d/2$ (Fig. 4.9).

A intercepção é caracterizada por um parâmetro R_c , que é a relação dos diâmetros da partícula (d) e do corpo interceptador (d_c),

$$R_c = d/d_c \tag{4.22}$$

A eficiência de coleta por intercepção (η_c) pode ser calculada das relações

$$\eta_c = 1 + R_c - 1/(1 + R_c), \tag{4.23}$$

para coletor cilíndrico,

$$\eta_c = (1 + R_c)^2 - 1/(1 + R_c), \tag{4.24}$$

para coletor esférico.

Alternativamente, Langmuir obteve a seguinte equação para determinação da eficiência de coleta por intercepção sobre um coletor cilíndrico:

$$\eta_c = \frac{1}{2.002 - \ln R_c} \left[(1 + R_c) \ln (1 + R_c) - \frac{R_c(2 + R_c)}{2(1 + R_c)} \right] \tag{4.24a}$$

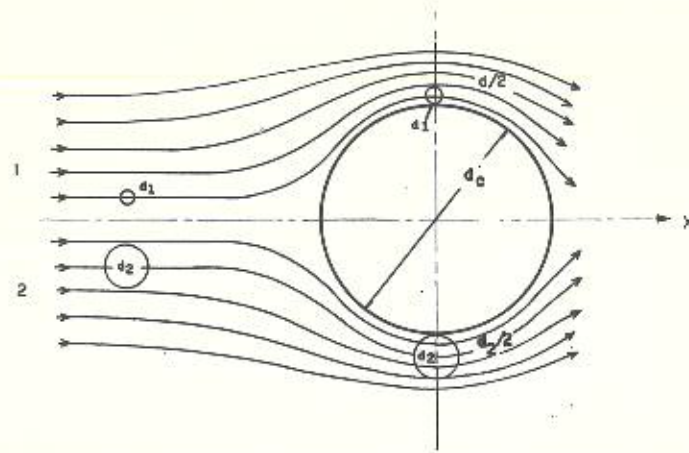


FIGURA 4.9 Modelo de fluxo ao redor de um cilindro mostrando o mecanismo de coleta por interceptação para esferas de diferentes tamanhos

Os dois mecanismos, de impactação inercial e de interceptação, não são, naturalmente, independentes e, quando as eficiências de coleta, individualmente, são baixas, podem-se somar $\eta_c + \eta_i$ para o cálculo da eficiência total. Contudo, como uma partícula coletada por um mecanismo não pode ser coletada novamente, uma estimativa melhor da eficiência total é

$$\eta_{ic} = 1 - (1 - \eta_c)(1 - \eta_i). \quad (4.25)$$

DIFUSÃO

Partículas muito pequenas, inferiores a $1 \mu\text{m}$ de diâmetro, raramente são coletadas por impactação inercial ou interceptação, pois, além de seguir as linhas de fluxo do gás ao redor do corpo coletor, movem-se de uma forma irregular. Esse movimento em ziguezague desordenado de pequenas partículas, causado pelo contínuo bombardeamento das moléculas do gás, é chamado de movimento browniano. Quando o gás está parado, as pequenas partículas se movem livremente e distribuem-se com uniformidade pelo gás. Se um objeto for colocado em seu interior, algumas partículas se sedimentarão sobre ele, sendo, assim, removidas do gás. Num gás em movimento, somente um tempo limitado está disponível para a remoção por esse processo de difusão, ou seja, somente serão coletadas as partículas localizadas nas linhas de fluxo gasoso suficientemente próximas do corpo coletor.

A estimativa do número de partículas removidas enquanto um gás flui através do coletor pode ser feita segundo dois métodos. O primeiro, introduzido por Langmuir, calcula a distância média percorrida pela partícula em movimento browniano durante o tempo que o gás flui através do coletor, e determina a eficiência de coleta do volume limpo por difusão quando comparado com o volume total do gás fluindo através do coletor. O segundo método deduz a eficiência de coleta usando teorias de transferências de massa para calcular a taxa de difusão através de uma "camada-limite" durante o tempo que o gás fica suficientemente perto do coletor.

Segundo Langmuir, a camada de gás parado, sendo limpa de partículas, difundindo-se para uma superfície, pode ser encontrada por

$$x = \sqrt{\frac{4Dt}{\pi}}, \quad (4.26)$$

onde D é o coeficiente de difusão das partículas, que pode ser calculado, quando o tamanho das partículas é da mesma ordem ou maior que o livre percurso médio das moléculas do gás, pela equação de Einstein,

$$D = \frac{KT}{3\pi\mu d}, \quad (4.27)$$

onde K é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-16}$ ergs/K).

Aplicando-se à equação (4.27) fator de correção de Cunningham,

$$D = \frac{ChKT}{3\pi\mu d}. \quad (4.28)$$

Para partículas menores que o livre percurso médio das moléculas, Langmuir introduziu a equação

$$D = \frac{v_{med}}{3n(\pi d^2/4)}, \quad (4.29)$$

onde v_{med} é a velocidade molecular média e n o número de moléculas de gás por unidade de volume.

O número de moléculas de gás por unidade de volume é uma função da pressão de gás (p), que pode ser expressa em pressões ordinárias onde a lei ideal dos gases pode ser admitida como

$$N = \frac{p}{KT}. \quad (4.30)$$

Usando as Eqs. (4.16) e (4.30) e substituindo na Eq. (4.29),

$$D = \frac{4KT}{3\mu d^2 p} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \quad (4.31)$$

O coeficiente de difusão, no sistema C.G.S., é dado em cm^2/s . O grupo adimensional que inclui o coeficiente de difusão é o número de Schmidt (Sc),

$$\text{Sc} = \frac{\mu}{\rho D} = \frac{\mu_c}{D}, \quad (4.32)$$

sendo μ_c a viscosidade cinemática do gás. Alguns coeficientes de difusão calculados pelas Eqs. (4.28) e (4.31) e os correspondentes Sc são apresentados na Tab. 4.5.

Outro grupo adimensional utilizado é o número de Peclet (Pe), que é uma medida do transporte por forças convectivas comparada ao transporte por difusão molecular. Para um sistema envolvendo um fluxo gasoso, movendo-se com velocidade v através de um corpo coletor de diâmetro d_c ,

$$\text{Pe} = \text{Re}_c \cdot \text{Sc} = \frac{v\rho d_c}{\mu} \frac{\mu}{\rho D} = \frac{v d_c}{D}. \quad (4.33)$$

TABELA 4.5 Coeficientes de difusão de partículas e números de Schmidt (ar a 20 °C e 1 atm de pressão)

Diâmetro das partículas (μm)	Coeficientes de difusão (cm ² /s)		Números de Schmidt usando <i>D</i> calculado da	
	Eq. (4.28)	Eq. (4.31)	Eq. (4.28)	Eq. (4.31)
10	$2,4 \times 10^{-8}$	—	$6,4 \times 10^6$	—
1	$2,7 \times 10^{-7}$	—	$5,6 \times 10^5$	—
0,1	$6,1 \times 10^{-6}$	$7,8 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^4$	$1,9 \times 10^4$
0,01	$4,0 \times 10^{-4}$	$7,8 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^2$	$1,9 \times 10^2$
0,001	$3,8 \times 10^{-2}$	$7,8 \times 10^{-2}$	4,0	1,9

Langmuir apresenta um parâmetro de difusão (*Z*) dado por

$$Z = [2,24(2,002 - \ln Re_c)/Pc]^{1/3}, \quad (4.34)$$

e a eficiência de coleta por difusão pode ser calculada pela equação:

$$\eta_d = \frac{1}{2,002 - \ln Re_c} \left[(1 + Z) \ln(1 + Z) - \frac{Z(2 + Z)}{Z(1 + Z)} \right]. \quad (4.35)$$

COMBINAÇÃO DA IMPACTAÇÃO INERCIAL, DA INTERCEPÇÃO E DA DIFUSÃO

Tendo-se em conta que as partículas são coletadas por um único mecanismo, a eficiência combinada de coleta η_{icd} pode ser dada por

$$\eta_{icd} = 1 - (1 - \eta_i)(1 - \eta_c)(1 - \eta_d). \quad (4.36)$$

Davies sugere a equação

$$\eta_{icd} = 0,16[R_c + (0,50 + 0,8R_c)(\psi + 1/Pc) - 0,1052(\psi + 1/Pc)^2]. \quad (4.37)$$

E Friedlander sugere a seguinte equação, que tem mostrado excelente concordância com valores obtidos experimentalmente,

$$\eta_{icd} = 6Sc^{-2/3} \cdot Re^{-1/2} + 3R_c \cdot Re^{1/2}, \quad (4.38)$$

Se partículas de tamanho decrescente, movendo-se com velocidade constante, aproximam-se de um coletor, as eficiências de coleta por impactação inercial e por intercepção diminuem com o tamanho, enquanto que aumenta a eficiência de coleta por difusão. Assim, sob condições específicas de operação, pode-se prever o particular tamanho de partícula para o qual a eficiência de coleta é mínima. Stairmand, usando um modelo simplificado, predisse que a mínima eficiência ocorreria para uma partícula de 0,9 μm (massa específica = 2g/cm³) coletada sobre fibras de 10 μm de diâmetro de um fluxo gasoso movendo-se a 3 cm/s.

EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE OS MECANISMOS BÁSICOS

O aumento da temperatura reduz a eficiência de coleta por impactação inercial e por intercepção, e aumenta a eficiência de coleta por difusão. Na

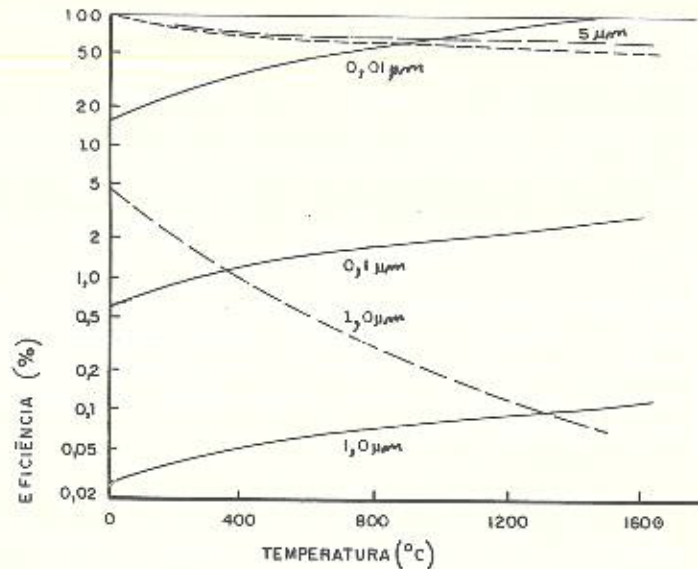


FIGURA 4.10 Efeito da temperatura sobre os mecanismos básicos de coleta por impactação inercial, intercepção e difusão. —, impactação inercial; — — —, intercepção; — — —, difusão. [Strauss, W., *Industrial Gas Cleaning*, p. 232, Pergamon Press, 1966]

Fig. 4.10 estão demonstrados os resultados de cálculos utilizando-se as Eqs. (4.20), (4.24a) e (4.31).

DEPOSIÇÃO POR SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL

Quando um fluxo gasoso se move lentamente através de um filtro, o momento das partículas maiores pode não ser suficiente para a coleta por impactação inercial. A sedimentação gravitacional pode ser um mecanismo importante de coleta, nesse caso devido ao comparativamente longo tempo de residência do fluxo gasoso. Por exemplo, a sedimentação é um mecanismo de coleta importante para partículas de $1 \mu\text{m}$ passando através de um leito de filtro de fibra de $10 \mu\text{m}$ de diâmetro quando as velocidades do fluxo gasoso são menores do que $0,05 \text{ cm/s}$.

Ranz e Wong, sugerem o seguinte parâmetro de sedimentação gravitacional:

$$\zeta = \frac{gd_c}{v^2}, \quad \psi = \frac{Chd^2 \rho_p g}{18\mu v} \quad (4.39)$$

No caso de lavadores, as velocidades relativas de partículas e gotículas são quase sempre muito grandes e a sedimentação gravitacional não é um mecanismo importante.

FORÇAS ELETROSTÁTICAS

As teorias apresentadas de captura aerodinâmica de partículas não têm levado em consideração o efeito das forças elétricas que podem estar presentes, quer nas partículas quer nos coletores, ou em ambos. Há quatro aspectos de

forças elétricas agindo num sistema de partículas aproximando-se de um coletor e que devem ser considerados.

a) Quando as partículas e o coletor estão carregados, agem forças de atração e de repulsão, dependendo do sinal das cargas das partículas e do coletor. Estas são consideradas como cargas puntiformes e a força de Coulomb tem magnitude:

$$F_{ec} = \frac{q_c q_p}{4\pi\epsilon_0 l^2}, \quad (4.40)$$

onde q_p é a carga sobre a partícula; q_c a carga sobre o corpo coletor; l a distância entre a partícula e o corpo; e ϵ_0 a capacidade específica indutiva do espaço.

b) Um coletor carregado causa uma carga-imagem sobre a superfície da partícula, oposta em sinal à carga sobre o coletor. Essa é uma força adicional sobre a partícula e tem magnitude:

$$F_{ei} = -\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \frac{d^3 q_c^2}{16\pi\epsilon_0 l^5}, \quad (4.41)$$

onde ϵ é a constante dielétrica da partícula e d o diâmetro desta.

c) Se uma partícula está carregada, ela, por sua vez, provoca uma carga-imagem oposta em sinal, sobre o coletor. Essa é uma força adicional entre a partícula e o coletor e tem magnitude:

$$F_{em} = \frac{q_p^2 d_c}{8\pi\epsilon_0 l^3} - \frac{2q_p^2 d_c l}{\pi\epsilon_0 (4l^2 - d_c^2)^2}, \quad (4.42)$$

d) As partículas carregadas de mesmo sinal produzem uma força de repulsão entre elas de magnitude:

$$F_{es} = \frac{q_p^2 d_c^3 N}{24\epsilon_0 l^2}, \quad (4.43)$$

onde N é a concentração das partículas por unidade de volume.

A força F_{ei} , entre uma partícula carregada e um coletor esférico (com carga constante), é dada por

$$F_{ei} = F_{ec} + F_{ei} + F_{em} + F_{es}. \quad (4.44)$$

Essas forças são expressas em termos de parâmetros força (K), que são obtidos dividindo-se as várias forças pela (equação de Stokes-Cunningham), força $F_R = 3\pi\mu d\mu/\text{Ch}$. Esses parâmetros encontram-se na Tab. 4.6.

Equações aproximadas para eficiência de coleta podem ser obtida se somente um único termo da Eq. (4.44) for considerado e, se o parâmetro de interceptação (R_c) for suposto nulo. As soluções aproximadas estão na Tab. 4.7.

COLETORES MÚLTIPLOS

As teorias apresentadas discutem a coleta de partículas sobre um único corpo coletor. Nos equipamentos de separação de aerossóis, como filtros de fibra e lavadores, as partículas encontram um grande número de corpos coletores. Numa torre de lavagem (tipo borrião) é produzido um grande número de gotículas quase idênticas. Essas gotículas são essencialmente esferas caindo através de um fluxo gasoso movendo-se lentamente em direção oposta. Quando a

TABELA 4.6 Parâmetros de força eletrostática (Kraemer e Johnstone)

Forma do coletor	Tipo de força	Tipo de carga	Símbolo	Parâmetro origem	Definição
Esférica	Atração entre partícula e coletor carregados	Constante	K_e	F_{ec}/F_R	$\frac{q_p q_c Ch}{3\pi\mu d v \epsilon_0}$
Esférica	Força causada por imagem de carga elétrica na partícula	Constante	K_i	F_{ei}/F_R	$\frac{(\epsilon - 1)d^2 q_c}{(\epsilon + 2)3\pi\mu d \epsilon_0}$
Esférica	Força causada por imagem de carga elétrica no coletor	Constante	K_m	F_{em}/F_R	$\frac{Chq_p^2}{3\pi^2\mu d v \epsilon_0}$
Esférica	Força de repulsão entre partículas de mesmo sinal	-	K_s	F_{es}/F_R	$\frac{Chq_p^2 d_c N}{18\pi\mu d \epsilon_0}$

eficiência combinada de coleta de uma única gotícula esférica η_{icd} foi encontrada, a eficiência total (η_0) pode ser encontrada por

$$\eta_0 = 1 - (1 - \eta_{icd})^n, \quad (4.45)$$

onde n é o número de gotículas encontrado pelas partículas. Na maioria dos casos práticos, n é grande (maior que 25), e a Eq. (4.45) pode ser modificada para

$$\eta_0 = 1 - e^{-n\eta_{icd}}. \quad (4.46)$$

Para uma torre de borrifo, n poderá ser estimado se forem conhecidos a vazão do fluxo gasoso, a taxa do líquido de lavagem, o tamanho médio das gotículas e, ainda, se for admitido que, para colisão efetiva, as gotículas devem cobrir toda a seção transversal da torre:

$$\eta = \frac{Q_l H}{Q d_g} 7,8 \cdot 10^4, \quad (4.47)$$

onde Q_l é a taxa de líquido de lavagem (gal/min); Q a vazão do gás (pés³/min); H a altura da torre (pés); d_g o diâmetro médio das gotículas (μ m). Essa equação mostra que, quanto menor a gotícula ou maior a taxa de líquido de lavagem, maior será o valor de η .

TABELA 4.7 Eficiências aproximadas de coleta

Forma do coletor	Força eletrostática	Eficiência de coleta
Esférica	Coulomb	$-4K_e$
Cilíndrica	Coulomb	$-\pi K_e$
Cilíndrica	Imagem	$\left(\frac{3\pi}{4} K_i\right)^{1/3}$
Plana	Coulomb	$\left(\frac{-K_e}{1 - K_e}\right)^{2/3}$
Plana	Imagem	$\left(\frac{K_i}{1 + K_i}\right)^{1/3}$

MOVIMENTO NUM GRADIENTE TÉRMICO

Uma partícula sujeita a um gradiente de temperatura entre uma superfície quente e outra fria tenderá a mover-se contra a superfície mais fria. O movimento é causado por uma força térmica originada da interação diferencial da partícula com as moléculas de gás. Aquelas que se aproximam do lado quente, e têm uma velocidade média maior do que aquelas do lado frio, produzindo uma força resultante na direção do fluxo de energia térmica. A precipitação térmica de partículas de poeira é freqüentemente utilizada para se obter uma amostra para análise subsequente em microscópio óptico ou eletrônico. À pressão atmosférica normal, a força térmica é dada por

$$F_t = (-9\pi)(d/2)(\mu^2/\rho T)(2 + k_p/k_a)^{-1}(\Delta T/\Delta x), \quad (4.48)$$

onde k_p é a condutividade térmica do material da partícula (cal/s · cm · K); k_a a condutividade térmica do ar (cal/s · cm · K); $\Delta T/\Delta x$ o gradiente de temperatura no ar, (°C/cm); d , μ , ρ e T , como definidos anteriormente.

Típicas faixas de condutividade térmica são: alumínio, 0,5; cádmio, 0,2; aço, 0,1; pedra e areia, 10^{-3} ; água, 10^{-3} ; glicerina e ácido esteárico, 10^{-4} ; ar, 10^{-4} .

Estabelecendo-se a força térmica igual à força de resistência do fluido [Eq. (4.17)], a velocidade de uma dada partícula pode ser determinada por:

$$v = (-3/2)(Ch \cdot \mu/\rho T)(2 + k_p/k_a)^{-1}(\Delta T/\Delta x). \quad (4.49)$$

Essa equação indica que o movimento térmico é dependente do tamanho da partícula quando Ch é maior que 1, o que ocorre para partículas menores que $1 \mu\text{m}$ de diâmetro na pressão atmosférica.

REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE TAMANHO DE PARTÍCULA

Tratando-se de um sistema monodisperso de partículas esféricas, um único parâmetro do tamanho (diâmetro) descreve as características gerais de todas as partículas em suficiente detalhe, quanto ao tamanho. Contudo, para um sistema polidisperso, um único parâmetro é inadequado para descrever os tamanhos que estão presentes. Devem ser feitas medidas numa larga faixa de tamanhos presentes, tornando-se a interpretação e a representação do tamanho um assunto de estatística matemática aplicada.

Após a medição das partículas, os dados são classificados em número de partículas dentro de intervalos sucessivos de tamanho (exemplo: 1 a $1,99 \mu\text{m}$, 2 a $2,99 \mu\text{m}$, etc.), e podem ser representados graficamente por um histograma. As larguras dos retângulos representam o intervalo de tamanho, e as alturas representam a freqüência de partículas que ocorrem em cada intervalo de tamanho. Uma distribuição idealizada é mostrada na Fig. 4.11. Uma curva traçada através dos pontos médios dos topos das barras do histograma na Fig. 4.11 assemelha-se a uma curva normal de probabilidade. A abscissa no centro da curva divide a área em duas partes iguais, representando o valor médio de tamanho de partícula, ou seja, a soma dos valores divididos pelo número de observações. Contudo o valor médio não define por si só a distribuição de tamanhos, pois é possível haver infinitas curvas com o mesmo ponto médio,

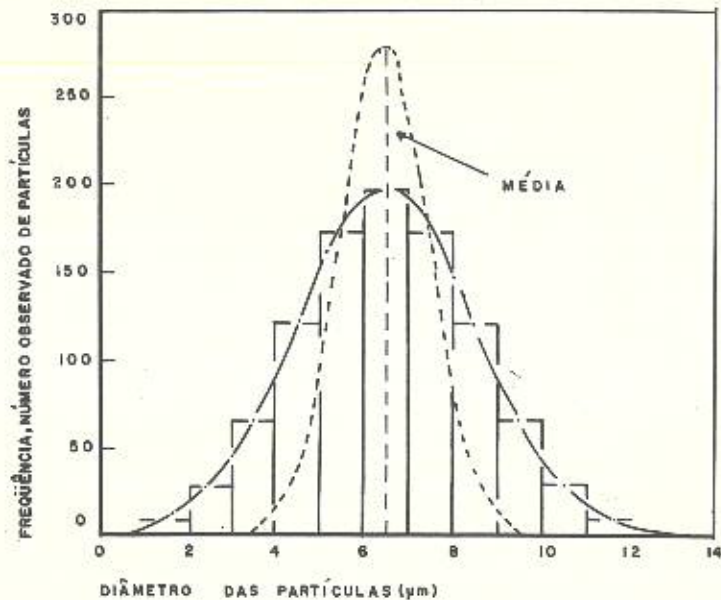


FIGURA 4.11 Histograma de uma distribuição normal de probabilidade de tamanhos

ou média; um exemplo disso é mostrado na Fig. 4.11 pela curva tracejada. Por isso é necessário um termo para descrever a dispersão das observações em torno da média; esse termo é o desvio-padrão. Um desvio-padrão de cada lado da média de uma curva normal inclui $\pm 34,13\%$ das observações e, para uma curva de distribuição simétrica, a relação do tamanho 50% dividido pelo tamanho 15,87% é igual à relação do tamanho 84,13% dividido pelo tamanho 50%. O espalhamento da curva em torno do valor 50% é definido pela magnitude dessa relação, que é o desvio-padrão σ :

$$\sigma = \frac{\text{tamanho } 84,13\%}{\text{tamanho } 50\%} = \frac{\text{tamanho } 50\%}{\text{tamanho } 15,87\%}$$

Distribuições reais de tamanho de partículas raramente dão curvas simétricas; o histograma de frequência de tamanho de uma poeira típica assemelha-se ao da Fig. 4.12, na qual as frequências observadas estão expressas em porcentagens, ao invés dos valores reais observados. Quando uma curva é traçada através dos pontos médios dos topos das barras, a curva resultante é assimétrica. Apesar de as curvas assimétricas poderem ser representadas graficamente com razoável facilidade, a análise matemática é bastante complexa.

Quando a distribuição é assimétrica, como na Fig. 4.12, o valor médio é afetado, e a mediana é uma forma mais útil de média. A mediana é o valor central de uma série de observações, quando as observações são arranjadas em ordem, da menor à maior. Para dados classificados, a mediana é definida como a abscissa que divide a área do histograma em duas partes iguais. Para a distribuição simétrica mostrada na Fig. 4.11, a média e a mediana coincidem.

Drinkler mostrou que a maioria das curvas assimétricas de frequência de tamanho de partículas pode ser convertida em curvas simétricas que se assemelham à curva normal de probabilidade, quando o tamanho é substituído pelo logaritmo do tamanho; assim, a mesma distribuição de tamanho mostrada

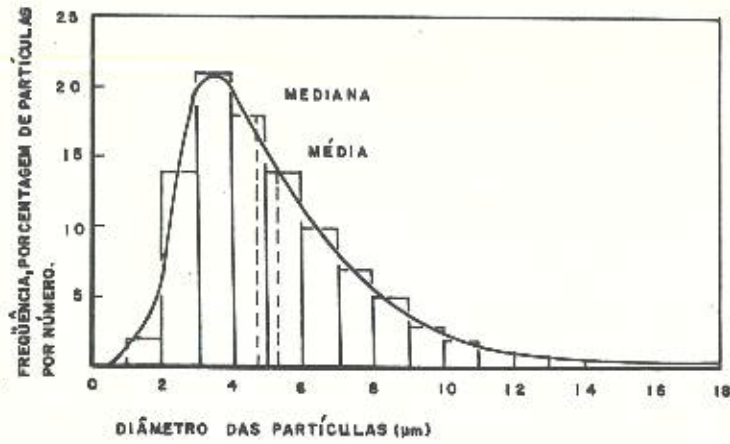


FIGURA 4.12 Histograma de uma distribuição assimétrica de tamanhos de partículas

na Fig. 4.12 aparece na Fig. 4.13 como uma curva simétrica, chamada curva de distribuição log-normal.

A curva da Fig. 4.13 pode ser analisada matematicamente com relativa facilidade. A curva cumulativa é o tipo mais útil de gráfico para análise de distribuição de tamanho de partículas. A Fig. 4.14 mostra uma curva de frequência acumulada para os mesmos valores observados das curvas das Figs. 4.12 e 4.13.

Quando se utilizam os logaritmos dos tamanhos, os dois parâmetros que definem a distribuição são a média geométrica e o desvio-padrão geométrico. O trabalho pode ser facilitado utilizando-se papel logarítmico de probabilidade, onde são representados graficamente a porcentagem de partículas menores que um tamanho dado versus os logaritmos de um tamanho dado (Fig. 4.15).

O modelo matemático que mais frequentemente tem sido utilizado para descrever a distribuição de tamanho de partículas de aerossóis é a distribuição logarítmica normal do número, área ou peso das partículas.

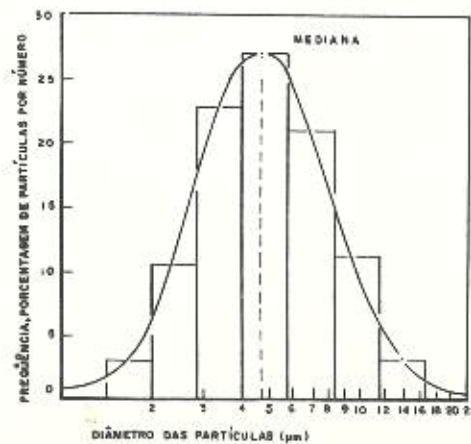


FIGURA 4.13 Histograma de uma distribuição log-normal

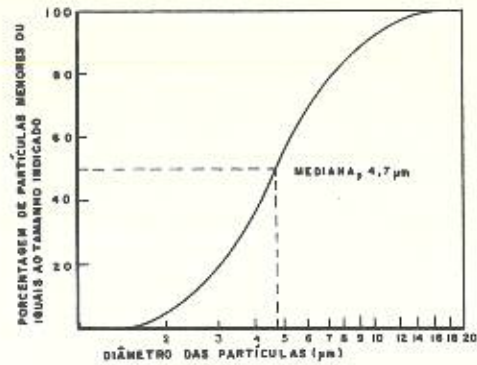


FIGURA 4.14 Distribuição cumulativa log-normal de tamanhos

A distribuição do número é dada por

$$g = \frac{1}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \ln m_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right]$$

O tamanho da média geométrica (m_g) coincide com o tamanho mediano; metade do número de partículas na distribuição está acima e abaixo desse tamanho; σ_g representa o desvio-padrão geométrico. Na Fig. 4.15, o valor 50% do tamanho é tomado como m_g e:

$$\sigma_g = \frac{\text{valor } 84,13\% \text{ de tamanho}}{\text{valor } 50\% \text{ de tamanho } (m_g)}$$

A distribuição log-normal é caracterizada pelo mesmo σ_g para a distribuição do número, área e peso das partículas. Assim, para a distribuição das áreas, conhecidos m_g e σ_g ,

$$\ln m_{gA} = \ln m_g + 2 \ln^2 \sigma_g$$

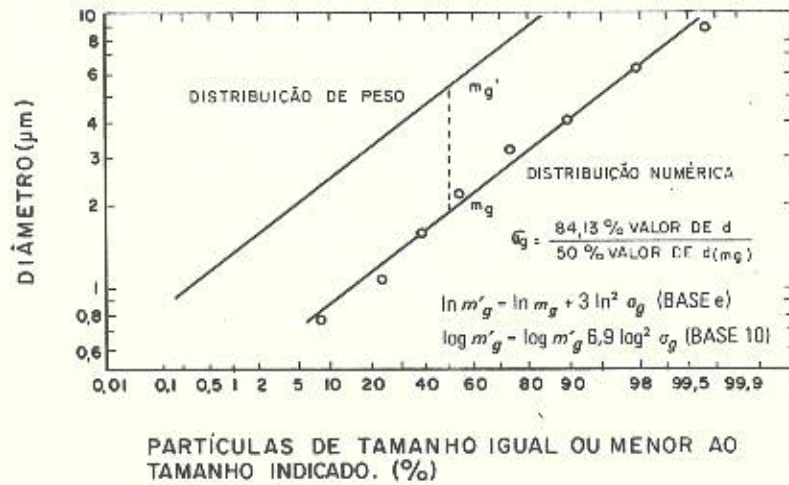


FIGURA 4.15 Apresentação típica de dados de tamanhos de partícula em papel logarítmico de probabilidade. [Stern, *Air pollution control*, p. 56, Vol. I, segunda edição, Academic Press, 1968]

onde m_{ga} é o tamanho da média geométrica para a área. Para a distribuição dos pesos,

$$\ln m'_g = \ln m_g - 3 \ln^2 \sigma_w.$$

onde m'_g é o tamanho média geométrica para peso.

O tamanho médio por número (contagem) é uma medida do tamanho de partículas para amostras de material particulado, consistindo no diâmetro da partícula que divide o número total das partículas em duas partes, uma com todas as partículas de tamanho inferior ao tamanho médio por número e outra com todas as partículas de tamanho superior a esse diâmetro.

O tamanho médio por peso é uma medida de tamanho de partículas para amostras de material particulado, consistindo naquele diâmetro que divide a massa de todas as partículas em duas partes, uma constituída de todas as partículas de tamanho inferior ao tamanho médio por peso e outra constituída de todas as partículas de tamanho superior ao tamanho médio por peso.

5 VENTILAÇÃO GERAL

INTRODUÇÃO

A ventilação geral é um dos métodos disponíveis para controle de um ambiente ocupacional; consiste na movimentação de quantidades relativamente grandes de ar através de espaços confinados, objetivando uma melhoria do ambiente pelo controle da temperatura, da umidade, da velocidade, da distribuição e da pureza do ar. Tal método pode fornecer também *make-up air* e, se adequadamente dimensionado, recuperação e conservação de calor. Segundo as principais finalidades a que se destina, a ventilação geral pode ser classificada em:

ventilação geral para manutenção do conforto e eficiência do homem, através do restabelecimento das condições do ar, alteradas pela presença deste, ou da refrigeração e do aquecimento do ar;

ventilação geral para manutenção da saúde e segurança do homem, através do controle da concentração de gases, vapores e partículas emitidas no ar ocupacional.

A ventilação geral pode ser fornecida pelos seguintes métodos:

- insuflação e exaustão naturais;
- insuflação mecânica e exaustão natural;
- insuflação natural e exaustão mecânica;
- insuflação e exaustão mecânicas.

INFILTRAÇÃO E VENTILAÇÃO NATURAL

CONSIDERAÇÕES GERAIS

A infiltração é o movimento de ar não-controlado, de fora para dentro e de dentro para fora de um edifício, através de frestas de janelas e portas, de paredes, pisos e forros, e por outras aberturas existentes. A magnitude da infiltração depende do tipo de construção, acabamento e conservação do edifício.

A ventilação natural é o deslocamento controlado ou intencional de ar através de aberturas específicas como portas, janelas, lanternins e dispositivos para ventilação. O fluxo de ar que entra ou sai de um edifício por infiltração ou ventilação natural depende da diferença de pressão entre as partes interior e exterior da estrutura e da resistência ao fluxo de ar oferecida pelas aberturas e frestas no edifício. A diferença de pressões exercida sobre o edifício pelo ar pode ser causada pelo vento ou pela diferença de densidade do ar fora e dentro do edifício.

O efeito de diferença de densidade, conhecido como "efeito de chaminé", é freqüentemente o principal fator. Quando a temperatura dentro do edifício é maior do que a exterior, produz-se uma pressão interna negativa e um fluxo de ar entra pelas partes inferiores, o que causa uma pressão interna positiva e um fluxo de ar que sai nas partes superiores do edifício. O inverso ocorre quando a temperatura interior é menor que a do exterior. Numa determinada altura no interior do edifício, existe uma zona neutra onde não há diferença de pressão dentro e fora.

Quando a diferença de pressão é o resultado da pressão do vento, o ar entra no edifício através de aberturas localizadas na direção do vento, e sai através de aberturas localizadas em direção oposta. Na Fig. 5.1 é apresentada a distribuição de pressões internas e externas sobre a altura de um edifício.



FIGURA 5.1 Distribuição de pressões internas e externas sobre a altura de um edifício

VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação por forças naturais encontra aplicação em edifícios industriais, edifícios públicos, escolas, habitações e garagens. As forças naturais disponíveis para movimentação do ar são a força do vento e as diferenças de temperatura entre o ar interior e o ar exterior do edifício. O movimento de ar pode ser causado por essas forças agindo individual ou combinadamente, dependendo das condições atmosféricas, do projeto e da localização do edifício. Os resultados obtidos da ventilação natural variarão de tempos em tempos, devido à variação na velocidade e na direção do vento, e na diferença de temperatura. O arranjo, a localização, o controle das aberturas de ventilação podem ser tais que as duas forças agem cooperativamente, e não em oposição.

Em problemas de remoção de calor, conhecida a quantidade de calor a ser removida, e tendo sido selecionada uma diferença desejável de temperatura, a quantidade de ar que deve atravessar o edifício por hora, para manter essa diferença de temperatura, pode ser determinada pela equação

$$Q = \frac{C_r}{C_p \times \rho \times 60(T_i - T_e)} = \frac{C_r}{1,08(T_i - T_e)} \quad (5.1)$$

sendo Q a vazão de ar (pés³/min), C_r o calor removido (Btu/h), C_p o calor específico à pressão constante (0,24 Btu/lb × °F), ρ a massa específica do ar, nas condições-padrão (70 °F ou 21,1 °C, 29,92 pol Hg ou 760 mm Hg = 0,075 lb/pé³), e $T_i - T_e$ a diferença de temperatura (°F).

Movimento devido aos ventos

Considerando-se o uso de ventos para produção de ventilação, devem ser levados em conta os seguintes parâmetros: (a) a velocidade média do vento, (b) a direção predominante do vento, (c) as variações diárias e sazonais do vento, e (d) a interferência local nos ventos devido a edifícios próximos, colinas e outras obstruções de natureza similar. Como regra geral, pode-se dimensionar o sistema utilizando-se uma velocidade de ventos de 50% do valor da velocidade média sazonal.

A Eq. (5.2) pode ser utilizada para calcular a quantidade de ar forçada pelo vento, através de abertura de ventilação, ou para determinar o tamanho das aberturas para produzir determinados resultados:

$$Q = EA v, \quad (5.2)$$

onde Q é a vazão do ar (pés³/min), A a área livre das aberturas de entrada (pés²), v a velocidade do vento (pés/min), e E o coeficiente de eficiência das aberturas. O valor de E pode ser tomado de 0,5 a 0,6 para ventos perpendiculares, e entre 0,25 e 0,35 para ventos diagonais.

A exatidão dos resultados obtidos pela Eq. (5.2) depende da localização das aberturas. As aberturas de entrada devem ser colocadas nas paredes voltadas para os ventos predominantes, enquanto que as saídas devem ser colocadas:

- a) nas paredes opostas aos ventos predominantes;
- b) no telhado, na área de baixa pressão causada pela passagem do vento;
- c) nas paredes adjacentes às das aberturas de entrada onde ocorrem áreas de baixa pressão;
- d) em dispositivos de ventilação nos telhados ou chaminés.

Movimento devido à diferença de temperaturas

A movimentação de ar devida ao efeito de chaminé pode ser calculada pela equação

$$Q = 9,4A \sqrt{h(T_i - T_e)}, \quad (5.3)$$

onde Q é a vazão de ar (pés³/min), A a área livre das entradas ou saídas – admitidas iguais – (pés²), h a distância entre aberturas de entrada e de saídas – diferença de alturas – (pés), T_i a temperatura média do ar interior, à altura das aberturas de saída (°F), T_e a temperatura do ar exterior (°F), e 9,4 a constante de proporcionalidade, incluindo o valor de 65% para efetividade das aberturas; esta deverá ser reduzida para 50% (constante = 7,2) se as condições não forem favoráveis.

A Eq. (5.3) só é aplicável quando não há resistência significativa ao fluxo de ar, dentro do edifício, das aberturas de entrada às aberturas de saída. Evidentemente, quanto maior a distância entre as aberturas de entrada e de saída, maior vantagem se pode obter.

Efeito de aberturas desiguais

A maior vazão de ar por unidade de área de aberturas é obtida quando as entradas e as saídas são iguais, e as Eqs. (5.2) e (5.3) são baseadas nessa condição. Aumentando-se as saídas em relação às entradas, ou vice-versa, aumentará

a vazão de ar, mas não na proporção da área aumentada. Nos casos práticos, havendo distribuição desigual de aberturas, deve-se utilizar a menor área, ou de entrada ou de saída, e adicionar-se o aumento, conforme determinado pelo gráfico da Fig. 5.2.

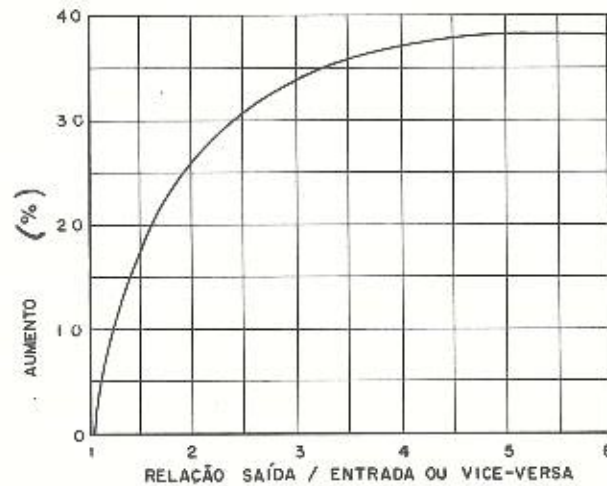


FIGURA 5.2 Correção para aberturas desiguais. [R. Jorgensen, *Fan engineering* (5)]

Movimento devido à combinação de ventos e efeito de chaminé

Usam-se as Eqs. (5.2) e (5.3) e calculam-se as vazões que cada força produz separadamente, nas condições das aberturas que melhor proporcionem a adição das forças. Então, determina-se a relação entre a vazão produzida por

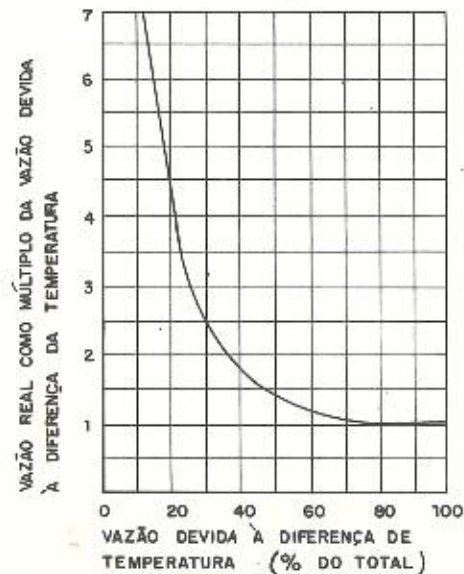


FIGURA 5.3 Correção para efeitos combinados. [R. Jorgensen, *Fan engineering* (5)]

diferença de temperatura e a soma das duas vazões, e a vazão real das forças combinadas pode ser dada pelo gráfico da Fig. 5.3.

Tipos de aberturas

JANELAS, PORTAS E CLARABÓIAS

Decreto Estadual 5916, de 13/03/1975, Art. 130:

“A superfície iluminante natural dos locais de trabalho será, no mínimo, de um quinto da área total do piso”;

Art. 131: “A área de ventilação natural deverá corresponder, no mínimo, a dois terços da superfície iluminante natural”.

As janelas têm a vantagem de iluminar, bem como de ventilar, quando abertas. As partes móveis dessas aberturas permitem até certo ponto o controle da quantidade de ar que está sendo movimentada; defletores podem ser usados para controlar a distribuição das correntes de ar.

ABERTURAS NO TELHADO

São geralmente protegidas por uma cobertura para impedir a entrada de chuva e a reversão do ar que sai. A quantidade de ar que passa através da abertura depende da diferença de temperatura entre o ar interior e o ar exterior e do coeficiente de descarga. A velocidade do ar através da abertura (*roof ventilator*) pode ser calculada pela expressão

$$v = 20 \left[\frac{hC_i}{A} \right]^{1/3}, \quad (5.4)$$

sendo v a velocidade através da abertura (pés/min), h a altura efetiva do ar aquecido, isto é, dentro do edifício (pés), C_i a quantidade de calor lançada no interior (Btu/min), e A a área da abertura (pés²). Observe-se que essa expressão não leva em conta a velocidade do vento. Quando esta é significativa, pode-se empregar a equação

$$Q = A \left[\frac{36 \sqrt{h(T_i - T_e)}}{6 + v} + 20v \right], \quad (5.5)$$

onde Q é a vazão de ar exaurido (pés³/h), A a área de abertura (pol²), h a altura da coluna de ar, compreendida entre a abertura de área A e a abertura de entrada de ar no recinto (pés), v a velocidade do vento (milhas/h), T_i a temperatura do ar interior (°F), e T_e a temperatura do ar exterior (°F).

Regras gerais

a) Edifícios e equipamentos de ventilação não devem ser orientados para uma particular direção de vento, mas, sim, devem ser projetados para ventilação efetiva com todas direções de vento.

b) Aberturas de entrada não devem ser obstruídas por edifícios, árvores, etc.

c) Uma vazão maior por área total de abertura é obtida usando-se áreas iguais de aberturas de entrada e de saída.

d) Deve haver uma distância vertical tão grande quanto possível entre as aberturas de entrada e de saída, de modo que a diferença de temperatura possa produzir uma força adequada.

VENTILAÇÃO PARA CONFORTO TÉRMICO

INTRODUÇÃO

No campo da ventilação industrial e da não-industrial, a ventilação destinada à promoção de conforto térmico é das mais importantes, e possui tal extensão que constitui motivo para trabalhos que só a ela se dedicam. Este manual abordará apenas conceitos básicos sobre o assunto e fornecerá alguns dados preliminares para uma iniciação de elaboração de projetos, não entrando, no entanto, nos aspectos de condicionamento de ar. Em outras palavras, serão abordados alguns aspectos dos mecanismos da termorregulação, alguns índices de conforto térmico e de sobrecarga térmica, psicrometria, e serão fornecidos alguns dados para cálculo de trocas (renovação), reposição e recirculação de ar em ambientes.

Temperaturas extremamente baixas não ocorrem com frequência no Brasil, com exceção de alguns casos esporádicos em algumas localidades no sul do país. Dessa forma, não nos referiremos em parte alguma do texto a aquecimento de ar para promoção de conforto térmico, uma vez que a simples utilização de vestimenta adequada soluciona os problemas usualmente encontrados.

CALOR E CONFORTO TÉRMICO — ASPECTOS GERAIS

INTRODUÇÃO

O homem é um animal tropical por excelência, pois sua temperatura crítica é maior que a da maioria dos animais e possui uma capacidade bastante desenvolvida para suar. Um grande número de indivíduos está, parte do tempo, exposto a altas temperaturas, não só em seu ambiente geral de vida como em seu ambiente ocupacional, onde uma série de fatores climáticos e não-climáticos conduzem a um ganho ou a uma menor dissipação de calor pelo organismo. A esse tipo de estímulo o organismo responde fisiologicamente, refletindo a severidade da exposição ao calor, para cujo equacionamento completo e adequado é necessário medir quantitativamente a ação do calor e a resposta do organismo, correlacionando-as; essa é uma tarefa difícil em função dos vários parâmetros intervenientes, tais como temperatura do ar, umidade relativa, calor radiante, velocidade do ar, tipo de trabalho exercido, aclimatação, roupa utilizada e outros.

Dessa forma, torna-se necessária a fixação de critérios específicos que permitem estabelecer os limites de exposição ao calor em diferentes tipos de trabalho e a redução da exposição para respostas excessivas do organismo. Os critérios assim desenvolvidos devem levar em conta não só a resposta fisiológica, mas também a psicológica, a produtividade e a ocorrência de desordens devido ao calor.

FISIOLOGIA DA TERMORREGULAÇÃO

A maioria dos mamíferos (incluindo-se o homem) é homotérmica, isto é, pode manter uma temperatura corporal relativamente constante, independentemente da temperatura do ambiente. Outro termo que se aplica aos mamíferos e às aves é endotérmico, isto é, produzem e controlam suas próprias fontes de calor. Os outros vertebrados (peixes, répteis e batráquios) têm temperaturas corporais que variam com as alterações do ambiente. Tais vertebrados são chamados de heterotérmicos ou ectotérmicos (fontes externas de calor corporal).

O termo temperatura corporal é inadequado, pois não se refere à temperatura média do corpo. Devem ser preferidos temperatura central e temperatura superficial. Temperaturas medidas na boca, no esôfago, no estômago, nas axilas, em diferentes profundidades do reto ou em áreas selecionadas das cavidades auricular e nasal mostram, relativamente, pequenas diferenças entre elas, e alteram-se de uma forma similar. As temperaturas centrais são mais frequentemente registradas no reto ou na boca. Uma temperatura oral de 36,9 °C pode ser aceita como normal, mas pode haver variações individuais na faixa de 36,4 a 37,2 °C.

A faixa de variação das temperaturas superficiais do organismo é maior, sem perda de eficiência. A temperatura média da pele de um homem nu, sentado, e em clima frio, pode ser tão baixa quanto 20 °C, enquanto que, em áreas localizadas, como nas mãos e nas faces, a temperatura pode ser ainda menor. Contudo, mesmo em climas muito quentes, para que o organismo mantenha o equilíbrio térmico, a temperatura da pele será sempre menor que a temperatura central pelo menos em 1 °C.

Mecanismos termorregulatórios em climas quentes

EQUILÍBRIO TÉRMICO

Para que haja equilíbrio,

quantidade de calor ganha = quantidade de calor perdida.

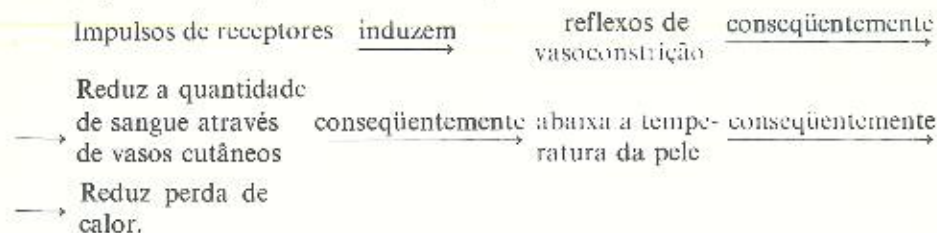
A quantidade de calor trocada entre o corpo e o ambiente é, fundamentalmente, função das diferenças de temperatura e pressão de vapor d'água entre a pele e o ambiente a seu redor. Alguns mecanismos fisiológicos interferem nas quantidades de calor transferidas, como, por exemplo, o sistema cardiovascular e a sudorese.

CONTROLE NERVOSO DA TERMORREGULAÇÃO

Essencialmente, o controle e a coordenação dos processos fisiológicos envolvidos na termorregulação são exercidos de um centro situado no hipotálamo, que funciona como um termostato. Nesse centro, podem ser encontrados outros controles, como do balanço de água e atividades vasomotoras e humorais.

O centro termorregulatório compreende dois subcentros anatomicamente distintos: um que é responsável pela conservação do calor (por exemplo, por vasoconstrição cutânea) e outro que é responsável pela dissipação do calor (por exemplo, por vasodilatação cutânea e sudorese). Os mecanismos precisos do controle nervoso central são complicados e ainda não estão completamente compreendidos.

Papel da circulação. Sob clima frio,



Aumentando-se a temperatura do ambiente, o estímulo dos receptores de frio na pele é reduzido, enquanto que o estímulo dos receptores de calor é aumentado. Há um aumento concomitante na quantidade de sangue que flui através dos vasos cutâneos. Em climas quentes, esse aumento pode provocar uma indesejável carga na circulação, com conseqüente desordem circulatória.

Papel das glândulas sudoríparas. Não há dúvida de que a principal defesa do organismo contra a exposição ao calor é a evaporação do suor, que é vertido sobre a superfície da pele pelas glândulas sudoríparas. Elas secretam uma solução aquosa que contém principalmente cloreto de sódio. As taxas máximas de sudação, que não podem ser mantidas por longos períodos, são da ordem de 2 litros/h. As glândulas sudoríparas são estimuladas através de inervação do do sistema simpático.

Papel dos hormônios. Há evidência de atividade humoral resultante da exposição ao calor, que é benéfica ao organismo, pois conserva sal e água. Como resultado da sudação, ocorre desidratação, e hormônio antidiurético pode ser encontrado na urina.

Finalmente, vale mencionar a aclimatização ao calor, que, como o próprio termo indica, auxilia o indivíduo a suportar exposições a altas e baixas temperaturas.

MECANISMOS DE TROCA DE CALOR

Trocas de calor entre o corpo e o ambiente

MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Há três modos principais de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Todos os três tipos podem ocorrer simultaneamente.

A condução é a transferência de calor de uma parte de um corpo a outra parte do mesmo, ou de um corpo para outro em contato físico com ele, sem apreciável deslocamento das partículas do corpo.

A convecção é a transferência de calor de um ponto a outro dentro de um fluido, gás ou líquido, pela mistura de uma porção com outra do fluido. Na convecção natural, o movimento de fluido é inteiramente o resultado de diferenças na densidade resultante de diferenças de temperaturas; na convecção forçada, o movimento é produzido por meios mecânicos. Quando a velocidade forçada é relativamente baixa, deve-se entender que os fatores de "convecção livre", tais como diferença de densidade e temperatura, podem ter uma influência importante.

A radiação é a transferência de calor de um corpo a outro, não em contato, por meio de movimento ondulatório através do espaço.

RADIAÇÃO TÉRMICA

Generalidades. A radiação térmica é uma das muitas formas de energia radiante. A energia radiante é emitida continuamente por todos corpos e pode ser considerada uma forma de movimento ondulatório, conhecido como fenômeno eletromagnético. Esse tipo de movimento ondulatório não deve ser confundido com movimentos ondulatórios mecânicos como as ondas sonoras. A energia radiante passa através do ar sem aquecê-lo apreciavelmente, e aquecerá a superfície que atingir. A energia radiante passa através do vácuo ou de outros meios a uma velocidade que depende do meio.

A maioria da radiação térmica encontrada na indústria é de um comprimento de onda maior que o da luz visível e situa-se na região do infravermelho do espectro eletromagnético. A distinção térmica entre os vários tipos de radiação eletromagnética é indefinida, pois a radiação de qualquer comprimento de onda aquece corpos.

Um corpo negro absorve todo o calor radiante incidente sobre sua superfície e nada reflete. A maioria dos materiais reflete uma fração (refletividade) e absorve a fração remanescente da energia incidente (absortividade). O poder de radiação de um corpo negro é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta. Superfícies comuns radiam menos energia que um corpo negro, à mesma temperatura. A relação entre o poder de radiação de uma superfície e o do corpo negro é a emissividade da superfície. A emissividade de uma superfície é exatamente igual a sua absortividade. Em outras palavras, um bom refletor (ou pobre absorvedor) tem um baixo poder radiante. Na Tab. 5.1 é mostrada essa propriedade para diversos materiais.

TABELA 5.1 Emissividades, absortividades e refletividades de algumas superfícies

Superfície	Emissividade ou absortividade	Refletividade
Superfícies negras não-metálicas (asfalto, carvão)	0,90 a 0,98	0,10 a 0,02
Vidros comuns de janelas	0,90 a 0,95	0,10 a 0,05
Tijolo, concreto, pedra	0,85 a 0,95	0,15 a 0,05
Superfícies pintadas	0,85 a 0,95	0,15 a 0,05
Chapa de aço oxidada	0,75 a 0,80	0,25 a 0,20
Chapa de ferro lisa	0,55 a 0,60	0,45 a 0,40
Pintura de alumínio	0,40 a 0,60	0,60 a 0,40
Chapa de aço galvanizada	0,20 a 0,30	0,80 a 0,70
Chapa de alumínio fosca	0,10 a 0,20	0,90 a 0,80
Chapa de alumínio polida	0,02 a 0,05	0,98 a 0,95

Equação de troca de energia radiante. A equação básica para troca de energia radiante entre duas superfícies é

$$C_{rad} = AKf_e f_s [T_1^4 - T_2^4], \quad (5.6)$$

sendo:

C_{rad} o calor transferido por meio de radiação (cal/s);

A a área efetiva de radiação do objeto quente (cm²);

K a constante de Stefan-Boltzmann ($1,37 \times 10^{-12}$ cal/s·cm²·K⁴);

T a temperatura absoluta (K);

f_c o fator de configuração, que é adimensional e ≤ 1 ($f_c = 1$ para planos paralelos infinitos, cilindros concêntricos infinitos e corpos completamente enclausurados);

f_e o fator de emissividade, que é adimensional e < 1 ($f_e = 1$ para planos paralelos infinitos, ou para um corpo completamente enclausurado que é grande comparado com o corpo que enclausura),

$$f_e = \frac{1}{(1/e_1) + (1/e_2) - 1} \quad (5.7)$$

(e_1 e e_2 são as emissividades das superfícies 1 e 2).

Temperatura média da radiação. Para se determinarem trocas de calor radiante em ambientes não-uniformes, utiliza-se o conceito de temperatura média de radiação (TMR). Esta pode ser definida como a temperatura de um recinto negro uniforme no qual um corpo sólido (ou um indivíduo) troca a mesma quantidade de calor radiante que seria trocada em ambiente não-uniforme. A TMR em um ambiente não-uniforme não é uniforme, mas varia de local para local no espaço.

Medida da TMR. É utilizado o termômetro de globo, que consiste basicamente numa esfera de cobre, de 15 cm de diâmetro, pintada de preto externa e internamente. Um termômetro é fixado no centro da esfera. A temperatura do ar dentro do globo em equilíbrio é o resultado de um balanço entre o calor ganho ou perdido por meio de radiação e o calor ganho ou perdido por meio de convecção,

$$TMR = (T_g + 273)^4 + 0,32 \cdot 10^8 v^{0,5} (T_g - T_{ba})^{0,25} - 273, \quad (5.8)$$

onde TMR é a temperatura média de radiação (°C), T_g a temperatura do termômetro de globo (°C), v a velocidade do ar (m/min), e T_{ba} a temperatura do ar (°C), com barreira para eliminar o efeito do calor radiante.

Em geral um período de 15 a 25 min é requerido para que o globo atinja o equilíbrio. Os gráficos para o cálculo da TMR estão apresentados na Fig. 5.4.

FONTES DE GANHO OU PERDA DE CALOR ENTRE O CORPO E O AMBIENTE

1) Produção de calor pelo organismo, ou calor metabólico, que pode variar bastante dependendo da atividade física realizada.

2) Convecção e (3) radiação, podendo ambas resultar em ganho ou em perda de calor, dependendo de estar a temperatura da pele, respectivamente, abaixo ou acima da temperatura do ar ou dos sólidos ao redor.

4) Evaporação do suor da superfície da pele, que pode resultar somente na perda de calor do corpo.

Outras fontes menos importantes quantitativamente, e que podem ser desprezadas na maioria dos casos práticos, são:

- convecção e evaporação através dos pulmões;
- ingestão de alimentos ou líquidos (temperatura);
- condução;
- fezes e urina.

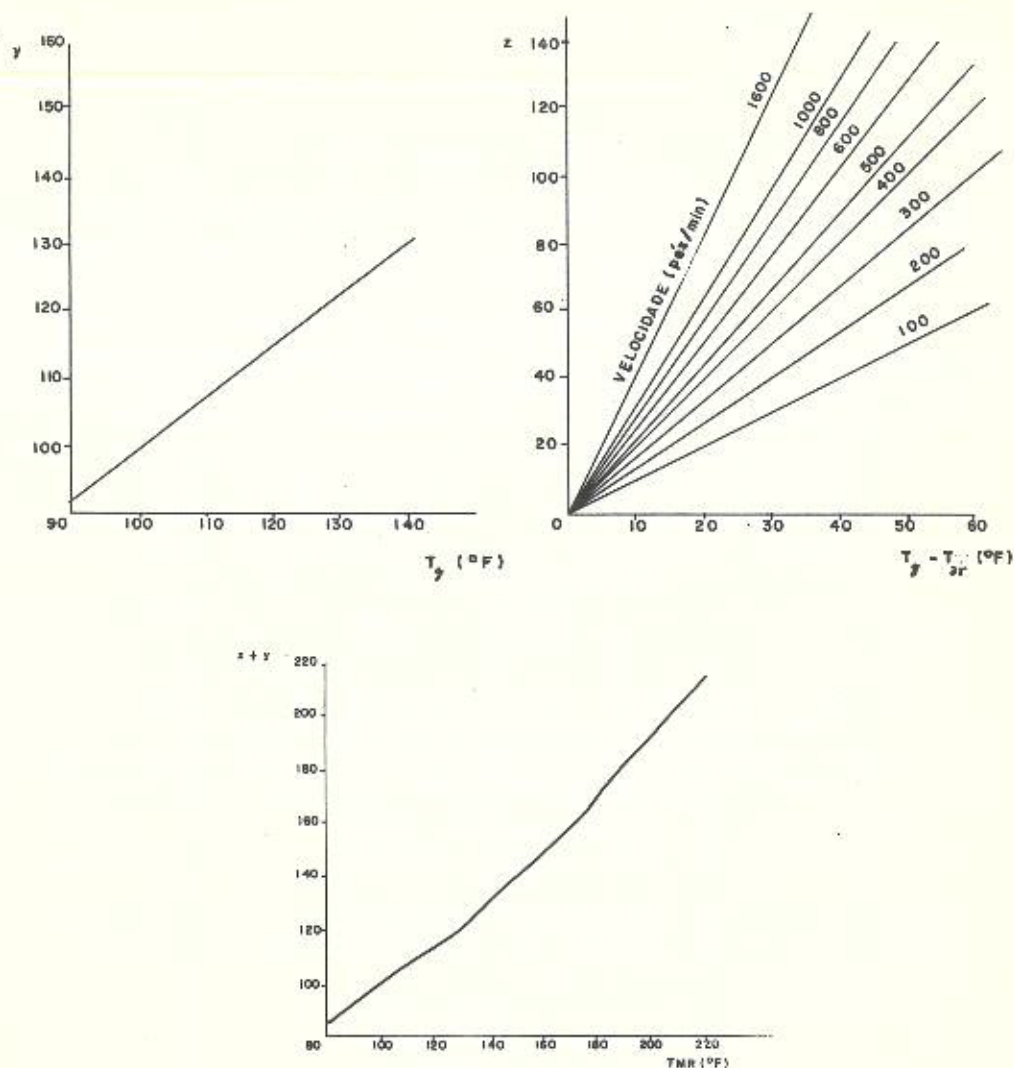


FIGURA 5.4 Cálculos de temperatura média de radiação (TMR). [Iron and Steel Institute, *Steel mill ventilation* (24)]

As trocas de calor entre o corpo e seu ambiente podem ser simplesmente representadas pela equação de balanço térmico,

$$C_{met} + C_c + C_{rad} - Ev = \pm C_{tec}, \quad (5.9)$$

onde C_{met} é o calor metabólico, C_c e C_{rad} representam o calor ganho ou perdido pelo corpo por meio de convecção e radiação, respectivamente, Ev é a quantidade de calor perdida pelo corpo por evaporação do suor, C_{tec} é a quantidade de calor ganha ou perdida pelos tecidos do corpo ($C_{tec} = 0$ se o corpo mantém equilíbrio térmico).

CARGA CALÓRICA

A carga calórica que resulta da exposição de um homem nu pode ser estimada por

$$C_{met} + C_{rad} + C_c = \text{carga calórica.}$$

Para ser mantido o equilíbrio térmico, requer-se a evaporação de uma quantidade de suor, Ev_{req} , de tal modo que

$$C_{met} + C_{rad} + C_c = Ev_{req}.$$

Calor metabólico. O calor metabólico basal situa-se entre 60 e 70 kcal/h (a mínima produção de calor possível). A máxima quantidade de energia despendida é ~ 1 000 kcal/h, e só pode ser mantida por alguns minutos. O dispêndio de energia relaciona-se com o tipo de trabalho, conforme segue:

trabalho leve	150 a 300 kcal/h;
trabalho moderado	300 a 450 kcal/h;
trabalho pesado	450 a 600 kcal/h;
trabalho muito pesado	600 a 750 kcal/h;
trabalho excessivamente pesado	acima de 750 kcal/h.

Para melhor estimativa de C_{met} , mede-se o consumo de oxigênio durante a atividade.

Definição de homem-padrão. O homem-padrão é definido como sendo jovem, de físico e saúde superiores ao normal, aclimatado ao calor, e com um peso de 70 kg; a estatura é 1,73 m, a superfície do corpo 1,86 m², e a temperatura da pele é de 35 °C. Com base nesse padrão, são feitos todos os cálculos.

Determinação de C_{rad} . Determina-se pela equação

$$C_{rad} = 11,34 (TMR - 35) \text{ kcal/h.} \quad (5.10)$$

A TMR também é dada por essa equação. Para evitar os cálculos, utilizam-se os nomogramas das Figs. 5.5 e 5.6, de onde se obtém diretamente o valor de C_{rad} em kcal/h, ou o gráfico da Fig. 5.7.

Determinação de C_c . Determina-se pela equação

$$C_c = v^{0,6} (T_{ba} - 35) \text{ kcal/h,} \quad (5.11)$$

onde v é a velocidade do ar (m/min) e T_{ba} a temperatura do ar (°C). O valor de C_c pode ser dado pelo nomograma da Fig. 5.8 ou pela Fig. 5.9.

Determinação da capacidade máxima de um ambiente como receptor da descarga térmica do operador. Determina-se pela equação

$$Ev_{max} = 2,05v^{0,6}(42 - p_{vap}) \text{ kcal/h,} \quad (5.12)$$

sendo p_{vap} a pressão de vapor d'água do ambiente (mm de Hg), v a velocidade do ar (m/min), e 42 a pressão de vapor d'água na pele quando completamente úmida e a 35 °C. O valor de p_v é calculado pela carta psicrométrica, e Ev_{max} através da Fig. 5.10.

CONDIÇÕES LIMITANTES

A equação para as trocas de calor do homem-padrão pode ser utilizada para prever as condições limitantes à manutenção do balanço térmico. Os

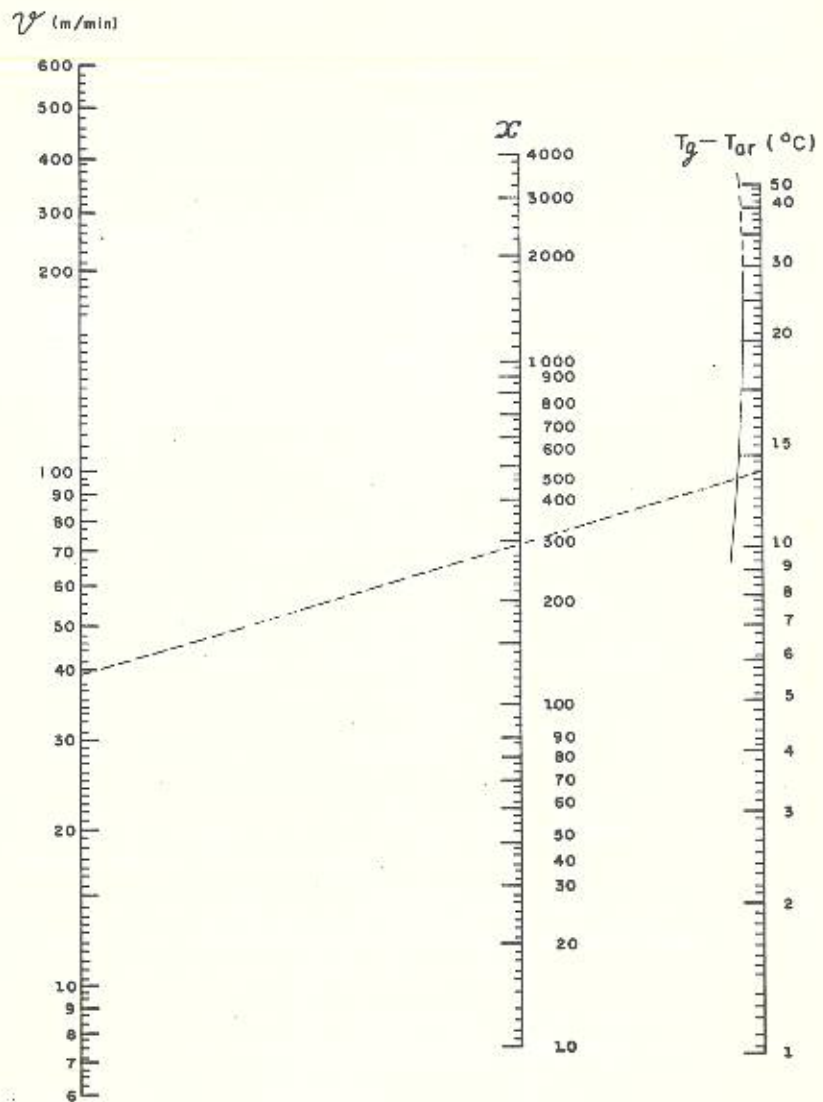


FIGURA 5.5 Nomograma 1. Se, $T_g = T_{ar}$, $C_{rad} = 11,34 (T_g - 35)$. Unindo-se v com $T_g - T_{ar}$, obtém-se x , valor auxiliar que se leva ao nomograma 2. [Eduardo Racca, Argentina, 1968]

resultados dessa predição podem ser mostrados numa carta psicrométrica, e será feito pelo exemplo que segue.

Problema. Quais as condições limitantes para um homem que está caminhando a 6 km/h, às custas de um calor metabólico de 350 kcal/h? Admitir a velocidade do ar a 90 m/min e a temperatura do ar igual à temperatura média de radiação. O homem não deve suar mais de 1 litro/h e, desse modo, a máxima quantidade de calor que ele pode dissipar por evaporação é 600 kcal/h.

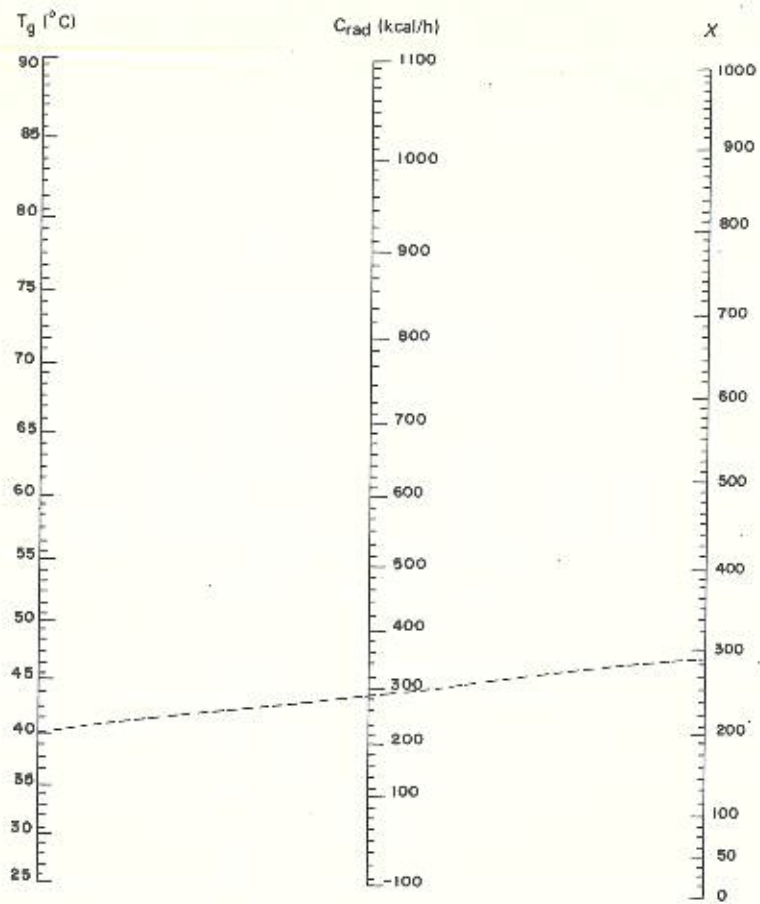


FIGURA 5.6 Nomograma 2. Unindo-se T_g com x , obtém-se C_{rad} . [Eduardo Racca, Argentina, 1968]

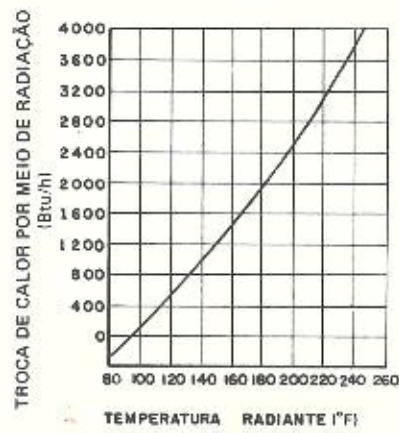


FIGURA 5.7 Relação entre a temperatura radiante média e a troca de calor radiante com o corpo humano ($T_s = 95^{\circ}\text{F}$). [Iron and Steel Institute, *Steel mill ventilation* (24)]

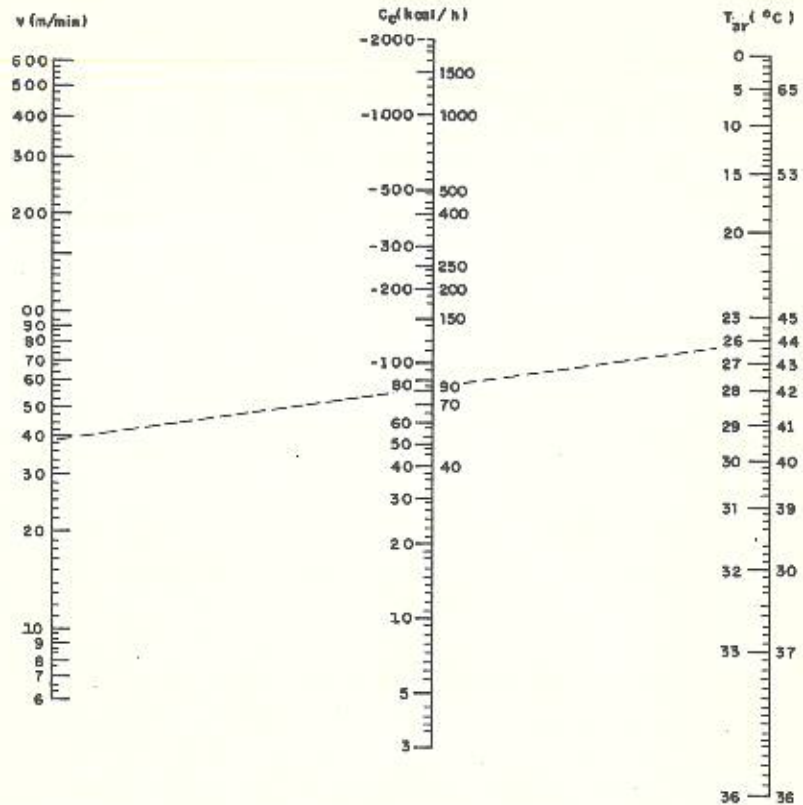


FIGURA 5.8 Nomograma 3. Se, $T_{ar} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $C_c = 0$. Unindo-se v com T_{ar} , obtém-se C_c . [Eduardo Racca, Argentina, 1968]

Solução. (1) Se 600 kcal/h são a máxima quantidade de calor que o homem pode dissipar por evaporação, a máxima quantidade de calor que ele pode receber por meio de convecção e de radiação é

$$C_{rad} + C_c = 600 - C_{met} = 600 - 350 = 250 \text{ kcal/h,}$$

$$\therefore [11,34(\text{TMR} - 35)] + [v^{0,6}(T_{bs} - 35)] = 250.$$

Sendo $T_{bs} = \text{TMR}$ e $v = 90 \text{ m/min}$,

$$[11,34(T_{bs} - 35)] + [90^{0,6}(T_{bs} - 35)] = 250,$$

$$\therefore T_{bs} = 44,7\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

“A temperatura do ar e a temperatura média de radiação não devem exceder 44,7 °C.”

2) Considerando $Ev_{max} = 600 \text{ kcal/h}$ como a capacidade máxima do ambiente como receptor do calor dissipado, temos

$$Ev_{max} = 2,05v^{0,6}(42 - p_{vap}),$$

$$\therefore 600 = 2,05 \cdot 90^{0,6}(42 - p_{vap}),$$

$$\therefore p_{vap} = 21,9 \text{ mm Hg}.$$

“A pressão de vapor do ambiente não deve superar 21,9 mm Hg para $Ev_{max} = 600 \text{ kcal/h}$.”

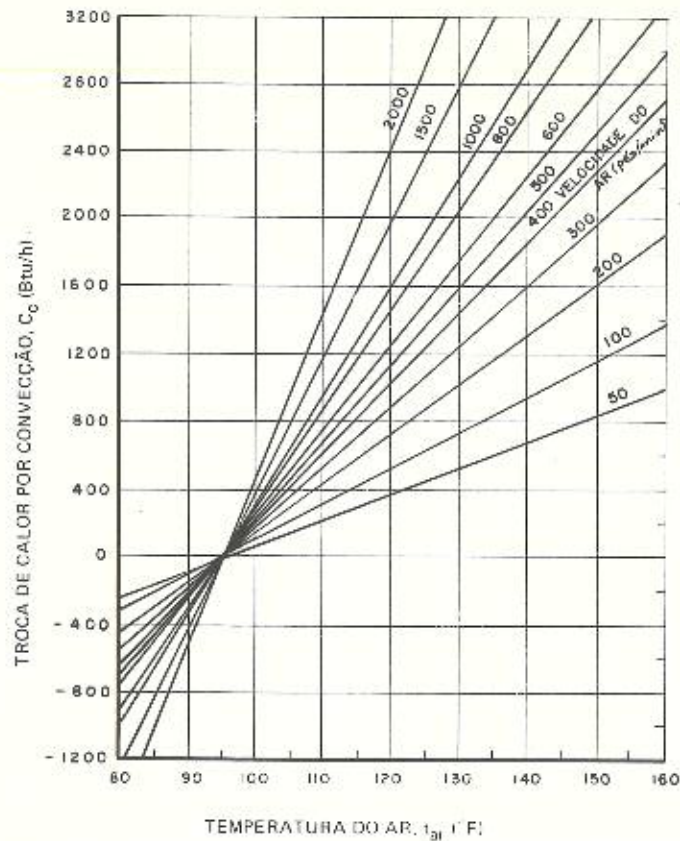


FIGURA 5.9 Relação entre temperatura e velocidade do ar para a troca de calor, por convecção, com o corpo humano ($T_s = 90^\circ\text{F}$). [Iron and Steel Institute, *Steel mill ventilation* (24)]

3) O ambiente deve receber pelo menos o calor dissipado pela evaporação devido a $C_{met} = 350 \text{ kcal/h}$; nesse caso, $C_c + C_{rad} = 0$, e teremos

$$[11,34(\text{TMR} - 35)] + [v^{0,6}(T_{ba} - 35)] = 0,$$

ou seja, para $T_{hs} = \text{TMR} = 35^\circ\text{C} =$ temperatura da pele. Para esse caso, em que $Ev_{max} = 350 \text{ kcal/h}$, teremos

$$\begin{aligned} Ev_{max} &= 2,05v^{0,6}(42 - p_{vap}), \\ \therefore 350 &= 2,05 \cdot 90^{0,6}(42 - p_{vap}), \\ \therefore p_v &= 30,2 \text{ mm Hg.} \end{aligned}$$

“A pressão do vapor do ambiente não deve superar 30,2 mm Hg, para $Ev_{max} = C_{met} = 350 \text{ kcal/h}$.”

Convém ressaltar que os limites calculados não devem ser interpretados como seguros para exposições prolongadas. O fato de os limites para manutenção do balanço térmico poderem ser preditos não significa que para alguns indivíduos os efeitos não sejam excessivos sob essas condições; nem significa que mais severas condições serão intoleráveis se a exposição for breve.

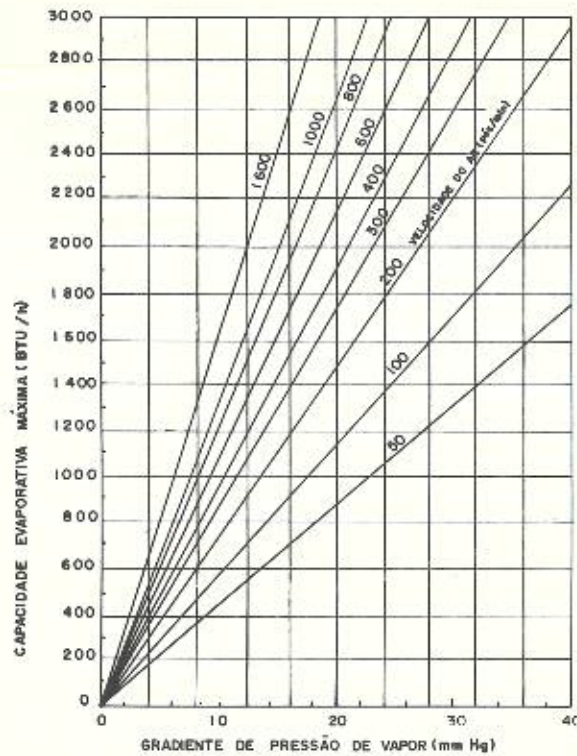


FIGURA 5.10 Capacidade evaporativa do homem a diferentes gradientes, pressões de vapor e velocidades do ar. [Iron and Steel Institute, *Steel mill ventilation* (24)]

INFLUÊNCIA DA ROUPA UTILIZADA

A roupa impõe uma barreira às três vias de transferência de calor disponíveis.

a) Diminuindo a convecção, por interferir com o movimento de ar junto à pele; essa diminuição, quando sob a ação do calor, será uma desvantagem se a temperatura do ar for inferior à temperatura da pele, e será uma vantagem se o gradiente estiver na direção contrária, também por interferir com o movimento de ar.

b) Diminuindo o potencial para evaporação, que usualmente não é um fato crítico, a não ser que a pressão de vapor no ambiente seja alta como nos trópicos úmidos, ou o tecido da roupa seja impermeável.

c) Diminuindo a transferência por meio de radiação. Quando a temperatura de radiação é alta, como, por exemplo, junto a fornos industriais, a utilização de uma roupa normal de cor cáqui reduz de 30 a 40% a carga de radiação sobre o homem. Pode-se esperar que o uso de roupa comum de trabalho reduza em 30% os valores de C_{rad} , C_c e Ev_{max} .

ÍNDICES DE CARGA TÉRMICA

Vários índices de carga térmica têm sido propostos, conforme segue.

EMPÍRICOS

Quando as respostas subjetivas ou fisiológicas do homem são utilizadas como variável dependente.

Temperatura de bulbo úmido

Essa medida reflete o efeito combinado da temperatura do ar e da pressão de vapor sobre a capacidade evaporativa da atmosfera, sendo útil na avaliação da carga térmica em atmosferas quentes e úmidas nas quais efeitos dos movimentos de ar e de energia radiante são relativamente constantes ou desprezíveis.

Um homem caminhando a 5 km/h e carregando um peso de 10 kg sentirá, a $T_{bu} = 33,6^\circ\text{C}$, o trabalho relativamente fácil; a $T_{bu} = 34,5^\circ\text{C}$, difícil; e a $T_{bu} = 35,7^\circ\text{C}$, impossível.

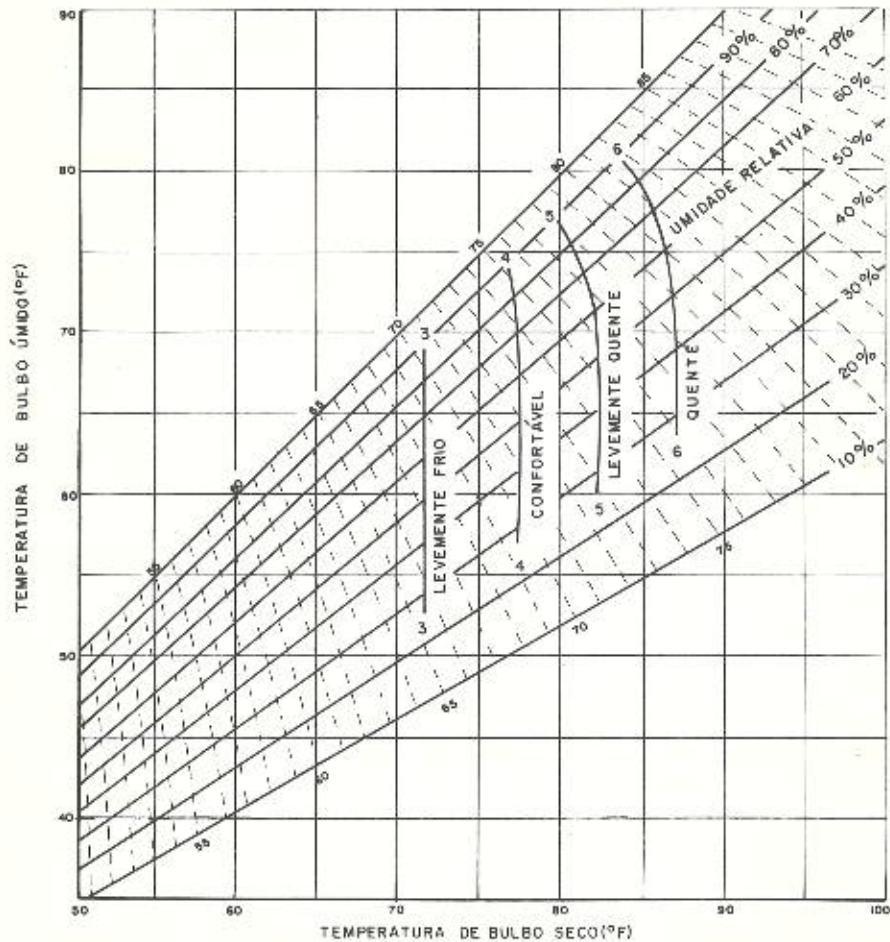


FIGURA 5.11 Movimentação do ar, 15 a 25 pés/min. As linhas de temperatura efetiva (pontilhadas) indicam a sensação de calor imediatamente depois de se entrar em um local com ar condicionado. As linhas cheias (3, 4, 5 e 6) indicam a sensação experimentada depois de três horas no local. Ambas as curvas (pontilhadas e cheias) aplicam-se a pessoas em repouso e normalmente vestidas [ACGIH, *Industrial ventilation* (3)]

Escala de temperatura efetiva e suas modificações

A temperatura efetiva (T_{ef}) é uma escala sensorial de calor combinando temperatura do ar, umidade relativa e movimento de ar num único índice. Não pode ser medida diretamente, devendo ser computada de leituras das temperaturas de bulbos seco e úmido e da velocidade do ar, utilizando gráficos ou tabelas. As Figs. 5.11 e 5.12 apresentam os diagramas de cálculo da temperatura efetiva.

O valor numérico desse índice foi fixado pela temperatura do ar parado (10 a 15 cm/s), saturado com umidade, que provoca uma sensação de calor ou frio, como aquela da condição dada. Por exemplo, um determinado ambiente tem uma $T_{ef} = 20^\circ\text{C}$ quando provoca uma sensação de calor como a experimentada em ar parado, saturado com umidade a 20°C .

Existem duas escalas de temperatura efetiva: a básica (para o homem nu) e a normal (para o homem vestido). Para utilizar essas escalas, é necessário conhecer T_{bs} , T_{bu} e v . As principais críticas a esse índice são que:

- superestima a umidade, a temperaturas normais e baixas;
- subestima a umidade, a temperaturas elevadas;
- omite o calor radiante.

Para corrigir o efeito do calor radiante, foi estabelecida a *temperatura efetiva corrigida*. Para obtermos essa temperatura, entramos no gráfico de temperatura efetiva, usando, em lugar dos valores reais de T_{bs} e T_{bu} , respectivamente, as temperaturas do termômetro de globo e a temperatura admitida no termômetro de bulbo úmido se a temperatura do ar fosse a temperatura do termômetro de globo.

Exemplo. Temperatura corrigida para radiação. Suponhamos que $T_{bs} = 20^\circ\text{C}$, $U_{rel} = 70\%$ e $T_g = 45^\circ\text{C}$. Na carta psicrométrica, com esses dados, determinamos um ponto ($T_{bu} = 16,2^\circ\text{C}$) e, desse ponto, percorremos uma linha de pressão de vapor até a temperatura de 45°C . Esse ponto dá as condições verdadeiras do local: $T_{bs} = 45^\circ\text{C}$, $U_{rel} = 17\%$ e $T_{bu} = 24,2^\circ\text{C}$. Para se determinar temperatura efetiva corrigida, utiliza-se $T_{bs} = 45^\circ\text{C}$ e $T_{bu} = 24,2^\circ\text{C}$.

Índice de temperatura de globo-bulbo úmido ($I T_g - T_{bu}$)

É derivado de leituras (em $^\circ\text{F}$) de T_{bu} , T_{bs} e T_g , ponderadas e somadas de acordo com a fórmula

$$I T_g - T_{bu} = 0,7T_{bu} + 0,1T_{bs} + 0,2T_g, \quad (5.13)$$

válida para ambiente ao ar livre. Quando o $I T_g - T_{bs} \geq 90^\circ\text{C}$, deve-se parar qualquer atividade.

TAXA PREVISTA DE SUDAÇÃO PARA QUATRO HORAS (σS_4)

Baseia-se na taxa total de suor medida em homens jovens, vestidos de macacão ou *short*, em descanso, ou alternadamente descansando e trabalhando por 4 h sob diferentes condições de T_{bs} , U_{rel} , v e C_{rad} . Foram preparados nomogramas que integram variáveis físicas e fisiológicas num único número que, presume-se, representa o suor total produzido em 4 h, sob as condições estabelecidas de ambiente, trabalho e roupa. Um valor de $\sigma S_4 = 4,5$ representa a máxima quantidade de calor tolerável por homens aclimatados.

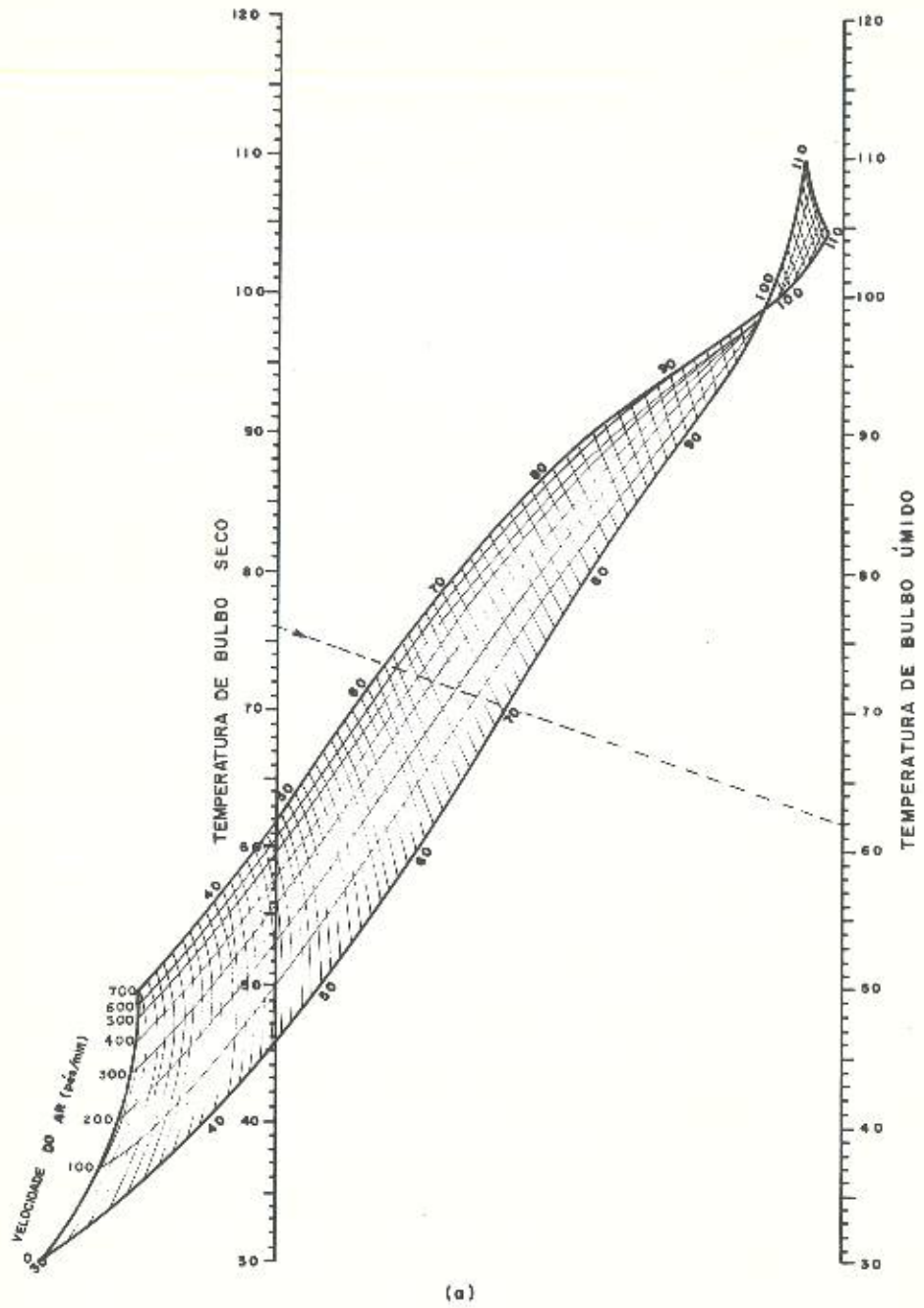
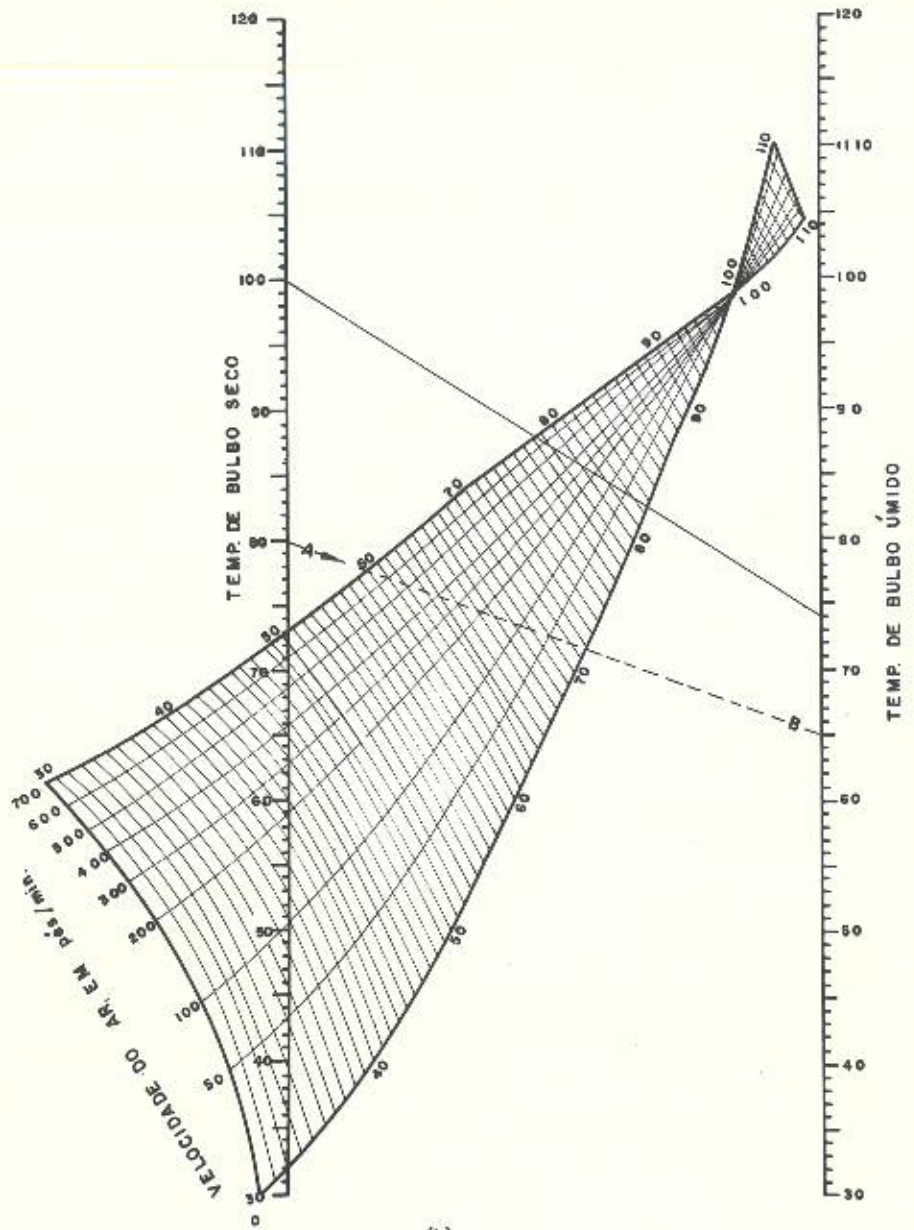


FIGURA 5.12 (a) Escala normal de temperatura efetiva (aplicável a pessoas em repouso e normalmente vestidas). (b) Escala básica de temperatura efetiva para homens nus até a cintura. [ACGIH, *Industrial ventilation* (3)]



(b)

RACIONAIS

Quando o índice está baseado em conhecidos princípios físicos de transferência de calor.

CRITÉRIO DE BELDING-HATCH (ÍNDICE DE SOBRECARGA TÉRMICA, IST)

Expressa a relação entre a quantidade de calor que deve ser perdida pelo corpo pela evaporação do suor, Ev_{req} , para manutenção da temperatura corporal, e a quantidade máxima de calor que pode ser perdida por evaporação do suor, Ev_{max} , quando o corpo estiver completamente molhado:

$$IST = \frac{Ev_{req}}{Ev_{max}} \times 100. \quad (5.14)$$

Quando $Ev_{max} > 600$ kcal/h, o índice é

$$IST = \frac{Ev_{req}}{600} \times 100. \quad (5.15)$$

Os valores de Ev_{req} , Ev_{max} e IST podem ser obtidos através de ábacos elaborados por Belding e Hatch (Fig. 5.13).

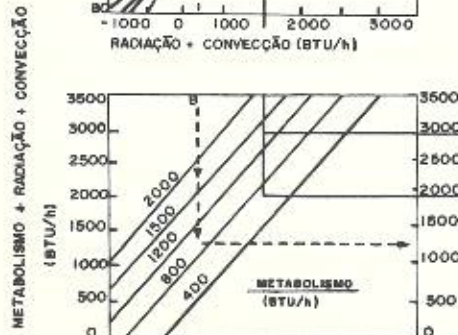
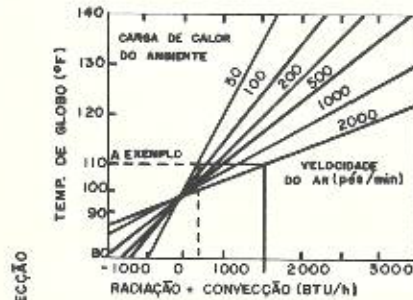
Exemplo. São dados: $T_g = 110$ °F, $T_{hu} = 75$ °F, $T_{bs} = 90$ °F, $v = 100$ pés/min e $M = 600$ Btu/h. Pela carta de Belding e Hatch, IST = 90. Isso obriga ao estudo dos tempos de exposição e de recuperação, que são calculados de acordo com a expressão

$$\text{tempo máximo de exposição} = \frac{\text{calor máximo acumulável}}{\text{velocidade de acumulação de calor}}$$

IST	Implicações fisiológicas e higiênicas de exposições de 8 h a várias cargas térmicas
-20	Leve resposta ao frio
-10	
0	Nenhuma resposta
10	Respostas leve e moderada ao calor. A atividade intelectual diminui, bem como diminui a eficiência em trabalhos físicos pesados
20	
30	
40	Resposta severa ao calor, envolvendo ameaça à saúde de homem não-aclimatado. Diminuição da eficiência de trabalhos físicos. Exames médicos pré-admissionais são importantes
50	
60	
70	Resposta muito severa ao calor. Somente uma pequena porcentagem da população está qualificada para esse trabalho
80	
90	
100	Máxima resposta tolerada diariamente por homens jovens, aclimatados e adaptados

Quando o IST é superior a 100, o balanço térmico não se mantém e a sudorese é exigida em excesso, de modo que o homem-padrão não tolerará uma exposição prolongada.

De acordo com estudos fisiológicos realizados, parece provável que o homem-padrão pode tolerar uma elevação da temperatura do corpo de 1,1 °C; isso significa que o calor máximo acumulável (dado pela expressão peso × calor específico × elevação de temperatura) é cerca de 63 kcal ($70 \times 0,83 \times 1,1$).



Entrada A. Trace uma linha vertical do ponto de interseção entre temperatura de globo e velocidade do ar. Obtenha daí as cargas de calor de radiação e de convecção combinadas. Alongue a linha vertical até a entrada B. **Entrada B.** Da interseção com o metabolismo, trace uma linha horizontal e obtenha a carga térmica total em termos de quantidade de suor a ser evaporada para o balanço térmico. Alongue a horizontal até a entrada C. **Entrada X.** Trace uma linha horizontal a partir da interseção de temperatura de bulbo úmido e temperatura de bulbo seco. Obtenha o gradiente de pressão de vapor entre a pele saturada a 95 °F e o ambiente. Alongue a horizontal até a entrada Y. **Entrada Y.** Na interseção com a velocidade do ar, trace uma linha vertical. Obtenha a evaporação máxima da pele molhada a 95 °F ($E_{v,max}$). Alongue a vertical até a entrada Z. **Entrada Z.** Prossiga com a vertical até interceptar a horizontal da entrada C. (Se $E_{v,max}$ exceder 2400 entre Z e 2400). Leia o índice de sobrecarga térmica.

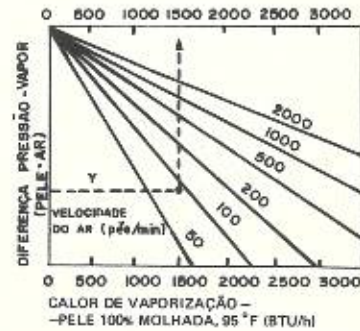
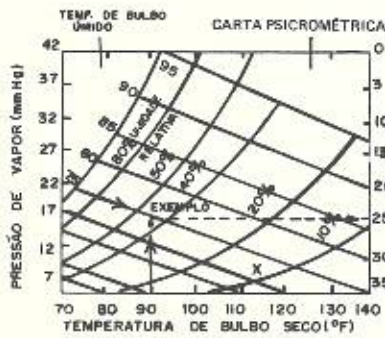
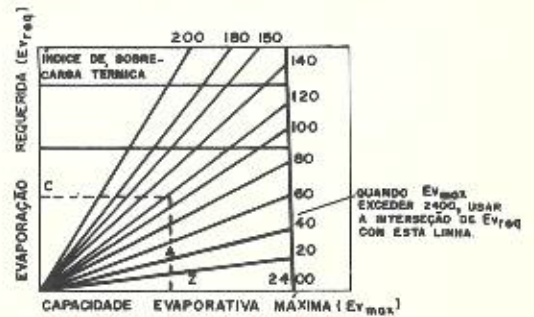


FIGURA 5.13 Ábaco para determinação do índice de sobrecarga térmica [Patty, F., *Industrial hygiene and toxicology*, segunda edição, Interscience Publishers, 1967]

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

Por outro lado, o tempo mínimo de recuperação é calculado assim:

$$\text{tempo mínimo de recuperação} = \frac{\text{calor acumulado}}{\text{velocidade de perda de calor}}$$

$$\text{calor acumulado} = \text{tempo real de exposição} \times \text{velocidade de acumulação de calor.}$$

Exemplo 1. $Ev_{req} = 800$ kcal/h, $Ev_{max} = 400$ kcal/h, IST = 200:

$$t_{max\ exp} = \frac{63\ \text{kcal}}{(800 - 400)\ \text{kcal/h}} \times \frac{60\ \text{min}}{\text{h}} = 9,5\ \text{min.}$$

Exemplo 2. $Ev_{req} = 400$ kcal/h, $Ev_{max} = 200$ kcal/h, IST = 200:

$$t_{max\ exp} = \frac{63\ \text{kcal}}{(400 - 200)\ \text{kcal/h}} \times \frac{60\ \text{min}}{\text{h}} = 19\ \text{min.}$$

Outros índices racionais são a temperatura operativa, a temperatura operativa-padrão e o índice de resposta relativa.

PSICROMETRIA

Introdução

A atmosfera da Terra é uma mistura de vários gases. Inclui nitrogênio, oxigênio, argônio, vapor d'água e traços de outros. Contém vários tipos de material particulado, além de vapores. Costuma-se definir *ar úmido* como uma mistura binária de ar seco e vapor d'água. O ar úmido pode conter quantidades variáveis de vapor d'água, desde zero (ar seco) até a saturação. O ar seco tem a seguinte composição aproximada, em porcentagem por volume:

Nitrogênio	78,084
Oxigênio	20,9476
Argônio	0,934
Dióxido de carbono	0,0314
Neônio	0,001818
Hélio	0,000524
Metano	0,0002
Dióxido de enxofre	0-0,0001
Hidrogênio	0,00005

e outros constituintes em menores concentrações, como kriptônio, xenônio e ozona. As quantidades de dióxido de carbono, dióxido de enxofre, metano e ozona podem sofrer variações significativas de local para local e de tempos em tempos, em relação às quantidades normais indicadas. O peso molecular do ar puro e seco é 28,966, com base na escala do oxigênio 16, e 28,9645, com base na escala do carbono 12.

Propriedades termodinâmicas do ar úmido

Várias propriedades termodinâmicas estão associadas com o ar úmido. O estado termodinâmico do ar úmido está estabelecido pela pressão e outras duas propriedades independentes. Em cálculos práticos para sistemas abertos à atmosfera, a pressão pode ser tomada como a pressão barométrica.

UMIDADE ABSOLUTA

É a quantidade de vapor d'água, em quilogramas, contida em 1 kg de ar seco. Quando a pressão parcial do vapor d'água no ar, a uma dada temperatura, é igual à pressão de vapor d'água de saturação à mesma temperatura, o ar está saturado, e a umidade absoluta é chamada umidade de saturação.

UMIDADE RELATIVA

É a relação, expressa em porcentagem, entre a pressão parcial do vapor d'água no ar, a uma dada temperatura, e a pressão de vapor d'água de saturação, à mesma temperatura. Pode ser definida também como a relação entre a fração molar do vapor d'água no ar, a uma dada temperatura, e a fração molar de vapor d'água no ar saturado de umidade à mesma temperatura.

TEMPERATURA DE BULBO SECO

É a temperatura obtida pela colocação do bulbo seco de um termômetro em contato com uma mistura de ar úmido até que o mesmo atinja o equilíbrio térmico. Resumindo, é a temperatura do ar como registrada por um termômetro comum.

TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO

Pode ser definida como a temperatura de equilíbrio alcançada por uma pequena massa de água com uma superfície exposta ao ar, de tal modo que o calor emitido por evaporação é balanceado pelo calor transferido do ar para a água, para uma dada temperatura de bulbo seco e uma dada umidade absoluta. A temperatura de bulbo úmido pode ser obtida, passando-se ar rapidamente sobre o bulbo de um termômetro coberto com uma mecha absorvente saturada com água.

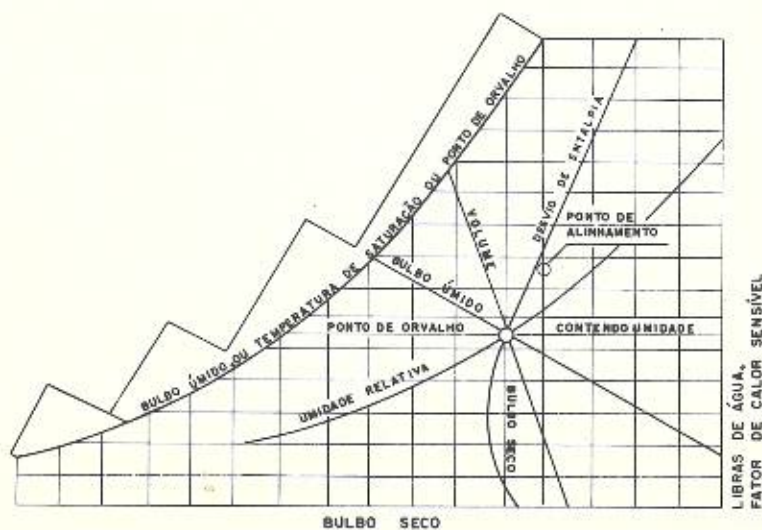


FIGURA 5.14 Carta psicrométrica esquematizada

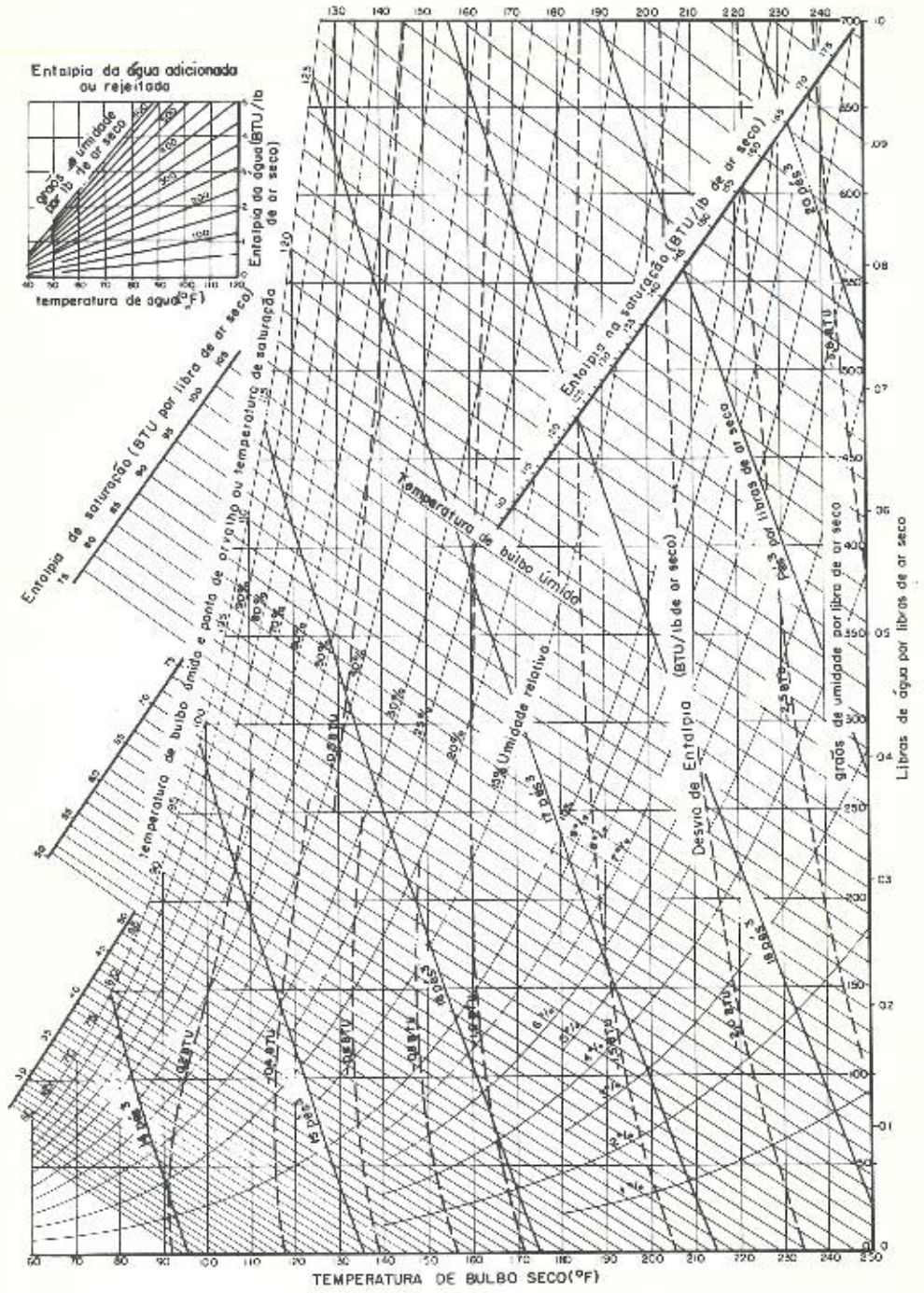


FIGURA 5.15 Carta psicrométrica de altas temperaturas. Pressão barométrica, 29,92 pol de Hg. [ACGIH, *Industrial ventilation* (3)]

PONTO DE ORVALHO

É a temperatura para a qual o ar úmido, com uma dada umidade absoluta, deve ser resfriado de modo a tornar-se saturado.

As propriedades do ar úmido podem ser mostradas graficamente numa carta psicrométrica (Figs. 5.14 a 5.17). A importância do conhecimento da psicrometria é melhor ressaltada pela resolução dos exercícios do fim do capítulo.

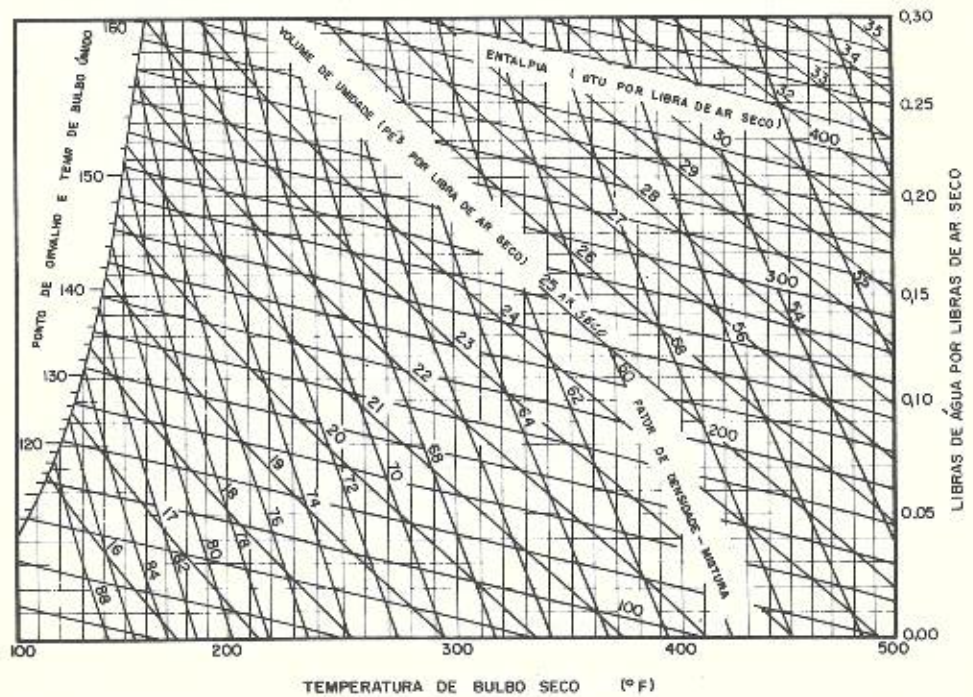
MEDIDA DAS TEMPERATURAS

Temperatura de bulbo seco

É medida com termômetros comuns, devendo o bulbo ser protegido contra a ação da radiação.

Umidade relativa

Medida com psicrômetro, que, basicamente, consta de um dispositivo onde dois termômetros estão montados, um dos quais com o bulbo coberto por um tecido umedecido com água destilada. Sobre os bulbos dos termômetros deve passar ar com velocidade superior a 75 m/min. Devido à evaporação da água, o termômetro de bulbo úmido indicará uma temperatura menor que a do termômetro de bulbo seco, exceto com 100% de umidade relativa, quando as tem-



(a)

FIGURA 5.16 (a) Carta psicrométrica para ar úmido (baseada em uma libra de ar seco). (b) Carta psicrométrica para ar quente e úmido. [ACGIH, *Industrial ventilation* (3)]

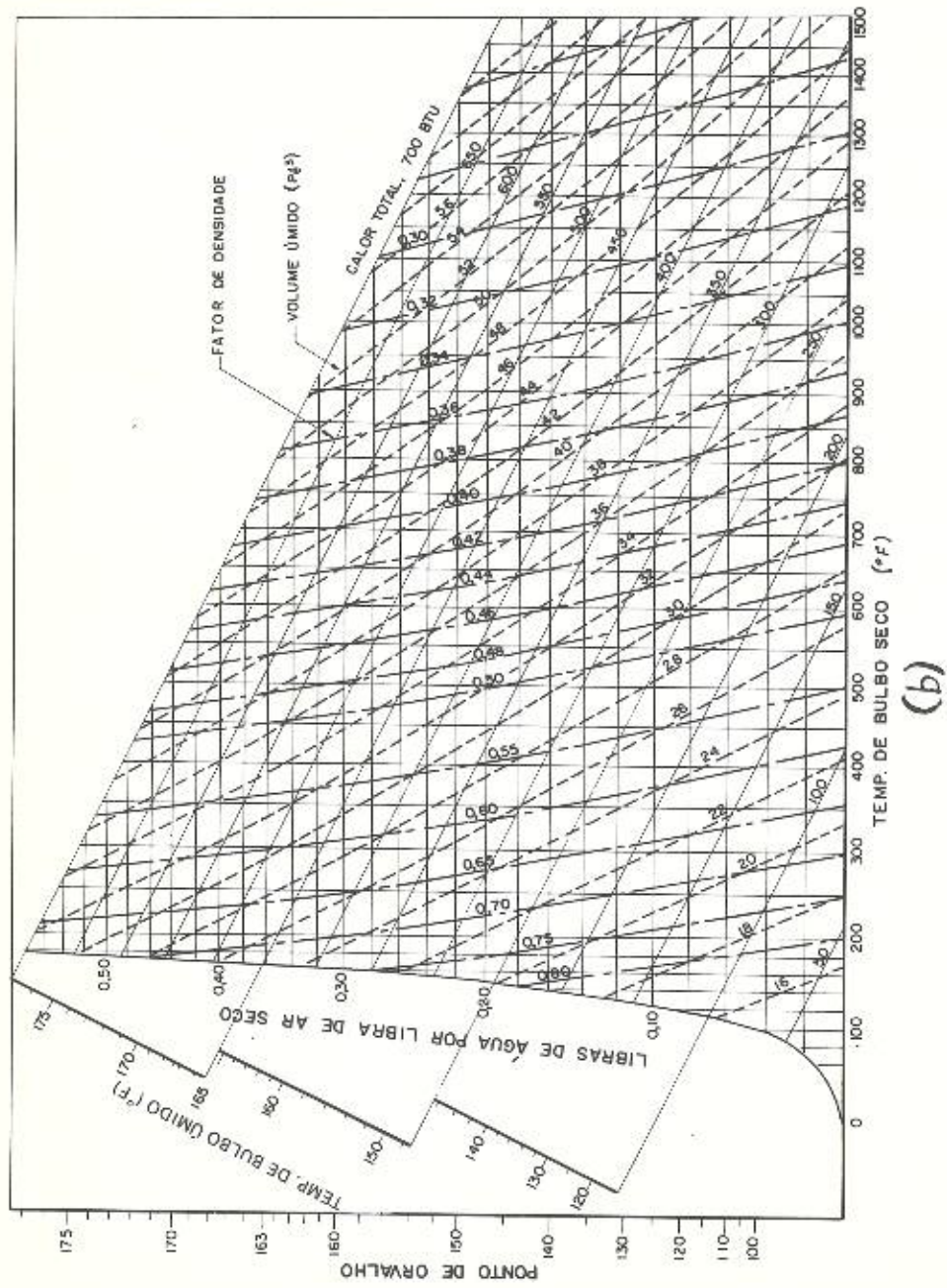


FIGURA 5.16 (Continuação)

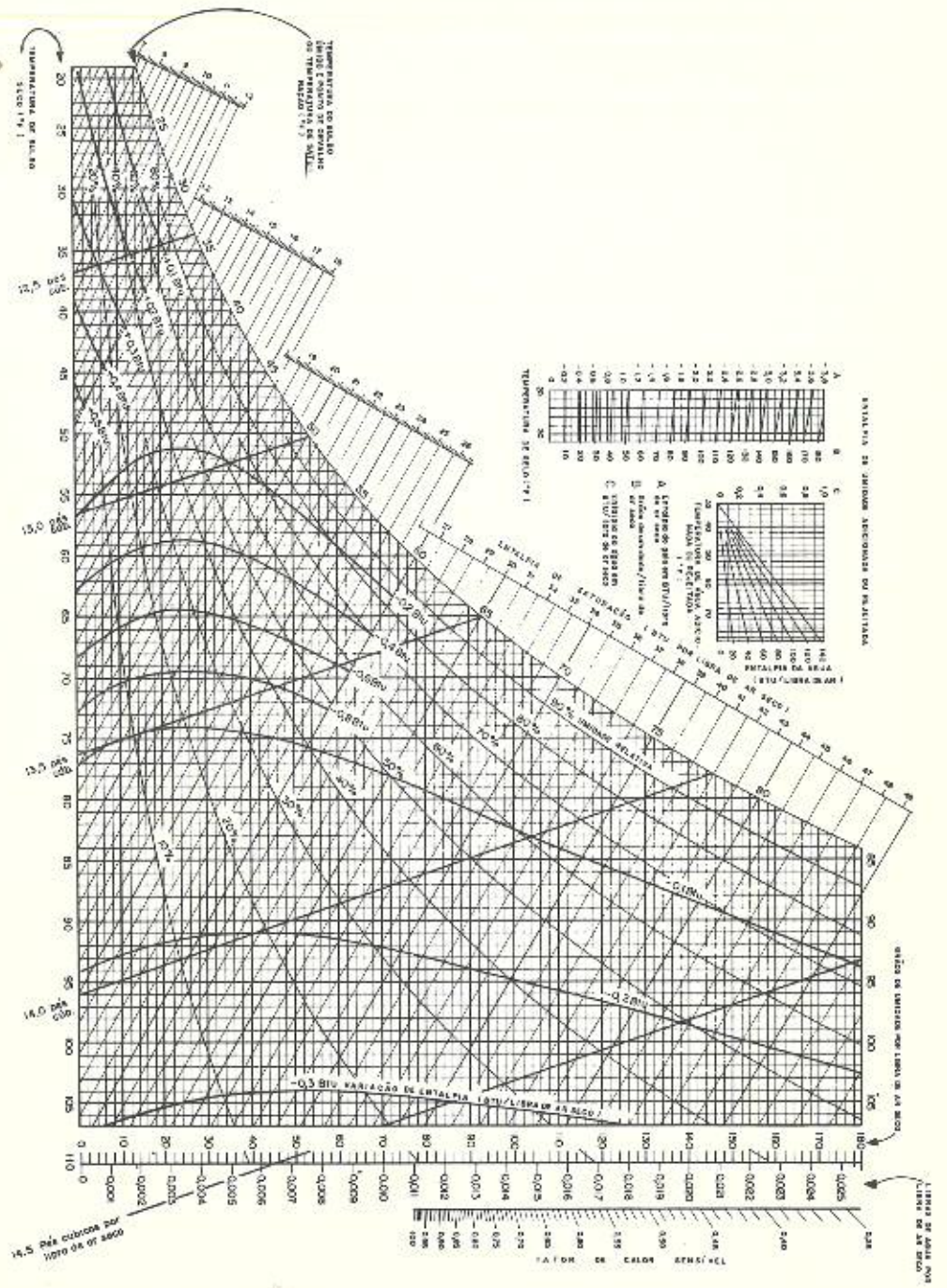


FIGURA 5.17 Carta psicrométrica (temperatura normal). [Carrier Air Conditioning Company, Handbook of air conditioning system design (22)]

peraturas coincidem. Com as duas temperaturas, vai-se à carta psicrométrica e determina-se a umidade relativa. Os tipos de psicrômetros mais comuns são o rotatório (ou de funda) e o aspiratório.

Exercícios de psicrometria

1. Aquece-se ar, a 1 atm, de T_{hs} 40 °F e T_{bu} 36 °F, para T_{bs} 70 °F. Achar:
 - a) a umidade relativa e absoluta antes e depois do aquecimento;
 - b) a temperatura do ponto de orvalho antes e depois do aquecimento;
 - c) a temperatura de bulbo úmido de ar aquecido;
 - d) o volume de ar antes e depois do aquecimento (baseado em uma libra de ar seco);
 - e) se a pressão de vapor da água saturada a 40 °F é 6,35 mm Hg qual será a pressão parcial de vapor nas condições iniciais?
2. Quanto calor foi consumido no processamento do Exercício 1?
3. Se for necessário obter uma umidade relativa de 60% no ar aquecido, quanto de umidade tem de ser adicionado por libra de ar fornecida, e quanto calor é necessário para produzir essa evaporação (por libra de ar seco)?
4. Uma sala com uma perda de calor sensível total de 10 000 Btu/h é suprida com 2 500 lb de ar/h, à temperatura de 90 °F. Achar a temperatura resultante da sala.

Solução. (1) Dados:

estado 1 $\left\{ \begin{array}{l} \text{ar a 1 atm} \\ T_{hs} = 40 \text{ °F} \\ T_{bu} = 36 \text{ °F} \end{array} \right\} \rightarrow$ é aquecido ao estado 2, $T_{bs} = 70 \text{ °F}$. Encontrar:

a) U_{abs1} , umidade absoluta antes do aquecimento \rightarrow C.P. $\rightarrow U_{abs1}$,

$$\frac{U_{abs1} = 0,0034 \text{ lb de vapor}}{\text{lb de ar seco}};$$

U_{rel1} , umidade relativa antes do aquecimento,

$$\frac{U_{rel1} = 70\%}{\text{}};$$

depois do aquecimento, estado 2,

$$\frac{U_{abs2} = 0,0034 \text{ lb de vapor}}{\text{lb de ar seco}}$$

$$\frac{U_{rel2} = 23\%}{\text{}}$$

b) Temperatura de orvalho,

$$T_{po1} \equiv T_{po2} \equiv 31,5 \text{ °F.}$$

c) $T_{bu2} \rightarrow$ carta psicrométrica $\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_{bs2} \\ U_{abs2} \end{array} \right\} \rightarrow T_{bu2} = 50,5 \text{ °F}$

(temp. de bulbo úmido após aquecimento).

d) Volume de ar (base, 1 lb de ar seco)

$$V_{ar1} = 12,65 \text{ pés}^3$$

$$V_{ar2} = 13,38 \text{ pés}^3.$$

e) Dado p_{va} nas condições de saturação = 6,35 mm de Hg.

$$p_{va} \textcircled{1} = ? \quad U_{rel1} = \frac{p_{va} \textcircled{1} (40 \text{ }^\circ\text{F})}{p_{va} \textcircled{2} (40 \text{ }^\circ\text{F})} = 70\% = \frac{p_{va} \textcircled{1}}{6,35},$$

$$\therefore p_{va} \textcircled{1} = 0,7 \times 6,35 = 4,45 \text{ mm de Hg.}$$

2) Quanto ao calor consumido no Exercício ①

$$\text{C.P.} \left\{ \begin{array}{l} C_{r2} = 20,7 \text{ Btu/lb de ar seco} \\ C_{r1} = 13,5 \text{ Btu/lb de ar seco,} \end{array} \right.$$

logo, $\Delta C_r = C_{r2} - C_{r1} = 7,2 \text{ Btu/lb de ar seco.}$

3) Para obter uma umidade relativa de 60% no ar aquecido do Exercício 1, devemos ter uma umidade absoluta de

$$\text{C.P.} \rightarrow U_{abs3} = 0,0094 \frac{\text{lb de vapor}}{\text{lb de ar seco}},$$

como temos

$$U_{abs2} = 0,0034 \frac{\text{lb de vapor}}{\text{lb de ar seco}},$$

temos de fornecer, portanto,

$$\Delta U_{abs} = 0,006 \frac{\text{lb de vapor}}{\text{lb de ar seco}},$$

ou

$$35 \frac{\text{grãos de vapor}}{\text{lb de ar seco}}.$$

Dessa forma, necessitamos de

$$\text{tabela C.P.} \rightarrow C = 0,18 \frac{\text{Btu}}{\text{lb de ar seco para evaporar a umidade}}$$

4) Se o salão perde 10 000 Btu/h e recebe 2 500 lb de ar por hora, a 90 °F, temos

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T,$$

$$10\,000 = 2\,500 \times 0,24 \times \Delta T,$$

$$\therefore \Delta T = -16,7 \text{ }^\circ\text{F.}$$

O sinal - indica que o salão perde calor; logo,

$$T_f - T_i = -16,7, \quad T_f = 90 - 16,7, \quad \therefore T_f = 73,3 \text{ }^\circ\text{F.}$$

RENOVAÇÃO DO AR AMBIENTE

Requisitos de ventilação

Várias medidas podem ser tomadas para se evitar a exposição de pessoas a condições de alta temperatura. Por exemplo, enclausuramento e isolamento de fontes quentes, vestimentas e barreiras protetoras, diminuição do tempo de exposição, etc. Aqui nos restringiremos às medidas relativas à ventilação de ambiente sem entrar em detalhes sobre condicionamento de ar, por ser esse assunto extenso, especializado e de pequena utilização industrial.

Decidida a necessidade de ventilação para promover conforto térmico, por exemplo, através da comparação da temperatura efetiva (ou temperatura efetiva corrigida) com os valores máximos recomendados, como os constantes da Fig. 5.18, vários enfoques podem ser seguidos para ventilar o ambiente. Alguns desses enfoques estão nas Figs. 5.19 e 5.20 e nas Tabs. 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9. Pode-se notar que, em alguns deles, o conforto térmico não é o único

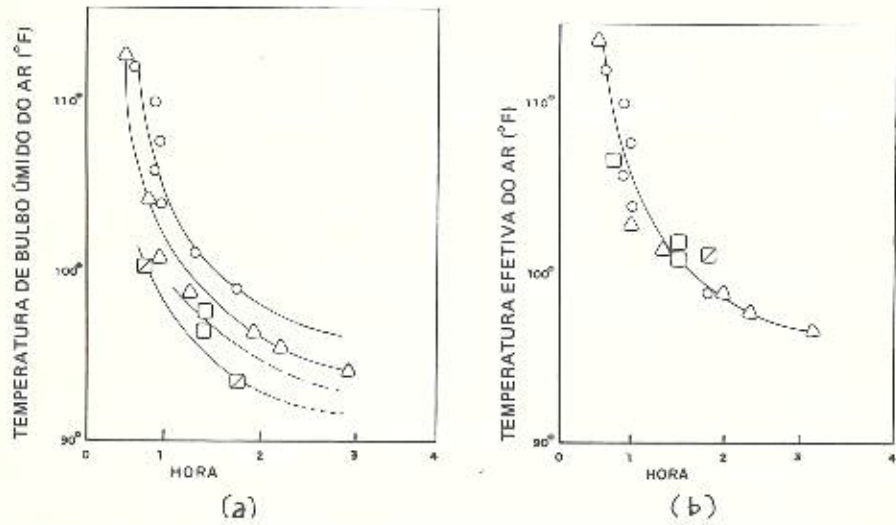


FIGURA 5.18 (a) Tempo de tolerância para um homem em repouso, com ar parado, para diversas temperaturas de bulbo úmido e várias umidades (\circ = 100%; \triangle = 60%; \square = 30%; \diamond = 15%). (b) Tempos de tolerâncias para diversas temperaturas efetivas. (\circ = 100%; \triangle = 60%; \square = 30%; \diamond = 15%) [ACGIH, *Industrial ventilation* (3)]

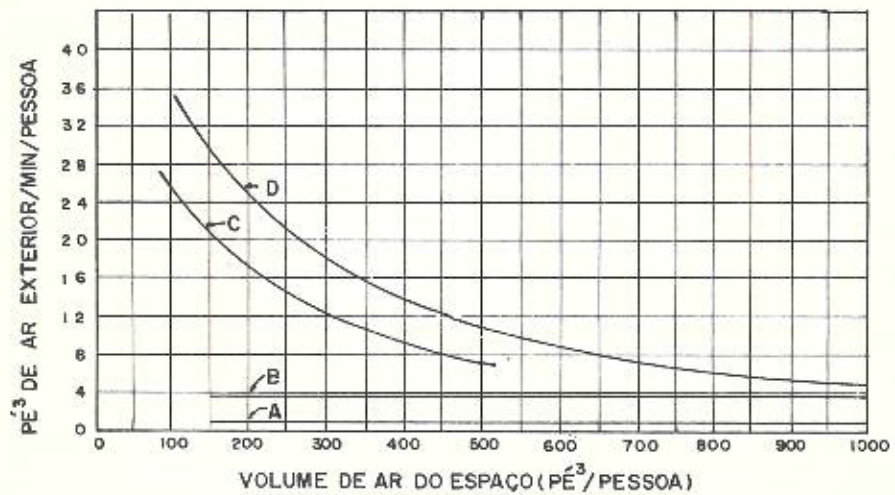


FIGURA 5.19 Requisitos de ar de diluição. A, ar requerido para prover a quantidade de oxigênio; B, ar requerido para evitar que a concentração de CO_2 ultrapasse 0,5%; C, ar requerido para remover odores do corpo de adultos sedentários D, dados da curva C aumentados 50% (e projetados) para permitir atividade física moderada. [ACGIH, *Industrial ventilation* (3)]

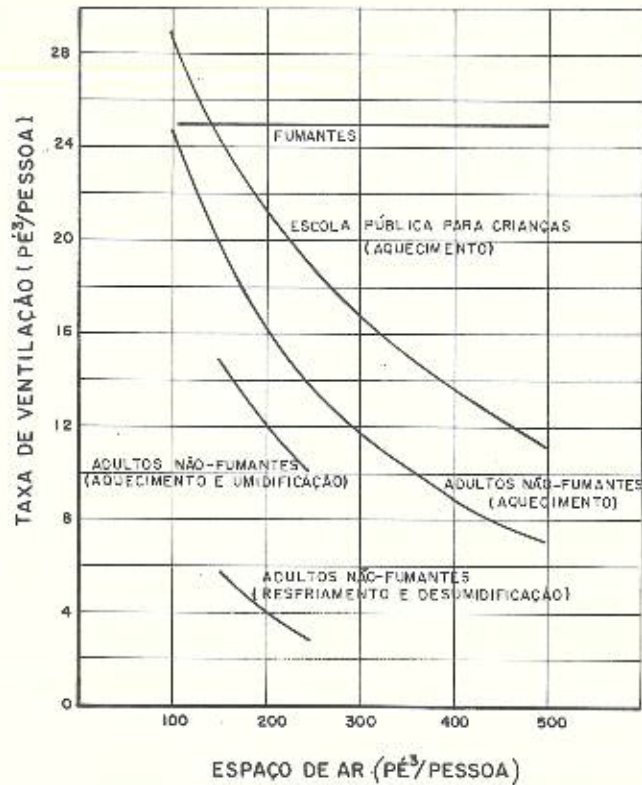


FIGURA 5.20 Taxas mínimas de ventilação. Os valores são os mínimos para ocupantes sedentários, com status sócio-econômico mediano, devendo ser ajustados para variações de status ou atividades [R. Jorgensen, *Fan engineering* (5)]

TABELA 5.2 Trocas de ar recomendadas

Tipo de sala	Minutos por troca de ar	Trocas de ar por hora
Auditórios e salas de reuniões	5-10	6-12
Padarias	3	20
Salas de caldeira	1-5	12-60
Cabinas	5	12
Salas de jantar	5-15	4-12
Salas de tingimento	5-10	6-12
Fundição	5-15	4-12
Garagens	5	12
Cozinhas	2-3	20-30
Laboratórios	3-10	6-20
Lavanderias	5	12
Oficinas	15-20	6-12
Escritórios	5-10	6-12
Túneis	1-10	6-60
Compartimentos de carga de navios	10	6

TABELA 5.3 Critérios sugeridos para projetos gerais de ventilação de ambientes, para controle de odores (ASHRAE)

Área funcional	Trocas por hora	pés ³ /min por pessoa
Hospitais (salas de anestesia)	8-12	—
Salas de animais	12-16	—
Auditórios	10-20	10
Hospitais (salas de autópsia)	8-12	10
Padaria e confeitaria	20-60	—
Boliches	15-30	30
Igrejas	15-25	5
Hospitais (salas de cistoscopia)	8-10	20
Salas de aula	10-30	40
Salas de conferência	25-35	—
Corredores	3-10	—
Hospitais (salas de parto)	8-12	—
Leiterias	5-15	—
Lavagem de pratos	30-60	—
Lavagem a seco	20-40	—
Fundações	5-20	—
Ginásios	—	1,5/pé quadrado
Garagens	6-30	—
Hospitais (salas de hidroterapia)	6-10	—
Hospitais (salas de isolamentos)	6-10	—
Manutenção e limpeza	8-12	—
Cozinhas	10-30	—
Lavanderias	10-60	—
Bibliotecas	15-25	10
Salas de depósito	2-15	—
Pequenas oficinas	8-12	—
Equipamentos mecânicos	8-12	—
Hospitais (suprimentos)	6-10	—
Berçários	10-15	—
Escritórios	6-20	10
Hospitais (salas de operação)	10-15	—
Pinturas e polimentos	18-22	—
Radiologia	6-10	—
Restaurantes	6-20	10
Lojinhas	18-22	10
Residências	5-20	—
Equipamentos telefônicos	6-10	—
Salas de controle de tráfego aéreo	18-22	10
Toiletas	8-20	—
Salas de transmissores e receptores	aumento de 10 °F	—
Soldas a arco voltaico	18-22	—

[American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, *Guide and data book*]

TABELA 5.4 Padrões de ventilação geral

Aplicação	Fumo	pés ³ /min por pessoa		pés ³ /min/pé ² de piso (mínimo)
		Recomendado	Mínimo	
Apartamentos populares	Algum	20	15	—
Apartamentos de luxo	Algum	30	25	0,33
Bancos	Ocasional	10	7,5	—
Barbearias	Considerável	15	10	—
Salões de beleza	Ocasional	10	7,5	—
Salas de corretores	Excessivo	50	30	—
Bares (<i>American bar</i>)	Muito	30	25	—
Corredores	—	—	—	0,25
Lojas de departamentos	Nenhum	7,5	5	0,05
Salas de diretoria	Excessivo	50	30	—
Lojas	Considerável	10	7,5	—
Fábricas (geral)	Nenhum	10	7,5	0,10
Farmácias	Nenhum	7,5	5	—
Salas de funerais	Nenhum	10	7,5	—
Garagens	—	—	—	1,0
Hospitais (salas de operação)	Nenhum	—	—	2,0
Hospitais (quartos privativos)	Nenhum	30	25	0,33
Hospitais (quartos comuns)	Nenhum	20	15	—
Cozinhas de restaurantes	—	—	—	4,0
Cozinhas residenciais	—	—	—	2,0
Laboratórios	Algum	20	15	—
Salas de reuniões	Excessivo	50	30	1,25
Escritórios gerais	Algum	15	10	—
Escritórios privativos	Nenhum	25	15	0,25
Escritórios privativos	Considerável	30	25	0,25
Restaurantes (cafeterias)	Considerável	12	10	—
Restaurantes (salas de jantar)	Considerável	15	12	—
Salas de aula	Nenhum	—	—	—
Lojinhas	Nenhum	10	7,5	—
Teatros	Nenhum	7,5	5	—
Teatros	Algum	15	10	—
Toaletes	—	—	—	2,0
Quartos de hotéis	Muito	30	25	0,33

[Carrier Air Conditioning Co., *Handbook of air conditioning system design* (22)]

ponto considerado, estando prevista a remoção de odores corporais, nível de atividade do indivíduo, concentração de gás carbônico e disponibilidade de oxigênio.

A vazão de ar requerida para uma dada quantidade de calor sensível liberado a fim de manter uma dada temperatura no ambiente é dada pelas equações que seguem, já tendo sido mencionada a primeira como Eq. (5.1):

$$Q = \frac{\text{calor sensível total (Btu/h)}}{1,08 \times \text{aumento de temperatura (°F)}} \text{ pés}^3/\text{min.} \quad (5.16)$$

No caso de calor latente,

$$Q = \frac{\text{calor latente total (Btu/h)}}{0,67 \text{ grãos/libra de diferença}} \text{ pés}^3/\text{min.} \quad (5.17)$$

TABELA 5.5 Trocas de ar por hora

Situação	Trocas de ar por hora*
Auditórios e salas de reuniões**	4-6
Padarias	20-30
Bancos	2-4
Salões de banquete	6-10
Salão de bilhar	6-8
Casas de caldeiras	20-30
Lanchonetes	10-12
Cantinas	4-6
Igrejas	0,5-1
Cinemas e Teatros**	10-15
Salões de clubes	8-10
Salões de dança**	6-8
Salões de tingimento de tecidos	20-30
Salas de máquinas	20-30
Oficinas	6-10
Fundições	20-30
Salas de fornos	30-60
Garagens	6-8
Hospitais, geral	4-6
Cozinhas	10-20
Laboratórios	4-6
Lavatórios	10-15
Lavanderias	20-30
Escritórios**	4-6
Salões de pintura	30-60
Câmara escura (fotografia)	10-15
Casa de carnes	6-10
Restaurantes	6-10
Sala de aula	2-3
Residências	1-2
Piscinas internas	20-30
Cabines de passageiros (navios)	10-20
Compartimentos de bagagens (navios)	6-10
Compartimentos de alimentos (navios)	10-30

*As trocas de ar até oito por hora são suficientes para remover contaminantes emitidos por ocupantes. O limite superior da faixa é recomendado para remover calor e vapor em zonas temperadas. Em climas quentes, sugere-se o dobro dos valores da tabela

**Se ocorrer o uso de fumo, deve-se usar o dobro do valor da tabela [G. Woods, *Woods practical guide to fan engineering* (23)]

TABELA 5.6 Vazão de ventilação geral por área do piso

Ventilação		Tipo de local ou processo
pés ³ /min/pé ²	pés ³ /h/pé ²	
1	60	Indústrias em geral que não contenham fontes emissoras de poluentes tóxicos, irritantes, inflamáveis ou explosivos
1	60	Armazéns ventilados
1,5	90	Ginásios e salões de dança
3	180	Salas de banho e toaletes
2	120	Cargas de baterias
3	180	Pequenas oficinas mecânicas
1,5	90	Grandes salas de jantar
2	120	Pequenas salas de jantar
2	120	Cozinhas espaçosas
4	240	Cozinhas de restaurantes (médias)
10	600	Pequenas cozinhas
50	3 000	Cabines para solda a arco voltaico
100	6 000	Cabines para jateamento de arca e <i>spray</i> metálico (o operador deve usar proteção respiratória adequada)

[Patty, F., *Industrial hygiene and toxicology*, 2.^a edição, Interscience Publishers, 1967]

TABELA 5.7 Trocas de ar para ventilação do ambiente

Tipo de sala ou ocupação	Trocas de ar por hora		Minutos/troca	
	Baixa	Alta	Lenta	Rápida
Auditórios e salas de reuniões	4	30	15	2
Padarias e confeitarias	10	60	6	1
Salas de máquinas e caldeiras	4	60	15	1
Corredores e <i>halls</i> de espera	1	10	60	6
Docerias	5	30	12	2
Fundições (ferrosos)	4	30	15	2
Fundições (não-ferrosos)	6	60	10	1
Garagens e estacionamentos	3	20	20	3
Oficinas mecânicas	6	30	10	2
Hospitais em geral	2	15	30	4
Cozinhas comerciais	10	60	6	1
Laboratórios	6	30	10	2
Lavanderias com passagem de roupa com tábuas a vapor	10	120	6	0,5
Armazéns	2	15	30	4
Pequenas oficinas	3	20	20	3
Escritórios	2	30	30	2
Restaurantes e lanchonetes	4	30	15	2
Residências	1	6	60	10
Lojas	6	20	10	3
Salas de fumar	10	60	6	1
Banheiros e lavabos	10	30	6	2
Salas de espera	3	10	20	6
Bares (fechados)	3	10	20	6
Lojas de ferragens	1	6	60	10

[Patty, F., *Industrial Hygiene and toxicology*, 2.^a edição, Interscience Publishers, 1967]

TABELA 5.8 Requisitos de ar externo limpo para a diluição de odores corporais

Pés ³ /pessoa	Suprimento de ar limpo (pés ³ /min por pessoa)*	Tipo de local, ou de ocupante e equipamento de ventilação**
100	29	Escola de crianças, higiene pessoal média
100	25	Adultos sedentários
100	22	Escola de crianças, ótima higiene pessoal
200	38	Escola de crianças, más condições de higiene
200	23	Trabalhadores
200	21	Escola de crianças, higiene pessoal média
200	18	Escola de crianças, higiene pessoal boa
200	16	Adultos sedentários
200	12	Adultos sedentários; ar lavado por umidificador centrífugo <i>spray</i>
200	< 4	Adultos sedentários; verão; ar esfriado e secado por torre de <i>spray</i> ; troca diária da água
300	17	Escola de crianças
300	12	Adultos sedentários
500	11	Escola de crianças
500	7	Adultos sedentários

*Dados baseados em experimentos com pessoas

**Ar sem limpeza, com exceção dos casos mencionados

[Patty, F., *Industrial hygiene and toxicology*, 2.^a edição, Interscience Publishers, 1967]

TABELA 5.9 Quantidades recomendadas de ar externo por pessoa

Pés ³ /min/pessoa	Tipo de espaço ou ocupação*
5-10	Locais de grande pé direito, tais como bancos, auditórios, igrejas, lojas de departamento, teatros; salas com proibição de fumo
10-15	Apartamentos, barbearias, salões de beleza, salas de hotéis; salas com pouco fumo
15-20	Lanchonetes, cafeterias, casas de chá, escritórios, quartos de hospitais, salas de jantar públicas, restaurantes; salas com fumo moderado
20-30	Escritórios particulares, boates; salas com fumo abundante
30-60	Sala de conferência, boates; salas cheias de pessoas fumando abundantemente
5-7,5	Para não-fumantes**
25-40	Para fumantes**

*Não se prevê uso de equipamento de limpeza de ar. O espaço não deve ser inferior a 150 pés³/pessoa ou 15 pés²/pessoa

**O limite inferior é o mínimo e o limite superior é o recomendado

[Patty, F., *Industrial hygiene and toxicology*, 2.^a edição, Interscience Publishers, 1967]

Quando se conhece a quantidade total de vapor evaporado,

$$\text{Btu/h} = 1\,000 \times \text{lb vapor/h}, \quad (5.18)$$

e, quando se conhece a quantidade de água liberada,

$$Q = 116,7 \times \frac{\text{lb/h de água liberada como vapor}}{\text{grãos/lb de diferença} \times \rho} \text{ pés}^3/\text{min} \quad (5.19)$$

Atividade	Temperatura efetiva máxima
Trabalho pesado	80 °F
Trabalho moderado	85 °F
Trabalho leve ou repouso	90 °F

Cálculo da carga calórica

É esse um ponto de grande importância no cálculo de sistemas de condicionamento de ar. Seu conhecimento é também importante para o cálculo da vazão de ar de renovação, conforme pôde ser visto nas equações já apresentadas. Trata-se de calcular a quantidade de calor liberada por pessoas, luz solar, motores, processos quentes e outras fontes de calor e umidade, e que será aqui abordado de forma resumida.

PESSOAS

Pessoas liberam calor sensível e calor latente. As Tabs. 5.11 e 5.12 fornecem valores do calor médio liberado em função da atividade exercida, onde ρ é a densidade do ar (lb/pé³).

O termo grãos por libra de diferença é tirado da carta psicrométrica, e representa a diferença de umidade entre o ar externo e o ar de projeto (ar nas condições admitidas como finais no ambiente). Vale lembrar fato de, normalmente, ser o calor sensível muito maior que o latente, e de serem ambos absorvidos simultaneamente. Isso faz com que, em casos de ambos existirem concomitantemente, o projeto necessite ser feito com base no maior valor obtido da vazão (e não a soma).

No sopro de ar sobre trabalhadores para dissipar calor (aumenta a evaporação e a convecção) é válido utilizar para temperaturas do ar (bulbo seco e úmido) inferiores a 95 °F (para maior eficiência, a temperatura deve ser inferior a 80 °F). As velocidades de sopro aceitáveis estão na Tab. 5.10.

TABELA 5.10 Movimentação de ar aceitável sobre o trabalhador

Exposição contínua	Velocidade do ar (pés/min)
Local com ar condicionado	50-75
Local de trabalho fixo com ventilação geral ou sopro sobre o local	75-125 (sentado) 100-200 (em pé)
<i>Exposição intermitente: sopro ou local de descanso</i>	
Pouca carga calórica e pouca atividade	1 000-2 000
Moderada carga calórica e atividade moderada	2 000-3 000
Forte carga calórica e grande atividade	3 000-4 000

[ACGIH, *Industrial ventilation* (3)]

TABELA 5.11 Taxa de dissipação de calor (Btu/h)

Atividades	Calor metabólico	Calor sensível	Calor latente
Basal	291	145	145
Sentado, em repouso	384	225	159
Sentado, lendo em voz alta	420	225	195
De pé, em repouso	431	225	206
Sentado, costurando (à mão)	441	225	216
Tricotando (23 pontos/min)	462	225	237
Vestindo-se ou despindo-se	468	225	243
Alfaiate	482	225	257
Cantando	486	225	261
Empregado de escritório (atividade moderada)	490	225	265
De pé, em trabalho leve	549	225	324
Datilografando rapidamente	558	225	333
Passando a ferro (ferro de 2,5 kg)	570	225	345
Lavando pratos	600	225	375
Balconista de pé, em atividade moderada	600	225	375
Encadernação de livros	626	225	401
Confeção de calçados	661	225	436
Varrendo o chão (38 varridas/min)	672	229	443
Jogando bilhar	680	230	450
Andando, 2 milhas/h, ou dançando (leve)	761	250	511
Trabalho leve, em bancada	862	277	585
Pintura de móveis	876	280	596
Carpetador	954	307	647
Garçom	1 000	325	675
Levantando pesos	1 041	335	708
Andando, 3 milhas/h	1 050	339	711
Andando, 4 milhas/h, dançando (ativo), patinando	1 390	452	938
Descendo escadas	1 444	467	977
Pedreiro	1 490	485	1 005
Jogando boliche	1 500	490	1 010
Serrando madeira	1 800	590	1 210
Nadando	1 986	—	—
Correndo, 5,3 milhas/h	2 268	—	—
Andando, 5 milhas/h	2 330	—	—
Andando rápido, 5,3 milhas/h	2 580	—	—
Subindo escada	4 365	—	—
Máximo esforço (pessoas diferentes)	3 000-4 800	—	—

[R. Jorgensen, *Fan engineering* (5)]

TABELA 5.12 Calor liberado por pessoa (Btu/h)

Atividade	Aplicação típica	M (adultos homens)	Temperatura de bulbo seco da sala (°F)											
			82		80		78		75		70			
			C_s	C_{lar}	C_s	C_{lar}	C_s	C_{lar}	C_s	C_{lar}	C_s	C_{lar}		
Sentado, em repouso	Teatro, escola	390	175	175	195	155	210	140	230	120	260	90		
Sentado, trabalho leve	Escola secundária	450	180	220	195	205	215	185	240	160	275	125		
Empregado de escritório	Escritório, hotel, apartamento, universidades	475	180	270	200	250	215	235	245	205	285	165		
De pé, andando vagarosamente	Lojas	550	180	270	200	250	215	235	245	205	285	165		
Andando; sentado	Lojas	550	180	320	200	300	220	280	255	245	290	210		
De pé, andando vagarosamente	Bancos	550	180	320	200	300	220	280	255	245	290	210		
Trabalho sedentário	Restaurantes*	500	190	360	220	330	240	310	280	270	320	230		
Trabalho leve em bancada	Fábricas (trabalhos leves)	800	190	560	220	530	245	505	295	455	365	385		
Dancando moderadamente	Salão de danças	900	220	630	245	605	275	575	325	525	400	450		
Andando, 3 milhas/h	Fábricas (trabalho pesado)	1 000	270	730	300	700	330	670	380	620	460	540		
Trabalho muito pesado	Fábricas (jogando boliche**)	1 500	450	1 000	465	985	485	965	525	925	605	845		

M, taxa metabólica; C_s , calor sensível; C_{lar} , calor latente; M' , taxa metabólica corrigida, que é a taxa metabólica a ser aplicada a um grupo de pessoas de composição típica, com base na:

taxa metabólica de mulher adulta = taxa metabólica de homem adulto \times 0,85,
taxa metabólica de crianças = taxa metabólica de homem adulto \times 0,75.

*Cerca de 60 Btu/refeição/indivíduo (30 latente e 30 sensível)

**Admitiu-se 1 pessoa/pista (outras sentadas); $M = \text{Btu/h}$ (sentada) e $M = 550$ (em pé)

[Carrier Air Conditioning Co., *Handbook of air conditioning system design* (22)]

CALOR SOLAR

A temperatura interior do ambiente é aumentada por meio de radiação solar transmitida pelas paredes, janelas e telhados. A quantidade de energia radiante absorvida depende da cor das superfícies expostas, e a quantidade transmitida para o interior depende principalmente dos materiais de construção e de sua espessura. O cálculo do efeito da radiação solar no aquecimento de ambientes é complexo e seu conhecimento exato é praticamente impossível,

TABELA 5.13 Ganho de calor pelas paredes* (Btu/h/pé²) — latitude 20° norte ou sul, céu limpo e temperatura interna igual à temperatura externa à sombra

Construção	Espessura (pol)	Leste e oeste	Sudeste e sudoeste**	Sul
Tijolo sólido sem reboco	4½	23	12	2,2
	9	16	10	1,6
	13½	13	7	1,3
Tijolo sólido com reboco de ½ pol	4½	19	10	1,9
	9	15	8	1,5
	13½	12	6	1,2
	18	10	5	1,0
	22½	8	4	0,8
Tijolo furado com reboco de ½ pol	11	10	5	1,1
	15½	8	5	0,9
	20	7	3	0,8
Concreto	6	22	13	2,2
	8	19	10	1,8
	10	16	9	1,6
	16	14	8	1,5
Pedra	12	17	9	1,7
	18	14	7	1,4
	24	11	6	1,2
Madeira (macho e fêmea)	1	17	9	1,7
	1½	14	7	1,4
Folha de asbesto (plana)	¼	31	16	2,9
Folha de asbesto corrugada	—	41	20	3,6
Chapa de aço corrugada	⅓	43	21	2,7
Chapa de aço corrugada e revestida	—	14	8	1,4
Janelas de vidro	—	185	110	39,0
Janelas de vidro com toldo de lona	—	52	31	3,0

*Válido para superfícies escuras. Para tonalidades médias, multiplicar os valores por 0,75. Não usar para cores claras, pois elas se sujam, com o tempo

**Para latitudes sul, use essas figuras para paredes nordeste, noroeste e norte [G. Woods, *Woods practical guide to fan engineering* (23)]

pois, além dos fatores já mencionados, muitos fatores estão envolvidos, tais como velocidade dos ventos, nebulosidade, sombra de árvores, latitude, longitude, altitude e relevo do local. No entanto, com o objetivo de estimar a influência do calor solar, algumas tabelas foram construídas para céu claro, tempo quente, máxima taxa de radiação solar, porcentagem absorvida, porcentagem refletida, defasagem de transmissão, etc. Esses e alguns outros dados estão apresentados nas Tabs. 5.13 a 5.17.

TABELA 5.14 Ganho de calor solar pelo telhado (Btu/h/pé²) – latitude 20° norte ou sul

Forma	Construção		Btu (máximo)
	Material ou posição		
Plana	Asfalto sobre 6 pol de concreto		29
	Asfalto sobre 6 pol de concreto, com revestimento de cortiça (1 pol)		10
	Asfalto sobre 6 pol de concreto, com revestimento de cortiça (2 pol)		6
	Asfalto sobre 6 pol de telha vazada		24
	Asfalto sobre 6 pol de telha vazada com revestimento de cortiça (1 pol)		10
	Asfalto sobre 6 pol de telha vazada com revestimento de cortiça (2 pol)		6
	Asfalto 1 pol de cortiça, 1¼ de prancha, juntas e reboco		7
	Inclinada	Asbesto corrugado	
Asbesto corrugado com forro de madeira (½ pol)		26	
Chapa de aço corrugada		79	
Chapa de aço corrugada, com forro de madeira (1 pol) e feltro		18	
Telhas sobre forro e feltro		18	
Telhas sobre sarrafo		79	
Telhas sobre sarrafo e feltro		36	
Telhas sobre forro sobrepostas		52	
Forro rebocado com espaço acima, até o telhado, de telhas sobre sarrafos		29	
Forro rebocado com espaço acima, até o telhado, de telhas ou ardósia sobre pranchas e feltro		15	
Horizontal ou levemente inclinada	Clarabóia		272
Vertical ou fortemente inclinada*	Luz de teto		
	a) face para leste ou oeste		180
	b) face para sudeste ou sudoeste**		100
	c) face para sul		21

*Com face norte, pode ser desprezada para latitudes norte e, com face sul, para latitudes sul

**Nordeste, noroeste ou norte em latitudes sul

[G. Woods, *Woods practical guide to fan engineering* (23)]

MOTORES ELÉTRICOS E OUTROS EQUIPAMENTOS

O calor fornecido por motores elétricos e por alguns outros equipamentos estão nas Tabs. 5.18 e 5.19. Em muitos outros casos não-tabelados, o calor cedido ao ambiente deve ser calculado a partir dos dados operacionais do equipa-

TABELA 5.15 Duração média da radiação solar, períodos de máxima intensidade — latitude 20° norte ou sul

	Superfície horizontal	Parede leste	Parede sudeste	Parede sul	Parede sudoeste	Parede oeste
Hora de máxima intensidade	12:00	8:00	9:00	12:00	15:00	16:00
Duração média (horas)	14,7	7	6	2,4	6	7

[G. Woods, *Woods practical guide to fan engineering* (23)]

TABELA 5.16 Fatores de correção para latitude

Latitude (graus)	Superfície perpendicular ao Sol	Superfície horizontal	Parede leste ou oeste	Parede sudeste ou sudoeste	Parede sul*
45	1,00	0,89	1,00	1,52	4,84
40	1,00	0,92	1,00	1,38	4,00
35	1,00	0,95	1,00	1,26	3,12
30	1,00	0,97	1,00	1,16	2,24
25	1,00	0,99	1,00	1,07	1,00
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

*Para latitudes sul, use esses valores para paredes nordeste, noroeste e norte

[G. Woods, *Woods practical guide to fan engineering* (23)]

TABELA 5.17 Condições interiores para projeto

Condições	Temperatura efetiva (°F)	Bulbo seco (°F)	Umidade relativa (%)	Velocidade do ar (pés/min)
Ótimas condições para inverno	68	73	42	25
Ótimas condições para verão	71	76	51	25
Condições comuns para inverno	68	76	25	—
Condições não comuns para inverno, aplicações práticas	66	70	50	—
Condições usuais para verão, aplicações práticas	74	80	51	—
Projeto comum para verão, ocupação curta	75	82	49	—
Projeto comum para verão; grande capacidade de pico	72	78	50	—

Correções

Sexo: mulheres, 1,0° a mais na temperatura efetiva

Idade: acima 40 anos, 1,0° a mais na temperatura efetiva

Atividade: fábricas, 60-65; ginásios, 56-60 (inverno, bulbo seco)

Localização: adicionar 1,0° na temperatura efetiva, para cada 5° de latitude abaixo da latitude 40°

[R. Jorgensen, *fan engineering* (5)]

TABELA 5.18 Calor aproximado liberado por motores elétricos (Woods)

Potência do motor (HP)	Btu/h (a toda capacidade)		Btu/h por HP	
	Emissão total	Perdas apenas	Emissão total	Perdas apenas
1/4	1 000	400	4 200	1 700
1/2	1 900	600	3 800	1 250
1	3 400	900	3 400	900
5	15 500	3 000	3 100	600
25	72 500	10 000	2 900	400
100	280 000	30 000	2 800	300

Para outros equipamentos elétricos, considerar 3,4 Btu/h/kW de alimentação [G. Woods, *Woods practical guide to fan engineering* (23)]

TABELA 5.19 Ganho de calor de equipamentos (Btu/h)

Fonte	Ganho de calor total
Luz fluorescente	4,09/W
Luz incandescente	3,41/W
Equipamento movido por motor elétrico dentro do ambiente	2 544/HP de entrada
Equipamento movido por motor elétrico fora do ambiente	2 544/HP de saída
Fogão a gás sem coifa*	500/pés ³ de gás
Fogão a gás com coifa*	100/pés ³ de gás
Fogão elétrico sem coifa*	1,70/W
Fogão elétrico com coifa*	0,55/W
Alimento (prato de comida)*	50/pessoa

*Calor latente, 25-75% do total

mento como, por exemplo, temperatura do equipamento, temperatura e quantidade do efluente, temperatura e quantidade de produtos de combustão, etc.

Nos dados fornecidos e nos exemplos de aplicação resolvidos no fim do capítulo, alguns fatores importantes como quantidade de calor armazenado estão sendo negligenciados, uma vez que sua consideração torna o assunto mais complexo, colocando-o fora do escopo deste manual.

Apenas a título de fornecimento de dados, as Tabs. 5.20 a 5.26, apresentam mais alguns dados de calor cedido por outros equipamentos.

AMBIENTES ADJACENTES

O calor é transmitido de ambientes adjacentes que apresentam um diferencial de temperatura em relação ao ambiente considerado. O calor cedido ou recebido pode ser estimado se são conhecidos o diferencial de temperatura ($T_e - T_i$) (bulbo seco) e o coeficiente total de transmissão de calor (K_{tr}) por,

$$\text{Btu/h} = K_{tr} A (T_e - T_i), \quad (5.20)$$

onde A é a área de troca (pés²) e K_{tr} o coeficiente total de transmissão (Btu/h × pés²).

TABELA S.20 Ganho de calor por equipamentos elétricos de restaurantes sem coifa de exaustão* (Btu/h)

Equipamento	Dimensões, exceto pés e alças (pol)	Tipo de controle	Dados gerais	Máximo	Normal	Sensível	Latente	Total
Cafeteira, 0,5 galão		Manual		2 240	306	900	220	1 120
Aquecedor, 0,5 galão		Manual		306	306	230	90	320
4 caldeiras com tanque de 4,5 galões	20 x 30 x 26h	Autom.	Banho-maria de 2 000 W					
Bule de café, 3 galões	15d x 34h	Manual	Cafeteira de 2 960 W	16 900		4 800	1 200	6 000
Bule de café, 3 galões	12 x 23 oval x 21h	Autom.	Preto	11 900	3 000	2 600	1 700	4 300
Bule de café, 5 galões	18d x 37h	Autom.	Niquelado	15 300	2 600	2 200	1 500	3 700
Máquina de fazer rosas	22 x 22 x 57h	Autom.	Exaustão para fora, motor de 0,5 HP	17 000	3 600	3 400	2 300	5 700
Máquina de ferver ovos	10 x 13 x 25h	Manual	Grande, 550 W	16 000		5 000		5 000
Aquecedor de prato de comida por pé ² de área do topo		Autom.	Pequena, 275 W	3 740		1 200	800	2 000
Aquecedor de comida por pé ² de área do topo		Autom.	Isolado, um aquecedor por panela; pratos aquecidos na base	1 350	500	350	350	700
Frigideira, 11,5 lb de gordura	12d x 14h	Autom.	Idem, sem aquecimento de pratos	1 020	400	200	350	550
Frigideira, 25 lb de gordura	16 x 18 x 12h	Autom.	Área frigar, 12 x 14 pol	8 840	1 100	1 600	2 400	4 000
Chapa de fritar	18 x 18 x 8h	Autom.	Área frigar, 18 x 14 pol	23 800	2 800	3 800	5 700	9 300
Grelha para carne	14 x 14 x 10h	Autom.	Área disponível, 10 x 12 pol	8 000	2 800	3 100	1 700	4 800
Grelha para sanduíches	13 x 14 x 10h	Autom.	Área da grelha, 12 x 12 pol	10 200	1 900	3 900	2 100	6 000
Aquecedor de pão	26 x 17 x 13h	Autom.	Uma gaveta	5 600	1 900	2 700	700	3 400
Torradeira contínua	15 x 15 x 28h	Autom.	Dois fatias de largura, 360 fatias/h	1 500	400	1 100	100	1 200
Torradeira contínua	20 x 15 x 28h	Autom.	Quatro fatias de largura, 720 fatias/h	7 500	5 000	5 100	1 300	6 400
Torradeira "salta-pão"	6 x 11 x 9h	Autom.	Dois fatias	10 200	6 000	6 100	2 600	8 700
Máquina de waffle	12 x 13 x 10h	Autom.	Waffle de 7 pol de diâmetro	4 150	1 000	2 450	450	2 900
				2 480	600	1 100	750	1 850

*Quando tiver coifa de exaustão, multiplique os valores da tabela por 0,5
 [[Carrier Air Conditioning Company, Handbook of air conditioning system design (22)]]

TABELA 5.21 Ganho de calor por equipamentos de restaurante, a gás ou vapor, sem coifa de exaustão* (Btu/h)

Equipamento	Dimensões, exoto pés e alças (pol)	Tipo de controle	Dados gerais	Valores recomendados		
				Máximo	Médio	Sensível Latente Total
Cafeteira de 0,5 galão		Manual	Combinação de cafeteira e aquecedor	3 400	500	1 350 350
Aquecedor de 0,5 galão		Manual	Quatro cafeteiras com tanque de 4,5 galões	500		400 100
Cafeteira grande com tanque	19 x 30 x 26h					
Bule de café, 3 galões	15d x 34h	Autom.	Niquelado	3 200	3 900	7 200 1 800
Bule de café, 3 galões	12 x 23 oval x 21h	Autom.	Niquelado		3 400	2 900 2 900
Bule de café, 5 galões	18d x 37h	Manual	Banho-maria	2 000	4 700	3 900 3 900
Aquecedor de comida por pé ² de área do topo					900	850 450
Frigideira, 15 lb de gordura	12 x 20 x 18h	Autom.	Área de fritagem, 10 x 10	14 250	3 000	4 200 2 800
Frigideira, 28 lb de gordura	15 x 25 x 11h	Autom.	Área de fritagem, 11 x 16 pol	24 000	4 500	7 200 4 800
Grill-queimador no topo, queimador na base	22 x 14 x 17h (superfície de grelha, 1,4 pé ²)	Manual	Isolado, 22 000 Btu/h 15 000 Btu/h	37 000		14 400 3 600
Fogão - topo aberto por pé ² de topo		Manual	Queimadores circulares, 12 000 e 22 000 BTU cada	14 000		4 200 4 200
Fogão - topo fechado por pé ² de topo		Manual	Queimadores circulares 10 000 e 12 000 BTU cada	11 000		3 300 3 300
Torradeira contínua	15 x 15 x 28h	Autom.	Dois fendas de largura, 360 fatias/h	12 000	10 000	7 700 3 300
Bule de café, 3 galões	Aquecido a vapor	Autom.	Preto			2 900 1 900
Bule de café, 3 galões	15d x 34h	Autom.	Niquelado			2 400 1 600
Bule de café, 5 galões	12 x 23 oval x 21h	Autom.	Niquelado			3 400 2 300
Bule de café, 3 galões	18d x 37h	Manual	Preto			3 100 3 100
Bule de café, 3 galões	15d x 34h	Manual	Niquelado			2 600 2 600
Bule de café, 3 galões	12 x 23 oval x 21h	Manual	Niquelado			3 700 3 700
Bule de café, 5 galões	18d x 37h	Autom.	Niquelado			400 500
Aquecedor de alimento por pé ² de topo		Manual				450 1 150
Aquecedor de alimento por pé ² de topo						

*Se houver coifa de exaustão, multiplicar valores por 0,5
[Carrier Air Conditioning Company, Handbook of air conditioning system design (22)]

TABELA 5.22 Ganho de calor -- equipamentos diversos sem coifa de exaustão* (Btu/h)

Equipamento	Tipo de controle	Dados diversos	Valor médio recomendado			
			Taxa máxima	Sensível	Latente	Total
Elétricos						
Secador de cabelos, tipo sopro: 15 A, 115 V ca	Manual	Ventilador de 165 W (de 915 a 1 580 W)	5 370	2 300	400	2 700
Secador de cabelos, tipo capacete: 6,5 A, 115 V ca	Manual	Ventilador de 80 W (de 300 W a 710 W)	2 400	1 870	330	2 200
Máquina de permanente	Manual	60 aquecedores de 25 W cada	5 100	850	150	1 000
Esterilizador e lavador a pressão		11 x 11 x 22 pol		12 000	23 460	35 460
Luminosa de Neon por pé linear de tubo		diâmetro externo, 1/2 pol		30		30
Esterilizador de roupa	Autom.	diâmetro interno, 3/8 pol		60		60
	Autom.	16 x 24 pol		9 600	8 700	18 300
	Autom.	20 x 26 pol		23 300	24 000	47 300
Esterilizador	Autom.	24 x 24 x 36 pol		34 800	21 000	55 800
	Autom.	24 x 24 x 48 pol		41 700	27 000	68 700
	Autom.	24 x 36 x 48 pol		56 200	36 000	92 200
	Autom.	24 x 36 x 60 pol		68 500	45 000	113 500
	Autom.	36 x 42 x 84 pol		161 700	97 500	259 200
	Autom.	42 x 48 x 96 pol		184 000	140 000	324 000
	Autom.	48 x 54 x 96 pol		210 000	180 000	390 000
Esterilizador de água	Autom.	10 galões		4 100	16 500	20 600
	Autom.	15 galões		6 100	24 600	30 700
Esterilizador de instrumentos	Autom.	6 x 8 x 17 pol		2 700	2 400	5 100
	Autom.	9 x 10 x 20 pol		5 100	3 900	9 000
	Autom.	10 x 12 x 22 pol		8 100	5 900	14 000
	Autom.	10 x 12 x 36 pol		10 200	9 400	19 600
	Autom.	12 x 16 x 24 pol		9 200	8 600	17 800
Esterilizador de utensílios	Autom.	16 x 16 x 24 pol		10 600	20 400	31 000
	Autom.	20 x 20 x 24 pol		12 300	25 600	37 900
Esterilizador de ar	Autom.			2 000	4 200	6 200
	Autom.			1 200	2 100	3 300
Raios X para chapas		Consultórios médicos e dentários		Nada	Nada	Nada
Raios X para terapia		Consultar fabricantes				
A gás						
Pequeno bico de Bunsen	Manual	Barril de gás GLP/dia 7:16	1 800	960	240	1 200
Pequeno bico de Bunsen, queimador chato	Manual	7/16", com gás natural	3 000	1 680	420	2 100
Queimador chato	Manual	7/16", com gás natural	3 500	1 960	490	2 450
Queimador chato	Manual	7/16", com gás natural	5 500	3 080	770	3 850
Grande bico de Bunsen	Manual	1 1/2", com gás natural	6 000	3 350	850	4 200
Acendedor de cigarros	Manual	Chama contínua	2 500	900	100	1 000
Sistema de aqueção de cabos						
Cinco capacetes	Autom.		31 000	15 000	4 000	19 000
Dez capacetes	Autom.			21 000	6 000	27 000

*Com coifa de exaustão, multiplicar os valores por 0,5

[Carrier Air Conditioning Company, *Handbook of air conditioning system design* (22)]

Esse mesmo enfoque pode ser utilizado para estimar o ganho de calor pela radiação solar. A Tab. 5.27 fornece valores do coeficiente total de transmissão (K_{tr}) para divisão de ambientes. A Tab. 5.28 fornece dados regionais de projeto.

Tabelas completas de coeficientes de transmissão de calor e de condições climáticas em outros locais podem ser encontrados na referência 5.

Exemplos de aplicação

Exemplo 1. Qual o ganho de calor provocado por 750 pessoas sentadas em um auditório?

Solução. Uma pessoa em repouso libera cerca de 400 Btu/h. Portanto

$$400 \text{ Btu/h} \times 750 \text{ pessoas} = 300\,000 \text{ Btu/h.}$$

TABELA 5.23 Ganho de calor de motores elétricos – operação contínua*

HP**	Eficiência do motor a plena carga (% η)	Localização do equipamento com relação ao ambiente		
		Motor e máquina dentro,	Motor fora e máquina dentro,	Motor dentro e máquina fora.
		$\frac{HP \times 254\ 500}{\% \eta}$	$\frac{HP \times 2\ 545}{\% \eta}$	$\frac{HP \times 2\ 545(100 - \% \eta)}{\% \eta}$
Btu/h				
0,05	40	320	130	190
0,08	49	430	210	220
0,12	55	580	320	260
0,16	60	710	430	280
0,25	64	1 000	640	360
0,33	66	1 290	850	440
0,5	70	1 820	1 280	540
0,75	72	2 680	1 930	750
1	79	3 220	2 540	680
1,5	80	4 770	3 820	950
2	80	6 380	5 100	1 280
3	81	9 450	7 650	1 800
5	82	15 600	12 800	2 800
7,5	85	22 500	19 100	3 400
10	85	30 000	25 500	4 500
15	86	44 500	38 200	6 300
20	87	58 500	51 000	7 500
25	88	72 400	63 600	8 800
30	89	85 800	76 400	9 400
40	89	115 000	102 000	13 000
50	89	143 000	127 000	16 000
60	89	172 000	153 000	19 000
75	90	212 000	191 000	21 000
100	90	284 000	255 000	29 000
125	90	354 000	318 000	36 000
150	91	420 000	382 000	38 000
200	91	560 000	510 000	50 000
250	91	700 000	636 000	64 000

*Para operação intermitente, calcular taxa de uso

**Se o motor trabalha sobrecarregado e a sobrecarga é desconhecida, multiplicar pelos seguintes valores:

Potência (HP)	Máximo fator de serviço					
	0,05-0,12	0,16-0,33	0,5-0,75	1	1,5-2	3-250
CA, aberto	1,4	1,35	1,25	1,25	1,20	1,15
CC, aberto	—	—	—	1,15	1,15	1,15

Em motores fechados não se permite sobrecarga

[Carrier Air Conditioning Company, *Handbook of air conditioning system design* (22)]

TABELA 5.24 Coeficiente de transmissão de calor para tubulações (Btu/h)/(pé linear) (°F de diferença entre o tubo e o ar ambiente)

Diâmetro nominal do tubo (pol)	Água quente (°F)				Vapor (°F)		
	120	150	180	210	5 psig, 227	50 psig, 300	100 psig, 338
	Diferença de temperatura						
	50 °F	80 °F	110 °F	140 °F	157 °F	230 °F	268 °F
1/2	0,46	0,50	0,55	0,58	0,61	0,71	0,76
3/4	0,56	0,61	0,67	0,72	0,75	0,87	0,93
1	0,68	0,74	0,82	0,88	0,92	1,07	1,15
1 1/2	0,85	0,92	1,01	1,09	1,14	1,32	1,43
1 1/2	0,96	1,04	1,15	1,23	1,29	1,49	1,63
2	1,18	1,28	1,41	1,51	1,58	1,84	1,99
2 1/2	1,40	1,53	1,68	1,80	1,88	2,19	2,36
3	1,68	1,83	2,01	2,15	2,26	2,63	2,84
3 1/2	1,90	2,06	2,22	2,43	2,55	2,97	3,22
4	2,12	2,30	2,53	2,72	2,85	3,32	3,59
5	2,58	2,80	3,08	3,30	3,47	4,05	4,39
6	3,04	3,29	3,63	3,89	4,07	4,77	5,16
8	3,88	4,22	4,64	4,96	5,21	6,10	6,61
10	4,76	5,18	5,68	6,09	6,41	7,49	8,12
12	5,59	6,07	6,67	7,15	7,50	8,80	9,53

Tomando-se a temperatura de bulbo seco do ambiente como sendo 70 °F

[Carrier Air Conditioning Company, *Handbook of air conditioning sistem design* (22)]

Exemplo 2. Calcular o máximo ganho de calor solar através de uma parede de chapa de ferro corrugado com os seguintes dados: 100 pés de comprimento, 22 pés de altura, cinco janelas de 10×4 pés² quadrados; e face leste, 30° de latitude norte.

Solução.

$$\begin{aligned} \text{Área da parede, } & 100 \times 22 - (5 \times 10 \times 4) = 2\,000 \text{ pés}^2; \\ \text{área das janelas, } & 10 \times 4 \times 5 = 200 \text{ pés}^2. \end{aligned}$$

O ganho aproximado de chapa de ferro é 43 Btu/h/pé² e do vidro 185 Btu/h/pé² para 20° norte de latitude. Portanto

$$\text{ganho} = 2\,000 \times 43 + 200 \times 185 = 123\,000 \text{ Btu/h.}$$

Exemplo 3. Calcular a ventilação requerida para a instalação seguinte. Local, 30° norte de latitude; tamanho, 100 pés \times 50 pés \times 20 pés; construção, paredes de até 6 pés de tijolo, com 9 pol de espessura, e o restante de asbesto corrugado; cinco janelas de 10×4 nas paredes maiores e três nas paredes menores; telhados de asbesto corrugado (chapas de 1/2 pol); ocupantes, 100 pessoas sentadas executando trabalho leve; fontes de calor, 25 motores elétricos de 1 HP; calor solar, as paredes maiores dão face para leste e oeste.

TABELA 5.25 Coeficientes de transmissão de calor para tubos isolados (Btu/h)/(pé linear) ($^{\circ}\text{F}$ de diferença entre o tubo e o ambiente)

Diâmetro do duto de ferro (pol)	85% de isolamento (magnésia)		
	1 pol de espessura	1½ pol de espessura	2 pol de espessura
1/2	0,16	0,14	0,12
3/4	0,18	0,15	0,13
1	0,20	0,17	0,15
1¼	0,24	0,20	0,17
1½	0,26	0,21	0,18
2	0,30	0,24	0,21
2½	0,35	0,27	0,24
3	0,40	0,32	0,27
3½	0,45	0,35	0,30
4	0,49	0,38	0,32
5	0,59	0,45	0,38
6	0,68	0,52	0,43
8	0,85	0,65	0,53
10	1,04	0,78	0,64
12	1,22	0,90	0,73

Esses valores são para dutos retos e não se consideram as emendas. Para outros isolantes, multiplique os valores pelos seguintes fatores:

Material	Fator
Asbestos corrugados	
4 dobras/pol	1,36
6 dobras/pol	1,23
8 dobras/pol	1,19
Asbestos laminados	0,98
Lã de vidro	1,00
Sílica diatomácea	1,36
Fibra de asbestos marrom	0,88

[Carrier Air Conditioning Company, *Handbook of air conditioning system design* (22)]

TABELA 5.26 Coeficientes de transmissão de calor para tanques não-isolados – ganho de calor sensível (Btu/h)/(pé²) ($^{\circ}\text{F}$ de diferença entre o líquido e o ambiente)

Construção	Metálico								Madeira, 2½ pol de espessura				Concreto, 6 pol de espessura			
	Pintado				Brilhante				Pintado ou não				Pintado ou não			
	ΔT ($^{\circ}\text{F}$)				ΔT ($^{\circ}\text{F}$)				ΔT ($^{\circ}\text{F}$)				ΔT ($^{\circ}\text{F}$)			
	50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200
Vertical (lados)	1,8	2,0	2,3	2,6	1,3	1,7	1,6	1,7	0,37	0,37	0,37	0,37	0,91	0,93	0,96	0,97
Topo	2,1	2,4	2,7	2,9	1,6	1,4	1,9	2,1	0,38	0,38	0,38	0,38	0,99	1,0	1,0	1,1
Base	1,5	1,7	2,0	2,2	0,97	1,1	1,3	1,4	0,35	0,36	0,36	0,36	0,83	0,86	0,88	0,90

ΔT é a diferença de temperatura

[Carrier Air Conditioning Company, *Handbook of air conditioning system design* (22)]

TABELA 5.27 Coeficiente de transmissão (K_{tr}) para divisões (Btu/h · pé² · °F)

Divisão		Acabamento						Espessura do reboco (pol)	
		K_{tr}	Um lado			Dois lados			
			NP	SP	LWP	NP	SP		LWP
			0,00	0,20 pol	0,64 pol	0,00	0,20 pol	0,64 pol	
<i>Armação</i>									
Ripas de gesso	3/8 pol	0,32	0,60	0,56	0,50	0,34	0,32	0,28	1/2
Ripas de madeira	1/4 pol	0,30	—	0,57	—	—	0,32	—	1/2
Chapa isolante	1/2 pol	1,43	0,36	0,35	—	0,19	0,19	—	1/2
Ripas metálicas	—	—	—	0,67	0,55	—	0,39	0,31	3/4
Madeira compensada	1/4 pol	0,31	0,60	—	—	0,34	—	—	—
Madeira compensada	3/8 pol	0,47	0,55	—	—	0,31	—	—	—
Madeira compensada	1/2 pol	0,63	0,50	—	—	0,28	—	—	—
Painéis de madeira	3/4 pol	0,94	0,43	—	—	0,24	—	—	—
Painel metálico	—	—	0,74	—	—	0,43	—	—	—
<i>Alvenaria</i>									
Tijolo comum	4 pol	0,80	0,46	0,44	0,39	0,46	0,42	0,34	5/8
Bloco de concreto	4 pol	0,71	0,48	0,46	0,40	0,48	0,43	0,35	5/8
Bloco de concreto	8 pol	1,11	0,40	0,39	0,35	0,40	0,37	0,31	5/8
Bloco de concreto	12 pol	1,28	0,38	0,36	0,33	0,38	0,35	0,29	5/8
Bloco de cinza prensada	3 pol	0,86	0,45	0,43	0,38	0,45	0,41	0,33	5/8
Bloco de cinza prensada	4 pol	1,11	0,41	0,39	0,35	0,41	0,37	0,31	5/8
Bloco de cinza prensada	8 pol	1,72	0,32	0,31	0,29	0,32	0,30	0,26	5/8
Bloco de cinza prensada	12 pol	1,89	0,31	0,30	0,27	0,31	0,29	0,25	5/8
Blocos leves	3 pol	1,27	0,38	0,36	0,33	0,38	0,35	0,30	5/8
Blocos leves	4 pol	1,50	0,35	0,34	0,31	0,35	0,32	0,27	5/8
Blocos leves	8 pol	2,00	0,30	0,29	0,27	0,30	0,28	0,24	5/8
Blocos leves	12 pol	2,27	0,28	0,27	0,25	0,28	0,26	0,23	5/8
Elemento vazado de barro	3 pol	0,80	0,46	0,44	0,39	0,46	0,42	0,34	5/8
Elemento vazado de barro	4 pol	1,11	0,41	0,39	0,35	0,41	0,37	0,31	5/8
Elemento vazado de barro	6 pol	1,52	0,35	0,33	0,31	0,35	0,32	0,27	5/8
Elemento vazado de barro	8 pol	1,85	0,31	0,30	0,28	0,31	0,29	0,25	5/8
Elemento vazado de gesso	3 pol	1,35	0,37	0,35	0,32	0,37	0,34	0,29	5/8
Elemento vazado de gesso	4 pol	1,67	0,33	0,32	0,29	0,33	0,31	0,26	5/8

Considera-se o ar parado dos dois lados

NP, sem reboco; SP, reboco de areia; LWP, reboco leve

TABELA 5.28 Condições climáticas

Estação	Cidade ou aeroporto	Elevação (pés)	Inverno				Verão				
			Baixo	T_{hs}		T_{hv}		T_{ho}		5%	
				99%	97,5%	1%	2,5%	1%	2,5%		
América do Sul											
<i>Argentina</i>											
	Buenos Aires	89	27	32	34	91	89	86	77	76	75
	Córdoba	1 388	21	28	32	100	96	93	76	75	74
	Tucumán	1 401	24	32	36	102	99	96	76	75	74
<i>Bolívia</i>											
	La Paz	12 001	28	31	33	71	69	68	58	57	56
<i>Brasil</i>											
	Belém	42	67	70	71	90	89	87	80	79	78
	B. Horizonte	3 002	42	47	50	86	84	83	76	75	75
	Brasília	3 442	46	49	51	89	88	86	76	75	75
	Curitiba	3 114	28	34	37	86	84	82	75	74	74
	Fortaleza	89	66	69	70	91	90	89	79	78	78
	Porto Alegre	33	32	37	40	95	92	89	76	76	75
	Recife	97	67	69	70	88	87	86	78	77	77
	Rio de Janeiro	201	56	58	60	94	92	90	80	79	78
	Salvador	154	65	67	68	88	87	86	79	79	78
	São Paulo	2 608	36	42	46	86	84	82	75	74	74
<i>Chile</i>											
	Punta Arenas	26	22	25	27	68	66	64	56	55	54
	Santiago	1 706	27	32	35	90	89	88	71	70	69
	Valparaíso	135	39	43	46	81	79	77	67	66	65
<i>Colômbia</i>											
	Barranquilla	44	66	70	72	95	94	93	83	82	82
	Bogotá	8 406	42	45	46	72	70	69	60	59	58
	Cali	3 189	53	57	58	84	82	79	70	69	68
	Medellin	4 650	48	53	55	87	85	84	73	72	72
<i>Equador</i>											
	Guayaquil	20	61	64	65	92	91	89	80	80	79
	Quito	9 446	30	36	39	73	72	71	63	62	62
<i>Guiana Francesa</i>											
	Caïena	20	69	71	72	92	91	90	83	83	82
<i>Guiana</i>											
	Georgetown	6	70	72	73	89	88	87	80	79	79
<i>Paraguai</i>											
	Assunción	456	35	43	46	100	98	96	81	81	80
<i>Peru</i>											
	Lima	394	51	53	55	86	85	84	76	75	74
<i>Suriname</i>											
	Paramaribo	12	66	68	70	93	92	90	82	82	81
<i>Uruguai</i>											
	Montevideo	72	34	37	39	90	88	85	73	72	71
<i>Venezuela</i>											
	Caracas	3 418	49	52	54	84	83	81	70	69	69
	Maracaibo	20	69	72	73	97	96	95	84	83	83

TABELA 5.28 (Continuação)

Estação	Cidade ou aeroporto	Elevação (pés)	Inverno				Verão				
			Baixo	T_{hs}		T_{hs}		T_{hs}			
				99%	97,5%	1%	2,5%	5%	1%	2,5%	5%
América do Norte											
<i>México</i>											
	Cidade do México	7 575	33	37	39	83	31	79	61	60	59
	Guadalajara	5 105	35	39	42	93	91	89	68	67	66
	Monterrey	1 732	31	38	41	98	95	93	79	78	77
	Vera Cruz	184	55	60	62	91	89	88	83	83	82
	Mérida	72	56	59	61	97	95	94	80	79	77
América Central											
<i>Honduras Britânicas</i>											
	Belize	17	55	60	62	90	90	89	82	82	81
<i>El Salvador</i>											
	San Salvador	2 238	51	54	56	98	96	95	77	76	75
<i>Guatemala</i>											
	Guatemala	4 855	45	48	51	83	82	81	69	68	67
<i>Honduras</i>											
	Tegucigalpa	3 094	44	47	50	89	87	85	73	72	71
<i>Nicarágua</i>											
	Manágua	135	62	65	67	94	93	92	81	80	79
<i>Panamá e zona do Canal</i>											
	Panamá	21	69	72	73	93	92	91	81	81	80
Ilhas do Atlântico											
<i>Baamas</i>											
	Nassau	11	55	61	63	90	89	88	80	80	79
<i>Bermudas</i>											
	Kindley AFB	129	47	53	55	87	86	85	79	78	78
<i>Cuba</i>											
	Baía Guantánamo	21	60	64	66	94	93	92	82	81	80
	Havana	80	54	59	62	92	91	89	81	81	80
<i>República Dominicana</i>											
	Santo Domingo	57	61	63	65	92	90	88	81	80	80
<i>Groenlândia</i>											
	Nassarssuaq	85	-23	-12	-8	66	63	61	56	54	52
<i>Haiti</i>											
	Port-au-Prince	121	63	65	67	97	95	93	82	81	80
<i>Islândia</i>											
	Reykjavik	59	8	14	17	59	58	56	54	53	53

TABELA 5.28 (Continuação)

Estação		Inverno				Verão				
Cidade ou aeroporto	Elevação (pés)	Baixo	T_{ba}		T_{ba}		T_{hu}			
			99%	97,5%	1%	2,5%	5%	1%		2,5%
América do Sul										
<i>Martínica</i>										
Fort de France	13	62	64	66	90	89	88	81	81	80
<i>Porto Rico</i>										
San Juan	82	65	67	68	89	88	87	81	80	79
<i>Trinidad</i>										
Port of Spain	67	61	64	66	91	90	89	80	80	79

[R. Jorgensen, *Fan engineering* (5)]

Solução. Uma vez que a hora mais quente é perto das 16 h, calcular-se-á o ganho solar pelo telhado e pela face oeste:

área da parede (tijolo) = $100 \times 6 = 600$ pés;

área da parede (asbesto) = $100 \times 14 - 10 \times 4 \times 5 = 1\,200$ pés²;

área das janelas = $10 \times 4 \times 5 = 200$ pés²;

área do telhado = $100 \times 50 = 5\,000$ pés².

De acordo com as tabelas do texto, teremos, de forma aproximada,

ganho solar = $600 \times 16 + 1\,200 \times 41 + 200 \times 185 + 5\,000 \times 26$;

ganho solar = 225×800 Btu/h;

ganho pelas pessoas = $100 \times 600 = 60\,000$ Btu/h;

ganho pelos motores = $25 \times 3\,400 = 85\,000$ Btu/h;

ganho total = $370\,800$ Btu/h.

Admitindo que a temperatura interna possa exceder em 5 °F a externa, a taxa de ventilação será

$$\text{taxa de ventilação} = \frac{370\,800}{5 \times 1,08} = 68\,667 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

REPOSIÇÃO DE AR AMBIENTE E RECIRCULAÇÃO

Esta seção diz respeito à reposição do ar retirado do ambiente por meio de sistemas de ventilação exaustora local e processos de combustão, quando as quantidades retiradas são muito grandes em relação ao tamanho do ambiente. O ar repostado, que servirá também como ventilação geral do ambiente, será recolocado em quantidades próximas ao ar retirado, sendo a diferença função das necessidades de projeto, devendo garantir a operação adequada de sistemas de exaustão e de chaminés, a ausência de correntes cruzadas intensas, a ausência de sopro de ar frio sobre os trabalhadores e a ausência de diferencial de pressão nas portas.

O ar de reposição deve ser tomado em locais distantes de fontes de contaminação (chaminés, etc.) e introduzido no ambiente (65 a 80 °F) a alturas inferiores a 10 pés, a fim de possibilitar inicialmente seu uso pelos ocupantes do ambiente.

Quando necessário, o aquecimento do ar é feito por trocadores de calor (água quente, vapor, gás ou óleo) ou por aquecedores de chama direta (a concentração de monóxido de carbono deve ser inferior a 10 ppm). Em casos de regiões frias, onde o aquecimento é necessário, é vantajosa, sob o ponto de vista econômico, a recirculação do ar. Essa recirculação é aceitável apenas quando o ar retirado do ambiente não é contaminado por substâncias tóxicas, pois, caso contrário, elas seriam reintroduzidas no ambiente, e a utilização de equipamentos de controle para a coleta dos contaminantes, por si só, não assegura em muitos casos sua adequada eliminação ou redução a concentrações não-perigosas.

No caso de alguns poluentes inertes, a recirculação pode ser feita desde que o ar seja passado por um equipamento de controle adequado, bem operado e bem mantido. Em nenhuma circunstância a concentração do poluente no ar recirculado deve exceder 20% do limite de tolerância (TLV).

VENTILAÇÃO GERAL DILUIDORA

INTRODUÇÃO

A ventilação geral diluidora é o método de insuflar ar em um ambiente ocupacional, de exaurir ar desse ambiente, ou ambos, a fim de promover uma redução na concentração de poluentes nocivos. Essa redução ocorre, uma vez que, ao introduzirmos ar limpo, ou não-poluído, em um ambiente contendo uma certa massa de um determinado poluente, faremos que essa massa seja dispersada ou diluída em um volume maior de ar, reduzindo, portanto, a concentração desses poluentes. A primeira observação a ser feita é a de que esse método de ventilação não impede a emissão dos poluentes para o ambiente de trabalho, mas simplesmente dilui esses poluentes.

A alternativa a esse tipo de ventilação é a ventilação local exaustora (será vista em próximo capítulo), que capta os poluentes junto à fonte de emissão antes que sejam emitidos ao ambiente ocupacional. Este último método é sempre preferível à ventilação geral diluidora, especialmente quando o objetivo do sistema de ventilação é a proteção da saúde do trabalhador.

Em casos onde não é possível ou não é viável a utilização de ventilação local exaustora, a ventilação geral diluidora pode ser usada. Os objetivos de um sistema de ventilação geral diluidora podem ser:

proteção da saúde do trabalhador — reduzindo a concentração de poluentes nocivos abaixo de um certo limite de tolerância;

segurança do trabalhador — reduzindo a concentração de poluentes explosivos ou inflamáveis abaixo dos limites de explosividade e inflamabilidade;

conforto e eficiência do trabalhador — pela manutenção da temperatura e da umidade do ar do ambiente;

proteção de materiais ou equipamentos — mantendo condições atmosféricas adequadas (impostas por motivos tecnológicos).

UTILIZAÇÃO DE VENTILAÇÃO GERAL DILUIDORA

A aplicação com sucesso da ventilação geral diluidora depende das seguintes condições:

- o poluente gerado não deve estar presente em quantidade que excede à que pode ser diluída com um adequado volume de ar;
- a distância entre os trabalhadores e o ponto de geração do poluente deve ser suficiente para assegurar que os trabalhadores não estarão expostos a concentrações médias superiores aos TLV;
- a toxicidade do poluente deve ser baixa (deve ter um alto TLV);
- o poluente deve ser gerado numa quantidade razoavelmente uniforme.

A ventilação geral diluidora, além de não interferir com as operações e processos industriais, é mais vantajosa que a ventilação local exaustora, nos locais de trabalho sujeitos a modificações constantes, e quando as fontes geradoras de poluentes se encontrarem distribuídas por local de trabalho.

A ventilação geral diluidora pode não ser vantajosa, pelo custo de operação elevado, sobretudo quando há necessidade de aquecimento do ar, nos meses de inverno; contudo seu custo de instalação é relativamente baixo quando comparado com o da ventilação local exaustora. É conveniente a instalação de sistemas de ventilação geral diluidora quando há interesse na movimentação de grandes volumes de ar na estação quente.

Diversas razões levam à não-utilização freqüente da ventilação geral diluidora para poeiras e fumos. A quantidade de material gerado é usualmente muito grande, e são difíceis de se obter dados seguros sobre taxa de geração de poeiras e fumos. Além disso, o material pode ser muito tóxico, requerendo, portanto, uma excessiva quantidade de ar de diluição.

COMPORTAMENTO DE GASES E VAPORES

A ação da gravidade sobre um volume de gás ou vapor é determinada pelo peso médio de todas moléculas gasosas contidas na mistura, e não simplesmente pelas moléculas do gás ou vapor. Além disso, as misturas moleculares são permanentes, não havendo separação espontânea das moléculas mais pesadas das mais leves. A relação de massas específicas com significado em qualquer sedimentação é

$$\begin{aligned} & \frac{\text{massa específica do ar e vapor}}{\text{massa específica do ar}} \\ \text{e não} & \\ & \frac{\text{massa específica do vapor puro}}{\text{massa específica do ar}} \\ \text{ou} & \\ & \frac{\text{peso molecular do vapor puro}}{\text{peso molecular do ar}} \end{aligned}$$

A concentração máxima possível que pode ser atingida por qualquer vapor está limitada pela pressão de vapor do solvente na determinada temperatura. Sendo k a concentração porcentual máxima e p_{vap} a pressão de vapor do líquido

em mm Hg, então

$$k = \frac{P_{vap}}{760} \times 100. \quad (5.21)$$

O peso molecular médio de uma mistura vapor/ar é média ponderada de acordo com a porcentagem. Sendo o peso molecular do ar 29, temos

$$P_{mol\ med} = \frac{kP_{mol}(vapor) + (100 - k)29}{100}. \quad (5.22)$$

Esse peso molecular médio, dividido pelo peso molecular do ar, representa a densidade da mistura.

Na Tab. 5.29, fornecida por Hemeon, estão algumas densidades de mistura de ar com solventes orgânicos comuns em conjunto com a relação erroneamente utilizada. Exceto em ocorrências acidentais, normalmente não são encontradas, nas indústrias, concentrações próximas às máximas citadas. Concentrações da ordem de 0,1 a 0,5% em volume podem ser tomadas como máximas encontradas normalmente em trabalhos de ventilação.

TABELA 5.29 Densidade de misturas solvente/ar

Substância	Pressão de vapor a 20 °C (mm Hg)	Densidade da mistura	$\frac{P_{mol} \text{ do solvente}}{P_{mol} \text{ do ar}}$
Acetona	184,8	1,24	2,0
Benzeno	74,2	1,16	2,7
N-Butanol	6,3	1,01	2,6
N-Butilacetato	10,0	1,04	4,0
Sulfeto de carbono	297,0	1,60	2,6
Clorofórmio	160,0	1,65	4,1
Tetracloro de carbono	92,0	1,52	5,3
Éter dicloroetilico	1,2	1,01	4,9
Éter etílico	430,0	1,88	2,6
Álcool etílico	43,0	1,03	1,6
Dicloroetileno	63,0	1,20	3,4
Álcool metílico	92,0	1,01	1,1
Metilcellosolve	9,5	1,02	2,6
Monoclorobenzeno	8,8	1,03	3,9
N-Hexano	119,0	1,31	3,0
Tricloroetileno	60,0	1,28	4,5
Tolueno	22,0	1,06	3,2
O-Xileno	10,1	1,04	3,7

TAXA DE VENTILAÇÃO

Entende-se por taxa de ventilação a vazão de ar que o sistema de ventilação geral diluidora introduz ou retira de um ambiente. É usualmente dada em m³/min ou pé³/min. Quando, em um ambiente de volume V, um sistema de ventilação geral diluidora faz atravessar um volume de ar igual ao volume do ambiente (V), diz-se que ocorre uma troca de ar nesse ambiente, ou seja,

$$\text{número de trocas de ar/min} = \frac{\text{taxa de ventilação (m}^3\text{/min)}}{\text{volume do salão (m}^3\text{)}}. \quad (5.23)$$

O número de trocas de um ambiente é dado, portanto, por unidade de tempo, ou seja, por minuto ou hora.

Muitas vezes, em ventilação geral diluidora e especialmente em ventilação para conforto térmico, os requisitos ou recomendações de vazão são dadas em número de trocas de ar por minuto. O cálculo da taxa de ventilação requerida para se obter uma concentração desejada k_d pode ser dada por

$$Q = G \times \frac{387}{P_{mol}} \times \frac{10^6}{k_d}, \quad (5.24)$$

onde Q é a taxa de ventilação ($\text{pé}^3/\text{min}$); G a taxa de geração da substância que se quer diluir (lb/min); 386 o volume de 1 lb mol de qualquer gás a 70°F e 1 atm; P_{mol} o peso molecular da substância que se quer diluir (lb); e k_d a concentração desejada no ambiente (ppm em volume). O valor a ser imposto a k_d (concentração desejada) vai depender dos objetivos a que se destina a ventilação diluidora, como explicado a seguir.

VENTILAÇÃO DILUIDORA PARA PROTEÇÃO DA SAÚDE DO HOMEM

Nesse caso, a concentração desejada no ambiente deve ser inferior ao limite de tolerância (TLV) para a substância poluente. Dessa forma, o valor mínimo para a taxa de ventilação seria dado pela expressão (5.24), fazendo-se k_d igual ao limite de tolerância da substância (veja os valores de TLV no Cap. 3). A esse valor mínimo da taxa de ventilação adiciona-se um certo valor, a título de segurança. Esse coeficiente de segurança pode ser introduzido na expressão (5.24) tal como segue.

a) Utilizando-se um valor para a concentração desejada inferior ao TLV. Por exemplo, para solventes industriais, Hemeon selecionou valores bons de projeto e chamou esses valores de VDC (*ventilation design concentration*). Os valores de VDC foram determinados dividindo-se o valor do TLV por um certo coeficiente de segurança K maior do que um. Esse coeficiente K levou em conta não só a toxicidade da substância como também suas propriedades odoríferas. A Tab. 5.30 apresenta esses valores de VDC.

b) Utilizando-se, para a concentração desejada (k_d), o valor de TLV e multiplicando-se a Eq. (5.24) por um certo valor de K maior que um

$$Q = G \times \frac{387}{P_{mol}} \cdot \frac{10^6}{\text{TLV}} \times K, \quad (5.25)$$

sendo K o coeficiente de segurança ($K \geq 1$). O valor de K vai depender dos seguintes fatores:

- distribuição do ar no ambiente (entradas e saídas do ar);
- toxicidade do poluente;
- variação da taxa de evolução da substância.

Os valores de K usualmente variam de 1,5 a 10,0, sendo bastante comuns valores entre 3 e 10. A título de recomendação a Tab. 5.31 apresenta os valores de K a serem utilizados.

TABELA 5.30 Valores de VDC – concentração desejada para vários solventes industriais*

Substância	VDC (ppm)	Substância	VDC (ppm)	Substância	VDC (ppm)
Acetona	150	Acetato de amila	75	Benzol	25
Acetato de butila	75	Álcool butílico	25	Butilcelosolve	25
Éter butílico	25	Dissulfeto de carbono	7	Tetracloroto de carbono	25
Celosolve	50	Acetato de celosolve	50	Clorofórmio	25
Ciclohexanol	50	Ciclohexanona	25	Ortodicloro-benzeno	50
Dicloroetileno	75	Dicloroetiléter	10	Diclorometano	200
Dioxano	25	Éter etílico	75	Acetato de etila	75
Álcool etílico	250	Dicloroetileno	25	Isoforona	10
Acetato de isopropila	75	Álcool isopropílico	150	Éter isopropílico	50
Mesityl Oxide	10	Metanol	100	Acetato de metila	75
Acetato de metilamila	75	Álcool de metilamílico	25	Metilcelosolve	25
Cloreto de metila	200	Metilacetona	150	Metilisobutilcetona	150
Monoclorobenzeno	50	Nitroetano	50	Nitrometano	50
Pentacloroetano	2	Éter de petróleo	500	Nafta de PMV	200
Acetato de propileno	75	Tetracloroetano	5	Tetracloroetileno	100
Toluol	100	Tricloroetano	100	Tricloroetileno	100
Turpentina	75	Xilol	75		

*Referência 2

TABELA 5.31 Recomendação para os valores de $K^{(3)}$

Tipo de entrada e saída de ar	Substância altamente tóxica ⁽¹⁾	Substância moderadamente tóxica ⁽¹⁾	Substância levemente tóxica ⁽¹⁾
Teto perfurado para entrada de ar	NR ⁽²⁾	3	1,5
Bons difusores para entrada de ar	NR ⁽²⁾	3-6	2-3
Janelas para entrada de ar e exaustores de parede para saída do ar	NR ⁽²⁾	6-10	3-6

⁽¹⁾Considera-se uma substância altamente tóxica quando $TLV \leq 100$ ppm; moderadamente tóxica quando $100 < TLV < 500$ ppm; levemente tóxica quando $TLV \geq 500$ ppm

⁽²⁾Não se recomenda ventilação geral diluidora para substâncias altamente tóxicas

⁽³⁾Devem-se usar valores superiores de K quando a taxa de geração da substância é variável

VENTILAÇÃO GERAL DILUIDORA PARA EVITAR FOGO OU EXPLOSÃO

Aqui o objetivo é reduzir a concentração abaixo do menor valor no qual risco de incêndio ou explosão possa ocorrer. Dessa forma, o valor da concentração desejada (k_d) será inferior ao limite inferior de inflamabilidade ou de explosividade. A expressão (5.24) fica

$$Q = G \times \frac{387}{P_{\text{mcl}}} \times \frac{10^2}{\text{LEL}} \times \frac{f_s}{B}, \quad (5.26)$$

onde LEL é o limite inferior de explosividade, expresso em porcentagem; f_s um fator de segurança que depende da porcentagem do LEL, necessária para condições de segurança; na maioria dos fornos e secadores, tem sido descabido manter concentrações de vapores não superiores a 25% do LEL; em fornos contínuos adequadamente ventilados, usa-se $f_s = 4$; e B é uma constante que leva em consideração o fato de que LEL diminui, aumentando a temperatura ($B = 1$ para $T < 250^\circ\text{F}$ e $B = 0,7$ para $T > 250^\circ\text{F}$).

Em fornos intermitentes, com boa distribuição de ar, a existência de picos requer $f_s = 10$ a 12. Em fornos sem recirculação ou fornos intermitentes ou, ainda, em fornos contínuos imprópriamente ventilados, pode ser necessário utilizar maiores valores para f_s .

Deve-se enfatizar que esse conceito nunca é aplicado onde trabalhadores estão expostos ao vapor. Em tais casos, são aplicadas taxas de ventilação para controle do risco à saúde. Os TLV são sempre inferiores aos LEL.

VENTILAÇÃO DILUIDORA PARA MISTURAS DE SUBSTÂNCIAS

Quando duas ou mais substâncias estão presentes, o efeito combinado deve ser levado em consideração. Na ausência de informação contrária, os efeitos de diferentes riscos devem ser considerados aditivos, isto é, a soma das frações

$$\frac{k_1}{\text{TLV}_1} + \frac{k_2}{\text{TLV}_2} + \dots + \frac{k_n}{\text{TLV}_n}, \quad (5.27)$$

sendo k_i a concentração da substância i no ambiente ($i = 1, 2, \dots, n$). Quando a soma exceder a unidade, o TLV da mistura deverá ser considerado como excedido. Nesse caso, a quantidade de ar requerida para diluir cada componente da mistura é calculada e a soma é utilizada como a taxa de ventilação de ar requerida para a mistura.

Onde duas ou mais substâncias nocivas estão presentes, e se conhece que os efeitos das diferentes substâncias não são aditivos, mas agem independentemente, a requerida ventilação diluidora para cada componente da mistura deve ser calculada e a maior deve ser usada como a taxa de diluição.

TAXA DE ALTERAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE UMA SUBSTÂNCIA EM UM AMBIENTE VENTILADO

Em um ambiente ventilado, com uma taxa de ventilação Q , onde uma substância está sendo constantemente emitida para o ambiente à razão de G

lb/min ou g/min, a concentração dessa substância no ambiente irá variar com o tempo, tendo-se em vista a taxa de geração (G) e a taxa de ventilação (Q). Em outras palavras, em certo intervalo de tempo, será introduzida no ambiente uma certa massa da substância, bem como uma certa massa de ar limpo, fazendo com que a concentração dessa substância varie com o tempo nesse ambiente.

Se admitirmos que a substância ao ser gerada é misturada instantaneamente com o ar total do espaço, teremos que a variação da concentração com o tempo pode ser dada por:

$$\frac{dk}{dt} = \frac{G}{V} - \frac{kQ}{V}, \quad (5.28)$$

onde dk/dt é a taxa de variação da concentração com o tempo; G a taxa de geração da substância; V o volume do ambiente; Q a taxa de ventilação; e k a concentração no instante t .

Rearranjando a Eq. (5.28), podemos proceder à integração da mesma,

$$\int_{k_0}^k \frac{dk}{G - kQ} = \int_{t_0}^t \frac{dt}{V}. \quad (5.29)$$

Os limites de integração são k_0 , a concentração inicial ou no instante t_0 , e k , a concentração final ou no instante t :

$$\left[-\frac{1}{Q} \ln (G - kQ) \right]_{k_0}^k = \left[\frac{t}{V} \right]_{t_0}^t. \quad (5.30)$$

Colocando os limites de integração, temos

$$\frac{G - k_0Q}{G - kQ} = e^{Q(t - t_0)/V}, \quad (5.31)$$

ou

$$k = \frac{G}{Q} [1 - e^{-Q(t - t_0)/V}] + k_0 e^{-Q(t - t_0)/V}, \quad (5.32)$$

que é a expressão geral para cálculo da concentração em qualquer instante.

Primeiro caso. Para o caso em que, para o instante inicial (t_0), a concentração inicial (k_0) é igual a 0, temos (vamos adotar $t_0 = 0$, para facilidade de expressão)

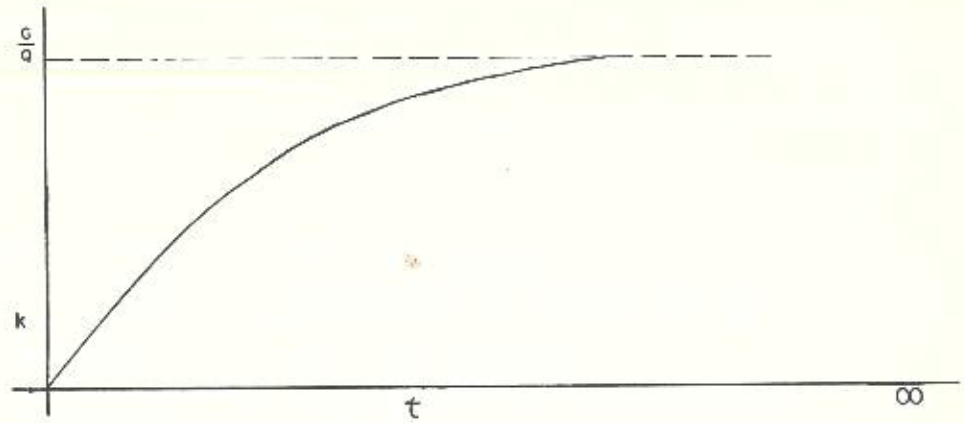
$$k = \frac{G}{Q} [1 - e^{-Qt/V}]. \quad (5.33)$$

Essa expressão encontra-se expressa graficamente na Fig. 5.21. Isto é, se, em um ambiente cuja concentração de uma substância é zero ($k_0 = 0$), começarmos a emitir essa substância a uma taxa de geração (G), por exemplo, em lb/min, e esse ambiente for ventilado a uma taxa de ventilação (Q), por exemplo, em pés³/min, a concentração irá crescer com o tempo, de acordo com a expressão (5.33), tendendo a atingir o valor máximo (G/Q) para um tempo infinito.

Segundo caso. Para o caso onde existe uma concentração inicial no ambiente ($k_0 \neq 0$) e não existe mais geração de poluentes ($G = 0$) — por exemplo, desligou-se a operação —, e se a taxa de ventilação for Q , a expressão (5.32) fica:

$$k = k_0 e^{-Qt/V}. \quad (5.34)$$

Essa expressão encontra-se expressa graficamente na Fig. 5.22. Isto é, quando,

FIGURA 5.21 Variação da concentração com o tempo para $k_0 = 0$

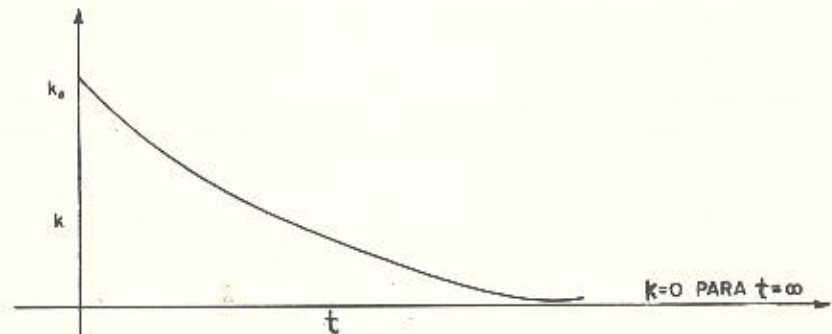
em um ambiente cuja concentração inicial é diferente de zero e a taxa de geração da substância também é zero, sendo esse ambiente ventilado com uma taxa de ventilação, a concentração irá decrescer de acordo com a expressão (5.34), tendendo ao valor zero para o tempo tendendo a infinito.

Terceiro caso. Um terceiro caso seria aquele em que a geração da substância poluente ocorre intermitentemente. Em outras palavras, no primeiro intervalo de tempo, $G \neq 0$, no segundo, $G = 0$, no terceiro, $G \neq 0$, e assim sucessivamente. Se o ambiente for ventilado com uma taxa de ventilação Q , irá ocorrer uma sucessão dos casos primeiro e segundo. A variação da concentração com o tempo poderá ser descrita pela Eq. (5.32), aplicando-se-a sucessivamente para cada intervalo de tempo, e considerando-se a concentração inicial de um intervalo como sendo a concentração final do intervalo anterior. A Fig. 5.23 representa esse caso.

A concentração num ciclo do tipo mencionado irá variar com o tempo, porém, depois de um número não muito grande de ciclos, ela terá um valor máximo, que pode ser dado pela expressão

$$k_{max} = \frac{G}{Q} \frac{[1 - e^{-Q t' / V}]}{[e^{-Q t' / V} - e^{-Q t / V}]}, \quad (5.35)$$

sendo t o tempo de geração e t' o tempo de ventilação sem geração.

FIGURA 5.22 Variação da concentração com o tempo para $G = 0$

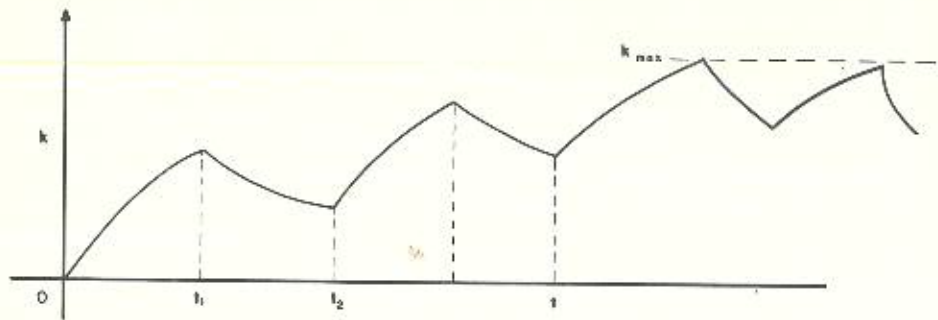


FIGURA 5.23 Variação da concentração com o tempo para G intermitente

Quando o valor Qt/V se aproxima de 4 ou 5, a concentração máxima tende para G/Q , uma vez que o segundo membro da Eq. (5.35) tende para um.

Em todos esses casos, estamos admitindo que o ar que entra no ambiente é limpo no que se refere à substância que está sendo gerada no ambiente, ou seja, concentração da substância no ar de entrada é igual a zero. Nos casos onde há uma concentração de entrada (k_e diferente de zero), as expressões para os cálculos da concentração são as seguintes.

Para os casos primeiro e segundo,

$$k = k_e e^{-Qt/V} + k_e (1 - e^{-Qt/V}) + \frac{G}{Q} (1 - e^{-Qt/V}), \quad (5.36)$$

onde k_{med} é a concentração média durante o tempo t . Da expressão (5.36), podemos tirar o valor da concentração média:

$$k_{med} = k_e + \frac{G}{Q} + \left(k_e - k_e - \frac{G}{Q} \right) \left(\frac{V}{Qt} \right) (1 - e^{-Qt/V}). \quad (5.37)$$

Para o terceiro caso (ciclo repetitivo),

$$k_{max} = \frac{(k_e + G/Q)(1 - e^{-Qt/V}) - k_e(1 - e^{-Qt/V})}{e^{-Qt/V} - e^{-Qt/V}}, \quad (5.38)$$

e

$$k_{med} = k_e + \frac{Gt}{Q(t + t')}. \quad (5.39)$$

EXERCÍCIOS – VENTILAÇÃO DILUIDORA

Exercício 1. 10,5 galões de cloreto de metileno são evaporados numa sala de 125 000 pés³. Calcular a concentração de equilíbrio, em ppm.

Solução

$$k = \frac{10^6 \times V_{soluto}}{V_{ar}} = \frac{10^6 \times 10,5 \times 0,134 \times 387 \times 1,34 \times 62,4}{125\,000 \times 85}$$

$$k = 4\,285 \text{ ppm,}$$

sendo 0,134 pés³/gal; 387 pés³/lb mol; 1,34 g/cm³; 62,4 lb/pé³/g/cm³; 85 lb/lb mol.

Exercício 2. Num salão medindo 150 × 180 × 20 pés cúbicos, um solvente é evaporado à razão de 15 gal/h durante 8 h. Calcular:

- a) as trocas de ar requeridas;
 b) se existir uma vazão de exaustão de 24 500 pés³/min, qual a máxima concentração atingida?
 c) qual o efeito de dobrar-se a vazão de exaustão?

Solução. (a) Volume do salão, $150 \times 180 \times 20 = 540\,000$ pés³; sendo a vazão em pés³/hora,

$$Q = \frac{403 \times g_e \times 10^6 \times G \times K}{m \times TLV}$$

onde, g_e é a gravidade específica = 1,34; $G = 15$ gal/h = 120 pints/h; m = massa molecular = 85; K = coeficiente de segurança = 3;

$$Q = \frac{403 \times 1,34 \times 10^6 \times 120 \times 3}{85 \times 500} = 4\,574\,287 \text{ pés}^3/\text{h.}$$

$$\therefore \frac{4\,550\,000 \text{ pés}^3/\text{h}}{540\,000 \text{ pés}^3} = 8,47 \text{ trocas/h.}$$

Solução. (b)

$$k = G/Q (1 - 1/e^{Qt/V}),$$

$$\frac{Qt}{V} = \frac{24\,500 \times 8 \times 60}{540\,000} = 21,8,$$

$$1/e^{21,8} \cong 0,$$

$$\therefore k = \frac{G}{Q} = \frac{12,75}{24\,500} = 52,05 \times 10^{-5}.$$

Sendo admitido $K = 1$, $k = 526$ ppm, onde

$$G = \frac{15 \times 0,134 \times 387 \times 1,34 \times 62,4}{60 \times 85} = 12,75 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

A saturação nunca será atingida. À medida que Q decresce, a concentração cresce, e o máximo tende a ser no limite,

$$k_{max} = \frac{400}{760} = 0,526 \text{ a } 760 \text{ mm H}_2\text{O e } 70 \text{ }^\circ\text{F,}$$

sendo

$$p_{vap} = 400 \text{ mm H}_2\text{O,}$$

ou seja,

$$k_{max} = 5\,260 \text{ ppm.}$$

Solução. (c) Para $t = 8$ h,

$$1/1^{Qt/V}$$

é ainda desprezível,

$$\therefore k = \frac{G}{Q} = \frac{12,8}{2 \times 24\,500} = 260 \text{ ppm.}$$

EXERCÍCIOS – VENTILAÇÃO GERAL DILUIDORA

Exercício 1. O ar de um ambiente é trocado por diferença de densidade mediante a entrada de ar pelas janelas (10 pés²) e saída pelo teto (10 pés²), sendo a dis-

tância entre entradas e saídas de 12 pés. Se a temperatura interna é 90 °F e a externa 85 °F, qual a vazão de troca de ar?

Solução. Admitindo efetividade das aberturas de 50%

$$Q = 7,2A\sqrt{h(T_i - T_e)}$$

$$Q = 7,2 \times 10\sqrt{12(90 - 85)} \cong 558 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Exercício 2. Qual a vazão induzida por ventos que sopram a 10 km/h perpendicularmente a janelas de 10 pés² para entrada e 18 pés² para saída?

Solução

$$Q = EAv = 0,5 \times 10 \times 546 = 2730 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Deve-se corrigir para aberturas desiguais,

$$r = \frac{A_e}{A_i} = \frac{18 \text{ pés}^2}{10 \text{ pés}^2} = 1,8.$$

Do gráfico (Fig. 5.2), obtém-se um aumento de 25%,

$$\therefore Q = 2730 \times 1,25 \cong 3412 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Exercício 3. Qual a vazão de ar, a 80 °F, que deve ser insuflada em um ambiente onde é liberado calor à vazão de 62 000 Btu/h, para mantê-lo a 85 °F?

Solução.

$$Q = \frac{C_r}{C_p \times \rho \times 60 \times (T_i - T_e)}$$

fazendo

$$C_p \cong 0,24 \text{ Btu/lb} \times \text{°F},$$

$$\rho \cong 0,075 \text{ lb/pé}^3,$$

$$T_i = 85 \text{ °F},$$

$$T_e = 80 \text{ °F},$$

$$C_r = 62\,000 \text{ Btu/h},$$

$$Q = \frac{62\,000}{0,24 \times 0,075 \times 60(85 - 80)} = 11\,481 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Exercício 4. Qual a vazão induzida pelos ventos que sopram a 10 km/h perpendicularmente a um ambiente com área de entrada de 10 pés².

Solução.

$$Q = EAv,$$

$$E = 0,5 \text{ para ventos perpendiculares,}$$

$$A = 10 \text{ pés}^2,$$

$$v = 10 \text{ km/h} \times 1\,000 \text{ m/km} \times (1/60) \text{ h/min} \times 3,28 \text{ pés/m} \cong 546 \text{ pés/min,}$$

$$Q = 0,5 \times 10 \times 546 = 2730 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Exercício 5. Em um ambiente de trabalho com dimensões de 30 × 30 × 20 pés, é dissipada uma quantidade de calor igual a 2 000 Btu/min de uma operação industrial. Pretende-se manter uma temperatura interior não superior a 90 °F.

Sabe-se que

- a temperatura exterior média no verão é 80 °F,
- a área das aberturas de entrada é 60 pés²,
- a área das aberturas de saída é 100 pés²,
- a direção do vento perpendicular às aberturas de entrada, e
- a velocidade dos ventos é 100 pés/min.

Pergunta-se: a ventilação natural desse edifício industrial será suficiente para manter a temperatura desejada?

Solução. (a) Vazão necessária para se remover o calor cedido no ambiente:

$$Q = \frac{C_r}{C_p \times \rho \times 60(T_i - T_e)} = \frac{2000 \times 60}{0,24 \times 0,075 \times 60(90 - 80)}$$

$$Q = 11\,111 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Solução. (b) Vazão de ar devido ao vento (considerando áreas iguais):

$$Q = EAv,$$

$$E = 0,55, \text{ vento perpendicular à abertura de entrada,}$$

$$A = 60 \text{ pés}^2 \text{ (vamos utilizar a área de entrada, pois é a menor):}$$

$$v = 100 \text{ pés/min,}$$

$$Q = 0,55 \times 60 \times 100 = 3\,300 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Solução. (c) Vazão de ar devido à diferença de temperatura da chaminé:

$$Q = 9,4A\sqrt{h(T_i - T_e)}$$

$$= 9,4 \times 60\sqrt{15(10)} = 6\,907 \text{ pés}^3/\text{min}$$

(h é a altura entre as aberturas de entrada e saída).

Solução. (d) Cálculo do aumento de vazão devido à diferença entre as aberturas de entrada e saída:

$$Q_a \frac{\text{área de saída}}{\text{área de entrada}} = \frac{100}{60} \cong 1,67;$$

do gráfico, portanto, a percentagem de aumento é 20%; logo,

vazão devida ao vento = $1,2 \times Q_v = 1,2 \times 3\,300 = 3\,960 \text{ pés}^3/\text{min}$,

vazão devida ao efeito da chaminé = $1,2Q_c = 1,2 \times 6\,907 = 8\,288 \text{ pés}^3/\text{min}$.

Solução. (e) Vazão total devido aos dois efeitos:

$$\text{soma de vazões} = 12\,248 \text{ pés}^3/\text{min,}$$

$$\text{percentagem devida à temperatura} = 67\%;$$

da Fig. 5.3,

$$\text{vazão real total} = 1,05 \times 8\,288 = 8\,702 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Logo, como a vazão do ar dada pela ventilação natural é inferior à necessária para manter as condições de conforto térmico desejadas (considerando só T), podemos:

- aumentar a ventilação natural (aumentando as áreas de entrada e saída);
- aumentar a altura do edifício;
- fazer ventilação mecânica.

6 VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA

INTRODUÇÃO

A ventilação local exaustora tem como objetivo principal a proteção da saúde do trabalhador, uma vez que capta os poluentes de uma fonte (gases, vapores ou poeiras tóxicas) antes que os mesmos se dispersem no ar do ambiente de trabalho, ou seja, antes que atinjam a zona de respiração do trabalhador. De uma forma indireta, a ventilação local exaustora também influi no bem-estar, na eficiência e na segurança do trabalhador, por exemplo, retirando do ambiente uma parcela do calor de convecção liberado por fontes quentes que eventualmente existam. Também no que se refere ao controle da poluição do ar da comunidade, a ventilação local exaustora tem papel importante. A fim de que os poluentes emitidos por uma fonte possam ser tratados em um equipamento de controle de poluentes (filtros, lavadores, etc.), eles têm de ser captados e conduzidos a esses equipamentos, e isso, em um grande número de casos, é realizado por um sistema de ventilação local exaustora.

Basicamente um sistema de ventilação local exaustora, esquematizado na Fig. 6.1, consiste em pelo menos um dos seguintes componentes:

- a) *captor* – ponto de entrada dos gases a serem exauridos pelo sistema;
- b) *sistema de dutos* – responsáveis pelo transporte dos gases captados;
- c) *ventilador* – responsável pelo fornecimento da energia necessária à movimentação dos gases (fornece um diferencial de pressão entre o captor e a saída do sistema);
- d) *equipamento de controle de poluição do ar* – destina-se a reter os poluentes, impedindo seu lançamento na atmosfera; é utilizado quando necessário.

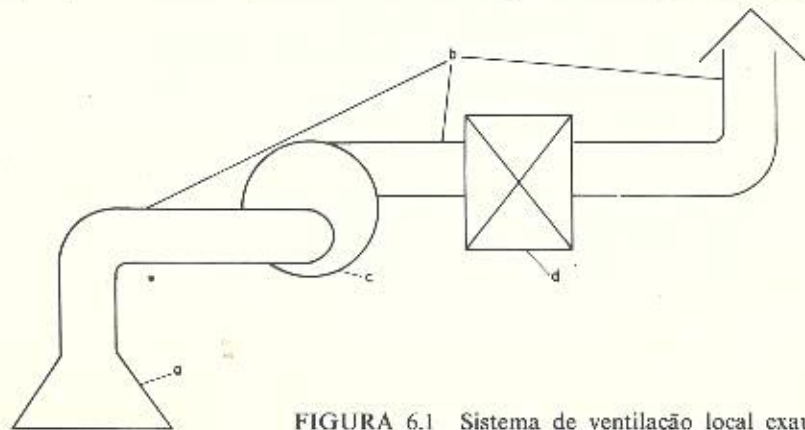


FIGURA 6.1 Sistema de ventilação local exaustora

Um sistema de ventilação local exaustora deve ser projetado dentro dos princípios de engenharia, ou seja, de maneira a se obter a melhor eficiência ao menor custo possível. Por outro lado, devemos lembrar sempre que, na maioria dos casos, o objetivo principal do sistema de ventilação local exaustora é a proteção da saúde do homem e, assim, esse fator deve ser considerado em primeiro lugar, e todos os demais devem estar condicionados a esse objetivo.

Neste trabalho veremos como dimensionar um sistema de ventilação local exaustora. Dimensionar ou projetar um sistema de ventilação local exaustora consiste em:

- a) *captor* — determinar sua forma, suas dimensões, sua posição relativa à fonte de poluentes, os requisitos de vazão e os requisitos de energia;
- b) *sistema de dutos* — determinar o arranjo físico do sistema de dutos, o comprimento e o diâmetro (se circulares) dos mesmos ou os lados (se retangulares); as singularidades necessárias para executar o arranjo físico estabelecido (alargamentos, cotovelos, etc.) e a energia necessária para movimentar os gases exauridos no captor através do sistema de dutos;
- c) *equipamento de controle de poluentes* — (quando necessário) determinar seu tipo, sua forma e dimensões, e a energia necessária para movimentar os gases através desse equipamento;
- d) *ventilador* — escolher adequadamente o ventilador, o qual deverá mover a vazão de ar exaurido fornecendo a energia necessária para tanto.

CAPTORES

É o ponto de entrada dos gases no sistema de ventilação local exaustora. Um captor estará completamente dimensionado quando determinarmos:

- sua forma e suas dimensões;
- sua posição relativa à fonte de poluentes;
- vazão a ser exaurida para captura completa dos poluentes;
- energia necessária para movimentar os gases exauridos para dentro dele.

Classificação dos captores

Quanto à forma e posição relativa, um captor pode ser classificado como segue.

ENCLAUSURAMENTO COM EXAUSTÃO

Nesse caso, a fonte de poluentes fica dentro do captor, o qual possui todos os lados fechados. Em outras palavras, a fonte fica enclausurada pelo captor e, nesse enclausuramento, faz-se a exaustão, conforme o esquema da Fig. 6.2.

Em alguns casos, as paredes do captor enclausurante podem ser a própria parede do processo ou operação que está sendo ventilado, como, por exemplo, no caso de um silo em cuja parede se coloca a tomada de exaustão. Convém frisar que nunca se trata de um enclausuramento perfeito, pois, se assim o fosse, não seria necessário exaustão; sempre existem aberturas ou frestas.

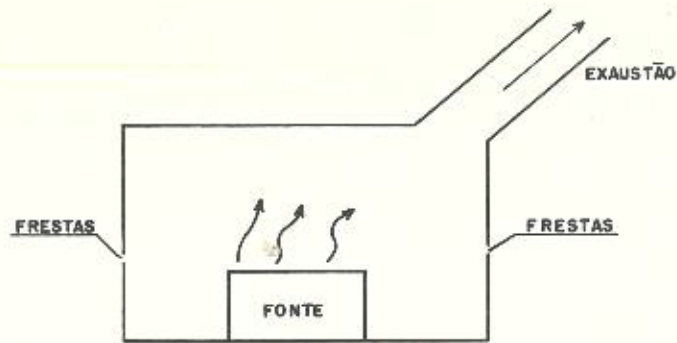


FIGURA 6.2 Enclausramento com exaustão

CABINES

Esse captor é semelhante ao captor enclausurante, porém com uma de suas faces abertas (necessário para acesso à operação ou processo poluidor), conforme esquematiza a Fig. 6.3.

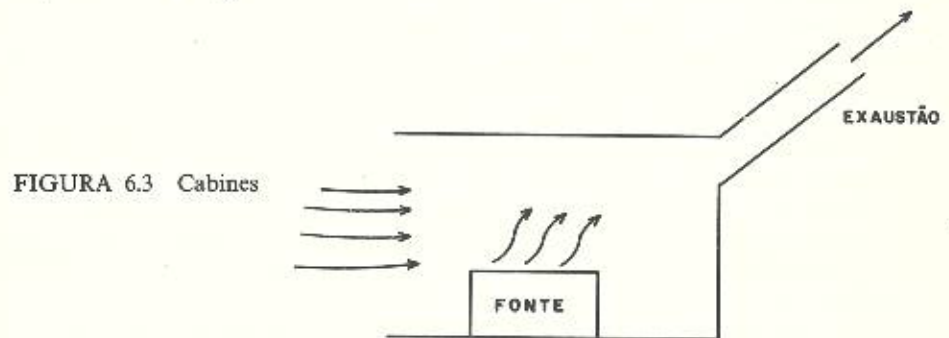


FIGURA 6.3 Cabines

CAPTORES EXTERNOS

Nesse caso, o captor é colocado externamente à fonte. Incluem as aberturas de sucção localizadas próximas às zonas de emissão de poluentes em processos ou operações poluidoras que não permitem seu enclausramento ou a colocação de uma cabine, dada a necessidade de acesso.

Esses captores devem induzir, na zona de emissão de poluentes, correntes de ar em velocidades tais que assegurem que os poluentes sejam carregados pelas mesmas para dentro do captor. A Fig. 6.4 mostra o esquema de um captor externo.

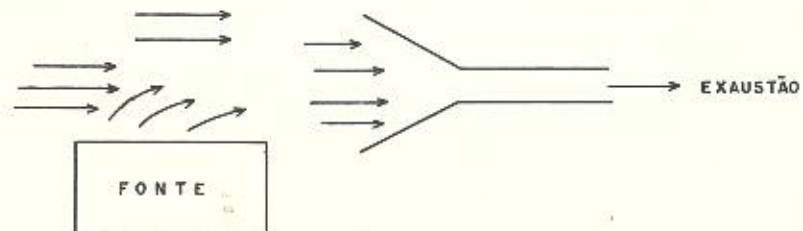


FIGURA 6.4 Captores externos

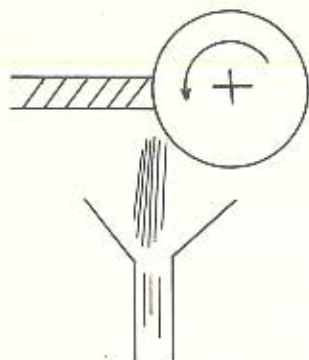


FIGURA 6.5 Captor-receptor

Quando o captor externo é colocado estrategicamente de modo a "receber" o fluxo de poluentes induzidos pela própria operação poluidora, esse captor recebe o nome de captor receptor (Fig. 6.5). Como exemplo, temos a roda de esmeril, que, ao esmerilhar uma peça, lança os poluentes já com uma certa velocidade na direção tangencial à roda de esmeril, no ponto de esmerilhamento.

O captor externo pode ter as mais variadas formas, de modo a melhor exercer seu objetivo (captar os poluentes) sem interferir com a operação industrial. Para diversas operações e processos industriais, já foram determinadas as formas que mais se adaptam, e estas se acham compiladas na seção "Ventilação de processos, operações e equipamentos industriais".

Em casos especiais, formas especiais de captores devem ser desenhadas. Usualmente as dimensões do processo ou operação poluidora determinam as dimensões do captor.

Requisitos de vazão dos diversos tipos de captores

A vazão de ar a ser exaurida para o interior de um captor deve ser tal que garanta que todos os poluentes gerados pela fonte sejam capturados. Por outro lado, essa vazão não deve interferir com o processamento industrial como, por exemplo, arrastando produto ou matéria-prima, além do que, quanto maior a vazão exaurida, maior o custo do sistema de ventilação local exaustora. O que devemos determinar, portanto, é qual a mínima vazão de exaustão que nos permita uma eficiente captura dos poluentes emitidos.

De uma forma geral, os requisitos de vazão são determinados pelos requisitos de velocidade dos gases ou do ar nos pontos de geração de poluentes e da área aberta determinada pela forma do captor e sua posição relativa à fonte. Em outras palavras, o captor deverá aspirar uma vazão tal que induza em todos os pontos de geração de poluentes uma velocidade maior que a velocidade do ar no ambiente, e dirigida para o captor. Se conhecêssemos a velocidade a ser induzida e a área aberta (determinada pela forma e posição relativa do captor), teríamos determinada a vazão necessária, ou seja:

$$Q = v \times A. \quad (6.1)$$

Os valores da área aberta (A) são determinados em função do tipo, das dimensões e da posição relativa do captor, e os valores da velocidade (v) do ar nessa área são usualmente determinados por experiências anteriores, ou seja, valores recomendados, como veremos a seguir.

CAPTOR ENCLAUSURANTE

Para determinarmos os requisitos de vazão em um captor enclausurante, devemos determinar A e v e aplicar a expressão (6.1).

Observando a Fig. 6.1, notamos que, com esse tipo de exaustão, pretende-se impedir que os poluentes emitidos pela fonte atinjam o ambiente saindo pelas frestas existentes no captor. Dessa forma, se for mantida, dentro do captor, uma pressão inferior à atmosférica, o ar do ambiente deverá entrar por essas frestas, o que nos garantirá não estar ocorrendo escape de poluentes. Isto é, temos uma movimentação de ar de fora para dentro do captor.

Logo, para o captor enclausurante nossa "área aberta" é a área de todas as frestas e aberturas existentes. Isso pode ser medido no caso de o captor já existir ou já estar determinado, no caso de projeto.

Uma vez que temos o valor da área aberta A , necessitamos conhecer qual o valor da velocidade do ar nessa área, a fim de determinarmos a vazão. Valores para velocidades na face da ordem de 75 a 200 pés/min são recomendados para esse tipo de captor.

A vazão necessária para esse tipo de captor é determinada pela expressão (6.1) com a área aberta e velocidade conforme descrito. A escolha do valor da velocidade na faixa dada deve levar em conta aspectos tais como os que seguem.

Correntes de ar no ambiente: a velocidade na face do captor deve ser superior à velocidade do ar no ambiente, a qual, para ambientes normais, está em torno de 50 pés/min. Em ambientes onde as correntes de ar atinjam velocidades maiores que a mencionada, ou que ocorram em direção paralela ou diagonal às aberturas do captor, devemos utilizar valores maiores para a velocidade na face.

Nos casos onde ocorrerem liberação de calor pela fonte teremos uma movimentação de ar no interior do captor. Nesses casos, devemos utilizar valores maiores para velocidades na face, especialmente quando as aberturas se localizarem no topo do captor.

Devemos utilizar valores maiores para velocidade na face quando a fonte emite poluentes de alta toxicidade. Isso aumentaria a segurança contra o escape de poluentes.

Note-se que a vazão determinada pela expressão (6.1) refere-se somente à vazão de ar exterior que deve ser aspirada para movimentar o ar exterior para dentro do captor. Nos casos onde, na fonte, ocorre também a geração de gases, a vazão desses gases deve ser adicionada à vazão calculada pela expressão (6.1), para obtenção da vazão total a ser aspirada.

CABINES

No caso de cabines, a vazão é determinada da mesma forma que no caso anterior, ou seja, pela aplicação da expressão (6.1). A área aberta é, nesse caso, a área da face da cabine, enquanto que a velocidade recomendada está na faixa de 100 a 200 pés/min. As observações feitas para captores enclausurantes valem também para as cabines.

CAPTORES EXTERNOS

Sempre que não for possível a utilização de um dos dois tipos de captores anteriormente mencionados, por necessidade de acesso à fonte, teremos de

lançar mão de aberturas de sucção próximas à fonte, e essas aberturas deverão induzir correntes de ar na zona de geração de poluentes dirigidas ao captor. Essas correntes de ar deverão ter uma velocidade tal, que, composta com a velocidade do ar do ambiente ou com a velocidade com que o poluente é lançado da fonte, dê uma resultante no sentido da abertura de sucção, conforme esquema da Fig. 6.6.

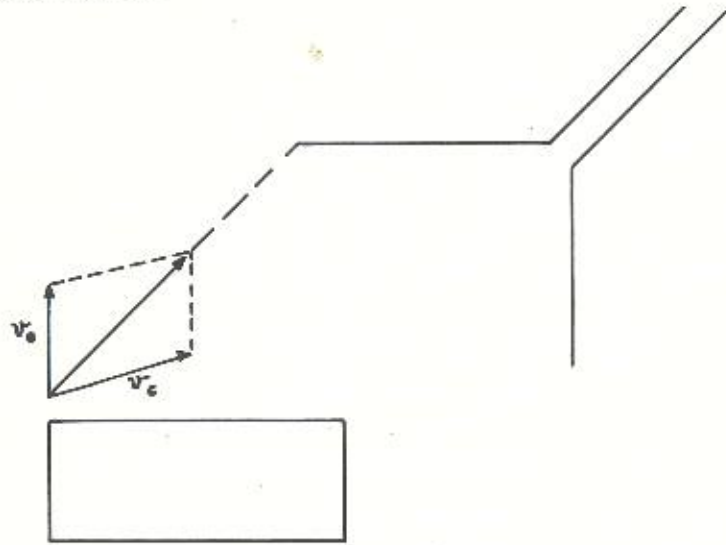


FIGURA 6.6 Correntes de ar induzidas por captadores externos

Todas as aberturas de sucção tendem a exaurir ar de todas as direções, e o fariam se a abertura de sucção tivesse dimensões desprezíveis (um ponto do espaço). Com uma abertura pontual, o lugar dos pontos que possuem a mesma velocidade seria uma esfera, como mostra a Fig. 6.7. Essa esfera é chamada de superfície de contorno. Como os captadores têm dimensões finitas, a presença das mesmas distorce as linhas de fluxo e as superfícies de contorno, ficando estas últimas como um elipsóides para o caso de uma sucção por um duto, como mostrado na Fig. 6.7.

As superfícies de contorno ocorrem em todas as aberturas de sucção e sua forma depende da forma do captor. A velocidade do ar exaurido vai diminuindo à medida que nos afastamos da abertura, conforme indicado na Fig. 6.7, e isso é evidente, uma vez que a vazão exaurida é a mesma e as superfícies de contorno aumentam à medida que se afastam do captor.

Se, para um dado captor, conhecêssemos as superfícies de contorno e a variação de velocidade, à medida que nos afastássemos do captor, a vazão de ar a ser exaurida poderia ser determinada. Verifiquemos o seguinte exemplo, esquematizado na Fig. 6.8. Se conhecêssemos a área da superfície de contorno 2, localizada à distância L do captor poderíamos, impondo uma velocidade, calcular a vazão pela expressão (6.1), ou seja, a vazão seria igual à área da superfície de contorno multiplicada pela velocidade imposta. Como a superfície 2 passa pelo ponto mais desfavorável de emissão de poluentes, teríamos garantido que todos os poluentes gerados pela fonte seriam captados, desde que a velocidade escolhida fosse adequada.

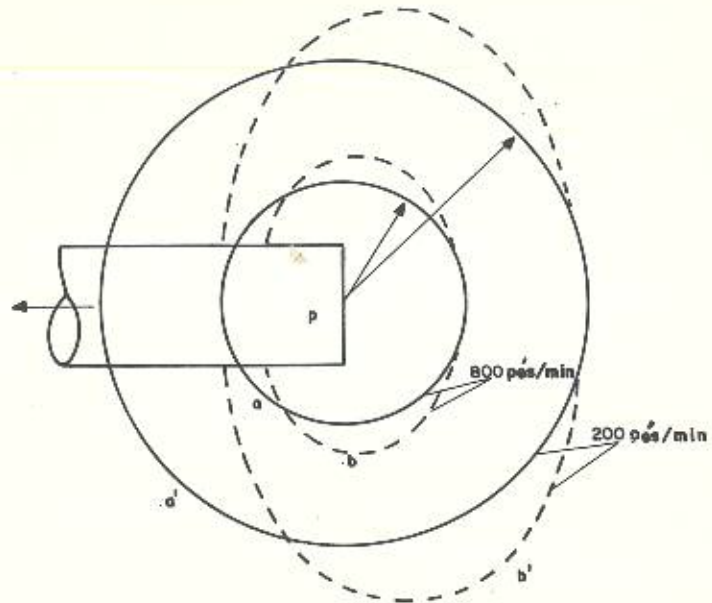


FIGURA 6.7 Contornos de velocidade para uma exaustão pontual p (a e a') e para uma tubulação (b e b')

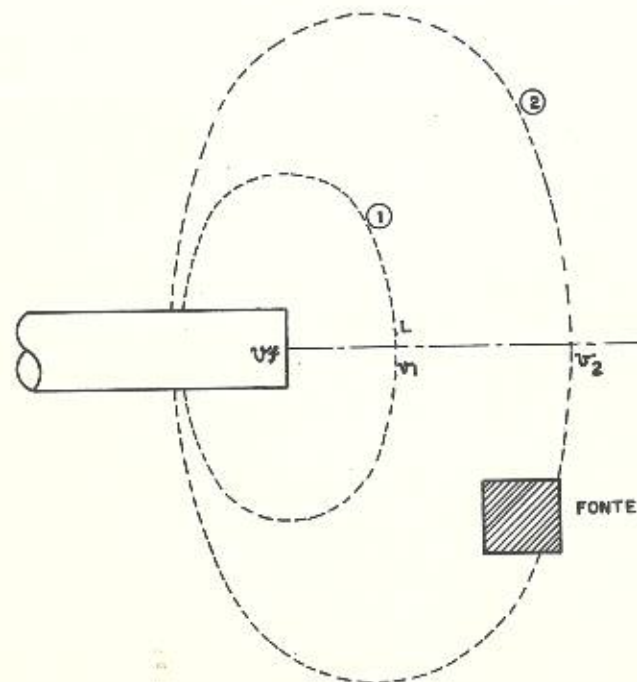


FIGURA 6.8 Exemplo de utilização das superfícies de contorno

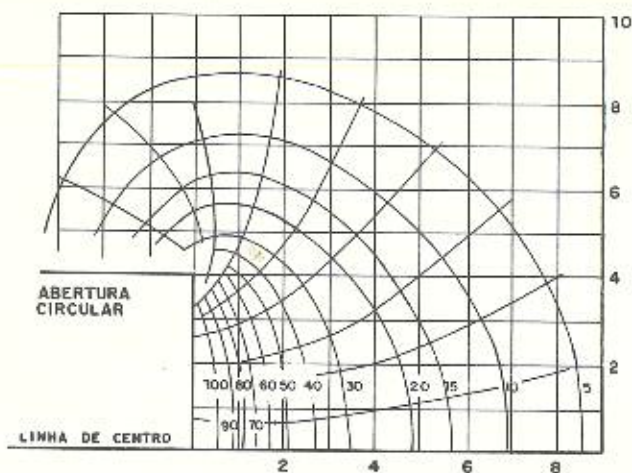


FIGURA 6.9 Contorno de velocidades para captadores de abertura circular

Dalla Valle através de estudos práticos determinou uma equação que dá a área das superfícies de contorno em aberturas circulares e retangulares,

$$A_c = 10x^2 + A_u, \quad (6.2)$$

onde x é a distância entre a área de contorno e a abertura do captor (medida ao longo do eixo do captor) em pés, e A_u é a área da abertura do captor em pés².

O mesmo autor determinou experimentalmente a variação da velocidade em função da velocidade na face (v_f) e da distância do captor (L). Essas determinações foram feitas para captadores de aberturas circulares e retangulares, e estão apresentadas nas Figs. 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12.

Nota. As distâncias x e y das Figs. 6.9 a 6.12 são medidas em unidades de abertura, iguais a:

- para o caso da Fig. 6.9, $1/4d$, sendo d diâmetro da abertura;
- para o caso da Fig. 6.10, $1/4l$, sendo l o lado do quadrado;
- para o caso da Fig. 6.11, $1/4l_1$, sendo l_1 o lado menor do retângulo;
- para o caso da Fig. 6.12, $1/15l_2$, sendo l_2 o lado maior do retângulo.

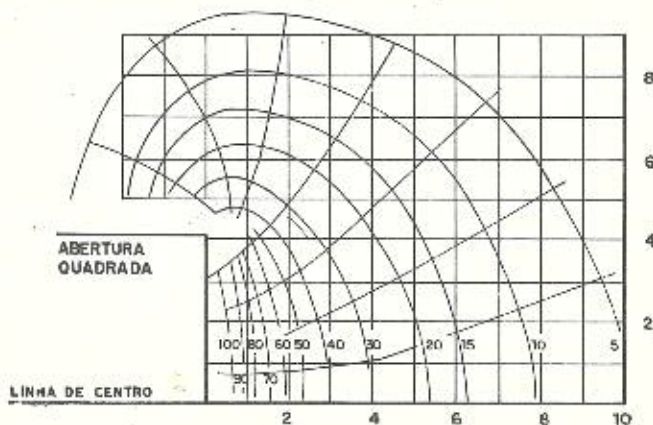


FIGURA 6.10 Contorno de velocidades para captadores de abertura quadrada

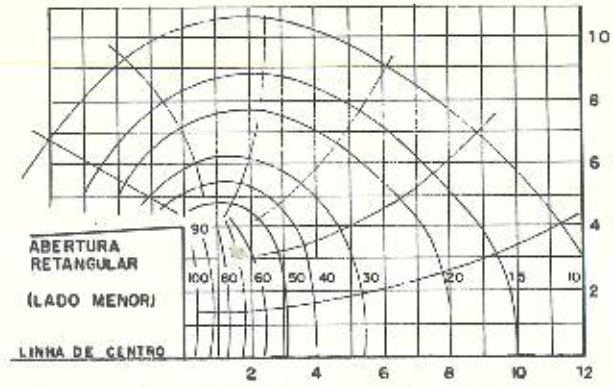


FIGURA 6.11 Contorno de velocidades para captadores de abertura retangular (lado menor; para retângulos de relação lado menor/lado maior igual a 1/3)

As velocidades nas Figs. de 9 à 12 são dadas em porcentagem da velocidade na face do captor.

Uma vez que tanto a área das superfícies de contorno quanto a variação de velocidades estão em função das dimensões do captor e da distância x , e esta também está relacionada com as dimensões do captor, podemos determinar a vazão necessária, desde que as dimensões do captor e a posição relativa do

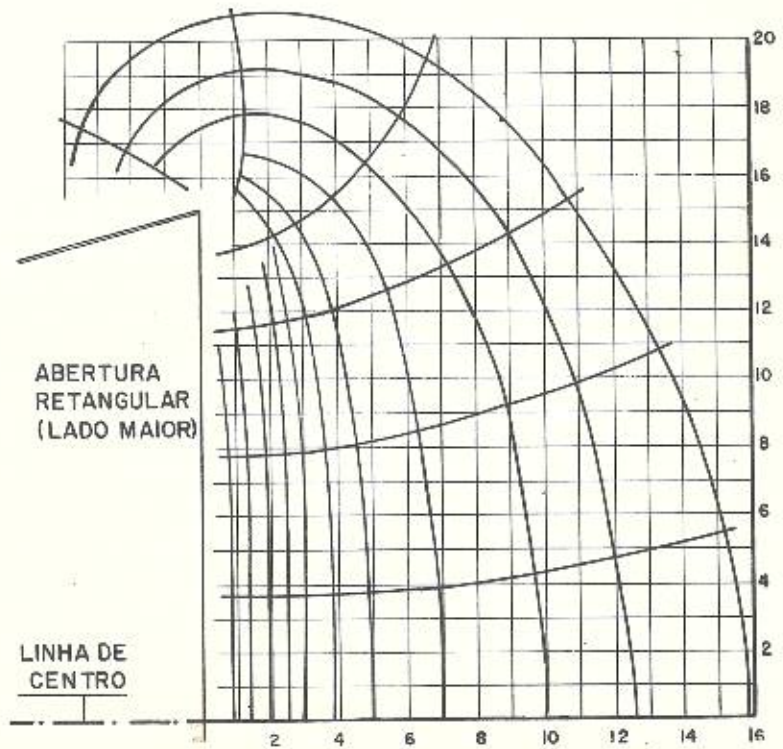


FIGURA 6.12 Contorno de velocidades para captadores de abertura retangular (lado maior; relação lado menor/lado maior igual a 1/3)

mesmo estejam estabelecidas, ou seja,

$$Q = v(10x^2 + A_c) \quad (6.3)$$

sendo Q a vazão necessária (em pés³/min) e v a velocidade a uma distância L do captor (em pés/min).

Na realidade, os captores não terão sempre a forma circular ou retangular e, portanto, a expressão de Dalla Valle, para as superfícies de contorno, seria apenas uma aproximação para orientar o projeto do captor. Mesmo para captores de aberturas circulares ou retangulares, a expressão de Dalla Valle tem suas limitações, ou seja, ela representa bem a área das superfícies de contorno que ocorrem a uma distância x entre os valores $1/2d$ e $1d$ (d é o diâmetro do captor). Para valores de x maiores que os dados anteriores, essa expressão superdimensiona os valores das áreas das superfícies do contorno.

Dimensionamento de captores

O dimensionamento de um captor vai depender em muito do bom-senso e da experiência do projetista. De uma forma geral, o projetista deverá obedecer, para um bom dimensionamento, às etapas apresentadas a seguir.

ESCOLHA DA FORMA, DIMENSÕES E POSIÇÃO DO CAPTOR

Conforme já foi mencionado existem compilados, para vários tipos de operações poluidoras, formas-padrão de captores provenientes de experiências anteriores com essas operações. Essas recomendações se encontram compiladas na seção "Ventilação de processos, operações e equipamentos industriais". Portanto o primeiro passo de um projetista seria o de verificar se, para seu caso, existe uma recomendação. Em caso positivo, ele pode utilizar diretamente o captor recomendado ou adaptá-lo a suas necessidades. Caso não exista uma recomendação específica para seu caso, o projetista deverá procurar uma recomendação para outra operação que mais se assemelhe a seu caso e, a partir desta, fazer as adaptações necessárias. Caso não exista qualquer recomendação específica, nem mesmo uma recomendação semelhante para seu caso, o projetista deverá então, com base nos fundamentos teóricos dados anteriormente, determinar um captor especial para o seu caso.

Uma das formas de se atingir a forma e a posição ideais do captor seria:

- 1) mentalmente enclausure a operação, processo ou equipamento poluidor; nesse enclausuramento, coloque a tubulação de exaustão;
- 2) retire desse captor enclausurante as partes necessárias para permitir o acesso ao processo, operação ou equipamento poluidor;
- 3) afaste o mínimo possível o restante do captor da operação, processo ou equipamento poluidor;
- 4) estime os requisitos de vazão, com base na teoria dada para a forma de captor encontrada pelos passos 1, 2 e 3;
- 5) faça modificações na forma e nas dimensões do captor para reduzir a vazão ao mínimo possível.

Essa seqüência parte do captor enclausurante, ou seja, aquele que seria o mais recomendado, pois daria a melhor exaustão com a menor vazão. Então, a partir do captor enclausurante, vamos para o captor externo, passando pela

cabine, ao executarmos os passos 1 e 2. No passo 3, vamos fazer que o captor externo fique o mais próximo possível dos pontos de geração de poluentes, uma vez que, quanto menor a distância L (distância do captor à fonte de geração de poluentes), menores os requisitos de vazão.

Note que, ao executarmos os passos 1, 2 e 3, as dimensões do captor ficam estabelecidas, pelo menos em uma primeira aproximação, e, como partimos de um captor enclausurante, o captor restante ficará com dimensões determinadas pela operação, processo ou equipamento poluidor.

Dessa forma, podemos executar o passo n.º 4, ou seja, com as dimensões do captor e a distância deste à fonte, podemos estimar as superfícies de contorno e, impondo uma velocidade no ponto de geração de poluentes mais desfavorável, calcularmos a vazão necessária.

A estimativa das áreas da superfície de contorno poderá ser feita com a expressão de Dalla Valle sempre que a abertura de sucção puder se aproximar de uma abertura circular ou retangular ou, ainda, poderá ser feita admitindo-se, através de análise teórica, superfícies geométricas conhecidas, por exemplo.

a) Se, de um captor enclausurante que tem a forma de um cubo e com tubulação de exaustão saindo de uma das arestas do cubo, retirarmos três faces, a superfície de contorno poderá ser aproximada a $1/8$ da área de uma esfera, conforme mostra a Fig. 6.13.

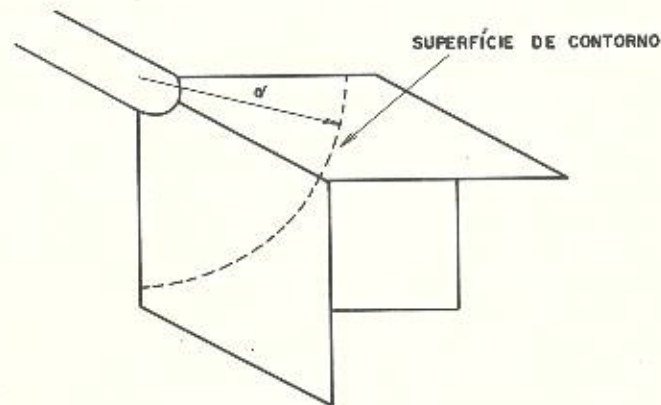


FIGURA 6.13 Superfície de contorno igual a $1/8$ da esfera

Para este caso, a área da superfície de contorno seria

$$A_c = \frac{4\pi d^2}{8} \quad (6.4)$$

b) Se, de um captor enclausurante com a forma de um paralelepípedo e saída de exaustão em todo o lado da dimensão maior, retirarmos todas as faces menos a face onde é feita a exaustão e a base, a superfície de contorno será a superfície de $1/4$ de cilindro, conforme mostrado na Fig. 6.14. Para esse caso, muito comum no caso de ventilação de tanques, a área da superfície de contorno seria

$$A_c = \frac{\pi x l}{2} \quad (6.5)$$

Assim, poderíamos estimar várias formas teóricas para as superfícies de contorno.

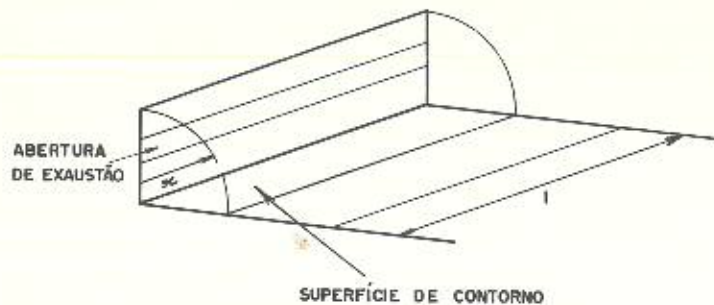


FIGURA 6.14 Superfície de contorno igual a 1/4 de cilindro

VELOCIDADE DE CONTROLE

Determinada a área da superfície de controle, necessitamos estabelecer qual a velocidade a ser imposta para determinação da vazão. Note que, ao determinarmos a área da superfície de controle, determinamos também a distância x na qual a superfície de controle irá se desenvolver. Essa distância será sempre a distância do captor ao ponto mais desfavorável de captação, medida ao longo do eixo do captor. Logo, quando impomos uma velocidade nessa superfície de contorno, estamos impondo que, em qualquer região a uma distância menor que x do captor, teremos valores maiores para a velocidade (veja "Contornos de velocidades").

A velocidade imposta deverá ser tal que garanta a captura dos poluentes no ponto mais desfavorável, o que nos garante que, nos demais pontos, os poluentes também serão captados. Essa velocidade chama-se velocidade de controle.

Chama-se ponto nulo ao ponto onde o poluente emitido por uma fonte perde a velocidade com que é emitida e fica incorporado ao meio ambiente. Isto é, a partir desse ponto, o poluente irá adquirir movimento de acordo com a movimentação do ar no ambiente.

Se determinarmos o ponto nulo em uma operação, processo ou equipamento poluidor, a partir do ponto de emissão mais desfavorável, teremos determinado a distância x . Nesse ponto, portanto, é que devemos impor a velocidade de controle.

Na determinação do ponto nulo, supõe-se não haver redução da velocidade de dispersão devido à ação de exaustão do captor, em favor da segurança. Na realidade isso ocorre. A velocidade de projeto no local do ponto nulo é especificada com base no que se supôs.

Apesar de a seleção de uma velocidade de projeto poder estar relacionada com o grau de movimentação de ar no ambiente, a experiência indica que a maioria dos ambientes de trabalho fechados não requererão mais do que 50 a 75 pés/min no ponto nulo. Se o movimento de ar é tão notório a ponto de sugerir a necessidade de valores mais elevados, então provavelmente sejam necessários anteparos para prevenir interferência na ação de exaustão.

Um dos fatores que influenciam na escolha da velocidade de controle é a toxicidade do poluente emitido, ou seja, quanto mais tóxico o poluente maior controle vamos querer exercer sobre a operação. Outro fator é a movimentação

TABELA 6.1 Valores para velocidade de controle

Características de movimento do ar ambiente	Menor fator de segurança — quantidades moderadas de poeira ou fumo nocivo; ou somente pequenas quantidades de poeira ou fumo tóxico	Maior fator de segurança — poeira ou fumo tóxico ou grande quantidade de poeira ou fumo incômodo
	Velocidade de controle no ponto nulo (pés/min)	
Pouco movimento do ar ou processo de fácil controle com anteparos	40-50	50-60
Médio movimento do ar	50-60	60-70
Grande mov. do ar; não há possibilidade para anteparos	70-80	75-100

do ar no ambiente; quanto maior a movimentação, maior deverá ser a velocidade de controle. A Tab. 6.1 apresenta valores para a velocidade de controle em função dos fatores apresentados.

CONTROLE DE PARTÍCULAS GROSSEIRAS E FINAS

Captor: localização e forma

Grosseiras ($> 50 \mu\text{m}$). Deve ser colocado de modo que a abertura de exaustão coincida com a trajetória das partículas (se o processo projeta material com velocidade). Por definição, partículas grosseiras que caem ao solo não são controladas, a não ser que caiam através de uma grelha para um transportador.

Finas ($< 50 \mu\text{m}$). Não é necessário colocar a abertura do captor coincidente com a trajetória das partículas, pois um fluxo de ar com alta velocidade pode ser interceptado por anteparos e sofrer exaustão em ângulos retos.

Princípios físicos aplicados

Grosseiras. O momento das partículas é muito grande para ser influenciado pelas velocidades do ar induzido/exaurido. Mesmo com anteparos, há uma reflexão elástica com alta velocidade.

Finas. Os anteparos podem destruir o momento direcional do fluxo de ar, e não há reflexão elástica. Nesse caso, não são consideradas as características de movimento dos fluxos de ar induzido.

Controle relativo

Grosseiras. Se um captor controla as partículas grosseiras efetivamente, então as finas são controladas automaticamente.

Finas. Um captor pode controlar as poeiras finas perfeitamente, mas pode não ser efetivo para as grosseiras.

Requisitos de energia para captadores

Como é sabido, ar flui de um ponto de maior pressão para um ponto de menor pressão. Como nosso objetivo é fazer escoar o ar ou os gases que estão junto à fonte para dentro do captor, teremos de estabelecer um diferencial de pressão entre o captor e o ar exterior. Esse diferencial de pressão é usualmente conseguido através de um ventilador e com um gasto de energia. Dessa forma, quando um sistema de ventilação local exaustora é dimensionado, deve ser prevista a quantidade de energia necessária para executar esse trabalho.

Quando ar flui para dentro de um captor, o fluxo de ar adquire uma configuração do tipo apresentado na Fig. 6.15, ou seja, a máxima convergência ocorre a jusante no plano da *vena-contracta*, cuja seção é inferior à seção do duto. A formação da *vena-contracta* é acompanhada de conversão de pressão estática em pressão cinética e, posteriormente, da volta de pressão cinética a pressão estática. Essa conversão de pressão estática em cinética e vice-versa acarreta uma perda de energia, isto é, essas transformações não têm rendimento 100%.

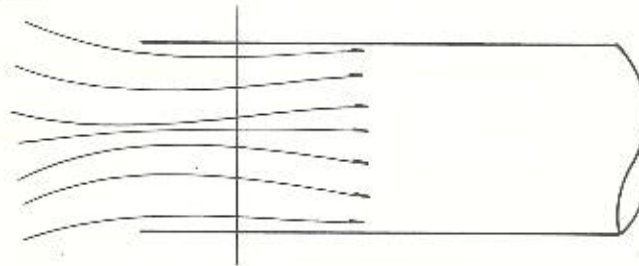


FIGURA 6.15 Configuração de um fluxo de ar entrando em um duto

A área do fluxo de ar na seção da *vena-contracta* vai variar de acordo com a forma do captor, ou abertura de entrada. Contudo, para a maioria das formas de captadores utilizados, vai variar de 70 a 100% da área do duto.

A perda de energia devido à transformação de pressão resulta em uma diminuição da vazão que entra no duto, quando comparada com a vazão que entraria se não houvesse essas perdas. Essa queda de vazão é dada pelo coeficiente de entrada (k_e), que representa a relação entre a vazão real, obtida com uma dada pressão estática, e a vazão ideal que seria obtida se a transformação de pressão estática em cinética ocorresse com 100% de eficiência.

A vazão ideal pode ser dada, para o ar nas condições-padrão, (70 °F e 1 atm) por:

$$Q_i = 4005A\sqrt{p_e}, \quad (6.6)$$

onde A é a área da seção transversal do duto (em pés²) e p_e a pressão estática do captor (em pol de H₂O).

A vazão real é dada pela expressão

$$Q_r = 4005A\sqrt{p_c}, \quad (6.7)$$

onde p_c é a pressão cinética à velocidade do duto (em pol de H₂O). De acordo com o conceito de coeficiente de entrada,

$$k_e = \frac{Q_r}{Q_i}, \quad (6.8)$$

ou, ainda, substituindo (6.6) e (6.7) em (6.8),

$$k_c = \sqrt{\frac{p_c}{p_e}} \tag{6.9}$$

Uma outra forma de representar o fluxo de ar, ou vazão, que entra em um captor é através da perda de energia, ou perda de pressão (Δp_e), que ocorre quando esse fluxo de ar entra no captor:

$$p_e = p_c + \Delta p_e \tag{6.10}$$

Substituindo (6.10) em (6.9), temos

$$k_e = \sqrt{\frac{p_c}{p_c + \Delta p_e}} \tag{6.11}$$

ou

$$\Delta p_e = \left[\frac{1 - k_e^2}{k_e^2} \right] p_c \tag{6.11a}$$

TABELA 6.2 Coeficiente de entrada para captores

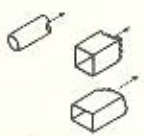
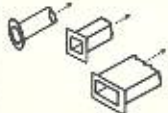


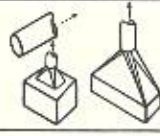
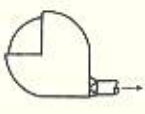

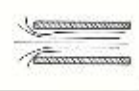
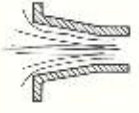

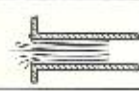
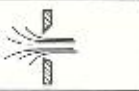
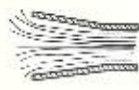

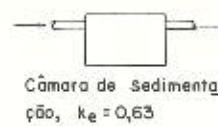
Tipo de captor	Descrito	Coeficiente de entrada, k_e	Perda de carga de entrada Δp_e
	Aberturas planas	0,72	0,93 p_c
	Aberturas flangeadas	0,82	0,49 p_c
	Captors cônicos ou afunilados	Variável com o ângulo do cone ou afunilamento (veja a fig. 6.16)	
	Entrada em forma de cone	0,96	0,04 p_c
	Orifícios	Veja a Fig. 6.16	
	Captor típico para rebolos abrgsivos	Saída em linha reta sem afunilamento	0,78 0,65 p_c
		Saída com afunilamento	0,85 0,40 p_c

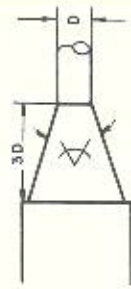
TABELA 6.2 (Continuação)

Tipo de orifício	Descrição	Coefficiente de entrada, k_e	Tipo de orifício	Descrição	Coefficiente, k_e
	Circular	0,98		Sem inclinação e sem flange	0,72
	Flangeada, 13° de inclinação	0,94		Abertura flangeada. Tubulação com menos 2 d	0,80
	Tubulação flangeada	0,90		Orifício de borda delgada	0,60
	13° de inclinação	0,79		Tubulação com menos de 1,5 d	0,53



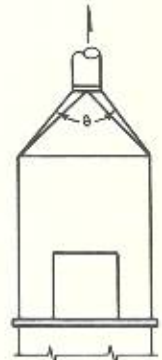
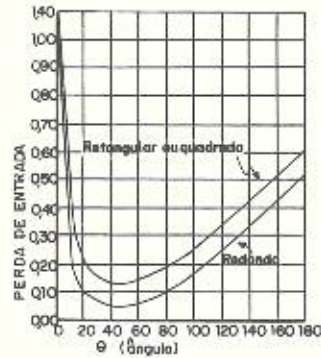
Logo, a perda de entrada de um captor pode ser dada por um número vezes a pressão cinética no duto, uma vez que o coeficiente de entrada se encontra tabelado para diversos tipos de captos, conforme apresentado a seguir.

Conforme se observa dos vários captos apresentados, pela adequada escolha do captor, pode-se minimizar a perda de energia, especialmente diminuindo a contração do fluxo de ar que ocorre na região da *vena-contracta*. (Tab. 6.2 e Fig. 6.16).



θ	PERDAS DE ENTRADA		COEFICIENTE DE ENTRADA	
	Redondo	Retangular	Redondo	Retangular
15°	0,15 p_c	0,25 p_c	0,93	0,89
30°	0,08 p_c	0,16 p_c	0,96	0,93
45°	0,06 p_c	0,15 p_c	0,97	0,93
60°	0,08 p_c	0,17 p_c	0,96	0,92
90°	0,15 p_c	0,25 p_c	0,93	0,89
120°	0,26 p_c	0,35 p_c	0,89	0,86
150°	0,40 p_c	0,40 p_c	0,84	0,82

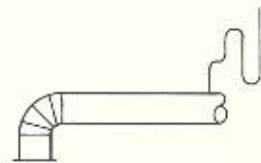
CABINE COM SAÍDA INCLINADA



COIFAS - k_e de 0,82 - 0,96



TUBULAÇÃO e COTOVELO,
 $k_e = 0,62$



TUBULAÇÃO FLANGEADA e COTOVELO,
 $k_e = 0,74$

FIGURA 6.16 Coeficientes de entrada e de perda de entrada para alguns captosres

SISTEMA DE DUTOS

DIMENSIONAMENTO DE DUTOS

Um sistema de dutos, depois de instalado, pode ser testado quanto a suas características, tais como pressões de operação, vazões, potência consumida, etc. através de medidas feitas com instrumentos específicos para esse fim. No entanto, quando o sistema está sendo projetado, essas características devem ser

computadas com o auxílio da teoria e de dados experimentais. Na seção relativa a captos, os requisitos de energia já foram abordados para essa parte do sistema de dutos. Nesta seção serão apresentados os requisitos de energia nas outras partes do sistema, ou seja, a perda de carga em trechos retos do sistema de dutos, e a perda de carga em singularidades. Além disso, na seção relativa a ventiladores, o sistema será estudado em seu total com relação ao comportamento. Preliminarmente convém lembrar que as perdas de energia são basicamente de dois tipos, perdas por atrito e perdas por turbulência (ou perdas por choque) e que variam em regime turbulento com o quadrado da velocidade (ou da vazão) e variam com a primeira potência da velocidade em regime laminar. Em sistemas de ventilação local exaustora, na maioria dos casos, o fluido se desloca em regime turbulento.

PERDA DE CARGA EM TRECHOS RETOS

Se tomarmos dois pontos em um trecho reto (diâmetro constante) do sistema de dutos, há uma queda na pressão estática entre os pontos causada pelo atrito nas paredes do duto. Em outras palavras, isso significa que a força total que empurra, no ponto 1, o corpo fluido entre os pontos é maior que a força que se opõe ao movimento no ponto 2. A força resultante será o produto da diferença de pressões estáticas multiplicado pela área da seção transversal do duto, ou seja,

$$\text{força resultante} = (p_{e1} - p_{e2})A. \quad (6.12)$$

Essa força deve ser contrabalanceada pela força de atrito, que será suposta homogênea por toda a superfície interna do duto, ou seja, cada unidade de superfície de parede contribui com a mesma resistência (atrito), ou melhor, a força total de atrito é proporcional à superfície interna do duto com a qual o fluido está em contato. Lembrando que a superfície interna é o produto do perímetro (P) da seção transversal do duto pelo seu comprimento (L), e que a força de atrito por unidade de superfície depende do quadrado da velocidade (v), da massa específica do fluido (ρ) e da rugosidade da parede interna do duto, podemos escrever

$$\text{força de atrito} = kPL\rho \frac{v^2}{2g}, \quad (6.13)$$

sendo k um coeficiente cujo valor depende da rugosidade do duto e g a aceleração da gravidade. Igualando (6.12) e (6.13),

$$[p_{e1} - p_{e2}]A = kPL\rho \frac{v^2}{2g}, \quad (6.14)$$

ou

$$\frac{p_{e1} - p_{e2}}{L} = k \frac{P}{A} \frac{\rho v^2}{2g}. \quad (6.15)$$

Lembrando que o raio hidráulico médio

$$r_h = \frac{\text{área}}{\text{perímetro}},$$

e que, em dutos redondos,

$$r_h = \frac{\text{diâmetro do duto } (d)}{4}, \quad (6.16)$$

e, em dutos quadrangulares,

$$r_h = \frac{lh}{2(l+h)} \quad (6.17)$$

(l é a largura da seção transversal do duto e h a altura da seção transversal do duto), teremos

$$\frac{p_{e1} - p_{e2}}{L} = \frac{k4\rho v^2}{d2g} \quad (6.18)$$

para dutos redondos, e

$$\frac{p_{e1} - p_{e2}}{L} = \frac{k2(l+h)\rho v^2}{lh2g} \quad (6.19)$$

para dutos quadrangulares.

Definindo o coeficiente de atrito $f = 4k$, chamando de Δp_r a perda de carga no trecho reto, expressando a velocidade em pés por minuto, e substituindo o valor da aceleração de gravidade,

$$\Delta p_r = f \frac{L}{d} \rho \left[\frac{v}{1096,5} \right]^2 \quad (6.20)$$

para dutos redondos.

Para efeito de cálculo, a equação apresentada pode ser tabelada ou plotada para condições-padrão ($\rho = 0,075 \text{ lb/pé}^3$), dando a perda de carga por 100 pés de trecho reto para dutos redondos comercialmente disponíveis. As Figs. 6.17, 6.18 e 6.19 foram construídas para esse fim, com vazão em pés³/min, velocidade em pés/min, diâmetro em pol, e perda de carga em pol de H₂O por 100 pés de comprimento de duto. As Figs. 6.20, 6.21 e 6.22 são para o mesmo propósito, apenas com unidades métricas. Quando a massa específica do fluido difere significativamente do valor 0,075 lb/pé³, a perda de carga obtida no gráfico deve ser multiplicada pela relação de massas específicas. A Fig. 6.23 é usada para dutos quadrangulares, transformando suas dimensões em diâmetro de um duto circular que tem a mesma perda de carga por unidade de comprimento. Dessa forma, as figuras apresentadas para cálculo da perda em dutos circulares podem ser usadas utilizando-se o diâmetro equivalente.

PERDA DE CARGA EM EXPANSÕES

Algumas vezes, durante o dimensionamento de um sistema de dutos, surge a necessidade de se conhecer a perda de carga decorrente de uma expansão de fluido. Os casos mais freqüentes são o alargamento do tramo principal necessário para manutenção de uma dada velocidade na junção com um tramo secundário e a expansão do fluido em sua saída do sistema de dutos. A expansão pode ser abrupta ou gradual, com o ângulo de expansão variando de zero a 180° que caracteriza a expansão abrupta. Enquanto em expansões abruptas a perda de carga se dá totalmente por turbulência, em expansões graduais, a perda de carga se dá por atrito e por turbulência, sendo tanto menor a perda por turbulência quanto mais suave for a expansão. Em expansões muito suaves, a perda de carga por turbulência é praticamente desprezível, e vários autores sugerem que a perda por atrito seja calculada por equivalência com trechos

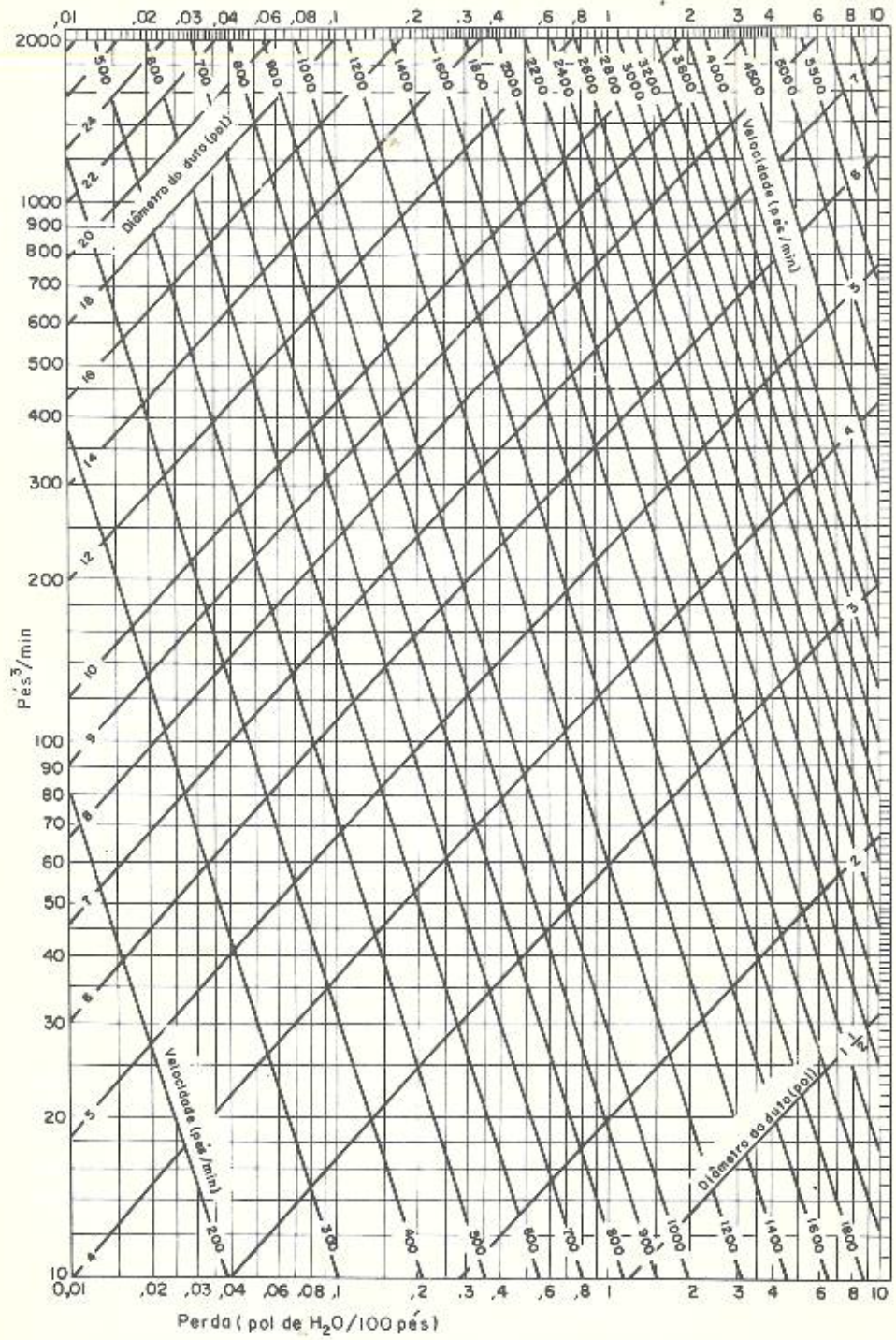


FIGURA 6.17 Perda de carga em dutos retos

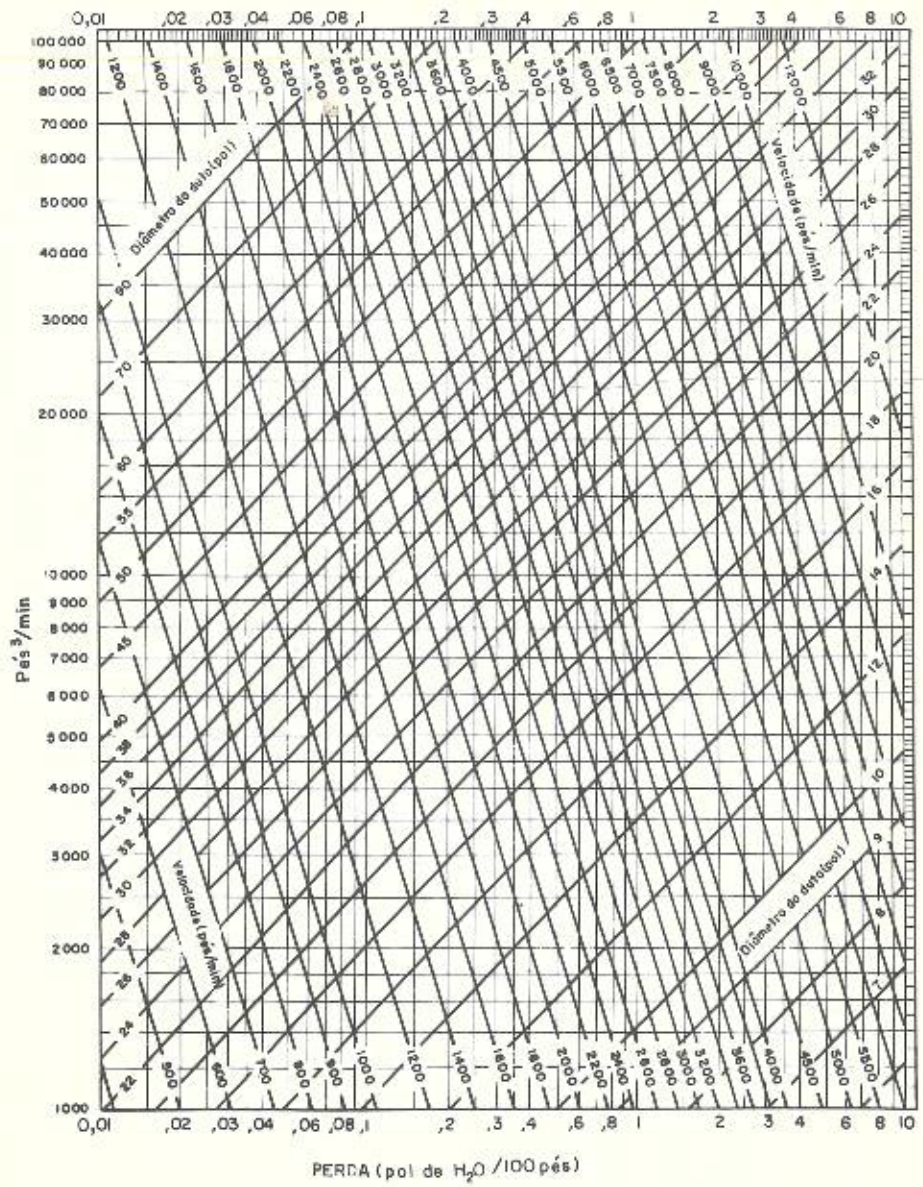


FIGURA 6.18 Perda de carga em dutos retos

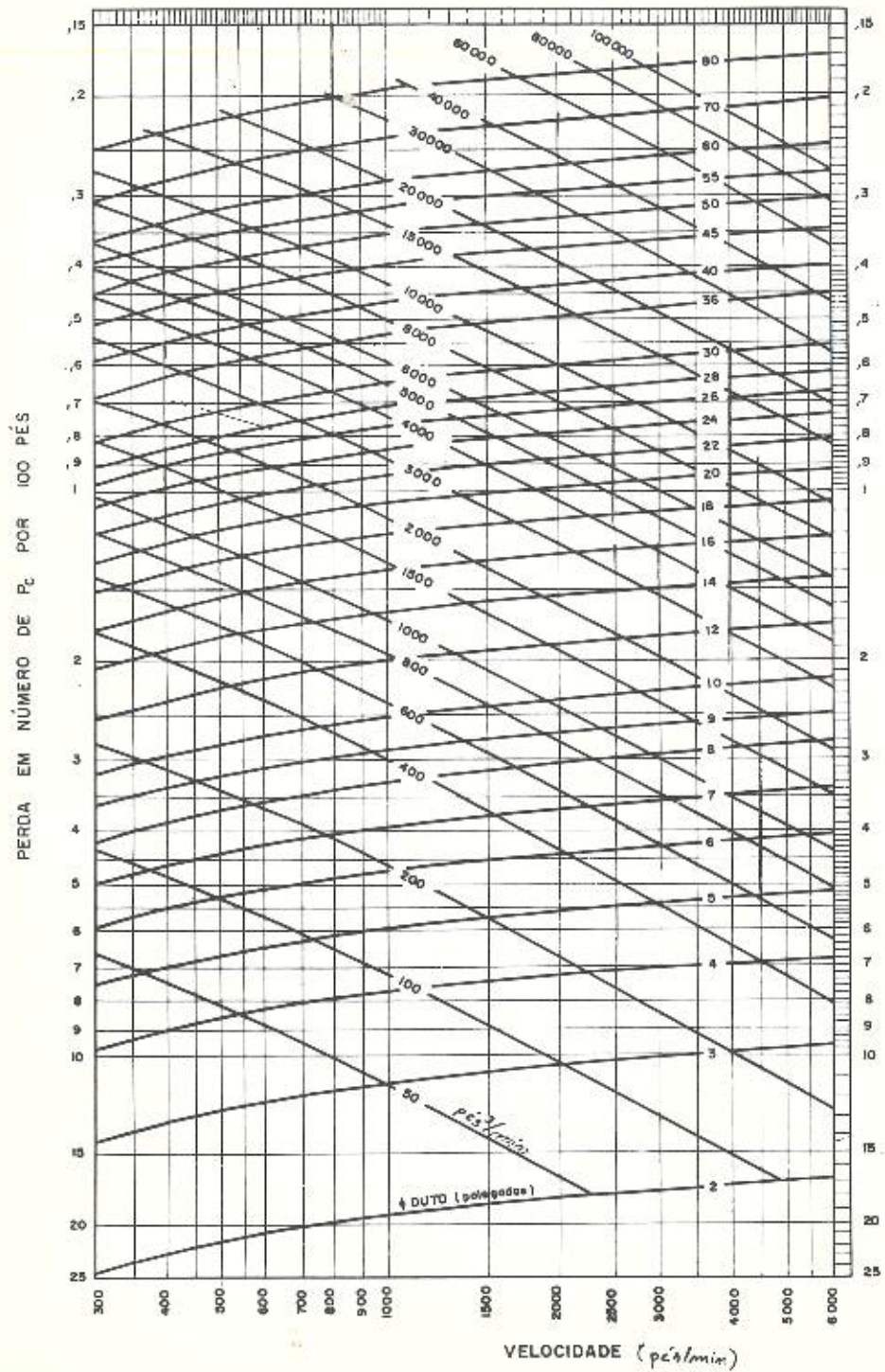


FIGURA 6.19 Perda de carga em dutos retos

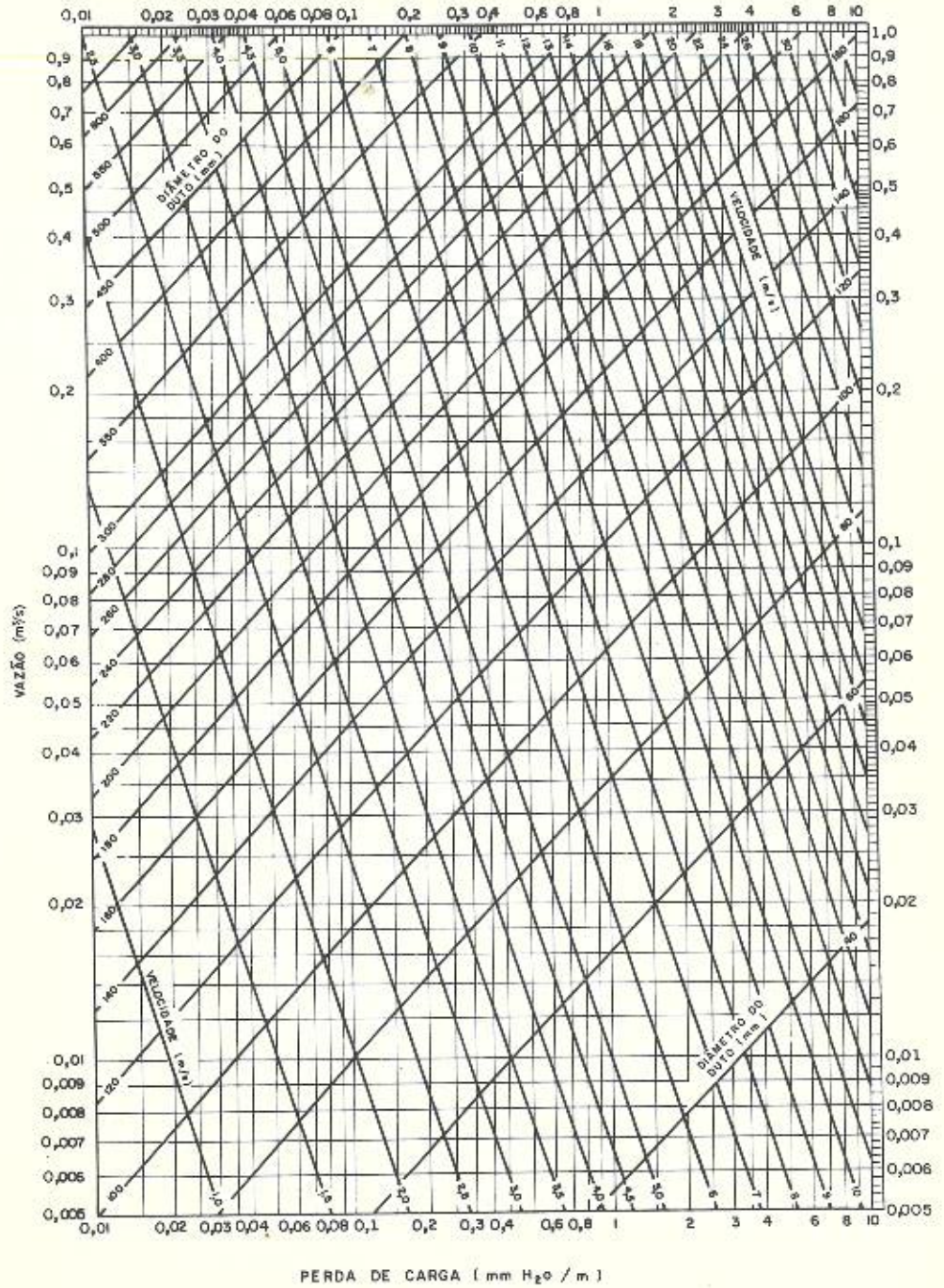


FIGURA 6.20 Perda de carga em dutos retos

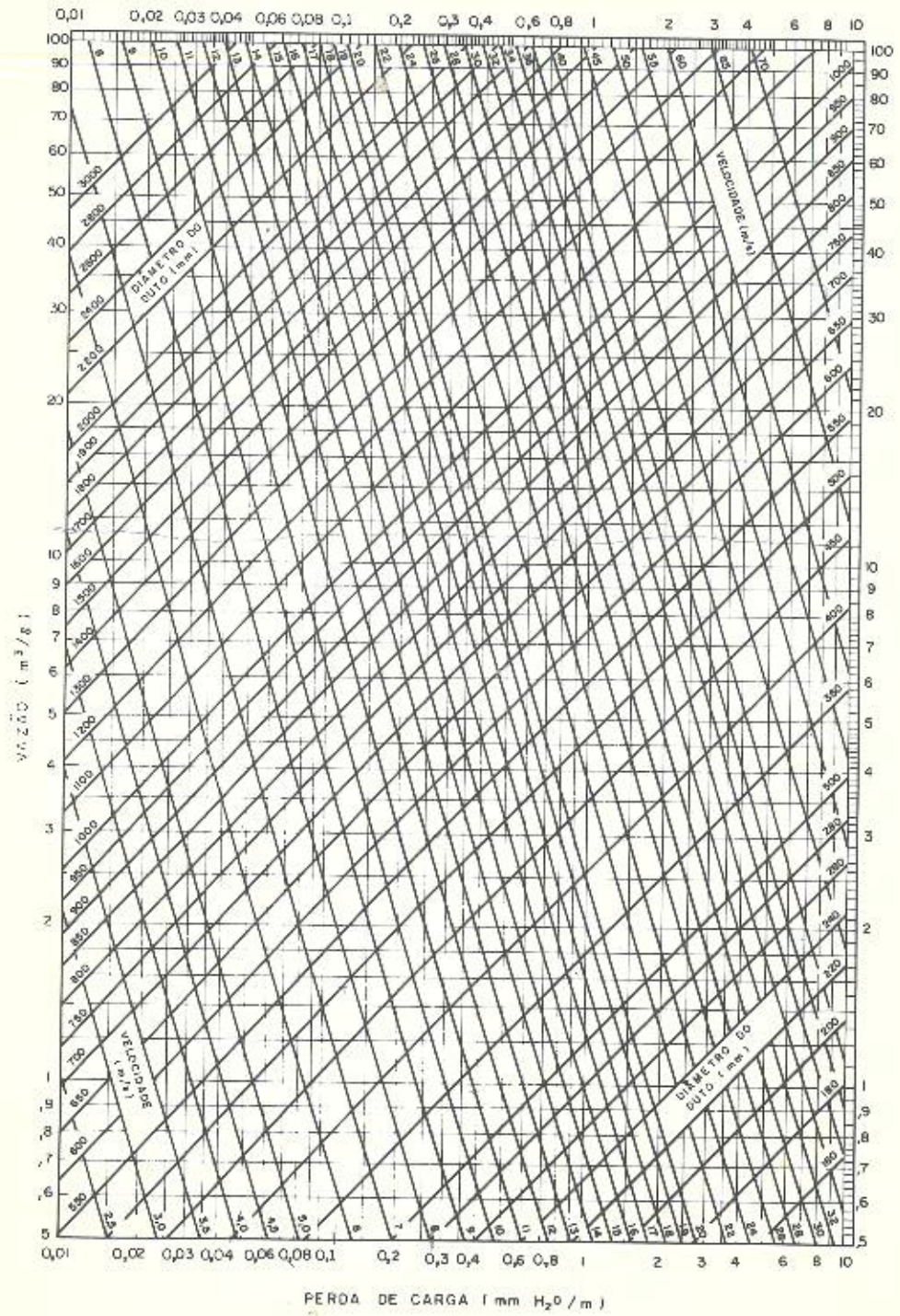


FIGURA 6.21 Perda de carga em dutos retos

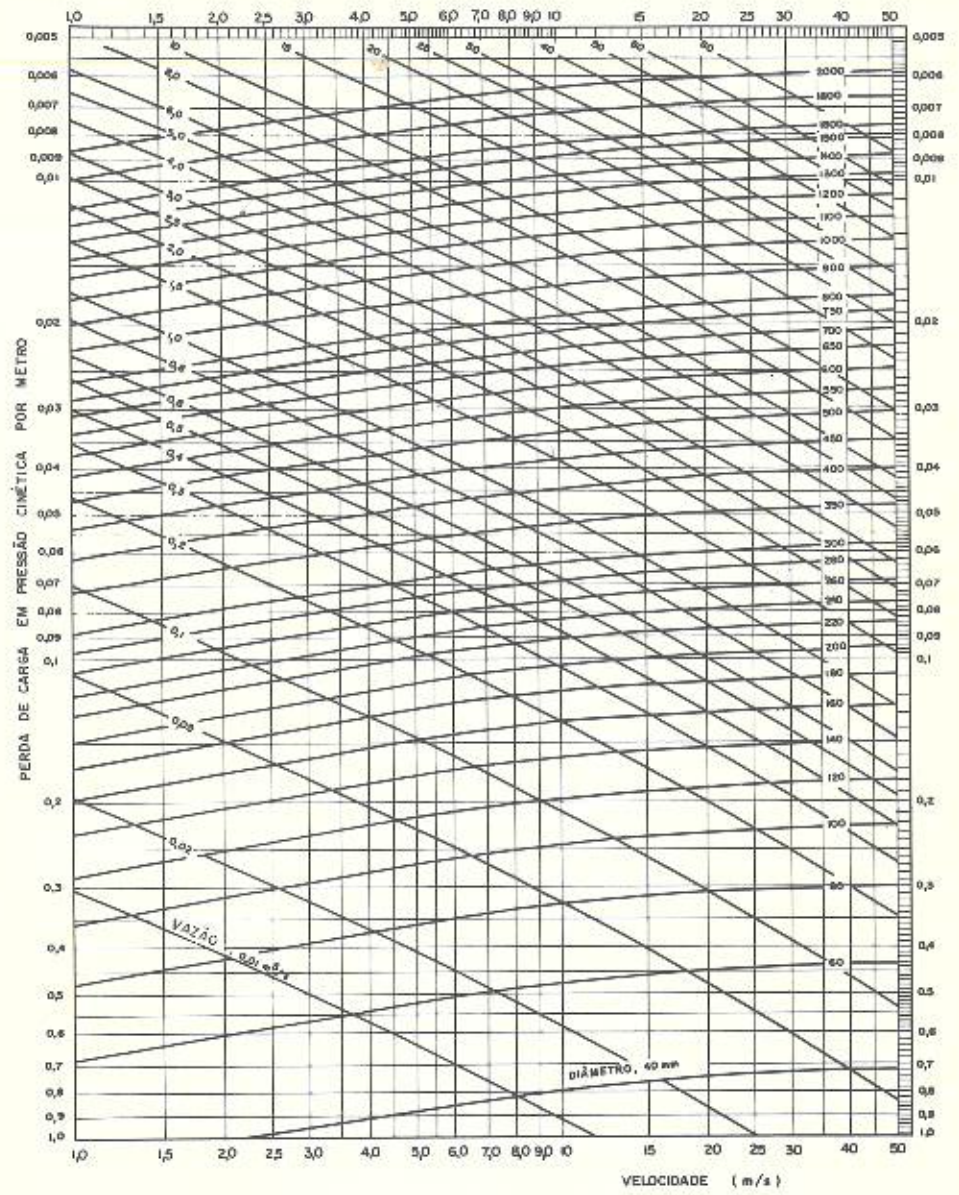


FIGURA 6.22 Perda de carga em dutos retos

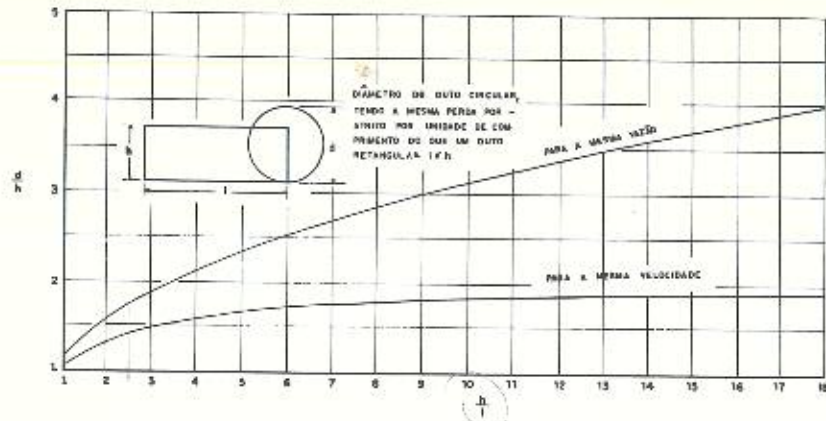


FIGURA 6.23 Atrito equivalente – dutos redondos e retangulares

de dutos retos. Para tal fim, calcula-se o diâmetro equivalente d_e ,

$$d_e = d_1 \left[\frac{4}{(1+r)(1+\sqrt{r})\sqrt{r}} \right]^{1/5} \quad (6.21)$$

onde d_e é o diâmetro equivalente e

$$r = \frac{\text{área da seção transversal no trecho 1}}{\text{área da seção transversal no trecho 2}} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (6.22)$$

A Fig. 6.24 esquematiza uma expansão gradual.

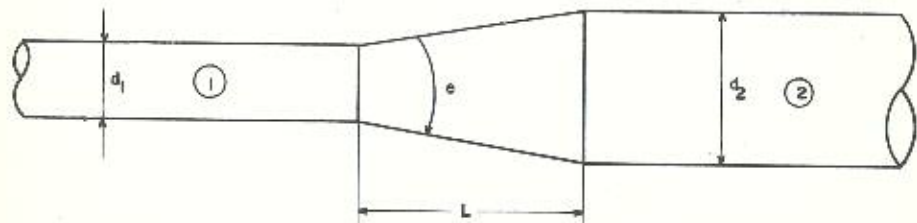


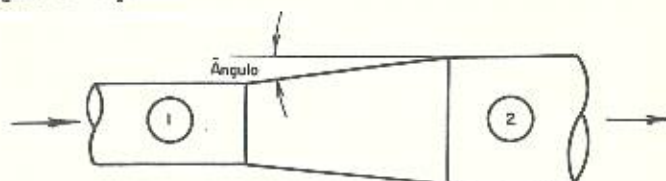
FIGURA 6.24 Esquema de uma expansão gradual

Com o diâmetro equivalente, as figuras para o cálculo da perda de carga em dutos retos podem ser usadas para o cálculo da perda na expansão. Para $r = 0$, temos a expansão para o ambiente ($v_2 = 0$) e o diâmetro equivalente é infinito, significando perda por atrito igual a zero. Quando $r = 1$, não há expansão e o diâmetro equivalente é o próprio diâmetro do duto.

A relação apresentada é válida para ângulos de expansão pequenos, em vista do que foi suposto. No entanto, para grandes ângulos, o comprimento (L) da expansão é pequeno e a perda por atrito torna-se desprezível para ângulos maiores que 30° , ficando como principal componente a perda por turbulência. Vale ainda ressaltar que o cálculo de perdas por atrito em expansões de dutos quadrangulares usando as relações propostas de uma transformação inicial em diâmetro de duto redondo equivalente e, a seguir, em diâmetro equivalente de duto reto, deve ser encarado com reservas, uma vez que expansões circulares não se comportam exatamente como expansões troncopiramidais.

Nesses casos, sugerimos consulta à Referência 9, que também aborda casos de várias expansões em série. Para propósitos práticos, a Tab. 6.3, pode ser utilizada fornecendo a perda de carga em expansões abruptas e graduais em função do ângulo de expansão e das dimensões da mesma.

TABELA 6.3 Perda de carga em expansões abruptas e graduais, ou função do ângulo de expansão



Ângulo em graus	X (reganho) em fração de diferença de p_c	Y (perda) fração de diferença de p_c
3,5	0,78	0,22
5	0,72	0,28
10	0,55	0,44
15	0,42	0,58
20	0,28	0,72
25	0,13	0,87
30	0,00	1,00
Mais de 30	0,00	1,00

Mudança em p_c
$p_{c2} = p_{c1} + X(p_{c1} - p_{c2})$
$Y = 1 - X$
$p_{c2} = p_{c1} + (p_{c1} - p_{c2}) - Y(p_{c1} - p_{c2})$

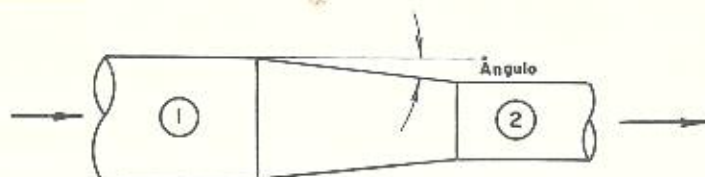
PERDA DE CARGA EM CONTRAÇÕES

Além das perdas de entrada nos captores, sistemas de dutos, apresentam outras situações onde perdas de carga são causadas pela convergência do fluxo para menores áreas de passagem. O cálculo da perda de carga nesses casos pode ser feita com o auxílio da Tab. 6.4, que fornece a perda em função do ângulo de convergência e das dimensões da contração.

PERDA DE CARGA EM COTOVELOS

O perfil do fluido em cotovelos é complicado. De uma maneira simples, pode-se dizer que, sob o efeito de sua inércia, o fluido em movimento num duto quadrangular comprime-se do lado oposto ao de sua entrada no cotovelo. Além disso, em virtude do fato de fluir a maiores velocidades no centro do fluxo e do efeito inercial mencionado, o fluxo apresenta a tendência de adquirir movimento helicoidal duplo. Em dutos redondos, a situação é ainda mais complexa. As várias formas e dimensões (raio de curvatura) e a complexidade do fluxo em cotovelos faz com que, além de grandes, as perdas em cotovelos dependam de muitas variáveis, dificultando seu cálculo e sua forma de apresen-

TABELA 6.4 Perda de carga em função do ângulo de convergência e das dimensões de contração



Para contração troncopiramidal

Ângulo (graus)	(perda) fração de diferença de p_c
5	0,05
10	0,06
15	0,08
20	0,10
25	0,11
30	0,13
45	0,20
60	0,30

Mudanças de p_c :

$$p_{c2} = p_{c1} - (p_{c2} - p_{c1}) - Y(p_{c2} - p_{c1})$$

$$p_{c2} = p_{c1} - (p_{c2} - p_{c1}) - Z(p_{c2})$$

Para expansões abruptas

Relação A_2/A_1	Z
0,1	0,48
0,2	0,46
0,3	0,42
0,4	0,37
0,5	0,32
0,6	0,26
0,7	0,20

tação. A perda de carga em cotovelos depende da relação entre o raio de curvatura e a dimensão radial de duto, da forma do duto (relação entre a dimensão axial e a dimensão radial), do ângulo de mudança de direção, das dimensões do cotovelo, da velocidade do fluido e da presença ou ausência de duto, outros cotovelos etc., na saída. A Tab. 6.5 fornece as perdas de carga em cotovelos de 90° com seções transversais, circulares e quadrangulares em fração da pressão cinética no duto para vários valores do raio de curvatura.

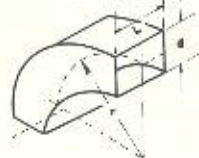
Se o fluxo não é homogêneo quando entra no cotovelo, há uma grande influência na perda de carga do mesmo. Se a região de alta velocidade está na parte de fora da curva, a perda de carga é menor e, se estiver na parte de dentro da curva, a perda será maior que a fornecida pelas tabelas. A Tab. 6.6 apresenta alguns casos de composição de cotovelos.

TABELA 6.5 Perda de carga em cotovelo

COTOVELO CIRCULAR



COTOVELO RETANGULAR



r/d	Perda, Δp_c
2,75	0,25
2,50	0,22
2,25	0,26
2,00	0,27
1,75	0,32
1,50	0,39
1,25	0,55

r/d	L/d					
	0,25	0,5	1	2	3	4
0,0	1,50	1,32	1,15	1,04	0,92	0,86
0,5	1,36	1,21	1,05	0,95	0,84	0,79
1,0	0,45	0,28	0,21	0,21	0,20	0,19
1,5	0,28	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12
2,0	0,24	0,15	0,11	0,11	0,10	0,10
3,0	0,24	0,15	0,11	0,11	0,10	0,10

Correção para ângulos diferentes de 90°

120°	X 1,22
60°	X 0,67
45°	X 0,5
30°	X 0,33

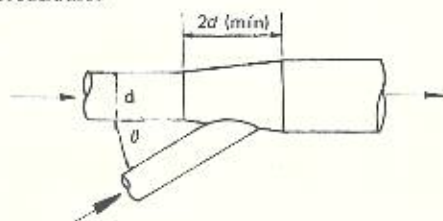
TABELA 6.6 Casos de composição de cotovelos; relação = perda medida/perda prevista

Símbolo	Tipo de composição de cotovelos	Cotovelos conectados diretamente	Cotovelos conectados por duto de comprimento = $1d$
a	12 3/8°	1,04	0,55
b		0,94	1,06
c		0,66	0,75
d	12 3/8°	0,83	0,60
e		1,20	1,31
f	12 3/8°	0,81	0,88

PERDA DE CARGA EM JUNÇÕES

Em sistema de dutos é comum a junção de dois tramos ou a separação de um em dois ou mais tramos. O fluxo nessas junções é extremamente complexo. A perda de carga se manifesta em ambos os tramos, no principal e no tramo secundário, a ele conectado. Em sistemas de ventilação local exaustora, a perda de carga é debitada ao tramo secundário, de acordo com os valores fornecidos pela Tab. 6.7.

TABELA 6.7 Tabela de valores para ramo secundário



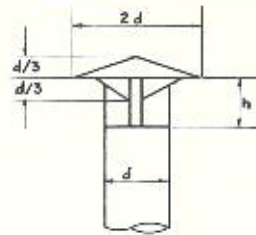
Ângulo (graus)	Δp_i em fração de p_e
10	0,06
15	0,09
20	0,12
25	0,15
30	0,18
35	0,21
40	0,25
45	0,28
50	0,32
60	0,44
90	1,00

PERDA DE CARGA EM OUTRAS SINGULARIDADES

Outras singularidades provocam perda de carga em sistemas de dutos, tais como, chapéus na saída do sistema, equipamentos de coleta de partículas, gases e vapores, etc. A Tab. 6.8(a) fornece os valores de perda de carga em chapéus. A perda de carga em equipamentos de controle de poluentes não é simples de calcular, dependendo dos parâmetros de projeto, operação e manutenção dos equipamentos, etc. A Tab. 6.8(b) fornece alguns valores estimativos usuais de perda de carga em equipamentos de controle de poluentes. Para o conhecimento de valores mais acurados da perda de carga em equipamentos de controle, sugerimos uma consulta ao Cap. 7.

Em adição às tabelas já mencionadas, as Tabs. 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 e a Fig. 6.25 são apresentadas como subsídio para os que preferem utilizar o sistema métrico ou outros enfoques para o cálculo de sistemas de dutos. As Tabs. 6.14 e 6.15 são anexadas por serem necessárias ao cálculo de sistemas de ventilação local exaustora. A Referência 13 é uma das mais completas obras sobre perdas de carga, e deve ser consultada sempre que necessário.

TABELA 6.8(a) Valores de perda de carga em chapéus



h/d	Δp_i em fração de p_c
1,0	0,10
0,75	0,18
0,70	0,22
0,65	0,30
0,60	0,41
0,55	0,56
0,50	0,73
0,45	1,0

TABELA 6.8(b) Perda de carga em equipamentos de controle

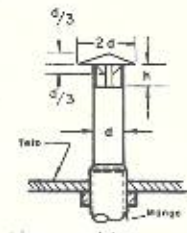
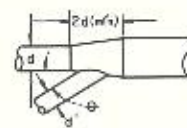
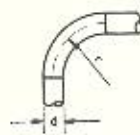
Equipamento	Perda de carga (por H_2O)	
	Faixa encontrada	Faixa comum
Câmara gravitacional	0,2-1,5	0,2-0,8
Ciclone comum	0,5-2,5	1,0-2,0
Ciclone de alta eficiência	2,0-6,0	4,0-5,0
Multiciclone	2,0-6,0	4,0-5,0
Câmaras de impactação	1,0-4,0	1,5-2,5
Precipitadores eletrostáticos	0,2-1,0	0,2-0,8
Filtros de tecido (filtros de manga)	3,0-6,0	4,0-5,0
Filtros compactados	0,2-1,0	0,2-1,0
Torres de borriço	0,2-2,0	0,5-1,0
Torres de enchimento	2,0-10,0	2,0-8,0
Torres de prato	1,0-8,0	2,0-6,0
Lavadores auto-induzidos	0,2-8,0	2,5-6,0
Lavadores ventúri	10,0-60,0	10,0-40,0
Lavadores de disco	10,0-60,0	10,0-40,0
Lavadores de impactação	1,5-8,0	4,0-6,0

TABELA 6.8(b) (Continuação)

Equipamento	Perda de carga (por H ₂ O)	
	Faixa encontrada	Faixa comum
Leitos de adsorção	2,0-10,0	3,0-6,0
Incineradores de chama direta	0,2-1,0	0,2-0,5
Incineradores catalíticos	1,0-4,0	1,0-4,0
Precipitadores sônicos	6-12	—
Precipitadores térmicos	0,1-1,0	0,2-0,5
Lavadores ciclônicos	2,0-6,5	2,5-6,0
Lavadores tipo <i>jet</i> *	1,0-6,0	1,0-3,0

*Pressão disponível

TABELA 6.9 Resistência equivalente em metros de duto reto



Diâmetro (mm)	Cotovelo de 90°, raio de curvatura			Ângulo de entrada		Número de diâmetros		
	1,5d	2,0d	2,5d	30°	45°	1,0h	0,75h	0,5h
75	1,4	0,9	0,7	0,5	0,9	0,3	0,5	2,0
100	2,0	1,3	1,1	0,8	1,3	0,5	0,8	3,4
125	2,6	1,7	1,4	1,1	1,7	0,6	1,1	4,4
150	3,2	2,2	1,8	1,4	2,2	0,8	1,4	5,5
175	3,9	2,6	2,2	1,7	2,6	0,9	1,7	6,6
200	4,6	3,1	2,5	2,0	3,1	1,1	2,0	7,8
250	6,0	4,0	3,3	2,6	4,0	1,4	2,6	10
300	7,4	5,0	4,1	3,2	5,0	1,8	3,2	13
350	8,9	6,0	5,0	3,8	6,0	2,1	3,8	15
400	10	7,0	5,8	4,5	7,0	2,5	4,5	18
450	12	8,1	6,7	5,2	8,1	2,8	5,2	21
500	14	9,2	7,6	5,9	9,2	3,2	5,9	23
600	17	11	9,5	7,3	11	4,0	7,3	29
700	21	14	11	8,8	14	4,8	8,8	35
800	24	16	13	10	16	5,7	10	41
900	28	19	15					
1000	32	21	18					
1200	39	26	22					
1400	47	32	26					
1600	55	37	31					
1800	64	43	36					
2000	72	49	40					

*Cotovelo de 45°, x = 0,5; cotovelo de 60°, x = 0,67

TABELA 6.10 Conversão de velocidade em pressão cinética (condições-padrão*)

p_c	v	p_c	v	p_c	v	p_c	v	p_c	v	p_c	v
0,1	1,28	5,1	9,13	11,0	13,41	61,0	31,58	111,0	42,59	161,0	51,30
0,2	1,81	5,2	9,22	12,0	14,00	62,0	31,83	112,0	42,79	162,0	51,46
0,3	2,21	5,3	9,31	13,0	14,58	63,0	32,09	113,0	42,98	163,0	51,62
0,4	2,56	5,4	9,39	14,0	15,13	64,0	32,34	114,0	43,17	164,0	51,77
0,5	2,86	5,5	9,48	15,0	15,66	65,0	32,59	115,0	43,35	165,0	51,93
0,6	3,13	5,6	9,57	16,0	16,17	66,0	32,84	116,0	43,54	166,0	52,09
0,7	3,38	5,7	9,65	17,0	16,67	67,0	33,09	117,0	43,73	167,0	52,24
0,8	3,62	5,8	9,74	18,0	17,15	68,0	33,34	118,0	43,92	168,0	52,40
0,9	3,84	5,9	9,82	19,0	17,62	69,0	33,58	119,0	44,10	169,0	52,56
1,0	4,04	6,0	9,90	20,0	18,08	70,0	33,82	120,0	44,29	170,0	52,71
1,1	4,24	6,1	9,99	21,0	18,53	71,0	34,07	121,0	44,47	171,0	52,87
1,2	4,43	6,2	10,07	22,0	18,96	72,0	34,30	122,0	44,65	172,0	53,02
1,3	4,61	6,3	10,15	23,0	19,39	73,0	34,54	123,0	44,84	173,0	53,18
1,4	4,78	6,4	10,23	24,0	19,81	74,0	34,78	124,0	45,02	174,0	53,33
1,5	4,95	6,5	10,31	25,0	20,21	75,0	35,01	125,0	45,20	175,0	53,48
1,6	5,11	6,6	10,39	26,0	20,61	76,0	35,24	126,0	45,38	176,0	53,63
1,7	5,27	6,7	10,46	27,0	21,01	77,0	35,48	127,0	45,56	177,0	53,79
1,8	5,42	6,8	10,54	28,0	21,39	78,0	35,71	128,0	45,74	178,0	53,94
1,9	5,57	6,9	10,62	29,0	21,77	79,0	35,93	129,0	45,92	179,0	54,09
2,0	5,72	7,0	10,70	30,0	22,14	80,0	36,16	130,0	46,10	180,0	54,24
2,1	5,85	7,1	10,77	31,0	22,51	81,0	36,39	131,0	46,27	181,0	54,39
2,2	6,00	7,2	10,85	32,0	22,87	82,0	36,61	132,0	46,45	182,0	54,54
2,3	6,13	7,3	10,92	33,0	23,22	83,0	36,83	133,0	46,62	183,0	54,69
2,4	6,26	7,4	11,00	34,0	23,57	84,0	37,05	134,0	46,80	184,0	54,84
2,5	6,39	7,5	11,07	35,0	23,92	85,0	37,27	135,0	46,97	185,0	54,99
2,6	6,52	7,6	11,15	36,0	24,26	86,0	37,49	136,0	47,15	186,0	55,14
2,7	6,64	7,7	11,22	37,0	24,59	87,0	37,71	137,0	47,32	187,0	55,28
2,8	6,76	7,8	11,29	38,0	24,92	88,0	37,93	138,0	47,49	188,0	55,43
2,9	6,88	7,9	11,36	39,0	25,25	89,0	38,14	139,0	47,66	189,0	55,58
3,0	7,00	8,0	11,43	40,0	25,57	90,0	38,35	140,0	47,84	190,0	55,73
3,1	7,12	8,1	11,51	41,0	25,89	91,0	38,57	141,0	48,01	200,0	57,17
3,2	7,23	8,2	11,58	42,0	26,20	92,0	38,78	142,0	48,18	210,0	58,59
3,3	7,34	8,3	11,65	43,0	26,51	93,0	38,99	143,0	48,35	220,0	59,96
3,4	7,45	8,4	11,72	44,0	26,82	94,0	39,20	144,0	48,51	230,0	61,31
3,5	7,56	8,5	11,79	45,0	27,12	95,0	39,40	145,0	48,68	240,0	62,63
3,6	7,67	8,6	11,86	46,0	27,42	96,0	39,61	146,0	48,85	250,0	63,92
3,7	7,78	8,7	11,92	47,0	27,72	97,0	39,82	147,0	49,02	260,0	65,19
3,8	7,88	8,8	11,99	48,0	28,01	98,0	40,02	148,0	49,18	270,0	66,43
3,9	7,98	8,9	12,06	49,0	28,30	99,0	40,23	149,0	49,35	280,0	67,65
4,0	8,09	9,0	12,13	50,0	28,59	100,0	40,43	150,0	49,51	290,0	68,85
4,1	8,19	9,1	12,20	51,0	28,87	101,0	40,63	151,0	49,68	300,0	70,02
4,2	8,29	9,2	12,26	52,0	29,15	102,0	40,83	152,0	49,84	310,0	71,18
4,3	8,38	9,3	12,33	53,0	29,43	103,0	41,03	153,0	50,01	320,0	72,32
4,4	8,48	9,4	12,40	54,0	29,71	104,0	41,23	154,0	50,17	330,0	73,44
4,5	8,58	9,5	12,46	55,0	29,98	105,0	41,43	155,0	50,33	340,0	74,55
4,6	8,67	9,6	12,53	56,0	30,25	106,0	41,62	156,0	50,49	350,0	75,63
4,7	8,76	9,7	12,59	57,0	30,52	107,0	41,82	157,0	50,66	360,0	76,71
4,8	8,86	9,8	12,66	58,0	30,79	108,0	42,01	158,0	50,82	370,0	77,77
4,9	8,95	9,9	12,72	59,0	31,05	109,0	42,21	159,0	50,98	380,0	78,81
5,0	9,04	10,0	12,78	60,0	31,32	110,0	42,40	160,0	51,14	390,0	79,84

* $v = 4,043\sqrt{p_c}$; massa específica do ar = 1,2 kg/m³; (p_c é a pressão cinética, em mm de H₂O, e v é a velocidade, em m/s)

TABELA 6.11 Conversão de velocidade e vazão

pés/min	m/s	pés/min	m/s	pés/min	m/s	pés/min	m/s	pés/min	m/s
100	0,508	2 000	10,16	4 000	20,32	6 000	30,48	8 000	40,64
150	0,762	2 100	10,67	4 100	20,83	6 100	30,99	8 100	41,15
200	1,016	2 200	11,18	4 200	21,33	6 200	31,49	8 200	41,65
300	1,524	2 300	11,68	4 300	21,84	6 300	32,00	8 300	42,16
400	2,032	2 400	12,19	4 400	22,35	6 400	32,51	8 400	42,67
500	2,540	2 500	12,70	4 500	22,86	6 500	33,02	8 500	43,18
600	3,048	2 600	13,21	4 600	23,37	6 600	33,53	8 600	43,69
700	3,556	2 700	13,72	4 700	23,87	6 700	34,03	8 700	44,19
800	4,064	2 800	14,22	4 800	24,38	6 800	34,54	8 800	44,70
900	4,572	2 900	14,73	4 900	24,89	6 900	35,05	8 900	45,21
1 000	5,080	3 000	15,24	5 000	25,40	7 000	35,56	9 000	45,72
1 100	5,588	3 100	15,75	5 100	25,91	7 100	36,07	9 100	46,23
1 200	6,095	3 200	16,26	5 200	26,41	7 200	36,57	9 200	46,73
1 300	6,604	3 300	16,76	5 300	26,92	7 300	37,08	9 300	47,24
1 400	7,112	3 400	17,27	5 400	27,43	7 400	37,59	9 400	47,75
1 500	7,620	3 500	17,78	5 500	27,94	7 500	38,10	9 500	48,26
1 600	8,128	3 600	18,29	5 600	28,45	7 600	38,61	9 600	48,77
1 700	8,636	3 700	18,80	5 700	28,95	7 700	39,11	9 700	49,27
1 800	9,144	3 800	19,30	5 800	29,46	7 800	39,62	9 800	49,78
1 900	9,652	3 900	19,81	5 900	29,97	7 900	40,13	9 900	50,29

pés ³ /min	m ³ /s	pés ³ /min	m ³ /s	pés ³ /min	m ³ /s	pés ³ /min	m ³ /s	pés ³ /min	m ³ /s
100	0,0471	300	0,1415	500	0,2359	1 500	0,7079	3 500	1,651
110	0,0519	310	0,1463	550	0,2595	1 600	0,7551	3 600	1,699
120	0,0566	320	0,1510	600	0,2831	1 700	0,8023	3 700	1,746
130	0,0613	330	0,1557	650	0,3067	1 800	0,8495	3 800	1,793
140	0,0660	340	0,1604	700	0,3303	1 900	0,8967	3 900	1,840
150	0,0707	350	0,1651	750	0,3539	2 000	0,9438	4 000	1,887
160	0,0755	360	0,1699	800	0,3775	2 100	0,9910	4 100	1,934
170	0,0802	370	0,1746	850	0,4011	2 200	1,038	4 200	1,982
180	0,0849	380	0,1793	900	0,4247	2 300	1,085	4 300	2,029
190	0,0896	390	0,1840	950	0,4483	2 400	1,132	4 400	2,076
200	0,0943	400	0,1887	1 000	0,4719	2 500	1,179	4 500	2,123
210	0,0991	410	0,1934	1 050	0,4955	2 600	1,227	4 600	2,170
220	0,1038	420	0,1982	1 100	0,5191	2 700	1,274	4 700	2,218
230	0,1085	430	0,2029	1 150	0,5427	2 800	1,321	4 800	2,265
240	0,1132	440	0,2076	1 200	0,5663	2 900	1,368	4 900	2,312
250	0,1179	450	0,2123	1 250	0,5899	3 000	1,415	5 000	2,359
260	0,1227	460	0,2170	1 300	0,6135	3 100	1,463	5 100	2,406
270	0,1274	470	0,2218	1 350	0,6371	3 200	1,510	5 200	2,454
280	0,1321	480	0,2265	1 400	0,6607	3 300	1,557	5 300	2,501
290	0,1368	490	0,2312	1 450	0,6843	3 400	1,604	5 400	2,548

TABELA 6.12 Área e circunferência de círculos

Diâm. (cm)	Área (m ²)	Circ. (cm)	Diâm. (cm)	Área (m ²)	Circ. (cm)	Diâm. (cm)	Área (m ²)	Circ. (cm)
1	0,000079	3,142	42	0,1385	131,9	122	1,169	383,3
2	0,000314	6,283	44	0,1521	138,2	124	1,208	389,6
3	0,000707	9,425	46	0,1662	144,5	126	1,247	395,8
4	0,001257	12,57	48	0,1810	150,8	128	1,287	402,1
5	0,001963	15,71	50	0,1963	157,1	130	1,327	408,4
6	0,002827	18,85	52	0,2124	163,4	132	1,368	414,7
7	0,003848	21,99	54	0,2290	169,6	134	1,410	421,0
8	0,005027	25,13	56	0,2463	175,9	136	1,453	427,3
9	0,006362	28,27	58	0,2642	182,2	138	1,496	433,5
10	0,007854	31,42	60	0,2827	188,5	140	1,539	439,8
11	0,009503	34,56	62	0,3019	194,8	142	1,584	446,1
12	0,01131	37,70	64	0,3217	201,1	144	1,629	452,4
13	0,01327	40,84	66	0,3421	207,3	146	1,674	458,7
14	0,01539	43,98	68	0,3632	213,6	148	1,720	465,0
15	0,01767	47,12	70	0,3848	219,9	150	1,767	471,2
16	0,02011	50,27	72	0,4071	226,2	152	1,815	477,5
17	0,02270	53,41	74	0,4301	232,5	154	1,863	483,8
18	0,02545	56,55	76	0,4536	238,8	156	1,911	490,1
19	0,02835	59,69	78	0,4778	245,0	158	1,961	496,4
20	0,03142	62,83	80	0,5027	251,3	160	2,011	502,7
21	0,03464	65,97	82	0,5281	257,6	162	2,061	508,9
22	0,03801	69,11	84	0,5542	263,9	164	2,112	515,2
23	0,04155	72,26	86	0,5809	270,2	166	2,164	521,5
24	0,04524	75,40	88	0,6082	276,5	168	2,217	527,8
25	0,04909	78,54	90	0,6362	282,7	170	2,270	534,1
26	0,05309	81,68	92	0,6648	289,0	172	2,324	540,4
27	0,05726	84,82	94	0,6940	295,3	174	2,378	546,6
28	0,06158	87,96	96	0,7238	301,6	176	2,433	552,9
29	0,06605	91,11	98	0,7543	307,9	178	2,488	559,2
30	0,07069	94,25	100	0,7854	314,2	180	2,545	565,5
31	0,07548	97,39	102	0,8171	320,4	182	2,602	571,8
32	0,08042	100,5	104	0,8495	326,7	184	2,659	578,1
33	0,08553	103,7	106	0,8825	333,0	186	2,717	584,3
34	0,09079	106,8	108	0,9161	339,3	188	2,776	590,6
35	0,09621	110,0	110	0,9503	345,6	190	2,835	596,9
36	0,1018	113,1	112	0,9852	351,9	192	2,895	603,2
37	0,1075	116,2	114	1,021	358,1	194	2,956	609,5
38	0,1134	119,4	116	1,057	364,4	196	3,017	615,8
39	0,1195	122,5	118	1,094	370,7	198	3,079	622,0
40	0,1257	125,7	120	1,131	377,0	200	3,142	628,3

TABELA 6.13 Fator de correção de densidade

Temperatura (°C)	Altitudes (metros acima do nível do mar)								
	0	250	500	750	1 000	1 250	1 500	1 750	2 000
0	1,08	1,05	1,02	0,99	0,96	0,93	0,90	0,87	0,85
21	1,00	0,97	0,94	0,91	0,89	0,86	0,83	0,81	0,78
50	0,91	0,88	0,86	0,83	0,81	0,78	0,76	0,74	0,71
75	0,84	0,82	0,80	0,77	0,75	0,73	0,71	0,68	0,66
100	0,79	0,77	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62
125	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58
150	0,69	0,67	0,65	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,55
175	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,55	0,53	0,51
200	0,62	0,60	0,59	0,57	0,55	0,53	0,52	0,50	0,49
225	0,59	0,57	0,56	0,54	0,52	0,51	0,49	0,48	0,46
250	0,56	0,55	0,53	0,51	0,50	0,48	0,47	0,45	0,44
275	0,54	0,52	0,51	0,49	0,48	0,46	0,45	0,43	0,42
300	0,51	0,50	0,48	0,47	0,45	0,44	0,43	0,42	0,40
325	0,49	0,48	0,46	0,45	0,44	0,42	0,41	0,40	0,39
350	0,47	0,46	0,44	0,43	0,42	0,41	0,39	0,38	0,37
375	0,45	0,44	0,43	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36
400	0,44	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,36	0,35	0,34
425	0,42	0,41	0,40	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33
450	0,41	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32
475	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31
500	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30

$\text{kg/m}^3 = \text{fator de densidade} \times 1,2$. Ar seco, pesado a 21 °C e ao nível do mar = $1,2 \text{ kg/m}^3$.
A perda de carga varia diretamente com a densidade (aproximadamente).

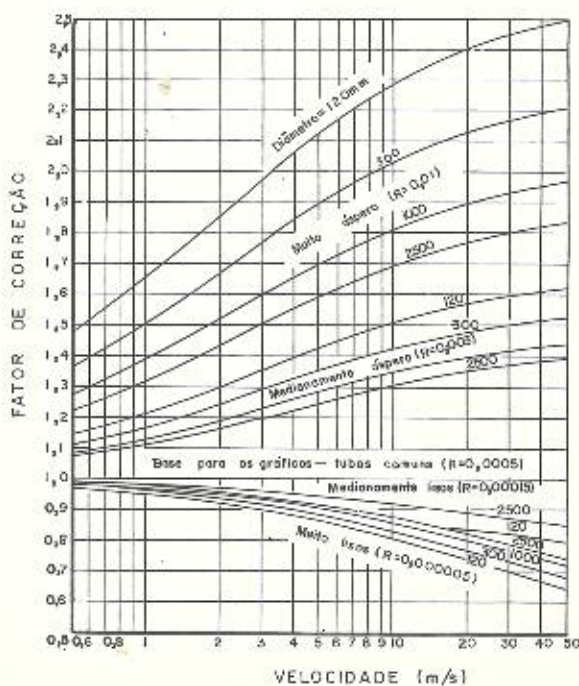


FIGURA 6.25 Fator de correção de rugosidade

TABELA 6.14 Velocidade cinética para diferentes velocidades (ar padrão)

p_c	v	p_c	v	p_c	v	p_c	v	p_c	v	p_c	v
0,01	400	0,52	2 888	1,03	4 064	1,54	4 970	2,05	5 734	3,10	7 051
0,02	566	0,53	2 916	1,04	4 084	1,55	4 986	2,06	5 748	3,20	7 164
0,03	694	0,54	2 943	1,05	4 103	1,56	5 002	2,07	5 762	3,30	7 275
0,04	801	0,55	2 970	1,06	4 123	1,57	5 018	2,08	5 776	3,40	7 385
0,05	896	0,56	2 997	1,07	4 142	1,58	5 034	2,09	5 790	3,50	7 492
0,06	981	0,57	3 024	1,08	4 162	1,59	5 050	2,10	5 804	3,60	7 599
0,07	1 060	0,58	3 050	1,09	4 181	1,60	5 066	2,11	5 817	3,70	7 704
0,08	1 133	0,59	3 076	1,10	4 200	1,61	5 082	2,12	5 831	3,80	7 807
0,09	1 201	0,60	3 102	1,11	4 219	1,62	5 098	2,13	5 845	3,90	7 909
0,10	1 266	0,61	3 127	1,12	4 238	1,63	5 114	2,14	5 859	4,00	8 010
0,11	1 328	0,62	3 153	1,13	4 257	1,64	5 129	2,15	5 872	4,10	8 109
0,12	1 387	0,63	3 179	1,14	4 276	1,65	5 144	2,16	5 886	4,20	8 208
0,13	1 444	0,64	3 204	1,15	4 295	1,66	5 160	2,17	5 899	4,30	8 305
0,14	1 498	0,65	3 229	1,16	4 314	1,67	5 175	2,18	5 913	4,40	8 401
0,15	1 551	0,66	3 254	1,17	4 332	1,68	5 191	2,19	5 927	4,50	8 496
0,16	1 602	0,67	3 279	1,18	4 350	1,69	5 206	2,20	5 940	4,60	8 590
0,17	1 651	0,68	3 303	1,19	4 368	1,70	5 222	2,21	5 954	4,70	8 683
0,18	1 699	0,69	3 327	1,20	4 386	1,71	5 237	2,22	5 967	4,80	8 774
0,19	1 746	0,70	3 351	1,21	4 405	1,72	5 253	2,23	5 981	4,90	8 865
0,20	1 791	0,71	3 375	1,22	4 423	1,73	5 268	2,24	5 994	5,00	8 955
0,21	1 835	0,72	3 398	1,23	4 442	1,74	5 283	2,25	6 008	5,10	9 044
0,22	1 879	0,73	3 422	1,24	4 460	1,75	5 298	2,26	6 021	5,20	9 133
0,23	1 921	0,74	3 445	1,25	4 478	1,76	5 313	2,27	6 034	5,30	9 220
0,24	1 962	0,75	3 468	1,26	4 495	1,77	5 328	2,28	6 047	5,40	9 307
0,25	2 003	0,76	3 491	1,27	4 513	1,78	5 343	2,29	6 061	5,50	9 392
0,26	2 042	0,77	3 514	1,28	4 531	1,79	5 359	2,30	6 074	5,60	9 477
0,27	2 081	0,78	3 537	1,29	4 549	1,80	5 374	2,31	6 087	5,70	9 562
0,28	2 119	0,79	3 560	1,30	4 566	1,81	5 388	2,32	6 100	5,80	9 645
0,29	2 157	0,80	3 582	1,31	4 583	1,82	5 403	2,33	6 113	5,90	9 728
0,30	2 193	0,81	3 604	1,32	4 601	1,83	5 418	2,34	6 128	6,00	9 810
0,31	2 230	0,82	3 625	1,33	4 619	1,84	5 433	2,35	6 140	6,10	9 891
0,32	2 260	0,83	3 657	1,34	4 636	1,85	5 447	2,36	6 153	6,20	9 972
0,33	2 301	0,84	3 669	1,35	4 653	1,86	5 462	2,37	6 166	6,30	10 052
0,34	2 335	0,85	3 690	1,36	4 671	1,87	5 477	2,38	6 179	6,40	10 132
0,35	2 369	0,86	3 709	1,37	4 688	1,88	5 491	2,39	6 192	6,50	10 210
0,36	2 403	0,87	3 729	1,38	4 705	1,89	5 506	2,40	6 205	6,60	10 289
0,37	2 436	0,88	3 758	1,39	4 722	1,90	5 521	2,41	6 217	6,70	10 366
0,38	2 469	0,89	3 779	1,40	4 737	1,91	5 535	2,42	6 230	6,80	10 444
0,39	2 501	0,90	3 800	1,41	4 756	1,92	5 550	2,43	6 243	6,90	10 520
0,40	2 533	0,91	3 821	1,42	4 773	1,93	5 564	2,44	6 256	7,00	10 596
0,41	2 563	0,92	3 842	1,43	4 790	1,94	5 579	2,45	6 269	7,50	10 968
0,42	2 595	0,93	3 863	1,44	4 806	1,95	5 593	2,46	6 282	8,00	11 328
0,43	2 626	0,94	3 884	1,45	4 823	1,96	5 608	2,47	6 294	8,50	11 676
0,44	2 656	0,95	3 904	1,46	4 840	1,97	5 623	2,48	6 307	9,00	12 015
0,45	2 687	0,96	3 924	1,47	4 856	1,98	5 637	2,49	6 320	9,50	12 344
0,46	2 716	0,97	3 945	1,48	4 873	1,99	5 651	2,50	6 332	10,00	12 665
0,47	2 746	0,98	3 965	1,49	4 889	2,00	5 664	2,60	6 458	11,00	13 283
0,48	2 775	0,99	3 985	1,50	4 905	2,01	5 678	2,70	6 581	12,00	13 874
0,49	2 804	1,00	4 005	1,51	4 921	2,02	5 692	2,80	6 702	13,00	14 440
0,50	2 832	1,01	4 025	1,52	4 938	2,03	5 706	2,90	6 820	13,61	14 775
0,51	2 860	1,02	4 045	1,53	4 954	2,04	5 720	3,00	6 937	14,00	14 986

$v = 4 005 \sqrt{p_c}$, sendo v em pés/min e p_c em pol H_2O

TABELA 6.15 Área e circunferência de círculos

Diâmetro (pol)	Área		Circunferência		Diâmetro (pol)	Área		Circunferência	
	pol ²	pés ²	pol	pés		pol ²	pés ²	pol	pés
1	0,7854	0,0054	3,1416	0,2618	30	706,8	4,909	94,25	7,854
1 1/2	1,767	,0123	4,712	,3927	31	754,7	5,241	97,39	8,116
2	3,14	,0218	6,28	,5236	32	804,2	5,585	100,5	8,376
2 1/2	4,910	,0341	7,854	,6544	33	855,3	5,940	103,7	8,639
3	7,07	,0491	9,42	,7854	34	907,9	6,305	106,8	8,901
3 1/2	9,620	,0668	11,00	,9164	35	962,1	6,611	109,9	9,163
4	12,57	,0873	12,57	1,047	36	1 017,8	7,069	113,1	9,425
4 1/2	15,90	,1105	14,14	1,178	37	1 075,2	7,467	116,2	9,686
5	19,63	,1364	15,71	1,309	38	1 134,1	7,876	119,4	9,948
5 1/2	23,76	,1650	17,28	1,439	39	1 194,5	8,296	122,5	10,20
6	28,27	,1964	18,85	1,571	40	1 256,6	8,727	125,7	10,47
6 1/2	33,18	,2305	20,42	1,702	41	1 320,2	9,168	128,8	10,73
7	38,48	,2673	21,99	1,833	42	1 385,4	9,621	131,9	10,99
7 1/2	44,18	,3068	23,56	1,964	43	1 452,2	10,08	135,1	11,26
8	50,27	,3491	25,13	2,094	44	1 520,5	10,56	138,2	11,52
8 1/2	56,75	,3940	26,70	2,225	45	1 590,4	11,04	141,4	11,78
9	63,62	,4418	28,27	2,356	46	1 661,9	11,54	144,5	12,04
9 1/2	70,88	,4923	29,85	2,487	47	1 734,9	12,05	147,6	12,30
10	78,54	,5454	31,42	2,618	48	1 809,5	12,57	150,8	12,57
11	95,03	,6000	34,56	2,880	49	1 885,7	13,10	153,9	12,83
12	113,1	,7854	37,70	3,142	50	1 963,5	13,64	157,1	13,09
13	132,7	,9218	40,84	3,403	51	2 042	14,19	160,2	13,35
14	153,9	1,069	43,98	3,665	52	2 124	14,75	163,4	13,61
15	176,7	1,227	47,12	3,927	53	2 206	15,32	166,5	13,88
16	201,0	1,396	50,26	4,189	54	2 290	15,90	169,6	14,14
17	226,9	1,576	53,41	4,451	56	2 463	17,10	175,9	14,66
18	254,4	1,767	56,55	4,712	58	2 642	18,35	182,2	15,18
19	283,5	1,969	59,69	4,974	60	2 827	19,63	188,5	15,71
20	314,1	2,182	62,83	5,236	62	3 019	20,97	194,8	16,33
21	346,3	2,405	65,97	5,498	64	3 217	22,34	201,1	16,76
22	380,1	2,640	69,11	5,760	66	3 421	23,76	207,3	17,28
23	415,4	2,885	72,26	6,021	68	3 632	25,22	213,6	17,80
24	452,3	3,142	75,40	6,283	70	3 848	26,73	219,9	18,33
25	490,8	3,409	78,54	6,545	72	4 072	28,27	226,2	18,85
26	530,9	3,687	81,68	6,807	74	4 301	29,87	232,5	19,37
27	572,5	3,976	84,82	7,069	76	4 536	31,50	238,8	19,90
28	615,7	4,276	87,96	7,330	78	4 778	33,18	245,0	20,42
29	660,5	4,587	91,11	7,592	80	5 027	34,91	251,3	20,94

TABELA 6.15 (Continuação)

		Fator de correção de densidade											
Altitude (pés)	Nível do mar	1 000	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000	8 000	9 000	10 000	
		Barômetro	"Hg	31,02	29,92	28,86	27,82	26,82	25,84	24,90	23,98	23,09	22,22
	"H ₂ O	422,2	407,5	392,8	378,6	365,0	351,7	338,9	326,4	314,3	302,1	291,1	280,1
Temperatura do ar (°F)	40	1,31	1,26	1,22	1,17	1,13	1,09	1,05	1,01	0,97	0,93	0,90	0,87
	0	1,19	1,15	1,11	1,07	1,03	0,99	0,95	0,91	0,89	0,85	0,82	0,79
	-40	1,10	1,06	1,02	0,99	0,95	0,92	0,88	0,85	0,82	0,79	0,76	0,73
	70	1,04	1,00	0,96	0,93	0,89	0,86	0,83	0,80	0,77	0,74	0,71	0,69
	100	0,98	0,95	0,92	0,88	0,85	0,81	0,78	0,75	0,73	0,70	0,68	0,65
	150	0,90	0,87	0,84	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,67	0,65	0,62	0,60
	200	0,83	0,80	0,77	0,74	0,71	0,69	0,66	0,64	0,62	0,60	0,57	0,55
	250	0,77	0,75	0,72	0,70	0,67	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54	0,51
	300	0,72	0,70	0,67	0,65	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48
	350	0,68	0,65	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,51	0,49	0,47	0,45
	400	0,64	0,62	0,60	0,57	0,55	0,53	0,51	0,49	0,48	0,46	0,44	0,42
	450	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46	0,45	0,43	0,42	0,40
	500	0,57	0,55	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45	0,44	0,43	0,41	0,39	0,38
	550	0,54	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45	0,44	0,43	0,41	0,39	0,38	0,36
	600	0,52	0,50	0,48	0,46	0,45	0,43	0,41	0,40	0,39	0,37	0,35	0,34
	700	0,47	0,46	0,44	0,43	0,41	0,39	0,38	0,37	0,35	0,34	0,33	0,32
800	0,44	0,42	0,40	0,39	0,37	0,36	0,35	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	
900	0,40	0,39	0,37	0,36	0,35	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27	
1 000	0,37	0,36	0,35	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25	

Densidade do ar a 70 °F no nível do mar = 0,075 lb/ft³

VENTILAÇÃO DE PROCESSOS, OPERAÇÕES E EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

INTRODUÇÃO

A American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), mantém um comitê de ventilação industrial que, desde 1951, vem publicando e revisando o *Manual of Industrial Ventilation* no qual a ventilação de processos e operações industriais é exaustivamente abordada quanto aos tipos de captadores empregados, aos requisitos de vazão de controle e aos requisitos de energia (perda de carga). Nenhuma outra publicação do campo fornece tal profusão, qualidade e praticidade de dados e informações, muitas delas concluídas a partir de experimentos que obtiveram resultados práticos satisfatórios, fatos esses que aconselham e até mesmo exigem o conhecimento de seu conteúdo por profissionais e engenheiros que, direta ou indiretamente, trabalhem com ventilação industrial.

Fundamentalmente por essa razão é que neste item estaremos transcrevendo quase na íntegra o conteúdo da Seção 5 do referido manual, devidamente traduzido para a língua portuguesa, pois acreditamos que será enorme a contribuição da ACGIH ao campo da ventilação industrial.

A Seção 5 fornece informações necessárias sobre captadores, vazões de controle e perdas de carga para promover a adequada ventilação de um grande número de processos, operações e equipamentos industriais que emitem contaminantes para a atmosfera.

CETEC - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

VENTILAÇÃO — CASOS ESPECIAIS

INTRODUÇÃO

Neste item serão abordados alguns casos particulares de ventilação industrial nos quais há necessidade de alguns conhecimentos adicionais, teóricos e práticos, que visam possibilitar melhores condições de avaliação e projeto, evitando dessa forma que a utilização das técnicas mais gerais da ventilação levem a um projeto menos eficiente. Consideraremos cinco casos especiais, a saber, ventilação de processos quentes, ventilação de operações de manipulação e transporte de material fragmentado, ventilação sopro-exaustora, ventilação de tanques para tratamento químico, termoquímico e eletroquímico de superfícies metálicas e sistemas de alta pressão.

VENTILAÇÃO DE PROCESSOS QUENTES

Processos e operações realizados a alta temperatura, muito comuns na indústria, por provocarem o aquecimento do ar circunvizinho, causam a movimentação ascensional de massas de ar, carreando os contaminantes que, em sua movimentação, provocam a entrada de quantidades adicionais de ar ambiente no fluxo ascensional. Com a introdução dessas quantidades adicionais de ar o fluxo ascensional tende a entrar em equilíbrio térmico com o ar ambiente, perdendo essa sua tendência ascensional, mas já então os contaminantes estarão dispersos numa enorme massa de ar. Esse fato faz com que as vazões de controle usualmente recomendadas sejam insuficientes para ventilar processos quentes, havendo necessidade de maiores vazões para exaurir a massa de ar adicional induzida. A Fig. 6.26 esquematiza esse fato.

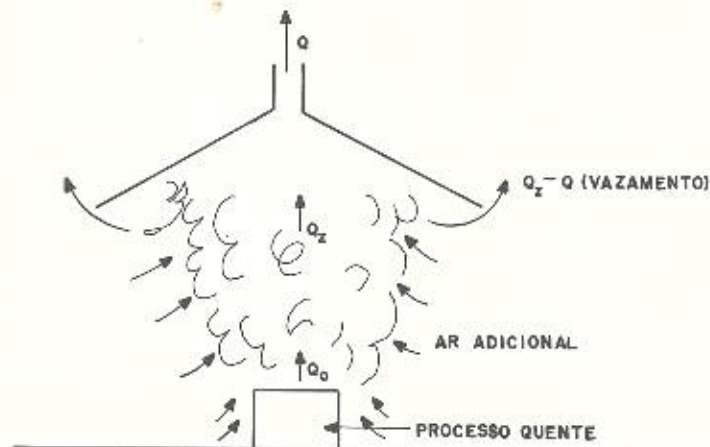


FIGURA 6.26 Ventilação de processo quente

Torna-se, pois, necessário o cálculo da quantidade de ar induzido (Q_0) até o topo do processo quente, para efeito de ventilação neste nível, e da quantidade de ar induzido pelo fluxo ascensional (Q_2) para propósitos de ventilação com coifas altas. Alguns enfoques teóricos e experimentais têm sido tentados para estimar esses valores e, ainda que não forneçam resultados com grande

exatidão, ao menos possibilitam o conhecimento aproximado dessas vazões, informação imprescindível para evitar ventilação insuficiente.

Hemcon sugere que, para o cálculo de fluxos de ar próximo a superfícies quentes, se chamarmos de



p_a a pressão ascensional dos gases (pés),
 $g_f = 1$ a gravidade específica do ar frio,
 g_q a gravidade específica média do ar quente,
 h a altura da coluna ascendente (pés),

podemos escrever,

$$p_a = h(1 - g_q) \quad (6.23)$$

e, sendo, T_f e T_q as temperaturas absolutas do ar frio e quente, respectivamente,

$$g_q = T_f/T_q, \quad (6.24)$$

teremos

$$p_a = h[1 - T_f/T_q], \quad (6.25)$$

se v é a velocidade ascensional dos gases,

$$v = \sqrt{2gp_a} = \sqrt{2gh(1 - T_f/T_q)}. \quad (6.26)$$

Convertendo a velocidade de pés por segundo para pés por minuto e substituindo $g = 32,2$,

$$v \cong 480 \sqrt{h \frac{(T_q - T_f)}{T_q}}. \quad (6.27)$$

O calor sensível cedido ao fluxo gasoso (C_{ced}), sendo Q_0 sua vazão no topo da fonte de calor, é dado por:

$$C_{ced} = \rho_q Q_0 C_{esp} (T_0 - T_f) \text{ Btu/min}, \quad (6.28)$$

sendo C_{esp} o calor específico, $\cong 0,24$, e T_0 a temperatura do ar no topo da coluna. Em temperatura absoluta,

$$C_{ced} = \rho_q \times Q_0 \times 0,24 \times (T_0 - T_f). \quad (6.29)$$

Para utilização dessas equações na prática, há necessidade de eliminar T_q . Rearranjando a equação (6.27), temos

$$T_q - T_f = \left(\frac{v}{480}\right)^2 \frac{T_q}{h}. \quad (6.30)$$

Sendo A a área transversal do fluxo de ar,

$$T_q - T_f = \left[\frac{Q_0}{480A}\right]^2 \frac{T_q}{h}. \quad (6.31)$$

Sabe-se que T_q (variável com h) é diferente de T_0 . No entanto o erro cometido fazendo-se $T_q = T_0$ é aceitável para os propósitos dessa dedução e, portanto, (6.29) e (6.31) fornecem

$$C_{ced} = \rho_q \times Q_0 \times 0,24 \times \frac{Q_0^2}{A^2} \times \frac{T_q}{(480)^2 \times h}; \quad (6.32)$$

transpondo-se,

$$Q_0^3 = \frac{(480)^2 \times h \times C_{ced} \times A^2}{0,24 \times T_q \times \rho_q}, \quad (6.33)$$

e fazendo-se a densidade do ar ambiente

$$\rho_a = 0,075 \text{ lb/pé}^3,$$

$$T_f = 530 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$\rho_q = 0,075 \frac{T_f}{T_q} = \frac{39,75}{T_q}$$

$$Q_0^3 = \frac{(480)^2 \times C_{ced} \times h \times A^2}{0,24 \times 39,75} = 24\,151 A^2 C_{ced} h, \quad (6.34)$$

ou

$$Q_0 = 29 \sqrt[3]{A^2 C_{ced} h}. \quad (6.35)$$

TABELA 6.16 Dados para cálculo de Q_0

Forma ou disposição da superfície quente		k_c
Pratos verticais ($h > 2$ pés)	h = altura do prato	$0,3(\Delta T)^{1/4}$
	l = largura do prato	
	$A \cong h \times l \times \text{tg } 5^\circ$	
Pratos verticais ($h < 2$ pés)	h = altura do prato	$0,28 \left(\frac{\Delta T}{h}\right)^{1/4}$
	l = largura do prato	
	$A \cong h \times l \times \text{tg } 5^\circ$	
Pratos horizontais com face para cima	d_p = diâmetro do prato	$0,38(\Delta T)^{1/4}$
	$A \cong \pi h^2/4$	
Pratos horizontais com face para baixo	d_p = diâmetro do prato	$0,2(\Delta T)^{1/4}$
	$A \cong \pi h^2/4$	
Cilindro horizontal d = diâmetro (pol)	$d_p = d$	$0,42 \left(\frac{\Delta T}{d}\right)^{1/4}$
	L = comprimento do cilindro	
	$A \cong L \times d$ (sobre laterais planas, cujo cálculo é igual a pratos verticais)	
Cilindro vertical ($L > 2$ pés) d = diâmetro (pol)	L = comprimento do cilindro	$0,4 \left(\frac{\Delta T}{d}\right)^{1/4}$
	$h = L$	
	$A \cong 0,275dL + 0,024L^2$ (superfície lateral)	
	$A \cong \pi d^2/4$ (topo)	
*Para cilindros verticais $L < 2$ pés, deve-se multiplicar k_c pelos fatores (F) (Btu/min)		
$C_{ced} = \frac{k_c}{60} A_s \Delta T$	$L = 0,1$ pé $F = 3,5$ $L = 0,4$ $F = 1,7$ $L = 0,2$ $F = 2,5$ $L = 0,5$ $F = 1,5$ $L = 0,3$ $F = 2,0$ $L = 1,0$ $F = 1,1$	
	k_c = coeficiente de convecção (Btu/h pé ² °F)	
	A_s = área da superfície quente (pé ²)	
	$\Delta T = T_s - T_a$ (°F)	

Hemcon (2) comenta os resultados fornecidos pela equação (6.35), quando comparados com valores experimentais encontrados por vários pesquisadores, e conclui por admitir como adequada a estimativa fornecida pela equação, principalmente por segurança, uma vez que a vazão é superestimada pela equação (6.35).

A dificuldade principal no uso prático da equação (6.35) reside na determinação de A , C_{ced} e h . Em função de estudos experimentais, em alguns casos, pode-se calcular Q_0 pelos dados da Tab. 6.16.

APLICAÇÕES IMEDIATAS

Exaustão de processos quentes com coifa baixa

Nos casos onde se pretende instalar uma coifa acima de uma superfície aquecida horizontal a ser ventilada, a uma altura não superior a 3 pés pode-se utilizar a equação (6.35) de imediato, pois Q_2 , a vazão na entrada da coifa, será apenas levemente maior do que Q_0 , e A_s , área da superfície horizontal aquecida, é aproximadamente igual a área do fluxo ascendente A . Da Tab. 6.16 podemos tirar

$$C_{ced} = \frac{k_c}{60} A_s \Delta T \text{ (Btu/min)}, \quad (6.36)$$

$$k_c = 0,38(\Delta T)^{1/4}, \quad (6.37)$$

(6.36) e (6.37) fornecem

$$C_{ced} = \frac{0,38}{60} A_s (\Delta T)^{5/4}, \quad (6.38)$$

substituindo (6.38) em (6.35)

$$Q_0/A_s \cong 5,4 \sqrt[3]{h(\Delta T)^{5/2}}. \quad (6.39)$$

Tanques de vapor

Outra aplicação imediata é possível no caso de tanques de água quente, onde o calor é oriundo de vapor que dele se desprende. Nesse caso, se

$$G = \text{lb/vapor por minuto por pé}^2 \text{ de tanque,}$$

$$C_{lat} = \text{calor latente} \cong 1000 \text{ Btu/lb,}$$

podemos calcular (C_{ced}) por

$$C_{ced} = C_{lat} G A_s = 1000 G A_s; \quad (6.40)$$

substituindo (6.40) em (6.35),

$$Q_0/A_s = 290 \sqrt[3]{Gh}. \quad (6.41)$$

Vale mais uma vez ressaltar que essas equações apesar de muito úteis para estimar a vazão de amostragem, carecem de confirmação experimental.

OUTRAS APLICAÇÕES

Grandes coifas baixas sobre pequenas fontes quentes

Nesse caso, trata-se da utilização de coifas grandes, instaladas para ventilar pequenas fontes quentes, diferentemente dos casos já abordados, onde as di-



FIGURA 6.27 Esquema da ventilação de pequenas fontes quentes usando grandes coifas

mensões (área) da coifa eram da mesma ordem de grandeza das dimensões (A_f) da fonte. Na Fig. 6.27, o presente caso está esquematizado.

O escape de contaminantes pelos cantos da coifa pode ser evitado pela utilização de um captor de grande profundidade que possibilite uma ação de estoque dentro dele, ou fazendo-se $Q > Q_z$, de forma a provocar uma velocidade de captura na face da coifa não-ocupada pelo fluxo ascendente, ou seja

$$Q = Q_z + vA_f, \quad (6.42)$$

onde v é a velocidade na face da coifa (100-200 pés/min) e A_f a área da face da coifa não-ocupada pelo fluxo ascensional de ar quente.

Coifas altas

Aproveitando dados experimentais, Sutton derivou uma relação para a variação na velocidade do fluxo com a altura acima da fonte de calor. A Fig. 6.28 esquematiza o problema em questão. Sutton propôs

$$v = KL^{-M/6}, \quad (6.43)$$

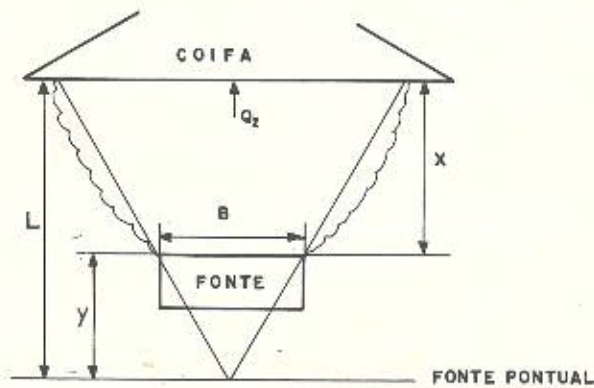


FIGURA 6.28 Fluxo ascendente em relação à fonte pontual teórica

onde v é a velocidade do fluxo ascendente (pés/s), K constante, função de C_{conv} , e M constante = 1,75, segundo Sutton, sendo,

$$K = \left(\frac{7gC_{conv}}{10\,800\pi C_{esp}\rho T_f k} \right)^{1/3}, \quad (6.44)$$

g = constante gravitacional = 32,174 (pés/s²),

L = distância acima da fonte puntual (pés),

C_{conv} = calor convectivo fornecido pela fonte e levado pelo fluxo ascendente (Btu/h),

C_{esp} = calor específico do ar à pressão constante (Btu/lb/°F),

ρ = densidade do ar ambiente (lb/pé³),

T_f = temperatura do ar ambiente (°R),

k = coeficiente de mistura por turbulência = 0,17 (pés)^{1/8}, e que

$$r = 1,5 kL^{M/2} = d/2, \quad (6.45)$$

onde $d/2 = r$, que é o raio da seção transversal do fluxo ascendente (em pés). Em unidade inglesas, e a 70 °F e 1 atm,

$$K = \left(\frac{7 \times 32,174 C_{conv}}{10\,800\pi \times 0,24 \times 0,075 \times 530 \times 0,17} \right)^{1/3} = 0,16(C_{conv})^{1/3} \quad (6.46)$$

e

$$r = 1,5 \times 0,17 \times L^{0,88} = 0,255L^{0,88} \text{ pés}, \quad (6.47)$$

sendo

$$A = \pi r^2 = \pi \times (0,255 \times L^{0,88})^2 = 0,203L^{1,75} \text{ pés}^2, \quad (6.48)$$

e

$$v = KL^{-M/6} = 0,16 \times C_{conv}^{1/3} \times 60 \times L^{-0,29} = \frac{9,6C_{conv}^{1/3}}{L^{0,29}} \text{ pés/min}, \quad (6.49)$$

temos que a vazão, em pés³/min, é

$$Q_z = v \times A = \frac{9,6C_{conv}^{1/3}}{L^{0,29}} \times 0,203L^{1,75},$$

ou

$$Q_z = 1,95C_{conv}^{1/3}L^{1,46}, \quad (6.50)$$

sendo C_{conv} em Btu/hora e L em pés. Da Fig. 6.28, tiramos

$$L = Y + X \quad (6.51)$$

e, fazendo $L = Y$ na Eq. (6.47) e supondo que $r = B/2$ nessas condições,

$$B = 2 \times 0,255Y^{0,88}, \quad (6.52)$$

ou

$$Y = 2,15B^{1,14}. \quad (6.53)$$

Há uma séria limitação prática na utilização destas relações. Elas são válidas na ausência de correntes cruzadas que provoquem distúrbios no fluxo ascendente, de forma a tirá-lo de sua direção vertical. Uma vez que, na prática, quase sempre existirão correntes cruzadas, as seguintes medidas são recomendadas (15):

fazer a coifa suficientemente grande para engolfar todo o fluxo ascendente desviado de sua vertical;

calcular a vazão teórica (Q) e a área transversal do fluxo ascendente;

calcular a vazão de projeto (Q_p) por

$$Q_p = Q_z + v_p(A_c - A_{fs}), \quad (6.54)$$

onde A_c é a área da coifa,

Um exemplo prático (15) ilustra o assunto. Seja um forno redondo, de 4 pés de diâmetro e 4 pés de altura, com uma temperatura média da superfície de 800 °F, num ambiente a 70 °F. Da Tab. 6.16, extraímos, para o cilindro,

$$k_c = 0,4 \left[\frac{\Delta T}{d} \right]^{0,25} = 0,4 \left[\frac{730}{4 \times 12} \right]^{0,25} = 0,79;$$

para a face superior,

$$k_c = 0,38(\Delta T)^{0,25} = 1,975,$$

$$C_1 = \frac{k_c}{60} \times A_{fs} \times \Delta T = \frac{0,79 \times 4\pi \times 4 \times 730}{60} \cong 480 \text{ Btu/min.}$$

$$C_2 = \frac{1,975 \times 4\pi \times 730}{60} \cong 300 \text{ Btu/min.}$$

$$C = (480 + 300) \times 60 = 46\,800 \text{ Btu/h.}$$

Suponhamos que, ao se colocar a coifa a 8 pés, as correntes cruzadas possam defletir o fluxo até 10°. Se são pedidos o tamanho da coifa e a vazão, temos, da Eq. (6.53),

$$Y = 2,15B^{1,14} = 2,15 \times 4^{1,14} = 10,44 \text{ pés};$$

da Eq. (6.47),

$$r = 0,25(8 + 10,44)^{0,88} \cong 3,3 \text{ pés}^2;$$

da Eq. (6.49),

$$v = \frac{9,6 \times (46\,800)^{1/3}}{(18,4)^{0,29}} \cong 149 \text{ pés/min};$$

e, da Eq. (6.50),

$$Q = 1,95(46\,800)^{1/3}(18,4)^{1,46} \cong 4\,936 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Para engolfar um fluxo defletido 10°, é necessária, a 8 pés, uma coifa com 6,5 pés de raio c , portanto,

$$A_c = \frac{\pi(13)^2}{4} = 133 \text{ pés}^2;$$

da Eq. (6.48),

$$A_s = 0,203(18,4)^{1,75} = 34 \text{ pés}^2.$$

Portanto, ao tomarmos $v_p = 150$ pés/min, usando a Eq. (6.54),

$$Q_p = 4\,936 + 150(133 - 34) = 19\,786 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

No *Air Pollution Engineering Manual* (12), algumas simplificações foram feitas para facilitar a resolução dos problemas com o uso de tabelas e gráficos. Os casos estão subdivididos em coifas altas e coifas baixas.

Coifas altas

É sugerido

$$v = \frac{8(A_s)^{1/3}(\Delta T)^{5/12}}{L^{1/4}} \quad (6.55)$$

Sendo sugerido (3) que as dimensões da coifa excedam as da coluna de ar quente ascendente por um fator 0,8, a vazão total pode ser calculada por

$$Q = Av + v_p(A_c - A), \quad (6.56)$$

equação idêntica à Eq. (6.54) proposta por Hemeon.

Para o cálculo de Y , a Fig. 6.29 é sugerida.

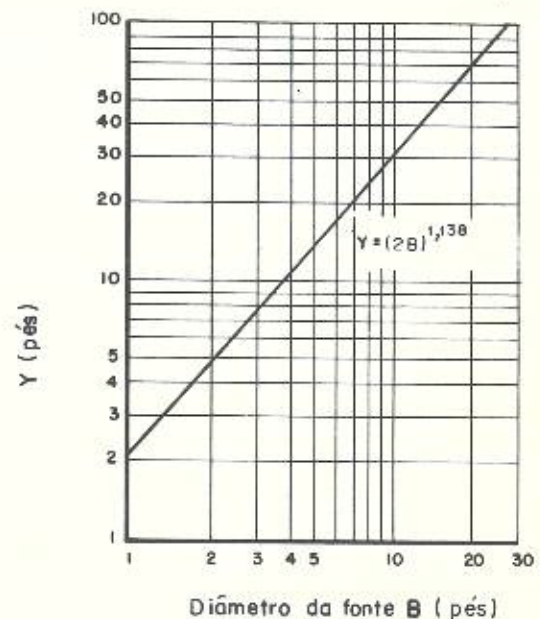


FIGURA 6.29 Cálculo de Y

Coifas baixas (distância fonte-captor < 3 pés)

A sugestão é de que o diâmetro da coifa seja 1 pé maior que o diâmetro da fonte quente (coifa circular), ou 1 pé maior em largura e comprimento que a fonte quente (coifa retangular) onde as correntes cruzadas não sejam muito intensas. Em casos de correntes cruzadas intensas ou poluente altamente tóxico, sugere-se enclausuramento completo da fonte ou a adição de 1 pé ou mais nas dimensões recomendadas.

O enfoque sugerido é o mesmo proposto por Hemeon; rearranjando suas equações, introduzindo um fator de segurança de 15% e supondo as dimensões da coifa iguais às da fonte quente, obtém-se, para coifas circulares,

$$Q = 4,7(d)^{2,33}(\Delta T)^{5/12}, \quad (6.57)$$

onde d é o diâmetro da coifa, em pés. A Eq. (6.57) pode ser resolvida com a utilização da Fig. 6.30, fazendo-se o tamanho da coifa 1 a 2 pés maior que a fonte.

Para coifas retangulares, sugere-se (12)

$$Q = 6,2L(l)^{4/3}(\Delta T)^{5/12}, \quad (6.58)$$

sendo L o comprimento da coifa, em pés (1 a 2 pés mais longo que a fonte), e l a largura da coifa em pés (1 a 2 pés mais larga que a fonte). A Eq. (6.58) pode ser resolvida pela Fig. 6.31.

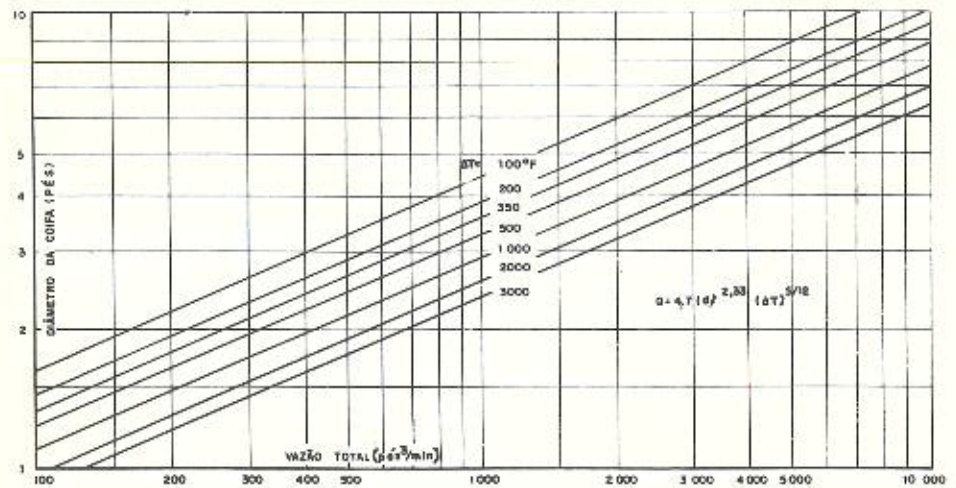


FIGURA 6.30 Solução da Eq. (6.57)

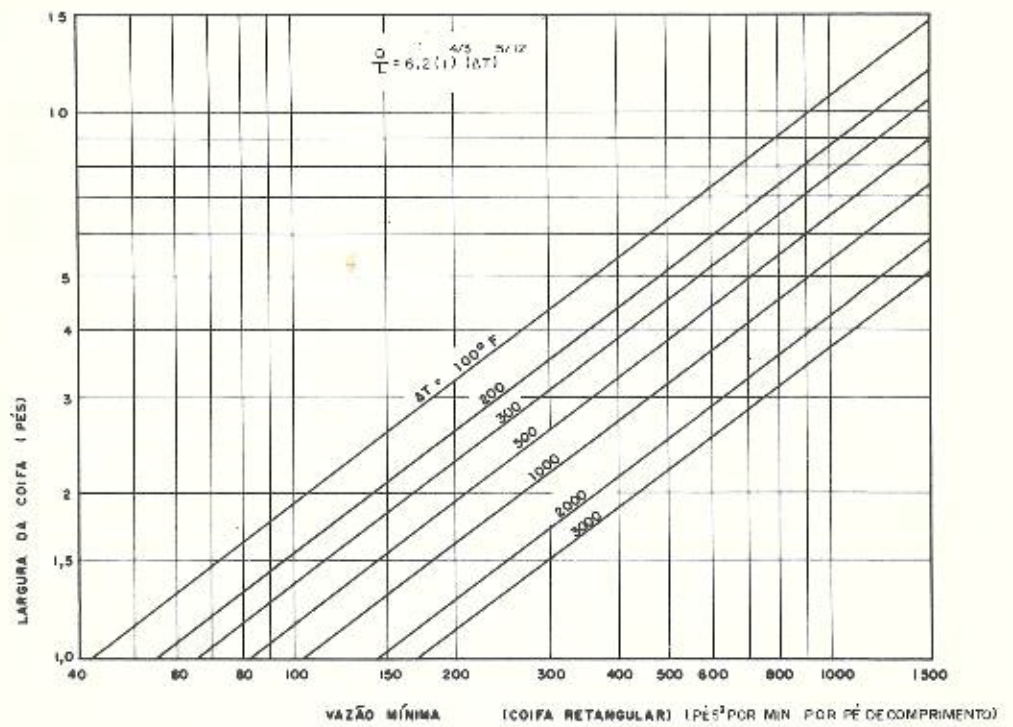


FIGURA 6.31 Solução da Eq. (6.58)

ENCLAUSURAMENTO

O enclausuramento de fontes quentes, da mesma forma que as coifas, deve levar em consideração a vazão de ar induzido, para evitar o escape do mesmo por ser insuficiente a vazão de exaustão utilizada.

Conhecida a vazão de ar induzido, deve-se manter, em qualquer abertura do enclausuramento, uma velocidade não inferior a 200 pés/min em casos normais, e chegando-se até 500-800 pés/min em casos onde a liberação de poluentes ocorre violentamente, como, por exemplo, em fornos elétricos a arco para fusão de aço.

VAZAMENTOS

Captorees usados para ventilação de processos quentes devem ser absolutamente estanques, para evitar vazamento por força da tendência ascensional dos gases quentes, ou deve-se providenciar uma vazão de exaustão tal que elimine esse efeito. A Fig. 6.32 ilustra esse fato. Hemeon sugere uma relação para cálculo do volume do vazamento (Q) através de um orifício localizado acima da face do captor:

$$v = 200 \left[\frac{LC}{A(460 + T_{med})} \right]^{1/3}, \quad (6.59)$$

onde

v = velocidade de escape pelos orifícios situados no topo do captor (em pés/min);

L = distância vertical entre a face do captor e o local do orifício (em pés);

C = calor transferido ao ar dentro do captor pela fonte quente (em Btu/min);

A = área do orifício (em pés²);

T_{med} = temperatura média do ar dentro do captor (em °F).

Em casos de poluentes altamente tóxicos ou de odores nauseabundos, esses vazamentos devem ser totalmente evitados e, quando não é possível evitar

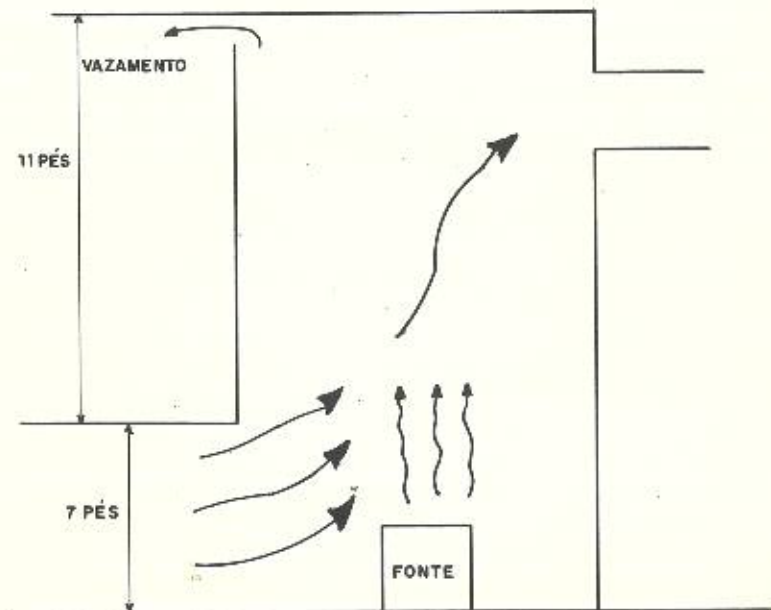


FIGURA 6.32 Vazamentos em captorees

os pontos de vazamento, a vazão de exaustão deve ser de magnitude tal que sejam mantidas, nas áreas de vazamento e na face do captor, velocidades superiores à velocidade de escape.

VENTILAÇÃO TIPO SOPRO-EXAUSTÃO

Aspectos teóricos e experimentais sobre as características de jatos de ar emitidos por dutos, orifícios ou fendas podem ser utilizados para aplicações práticas. O jato de ar emitido por um bocal tem sua vazão aumentada (mistura com ar ambiente por turbulência) e a velocidade reduzida à medida que aumenta a distância percorrida. A Fig. 6.33 ilustra um jato de ar.

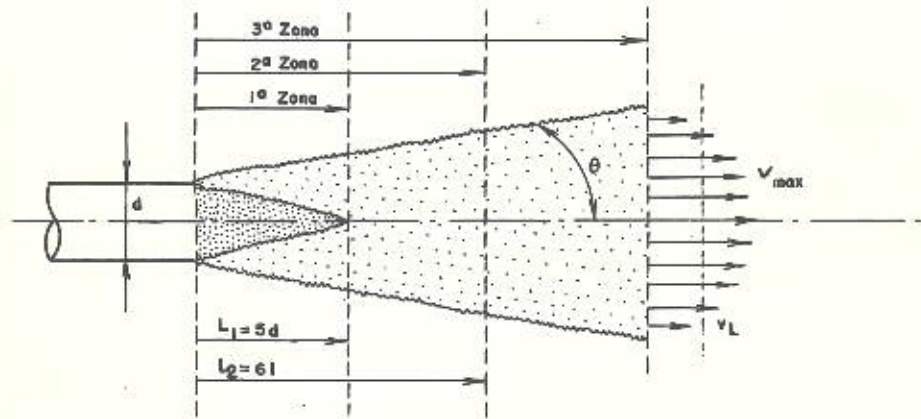


FIGURA 6.33 Jato de ar

O primeiro estágio (curto) é aquele durante o qual o núcleo do jato de ar primário está se misturando com o ar ambiente. O segundo estágio (segunda zona) só existe para bocais retangulares, e consiste em transformação da seção transversal para a forma circular. Na terceira zona, a mistura e a expansão ocorrem na forma cônica para qualquer forma do bocal. Os limites dessas três zonas são:

$$1.^{\text{a}} \text{ zona, } 1,0 \leq \frac{v_{\max}}{v_0} \leq 1,2;$$

$$2.^{\text{a}} \text{ zona, } 2,5 \leq \frac{v_{\max}}{v_0} \leq 3,0;$$

$$3.^{\text{a}} \text{ zona, } \frac{v_{\max}}{v_0} = \frac{K' \sqrt{A_0}}{L} = \frac{Kd}{L}, \quad (6.60)$$

onde

K' e K = constantes tabeladas;

v_0 = velocidade média do jato no bocal (pés/min);

v_{\max} = velocidade máxima numa dada seção transversal (pés/min);

d = diâmetro do bocal (pés);

A_0 = área da seção transversal do bocal (pés²);

v_{med} = velocidade média na seção transversal A_{med} (pés/min);

L = distância do bocal à seção transversal A_{med} (pés).

Os valores de K e K' estão na Tab. 6.17.

TABELA 6.17 Valores de K e K'

Tipo de bocal	K		K'	
	v_0 entre 500-1 000 fpm	v_0 entre 2 000-10 000 pés/min	v_0 entre 500-1 000 pés/min	v_0 entre 2 000-10 000 pés/min
Redondo ou quadrado	5,0	6,2	5,7	7,0
Retangular, $\frac{h}{l} < 4,0$	4,3	5,3	4,9	6,0
Fenda anular	—	—	3,9	4,8
Grelhas com área livre $\geq 40\%$	4,1	5,0	4,7	5,7

h = altura do bocal; l = largura do bocal

Admitiu-se a força do jato de ar (F) como constante, e a força por unidade de área decrescente com a distância. Valores recomendados em casos práticos são

$$v \geq 250 \text{ pés/min};$$

$$F \geq 0,25 \text{ lb.}$$

A força mencionada exercida pelo jato de ar é o momento por unidade de tempo, ou seja,

$$F = \frac{mv}{t}, \quad (6.61)$$

onde

- F = força (em libras);
- m = massa (em slugs);
- v = velocidade (em pés/s);
- t = tempo (em s).

Para a massa em libras, substituindo-se pelo volume V ,

$$m = \rho V;$$

da Eq. (6.61), obtém-se

$$F = \frac{\rho Vv}{gt} = \frac{\rho Qv}{g} = \frac{\rho Av^2}{g}; \quad (6.62)$$

para a velocidade em pés/min, sendo g a aceleração da gravidade,

$$F = \frac{\rho A}{g} \left(\frac{v}{60} \right)^2; \quad (6.63)$$

em condições-padrão, $\rho = 0,075 \text{ lb/pé}^3$,

$$F = 6,5 \times 10^{-7} Av^2. \quad (6.64)$$

Tendo sido admitido que F é constante com a distância L , podemos calcular

$$F = F_0 = 6,5 \times 10^{-7} A_0 v_0^2. \quad (6.65)$$

sendo F em libras, A_0 em pés² e v_0 em pés/min.

A equação da conservação do momento

$$v_0^2 A_0 = v_{med}^2 A_{med} \quad (6.66)$$

é o mesmo que

$$Q_0 v_0 = Q_{med} v_{med} \quad (6.67)$$

Na terceira zona, já vimos, na Eq. (6.60), para bocais circulares ou quadrados é

$$v_{max} = \frac{K' v_0 \sqrt{A_0}}{L};$$

a relação entre a velocidade máxima (na linha de centro) e a velocidade média numa dada seção é

$$v_{max} = 2,7 v_{med} \quad (6.68)$$

Substituindo na Eq. (6.67),

$$\frac{Q_{med}}{Q_0} = \frac{v_0}{v_{med}} = \frac{2,7L}{K' \sqrt{A_0}} \quad (6.69)$$

Dando a K' o valor tradicional $K' = 6$,

$$\frac{Q_{med}}{Q_0} = \frac{0,45L}{\sqrt{A_0}} \quad (6.70)$$

Em bocais tipo fenda, com expansão para os dois lados, na segunda zona, (comprimento $L = 6l$), Hemeon sugere, de Forthman,

$$v_{max} = 2,45 v_0 \sqrt{\frac{h}{L}} \quad (6.71)$$

e

$$v_{max} = 2,5 v_{med} \quad (6.72)$$

que, substituídos na Eq. (6.67), resultam

$$\frac{Q_{med}}{Q_0} = \sqrt{\frac{L}{h}}; \quad (6.73)$$

e, para expansão unilateral,

$$v_{max} = 2,26 v_0 \left[\frac{h}{L} \right]^{0,36} \quad (6.74)$$

e

$$v_{max} = 1,88 v_{med} \quad (6.75)$$

que substituídos na Eq. (6.67)

$$\frac{Q_{med}}{Q_0} = 0,83 \left[\frac{L}{h} \right]^{0,36} \quad (6.76)$$

O ângulo de abertura do jato de ar, na prática, foi determinado $2\theta = 30^\circ-40^\circ$, e pode ser determinado teoricamente pela equação da conservação do momento.

Na terceira zona para bocais redondos e quadrados,

$$v_{med} = \frac{6 v_0 \sqrt{A_0}}{2,7L} \quad (6.77)$$

Substituindo (6.77) em (6.66),

$$0,2L^2 = A_{med} \quad (6.78)$$

Se considerarmos A_{med} circular, de raio $L \operatorname{tg} \theta$, teremos

$$0,2L^2 = \pi(L \operatorname{tg} \theta)^2, \quad (6.79)$$

ou

$$\theta = 14^\circ.$$

Na segunda zona, A_{med} seria retangular, com altura igual a $2(L \operatorname{tg} \theta)$, e chega-se a $\theta = 45^\circ$.

APLICAÇÕES PRÁTICAS

Ventilação tipo sopro-exaustão

Uma importante aplicação de teoria dos jatos de ar é a ventilação de tanques (ou outros equipamentos) através do sistema sopro-exaustão (*push-pull*). Com a finalidade de aplicação prática, podemos extrair, da Eq. (6.65),

$$Q_0 = 1,54 \times 10^6 \frac{F}{v_0}, \quad (6.80)$$

de onde concluímos que infinitas combinações de Q_0 e v_0 podem fornecer um valor fixo da força (F) como, por exemplo, o recomendado $F = 0,25$ lb. No entanto a força por unidade de área varia com o quadrado da velocidade, e quando esta cai a valores em que a ação de movimentos do ar do ambiente provoca distúrbios no jato ar, a ventilação passa a ser ineficiente. Por essa razão, recomenda-se também $v_{med} \geq 250$ pés/min, como já foi mencionado.

Sendo para a segunda zona de bocais tipo fenda unilaterais,

$$\frac{v_{med}}{v_0} = 1,2 \left[\frac{h}{L} \right]^{0,36}. \quad (6.81)$$

Substituindo os valores recomendados, podemos obter

$$[Q_0]_{min} \cong 2000 \left[\frac{h}{L} \right]^{0,36} \quad (6.82)$$

e, para fendas de dupla expansão, onde

$$\frac{v_{med}}{v_0} = \sqrt{\frac{h}{L}}, \quad (6.83)$$

obtemos

$$[Q_0]_{min} = 1500 \sqrt{\frac{h}{L}}. \quad (6.84)$$

Resta agora determinar a vazão de exaustão Q_e e as dimensões da coifa ($l \times h_{min}$) exaustão. Para tanto, sugere-se o uso das Eqs. (6.73) e (6.76) fazendo-se

$$\begin{aligned} Q_e &= Q_{med}, \\ L &= \text{largura do tanque} = d, \\ l_{min} &= \text{comprimento do tanque}, \\ h_{min} &= L \operatorname{tg} 15^\circ = \text{altura mínima da coifa.} \end{aligned}$$

A Ref. 3 sugere o enfoque experimental da Fig. 6.34. Com $Q_e = 100$ a 150 pés³/min por pé² de área do tanque,

$$Q_0 = \frac{Q_e}{d \times \eta}, \quad (6.85)$$

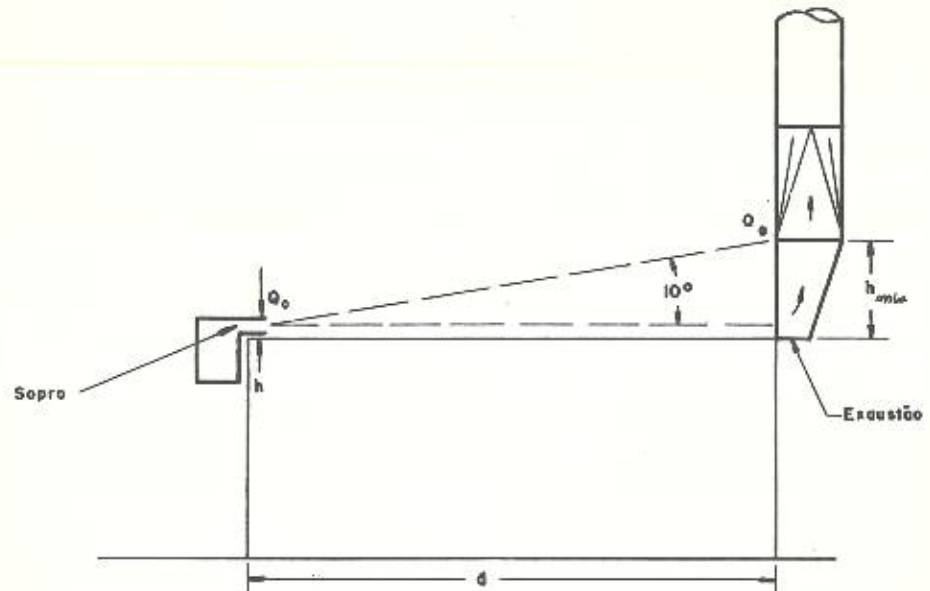


FIGURA 6.34 Ventilação sopro-exaustão

sendo η o fator de indução,

d (pés)	η
0-8	2,0
8-16	1,4
16-24	1,0
> 24	0,7

$$h_{min} = d \operatorname{tg} 10^\circ = 0,18d. \quad (6.86)$$

Cortinas de ar

Outra importante aplicação é o projeto de cortinas de ar. Ainda uma vez mais, o uso da Eq. (6.76) é recomendado, fazendo-se

L = altura da porta,
largura mínima da fenda = largura da porta.

A vazão de exaustão e as dimensões da coifa são calculadas como no caso de ventilação sopro-exaustão, com fenda de dupla expansão.

Exercícios de aplicação

Exercício 1. Forneça as principais características de projeto de um sistema *push-pull*, a ser usado para ventilar um tanque de 6×3 pés.

Solução. (a) Pelo *Manual of Industrial Ventilation*,

$$Q_e = 100-150 \text{ pés}^3/\text{min} \cdot \text{pé}^2,$$

$$\therefore Q_e = 150 \times 3 \times 6 = 2700 \text{ pés}^3/\text{min};$$

logo,

$$Q_0 = \frac{Q_e}{d \times \eta} = \frac{2\,700}{2 \times 3} = 450 \text{ pés}^3/\text{min},$$

$$h = 0,18d = 0,18 \times 3 = 0,54 \text{ pés},$$

não sendo possível fixar as dimensões do jato,

$$Q_0 = v_0 A_0, \quad A_0 = \frac{Q_0}{v_0}.$$

b) Pelas equações apresentadas para fendas de expansão simples,

$$(Q_0)_{\min} = 2\,000 \left[\frac{h}{L} \right]^{0,36}.$$

Se escolhermos uma espessura da fenda de 0,5 pol,

$$(Q_0)_{\min} = 2\,000 \left[\frac{0,5 \times 1/12}{3} \right]^{0,36} \cong 430 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

Exercício 2. Uma cortina de ar vertical é instalada como barreira em uma porta de 4 pés de largura entre duas salas, numa das quais poeira é emitida formando-se uma concentração no ambiente de 50 m.p./pé³. A cortina é feita com uma fenda de 4 pés por 0,5 pol, com uma velocidade $v_0 = 6\,000$ pés/min para cobrir os 7 pés de altura da porta. Pergunta-se: qual a concentração de poeira no efluente da exaustão da cortina.

Solução.

$$Q_0 = v_0 A_0 = 6\,000 \times 4 \times \frac{0,5}{12} = 1\,000 \text{ pés}^3/\text{min};$$

na segunda zona (pois 7 pés < 6 × 4) com expansão bilateral,

$$\frac{Q_{\text{med}}}{Q_0} = \sqrt{\frac{L}{h}} = \sqrt{\frac{7}{0,5/12}} \cong 13,$$

$$Q_{\text{med}} = 13Q_0 = 13 \times 1\,000 = 13\,000 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

Se há poeira em uma das salas e como o ar total induzido vale $Q_x - Q_0$,

$$\text{vazão de ar da sala suja} = \frac{Q_x - Q_0}{2} = 6\,000 \text{ pés}^3/\text{min};$$

portanto temos

6 000 pés³/min de ar sujo,

7 000 pés³/min de ar limpo;

$$\therefore G = \frac{6\,000}{13\,000} \times 50 = 23 \text{ m.p./pé}^3.$$

Exercício 3. Um forno de 6 pés de diâmetro emite fumos num ambiente de trabalho. Não sendo possível a colocação de uma coifa a menos de 15 pés da boca do forno, calcule as dimensões da coifa e a vazão de exaustão para promover adequada ventilação, sabendo-se que o forno libera uma quantidade de calor sensível no ambiente de 1 000 Btu/min.

Solução. (a) Cálculo de L :

$$\begin{aligned} L &= Y + X, \\ X &= 15 \text{ pés}, \\ Y &= 2,15B^{1,14} = 2,15 \times (6)^{1,14} = 16,58 \text{ pés}, \\ \therefore L &= 15 + 16,58 \cong 31,6 \text{ pés}. \end{aligned}$$

b) Cálculo de Q_z :

$$\begin{aligned} Q_z &= 1,95(C_{\text{conv}})^{1/3} L^{1,46} = 1,95 \times (1000 \times 60)^{1/3} \times (31,6)^{1,46}, \\ Q_z &\cong 11\,767,99 \text{ pés}^3/\text{min}. \end{aligned}$$

c) Cálculo de Q :

$$\begin{aligned} Q_p &= Q_z + (A_c - A_s)v_p, \\ Q_p &= 12\,700 + (A_c - A_s)v_p, \\ r &= 0,255 L^{0,88} = 0,255 \times (31,6)^{0,88} \cong 5,3 \text{ pés}, \\ A_s &= \pi r^2 = \pi \times (5,3)^2 = 88,24 \text{ pés}^2. \end{aligned}$$

O *Manual of Industrial Ventilation* sugere $d_c = 2r + 0,8X$:

$$\begin{aligned} \therefore d_c &= 2 \times 5,3 + 0,8 \times 15 = 22,6 \text{ pés}, \\ \therefore A_c &\cong \frac{\pi(22,6)^2}{4} = 401 \text{ pés}^2. \end{aligned}$$

Esse valor parece exagerado; Hemeon sugere

$$\begin{aligned} r_c &\cong 1,5r = 1,5 \times 5,3 \cong 7,95 \text{ pés}, \\ \therefore A_c &= \pi(7,95)^2 = 198,5 \text{ pés}^2. \end{aligned}$$

Um enfoque interessante é o de se prever um desvio de 10° de posição original. Trigonometricamente, chega-se a

$$\begin{aligned} r_c &= r + \Delta r, \\ r_c &= 5,3 + 2,8 = 8,1 \text{ pés}, \\ \therefore A_c &= \pi(8,1)^2 = 206 \text{ pés}^2. \end{aligned}$$

Tomemos esse valor. Supondo $v_p = 150$ pés/min,

$$\begin{aligned} \text{ou} \quad Q &= 12\,700 + 150(206 - 89) = 30\,250, \\ Q &\cong 30\,250 \text{ pés}^3/\text{min}. \end{aligned}$$

Exercício 4. Um cilindro quente, de 2 pés de diâmetro por 3 pés de altura, com temperatura superficial de $1\,650^\circ\text{F}$ permanece verticalmente sobre o piso. Os fumos metálicos emitidos de sua superfície são carregados pelo ar induzido ascensional. Projete a coifa (dimensões) e a vazão de controle para ventilar o processo.

Solução.

$$Q_v = 29\sqrt[3]{A^2Ch}.$$

Precisamos calcular o calor liberado e a área transversal do fluxo de ar ascendente.

a) Calor liberado:

$$C = \frac{k_c}{60} A_s \Delta T;$$

para cilindros verticais de $h > 2$ pés,

$$k_c = 0,4 \left(\frac{\Delta T}{d} \right)^{1/4},$$

$$d = 2 \text{ pés ou } 24 \text{ pol}$$

e, tomando $T_w = 70^\circ\text{F}$,

$$k_c = 0,4 \left(\frac{1650 - 70}{24} \right)^{0,25} = 1,14,$$

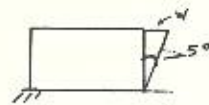
$$A_s = \pi dh + \frac{\pi d^2}{4} = \pi \times 2 \times 3 + \frac{\pi \times (2)^2}{4} = 7\pi \text{ pés}^2,$$

$$\therefore C = \frac{1,14}{60} \times 7\pi \times (1650 - 70) \cong 660 \text{ Btu/min.}$$

b) Área transversal do fluxo de ar ascendente: Hemeon propõe a aproximação

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 2^2}{4} = \pi \text{ pés}^2.$$

O fluxo ar induzido nas laterais do forno tem como seção transversal uma coroa circular. Se admitirmos um ângulo de 5° (sugerido por Hemeon),



$$W = h \operatorname{tg} 5^\circ = 3 \times \operatorname{tg} 5^\circ = 0,26 \text{ pés},$$

$$A_s = \frac{\pi(d + 0,26 \times 2)^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} = 5 - \pi = 1,84 \text{ pés}^2;$$

$C = A_1$ lateral seria apenas

$$C_1 = \frac{1,14}{60} \times \pi d h \times \Delta T = \frac{1,14}{60} \times \pi \times 2 \times 3 \times (1650 - 70),$$

$$C_1 = 565,6 \text{ Btu/min.}$$

$$\therefore (Q_0)_1 = 29 \sqrt[3]{(1,84)^2 \times 565,6 \times 3} = 517,9 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Para o fluxo que sai da superfície horizontal superior do forno, teremos

$$C_2 = \frac{1,14}{60} \times \frac{\pi d^2}{4} \times \Delta T = \frac{1,14}{60} \times \frac{\pi (2)^2}{4} \times (1650 - 70),$$

$$C_2 = 94,3 \text{ Btu/min.}$$

$$A_s = \frac{\pi d^2}{4} = \pi \text{ pés}^2, \quad h = d \quad (\text{Hemeon});$$

$$(Q_0)_2 = 29 \sqrt[3]{\pi^2 \times 94,3 \times 2} = 355,72 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

$$\therefore Q_0 = (Q_0)_1 + (Q_0)_2 = 873,62 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

$$Q_0 \cong 874 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

De Hemeon,

$$Q_0 = 29 \sqrt[3]{(\pi)^2 \times 660 \times 3} = 778 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Se adotarmos coifa baixa ($X < 3$ pés),

$$Q_x = Q_0$$

e, se tomarmos uma coifa quadrada de 3×3 pés,

$$Q = Q_x + v_p(A_c - A_s);$$

fazendo

$$A_s = \frac{\pi[d + (0,26 \times 2)]^2}{4} \cong 5 \text{ pés}^2,$$

$$v_p = 100 \text{ pés/min},$$

ou

$$Q = 874 + 100(9-5) = 1274 \text{ pés}^3/\text{min},$$

$$Q \cong 1274 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

Hemeon calcula

$$A_s = \pi \text{ pés}^2,$$

$$v_p = 150 \text{ pés/min},$$

$$Q = 778 + 150(9 - \pi) \cong 1657 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

Exercício 5. Um banho de chumbo mantido a 1000 °F deve ser ventilado com uma coifa baixa. O tanque é retangular com 4 pés de comprimento e 3 pés de largura. Estime a mínima vazão de exaustão necessária.

Solução. Supondo que só haja indução na face do banho,

$$k_c = 0,38(\Delta t)^{0,25} = 0,38(1000 - 70)^{0,25} = 2,10,$$

$$C = \frac{2,09}{60} \times 3 \times 4(1000 - 70) = 390,3 \text{ Btu/min},$$

façamos

$$A_s = 3 \times 4 = 12 \text{ pés}^2 \text{ e } h = 4 \text{ pés (por segurança);}$$

$$\therefore Q_0 = 29\sqrt[3]{(12)^2 \times 390,3 \times 4} = 1756,14 = 1800 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

Fazendo Q um pouco superior a Q_0

$$Q = 2000 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

Exercício 6. Um tanque de (6 × 3) pés² contém água fervente, que se evapora à razão de 10 lb/pé²/h. Estime a mínima vazão de exaustão para coifa baixa.

Solução.

$$\frac{Q_0}{A_s} = 290\sqrt[3]{Gh},$$

$$A_s = (6 \times 3) = 18 \text{ pés}^2,$$

$$G = 10 \text{ lb/pé}^2/\text{h} = \frac{10}{60} \text{ lb/pé}^2/\text{min},$$

$$h = 6 \text{ pés (por segurança),}$$

$$h = 3 \text{ pés (o Engineering sugere),}$$

$$Q_0 = 290A_s\sqrt[3]{Gh} = 290 \times 18 \sqrt[3]{\frac{10}{60} \times 3},$$

$$Q_0 = 4144 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

Hemeon calcula,

$$Q_0 = 290A_s\sqrt[3]{G} = 290 \times 18 \times \sqrt[3]{\frac{10}{60}} = 2874 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

Este valor, aparentemente, está subestimando a vazão necessária. O *Industrial Ventilation* sugere $Q = 175 \text{ pés}^3/\text{min} \cdot \text{pé}^2$ de tanque.

$$\therefore Q = 175 \times 18 = 3\,150 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

Exercício 7. Que vazão de exaustão deve ser utilizada para ventilar um processo quente com coifa baixa (1,5 pés), sabendo-se que o processo é um forno-cadinho cilíndrico de 3 pés de diâmetro e 4 pés de altura, cuja temperatura das paredes laterais é 200 °F, estando o metal fundido a 1 200 °F.

Solução.

$$Q_o = 29 \sqrt[3]{A^2 \times h \times C_{ced}},$$

$$Q_o = Q'_o + Q''_o,$$

$$Q'_o = 29 \sqrt[3]{A'^2 h' C'_{ced}},$$

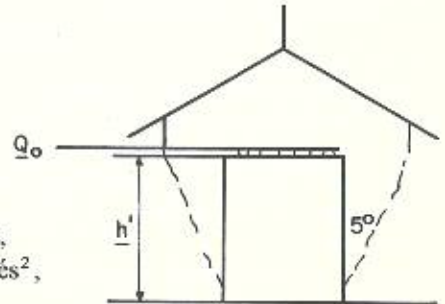
$$h' = 4 \text{ pés},$$

$$A' = \pi(r + \Delta)^2 - \pi r^2,$$

$$\Delta = h' \operatorname{tg} 5^\circ = 4 \times \operatorname{tg} 5^\circ \cong 0,35 \text{ pés},$$

$$A' = \pi(1,5 + 0,35)^2 - \pi(1,5)^2 \cong 3,7 \text{ pés}^2,$$

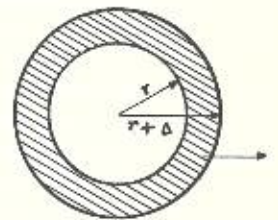
$$C_{ced} = \frac{k_c}{60} \times A_s \times \Delta T.$$



Considerando ambiente a 70 °F,

$$\Delta T = 200 - 70 = 130 \text{ °F}.$$

$$A_s = \pi \times d \times h' = \pi \times 3 \times 4 = \pi 12 \cong 37,7 \text{ pés}^2.$$



Da tabela para cilindros verticais com $h > 2$ pés,

$$k_c = 0,4 \left(\frac{\Delta T}{d} \right)^{0,25} \quad (d \text{ em pol})$$

$$k_c = 0,4 \times \left(\frac{130}{12 \times 3} \right)^{0,25} \cong 0,55,$$

$$C_{ced} = \frac{0,55}{60} \times 37,7 \times 130 \cong 45 \text{ Btu/min},$$

$$Q'_o = 29 \sqrt[3]{(3,7)^2 \times 4 \times 45} \cong 390 \text{ pés}^3/\text{min},$$

$$Q''_o = 29 \sqrt[3]{A''^2 h'' C''_{ced}},$$

$$A'' = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times (3)^2}{4} \cong 7,1 \text{ pés}^2,$$

$$h'' = d = 3 \text{ pés},$$

$$k_c = 0,38(\Delta t)^{0,25} = 0,38(1\,200 - 70)^{0,25} \cong 2,2,$$

$$C''_{ced} = \frac{2,2}{60} \times \frac{\pi \times 3^2}{4} \times (1\,200 - 70) \cong 292,74 \text{ Btu/min},$$

$$Q''_o = 29 \sqrt[3]{(7,1)^2 \times 3 \times 292,74} \cong 1\,022 \text{ pés}^3/\text{min},$$

$$\therefore Q_o = 390 + 1\,022 = 1\,412 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

Escolhamos uma coifa redonda com $d_c = 4$ pés:

$$\begin{aligned} A_{pluma} &= 10,75 \text{ pés}, \\ A_{coifa} &= 12,57 \text{ pés}, \\ A_c - A_p &\cong 1,82 \text{ pés}^2; \\ v_p &= 100 \text{ pés/min}, \\ \therefore Q_c &= Q_0 + v_p(A_c - A_p) = 1412 + 100(1,82), \\ Q_c &= 1594; \end{aligned}$$

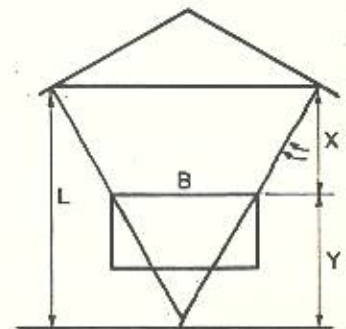
ou, em números redondos,

$$Q_c = 1600 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

Exercício 8. Devido à necessidade de se calcular uma ponte rolante para vazamento do forno do problema anterior, a coifa baixa não mais poderia ser usada, tendo-se resolvido a utilização de uma coifa alta cuja altura não poderia ser inferior a 12 pés. Nessas novas condições, qual será a nova vazão de exaustão, se o diâmetro da coifa deve ser 2 pés maior que o diâmetro da pluma (dado recomendado).

Solução.

$$Q_z = 1,95(C)^{1/3}L^{1,46};$$



do Exercício 7,

$$\begin{aligned} C_{ced} &= C'_{ced} + C''_{ced} = (45 + 293,3) \times 60 \cong 20298 \text{ Btu/h}, \\ L &\neq X + Y \begin{cases} X = 12 \text{ pés} \\ Y = 2,15B^{1,14} = 2,15 \times (3)^{1,14} \cong 7,5 \text{ pés}, \end{cases} \\ L &= 12 + 7,5 = 19,5 \text{ pés}, \\ \therefore Q_z &= 1,95 \times (20298)^{1/3} \times (19,5)^{1,46} \cong 4053 \text{ pés}^3/\text{min}; \\ d &= 2r = 2 \times 0,255 \times L^{0,88} = 2 \times 0,255 \times (19,5)^{0,88} \cong 6,96 \text{ pés}, \\ \therefore d_c &= 2 \text{ pés} + 6,96 \cong 9 \text{ pés}, \\ \therefore Q_c &= Q_z + (A_c - A_p)v_p = 4053 + 100 \left(\frac{\pi \times 9^2}{4} - \frac{\pi \times (6,96)^2}{4} \right) \\ Q_c &\cong 6608 \text{ pés}^3/\text{min}. \end{aligned}$$

VENTILAÇÃO DE OPERAÇÕES DE TRANSPORTE E MANIPULAÇÃO DE MATERIAL FRAGMENTADO

Introdução

Materiais fragmentados ou pulverizados em movimento provocam a movimentação de ar em sua passagem, sendo, portanto, importante o conhecimento da quantidade de ar induzido, a fim de promover-se uma ventilação adequada.

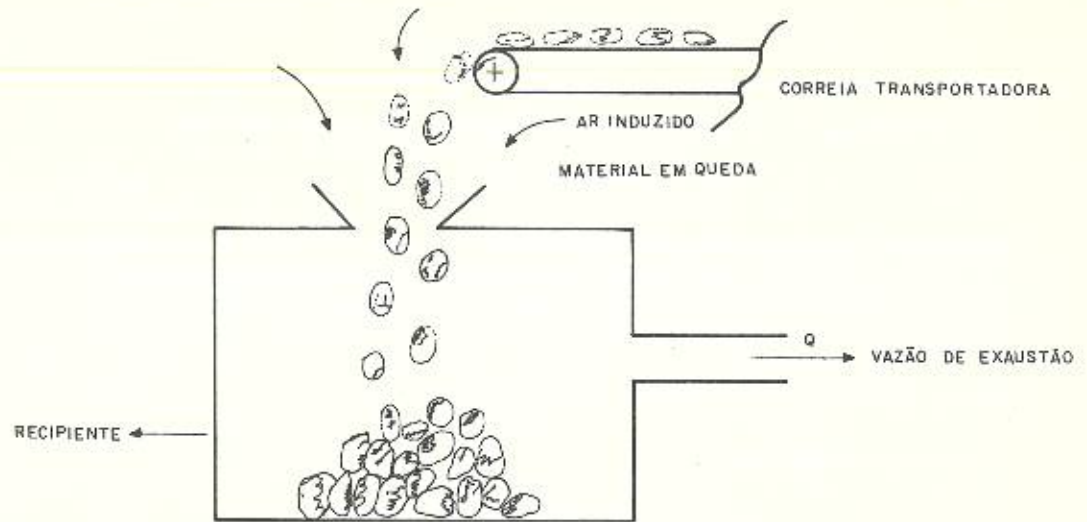


FIGURA 6.35 Indução de ar por movimento de materiais

A Fig. 6.35 ilustra esse aspecto, uma vez que a vazão de exaustão (Q) deve ser de magnitude suficiente para evitar a saída do ar que foi induzido pelo material em queda, pela boca de entrada ou frestas no recipiente.

Dessa forma, valores usualmente recomendados de velocidades nas faces abertas são insuficientes para evitar a saída do ar induzido com partículas nele dispersas, havendo, pois, necessidade de ser estimada a quantidade de ar induzido. Hemeon apresenta um enfoque com esse propósito.

Vazão de ar induzido

Uma partícula em movimento no ar está sujeita à força viscosa (F), que tende a eliminar sua aceleração. O trabalho realizado ζ pode ser calculado por

$$\zeta = \int F dx, \quad (6.87)$$

onde dx é o diferencial de distância. A potência desenvolvida por um fluxo de partículas (N), é dada por

$$N = \frac{f}{P} \int F dx, \quad (6.88)$$

onde f é o fluxo de partículas (vazão em massa) e P o peso de uma partícula. A potência é uma medida da quantidade de energia transferida para o ar na forma de movimento, calor e turbulência.

A parcela transformada em calor e turbulência será suposta desprezível, ou seja, toda a energia transferida ao ar pelo movimento das partículas se converterá em movimento do ar, observando-se que

$$\text{trabalho} = \text{força} \times \text{deslocamento},$$

$$\text{potência} = \frac{\text{trabalho}}{\text{tempo}},$$

$$\text{potência} = \frac{\text{força} \times \text{deslocamento}}{\text{tempo}} = \text{força} \times \text{velocidade},$$

ou
 potência = pressão \times área \times velocidade,
 potência = pressão \times vazão.

Para pressão (p) em polegada de coluna de água e vazão em pés³/min,

$$\text{HP} \cong \frac{p \times Q}{6\,356}, \quad (6.89)$$

sendo HP a potência, em *horse-power*.

Se considerarmos essa pressão como sendo a pressão necessária para acelerar o ar do repouso até uma dada velocidade v (pés/min), ela será a pressão cinética p_c , ou seja, em condições-padrão,

$$p = p_c = \left[\frac{v}{4\,005} \right]^2. \quad (6.90)$$

Substituindo (6.90) em (6.89),

$$\text{HP} = \frac{Q}{6\,356} \times \left[\frac{v}{4\,005} \right]^2. \quad (6.91)$$

Lembrando a equação da continuidade

$$Q = v \times A, \quad (6.92)$$

$$\text{HP} = \frac{Q^3}{1,02 \times 10^{11} A^2}, \quad (6.93)$$

ou

$$Q^3 = 1,02 \times 10^{11} \times A^2 \times \text{HP}. \quad (6.94)$$

Dessa forma, já tendo sido admitido que toda a energia da movimentação das partículas se reverte em movimento do ar, se calcularmos a potência da Eq. (6.88) e substituirmos esse valor na Eq. (6.94), poderemos calcular a vazão de ar induzido, Q .

POTÊNCIA EM FLUXO DE PARTÍCULAS EM QUEDA

Já foi visto que, quando uma certa quantidade de partículas entra em queda ($t = 0$; $x = 0$; $v = 0$), verifica-se a passagem por três estágios, a saber, movimento laminar (pouca significância), movimento intermediário (ou de transição) e movimento turbulento. A força viscosa na fase turbulenta ($Re_p \geq 500$) é

$$F = \frac{C_R \rho v^2 A_p}{2}; \quad (6.95)$$

no regime turbulento, $0,35 < C_R < 0,60$; tomando como tradicionalmente é feito,

$$C_R = 0,44$$

e, substituindo em (6.95),

$$F = 0,22 \rho v^2 A_p. \quad (6.96)$$

Substituindo (6.96) em (6.88),

$$N = \frac{f}{P} \int_{x_{500}}^{x^*} 0,22 \rho v^2 A_p dx, \quad (6.97)$$

e, lembrando que

$$1 \text{ HP} = 33\,000 \frac{\text{lb-pé}}{\text{min}} = 550 \frac{\text{lb-pé}}{\text{s}}, \quad (6.98)$$

$$N = \text{HP} = \frac{0,22\rho A_p f}{550P} \int_{x_{500}}^x v^2 dx, \quad (6.99)$$

a relação

$$v^2 = 2gx \quad (6.100)$$

pode ser usada como aproximação, uma vez que o erro introduzido não é de grande monta, e estará a favor da segurança. Portanto

$$\text{HP} = \frac{0,22\rho A_p f}{550P} \int_{x_{500}}^x 2gx dx. \quad (6.101)$$

Integrando,

$$\text{HP} = \frac{0,22\rho A_p f g}{2 \times 550 \times P} (x^2 - x_{500}^2). \quad (6.102)$$

Para propósitos práticos Hemeon sugere que x_{500} é muito pequeno, podendo ser desprezado. Substituindo para ar-padrão,

$$\rho = 0,075 \text{ lb/pé}^3.$$

Lembrando que

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad \text{e} \quad P = \frac{\pi}{6} \rho_p d_p^3 g,$$

transformando o diâmetro (em μm)

$$d (\mu\text{m}) = 3,05 \times 10^5 d (\text{pés}),$$

a densidade das partículas em gravidade específica (em relação à água),

$$\text{densidade } (\rho_p) = 62,4 \times \text{gravidade específica } (g_e),$$

e, sendo h a altura total de queda em pés, temos

$$\text{HP} = \frac{0,22 \times 0,075 \times \pi \times 6 \times f \times h^2 \times (3,05 \times 10^5)}{4 \times 2 \times 550 \times \pi \times 62,4 g_e \times d_p}, \quad (6.103)$$

$$\text{HP} = \frac{0,22 f h^2}{d_p g_e}. \quad (6.104)$$

No regime intermediário ($1 < \text{Re}_p < 500$),

$$C_R \cong \frac{10}{\sqrt{\text{Re}_p}},$$

que, substituído em (6.95), fornece

$$F = \frac{5\rho v^2 A_p}{\sqrt{\text{Re}_p}}, \quad (6.105)$$

onde Re_p é o número de Reynolds da partícula,

$$\text{Re}_p = \frac{\rho d_p v}{\mu}; \quad (6.106)$$

e, da mesma forma que para regime turbulento, chega-se, para o regime intermediário, a

$$HP = \frac{34fh^{1,7}}{g_e d_p^{1,6}} \quad (6.107)$$

Quando as partículas atingem a velocidade terminal de queda (v_t), a força viscosa é equilibrada pelo peso da partícula ($F = P$) e, portanto,

$$N = \frac{f}{P} \int P dh = fh, \quad (6.108)$$

$$HP = \frac{fh}{550}, \quad (6.109)$$

independentemente do tipo de movimento.

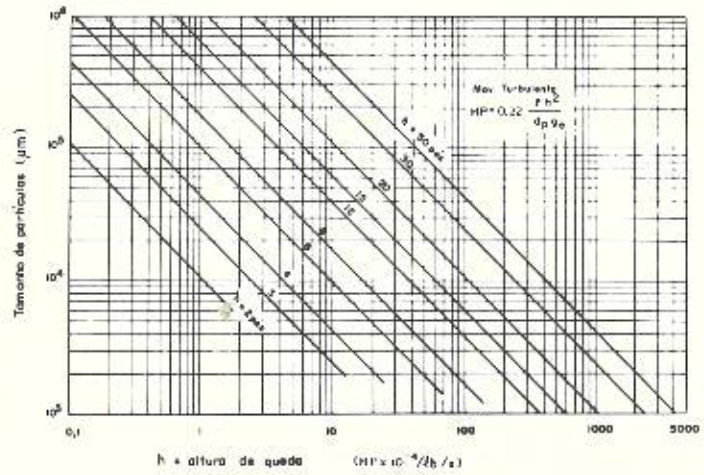


FIGURA 6.36 Potência induzida por partículas com $g_e = 1$ (multiplicar valor obtido por f/g_e)

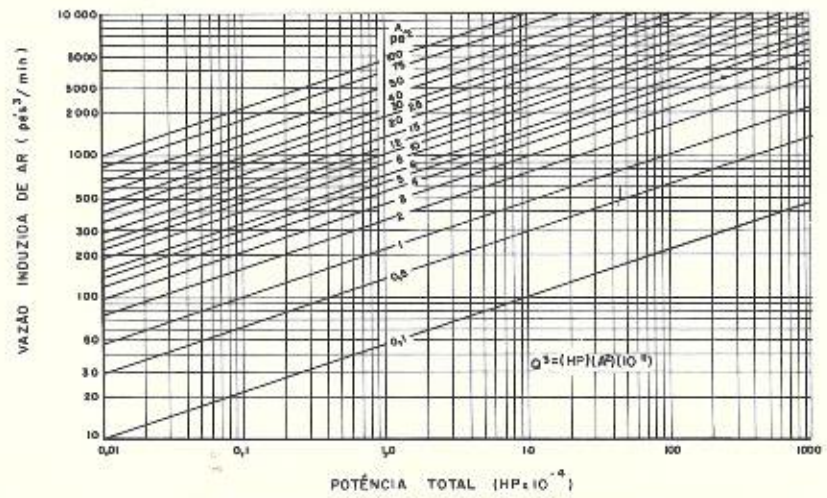


FIGURA 6.37 Volume de ar induzido

Para aplicações práticas da teoria desenvolvida, as Figs. 6.36, 6.37 e 6.38 e a Tab. 6.18 foram preparadas por Hemeon.

Um caminho diferente poderia ter sido seguido para as deduções feitas. Lembrando que,

$$F = \frac{C_R \rho v^2 A_p}{2}, \quad Re_p = \frac{\rho d_p v}{\mu};$$

$$C_R = \frac{24}{Re_p}$$

para regime laminar ($Re_p \leq 2$);

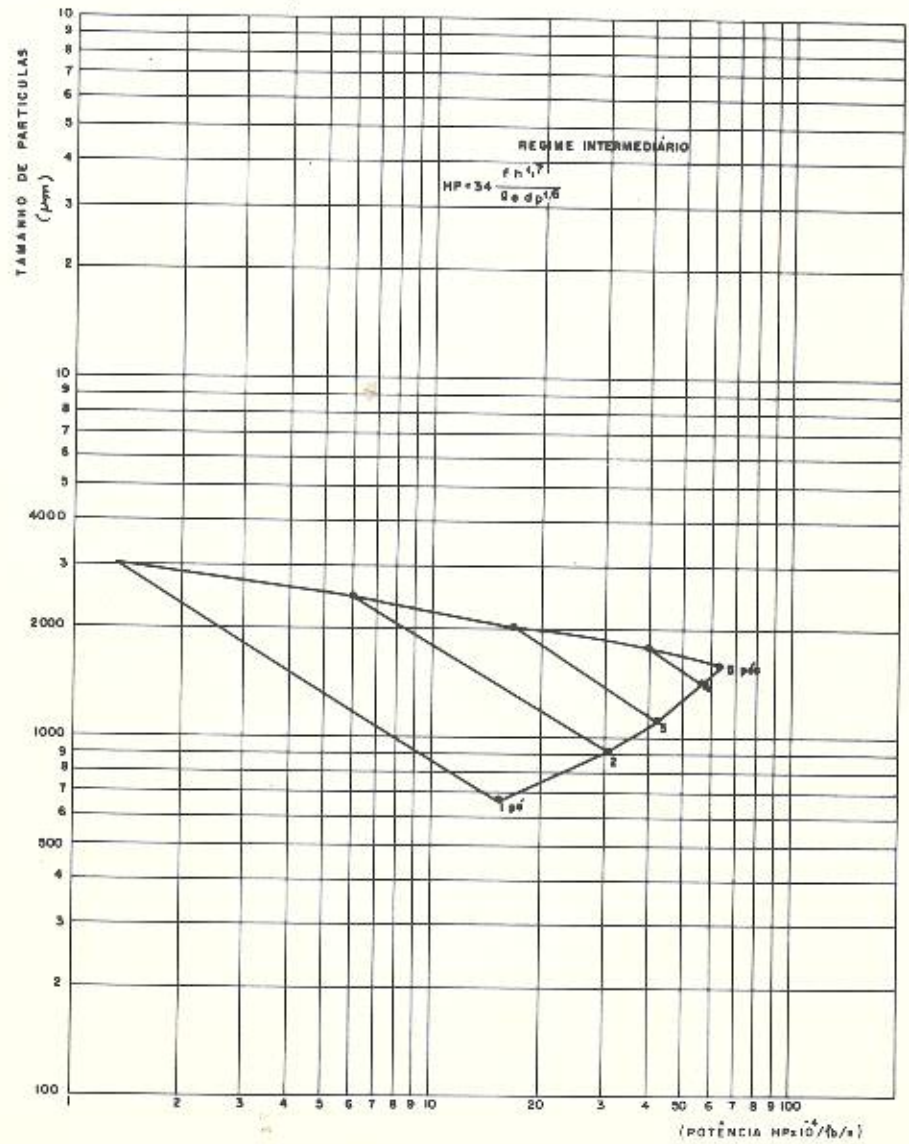


FIGURA 6.38 Potência induzida por partículas com $g_c = 1$ (multiplicar o valor obtido por f/g_c)

TABELA 6.18 Ar induzido por queda de partículas em ar livre, para $f = 1$ e $g_e = 1$

Altura de queda, h (pés)	Área do Fluxo, A (pés ²)	Vazão ar induzido (pés ³ /min) multiplicar por $(f/g_e)^{1/3}$						
		Tamanho da partícula (mm)						
		1	2,5					
2	0,5	200	100					
	1	300	200					
	2	500	300					
	4	800	500					
	8	1 200	700					
	15	2 000	1 000					
	25	2 500	1 500					
50	4 000	2 500						
h	A	Tamanho da partícula (mm)						
		1	2	5	10	20	50	100
3	0,5	450	350	220	180	150	80	65
	1	750	550	350	300	250	150	100
	2	1 200	850	550	450	350	200	170
	4	1 900	1 400	850	700	600	350	250
	8	3 000	2 200	1 400	1 100	900	500	400
	15	4 600	3 300	2 000	1 700	1 400	800	650
	25	6 400	4 600	3 000	2 500	2 000	1 000	900
50	10 000	7 500	4 700	4 000	3 200	1 800	1 400	
h	A	Tamanho da partícula (mm)						
		< 2*	5	10	20	50	100	
		Equivalente pés ³ /min						
6	1/2	650	350	300	250	200	150	
	1	1 000	600	500	350	300	200	
	2	1 500	900	700	600	400	350	
	4	2 000	1 500	1 200	900	700	500	
	8	4 000	2 300	1 800	1 500	1 000	900	
	15	6 500	3 500	2 800	2 200	1 500	1 300	
	25	9 000	5 000	4 000	3 200	2 300	1 800	
50	—	8 000	6 000	5 000	3 700	3 000		
12	1/2	800	560	450	350	270	220	
	1	1 300	900	700	600	420	350	
	2	2 000	1 500	1 100	900	700	550	
	4	3 300	2 300	1 800	1 500	1 000	850	
	8	5 100	3 600	2 900	2 300	1 700	1 300	
	15	8 000	5 300	4 200	3 500	2 600	2 100	
	25	—	7 800	6 000	5 000	3 600	2 900	
50	—	—	10 000	8 000	6 000	4 700		

TABELA 6.18 (Continuação)

h	A	Tamanho da partícula (mm)					
		< 2*	5	10	20	50	100
		Equivalente pés ³ /min					
20	1/2	950	800	650	500	370	300
	1	1 500	1 300	1 000	800	600	500
	2	2 400	2 000	1 600	1 300	960	760
	4	4 000	3 300	2 600	2 000	1 500	1 200
	8	6 000	5 000	4 100	3 200	2 400	1 900
	15	9 500	8 000	6 400	5 000	3 700	2 900
	25	—	—	9 000	7 000	5 000	4 000
30	1/2	1 100	1 000	850	650	500	400
	1	1 800	1 700	1 400	1 100	800	600
	2	2 800	2 700	2 100	1 700	1 300	1 000
	4	4 500	4 400	3 500	2 700	2 000	1 600
	8	7 000	6 800	5 400	4 200	3 200	2 500
	15	—	10 000	8 200	6 600	4 800	4 000
	25	—	—	—	9 000	6 800	5 400

*Multiplique os valores da coluna por $f^{1/3}$ ao invés de $(f/g_p)^{1/3}$

$$C_R = 10 / \sqrt{Re_p}$$

para regime intermediário ($2 < Re_p < 500$);

$$C_R = 0,44$$

para regime turbulento ($Re_p > 500$).

Sendo n o número de partículas (esféricas) por libra de material,

$$n = \frac{6}{d_p^3}, \tag{6.110}$$

$$HP/lb = \int_{v_0}^{v_1} nF dv, \tag{6.111}$$

$$HP/lb = \int_{v_0}^{v_1} \frac{C_R \rho v^2 A_p}{2} \times \frac{6n}{d_p} \times dv; \tag{6.112}$$

em regime laminar, para $v_0 = 0$,

$$HP/lb = \frac{9v^2}{\rho_p d_p^2}; \tag{6.113}$$

para regime turbulento (em aceleração),

$$HP/lb = \left[\frac{0,11 v^3 \rho}{\rho_p d_p} \right]_{v_1}^{v_2} \tag{6.114}$$

Quando em velocidade terminal de queda,

$$HP/partícula = \frac{Fv_t}{550} \tag{6.115}$$

sendo

$$\text{HP/lb} = \text{partículas/lb} \times \text{HP/partícula.}$$

Para cálculo de Q usa-se a Eq. (6.94), com

$$\text{HP} = \text{HP/lb} \times \frac{\text{libras}}{(\text{unidade de tempo})}. \quad (6.116)$$

Vale lembrar que, em condições-padrão,

$$v_t = 0,003\rho_p g d_p^2 \text{ para movimento laminar,}$$

$$v_t = 0,35(\rho_p g)^{2/3} d_p \text{ para movimento intermediário,}$$

$$v_t = 16(\rho_p g)^{1/2} d_p^{1/2} \text{ para movimento turbulento.}$$

POTÊNCIA EM FLUXO DE PARTÍCULAS LANÇADAS

Esse é o caso no qual as partículas são lançadas com uma velocidade inicial (v_0) como, por exemplo, em operações de desbaste com esmeris, corte com serra, etc. A variação da energia cinética no fluxo de partículas com a queda de velocidade serve como base para determinar a potência,

$$\text{HP} = \frac{f(v_0^2 - v^2)}{2 \times 550 \times g} \quad (6.117)$$

ou

$$\text{HP} = 2,83 \times 10^{-5} f(v_0^2 - v^2). \quad (6.118)$$

A equação que liga (aproximadamente) a velocidade ao espaço percorrido em movimento turbulento é

$$v = v_0 \left[1 - \frac{100h}{g_e d_p} \right]. \quad (6.119)$$

Quadrando (6.119) e substituindo em (6.118),

$$\text{HP} = 5,7 \times 10^{-3} \frac{f v_0^2 h}{g_e d_p} \left[1 - \frac{100h}{2g_e d_p} \right]. \quad (6.120)$$

Em casos práticos (pequenas distâncias $x < 5$ pés e grandes partículas $d_p \cong 1000 \mu\text{m}$),

$$\frac{100h}{2g_e d_p} \cong 0, \quad \text{HP} = \frac{5,7 \times 10^{-3} f v_0^2 h}{g_e d_p}; \quad (6.121)$$

em regime intermediário,

$$v^2 = \left[v_0^{0,6} - \frac{10^5 h}{3,05 g_e d_p^{1,6}} \right]^{3,34}; \quad (6.122)$$

substituindo (6.122) em (6.118),

$$\text{HP} = 2,8 \times 10^{-5} f \left[v_0^2 - \left(v_0^{0,6} - \frac{3 \times 10^5}{3,05 g_e d_p^{1,6}} \right)^{3,34} \right]. \quad (6.123)$$

Comentários sobre a teoria apresentada

Os gráficos propostos por Hemeon para cálculo da vazão de ar induzido devem ser usados para os tamanhos máximo e mínimo do tamanho de partícula, obtendo-se as vazões máxima e mínima, adotando-se, para a vazão de ar induzido, o valor médio entre elas. Na prática, tem-se observado que os valores obtidos pelo método proposto são duas ou três vezes maiores que os valores reais, sendo tal fato devido ao que se supõe no desenvolvimento das equações. Supõe-se independência do volume de ar que cada partícula induz, quando, na realidade, há interação de efeitos; admite-se que, com o aumento da distância de queda, cada vez mais ar é induzido, sem se levar em consideração as dimensões e o arranjo espacial do sistema, que podem limitar a indução de ar; supõe-se homogeneidade no tamanho de partículas, mas, na prática, a faixa de tamanho de partículas é ampla, fazendo com que as partículas caiam com velocidades de queda diferentes (maiores partículas têm maior velocidade terminal de queda).

Esses fatos levaram a estudos práticos, como o mencionado trabalho de Anderson, que propôs, para a quantidade de ar induzido,

$$Q = 10A \sqrt[3]{\frac{fh}{d_p}}, \quad (6.124)$$

onde:

- Q = vazão de ar induzido (pés³/min);
- A = área aberta na parte superior do conduto de material disponível para a aspiração do ar induzido (pés²);
- f = fluxo de material transportado (t/h);
- h = altura de queda (pés);
- d_p = diâmetro médio das partículas (pés).

Dummer menciona ainda a sugestão de Krusé e Bianconi, de se tomar o valor real do fluxo de ar induzido como sendo 30% do valor calculado pelas relações propostas por Hemeon. Arrazoam a sugestão prática em função de Hemeon haver admitido que a totalidade da energia se converte em movimento de ar, quando, na prática, uma parte da energia se converte em turbulência. Argumentam, ainda, que, na maior parte dos casos práticos, a queda de material se dá através de dutos estreitos e estanques, fato que limita a indução de ar. Finalmente, sugerem para cálculo de Q ,

$$Q = \left(\frac{10,5 f \sqrt{h}}{\sqrt{d_{med} h P}} \right) e^{-6,5k}, \quad (6.125)$$

sendo

$$k = \frac{90n}{\theta h}, \quad (6.126)$$

- onde
- Q = vazão de ar induzido (pés³/min);
 - f = vazão mássica de material (t/h) ($t = 2\,000$ lb);
 - h = altura vertical de queda (pés);
 - P = peso específico do material (g/cm³);
 - d_{med} = diâmetro médio (em massa) do material (pol);
 - n = número de mudanças de direção do conduto;
 - θ = ângulo de inclinação do conduto.

Afirmam os autores que os valores de Q reais são 30% menores que os valores dados pela Eq. (6.125).

Para correias transportadoras sugerem-se (3) os valores constantes da Tab. 6.19.

TABELA 6.19 Vazões de controle para correias transportadoras

Altura de queda (pés)	Velocidade da correia (pés/min)	Vazão de controle pés ³ /min por pé de largura da correia
≤ 3	< 200	350
	> 200	500
> 3	Largura da correia (pol)	
	< 36	Vazão de controle (pés ³ /min)
	> 36	700
		1000

Exercícios de aplicação

Exercício 1. Um material de gravidade específica 2,7 passa por uma peneira vibratória de 20 mesh (835 μm) à razão de 60 lb/min. Praticamente o peneiramento se dá em metade do comprimento total da peneira, que tem 4 pés de largura e 8 pés de comprimento. Sendo a distância entre a peneira e o silo 3 pés, qual a razão de ar induzido pela queda do material?

Solução. $Re_p = 2$ fixa o limite entre laminar e intermediário.

$$\therefore \frac{\rho d_p v_2}{\mu} = 2, \quad \text{ou} \quad v_2 = \frac{2\mu}{\rho d_p}$$

Fazendo $\mu = 1,8275 \times 10^{-4}$, e d_p em μm,

$$\rho = 1,192 \times 10^{-3},$$

$$\therefore v_2 = \frac{2 \times 1,8275 \times 10^{-4}}{1,192 \times 10^{-3} d_p \times 10^{-4}} = \frac{3066}{d_p} \text{ cm/s};$$

em pés/s $\times 0,03281$,

sendo

$$v_2 = \frac{100,6}{d_p},$$

$$v = \sqrt{2gx}$$

$$h_{500} = \frac{v_2^2}{2g} \cong \frac{157}{d_p^2}$$

Da mesma forma, o limite entre intermediário e turbulento

$$Re_p = 500 = \frac{\rho d_p v_{500}}{\mu},$$

$$\therefore v_{500} = \frac{500 \times 1,8 \times 10^{-4}}{1,2 \times 10^{-3} \times d_p \times 10^{-4}} = \frac{7,5 \times 10^5}{d_p},$$

$$h_{500} = \left[\frac{7,5 \times 10^5}{d_p} \right]^2 \times \frac{1}{2 \times 32,2} \times (0,03281)^2,$$

$$h_{500} = \frac{9,4 \times 10^6}{d_p^2}.$$

Dessa forma, as partículas caminharão, em movimento laminar,

$$h_2 = \frac{150}{(835)^2} \cong 2 \times 10^{-4} \text{ pés,}$$

em movimento intermediário,

$$h_{500} = \frac{9,4 \times 10^6}{(835)^2} \cong 1,35 \times 10 = 13,5 \text{ pés.}$$

Desse modo, considerando só o regime intermediário, por ser significativo, calcule HP pela fórmula (6.107) e, depois, a vazão de ar induzido, pela fórmula (6.94). [Observação. $A = 4 \times \frac{8}{2} = 16 \text{ pés}^2$ na fórmula (6.94).]

Exercício 2. Uma correia transportadora despeja material fragmentado em um silo. São conhecidas: a área do fluxo de partículas em queda ($2 \times 2 \text{ pés}^2$); a altura de queda (10 pés); a distribuição de tamanho das partículas (50% de 10-20 mm e 50% de 1-10 mm); a gravidade específica das partículas (3); a quantidade de material (10 t/h); e a área da boca do silo ($3 \times 3 \text{ pés}^2$). Pede-se (a) o volume de ar induzido e (b) a vazão de exaustão.

Solução. (a) Cálculo da potência. Regimes:

partículas 1-10 mm \rightarrow 5 mm,

desprezamos o movimento intermediário, e precisamos do limite entre turbulento acelerado e turbulento em velocidade constante:

$$S_{(t)} = \frac{0,29 \times g_e \times d_p}{64,4} = \frac{0,29 \times 3 \times 5000}{64,4},$$

$$S_{(t)} = 67,54 \text{ pés.}$$

ou seja, cai todo o tempo em turbulento acelerado. Com muito mais motivo estarão as partículas de 10-20 mm nessas condições:

$$HP_1 = 0,22 \times \frac{fh^2}{d_p g_e},$$

$$f = 10 \frac{\text{t}}{\text{h}} \times \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} \times 2000 \frac{\text{lb}}{\text{t}} \cong 5,55 \frac{\text{lb}}{\text{s}},$$

$$HP = 0,22 \times \frac{5,55 \times (10)^2}{5000 \times 3} \cong 8 \times 10^{-3} \text{ HP;}$$

com o valor de HP,

$$Q^3 = 1,02 \times 10^{11} A^2 \text{ HP,}$$

$$Q = [1,02 \times 10^{11} \times (4)^2 \times 8 \times 10^{-3}]^{1/3} \cong 2350 \text{ pés}^3/\text{min.}$$

Se admitirmos $v_p = 100 \text{ pés}/\text{min}$,

$$Q_e = Q + 100 (A_s - A) = 2350 + 100 (9 - 4),$$

$$Q_e \cong 2850 \text{ pés}^3/\text{min}$$

Exercício 3. Areia ($g_e = 2,7$) com partículas de tamanhos uniformes (2 mm) cai de um transportador à razão de 1200 lb/min em um silo, de uma altura de 3,5 pés. A área da seção transversal do fluxo de material é de 10 pol \times 1,5 pés, sendo a boca do silo de 2 por 3 pés. Calcule a vazão de exaustão, a distância vertical que as partículas percorreriam até atingir a velocidade terminal de queda, e a velocidade terminal de queda.

Solução. (a) Cálculo da velocidade terminal de queda. Em movimento laminar, $Re_p < 2$, ou

$$\frac{\rho d_p v}{\mu} < 2$$

ou

$$v < \frac{2\mu}{\rho d_p};$$

fazendo $\rho \cong 1,2 \times 10^{-3}$, $\mu \cong 1,8 \times 10^{-4}$, e d_p em μm ,

$$v < \frac{2 \times 1,8 \times 10^{-4}}{1,2 \times 10^{-3} \times d_p \times 10^{-4}} \cong \frac{3000}{d_p}.$$

Como em regime laminar, a velocidade terminal de queda vale

$$v_t = \frac{\rho_p g d_p^2}{18\mu},$$

$$v_t = \frac{2,7 \times 980 \times d_p^2}{18 \times 1,8 \times 10^{-4}} \cong 8,16 \times 10^5 d_p^2;$$

igualando e fazendo d_p em μm

$$\frac{3000}{d_p} = 8,16 \times 10^5 d_p^2 \times (10^{-4})^2,$$

$$d_p^3 = \frac{3000}{8,16 \times 10^5 \times 10^{-8}} = \frac{30}{8,16} \times \frac{100}{10^{-3}} = 3,676 \times 10^5,$$

ou

$$d_p^3 = 0,366 \times 10^6 \rightarrow d_p = (0,366)^{1/3} \times 10^2,$$

$$d_p \cong 71 \mu\text{m}.$$

Em outras palavras, apenas partículas com menos de aproximadamente $70 \mu\text{m}$ atingirão velocidade terminal de queda em regime laminar.

O mesmo raciocínio, aplicado para regime intermediário, ou, inversamente, para turbulento, resulta

$$Re > 500,$$

$$Re = \frac{\rho d_p v}{\mu} \therefore v > \frac{500 \mu}{\rho d_p}$$

ou

$$v > \frac{500 \times 1,8 \times 10^{-4}}{1,2 \times 10^{-3} \times d_p \times 10^{-4}} = \frac{750000}{d_p}.$$

Com d_p em μm e sendo em movimento turbulento,

$$v_t = 16(\rho_p g)^{1/2} d_p^{1/2};$$

igualando e com d_p em μm ,

$$16(\rho_p g)^{1/2} (10^{-4} d_p)^{1/2} = \frac{750000}{d_p},$$

$$16 \sqrt{(2,7 \times 980)^1 \times 10^{-4} d_p} = \frac{750000}{d_p},$$

$$\sqrt{2,65 \times 10^{-1} d_p} = \frac{46875}{d_p},$$

$$2,65 \times 10^{-1} d_p = \frac{2,2 \times 10^9}{d_p^2},$$

$$d_p^3 = \frac{2,2 \times 10^9}{2,65 \times 10^{-21}} = 0,830 \times 10^{10} = 8,30 \times 10^9,$$

$$d_p \cong 2009 \mu\text{m},$$

ou seja, partículas superiores a 2000 μm atingem velocidade terminal de queda em regime turbulento. Portanto

$$v_t = 16\sqrt{\rho_p g d_p} = 16\sqrt{2,7 \times 980 \times 2},$$

para $d_p = 2 \text{ mm} = 0,2 \text{ cm}$,

$$\therefore v_t \cong 1164 \text{ cm/s}.$$

(b) Cálculo da queda. Com d_p em μm ,

$$S_{(t)} = \frac{0,29 g_e d_p}{64,4} = \frac{0,29 \times 2,7 \times 2000}{64,4},$$

$$S_{(t)} \cong 24,4 \text{ pés}.$$

(c) Cálculo da vazão induzida

A partícula cai em movimento intermediário acelerado até

$$S_{500} = \frac{11,1 \times 10^6}{d_p^2} = \frac{11,1 \times 10^6}{(2000)^2} = 2,78 \text{ pés},$$

ou seja, quase todo o percurso. Por simplificação, consideremos toda a queda nessa faixa

$$\therefore \text{HP} = 34 \frac{fh^{1,7}}{g_e d_p^{1,6}} = \frac{34 \times 3^{1,7}}{2,7 \times (2000)^{1,6}} = 4,3 \times 10^{-4},$$

$$\therefore Q = (1,02 \times 10^{11} \times A^2 \times \text{HP})^{1/3} = (1,02 \times 10^{11} \times (1,25)^2 \times 4,3 \times 10^{-4})^{1/3},$$

$$Q \cong 406 \text{ pés}^3/\text{min},$$

$$\therefore Q_e = Q + v_p(A_s - A) = 406 + 100(4,75) \cong 881 \text{ pés}^3/\text{min}.$$

VENTILAÇÃO DE TANQUES

Uma das operações industriais frequentemente utilizadas é o tratamento químico, termoquímico e eletroquímico de superfícies metálicas. Além do sistema sopra-exaustão já mencionado, vários outros métodos para a ventilação de tanques têm sido propostos.

A Ref. 3 apresenta várias opções para captores e uma série de tabelas para o cálculo da vazão de controle. Os captores disponíveis estão na Fig. 6.39. As Tabs. 6.20 a 6.25 são utilizadas para o cálculo das vazões de controle.

TABELA 6.20 Determinação do risco potencial

Risco potencial	T.L.V. gás ou vapor	T.L.V. névoas	Ponto de fulgor
A	0-10 ppm	0-0,1 mg/m ³	—
B	11-100 ppm	0,11-1,0 mg/m ³	Abaixo de 100 °F
C	101-500 ppm	1,1-10 mg/m ³	100-200 °F
D	Acima de 500 ppm	Acima de 10 mg/m ³	Acima de 200 °F

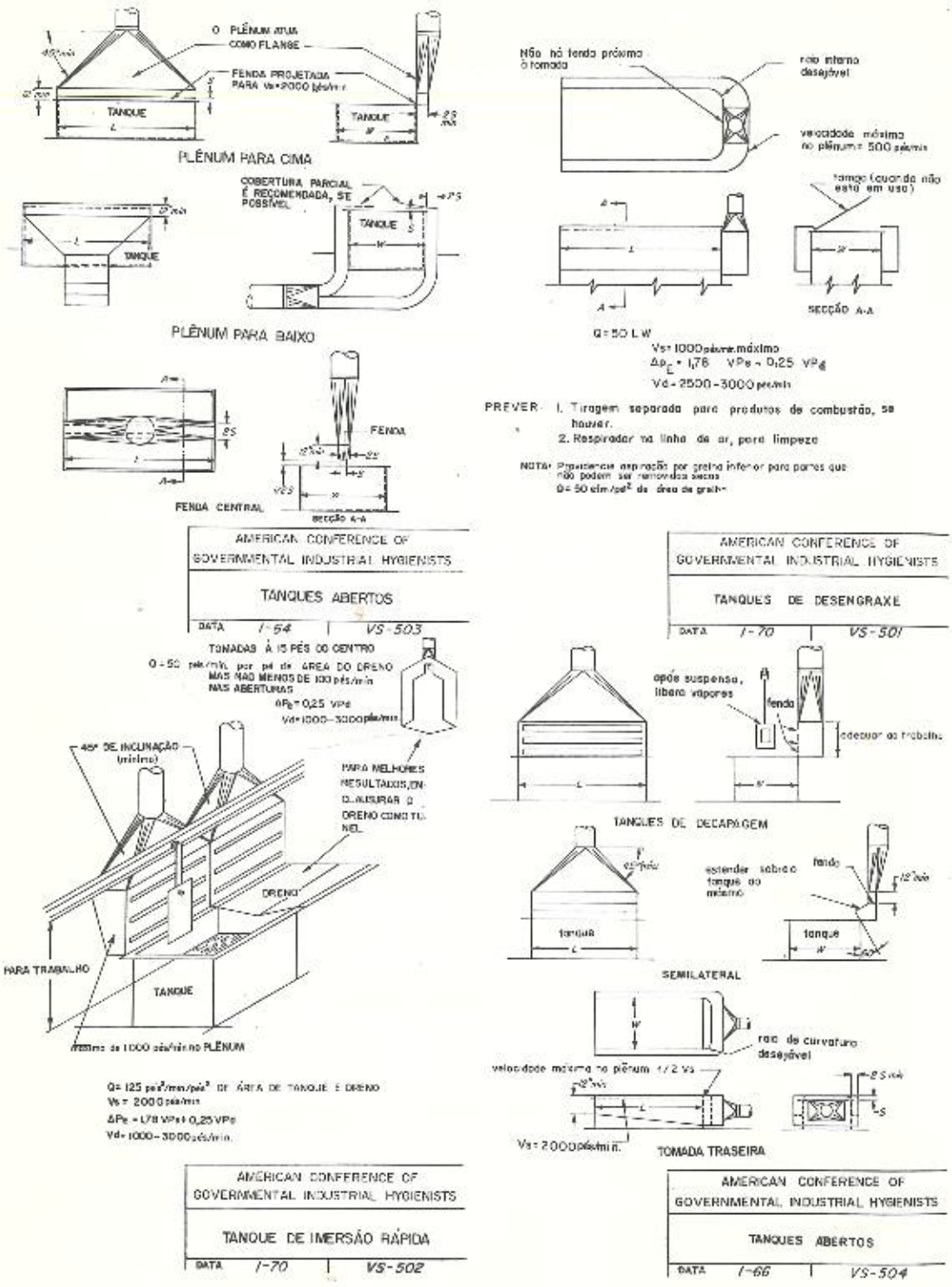


FIGURA 6.39 Ventilação de tanques (Industrial Ventilation)

TABELA 6.21 Determinação da taxa de evaporação

Taxa	Temperatura do líquido (°F)	Graus acima do ponto de ebulição (°F)	Evaporação relativa (tempo para evaporar 100%)	Gaseificação
1	> 200	0-20	Rápida (0-3 h)	Alta
2	150-200	21-50	Média (3-12 h)	Média
3	94-149	51-100	Lenta (12-50 h)	Baixa
4	< 94	Mais de 100	Praticamente nada (mais de 50 h)	Nenhuma

TABELA 6.22 Mínima velocidade de controle para locais sem correntes cruzadas (pés/min)

Classe	Captadores enclausurantes		Exaustão lateral (a)	Coifas	
	Um lado aberto	Dois lados abertos		Três lados abertos	Quatro lados abertos
A-1 e A-2(b)	100	150	150	Não usar	Não usar
A-3(b)					
B-1;	75	100	100	125	175
B-2;					
C-1					
B-3;	65	90	75	100	150
C-2;					
D-1(c)					
A-4(b);	50	75	50	75	125
C-3;					
D-2(c)					
B-4;	Apenas ventilação diluidora é suficiente				
C-4;					
D-3(c);					
D-4					

a) Use W/L para cálculo na Tab. 6.23

b) Não use coifa para risco potencial A

c) Para controle total de água quente, use a classe seguinte

TABELA 6.23 Mínima vazão de controle para exaustão lateral (pés³/min/pé² de tanque)

Caso	Mínima velocidade de controle (pés/min) (Tab. 6.22)	$\frac{W}{L} = \frac{\text{largura do tanque}}{\text{comprimento do tanque}}$				
		0-0,09	0,1-0,24	0,25-0,49	0,5-0,99	1,0-2,0
I	50	50	60	75	90	100
	75	75	90	110	130	150
	100	100	125	150	175	200
	150	150	190	225	260	300
II	50	75	90	100	110	125
	75	110	130	150	170	190
	100	150	175	200	225	250
	150	225	260	300	340	375

Caso I. Captor ao longo de um lado ou dois lados paralelos do tanque, quando um captor está contra uma parede ou barreira. Também para o "captor" ao longo da linha de centro do tanque.

Caso II. Captor ao longo de um lado ou de dois lados paralelos de um tanque livre, sem estar contra uma parede ou barreira.

Nota. Use $W/2$ como largura do tanque quando o captor está ao longo da linha de centro do tanque ou para exaustão lateral nos dois lados do tanque.

TABELA 6.24 Mínima velocidade de controle para locais sem correntes cruzadas (pés/min) - exaustão lateral

Operação	Contaminante	Risco	Evolução	Velocidade (pés/min)	Equipamento de controle
Anodização de alumínio	Ács. crômico e sulfúrico	A	1	150	Sim
Abrilhamento de alumínio	Ács. nítrico e sulfúrico e fosfórico	A	1	150	Sim
		A	1	150	Sim
Eletrólise	Ác. crômico Névoa, cianeto	A	1	150	Sim
		C	2	75	Sim
Limpeza	Névoa alcalina	C	1	100	Sim
Água	Vapor quente fervente	D	2	50	Não
		D	1	75	Não
Remoção de película de cobre	Névoas alcalinas, cianeto	C	2	75	Sim
Remoção de película de níquel	Óxido nítrico	A	1	150	Sim
Decapagem de aço	Ác. clorídrico Ác. sulfúrico	A	2	150	Sim
		B	1	100	Sim
Banhos em solução de sais	Vapor d'água quente fervente	D	2	50	Não
		D	1	75	Não
Banho em sais fundidos	Névoa alcalina	C	1	100	Sim

TABELA 6.25 Tabela para cálculo de vazão de controle

Processo	Tipo	Componente do banho que pode ser emitido	Classe	Faixa usual de temperatura (°F)
Tratamento superficial	Anodização de Al	Ács. crômico e sulfúrico	A-1	95
	Anodização de Al	Ác. sulfúrico	B-1	60-80
	Oxidação alcalina	Solução concentrada de agentes oxidantes alcalinos	C-1	260-350
	Fosfatização	Água fervente	D-2,1	140-212
	Coloração química	Nenhum	D-4	70-90
	Pré-tratamento de aço inox. antes do polimento eletrolítico	Ács. nítrico e fluorídrico	B-2,1	70-150
	Galvanização	Hidróxido de amônia (2)	B-3	140
	Endurecimento superficial do Al	Ács. crômico e sulfúrico	A-1	120-180
	Endurecimento superficial do Al	Ác. sulfúrico	B-1	120-180
	Coloração química em magnésio	Hidróxido de amônia e acetato de amônia	B-3	90-180
Deslustramento e aumento da rugosidade superficial	Alumínio	Hidróxido de sódio e fosfato trissódico	C-1	160-180
	Cobre	Ác. clorídrico	A-2	70-90
	Cobre	Nenhum	D-4	70
Decapagem	Alumínio	Ác. nítrico	A-2	70-90
	Alumínio	Ács. crômico e sulfúrico	A-3	140
	Alumínio	Hidróxido de sódio	C-1	140
	Ferro fundido	Ács. nítrico e fluorídrico	A-2,1	70-90
	Cobre	Ác. sulfúrico	B-3,2	125-175
	Cobre	Nenhum	D-4	70-175
	Duralumínio	Ács. sulfúrico e fluoreto de sódio	A-3	70
	Inconel	Ács. nítrico e fluorídrico	A-1	150-165
	Inconel	Ác. sulfúrico	B-2	160-180
	Ferro e aço	Ác. clorídrico	A-2	70
	Ferro e aço	Ác. sulfúrico	B-1	70-175
	Magnésio	Ács. crômico, sulfúrico e nítrico	A-2	70-160
	Metal monel e níquel	Ác. clorídrico	A-2	180
	Metal monel e níquel	Ác. sulfúrico	B-1	160-180
	Níquel-prata	Ác. sulfúrico	B-3,2	70-140
	Prata	Cianeto de sódio	C-3	70-210
	Aço inoxidável	Ács. nítrico e fluorídrico	A-2	125-180
	Aço inoxidável	Ác. clorídrico	A-2	130-140

TABELA 6.25 (Continuação)

Processo	Tipo	Componente do banho que pode ser emitido	Classe	Faixa usual de temperatura (°F)
	Aço inoxidável	Ác. sulfúrico	B-1	180
	Aço inoxidável (imunização)	Ác. nítrico	A-2	70-120
	Aço inoxidável (apassivação)	Ác. nítrico	A-2	70-120
Imersão rápida em solução ácida	Banho abrillantador de alumínio	Ács. sulfúrico e nítrico	A-1	200
	Banho abrillantador de alumínio	Ács. fosfórico e nítrico	A-2,1	70-90
	Banho abrillantador de cádmio	Nenhum	D-4	70
	Banho abrillantador de cobre	Ács. sulfúrico e nítrico	A-2,1	70-90
	Banho abrillantador de cobre	Ác. sulfúrico	B-2	70
	Banho abrillantador de ligas de cobre	Ács. sulfúrico e nítrico	A-2,1	70-90
	Banho fosco de cobre	Ács. sulfúrico e nítrico	A-2,1	70-90
	Banho de magnésio	Ác. crômico	A-2	190-212
	Banho de magnésio	Ács. sulfúrico e nítrico	A-2,1	70-90
	Banho de metal monel	Ács. sulfúrico e nítrico	A-2,1	70-90
	Banho para níquel e ligas	Ács. sulfúrico e nítrico	A-2,1	70-90
	Banho para prata	Ác. nítrico	A-1	70-90
	Banho para prata	Ác. sulfúrico	B-2	70-90
	Banho para zinco e ligas	Ács. crômico e clorídrico	A-4,3	70-90
Limpeza de superfícies metálicas	Limpeza alcalina	Sais alcalinos de sódio	C-2,1	160-210
	Desengraxe	Tricloroetileno e percloroetileno	B	188-250
	Limpeza com emulsão	Solventes de petróleo	B-3,2	70-140
	Limpeza com emulsão	Hidrocarbonetos clorados		70-140
Polimento eletrolítico	Alumínio	Ács. sulfúrico e clorídrico	A-2	140-200
	Latão de bronze	Ác. fosfórico	B-3	68
	Cobre	Ác. fosfórico	B-3	68
	Ferro	Ács. clorídrico, sulfúrico e perclórico	A-2	68-175
	Metal monel	Ác. sulfúrico	B-2	86-160
	Níquel	Ác. sulfúrico	B-2	86-160
	Aço inoxidável	Ács. crômico, fluorídrico e sulfúrico	A-2,1	70-300
	Aço	Ács. sulfúrico, clorídrico e perclórico	A-2	68-175

TABELA 6.25 (Continuação)

Processo	Tipo	Componente do banho que pode ser emitido	Classe	Faixa usual de temperatura (°F)
Solução <i>strike</i>	Cobre	Cianetos	C-2	70-90
	Prata	Cianetos	C-2	70-90
	Liga de níquel	Cloreto de níquel e ác. clorídrico	A-2	70-90
Deposição não-eletrolítica	Cobre	Aldeído fórmico	A-1	75
	Níquel	Hidróxido de amônia (2)	B-1	190
Eletr deposição alcalina	Platina	Fosfato de amônia e amônia	B-2	158-203
	Estanho	Estanato de sódio	C-3	140-170
	Zinco	Nenhum	D-4	170-180
Eletr deposição com fluorboratos	Cádmio	Fluorborato	C-3,2	70-170
	Cobre	Fluorborato de cobre	C-3,2	70-170
	Índio	Fluorborato	C-3,2	70-170
	Chumbo	Fluorborato de chumbo e ác. fluorbórico	A-3	70-90
	Liga de chumbo (estanho)	Fluorborato de chumbo e ác. fluorbórico	C-3,2	70-100
	Níquel	Fluorborato de níquel	C-3,2	100-170
	Estanho	Fluorborato de estanho e ác. fluorbórico	C-3,2	70-100
	Zinco	Fluorboratos	C-3,2	70-170
Eletr deposição com cianetos	Latão e bronze	Cianeto e hidróxido de amônia (2)	B-4,3	60-100
	Zinco	Cianetos e hidróxido de sódio	C-3	70-120
	Cádmio	Nenhum	D-4	70-100
	Cobre	Nenhum	D-4	70-160
	Cobre	Cianetos e hidróxido de sódio	C-2	110-160
	Ouro	Cianetos	C-4,3	75-214
	Índio	Cianetos e hidróxido de sódio	C-3	70-120
	Prata	Nenhum	D-4	72-120
	Liga zinco-estanho	Cianetos e hidróxido de potássio	C-3,2	120-140
	Liga branca	Cianetos e estanato de sódio	C-3	120-150
	Zinco	Cianetos e hidróxido de sódio	C-3,2	70-120
Eletr deposição com ácidos	Cromo	Ác. crômico	A-1	90-140
	Cobre	Sulfato de cobre e ác. sulfúrico	B-4,3	75-120

TABELA 6.25 (Continuação)

Processo	Tipo	Componente do banho que pode ser emitido	Classe	Faixa usual de temperatura (°F)
	Ouro	Cianetos	C-3,2	70-160
	Índio (sulfato)	Nenhum	D-4	70-120
	Índio	Ác. sulfâmico e sais sulfamato	C-3	70-90
	Ferro	Cloretos e ác. clorídrico	A-2	190-210
	Ferro (sulfato)	Nenhum	D-4	70-120
	Níquel	Fluoreto de amônia e ác. fluorídrico	A-3	102
	Níquel (sulfato)	Nenhum	C-4	70-150
	Níquel	Sulfato de níquel	B-2	70-90
	Níquel	Sulfamato de níquel	C-3	75-160
	Paládio	Nenhum	D-4	70-120
	Rádio (sulfato)	Nenhum	D-4	70-120
	Estanho (sulfato)	Nenhum	C-2	70-90
	Estanho	Haletos de estanho	D-4	70-120
	Zinco	Cloreto de zinco	B-3	75-120
	Zinco (sulfato)	Nenhum	D-4	70-120
Remoção de película depositada sobre a superfície metálica	Material superficial que foi coberto			
Películas anodizadas	Alumínio, magnésio	Ác. crômico	A-2	120-200
Película oxidada negra	Aço	Ác. clorídrico	A-3,2	70-125
Latão e bronze *	Níquel e aço	Hidróxido de sódio e cianeto de sódio	C-3,2	70-90
Cádmio *	Níquel e aço	Hidróxido de sódio e cianeto de sódio	C-3,2	70-90
Cádmio	Latão-cobre-aço	Ác. clorídrico	A-3,2	70-90
Cromo *	Magnésio-níquel-aço	Hidróxido de sódio	C-3	70-150
Cromo	Latão-cobre-níquel-aço	Ác. clorídrico	A-2	70-125
Cromo *	Latão Cu Ni Zn	Ác. sulfúrico	B-2	70-90
Cobre	Níquel e aço	Hidróxido de sódio e cianeto de sódio	C-3,2	70-90
Cobre	Mg, metais não-ferrosos e aço	Nenhum (para o aço só quando se usa banho de ácidos crômico e sulfúrico)	D-4	70-90
Cobre *	Aço	Cianetos alcalinos	C-3,2	70-160
Cobre	Alumínio	Ác. nítrico	A-1	70-120

TABELA 6.25 (Continuação)

Processo	Tipo	Componente do banho que pode ser emitido	Classe	Faixa usual de temperatura (°F)
Cobre *	Zinco	Hidróxido de sódio e sulfato de sódio	C-2	185-195
Ouro *	Cobre e ligas; níquel e ligas	Hidróxido de sódio, cianeto de sódio ferroso e aço	C-3,2	70-90
Ouro *	Cobre e ligas; zinco	Ác. sulfúrico	B-3,2	70-100
Chumbo	Prata	Ác. acético e peróxido de hidrogênio	D-3	70-90
Chumbo *	Aço	Hidróxido de sódio	C-3,2	70-140
Níquel	Latão-cobre	Ács. sulfúrico e nítrico	A-2,1	70-90
Níquel *	Latão-cobre	Ács. clorídrico	A-3	70-90
Níquel *	Latão-cobre-aço	Ác. sulfúrico	B-3	70-90
Níquel	Magnésio	Ác. clorídrico	A-3,2	70-90
Níquel	Aço	Ác. nítrico fumegante	A-1	70-90
Níquel *	Alumínio-zinco	Ác. sulfúrico	B-3,2	70-150
Película de fosfato	Aço	Ác. crômico	A-3	165
Película de fosfato	Aço	Hidróxido de amônia	B-3,2	70-90
Ródio	Latão niquelado	Ács. sulfúrico e clorídrico	A-3,2	70-100
Prata	Alumínio	Ác. nítrico	A-1	70-90
Prata	Latão	Ács. nítrico e sulfúrico	A-1	180
Prata *	Níquel-aço	Hidróxido de sódio e cianeto de sódio	C-3	70-90
Prata *	Metal branco	Cianeto de sódio	C-3	70-90
Estanho	Latão-cobre-bronze	Cloreto férrico-sulfato de cobre-ác. acético	B-4,3	70-90
Estanho *	Latão-cobre-bronze	Hidróxido de sódio	C-3	70-90
Estanho	Latão-cobre-aço	Ác. clorídrico	A-3,2	70-90
Estanho *	Aço	Hidróxido de sódio	C-2	70-200
Zinco	Alumínio	Ác. nítrico	A-1	70-90
Zinco	Níquel-aço	Hidróxido de sódio	C-3	70-90

*Processo eletrolítico.

TABELA 6.26 Velocidade de captura e vazão mínima de controle*

Processo	Tipo	Componente do banho que pode ser emitido	Mínima velocidade de captura (m/min)		Vazão mínima de controle m ³ /min/m ² de áreas do tanque para exaustão lateral								
			Caplar enclausurado	Exaustão lateral	Colifa	Relação $\frac{W}{L} = \frac{\text{argu.}^3}{\text{comprimento}}$							
Tratamento superficial	Anodização de Al	Ác. crômico e sulfúrico	30	46	46	79	91	104	114				
	Anodização de Al	Ác. sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76	
	Oxidação alcalina	Solução concentrada de agentes oxidantes alcalinos	23	30	30	38	52	46	53	61	69	76	
	Fosfitização	Água fervente	15	23	15	23	38	23	27	30	34	38	
	Coloração química	Nenhum	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	
	Pré-tratamento de aço inox. antes do polimento eletrolítico	Ác. nítrico e fluorídrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76	
	Deslustramento e aumento da rugosidade superficial	Galvanização	Hidróxido de amônia (2)	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58
		Endurecimento superficial do Al	Ác. crômico e sulfúrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
		Endurecimento superficial do Al	Ác. sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76
		Coloração química em magnésio	Hidróxido de amônia e acetato de amônia	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58
Alumínio		Hidróxido de sódio e fosfato trissódico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76	
Decapagem	Cobre	Ác. clorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114	
	Cobre	Clorato férrico	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	
	Alumínio	Ác. nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114	
	Alumínio	Ác. crômico e sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76	
	Alumínio	Hidróxido de sódio	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76	
Ferro fundido	Ác. nítrico e fluorídrico	30	46	46	(1)	(1)	68	79	91	104	114		

Cobre	Ác. sulfúrico	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58
Cobre	Dicromato de sódio + H ₂ SO ₄	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
Duralumínio	Ács. sulfúrico e fluoreto de sódio	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76
Inconel	Ács. nítrico e fluorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Inconel	Ác. sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76
Ferro e aço	Ác. clorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Ferro e aço	Ác. sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76
Magnésio	Ács. crômico, sulfúrico e nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Metal monel e níquel	Ác. clorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Metal monel e níquel	Ác. sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76
Níquel-prata	Ác. sulfúrico	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58
Prata	Cianeto de sódio	15	23	15	23	38	23	27	30	34	38
Aço inoxidável	Ács. nítrico e fluorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Aço inoxidável	Ác. clorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Aço inoxidável	Ác. sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76
Aço inoxidável (imunização)	Ác. nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Aço inoxidável (passivação)	Ác. nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Banho abrillantador de alumínio	Ács. sulfúrico e nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Idem, idem, de alumínio	Ács. fosfórico e nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Idem, idem, de cádmio	Nenhum	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
Idem, idem, de cobre	Ács. sulfúrico e nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Idem, idem, de cobre	Ác. sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76
Idem, idem, de ligas de cobre	Ács. sulfúrico e nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Idem, foseco de cobre	Ács. sulfúrico e nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Idem de magnésio	Ác. crômico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Idem de metal monel	Ács. sulfúrico e nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Idem p/ níquel e ligas	Ács. sulfúrico e nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Idem p/ prata	Ác. nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Idem p/ prata	Ác. sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76
Idem p/ zinco e ligas	Ács. crômico e clorídrico	23	30	30	(1)	(1)	46	53	61	69	76

Imersão rápida em solução ácida

Eletrodeposição e/ fluorboratos	Cádmio	Fluorborato	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58	
	Cobre	Fluorborato de cobre	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58	
	Índio	Fluorborato	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58	
	Chumbo	Fluorborato de chumbo e ác. fluorbórico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76	
	Liga chumbo (estanho)	Fluorborato de chumbo e ác. fluorbórico	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58	
	Níquel	Fluorborato de níquel	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58	
	Estanho	Fluorborato de estanho e ác. fluorbórico	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58	
	Zinco	Fluorboratos	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58	
	Eletrodeposição com cianeto	Latão e bronze	Cianetos e hidróxido de amônia (2)	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58
		Zinco	Cianeto e hidróxido de sódio	15	23	15	23	38	23	27	30	34	38
		Cádmio	Nenhum	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
		Cobre	Cianeto	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
		Cobre	Excesso cianeto	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58
Ouro		Cianetos	15	23	15	23	38	23	27	30	34	38	
Índio		Cianeto e hidróxido de sódio	15	23	15	23	38	23	27	30	34	38	
Prata		Nenhum	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	
Ligas zinco-estanho		Cianetos e hidróxido de po- tássio	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58	
Liga branca		Cianetos e estanoato de Na e Albaloy	15	23	15	23	38	23	27	30	34	38	
Zinco		Quando usados anodos insol.	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58	
Cromo		Ác. crômico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114	
Cobre		Acima de 90 °F	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58	
Ouro	Moderado de ác. orgânico	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58		
Índio (sulfato)	Nenhum	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)		
Índio	Sulfamato	15	23	15	23	38	23	27	30	34	38		
Ferro	Cloretos e ác. clorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114		
Ferro (sulfato)	Nenhum	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)		
Níquel	Magnésio	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76		

Eletrodeposição
com ácidos

TABELA 6.26 (Continuação)

Processo	Tipo	Componente do banho que pode ser emitido	Mínima velocidade de captura (m/min)		Vazão mínima de controle m ³ /min/m ² de áreas do tanque para exaustão lateral							
			Captor enclausurado	Exaustão lateral	Cofa	Relação $\frac{W}{L}$	$\frac{W}{L}$ largura comprimento					
			Um lado aberto	Dois lados abertos	Três lados abertos	Quatro lados abertos	Até 0,09	0,25 a 0,24	0,5 a 0,49	1,0 a 2,0		
			(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)		
	Níquel (sulfato)	Clorídrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76
	Níquel	Quando se usam anodos insol.	15	23	15	23	38	23	27	30	34	38
	Níquel	Sulfâmico	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
	Paládio	Ac. clorídrico	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
	Rádio (sulfato)	Fosfórico	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
	Estanho (sulfato)	Nenhum	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
	Estanho	Halato de estanho	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58
	Zinco	Cloreto de zinco	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58
	Zinco (sulfato)	Nenhum	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
	Remoção de película depositada sobre a superfície metálica											
	Material da superfície que foi coberta											
Películas anodizadas	Alumínio, magnésio	Ac. crômico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Película óxida negra	Aço	Ac. clorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Latão e bronze (5)	Níquel e aço	Hidróxido de sódio, cianeto de sódio	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58
Cádmio (5)	Níquel e aço	Hidróxido de sódio e cianeto de sódio	20	27	23	30	46	34	40	46	52	58
Cádmio	Latão-cobre-aço	Ac. clorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Cromo (5)	Magnésio-níquel-aço	Hidróxido de sódio	15	23	15	23	38	23	27	30	34	38
Cromo	Latão-cobre-níquel e aço	Ac. clorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104	114
Cromo (5)	Latão-cobre-níquel-zinco	Ac. sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69	76
Cobre	Níquel e aço	Hidróxido de sódio e cianeto de sódio	20	27	21	30	46	34	40	46	52	58

Cobre	Magnésio não-ferruginoso e aço	Nenhum (usa-se banho de ácidos crômico e sulfúrico)	(3)	(3)	(1)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
Cobre (5)	Aço	Cianetos alcalinos	20	27	23	30	46	34	40	46	52
Cobre	Alumínio	Ác. nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104
Cobre (5)	Zinco	Hidróxido e sulfeto de sódio	20	27	23	30	46	34	40	46	52
Ouro (5)	Cobre e ligas, níquel e ligas	Hidróxido e cianeto de sódio ferroso e aço	20	27	23	30	46	34	40	46	52
Ouro (5)	Cobre e ligas - zinco	Ác. sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69
Chumbo	Prata	Também ligas de chumbo	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
Chumbo (5)	Aço	Hidróxido de sódio	20	27	23	30	46	34	40	46	52
Níquel	Latão-cobre	Ác. sulfúrico e nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104
Níquel (5)	Latão-cobre	Ác. clorídrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69
Níquel (5)	Latão-cobre-aço	Ác. sulfúrico	20	27	23	30	46	34	40	46	52
Níquel	Magnésio	Ác. clorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104
Níquel	Aço	Nitrato de sódio	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104
Níquel (5)	Alumínio-zinco	Ác. sulfúrico	23	30	30	38	53	46	53	61	69
Película de fosfato	Aço	Ác. crômico	23	30	30	38	53	46	53	61	69
Película de fosfato	Aço	Hidróxido de amônia	23	30	30	38	53	46	53	61	69
Ródio	Latão níquelado	Ác. sulfúrico e clorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104
Prata	Alumínio	Ác. nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104
Prata	Latão	Ác. nítrico e sulfúrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104
Prata (5)	Níquel, aço	Hidróxido e cianeto de sódio	15	23	15	23	38	23	27	30	34
Prata (5)	Metá branco	Cianeto de sódio	15	23	15	23	38	23	27	30	34
Estanho	Latão-cobre-bronze	Cloreto férrico-sulfato de cobre - ác. acético	20	27	23	30	46	34	40	46	52
Estanho (5)	Latão-cobre-bronze	Hidróxido de sódio	15	23	15	23	38	23	27	30	34
Estanho	Latão-cobre-aço	Ác. clorídrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104
Estanho (5)	Aço	Hidróxido de sódio	20	27	23	30	46	34	40	46	52
Zinco	Alumínio	Ác. nítrico	30	46	46	(1)	(1)	69	79	91	104
Zinco	Níquel-aço	Hidróxido de sódio	15	23	15	23	38	23	27	30	34

(1) Não se usa coifa.
 (2) Ou hidróxido de amônia.
 (3) Não requer uma ventilação local exaustora.
 (4) Depende do T.L.V. da substância.
 (5) Processo eletrolítico.

*Alguns valores sugeridos nesta tabela são superiores aos valores em geral utilizados em ventilação industrial, por ser o propósito básico desta recomendação o controle dos ambientes de trabalho, visando proteger o trabalhador com garantia de uma dada margem de segurança. Valores válidos para tanques afastados de paredes, obstáculos, etc.

Os principais dados necessários ao projeto de ventilação de tanques podem ser resumidos da seguinte forma (3):

- a) velocidade nos dutos = 2 000 pés/min;
- b) perda de carga na entrada do captor,

$$\Delta p_e = 1,78p_c + \text{perda na entrada do duto,}$$

$$p_c = \text{pressão cinética na fenda (pol de H}_2\text{O)};$$

- c) máxima velocidade no plenum = metade da velocidade na fenda;
- d) velocidade na fenda = 2 000 pés/min (geralmente);
- e) para comprimento do tanque (L) maior que 6 pés, é desejável usar várias tomadas; se $L > 10$ pés, é necessário usar várias tomadas;
- f) para considerar o efeito da largura efetiva do tanque devem ser obedecidas as recomendações da Tab. 6.25,

$$W = 36-48 \text{ pol: necessária fenda dos dois lados,}$$

$$W = 48 \text{ pol: enclausurar ou usar push-pull.}$$

g) A ventilação, através da dimensão maior do tanque, não é praticável quando $W/L \geq 2,0$, e deve ser evitada quando $W/L > 1$.

h) O nível de líquido no tanque deve estar pelo menos 6 pol abaixo da base da fenda.

i) Os dutos devem ser revestido de material anticorrosivo e ter portas de limpeza e de drenagem.

j) Sempre que possível, devem-se usar obstáculos para reduzir o efeito de correntes cruzadas do ambiente.

A Superintendência de Saneamento Ambiental (11) combinou os dados das tabelas do *Manual of Industrial Ventilation* numa única tabela (Tab. 6.26), que permite o cálculo de sistemas de ventilação local exaustora em tanques.

TABELA 6.27 Vazões de controle e dutos utilizados

Operação ou equipamento	Vazão (pés ³ /min)	Diâmetro (pol) mangueiras de plástico
Talhadeira pneumática	8-60	3/8-1 1/2
Esmeris radiais	10-45	5/8-7/8
Esmeris de superfícies	10-50	5/8-1 1/2
Lixadeira de disco (5 a 9 pol diâm.)	10-30	5/8-1 1/2
Lixadeira vibratória	100-200	1-2
Esmeril cônico (1-3 pol de diâm.)	10-40	5/8-1 1/2
Esmeril basculante	250-300	2
Escovas metálicas manuais	25-30	5/8
Escovas metálicas de superfície	35	3/4
Esmeril interno (1,5 pol de diâm.)	25	5/8
Esmeril interno (4 pol de diâm.)	37,5	3/4

SISTEMAS DE BAIXA VAZÃO E ALTA PRESSÃO

Em alguns casos de emissão de material particulado, há necessidade de se promover ventilação com grandes velocidades de captura e a altas velocidades de transporte com pequenas vazões. É o caso da ventilação da poeira emitida por ferramentas manuais portáteis e por algumas máquinas operatrizes. As grandes perdas de carga envolvidas nesses sistemas exigem a utilização de turbinas, ao invés de ventiladores centrífugos, sendo seu cálculo complexo e,

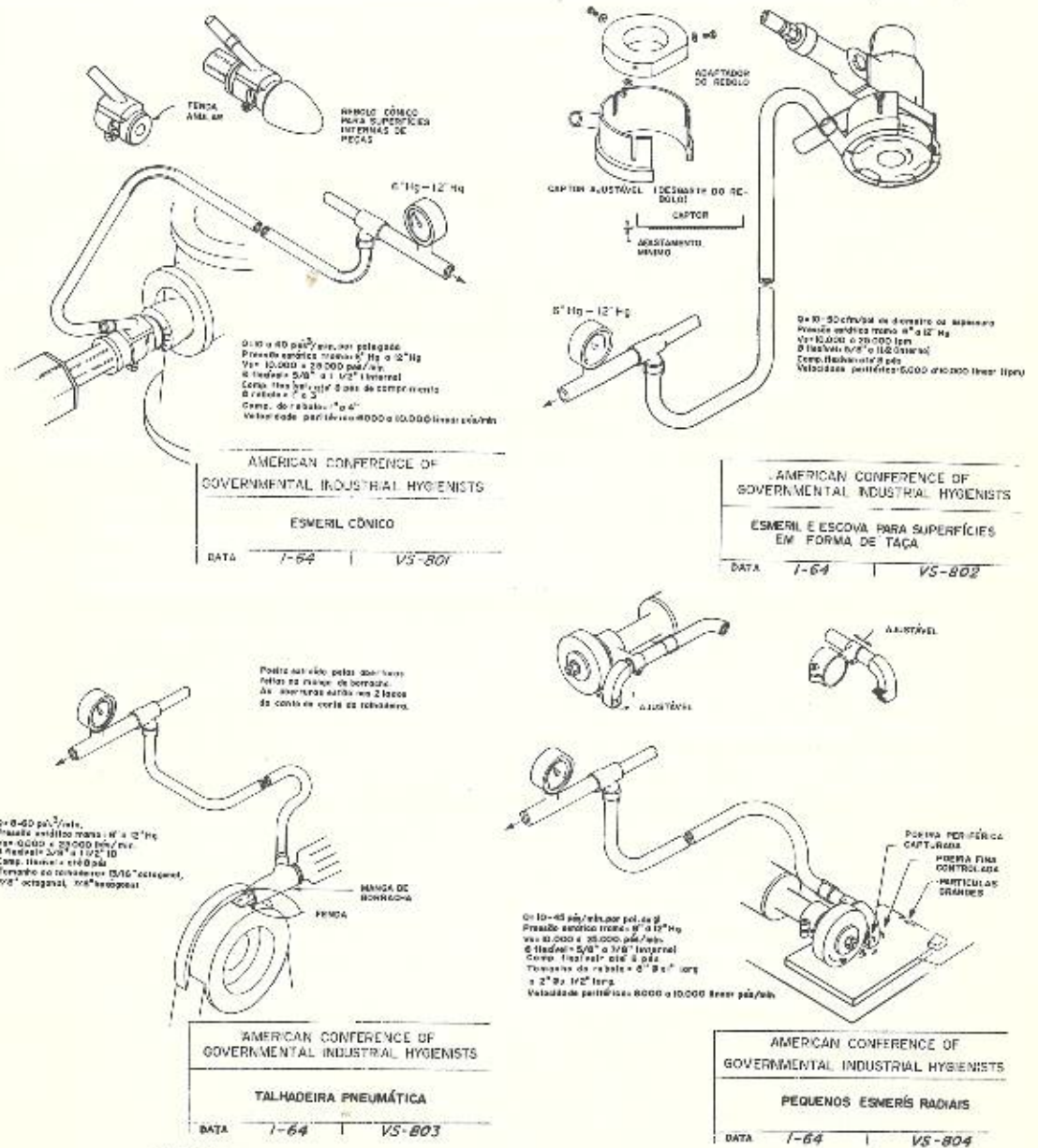


FIGURA 6.40 Ventilação de sistemas de baixa vazão e alta pressão

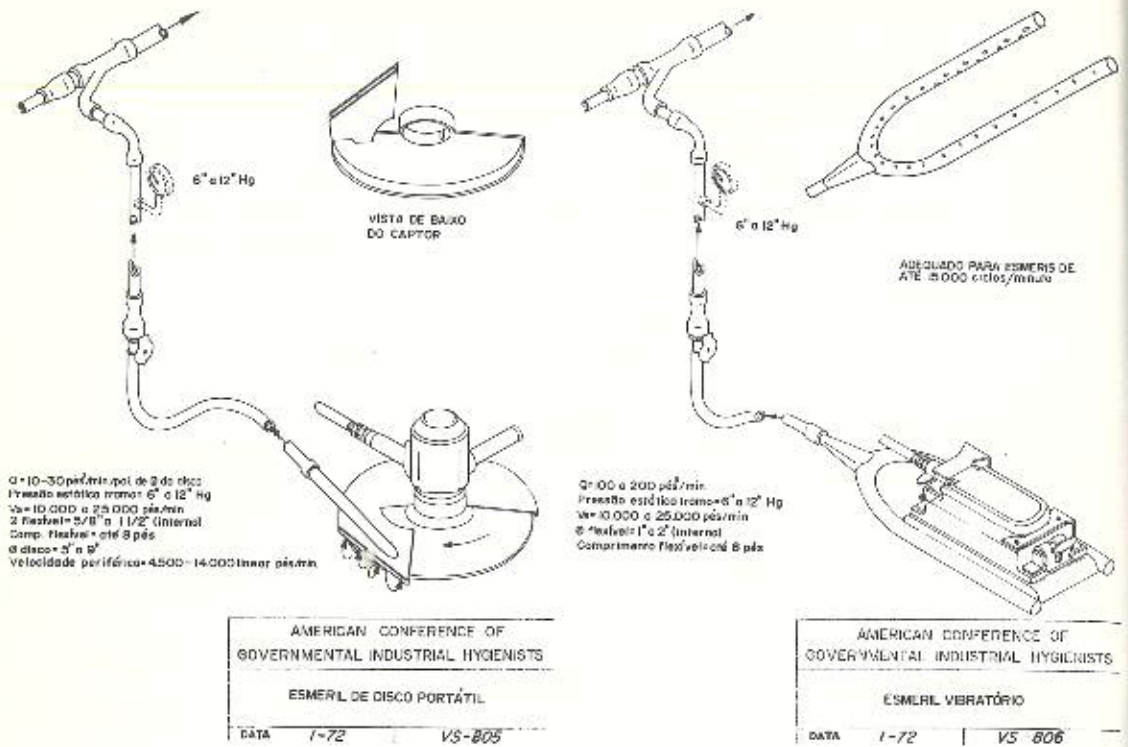


FIGURA 6.40 (Continuação)

na maior parte das vezes, solucionável experimentalmente. Os sistemas normalmente encontrados não são fixos, sendo comum o uso de mangueiras de plásticos, internamente lisas e resistentes, para reduzir a perda de carga e o desgaste abrasivo.

A Ref. 3 fornece alguns dados de vazão de controle e diâmetro das mangueiras (Tab. 6.27) e algumas configurações para a captação da poeira (Fig. 6.40).

VENTILADORES

INTRODUÇÃO

Em ventilação industrial, o fornecimento de energia para o fluido geralmente é feito através de um ventilador centrífugo ou axial. Mais raramente são usados os chamados sopradores e ejetores. Neste trabalho nos limitaremos a abordar os ventiladores, por ser sua aplicação muito mais freqüente.

A função básica de um ventilador é, pois, mover uma dada quantidade de ar por um sistema de ventilação a ele conectado. Assim, o ventilador deve gerar uma pressão estática suficiente para vencer as perdas do sistema e uma pressão cinética para manter o ar em movimento. Quando em repouso, o ventilador centrífugo comporta-se como um vaso volumétrico contendo um dado volume de ar. Ao entrar em movimento, o ar nele contido é centrifugado, recebendo um incremento de energia, sendo o vazio criado no ventilador preenchido com novo ar, pela ação da pressão atmosférica, a uma velocidade suficiente para repor a quantidade que foi descarregada. Quando em movimento a uma dada

rotação constante, o volume específico do ventilador é induzido e descarregado continuamente, sendo evidente que o volume total depende apenas da rotação do ventilador. Uma vez que a energia cinética é função da velocidade ao quadrado, a pressão gerada pelo ventilador varia com o quadrado da rotação. Sendo a potência função de ambos, vazão e pressão, ela varia com o cubo da rotação.

PRINCIPAIS TIPOS — VANTAGENS E DESVANTAGENS

Os tipos principais de ventiladores axiais e centrífugos estão na Fig. 6.41. As principais vantagens de cada tipo são dadas a seguir.

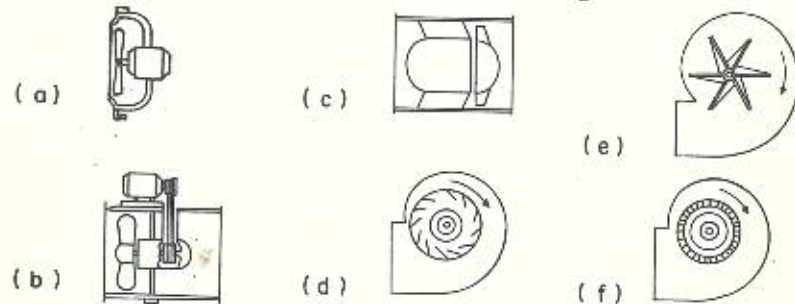


FIGURA 6.41 Tipos de ventiladores. (a) Axial, tipo propulsor; (b) axial comum; (c) axial com guias; (d) centrífugo, pás para trás; (e) centrífugo, pás retas; (f) centrífugo, pás para frente

CENTRÍFUGO DE PÁS RADIAIS

É um ventilador robusto, para movimentar efluentes com grande carga de poeira, poeiras pegajosas e corrosivas. Apresenta menores possibilidades de "afogar", sendo para trabalho mais pesado. A eficiência desse tipo de ventilador é baixa, e seu funcionamento é barulhento. Sua curva característica é mostrada na Fig. 6.42(a).

CENTRÍFUGO DE PÁS PARA FRENTE

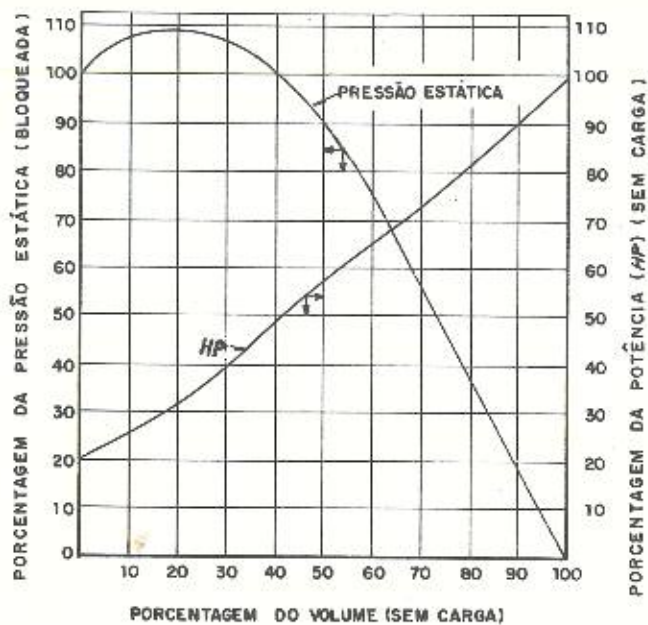
Tem eficiência mais elevada, maior capacidade exaustora a baixas velocidades, e não é adequado para trabalhos de alta pressão. Não é adequado para altas cargas de poeira, e apresenta problemas freqüentes de corrosão se mal-utilizado. Uma curva característica típica é mostrada na Fig. 6.42(b). Cuidados devem ser tomados para que o ponto de trabalho caia à direita do segundo pico da curva característica.

CENTRÍFUGO DE PÁS PARA TRÁS

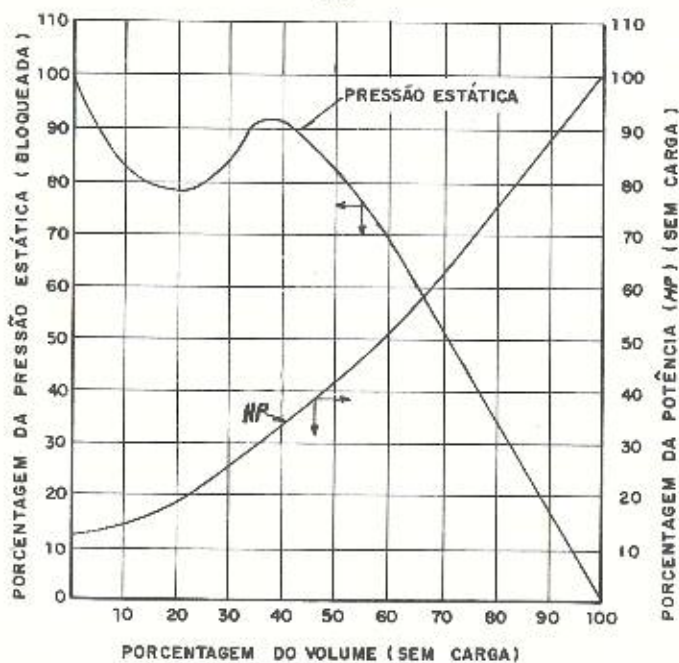
Possui duas importantes vantagens: apresenta uma eficiência maior e uma autolimitação de potência, como pode ser observado na Fig. 6.42(c), que é sua curva característica típica. Isso significa que, se o ventilador está sendo usado em sua máxima potência, o motor não será sobrecarregado por mudanças de sistema de dutos. É um ventilador de alta eficiência e silencioso se trabalhar num ponto eficiente.

AXIAL PROPULSOR

É o tipo mais barato para mover grandes volumes de ar a baixas pressões. É freqüentemente utilizado para circulação de ar ambiente, e raramente para ventilação local exaustora. Sua curva característica típica está na Fig. 6.42(d).

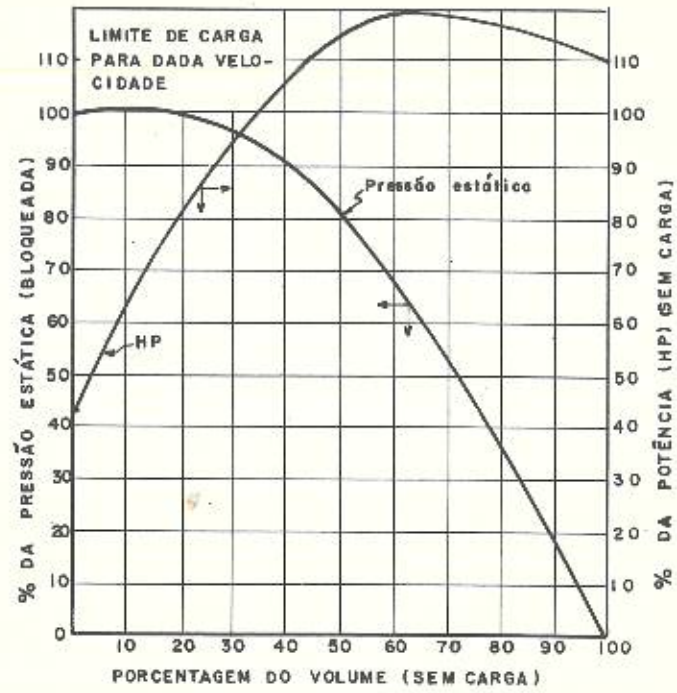


(a)

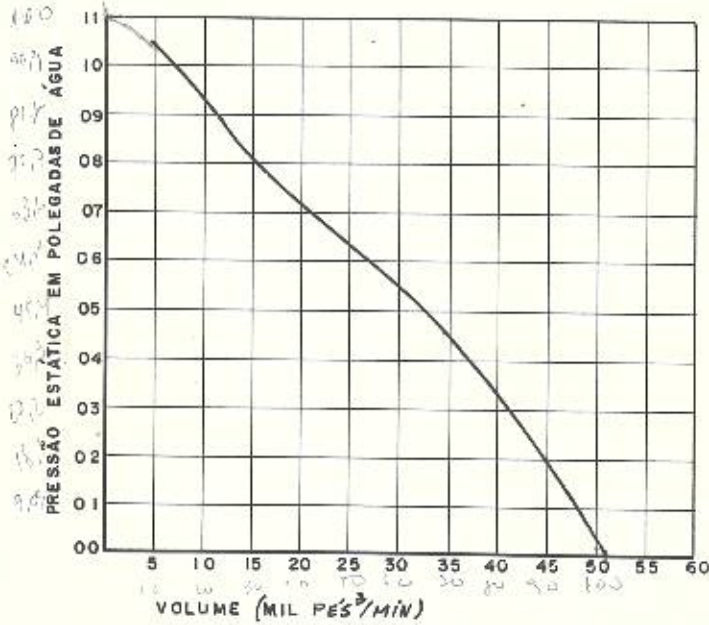


(b)

FIGURA 6.42 (a) Curvas características de ventiladores centrífugos de pás radiais. (b) Curvas características de ventiladores centrífugos de pás para frente. (c) Curvas características de ventiladores centrífugos de pás para trás. (d) Curvas características de ventiladores axiais propulsores. (e) Curvas características de ventiladores tubo-axiais



(c)



(d)

FIGURA 6.42 (Continuação)

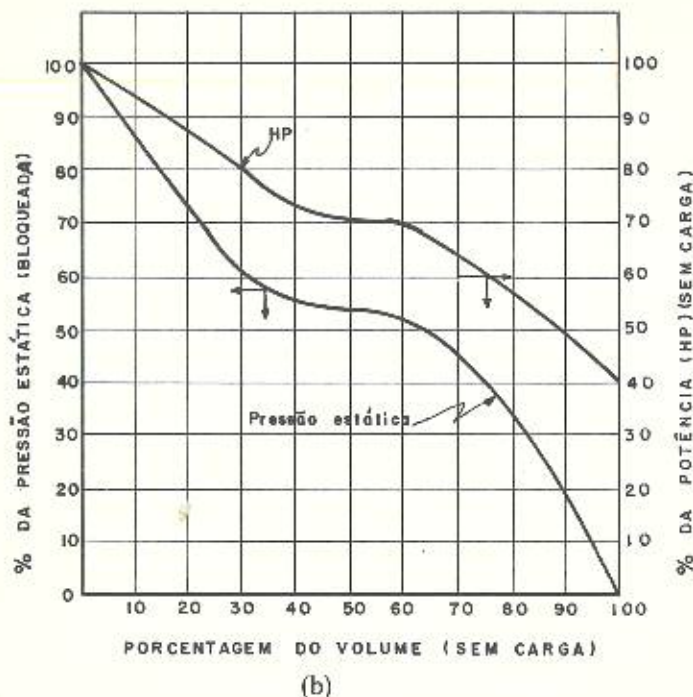


FIGURA 6.42 (Continuação)

TUBO-AXIAIS

Trata-se de um propulsor, com pás mais grossas e mais largas, colocado dentro de um tubo, o que permite sua direta conexão em dutos.

AXIAL COM AEROFÓLIOS

Possui uma ampla calota central, que possibilita sua utilização a pressões mais elevadas. É freqüentemente usado em ventilação de minas subterrâneas e, em algumas ocasiões, em indústrias. Nesse tipo de ventilador, a forma das pás é muito importante, e eles não devem ser usados onde haja risco de erosão e corrosão.

Sua típica curva característica está na Fig. 6.42(e).

LEIS DOS VENTILADORES

Já vimos, ao final da Introdução, que a vazão varia com a rotação, que a pressão desenvolvida varia com o quadrado da rotação, e que a potência varia com o cubo da rotação. Essas relações, acrescidas das que mostram a variação da vazão, da pressão e da potência com a densidade do fluido, e com o tamanho do ventilador, constituem as chamadas leis dos ventiladores. Usaremos a seguinte nomenclatura:

- d = diâmetro do ventilador (pés);
- Q = vazão exaurida (pés³/min);

p_{st} = pressão estática (pol de H_2O);
 rpm = rotações por minuto;
 HP = potência transferida ao fluido (em *horse power*);
 ω = capacidade do ventilador (lb/min);
 ρ = densidade do fluido gasoso (lb/pé³);
 η = eficiência mecânica do ventilador.

As leis dos ventiladores podem ser expressas conforme segue.

a) Para um dado ventilador exaurindo um gás de densidade constante,

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2}, \quad (6.127)$$

$$\frac{p_{st1}}{p_{st2}} = \frac{(\text{rpm}_1)^2}{(\text{rpm}_2)^2}, \quad (6.128)$$

$$\frac{HP_1}{HP_2} = \frac{(\text{rpm}_1)^3}{(\text{rpm}_2)^3}. \quad (6.129)$$

b) Para um dado ventilador a rotação constante,

$$Q = \text{constante}, \quad (6.130)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (6.131)$$

$$\frac{p_{st1}}{p_{st2}} = \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (6.132)$$

$$\frac{HP_1}{HP_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (6.133)$$

c) A variação com o tamanho de d é

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left[\frac{d_1}{d_2} \right]^3, \quad (6.134)$$

$$\frac{p_{st1}}{p_{st2}} = \left[\frac{d_1}{d_2} \right]^2, \quad (6.135)$$

$$\frac{HP_1}{HP_2} = \left[\frac{d_1}{d_2} \right]^5. \quad (6.136)$$

A variação da vazão com a rotação faz com que muitos se proponham a aumentá-la com o objetivo de conseguir maiores vazões. Vale, pois, lembrar o aumento da potência com o cubo da rotação, fazendo com que o motor originalmente utilizado nem sempre suporte esse aumento, havendo risco de que seja danificado. Cuidados de ordem estrutural do ventilador também devem ser tomados.

As Eqs. (6.134), (6.135) e (6.136) indicam que se pode prever o funcionamento de ventiladores de tamanhos diferentes do protótipo testado sem a necessidade de se testar cada tamanho de ventilador.

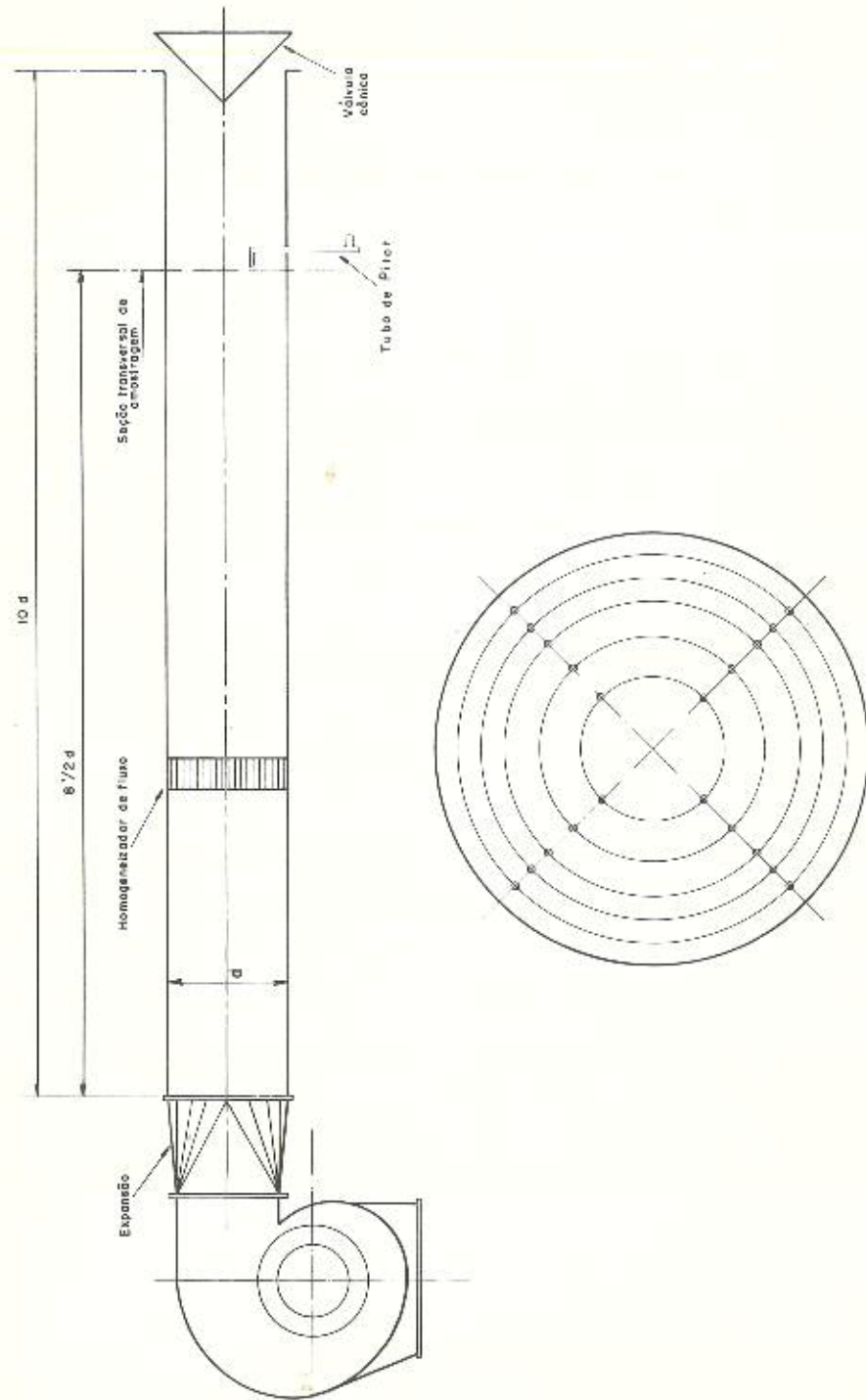


FIGURA 6.43 Arranjo para testes de ventiladores

TESTE DE VENTILADORES — OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

A Fig. 6.43 mostra um arranjo típico de teste de um ventilador. O duto conectado ao ventilador tem um comprimento de cerca de dez vezes seu próprio diâmetro cuja magnitude é tal que a área da seção transversal esteja entre +12,5% e -7,5% da área da boca de descarga do ventilador. A resistência do sistema é regulada com uma válvula cônica que permite a variação da vazão. O eixo do ventilador é diretamente conectado a um dinamômetro de corrente contínua, e a velocidade pode ser variada.

A carcaça do motor é montada em mancais antifricção, e tende a girar proporcionalmente ao torque aplicado no eixo, tendência essa balanceada por um peso cuja grandeza é diretamente lida em escala. O produto da velocidade pelo peso e por uma constante que depende do dinamômetro fornece a potência desenvolvida em um dado tempo. A densidade do fluido é medida por termômetros (bulbo seco e bulbo úmido) e um barômetro devidamente calibrados. Vazão e pressão são lidas com o tubo de Pitot.

A uma dada rotação, as leituras são feitas com a válvula bloqueando totalmente a boca de saída. A seguir novas leituras são feitas para aumentos graduais de boca de saída por afastamento da válvula cônica, totalizando de oito a dez posições da mesma, sendo a última com a válvula totalmente aberta, de forma a não mais interferir na resistência do sistema. Feitas as correções para condições-padrão (densidade = 0,075 lb/pé³) e, usando as leis dos ventiladores, podem-se construir as curvas características do ventilador já mencionadas.

A chamada eficiência estática pode ser computada e plotada pelo uso da seguinte relação:

$$\eta_e = \frac{Q \times p_{st}}{6356 \times \text{HP}} \quad (6.137)$$

Cada curva é correspondente a um tamanho, a uma rotação e a uma densidade. Se houver mudança em um desses parâmetros, a curva mudará, de acordo com a lei dos ventiladores. A forma da curva depende em parte do tipo de ventilador, como já foi abordado quando os vários tipos foram apresentados.

O SISTEMA E SUA RESISTÊNCIA

Considerações iniciais

A aplicação do teorema de Bernoulli entre a entrada e a saída de um sistema de dutos, considerando-se que a velocidade do ar, nos ambientes de onde o fluido provém e onde o fluido é descarregado, é zero, fornece

$$\omega = \Delta p_t + (p_{st_e} - p_{st_s}), \quad (6.138)$$

onde

- ω = trabalho a ser fornecido pelo ventilador;
- Δp_t = perda de carga total do sistema (inclui a pressão cinética de saída);
- p_{st_e} = pressão estática na entrada;
- p_{st_s} = pressão estática na saída.

A diferença de pressões estáticas ($p_{st_1} - p_{st_2}$) não deve ser computada como perda, pois não o é. Em casos usuais de ventilação industrial, essa diferença de pressão estática é nula, e o trabalho fornecido pelo ventilador deve ser igual à perda total do sistema. Vale ressaltar que a energia fornecida para dar uma pressão cinética ao fluido não é uma perda, pois pode, a qualquer instante, ser transformada em pressão estática. No entanto a pressão cinética na saída do sistema deve ser debitada como perda, uma vez que a energia a ela correspondente é dissipada no ambiente onde se dá a descarga.

Feitas essas considerações iniciais, podemos passar a estudar a variação da resistência do sistema (soma da perda de carga com a diferença de pressão estática) com a vazão.

Variação da resistência do sistema com a vazão

Para escoamento em regime turbulento ($Re > 2\,400$), cada perda individual é proporcional ao quadrado da velocidade do fluido e, portanto, ao quadrado da vazão. A soma das perdas individuais, em conseqüência, variará proporcionalmente ao quadrado da vazão, isto é, parabolicamente.

Em escoamento laminar ($Re < 2\,400$), cada perda é proporcional à velocidade (vazão) e, portanto, assim, será sua soma, isto é, a soma das perdas de carga variará linearmente com a vazão. Finalmente, em alguns componentes do sistema, pode-se ter uma perda constante, invariável com a vazão (ou velocidade) como, por exemplo, por borbulhadores e fornos Bessemer, que apresentam uma resistência constante à passagem do fluido pela massa líquida, casos, no entanto, incomuns em sistemas de ventilação usuais.

Equacionando as possibilidades,

$$\Delta p_t = aQ^2 + bQ + c. \quad (6.139)$$

Como já foi mencionado, em sistemas de ventilação usuais, $c = 0$. A maioria dos sistemas de ventilação opera em regime turbulento em quase todas as suas partes componentes. Em alguns componentes, no entanto, o regime é laminar, como, por exemplo, em equipamentos de coleta de poluentes do tipo filtro de tecido (filtro-manga). Em casos onde existem componentes em que o escoamento é laminar $b \neq 0$ e, quando no sistema não existirem componentes nessas condições, $b = 0$. A Fig. 6.44 mostra essas possibilidades graficamente. A curva resultante em cada caso chama-se curva característica do sistema.

Um comentário se faz necessário. Em regime turbulento, já vimos que a perda de carga varia com o quadrado da vazão. Haverá, no entanto, um valor da vazão (à medida que ela diminui) a partir do qual o número de Reynolds cai para valores abaixo de 2000, ou seja, passa-se a regime laminar. Em outras palavras, o regime não é turbulento em todos os casos e, para pequenas vazões, o regime é laminar. Esse fato é verdadeiro, no entanto incomum em ventilação industrial por exigir valores pequenos da vazão como, por exemplo, 1 600 pés³/min para um duto de 12 pol e 260 pés³/min para um duto de 5 pol. Deve-se, no entanto, ter em mente que, nos pontos próximos da origem (vértice) da parábola que caracteriza a variação em regime turbulento, o regime é laminar, ou seja, caracterizado por variação linear.

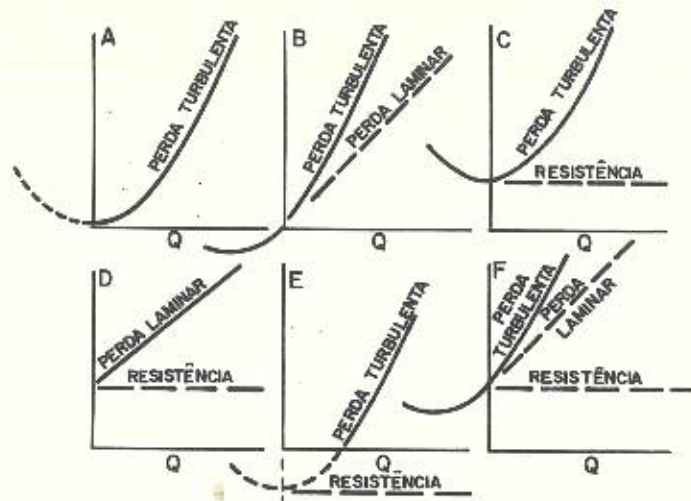


FIGURA 6.44 Curvas características do sistema

A resistência do sistema não é obrigatoriamente fixa. A adição de novos componentes, a variação da posição de válvulas reguladoras, a deposição de poeira em meio filtrante e outros fatores, modificam-na, ou seja, provocam uma mudança nos coeficientes da equação (a e b).

CONJUNTO SISTEMA-VENTILADOR

Em sistemas de ventilação, o ventilador é a turbomáquina que deve fornecer a energia suficiente para promover o escoamento do fluido através do sistema, acelerando-o e garantindo que as perdas do sistema sejam vencidas. Já vimos que o ventilador, em dadas condições, tem uma curva característica, o mesmo acontecendo com o sistema. Se ambas as curvas forem plotadas em um mes-

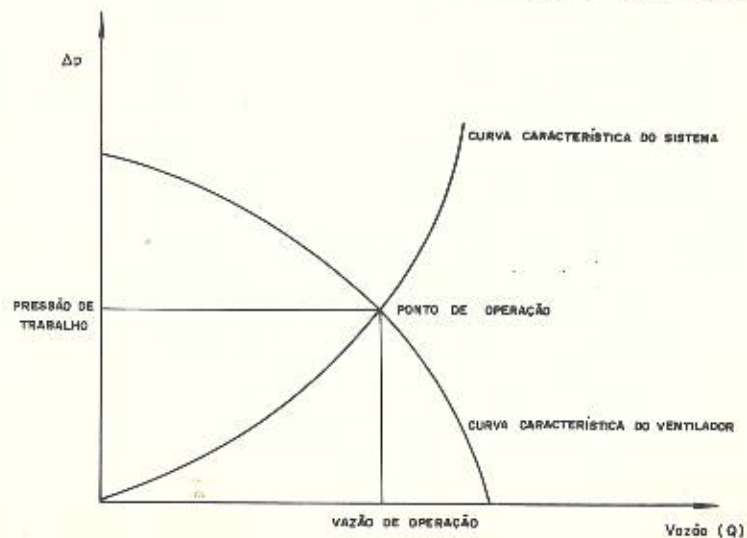


FIGURA 6.45 Conjunto sistema-ventilador

mo diagrama (Fig. 6.45) só haverá um ponto de funcionamento do ventilador no sistema, o ponto de interseção das curvas características. Nesse ponto, a vazão do sistema é a vazão do ventilador, e a pressão desenvolvida pelo ventilador equilibrará a resistência do sistema. Mudanças de condições e fatores alteram uma ou ambas as curvas características e a curva de potência. Em itens posteriores, essas variações serão analisadas. Antes disso, a relação entre o tipo de ventilador e a forma de sua curva característica será analisada.

A INFLUÊNCIA DO TIPO DE VENTILADOR EM SUA CURVA CARACTERÍSTICA

Antes de iniciarmos o assunto desta seção é interessante um rápido comentário sobre a estabilidade de funcionamento de um ventilador com uma dada curva característica.

A Fig. 6.46 ilustra o assunto. No caso em pauta, o ventilador sem válvula de regulação de vazão opera a 1 170 rpm, exaure ar em condições-padrão, ou seja, com densidade igual a $0,075 \text{ lb/pe}^3$. Pelas curvas da Fig. 6.46, pode-se notar que a curva característica do ventilador apresenta um ponto de máxima pressão e que a curva característica do sistema determina o ponto de operação do conjunto em sua interseção com a curva característica do ventilador. Esse ponto pode ser o ponto de máxima pressão, ou pode cair à esquerda (trecho de inclinação positiva) ou à direita (trecho de inclinação negativa) do mesmo, e determinará a eficiência e a potência requerida pelo ventilador. O ventilador operará em condições estáveis se o ponto de operação situar-se no trecho de inclinação negativa da curva característica do ventilador, e em condições instáveis se estiver no trecho de inclinação positiva. A mesma Fig. 6.46 confirma essa afirmação. Se considerarmos o ponto de operação X e, pela diminuição da resistência do sistema, a vazão é aumentada, o conjunto se equilibrará no ponto de operação Y . Da mesma forma, a um aumento da resistência do sistema, o ventilador reagirá reduzindo a vazão. Quando o ponto de operação estiver no trecho de inclinação positiva, por exemplo, ponto P na figura, nenhum problema advirá se não houver qualquer mudança no sistema. Se, por qualquer razão, houver um pequeno aumento na resistência do sistema (a curva característica do sistema move-se para a esquerda e, portanto, para menores vazões), e instantaneamente o ventilador tiver de suprir esse acréscimo de pressão, devido à inclinação positiva da curva, isso só será possível com um aumento da vazão. No entanto uma disponibilidade maior de vazão só é possível com um aumento ainda maior da pressão desenvolvida pelo ventilador. Esse processo contínuo ocorre até ser atingido o ponto máximo da curva característica do ventilador, quando então o ventilador perde pressão e cai a vazão, resultando em um decréscimo da pressão requerida, movendo a curva novamente para a esquerda, e assim por diante. Vê-se, pois, que o ventilador é incapaz de encontrar um ponto de operação estável, e esse fenômeno chama-se "caça" (ou procura), do ponto de operação. Em altas pressões, esse fenômeno é altamente danoso à estrutura do ventilador, e, portanto, na prática, deve ser evitado escolhendo-se um ventilador que permita que o ponto de operação caia no trecho de inclinação negativa de sua curva característica. Vistos esses aspectos, podemos passar ao estudo superficial das curvas características de vários tipos de ventiladores. A Fig. 6.47 mostra os

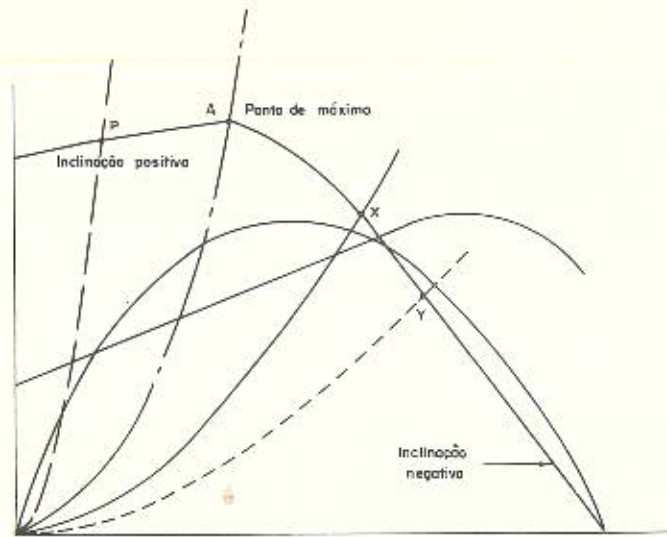


FIGURA 6.46 Variações do ponto de operação

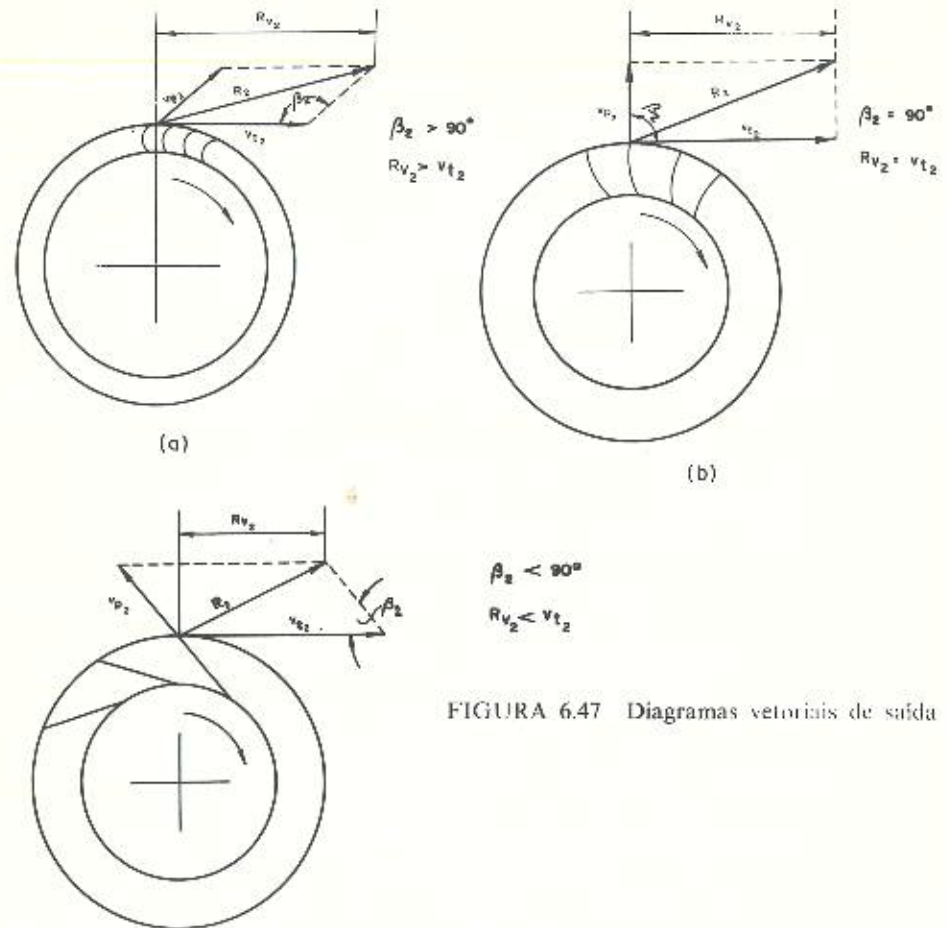


FIGURA 6.47 Diagramas vetoriais de saída

diagramas vetoriais de saída dos três tipos de ventiladores centrífugos mais comuns, onde v_{t2} é a velocidade tangencial da ponta da pá, v_{p2} a velocidade do ar com relação à pá, β_2 o ângulo entre v_{t2} e a pá na sua ponta, R_2 a resultante de v_{t2} e v_{p2} ou velocidade absoluta do ar com relação à carcaça, e Rv_2 a componente de R_2 na direção de v_{t2} .

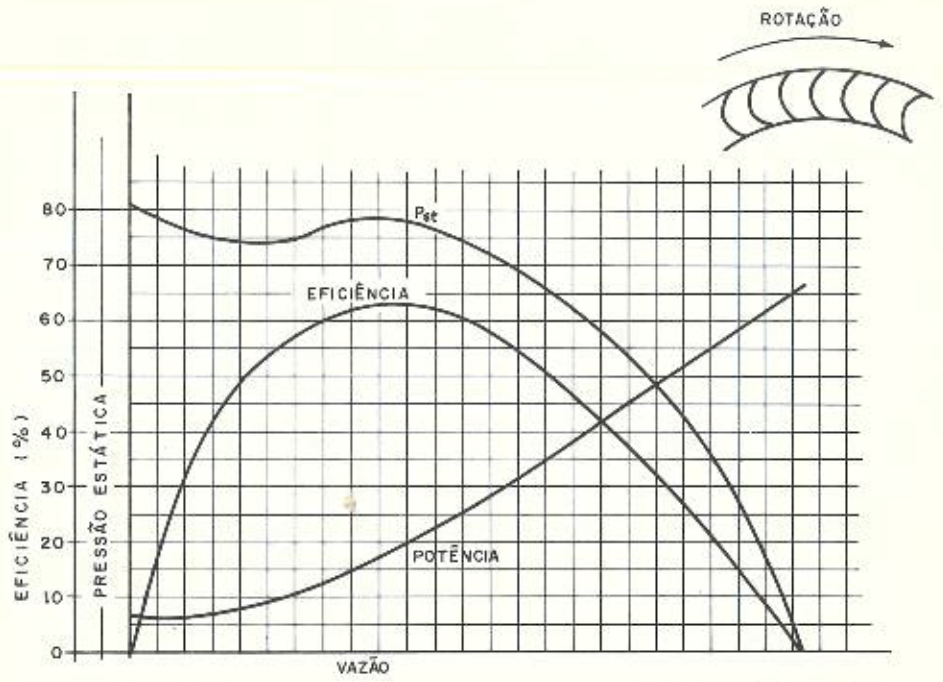
As curvas características desses tipos de ventiladores estão nas Figs. 6.48(a), (b) e (c).

É sabido que a pressão que pode ser desenvolvida por um ventilador depende de Rv_2 e, pelas figuras, pode-se notar que, para um valor fixo de v_{t2} , o ventilador de pás para frente é o que desenvolve maiores pressões ($Rv_2 > v_{t2}$) ou, em outras palavras, para um dado requisito de pressão, um ventilador de pás para frente é o que terá menores dimensões.

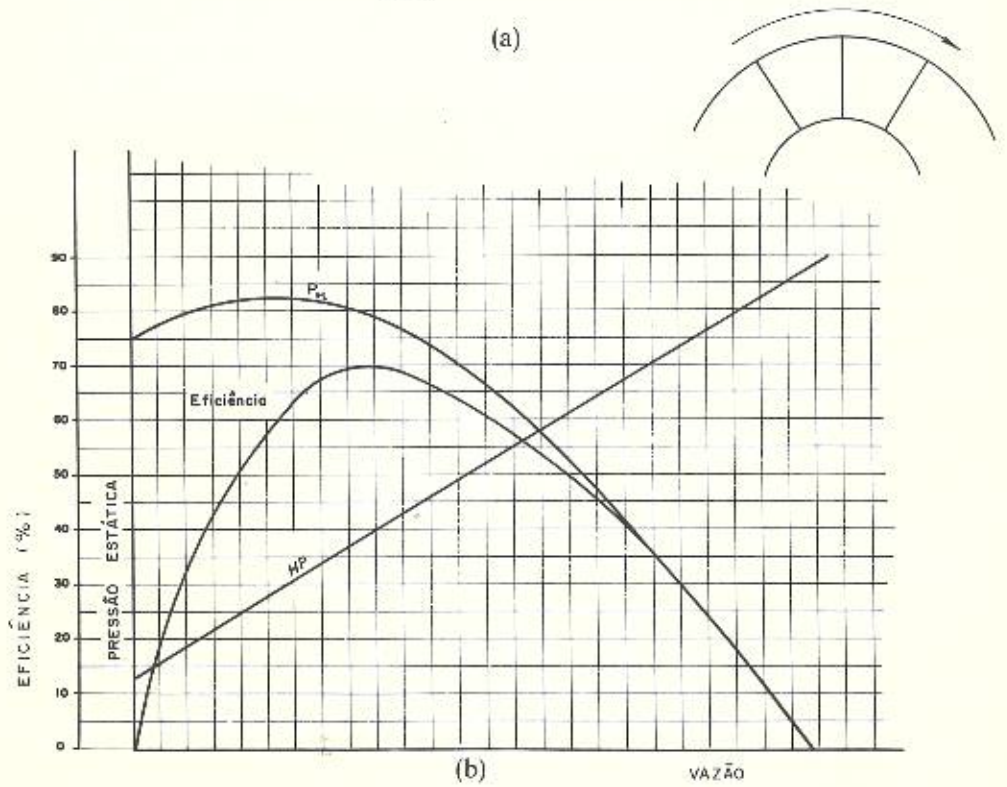
De forma resumida, podem-se notar, nas figuras apresentadas, algumas características principais dos três tipos de ventiladores centrífugos, conforme segue.

Pás para frente [Figs. 6.47 e 6.48(a)]

Alta capacidade de vazão e pressão.



(a)



(b)

FIGURA 6.48 Curvas características de ventiladores

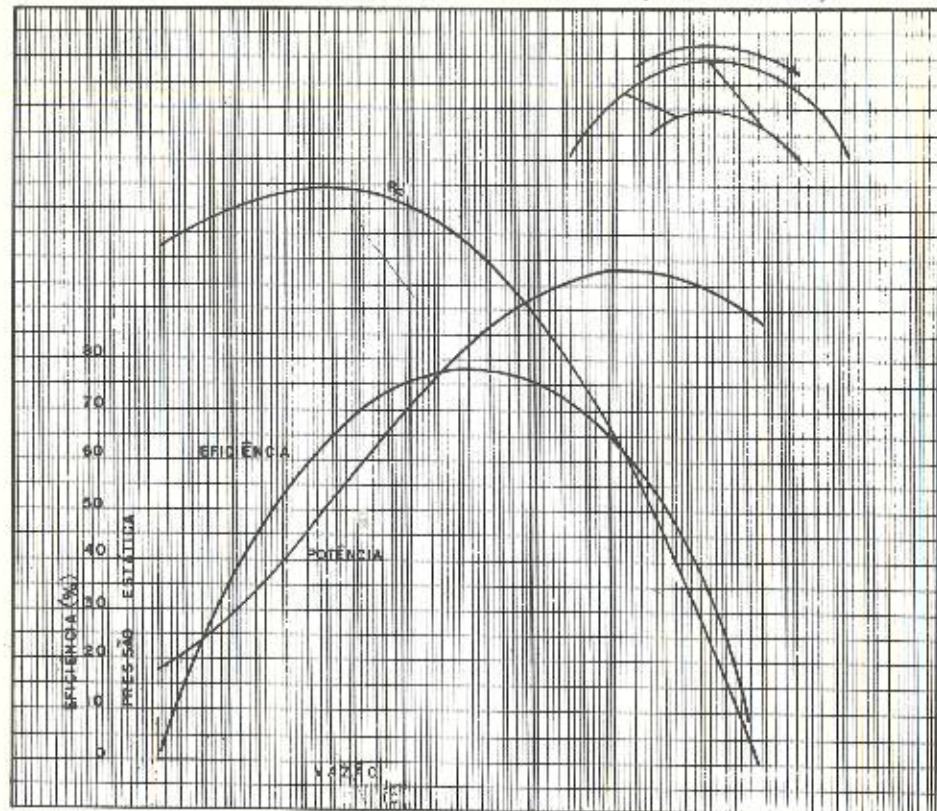


FIGURA 6.48 (Continuação)

Profunda depressão na curva característica à esquerda do pico de pressão estática, tornando perigosa sua utilização em paralelo, de forma indiscriminada.

Ponto de máxima eficiência próximo ao pico de pressão estática, impedindo o ponto de operação nessa região por deixar pouca margem de pressão em casos de emergência.

Curva de potência sempre crescente com a vazão, fazendo com que aumentos da perda de carga (em projeto ou operação) acarretem o risco de sobrecarga do motor, obrigando o uso de motores com margem de segurança de potência.

Eficiência estática máxima da ordem de 60%, ou seja, a eficiência desses ventiladores é elevada (máxima, 70%).

[*Observação.* Neste tipo de ventilador a resistência das pás não é muito grande, e a erosão das mesmas é marcante, devendo ser evitado seu uso onde o fluido carregue grandes quantidades de material particulado.]

Pás radiais [Figs. 6.47 e 6.48(b)]

Depressão da curva característica existe, mas não tão profunda. O ponto de operação deve cair no trecho de inclinação negativa da curva.

O ponto de máxima eficiência está mais à direita do pico de pressão estática que no tipo anterior, deixando maior margem de segurança.

A potência cresce com a vazão, como no tipo anterior, com risco de sobrecarga, porém não de forma tão acentuada.

[*Observação.* A estrutura das pás é muito mais robusta que nos ventiladores de pás para frente, permitindo, pois, maiores velocidades na ponta das pás. Pode ser usado em casos de grandes quantidades de poeira, pois não entope com facilidade.]

Pás planas para trás [Figs. 6.47 e 6.48(c)]

Eficiências superiores a 70%, com ponto de máximo bem à direita do pico de pressão, deixando boa margem de segurança.

À direita do ponto de máxima eficiência, a curva de pressão atinge seu ponto de máximo, e posteriores aumentos na vazão acarretam uma queda na potência, fazendo com que não haja risco de sobrecarga do motor (autolimitante), se este for escolhido em função do ponto de máxima potência.

As pressões desenvolvidas são menores que aquelas do tipo anterior ou seja, para um mesmo requisito de pressão os ventiladores de pás para trás são os de maiores dimensões, ou girarão à maiores rotações (nem sempre possível por problemas estruturais).

[*Observação.* Deve-se evitar seu uso com excesso de poeira no fluido, pois esta facilmente se deposita nas pás, desbalanceando o ventilador. Ventiladores de pás aerodinâmicas para trás apresentam basicamente as mesmas características dos de pás planas, acrescentando, no entanto, as seguintes vantagens:

- maiores eficiências (80-85%);
- são mais autolimitantes;
- permitem maiores rotações, por terem pás mais resistentes.

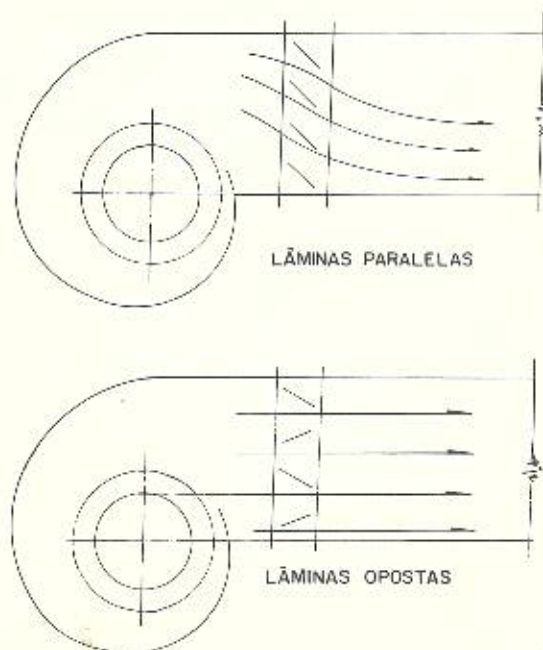


FIGURA 6.49 Válvulas de controle de vazão

CONTROLE DE VAZÕES

O controle de vazão de ventiladores é usualmente feito com válvulas tipo veneziana de lâminas paralelas ou opostas colocadas na entrada ou na saída do ventilador. A utilização desses dispositivos consome parte da pressão disponível do ventilador, sendo esse fato mais acentuado quando são colocados na saída do ventilador. As Figs. 6.49, 6.50 e 6.51 ilustram os dispositivos utilizados e o efeito de sua utilização nas curvas características.

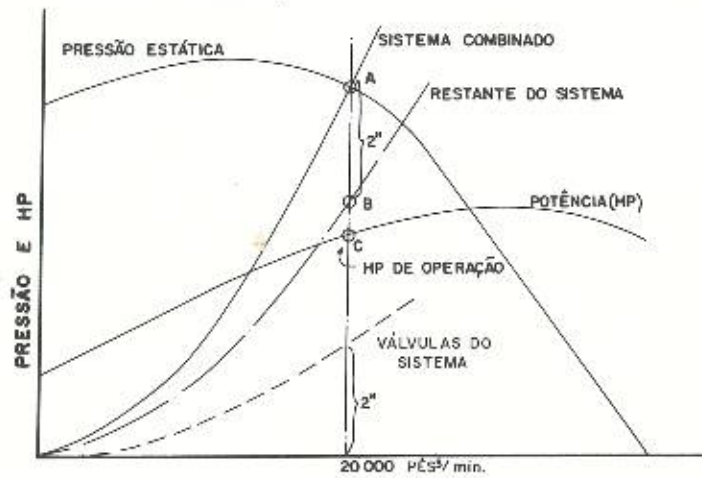


FIGURA 6.50 Curvas características

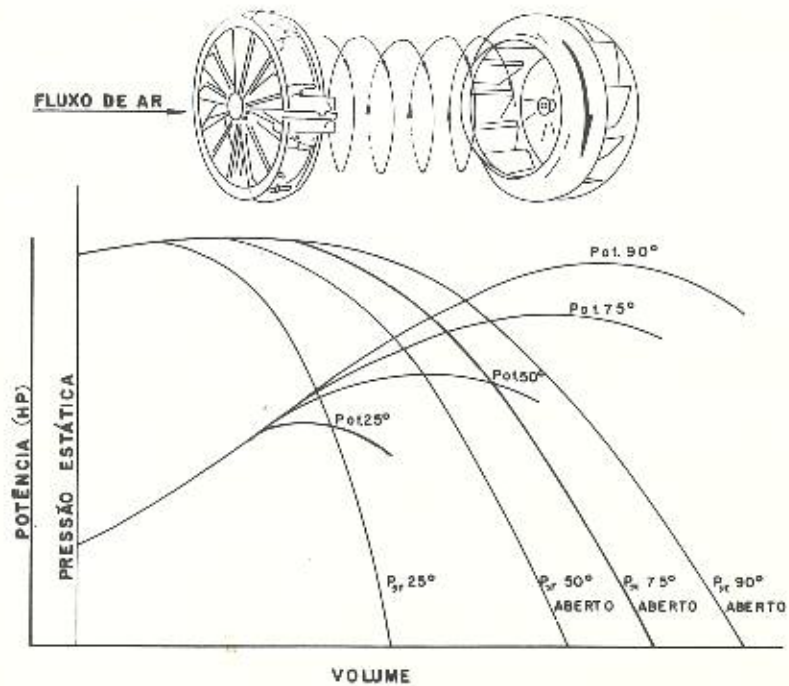


FIGURA 6.51 Controle de vazão interno

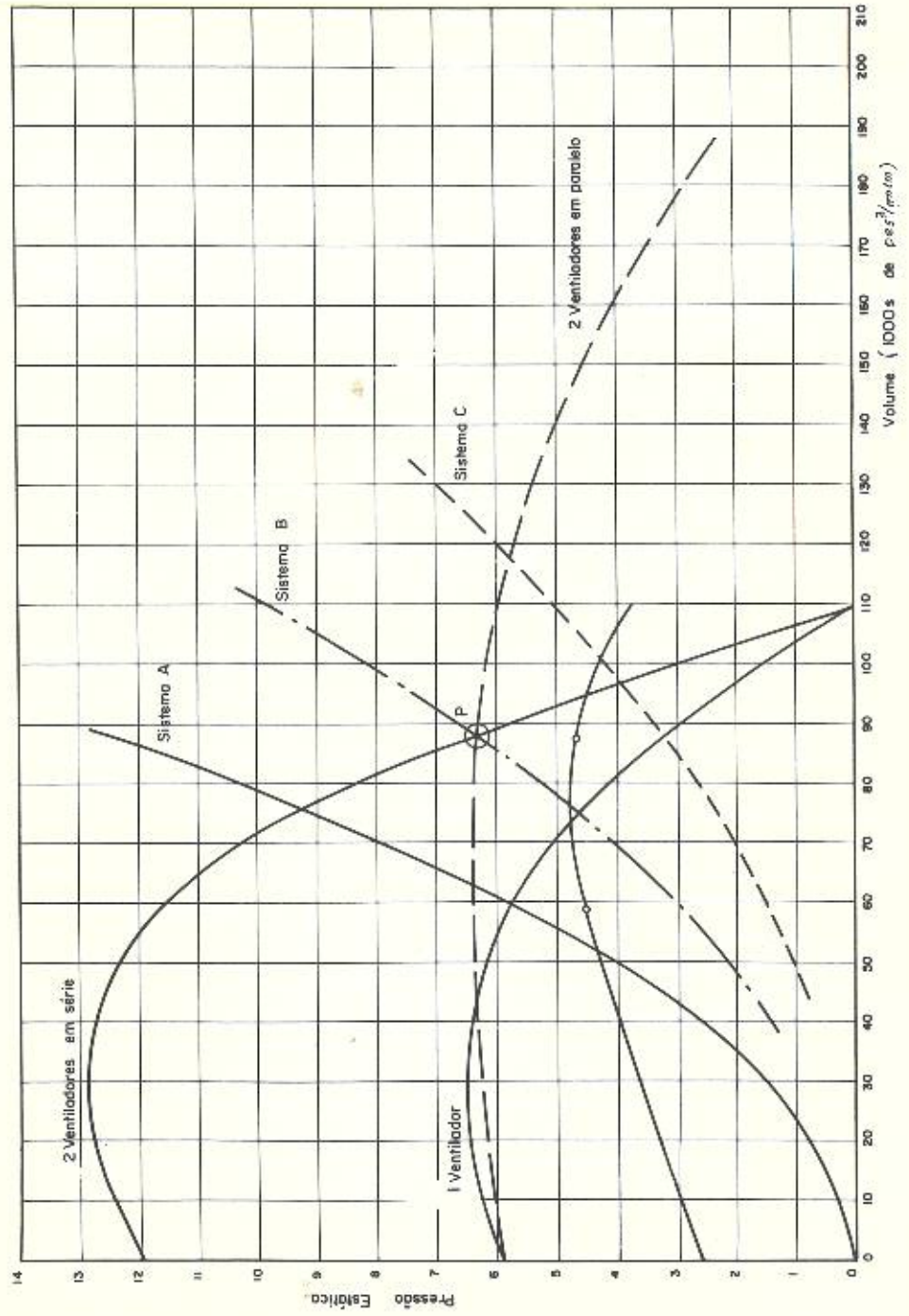


FIGURA 6.52 Curvas características de um ventilador e de dois iguais, em série

VENTILADORES EM SÉRIE E EM PARALELO

Utilização de ventiladores em série

Quando dois ventiladores são colocados em série, eles devem possuir a mesma vazão (se não houver vazamentos) em massa, podendo as vazões em volume ser diferentes devido a possíveis diferenças na densidade. A Fig. 6.53 mostra as curvas características de um ventilador e de dois iguais a ele em série. A pressão total resultante é o dobro da pressão total de um deles, e a pressão estática resultante é ligeiramente superior ao dobro, pois só se desconta uma pressão cinética na saída do segundo ventilador.

A utilização de ventiladores em série é feita quando se desejam maiores pressões no sistema. Vale lembrar que, em certos pontos da curva característica resultante, um aumento de vazão decorre da utilização de dois ventiladores em série.

Utilização de ventiladores em paralelo

Na Fig. 6.54 temos as curvas características de um ventilador (pás para frente) e de dois deles iguais em paralelo. Observa-se que, para uma dada pressão estática, a vazão dobra. Entretanto o ponto de operação deve ser cuidadosamente escolhido, uma vez que não é bastante que ele esteja localizado no trecho de inclinação negativa da curva. Na Fig. 6.52, vemos que, enquanto o sistema C

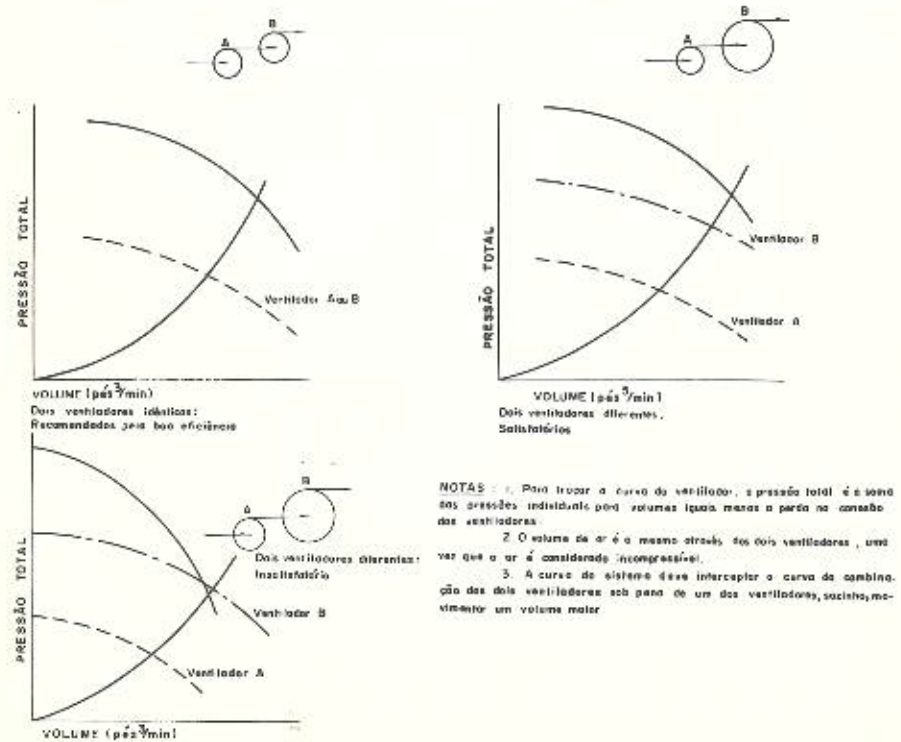


FIGURA 6.53 Operação de ventiladores em série

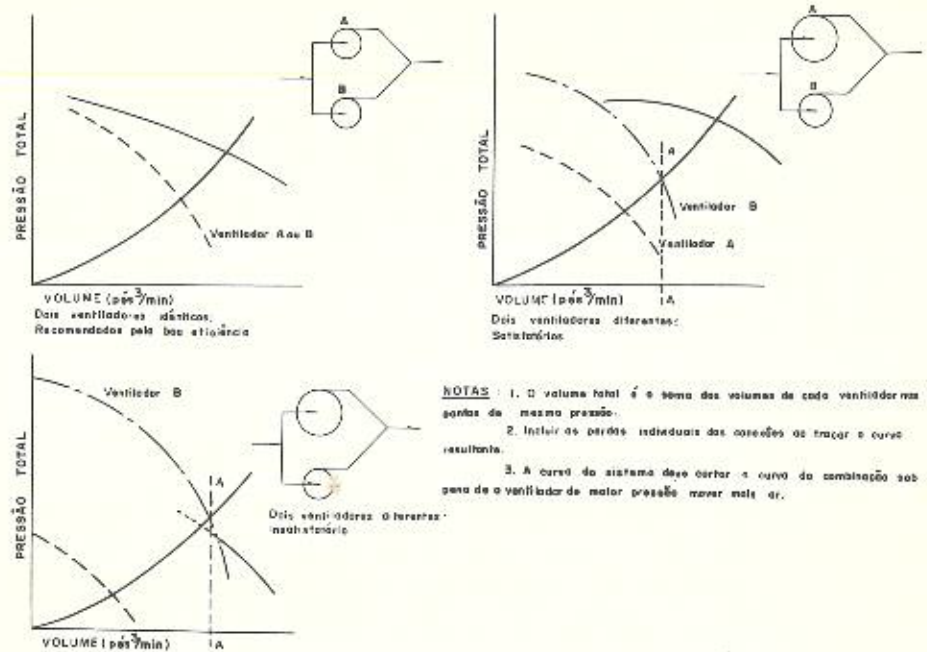


FIGURA 6.54 Operação de ventiladores em paralelo

provoca funcionamento estável dos ventiladores em paralelo ou de um só deles, o sistema A provoca funcionamento estável apenas de um só ventilador, sendo instável o funcionamento dos dois em paralelo com a ocorrência de "caça". Na mesma figura, pode-se ainda observar que os dois ventiladores em paralelo não produzem o dobro de vazão para o mesmo sistema.

A Fig. 6.54 mostra as curvas características de dois ventiladores desiguais em paralelo. Vale notar que o conjunto operará satisfatoriamente se a curva característica do sistema cortar a curva característica do conjunto à direita da linha vertical A-A.

Se o sistema cortar as curvas de cada ventilador em pontos diferentes e, estando os ventiladores ligados ao mesmo sistema, o de maior pressão soprará através do outro, não produzindo, portanto, a pressão indicada pela sua curva. Vale ainda ressaltar que, se o sistema cortar a curva característica do conjunto próximo à linha vertical A-A, a vazão conjunta será apenas ligeiramente maior que a vazão individual para uma potência consumida de quase o dobro, não sendo, pois, vantajosa a utilização de ventiladores em paralelo nessa região.

Na Fig. 6.55, a curva característica de dois ventiladores em série é comparada à curva característica dos mesmos ventiladores em paralelo. Vale notar que a curva de pressão estática para os dois ventiladores em série é, na realidade, ligeiramente mais alta do que a mostrada na figura, uma vez que se desconta apenas uma pressão cinética da soma das pressões totais e, apenas por facilidade de discussão, admitiu-se que, na utilização de dois ventiladores iguais em série, obtém-se o dobro da pressão estática. Observa-se, na figura que a curva característica do sistema B corta ambas as características (série e paralelo no mesmo

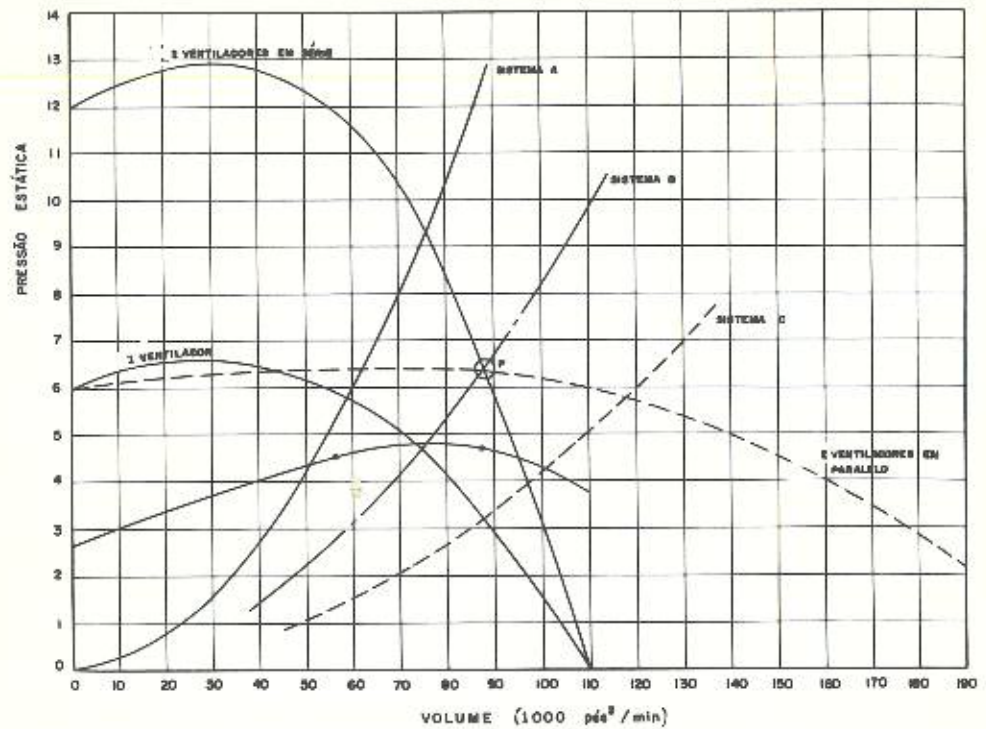


FIGURA 6.55 Curvas características de dois ventiladores em série em comparação com os mesmos em paralelo

ponto *P*), ou seja, obtém-se a mesma vazão resultante. Nota-se, ainda, que, se a curva característica do sistema cortar as curvas características dos conjuntos em qualquer ponto à esquerda de *P*, o conjunto em série terá uma vazão superior à do conjunto em paralelo, ocorrendo o contrário à direita do ponto *P*.

EFEITOS DOS PARÂMETROS INTERVENIENTES

A variação de vários parâmetros relativos ao ventilador, tais como rotação, tamanho etc., de parâmetros do sistema, como sua perda de carga, e de parâmetros relativos ao fluido, tais como densidade e viscosidade, provoca variações na *performance* do sistema, alterando vazão, a pressão, a potência e a eficiência. A seguir, veremos como se dá a influência de alguns desses fatores.

EFEITO DA ROTAÇÃO

Quando um dado ventilador é submetido a uma variação de rotação, já vimos, pelas leis dos ventiladores, que há uma alteração proporcional da vazão, uma variação quadrática da pressão e uma variação cúbica da potência. A Fig. 6.56 mostra a variação ocorrida na curva característica do ventilador por variação da rotação.

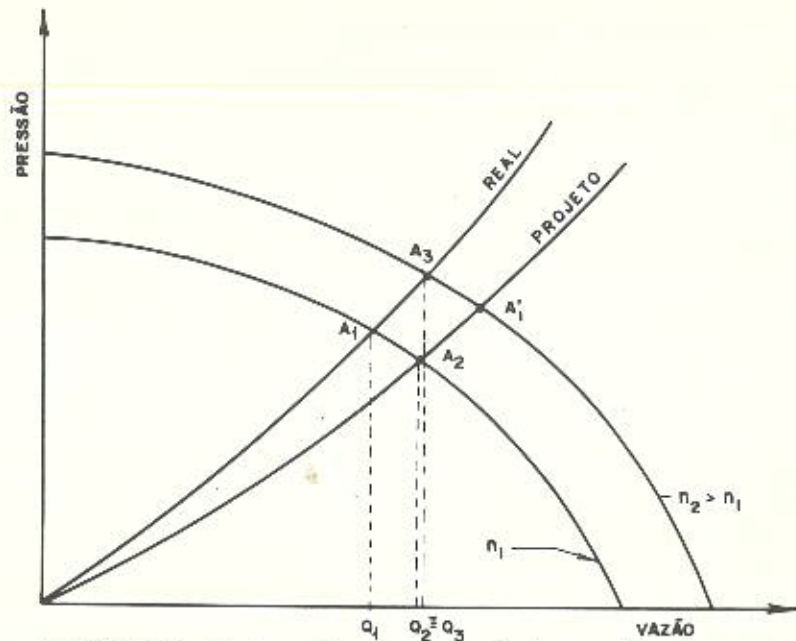


FIGURA 6.56 Mudança da curva característica por efeito da rotação

Se o ventilador estivesse conectado a um sistema de resistência tal que o ponto de operação fosse $A_1 (Q_1, P_1)$, e o ponto de projeto fosse para a vazão mínima de exaustão Q_2 , sendo $Q_2 > Q_1$, um aumento da rotação poderia levar o ponto de operação para A_3 , onde $Q_3 \cong Q_2$, desde que não houvesse variação na curva característica do sistema. Observe-se que o aumento cúbico da potência nem sempre recomenda um aumento da rotação para se conseguir um aumento de vazão.

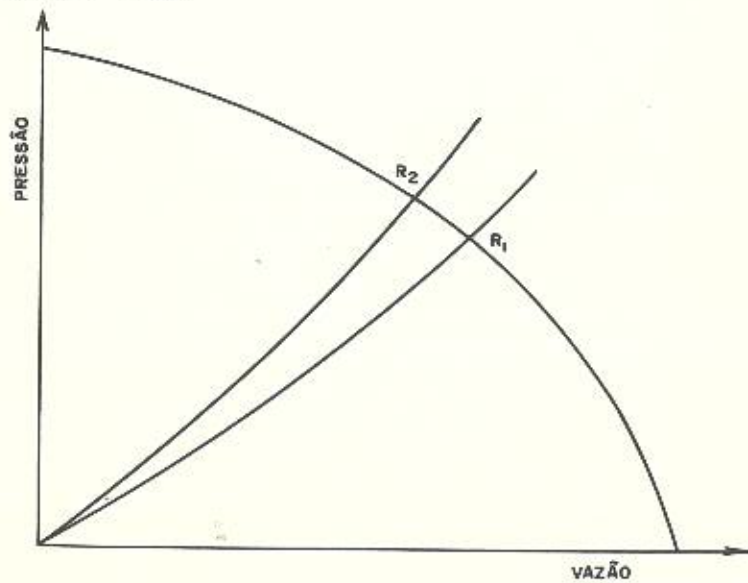


FIGURA 6.57 Curva característica para efeito de variação no sistema

EFEITO DE MUDANÇAS NO SISTEMA

Qualquer modificação física estrutural do sistema acarretará apenas uma mudança na curva do sistema, não havendo qualquer modificação na curva característica do ventilador. A Fig. 6.57 ilustra a mudança do ponto de operação, quando há uma variação na curva característica do sistema pela instalação de um equipamento de retenção de partículas no sistema.

EFEITO DA VARIAÇÃO DA DENSIDADE DO FLUIDO

Os casos mais usuais de variação de densidade ocorrem por variações da temperatura do fluido, ou por variação da pressão barométrica (altitudes diferentes), sendo menos usual a variação da densidade por outras causas, tais como variação na composição do fluido. Já foi visto nas leis dos ventiladores que um aumento da densidade do fluido não altera a vazão volumétrica do ventilador, alterando proporcionalmente a vazão em massa, a pressão estática e a potência. A Fig. 6.58 mostra o efeito da densidade nas curvas características. Maiores altitudes acarretam uma diminuição na densidade do fluido, conforme está discriminado na Fig. 6.59, que também fornece a variação da densidade com a temperatura. Grosseiramente, pode-se dizer que a pressão e a potência decrescem cerca de 4% para cada 1 000 pés de elevação acima do nível do mar.

Uma vez que as curvas características de ventiladores são computadas levando-se em consideração a densidade na boca de entrada do ventilador, a magnitude da perda de carga do sistema até esse ponto pode acarretar uma variação de densidade do fluido que não pode ser desprezada.

Vale ainda ressaltar que a curva característica do sistema é alterada por variações da densidade, por ser a pressão cinética diretamente proporcional à raiz quadrada da densidade do fluido.

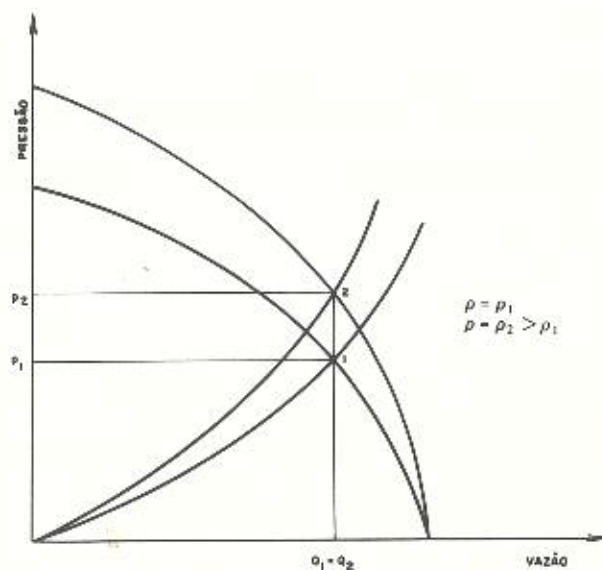


FIGURA 6.58 Variação da característica com a densidade

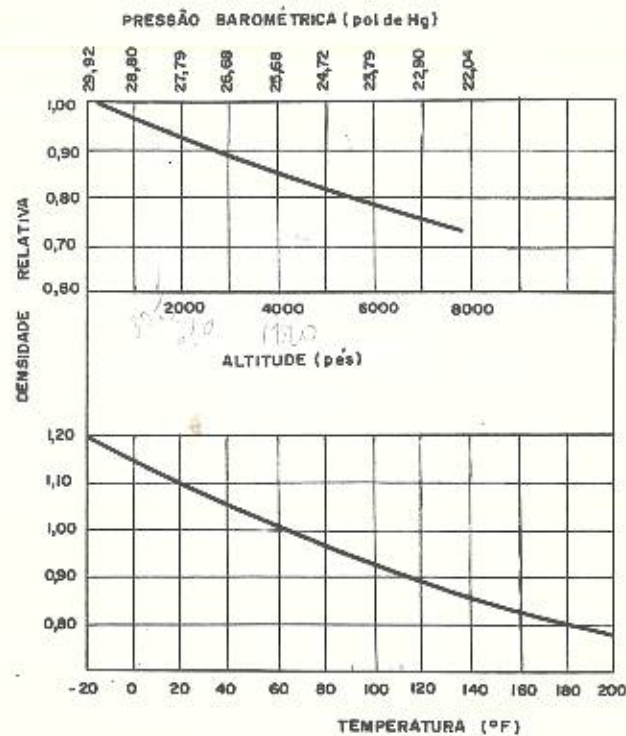


FIGURA 6.59 Efeito da altitude, da temperatura e da pressão barométrica na densidade do ar

Finalmente, convém deixar estabelecido que a mudança desses fatores pode ocasionar variações na curva característica do ventilador e na curva característica do sistema, mudanças essas que não podem ser negligenciadas, devendo ser, isto sim, analisadas à luz dos conceitos fornecidos. Ao final do capítulo alguns exercícios são propostos e resolvidos para melhor ilustrar o assunto.

ESCOLHA DE VENTILADORES

As seguintes informações são necessárias para uma adequada escolha:

- vazão requerida ($\text{pés}^3/\text{min}$);
- pressão estática do ventilador;
- característica do fluido a ser exaurido pelo ventilador, isto é, grau de poeira, presença de material fibroso, pegajoso, inflamável corrosivo, temperatura dos gases;
- limitação de espaço;
- nível de ruído;
- eficiência desejada;
- tipo de transmissão.

O uso de correias e engrenagens torna o conjunto mais flexível, às custas de um consumo adicional de potência. Vale lembrar que, para grandes ventiladores, essa potência adicional não representa uma grande porcentagem da potência

Volume (m³/min)	Velocidade de saída (g/s/min)	1° S.P.			1.34° S.P.			3.10° S.P.			1.34° S.P.			3.10° S.P.			2.10° S.P.			3° S.P.					
		R.P.M.	Velocidade m/pont. de pú.	H.P.P.	R.P.M.	Velocidade m/pont. de pú.	H.P.P.	R.P.M.	Velocidade m/pont. de pú.	H.P.P.	R.P.M.	Velocidade m/pont. de pú.	H.P.P.	R.P.M.	Velocidade m/pont. de pú.	H.P.P.	R.P.M.	Velocidade m/pont. de pú.	H.P.P.	R.P.M.	Velocidade m/pont. de pú.	H.P.P.			
5418	700	4488	440	1.20	4864	487	1.56	5474	537	2.03	5882	577	2.31	6280	617	2.57	6688	7021	3.22	7096	688	3.52	7504	732	4.33
6192	800	4522	443	1.32	4881	488	1.70	5491	538	2.10	5899	578	2.50	6307	618	2.85	6715	7028	3.57	7123	690	3.87	7531	733	4.73
6966	900	4256	446	1.46	4898	490	1.85	5508	540	2.49	5916	580	2.72	6324	620	3.17	6732	7055	4.13	7140	693	4.43	7548	737	5.15
7740	1000	4624	444	1.60	5032	494	2.01	5523	542	2.45	5933	582	2.95	6341	622	3.39	6749	7072	4.43	7148	695	4.74	7556	738	5.82
8514	1100	4709	452	1.78	5083	498	2.19	5547	544	2.67	5967	586	3.13	6358	624	3.63	6767	7089	4.74	7156	697	5.05	7564	740	6.22
9288	1200	4802	476	1.97	5202	510	2.42	5593	548	2.91	6011	588	3.38	6375	626	4.04	6784	7106	5.05	7164	698	5.35	7572	742	6.37
10062	1300	5015	482	2.18	5321	522	2.75	5693	558	3.14	6052	594	3.65	6409	628	4.20	6801	7123	5.35	7172	700	5.65	7580	744	6.90
10836	1400	5168	506	2.41	5474	536	2.90	5831	572	3.42	6137	602	3.93	6494	636	4.49	6918	7140	5.65	7180	702	5.95	7588	746	7.30
11610	1500	5358	524	2.67	5644	554	3.19	5984	586	3.73	6243	612	4.22	6579	646	4.82	7027	7157	5.95	7188	704	6.24	7596	748	8.10
12384	1600	5535	542	3.05	5814	570	3.49	6137	602	4.03	6343	620	4.66	6732	660	5.18	7136	7174	6.24	7196	706	6.53	7604	750	9.10
13158	1700	5712	560	3.28	5984	586	3.78	6307	618	4.39	6546	646	4.98	6833	676	5.58	7245	7191	6.53	7204	708	6.82	7612	752	10.10
13932	1800	5899	578	3.68	6171	606	4.17	6473	636	4.75	6749	662	5.36	7038	690	6.01	7354	7208	6.82	7312	710	7.11	7620	754	11.10
14706	1900	6120	600	4.09	6375	626	4.60	6664	654	5.15	6950	682	5.75	7244	712	6.45	7463	7324	7.11	7422	720	7.40	7628	756	12.10
15480	2000	6358	624	4.53	6579	646	5.04	6864	672	5.61	7050	696	6.15	7344	724	7.14	7572	7441	7.40	7530	722	7.69	7636	758	13.10
16254	2100	6517	658	5.03	6770	682	5.25	7225	708	6.08	7250	716	6.75	7444	734	7.43	7681	7539	7.69	7638	724	7.98	7644	760	14.10
17028	2200	7276	714	5.55	7066	730	5.90	7450	730	7.03	7537	746	7.33	7644	754	7.92	7790	7684	7.98	7640	726	8.27	7652	762	15.10
18576	2400	7820	746	7.06	7422	776	6.99	8109	796	9.20	8219	812	10.00	8466	830	10.83	8714	8100	8.27	7642	728	8.56	7650	764	16.10
20124	2600	8330	816	8.59	8066	830	10.28	8585	842	10.95	859	858	11.99	8908	874	12.48	9248	870	12.50	7644	730	8.85	7652	766	17.10
21672	2800	8837	848	11.33	8950	878	12.05	9094	892	12.82	9231	906	13.65	9367	918	14.44	9656	947	14.05	7646	732	9.14	7654	768	18.10
23220	3000	9418	924	13.28	9503	932	14.78	9603	945	15.85	9690	950	15.70	9843	966	16.64	10132	993	15.38	7648	734	9.43	7656	770	19.10
24768	3200	9979	978	15.48	10030	984	16.53	10115	992	17.28	10217	1002	18.00	10319	1012	18.88	10608	1040	18.58	7650	736	9.72	7658	772	20.10
26316	3400	9979	978	15.48	10030	984	16.53	10115	992	17.28	10217	1002	18.00	10319	1012	18.88	10608	1040	18.58	7652	738	10.01	7660	774	21.10

FIGURA 6.60 Tabelas para escolha

total consumida, mas, em pequenos ventiladores, chega, em alguns casos, a representar altas porcentagens do total.

Quantitativamente são várias as formas de se escolher um ventilador. A forma mais usual é através de tabelas fornecidas pelo fabricante, como a apresentada na Fig. 6.60. Nessas tabelas, para uma dada pressão, a máxima eficiência mecânica geralmente se dá para valores intermediários da faixa de vazões apresentadas.

Em muitos casos será necessária a interpolação dupla ou simples de valores na tabela. Quando for necessária dupla interpolação, primeiro deve ser feita a pressão, usando-se uma vazão inferior à desejada e, então, interpolar-se a vazão para os valores já interpolados da potência e da rotação.

Essas tabelas de escolha são construídas para gases em condições-padrão (70 °F e 1 atm). Em aplicações onde os gases não estejam nessas condições, as devidas correções devem ser feitas. Sabendo-se que a vazão volumétrica não varia com a densidade, mas que a pressão e a potência variam linearmente com ela, a escolha deve ser feita pela vazão real c , pela pressão calculada com o sistema exaurindo ar em condições-padrão. A rotação obtida é a real de trabalho, e a potência deve ser corrigida multiplicando-se-a pela relação de densidades.

Ao final do capítulo alguns exemplos de escolha de ventiladores ilustrarão melhor este ponto, inclusive os casos onde sistemas com alta perda de carga antes do ventilador alteram a densidade do fluido, por não serem essas perdas desprezíveis quando comparadas à pressão atmosférica.

INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE VENTILADORES

Esse assunto será aqui abordado de forma resumida. Sabemos que as condições reais de operação de um ventilador conectado a um sistema são bem diferentes de suas condições de teste, fazendo com que, muitas vezes, sua *performance* seja diferente da prevista. Conexões, arranjos, etc. devem ser feitos de forma a não introduzirem excesso de perdas de carga adicionais. A Fig. 6.61 ilustra esses comentários.

As Figs. 6.61 e 6.62 foram elaboradas por um fabricante de ventiladores, e mostram as perdas ocasionadas por fluxos não-uniformes na entrada e na saída do ventilador.

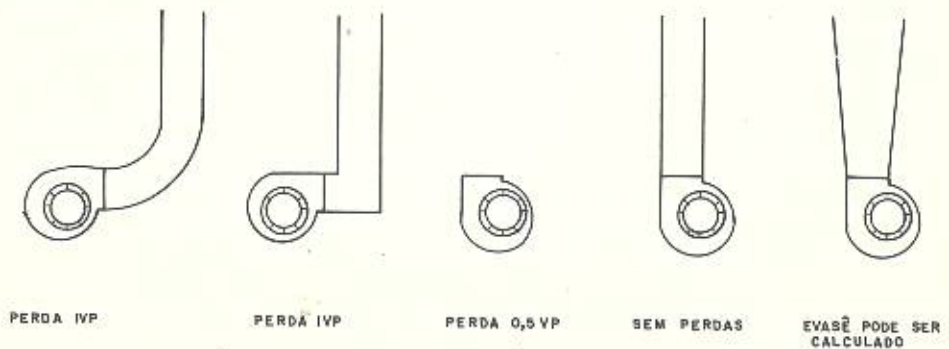


FIGURA 6.61 Posição do ventilador

Com relação à localização dos ventiladores nos sistemas, esta deve permitir a fácil inspeção e manutenção do mesmo, de forma a evitar sua erosão e abrasão (colocado após o equipamento de coleta de poeira), de forma a evitar cotovelos e outras obstruções na entrada ou na saída do ventilador, pois, nesse caso, a vazão pode ser consideravelmente reduzida (veja a Fig. 6.62).

Deve-se inspecionar regularmente a lubrificação dos mancais, a tensão das correias de transmissão, a deposição de poeira no ventilador e o sistema elétrico.

Exercícios de aplicação

Exercício 1. Por ser excessiva a emissão de gotículas na saída de um sistema de exaustão de um tanque de cromeação, cuja vazão é de 25 000 pés³/min contra uma perda de carga de 5,5 pol de H₂O, foi instalado um eliminador de gotas cuja perda de carga, a 25 000 pés³/min, é 0,75 pol de H₂O. Com isso, a vazão do sistema caiu para 24 000 pés³/min, fazendo com que a rotação, que era de 628 rpm, tivesse de ser aumentada, para que a vazão voltasse a ser 25 000 pés³/min. Nessas condições pergunta-se:

- Qual a nova rotação do ventilador?
- Qual a nova potência consumida?
- Qual a potência consumida pelo sistema, quando exaurindo 24 000 pés³/min a 628 rpm?

Admitir o rendimento do ventilador 62,2% (constante).

Solução

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{24\,000}{25\,000} \rightarrow n_2 = 654 \text{ rpm,}$$

$$\frac{p_{st1}}{p_{st2}} = \frac{Q_1^2}{Q_2^2} = \left(\frac{24\,000}{25\,000}\right)^2 = \frac{p_{st1}}{6,25} \rightarrow p_{st1} = 5,76 \text{ pol de H}_2\text{O,}$$

$$\text{HP}_1 = \frac{24\,000 \times 5,76}{6\,356 \times 0,622} = 34,96,$$

$$\text{HP}_2 = \frac{25\,000 \times 6,25}{6\,356 \times 0,622} = 39,52.$$

Exercício 2. Um ventilador com 65% de rendimento trabalha num sistema de ventilação exaurindo uma vazão de 30 000 pés³/min contra uma perda de carga de 10 pol de H₂O, a uma rotação de 720 rpm. Tendo sido retirado o chapéu da chaminé, cuja contribuição de perda de carga era de 1,2 pol de H₂O, a vazão do sistema aumentou, alterando a velocidade de filtragem, nos filtros de manga conectados ao sistema, para 2,8 pés/min, fazendo cair seu rendimento de coleta de poeira. Sabendo-se que a área de filtragem é de 12 000 pés², e que a perda de carga através do filtro inicialmente era de 4 pol de H₂O, pede-se:

- qual era a potência consumida pelo ventilador antes de se retirar o chapéu?
- qual a potência consumida após a retirada do chapéu?
- para se retornar à eficiência inicial dos filtros (ou seja, para se obter a velocidade de filtragem inicial), qual deve ser a nova rotação do ventilador?

4) nas condições do item anterior (ou seja, com a nova rotação calculada) qual a potência consumida?

Solução

$$1) \text{ Potência inicial} = \frac{30\,000 \times 10}{6\,356 \times 0,65} = 72,6 \text{ HP.}$$

2) A nova vazão é

$$Q_2 = 12\,000 \text{ pés}^2 \times 2,8 \text{ pés/min} = 33\,600 \text{ pés}^3/\text{min};$$

a nova perda no filtro é

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \frac{33\,600}{30\,000} = 4,48 \text{ pol de H}_2\text{O};$$

a nova perda no resto do sistema é

$$\Delta p_3 = 4,8 \left[\frac{33\,600}{30\,000} \right]^2 = 6,02 \text{ pol de H}_2\text{O};$$

logo, a nova potência consumida é

$$\text{HP}_2 = \frac{33\,600 \times (6,02 + 4,48)}{6\,356 \times 0,65} = 85,4 \text{ HP.}$$

3) A nova rotação deverá ser

$$n_2 = 720 \times \frac{30\,000}{33\,600} \cong 642,8 \text{ rpm.}$$

4) A nova potência consumida será

$$\text{HP}_3 = 85,4 \times \left[\frac{642,8}{720} \right]^2 = 68 \text{ HP.}$$

BALANCEAMENTO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA

INTRODUÇÃO

Freqüentemente um mesmo sistema de ventilação local exaustora é utilizado para captar em mais de um ponto. Isso é feito por questões de economia, bem como para simplificar o arranjo físico de tubulações e outros componentes do sistema. O que se faz, na verdade, é projetar um sistema de ventilação para cada ponto que se quer ventilar e conectá-los a um duto principal, que estará ligado ao ventilador, ao equipamento de controle de poluentes e à chaminé. A Fig. 6.63 esquematiza um caso como exemplo.

O dimensionamento de um sistema de ventilação local exaustora com mais de um tramo segue exatamente o mesmo processo daquele utilizado para um tramo só, adicionando-se o fato de que o sistema deverá estar balanceado.

Diz-se que um sistema de ventilação local exaustora está balanceado quando em funcionamento ele dá, em cada tramo, exatamente a vazão de ar necessária

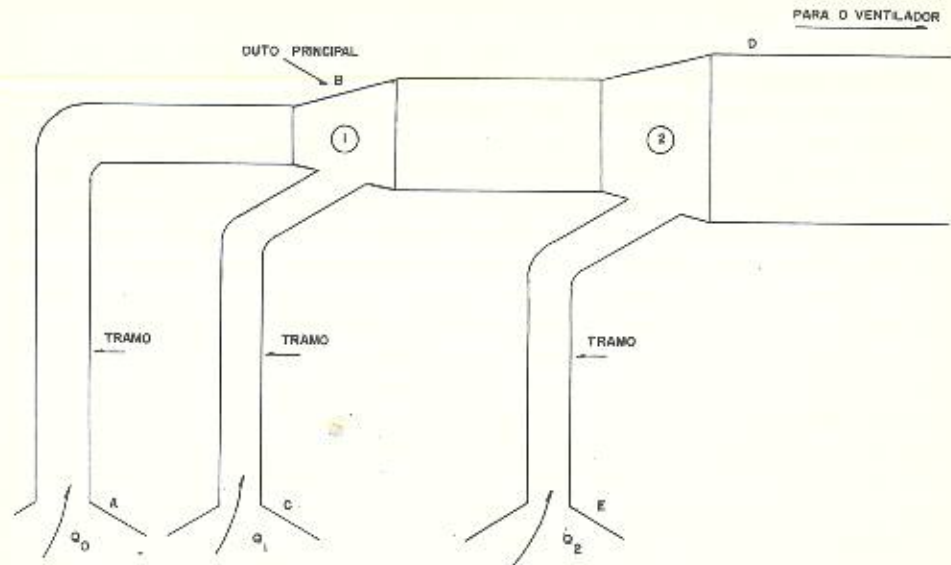


FIGURA 6.63 Sistema de ventilação local exaustora com três tramos

para um bom controle da fonte de poluentes. Logo, esse balanceamento deve ser previsto em projeto. Note-se que o balanceamento do sistema é tão importante quanto o dimensionamento do captor e sistema de dutos para cada tramo.

A vazão que irá se desenvolver em cada tramo será função da resistência oposta pelo tramo (captor e sistema de dutos) à passagem do fluxo de ar. No exemplo da Fig. 6.63, a vazão de ar Q_0 que irá fluir através do tramo AB será função da depressão que está ocorrendo em 1. Logo, a fim de termos a vazão Q_0 no tramo AB (determinada como a necessária quando do dimensionamento do captor), o ventilador do sistema deverá fornecer no ponto 1 a depressão necessária para vencer a resistência oposta pelo tramo AB , bem como para movimentar a vazão Q_0 . Esse mesmo raciocínio se aplica ao tramo CB da Fig. 6.63, ou seja, o ventilador do sistema deverá fornecer, no ponto 1, a depressão necessária para vencer a resistência oposta por CB , bem como para movimentar a vazão Q_1 . Mas o ponto 1 é único, ou seja, naquele ponto somente poderá ocorrer um valor da pressão. Esse valor deverá ser calculado, portanto, para satisfazer ambos os tramos, no que diz respeito a seus requisitos de vazão. Note-se que as vazões Q_0 e Q_1 , as dimensões de cada tramo, a forma geométrica de cada tramo, o número de cotovelos, etc., podem ser bem diferentes, uns dos outros.

Dessa forma, balancear um sistema (na fase de projeto) é prover meios para que a pressão do ponto de junção de dois tramos seja a adequada; em outras palavras, seja a pressão que fará com que as vazões necessárias (determinadas quando do projeto do captor) fluam em cada um dos tramos.

MÉTODOS DE BALANCEAMENTO

Método de balanceamento estático

Nesse método, inicia-se geralmente o cálculo pelo tramo que deverá apresentar maior perda de carga. Para esse tramo, dimensiona-se o captor e o sis-

tema de dutos até o ponto da primeira junção. Portanto, nessa fase, do cálculo determinamos qual a pressão estática que deverá existir no ponto de junção para que flua, no tramo dimensionado, a vazão necessária. Passamos em seguida ao dimensionamento do outro tramo, o que chega a essa junção. Da mesma forma, dimensionamos o captor e o sistema de dutos até a junção e, portanto, determinamos a pressão estática que deverá ocorrer nesse ponto para, nesse tramo, fluir a vazão necessária. Uma vez que o ponto da junção onde estamos calculando a pressão estática é único (isto é, pertence tanto ao primeiro tramo quanto ao segundo), a pressão estática nesse ponto deverá ser a mesma. Em outras palavras, o valor da pressão estática, no ponto da junção calculado pelo primeiro tramo, deverá ser igual ao valor calculado pelo segundo tramo.

No caso em que os valores calculados não coincidem, recalculamos o primeiro ou o segundo tramo, modificando algumas de suas características, para que se igualem os valores da pressão estática no ponto de junção. Note-se que se trata de um cálculo iterativo; recalcula-se o segundo tramo fazendo-se modificações na velocidade, no diâmetro do duto, nos cotovelos, nas junções, etc., até se conseguir o mesmo valor da pressão estática calculado para o primeiro tramo.

No exemplo da Fig. 6.63, o sistema estaria balanceado se a perda de carga no tramo *AB*, calculada com a vazão Q_0 , fosse igual à perda de carga no tramo *CB*, calculada com a vazão Q_1 . Isso implica dizer que a pressão estática no ponto 1 é a mesma calculada por ambos os tramos.

Um terceiro tramo, como o *ED* da Fig. 6.63, seria balanceado igualando sua perda de carga calculado com a vazão Q_2 à perda de carga no ponto 2, calculada pelo tramo principal, ou seja, a soma da perda em 1 calculada por *AB* ou *BD*, com a perda no trecho *BD* calculada com a vazão total nesse trecho, ou seja, $Q_0 + Q_1$.

A igualdade das perdas de carga até o ponto de junção de dois tramos pode ser encarada, em termos práticos, com uma certa tolerância, ou seja:

a) quando houver uma diferença entre as pressões estáticas, calculada em cada tramo, de 20% ou mais, deve-se recalculá-los dos tramos, fazendo-se as modificações necessárias para reduzir essa diferença;

b) quando houver uma diferença entre as pressões estáticas entre 5 e 20%, pode-se atingir o balanceamento aumentando a vazão do tramo de menor perda; a nova vazão, ou vazão corrigida, pode ser calculada por

$$\text{vazão corrigida} = \text{vazão inicial} \sqrt{\frac{p_{st}(\text{pressão estática maior})}{p_{st}(\text{pressão estática menor})}}$$

c) quando houver uma diferença entre as pressões estáticas menor que 5%, usualmente se ignorará o pequeno erro, e o sistema será considerado completamente balanceado no ponto. Esse método de balanceamento está exemplificado no exercício resolvido da p. 311.

Balanceamento com registros

Nesse método, na fase de projeto do sistema, não se faz qualquer tentativa para igualar as pressões estáticas nos pontos de junção. Dimensionam-se todos

os tramos apenas com as vazões necessárias e as velocidades de duto recomendadas. A perda total do sistema será calculada com o tramo de maior resistência. Nos tramos de menor resistência, colocam-se registros ajustáveis, que serão regulados após a instalação do sistema, a fim de se obter a vazão desejada em cada tramo.

Na verdade, o registro – que pode ser de gaveta ou de borboleta – vai introduzir uma perda de carga variável (de acordo com sua abertura) nos tramos de menor perda. Dessa forma, podemos praticamente variar o registro até obter o balanceamento desejado e, portanto, as vazões necessárias em cada tramo.

Note que um sistema de ventilação local exaustora, instalado e funcionando, terá, nos pontos de junção, sempre, um único valor da pressão estática, ou seja, as perdas de carga em dois tramos paralelos serão sempre iguais. Isso, contudo, não significa que os sistemas estarão sempre balanceados, pois isso poderá estar ocorrendo para valores da vazão diferentes das necessárias em cada tramo. Portanto os valores da perda de carga em dois tramos paralelos deverão ser iguais entre si e iguais ao valor que dá as vazões desejadas em cada tramo.

Assim sendo, o balanceamento através de registros é feito variando-se a abertura do registro e medindo-se as vazões nos pontos de captura. Faz-se isso repetidas vezes, até se obterem as vazões desejadas.

Balanceamento com plênum

Este tipo de sistema parte de um duto principal superdimensionado, a fim de se conseguir um sistema de baixa resistência à passagem do fluxo de ar. As velocidades utilizadas no duto principal estão bem abaixo dos valores usuais para velocidades em sistemas de ventilação local exaustora. A este duto principal ligam-se os vários tramos os quais são dimensionados exatamente como nos casos anteriores. A Fig. 6.64 apresenta um sistema deste tipo.

Uma vez que a perda de carga no duto principal é bastante baixa (construído para isso) as pressões estáticas nos vários pontos de junção são iguais e igual à pressão estática reinante no duto principal. Logo, se essa pressão estática for

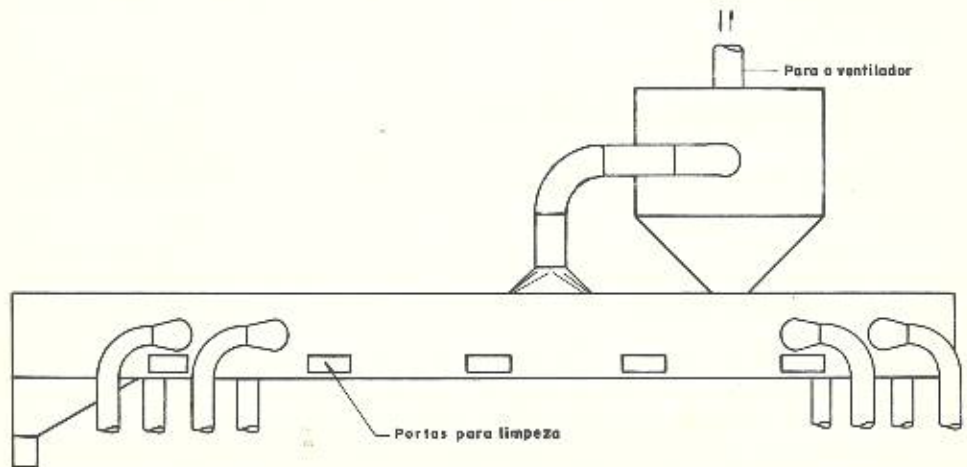


FIGURA 6.64 Sistema de ventilação local exaustora com plênum

dimensionada para dar as vazões necessárias em cada tramo, teremos o sistema balanceado. Esse tipo de sistema geralmente dá o mínimo valor de potência consumida.

O duto principal deve ser dimensionado para velocidades entre 500 e 2 000 pés/min. A pressão estática reinante no duto principal (que vai ser a pressão estática nos pontos de junção) deverá ser calculada com base no tramo de maior resistência. Os demais tramos deverão ser calculados para dar a vazão requerida a essa mesma pressão estática, ou então poderão ser previstos registros nesses tramos de menor resistência para posterior regulação nas vazões.

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TRÊS MÉTODOS DE BALANCEAMENTO

Cada um dos três métodos anteriormente descritos apresentam vantagens e desvantagens. A escolha do método a ser utilizado em cada caso depende de vários aspectos, tais como econômicos, disponibilidades de espaço, arranjo físico dos equipamentos e do sistema de ventilação, tipo de poluente, etc. A seguir, relacionamos algumas das principais vantagens e desvantagens dos métodos.

BALANCEAMENTO ESTÁTICO

A principal vantagem desse método é a segurança, pois, uma vez instalado, a vazão que irá se desenvolver em cada ponto será a especificada em projeto, não sendo passível de fácil modificação. Em outras palavras, o elemento humano não poderá variar a vazão em cada ponto facilmente, como ocorreria se o sistema estivesse balanceado através de registros. Outra vantagem é o fato de que o sistema não sofrerá entupimentos se as velocidades forem escolhidas adequadamente. Esse tipo de sistema não estará sujeito a desbalanceamentos devido ao uso, como o que pode ocorrer com o balanceado por registros.

Por outro lado, esse tipo de sistema também apresenta algumas desvantagens, como, por exemplo, projeto mais difícil (portanto mais caro); o sistema deve ser construído exatamente de acordo com o projeto e, portanto, apresenta pequenas flexibilidades no que se refere a modificações de *lay-out* e menor flexibilidade para correção de eventuais erros cometidos em projeto.

BALANCEAMENTO COM REGISTROS

As principais vantagens desse sistema são a maior facilidade de projeto e maior flexibilidade de modificações, que poderão ser introduzidas, se necessário, como, por exemplo, a adição de um novo tramo ou uma correção de um erro de projeto.

As principais desvantagens são:

a vazão em cada ponto pode ser facilmente alterada, uma vez que esta depende da posição do registro e essa posição pode ser facilmente alterada pelo elemento humano;

a variação da vazão em um ramal repercute sobre os demais; portanto o ajuste completo desse tipo de sistema é bastante trabalhoso;

abrasão dos registros parcialmente fechados, quando poluentes abrasivos estão sendo exauridos;

entupimento no registro por acumulação de material, especialmente quando está sendo exaurido material pegajoso.

BALANCEAMENTO COM PLÊNUM

A principal vantagem desse tipo de sistema é a flexibilidade que o mesmo apresenta a modificações, remanejamento, adições ou reduções de tramos. Um ou mais tramos podem ser completamente fechados, e o volume total de ar reduzido até o valor no qual ainda se mantém mínima velocidade de transporte nos demais tramos. Outra vantagem é que o duto principal funciona como uma câmara de sedimentação para partículas grosseiras.

As desvantagens são:

a necessidade de limpeza periódica no duto principal devido à deposição de material – essa limpeza pode ser feita manual ou mecanicamente, como, por exemplo, através de correntes transportadoras;

materiais pegajosos podem aderir às paredes do duto principal, tendendo a entupi-lo – para esse tipo de material, a limpeza do duto é mais difícil, além de ter de ser mais constante;

materiais sujeitos a combustão espontânea e materiais explosivos não devem ser ventilados por esse tipo de sistema.

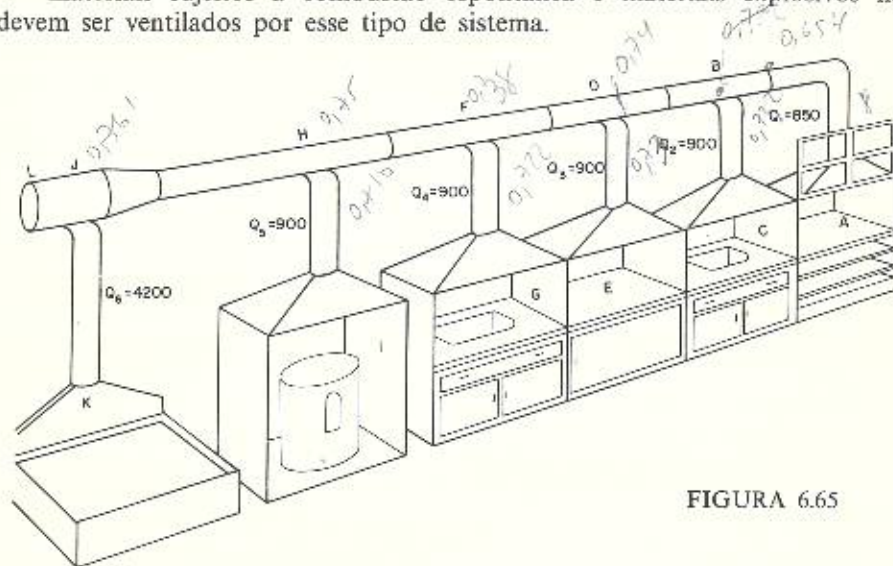


FIGURA 6.65

Exercício de aplicação

Balancear o esquema da Fig. 6.65. Para o balanceamento, obedecer à seqüência que expomos a seguir.

Ramal AB:

$$Q = 850 \text{ pés}^3/\text{min};$$

$$\text{velocidade no duto} = 2450 \text{ pés}/\text{min};$$

diâmetro do duto = 8 pol;

$p_{c_d} = 0,375$ pol de H_2O ;

perda na entrada = $\Delta p_e = 0,25 p_{c_p}$;

comprimento do duto reto = 7 pés;

$\Delta p_e = 0,25 p_{c_p}$;

perda por atrito em 100 pés = $\Delta p_f = 1,2$, $\Delta p_f = 1,2$ pol de $H_2O/100$ pés;

1 cotovelo $90^\circ r = 2d$,

$\Delta p_{e_1} = 0,27 p_{c_p}$;

$$\Delta p_{AB} = \frac{\Delta p_f \times L}{100} + (\Delta p_e + \Delta p_{e_1} + 1 p_{c_p});$$

$$\Delta p_{AB} = \frac{1,2 \times 7}{100} + (0,25 + 0,27 + 1)0,375.$$

$$\Delta p_{AB} = 0,654 \text{ pol.}$$

Ramal CB:

$Q = 900$ pés³/min;

velocidade no duto = 2600 pés/min;

diâmetro do duto = 8 pol;

$p_{c_d} = 0,42$ pol;

perda na entrada = $\Delta p_e = 0,25 p_{c_p}$;

$\Delta p_f = 1,35$ pol de $H_2O/100$ pés;

1 cotovelo de $60^\circ = \Delta p_{e_1} = 0,67 \times 0,27 p_{c_p}$, $\Delta p_{e_2} = 0,18 p_{c_p}$;

1 junção, $\Delta p_j = 0,18 p_{c_p}$;

comprimento do duto reto = 3,4 pés;

$$\Delta p_{CB} = \frac{\Delta p_f \times L}{100} + (\Delta p_e + \Delta p_{e_1} + \Delta p_j + 1 p_{c_p}),$$

$$\Delta p_{CB} = \frac{1,35 \times 3,4}{100} + (0,25 + 0,18 + 0,18 + 1)0,42,$$

$\Delta p_{CB} = 0,722$ pol de H_2O ;

pressão dominante em B = $\Delta p_B = 0,722$ pol de H_2O .

Ramal BD:

$Q = 900 + 850 = 1750$ pés³/min;

velocidade no duto = 2200 pés/min;

diâmetro do duto = 12 pol;

comprimento do duto reto = 3,0 pés;

perda por atrito em 100 pés = $\Delta p_f = 0,60$ pol de $H_2O/100$ pés;

$$\Delta p_D = \Delta p_B + \frac{\Delta p_f \times L}{100};$$

$$\Delta p_f = \frac{0,60 \text{ pol de } H_2O}{100 \text{ pés}};$$

$$\Delta p_D = 0,722 + \frac{0,60 \times 3}{100} = 0,715 + 0,0160; \Delta p_D = 0,74 \text{ pol de } H_2O.$$

Ramal ED:

$$Q = 900 \text{ pés}^3/\text{min};$$

$$\text{velocidade no duto} = 2600 \text{ pés}/\text{min};$$

$$\text{diâmetro do duto} = 8 \text{ pol};$$

$$p_{c,d} = 0,42 \text{ pol de H}_2\text{O};$$

$$\text{perda na entrada} = \Delta p_e = 0,25 p_c;$$

$$\text{comprimento do duto reto} = 4,0 \text{ pés};$$

$$\text{perda por atrito em 100 pés} = \Delta p_f = 1,35 \text{ pol de H}_2\text{O}/100 \text{ pés};$$

$$\Delta p_e = 0,25 p_c;$$

$$1 \text{ cotovelo de } 60^\circ r = 2d; \quad \Delta p_f = 1,35 \text{ pol de H}_2\text{O}/100 \text{ pés};$$

$$\Delta p_{c_1} = 0,67 \times 0,27 p_c \quad \Delta p_{c_1} = 0,18 p_c;$$

$$1 \text{ junção, } \Delta p_j = 0,18 p_c \quad \Delta p_j = 0,18 p_c;$$

$$\Delta p_{ED} = \frac{\Delta p_f \times 1}{100} + (\Delta p_e + \Delta p_{c_1} + \Delta p_j + 1 p_c);$$

$$\Delta p_{ED} = \frac{1,35 \times 4}{100} + (0,25 + 0,18 + 0,18 + 1)0,42;$$

$$\Delta p_{ED} = 0,730 \text{ pol de H}_2\text{O};$$

$$\text{pressão dominante em } D = \Delta p_D = 0,73 \text{ pol de H}_2\text{O};$$

Ramal DF:

$$Q = 1750 + 900 = 2650 \text{ pés}^3/\text{min};$$

$$\text{velocidade no duto} = 2150 \text{ pés}/\text{min};$$

$$p_{c,d} = 0,29 \text{ pol de H}_2\text{O};$$

$$\text{diâmetro do duto} = 15 \text{ pol};$$

$$\text{perda por atrito por 100 pés} = \Delta p_f = 0,43;$$

$$\Delta p_f = 0,43 \text{ pol de H}_2\text{O}/100 \text{ pés};$$

$$\text{comprimento do duto reto} = 1,9 \text{ pé};$$

$$\Delta p_F = \Delta p_D + \frac{\Delta p_f \times 1}{100};$$

$$\Delta p_F = 0,73 + \frac{0,43 \times 1,9}{100};$$

$$\Delta p_F = 0,738 \text{ pol de H}_2\text{O}.$$

Ramal GF:

$$Q = 900 \text{ pés}^3/\text{min};$$

$$\text{diâmetro do duto} = 8 \text{ pol};$$

$$\text{velocidade no duto} = 2600 \text{ pés}/\text{min};$$

$$p_{c,d} = 0,42 \text{ pol de H}_2\text{O};$$

$$\text{perda na entrada} = \Delta p_e = 0,25 p_c;$$

$$\Delta p_f = 1,35 \text{ pol de H}_2\text{O}/100 \text{ pés};$$

$$\text{comprimento do duto reto} = 3,4 \text{ pés};$$

$$1 \text{ cotovelo de } 60^\circ, \Delta p_{c_1} = 0,18 p_c;$$

$$1 \text{ junção, } \Delta p_j = 0,18 p_c;$$

$$\Delta p_{GF} = \frac{\Delta p_f \times l}{100} + (\Delta p_e + \Delta p_{e_1} + \Delta p_j + 1p_c),$$

$$\Delta p_{GF} = \frac{1,35 \times 3,4}{100} + (0,25 + 0,18 + 0,18 + 1)0,42,$$

$$\Delta p_{GF} = 0,722 \text{ pol de H}_2\text{O}.$$

Pressão dominante em F,

$$\Delta p_F = 0,738 \text{ pol de H}_2\text{O}.$$

Ramal FH:

$$Q = 2650 + 900 = 3550 \text{ pés}^3/\text{min};$$

diâmetro do duto = 17 pol;

velocidade no duto = 2250 pés/min;

perda por atrito em 100 pés = $\Delta p_f = 0,4$ pol de H₂O/100 pés;

comprimento do duto reto = 3,0 pés;

$$\Delta p_H = \Delta p_F + \frac{\Delta p_f \times l}{100},$$

$$\Delta p_H = 0,738 + \frac{0,40 \times 3}{100} = 0,751,$$

$$\Delta p_H = 0,75 \text{ pol de H}_2\text{O}.$$

Ramal IH:

$$Q = 900 \text{ pés}^3/\text{min};$$

diâmetro do duto = 8 pol;

velocidade no duto = 2600 pés/min;

$p_{e_1} = 0,42$ pol de H₂O;

perda na entrada = $0,25p_c$;

perda por atrito por 100 pés = $\Delta p_f = 1,35$ pol de H₂O/100 pés;

$\Delta p_{e_1} = 0,18p_c$;

comprimento do duto reto = 2,5 pés;

cotovelo de 60°, $r = 2d$;

junção, $\Delta p_j = 0,18p_c$;

$$\Delta p_{IH} = \frac{\Delta p_f \times l}{100} + (\Delta p_e + \Delta p_{e_1} + \Delta p_j + p_c),$$

$$\Delta p_{IH} = \frac{1,35 \times 2,5}{100} + (0,25 + 0,18 + 0,18 + 1)0,42,$$

$$\Delta p_{IH} = 0,710 \text{ pol de H}_2\text{O}.$$

Pressão dominante em H,

$$\Delta p_H = 0,75 \text{ pol de H}_2\text{O}.$$

Ramal HJ:

$$Q = 3550 + 900 = 4450 \text{ pés}^3/\text{min};$$

diâmetro do duto = 2,0 pol;

velocidade no duto = 2050 pés/min;

perda por atrito em 100 pés = 0,28 pol de H₂O/100 pés;

comprimento do duto reto = 3,9 pés;

$$\Delta p_J = \Delta p_H + \frac{\Delta p_f \times 1}{100} = 0,75 + \frac{0,28 \times 3,9}{100} = 0,761 \text{ pol de H}_2\text{O}.$$

Ramal KJ:

$Q = 4\,200 \text{ pés}^3/\text{min};$

velocidade no duto = 1 920 pés/min;

diâmetro do duto = 20 pol;

$p_{c_d} = 0,23 \text{ pol de H}_2\text{O};$

perda por atrito em 100 pés = $\Delta p_f = 0,24 \text{ pol de H}_2\text{O}/100 \text{ pés};$

comprimento do duto reto = 2,0 pés;

1 cotovelo de 60°, $r = 2d;$

$\Delta p_{c_e} = 0,18 p_c;$

junção $\Delta p_j = 0,18 p_c;$

perda na entrada = 0,435 pol de H₂O;

$$\Delta p_{KJ} = 0,453 + \frac{0,24 \times 2}{100} + (0,18 + 0,18 + 1) \times 0,23,$$

$$\Delta p_{KJ} = 0,753 \text{ pol de H}_2\text{O}.$$

Pressão dominante em J,

$$\Delta p_J = 0,761 \text{ pol de H}_2\text{O}.$$

Ramal JL:

$Q = 4\,450 + 4\,200 = 8\,650 \text{ pés}^3/\text{min};$

diâmetro do duto = 26 pol;

perda por atrito = 0,25 pol de H₂O/100 pés;

comprimento do duto reto = 0,8 pés;

$$\Delta p_L = 0,762 + \frac{0,8 \times 0,25}{100} = 0,764 \text{ pol de H}_2\text{O};$$

chapéu após o ventilador,

$\Delta p_e = 0,18 p_c$ (para $H = 0,75d$ duto),

$\Delta p_e = 0,18 \times 0,36$, $= 0,065$

$\Delta p_e = 0,065 \text{ pol de H}_2\text{O};$

comprimento do duto após o ventilador,

perda por atrito = $\Delta p_f = 0,25 \text{ pol de H}_2\text{O}/100 \text{ pés};$

comprimento do duto reto = 3 pés;

$$\Delta p_1 = \frac{0,25 \times 3}{100} = 0,0075 \text{ pol de H}_2\text{O};$$

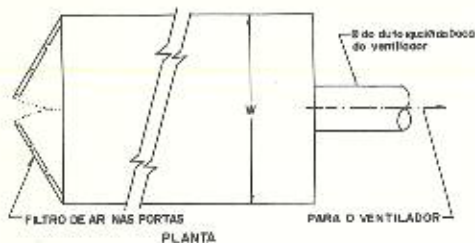
perda total = $\Delta p_t = 0,764 + 0,065 + 0,0075 = 0,836 \text{ pol de H}_2\text{O};$

$$\Delta p_t = 0,836 \text{ pol de H}_2\text{O};$$

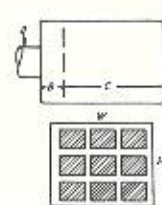
$Q = 8\,650 \text{ pés}^3/\text{min};$

ventilador,

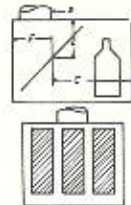
$p = 1 \text{ pol de H}_2\text{O}.$



$Q = 100 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pé de seção transversal.
 $\Delta P_f = 0,50 \text{ VP}$ mais a perda nos filtros quando sujos.
 $Vd = 1000 - 3000 \text{ pés}^3/\text{min}$
 Filtros de ar dimensionados para $275 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pé² de filtro.
 Filtros de tinta consultar fabricantes para número e tamanho.
 Observar combustibilidade.



1-Obstáculos múltiplos ou filtros
 $B = 0,75 D$
 Área do filtro ou obstáculo = $0,75 WH$



2-Obstáculo inclinado
 $E = D + 6"$
 Área do obstáculo = $0,40 WH$

DADOS DO PROJETO

Cabinas grandes e profundas dispõem-se obstruídas. Para projeto de cabina de pintura consulte o fabricante. Leia em cada divisor de espelhos/ventilador anti-taóol. Em pintura eletrolítica, o sistema deve desligar-se automaticamente, se faltar o transportador/ventilador ou a terra.

OPERADOR DENTRO

W = tamanho de trabalho + 6"
 H = tamanho de trabalho + 3 (mínimo H=7")
 C = tamanho de trabalho + 6"
 $Q = 100 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pé² de seção transversal da cabina.
 Pode-se usar $75 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pé² para cabinas grandes e profundas.

OPERADOR FORA

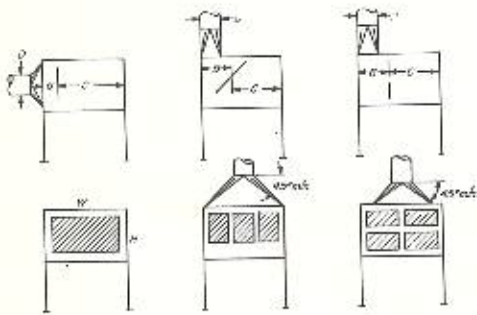
W = tamanho de trabalho + 6"
 H = tamanho de trabalho + 6"
 C = 0,75x maior (para maior frontal)
 $Q = 100 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pé² de área aberta (incluindo transportador).
 Obstáculos apenas para melhor distribuição.

$\Delta P_f = 1,75 \text{ VP} + 0,5 \text{ VPd}$ (com obstáculo)
 $= \text{filtro} + 0,5 \text{ VPd}$ (sem filtro)
 $Vd = 1000 - 3000 \text{ pés}^3/\text{min}$

O operador deve usar máscara

AMERICAN COMPTON CO GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENIST	
PINTURA DE VEÍCULOS	
DATA	1-74 VS-601

AMERICAN COMPTON CO GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENIST	
GRANDES CABINAS DE PINTURA	
DATA	1-74 VS-603



1-OBSTÁCULO DE TOPO: $B = 0,75 D$ Área do obstáculo = $0,80 WH$
 2-OBSTÁCULO INCLINADO: $B = 0,16 D$ Distância = $0,60 WH$
 3-OBSTÁCULOS MÚLTIPLOS OU FILTROS: $B = 0,75 D$ Área dos filtros = $0,75 WH$

DADOS DO PROJETO

W = tamanho de trabalho + 12"
 H = tamanho de trabalho + 12"
 C = 0,75W ou 12,5H (ou maior)
 $Q = 200 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pé² de face (200WH) para área de face até 4 pés²
 $Q = 50 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pé² de face para área de face acima de 4 pés²
 $\Delta P_f = 1,75 \text{ VP} + 0,5 \text{ VPd}$ (obstruído)
 $\Delta P_f = \text{filtro} + 0,5 \text{ VPd}$ (filtro)
 $Vd = 1000 - 3000 \text{ pés}^3/\text{min}$
 (Obstáculos apenas para melhor distribuição)

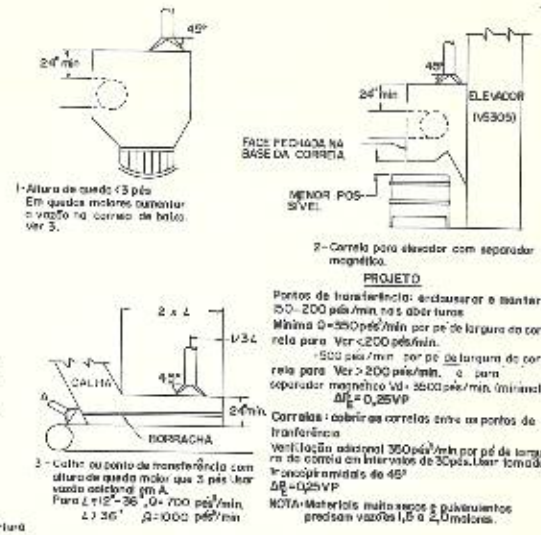
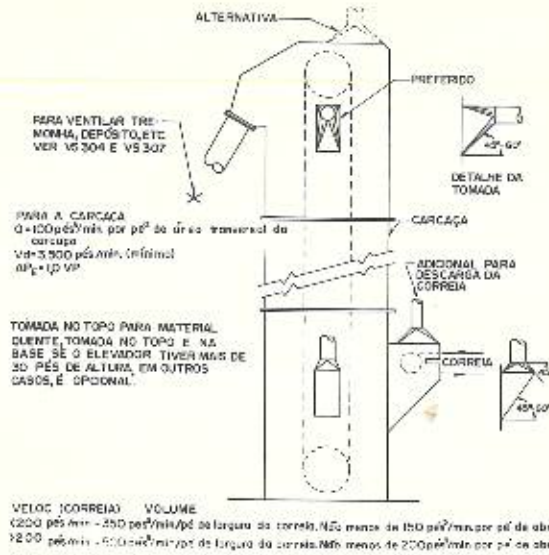


$Q = 50 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pé² de seção transversal (Quando WxH é maior que 50 pés²)
 $\Delta P_f = 0,50 \text{ VP}$ mais a resistência dos filtros quando sujos
 $Vd = 1000 - 3000 \text{ pés}^3/\text{min}$
 Filtros de ar, $275 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pé² de filtro (base de cálculo)
 Filtros de tinta (pigmento) consultar fabricantes para número e tamanho. Observar combustibilidade.

NOTA: É conveniente investigar a exaustão com o ar de suprimento e com o ar comprimido do pistolo.

AMERICAN COMPTON CO GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENIST	
PEQUENAS CABINAS DE PINTURA	
DATA	1-74 VS-604

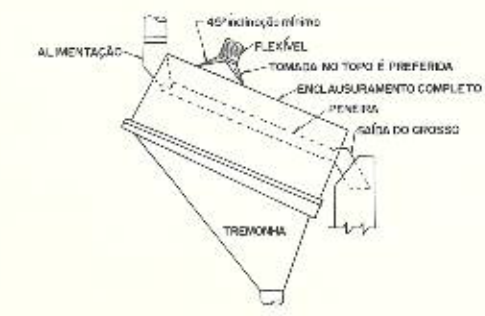
AMERICAN COMPTON CO GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENIST	
GRANDES CABINAS DE PINTURA	
DATA	1-74 VS-606



AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
ELEVADOR DE CAMECAS	
DATA	1-66 VS-305



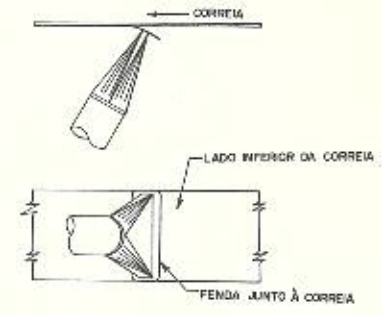
AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
CORREIA TRANSPORTADORA	
DATA	1-72 VS-306



PENEIRA PLANA
 $Q = 200 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pé de abertura, mas não mais de 50 $\text{pés}^3/\text{min}$ por pé de área da peneira
 $V = 3.500 \text{ pés}/\text{min}$ (máximo)
 $AP = 0,25VP$



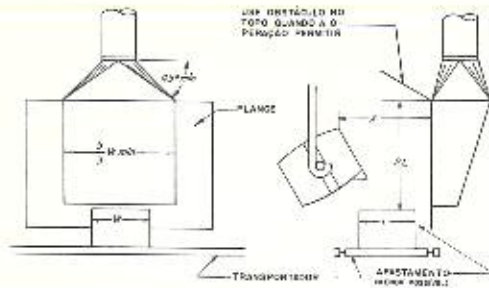
AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
PENEIRAS	
DATA	1-64 VS-307



$Q = 200 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pé de largura da correia
 $V = 2.000 \text{ pés}/\text{min}$
 $W = 4.000 \text{ pés}/\text{min}$ (máximo)

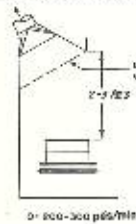
Não se recomenda para correias unidas

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
LIMPEZA DE CORREIAS	
DATA	1-68 VS-308



CAPTORAS REDUZIDAS
 Ducha sem fumaça: 40-2000 pés/min;
 Ducha com fumaça: 2000-4000 pés/min;
 $V_e = 3000$ pés/min;
 $\Delta p_e = 0,25$ VP (sem fumaça), $0,25$ VP (com fumaça)

ENCLOSURAMENTO PARCIAL

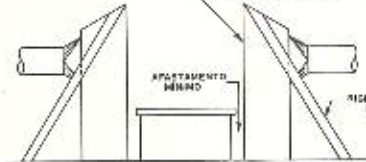


AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

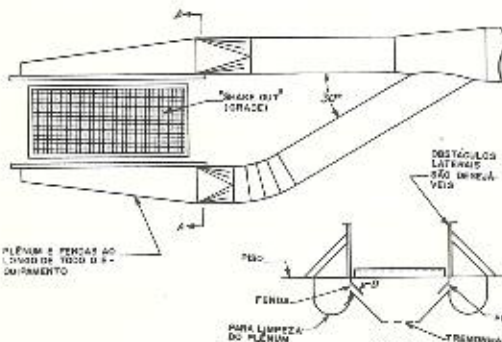
VAZAMENTO

DATA 1-64 VS-109

PARTE ENCLAUSTRADA DEVE SER CRIADA EM 2 LADOS



VENTILAÇÃO EM 2 LADOS (BILATERAL)

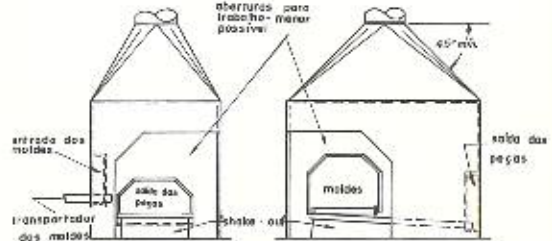
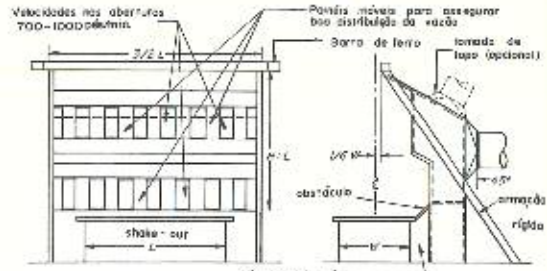


VENTILAÇÃO POR BAIXO
 $V_e = 1500 - 2000$ pés/min;
 $V_e = 6000$ pés/min (plênio);
 $\Delta p_e = 0,25$ VP (sem fumaça);
 Desobstruir o piso imediatamente ao redor do vento;
 Vela VS-112

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

"SHAKE OUT"

DATA 1-64 VS-111



CAPTOR ENCLAUSTRANTE

$V_e = 3500$ pés/min;
 $\Delta p_e = 0,25$ VP;
 $v_{50} = 112$

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

"SHAKE - OUT"

DATA 1-64 VS-110

Módulo econômico para shake-out*

Taxa de coleta**	Peças quantas	Peças frías
Encarceramento**	200 peças por pé² de área, ou mesmo 200 peças por pé² de área de grade	200 peças por pé² de área, ou mesmo 200 peças por pé² de área de grade
Encarceramento em 2 lados, 1/3 de área**	300 peças por pé² de área de grade	275 peças por pé² de área de grade
Captor lateral ou equivalente**	400-600 peças por pé² de área de grade	350-400 peças por pé² de área de grade
Moagem centrada**	400 peças por pé² de área de grade	300 peças por pé² de área de grade
Ventilação por baixo**	400 peças por pé² de área de grade	300-350 peças por pé² de área de grade

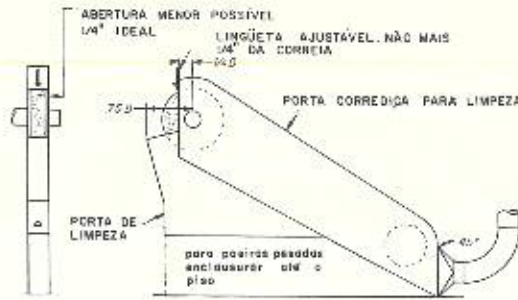
*Recomenda-se usar estas quando - as peças são muito pequenas; - há resíduo entre as peças; - há um grande número de peças; - há uma grande quantidade de peças; - há uma grande quantidade de peças; - há uma grande quantidade de peças.



AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

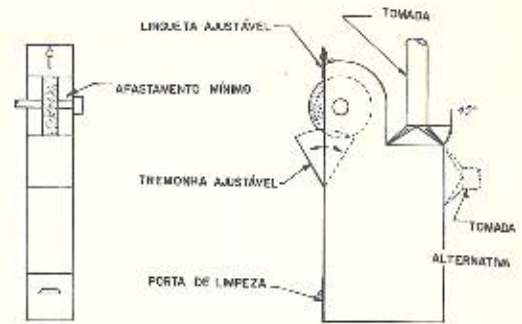
"SHAKE OUT"

DATA 1-64 VS-112



largura da correia (pol.)	velocidade sem enclausuradas	velocidade na enclausurada
1 1/2	220	330
2	390	600
3	500	750
4	810	920
5	880	1200
6	1200	1600

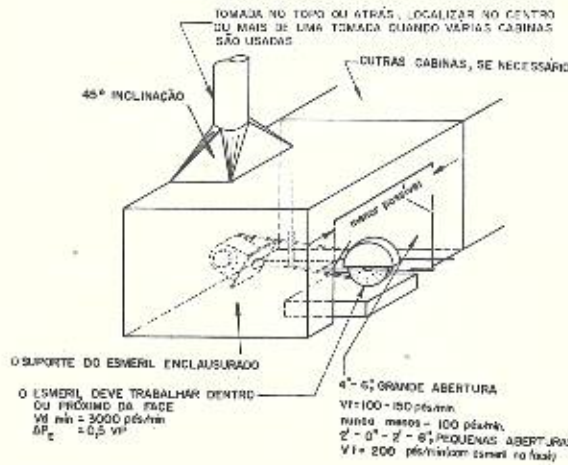
Nota: não mais de 25% da roda exposta
 $AP_c = 0,40 \text{ VP}$
 $V_c = 3500 \text{ pés/min (máx)}$
 NOTA: para HIRBto e magnésio, efetuar a limpeza e limpar 5000 pés/min através da seção transversal da capta



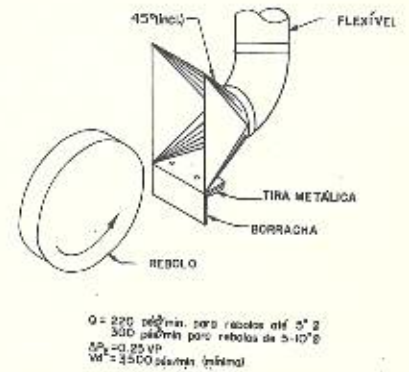
dia da roda (pol.)	largura da roda (pol.)	velocidade pés/min
9	2	400
9	3	670
15	4	800
19	5	1100
24	6	1400
30	8	1800

NOTA: para maiores larguras, aumente o diâmetro com largura
 $V_c = 4800 \text{ pés/min (máx)}$
 $AP_c = 0,40 \text{ VP}$

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
POLITRIZ
 DATA 1-64 VS-402

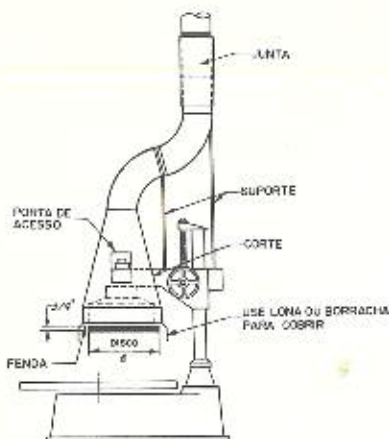


AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
POLITRIZ (RODA MACIA)
 DATA 1-64 VS-407



AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
ESMERIL BASCULANTE
 DATA 1-64 VS-414

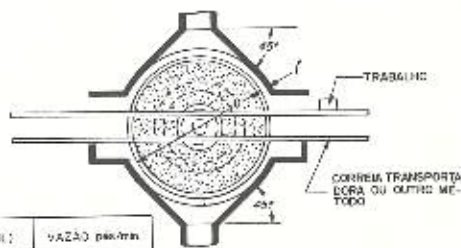
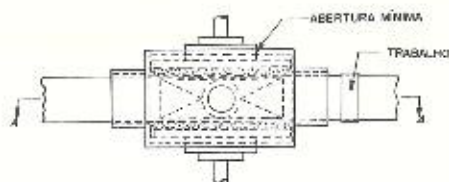
AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
ESMERIL DE SUPERFÍCIE
 DATA 1-65 VS-417



Ø DISCO	Ø TUBO	VAZÃO
20	6"	900
20" - 30"	8"	1500
30" - 53"	12"	3500
53" - 72"	6"	6300

Mínimo Vd = 4500 pés/min
 3500 pés/min
 Mínimo Va = 2000 pés/min
 $\Delta P_s = 10 VP_s + 0,40 VP_s$

AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
ESMERIL INTERNO
 DATA 1-64 VS-10P



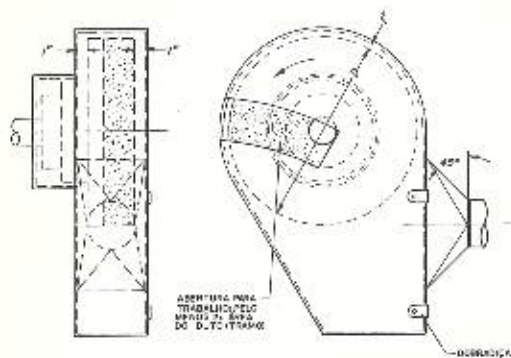
Ø DISCO (POL)	VAZÃO pés/min
Ø 19	600
Ø 25	980
Ø 30	1200
Ø 53	1770
Ø 72	6280

SEÇÃO A-A

NOTA: No princípio, o encerramento feito com a peça a coroa, com o intuito de assegurar o equilíbrio.

Mínimo velocidade no tronco*
 4500 pés/min. tronco
 3500 pés/min. principal
 $\Delta P_s = 0,25 VP_s$ (tomado no tronco)
 $\Delta P_s = 0,45 VP_s$ (tomado no tronco principal)

AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
ESMERIL HORIZONTAL DE DISCO DUPLA
 DATA 1-64 VS-40B

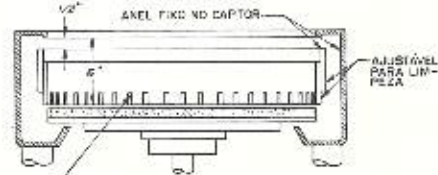
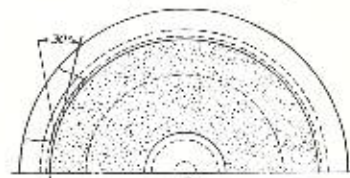


Ø do disco (polegadas)	Velocidade (pés/min)
Ø 12	220
12 a 19	390
19 a 30	610
30 a 36	880

Mínimo Vd = 4500 pés/min. (tronco), 3500 pés/min. (principal)
 $\Delta P_s = 0,25 VP_s$ tomado no tronco
 $\Delta P_s = 0,45 VP_s$ tomado no tronco principal

NOTA: Para obter encerramentos aumentar a vazão

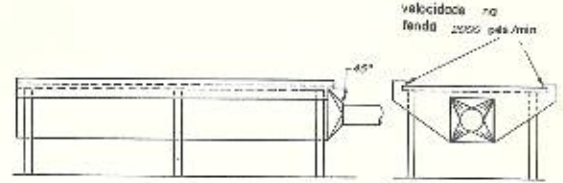
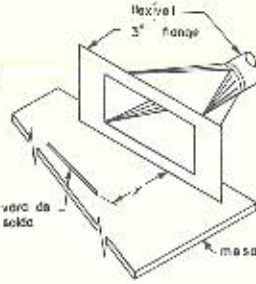
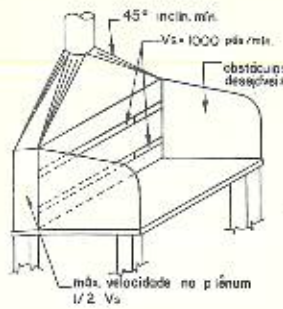
AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
ESMERIL HORIZONTAL DE DISCO ÚNICO
 DATA 1-64 VS-10S



Ø disco (polegadas)	1/2 ou mais do disco coberto		disco descoberto	
	N.º*	Veloc. (pés/min)	N.º*	Veloc. (pés/min)
Ø 20	1	500	2	780
20 a 30	2	780	2	1480
30 a 53	2	1770	4	3530
53 a 72	2	3140	5	6010

* Número de revoluções do longo do captor:
 Va = 2000 pés/min
 Vd = 4500 pés/min mínimo no tronco
 3500 pés/min mínimo no principal
 $\Delta P_s = 10 VP_s + 0,5 VP_s$ (tronco)

AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
ESMERIL VERTICAL
 DATA 1-64 VS-410



Q = 350 pés³/min. por pé linear do captor
Compr. captor fixado para requisitos do trabalho
larg. mesa = 24" máx.

Vd = 1000-3000 pés/min
ΔP_L = 1,76 VP_s + 0,25 VP_d

Ventilação geral não é possível local

Ø	SOLDA	Velocidade máxima
5/8"	1000	
3/4"	500	
1/2"	350	
3/8"	450	

EXAUSTÃO PORTÁTIL

X	Velocidade
5	250
8	400
12	1300

Vf = 1500 pés/min
Vd = 3000 pés/min. mínimo

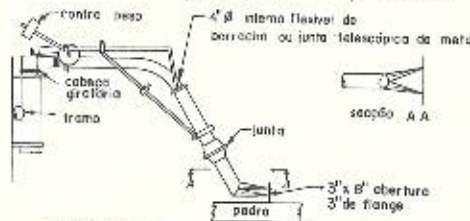
ΔP_L = 0,25 VP_d

Q = 50 . 100³ pés³/min. por pé² de área de topo da mesa
Vd = 2500-3000 pés/min.
ΔP_L = 1,76 VP_s + 0,25 VP_d

NOTA: velocidade máxima no plenum = 1/2 V_s

* para materiais tóxicos usar vazões mais altas

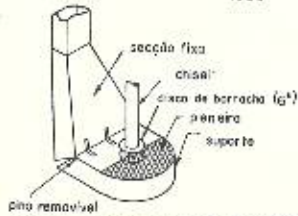
Dutras tipos de Captor
Cubina
Q = 100 pés³/min. por pé de área da face
Pintura var VS-603-VS-604
Spray metal VS-45



FERRAMENTAS MANUAIS PNEUMÁTICAS

Q = 540 pés³/min, distância máxima captor - ferramenta, 10"
perda máx. ΔP = 8" de água até o tramo
Vd = 4000 pés/min.

NOTA: Este trabalho pode ser feito com velocidade na face
VF = 200 pés/min. em uma cubina

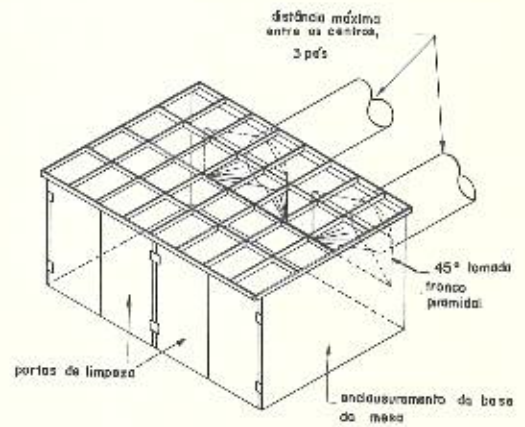


MÁQUINA DE ACABAMENTO SUPERFICIAL

Ø ferramenta pés/min. Ø tramo
ole: 2 3/8" 500 4"
2 3/8" x 2 7/8" 1000 5 1/2"
ΔP_L = 1,0 VP

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
CORTE E ACABAMENTO DE GRANITO	
DATA	1-68 VS-909

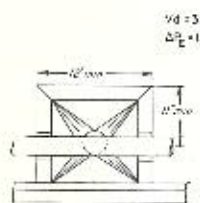
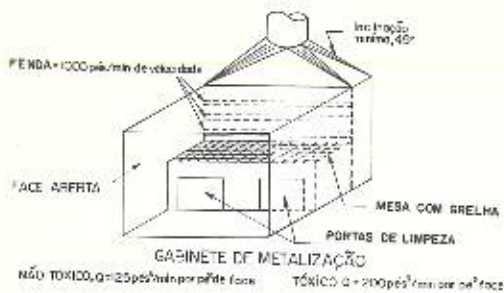
AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
MESA DE TRABALHO	
DATA	1-70 VS-503



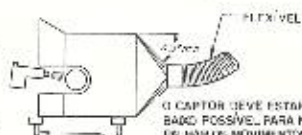
Q = 150 pés³/min por pé² de área da mesa
Vd = 2000-4000 pés/min.
ΔP_L = 10 VP (através da grade)
0,25 VP_d - tomada tronco-pirâmidal

* Usar V_s = 4000 pés/min nos tramos horizontalis

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
CORTE OXI-ACETILENO	
DATA	1-68 VS-915



$V_d = 3000$ pés³/min (mínimo)
 $\Delta P_c = 1,78$ VP + 0,25 VP

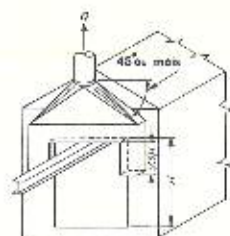


O CAPTOR DEVE ESTAR O MAIS BAIXO POSSÍVEL PARA NÃO OBSTRUIR OS MOVIMENTOS

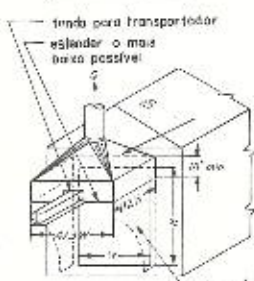
NOTA: CAPTOR LOCAL NÃO INDICADO QUANDO SE ESTÃO USANDO METAIS MUITO TÓXICOS

$Q = 200$ pés³/min por pé² (mínimo)
 $V_d = 3500$ pés³/min (mínimo)
 $\Delta P_c = 0,25$ VP

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
"SPRAY METÁLICO"	
DATA	1-54 VS-413



TÍPO FENDA
 $Q = 100$ pés³/min por pé² DE PORTA MAIS 1/2 DOS PRODUTOS DE COMBUSTÃO
 $\Delta P_c = 1,0$ VP + 0,25 VP
 $V_d = 1000 - 3000$ pés³/min
 DIMENSIONAR O FLÛNUM 500 pés³/min (mínimo)
 FENDAS PARA TRANSPORTADOR ESTENDER O MAIS BAIXO POSSÍVEL

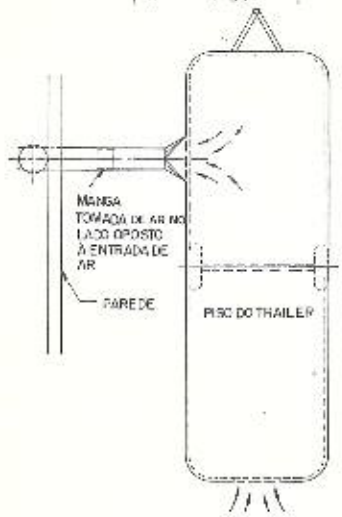


TÍPO COIFA
 $A = 200$ pés³/min por pé² DE FRENTO DO CAPTOR MAIS 1/2 DOS PRODUTOS DE COMBUSTÃO
 $V_d = 0,25$ VP
 $V_s = 1000 - 3000$ pés³/min

NOTA: PARA SECADORES, INCLUIR O VOLUME DE VAPOR D'ÁGUA EMPURRADO PARA SOLVENTES EM PLAMINAS, TAVAS E DEVIDAS PRECAUÇÕES

NOTA: CAPTORES EM CADA LADO DO FORNO REDUZIR O TAMAHO DAS PORTAS AO MÁXIMO TIRANDO NATURAL PARA OS PRODUTOS DE COMBUSTÃO

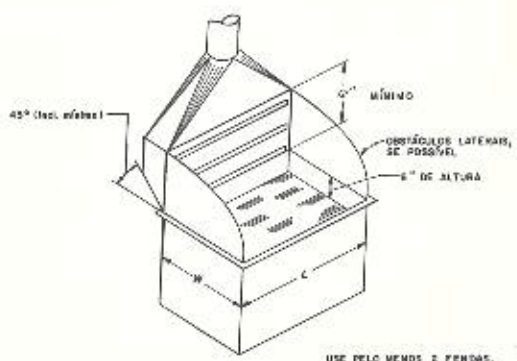
AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
"FORNO DE SECAGEM"	
DATA	1-70 VS-502



$Q = 50$ pés³/min por pé² de área transversal do "trailer"
 $\Delta P_c = 0,25$ VP
 $V_d = 1000 - 3000$ pés³/min

NOTA: Pintor deve usar equipamento individual de proteção.

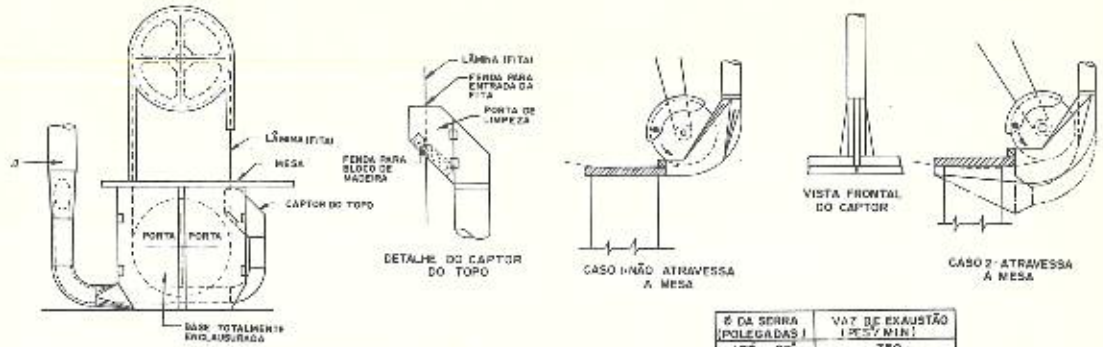
AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
"PINTURA INTERNA - TRAILER"	
DATA	1-70 VS-501



USE PELO MENOS 2 FENDAS, SENDO UMA NA BASE DO CAPTOR

$Q = 150$ pés³/min por pé² de área (ISOLW)
 $V_d = 2000$ pés³/min
 $\Delta P_c = 1,78$ VP + 0,25 VP
 $V_d = 2,500 - 3,000$ pés³/min
 $W \leq 26"$
 PARA LEITOS CIRCULARES, VER VS-503, VS-505

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
"LEITOS FLUIDIZADOS"	
DATA	1-70 VS-315



LARGURA DA FITA (POL.)	VAZÃO (PÉS/CUB. M.)	VAZÃO (PÉS/CUB. M.)	VAZÃO (PÉS/CUB. M.)
	ATE 2	3 x 4	4 x 6
Até 2	350	440	550
3 x 4	350	440	550
4 x 6	350	440	550
5 x 8	350	440	550

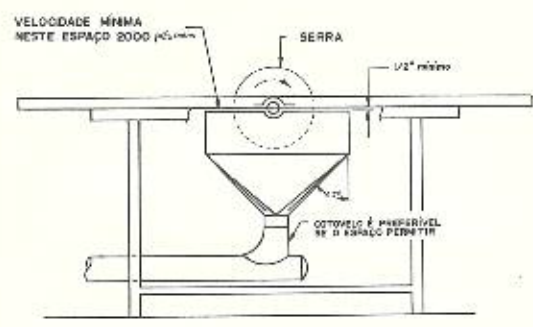
Ø DA SERRA (POLEGADAS)	VAZ DE EXAUSTÃO (PÉS/CUB. MIN)
ATE 20"	350
ACIMA 20"	440

$V_d = 3500 \text{ pés}^3/\text{min}$
 $\Delta P_s = 1,78 \text{ VP}_s = 0,25 \text{ VP}_d$

$V_d = 3500 \text{ pés}^3/\text{min}$
 $\Delta P_s = 1,78 \text{ VP}_s = 0,25 \text{ VP}_d$

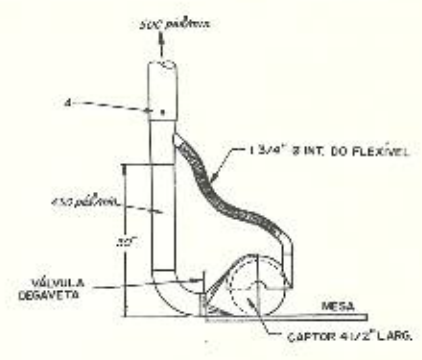
AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
SERRA DE FITA	
DATA	1-68 VS-708

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
SERRA SUSPensa	
DATA	1-68 VS-707



Ø DA SERRA (POL.)	VAZÃO (PÉS/CUB. MIN)
Até 18"	350
de 18" a 24"	440
acima de 24"	550

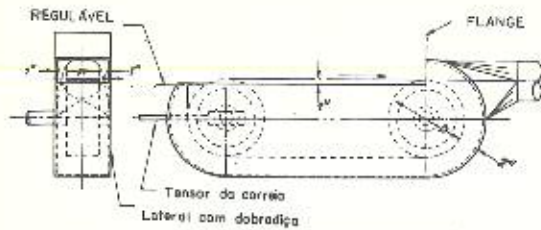
$V_d = 3500 \text{ pés}^3/\text{min}$
 $\Delta P_s = 1,0 \text{ VP}_s = 0,25 \text{ VP}_d$



$V_d = 3500 \text{ pés}^3/\text{min}$
 $\Delta P_s = 1,35 \text{ VP}$ no ponto A
 Para captor tipo cabine, ver VS-401

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
SERRA DE MESA	
DATA	1-68 VS-708

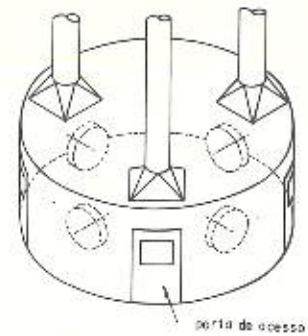
AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
SERRA RADIAL	
DATA	1-68 VS-705



largura da correia (pol)	veloc. pés/min
ata 3	220
3 a 5	300
5 a 7	390
7 a 9	500
9 a 11	610
11 a 13	740

máx. veloc. no duto - 4500 pés/min, trazo, 3500 pés/min principal.

$\Delta P_E = 0,65 VP$ tomada reto
 $0,45 VP$ tomada tronco-prismado



Q = 500 pés/min por roda (mínima)
 Não menos de 250 pés/min por pé de abertura

Vd = 3500 pés/min (mínima)
 $\Delta P_E = 1,78 VP + 0,25 VP$

Em unidades pequenas, pode-se usar apenas uma tomada.
 Cuidados com incêndios são necessários

AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

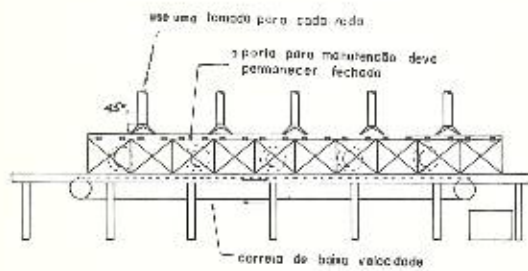
CORREIA POLITRIZ PARA
 METAL

DATA 1-64 VS-403

AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

POLTRIZ CIRCULAR AUTOMÁTICA

DATA 1-64 VS-404



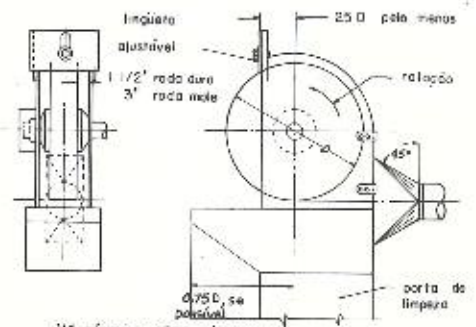
Q = 500 pés/min por roda (mínima)
 Não menos de 250 pés/min por pé de abertura

Vd = 4500 pés/min (mínima)
 $\Delta P_E = 1,78 VP + 0,25 VP$

AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

LINHA AUTOMÁTICA DE POLIMENTO

DATA 1-64 VS-405



Vd mínima = 4500 pés/min trazo
 3500 principal

$\Delta P_E = 0,65 VP$ tomada reto
 $0,40 VP$ tomada tronco prismado

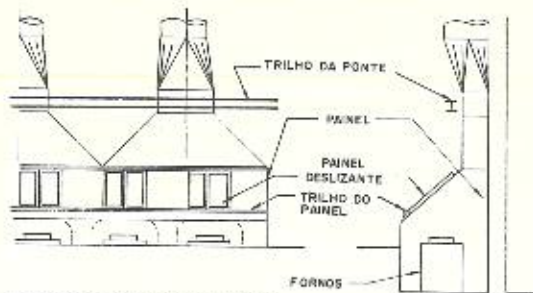
Dímetro de roda, pol	Largura de roda, pol	Veloc. pés/min	Veloc. pés/min
		sem-enclausurada	em-enclausurada
atd 9	2	300	400
9 a 18	3	500	670
18 a 18	4	810	800
19 a 24	5	1170	1100
24 a 30	6	1530	1400
30 a 36	8	2170	1800

* para maiores larguras, extrapolar

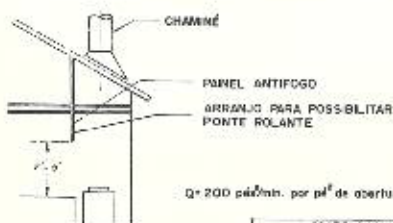
AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

POLIMENTO

DATA 1-64 VS-406

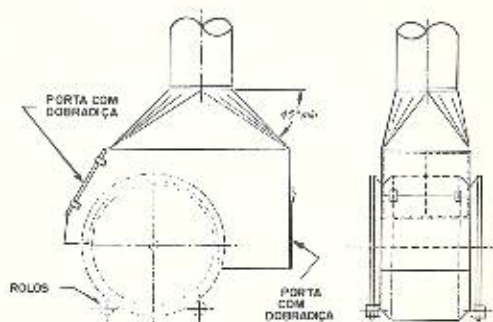


Q = 200 pés³/min por pé² de área aberta mais produtos de combustão
 $\Delta P_c = 0,5 VP$
 $V_s = 1000 - 3500$ pés³/min^{**}
 *Corrigir temperatura
 **em dados horizontais usar valores próximos de 3500 pés³/min



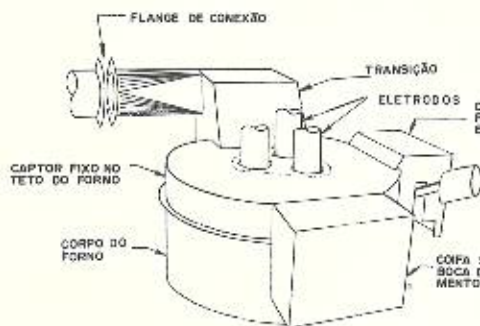
Q = 200 pés³/min por pé² de abertura total, incluindo

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
FORNO CADINHO NÃO BASCULANTE	
DATA	1-64 VS-103



Q = 400 pés³/min por pé² de abertura
 $V_s = 1000 - 3500$ pés³/min^{**}
 $\Delta P_c = 1,75 VP + 0,25 VP$
 **Para framos horizontais, a velocidade de transporte é necessária.

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
FORNO ELÉTRICO BASCULANTE	
DATA	1-64 VS-104



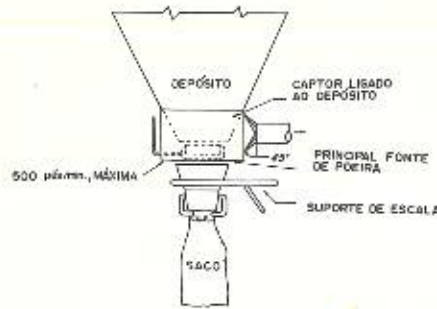
Para conhecer Q, SP e temperatura, consulte o fabricante.
 (Gás) = 2500 pés³/min por t de carga
 Alternativa: coifa suspensa - requer grandes vazões
 Q = 200 pés³/min por pé² de área aberta

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
FORNO ELÉTRICO A ARCO	
DATA	1-64 VS-105



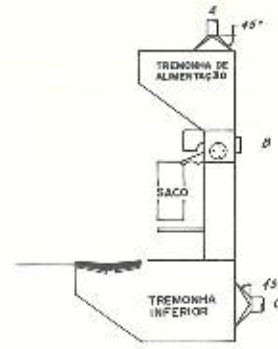
Q = 200 L/s, não menos de 200 pés³/min por pé² de área aberta total com portas abertas
 $\Delta P_c = 0,25 VP$
 $V_s = 1000 - 3500$ pés³/min^{**}
 *Corrigir para temperatura e produtos de combustão
 ** Observar Vd para trechos horizontais = 3500 pés³/min.

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
FORNO CADINHO BASCULANTE	
DATA	1-64 VS-106



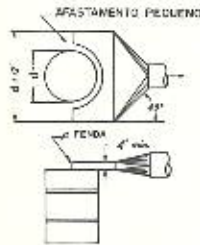
Q= 400-500 pés/min - poeira inerte.
 1000-1500 pés/min - poeira tóxica
 Vd= 3500 pés/min. mínima
 $\Delta P_2 = 0,25 VP$

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
ENCHIMENTO DE SACOS	
DATA	1-64 VS-301

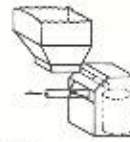


Q= 500 pés/min tubo de enchimento
 Q= 500 pés/min na tremonha de alimentação
 Q= 900 pés/min na tremonha inferior
 Vd= 3500 pés/min. mínima
 $\Delta P = 0,25 VP$ (A e C)
 = 100 VP em B

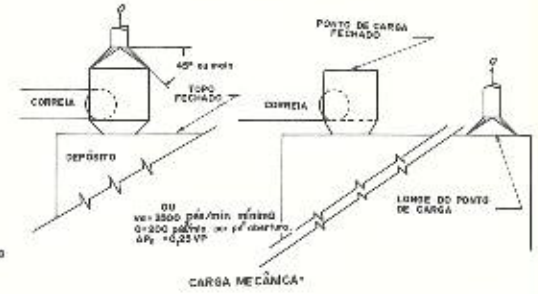
AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
EMPA COTADOR	
DATA	1-64 VS-302



Q= 100 pés/min por pés de boca do barril (mód.)
 Vd= 3500 mínima
 $\Delta P_2 = 0,25 VP + 1,78 VP_2$
 Carga manual



Q= 150 pés/min por pés de boca aberta
 Vd= 3500 pés/min. mínima
 $\Delta P_2 = 0,25 VP$ para 45°



OU
 Vd= 3500 pés/min. mínima
 Q= 200 pés/min por pés de boca
 $\Delta P_2 = 0,25 VP$

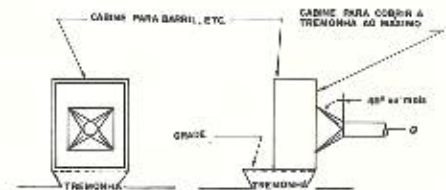
CARGA MECÂNICA*



Q= 50 pés/min x 8 do tonel (pés) - tempo parado
 Q= 150 pés/min x 8 do tonel (pés) - tempo livre
 Vd= 3500 pés/min (mínimo)
 $\Delta P_2 = 0,25 VP$



Q= 300-400 pés/min
 Vd= 3500 pés/min. mínima.
 $\Delta P_2 = 0,25 VP$

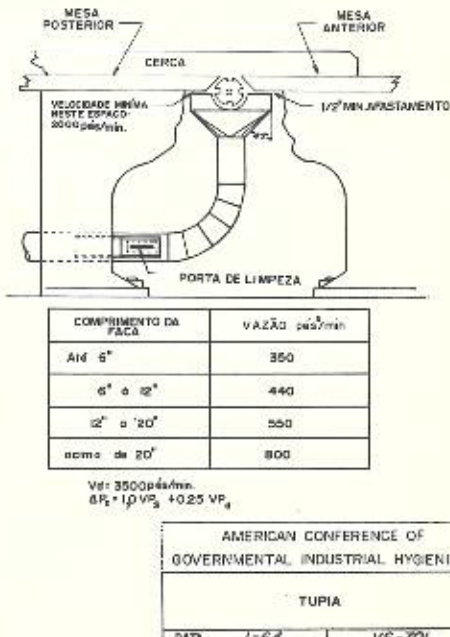
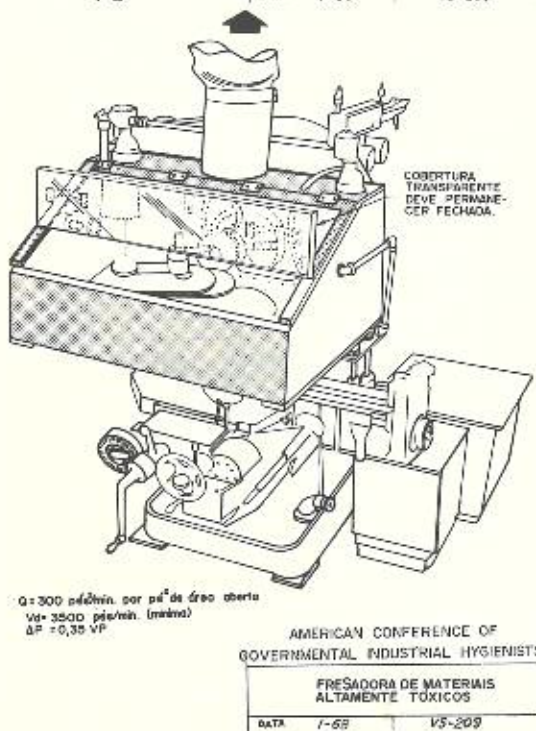
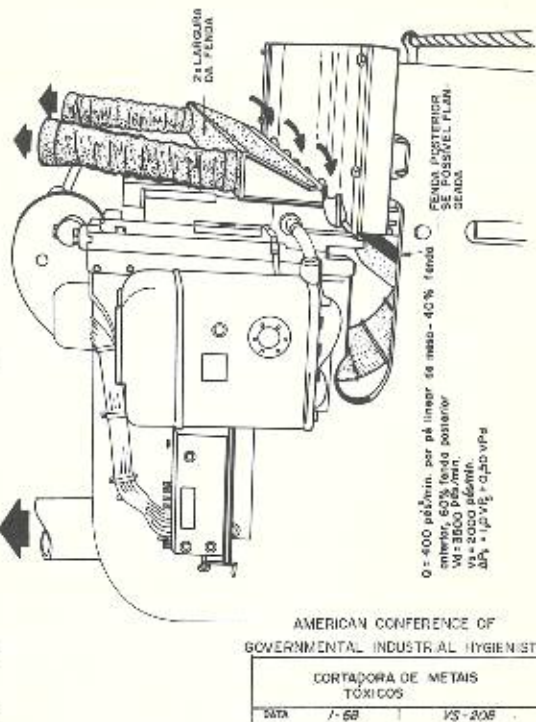
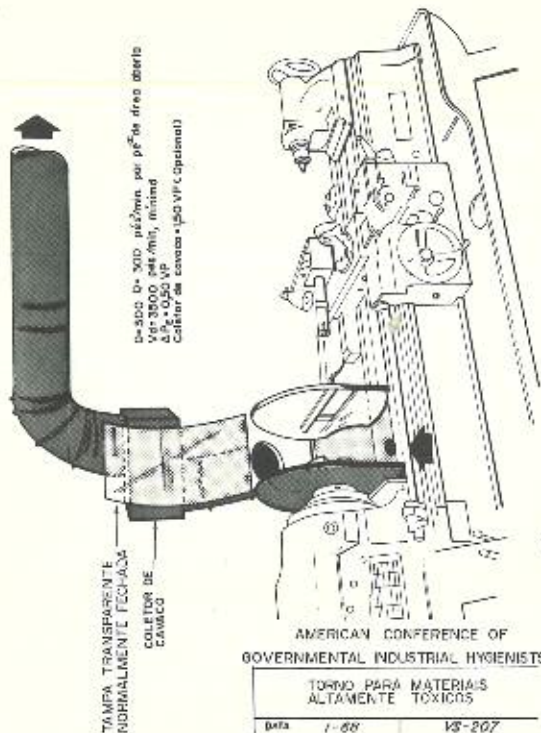


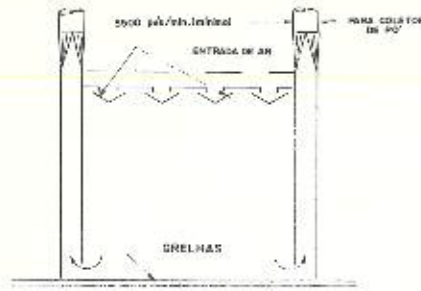
Vd= 3500 pés/min. mínima
 Q= 200 pés/min por pés de boca
 $\Delta P_2 = 0,25 VP$

CARGA MANUAL

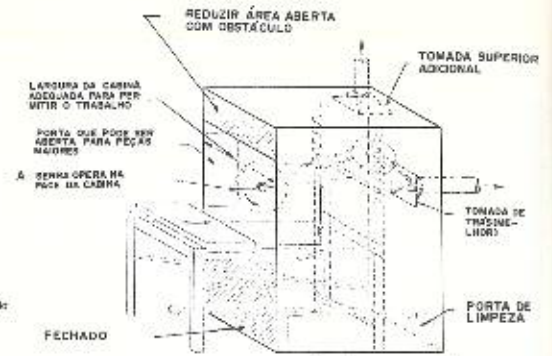
AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
ENCHIMENTO DE BARRIS	
DATA	1-64 VS-303

* VELOCIDADE (CORREIA)	VOLUME	AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
< 200 pés/min	300 m³/mês. por 40 barris (temporal) 100 metros 50 m³/Ano. por pés de abertura	
> 200 pés/min	500 pés/min por pés de carga (temporal) 100 metros de 200 pés/min. por pés de abertura	DEPÓSITO E TREMONHA
		DATA
		1-64 VS-304

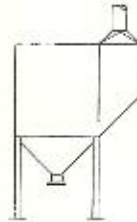




Sarner 60-100 pés/min. para cabos, até 100 pés/min. ou 100 pés/min. cruzado
 Mesa rotativa, 200 pés/min. por pé de abertura total (sem centros)
 Cilindros 20 frcos/wh.
 Pelo menos 500 pés/min. em qualquer abertura
 $\Delta P_p = 1,0$ VP; ou calculado pelas peças individuais



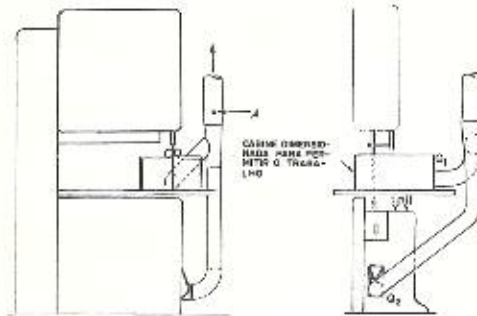
$Q = 250$ pés/min. por pé de área aberta da face
 $v = 3500$ pés/min. (máx.)
 $\Delta P_p = 0,50$ VP tomada reto
 $0,25$ VP tomada tronco-cônicado



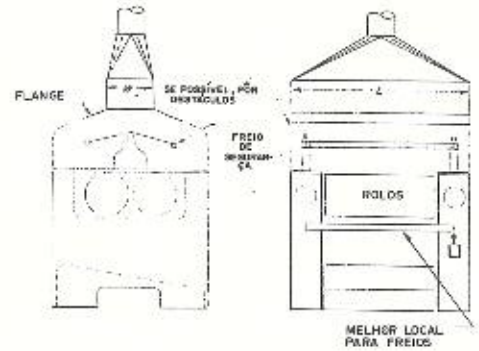
Em pequenas cabines, use plenum inferior para sedimentar particulares
 $\Delta P_p = 1,5$ VP

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
LIMPEZA ABRASIVA	
DATA 1-64	VS-101

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
CORTE ABRASIVO COM REBOLO	
DATA 1-64	VS-401



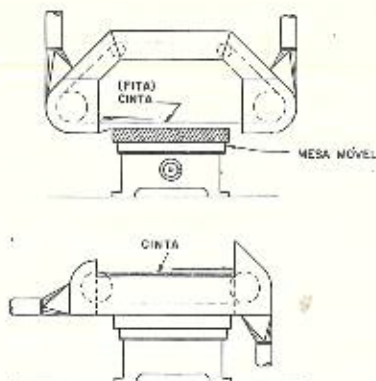
$Q = 225$ pés/min. por pé de área aberta
 $Q_2 = 350$ pés/min.
 $V_g = 4000$ pés/min.
 $\Delta P_p = 1,75$ VP no ponto A



$Q = 125$ pés/min. por pé de área (1125 WL)
 $v = 1000 - 3000$ pés/min.
 $\Delta P_p = 0,25$ VP

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
SERRA METÁLICA	
DATA 1-70	VS-41B

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
CALANDRAS (BORRACHA)	
DATA 1-70	VS-902

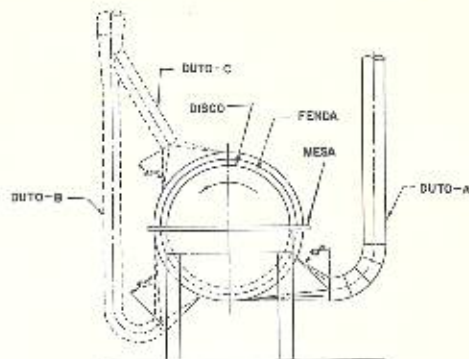


LIXADEIRA DE FITA (HORIZONTAL)

LARGURA DA FITA (POL)	VAZÃO PÉS ³ /MIN		
	FRENTE	CAUBA	TOTAL
até 6 incl.	400	350	750
6 a 8 incl.	550	350	900
9 a 16 incl.	800	440	1240
acima de 16 incl.	1100	550	1650

Vd = 3500 pés/min. Telescopiável
 DR = 0,40 VP PARA TOMADA

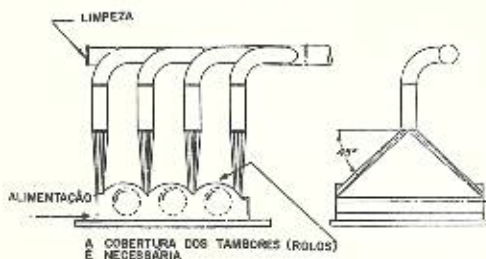
AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
 LIXADEIRA DE FITA (HORIZONTAL)
 DATA 1-64 VS-702



Ø DO DISCO (POL)	VAZÃO TOTAL PÉS ³ /MIN.	Nº DUTO
até 12	350	A
12 a 18	440	A
18 a 26	650	A
26 a 32	750	A-B
32 a 38	900	A-B
38 a 48	1250	A-B-C

Ø DOS TRAMOS NA BASE
 Ø UM TRAMO NO TOPO E DOIS NA BASE
 Vd = 3500 pés/min
 DR = DEPENDE DO PROJETO CAPTOR 1,0 VP + 0,25 VP

AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
 LIXADEIRA DE DISCO
 DATA 1-64 VS-703

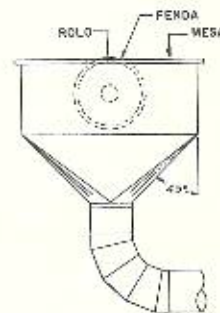


VOLUMES

COMPRIMENTO DO TAMBOR (POL)	VAZÃO TOTAL (PÉS ³ /MIN)
até 31"	550
31" a 49"	785
49" a 67"	1100
acima de 67"	1400
NOTAS	550 pés/min no eixo

Uma tomada/tambor, é interessante uma tomada na alimentação.
 Vd = 3500 pés/min
 DR = 0,25

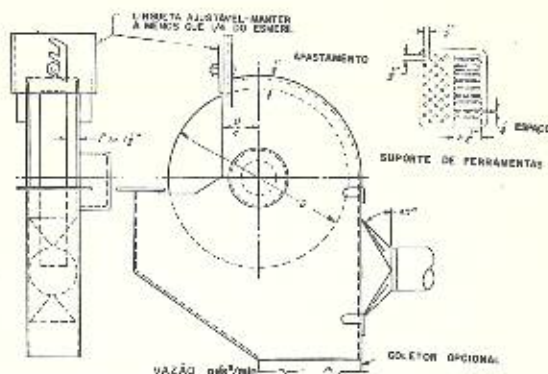
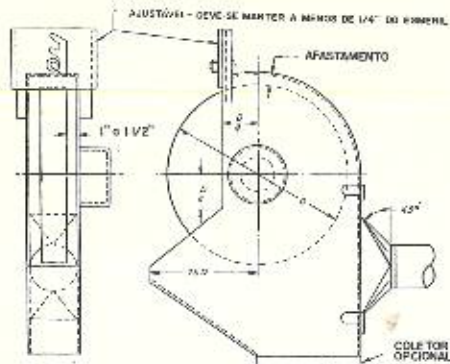
AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
 LIXADEIRA DE ROLOS (VÁRIOS)
 DATA 1-64 VS-704



SUPERFÍCIE DO ROLO (POL ²)	EXAUSTÃO PÉS ³ /MIN
até 200 (a menos de 20" Ø)	350
200 a 400 incl.	550
400 a 700 incl.	785
700 a 1400 incl.	1100
1400 a 2400 incl.	1400

Vd = 3500 pés/min
 DR = DEPENDE DO PROJETO DO CAPTOR 1,78 VP + 0,25 VP

AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
 LIXADEIRA DE ROLO (UM SÓ)
 DATA 1-64 VS-705



VAZÃO pés³/min

Ø ESMERIL (POL.)	LARGURA ESMERIL (POL.)	SEM-ENCLAUSURADO	MIL-ENCLAUSURADO
5 x 5	1	220	220
5 x 10	1/2	220	300
10 x 14	2	300	500
14 x 16	2	390	610
16 x 20	3	500	740
20 x 24	4	610	880
24 x 30	5	880	1200
30 x 36	6	1200	1570

Não mais que 25% do campo espaço $\Delta R_p = 0,25$ VP tomado reto
 Mínimo $V_{min} = 4500$ pés³/min (tramo) $0,40$ VP tomado tronco-piramidal
 3500 pés³/min (pirâmide)

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

ESMERIL VELOCIDADE 6.500 rpm

DATA 1-72 VS-411

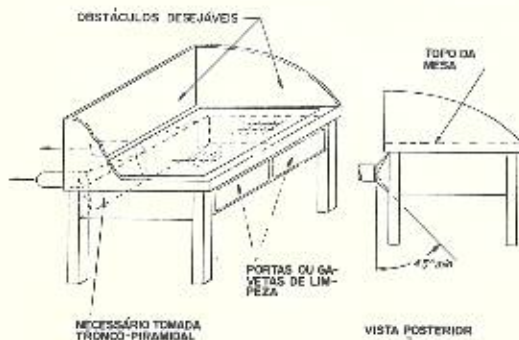
Ø DA RODA (P.O.L.)	LARGURA (P.O.L.)	SEM-ENCLAUSURADO	MIL-ENCLAUSURADO
5 x 5	1	220	220
5 x 10	1/2	220	300
10 x 14	2	300	500
14 x 16	2	390	610
16 x 20	3	500	740
20 x 24	4	610	880
24 x 30	5	880	1200
30 x 36	6	1200	1570

collet especial $\Delta R_p = 0,25$ VP tomado reto
 Vel. máx. no duto = 4500 pés³/min (tramo) $0,40$ VP tomado tronco-piramidal
 3500 pés³/min (pirâmide)

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

ESMERIL VELOCIDADE > 6.500 rpm

DATA 1-72 VS-411.1

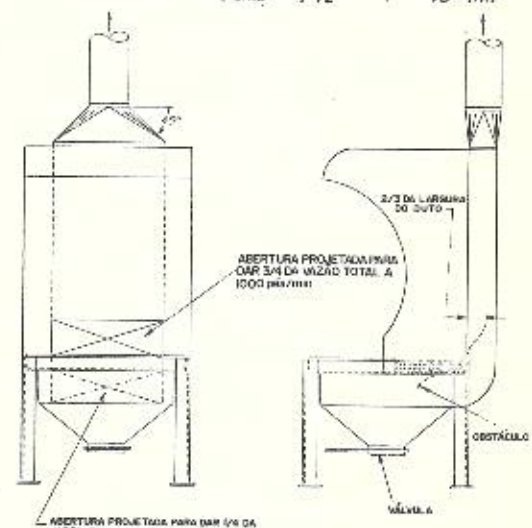


$Q = 150 - 250$ pés³/min por pé² de área da mesa
 Velocidade mínima no duto 3.500 pés³/min.
 $\Delta R_p = 0,25$ VP tomado tronco-piramidal
 Esmerilhamento em cabine $V = 100$ pés/min.
 Para grão no piso, $Q = 100$ pés³/min por pé² de área de trabalho
 Deve-se providenciar distribuição homogênea

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

ESMERIL MANUAL

DATA 1-66 VS-412



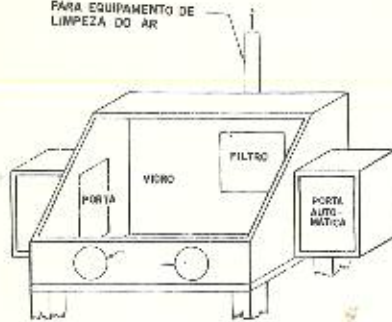
$Q = 150$ pés³/min por pé² de área da mesa captar
 Vel. 3.500 pés³/min
 $\Delta R_p = 0,25$ VP

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS

MESA PORTÁTIL DE RASAGEM E ESMERILHAMENTO

DATA 1-66 VS-413

PARA EQUIPAMENTO DE LIMPEZA DO AR

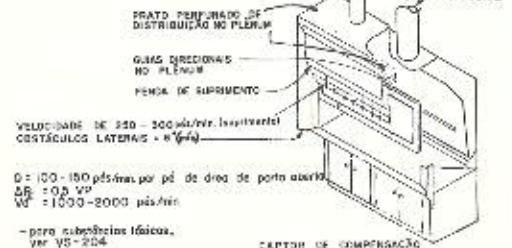
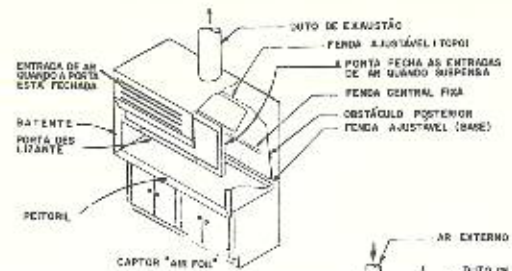


Q = 50 pés/mín. por pé² de área de porta aberta e 0,25" SP em sistemas fechados
 ΔP = 0,50 VP
 W = 2000 - 4000 pés/mín.

FILTROS:

1. Filtros de entrada nas portas
2. Filtro na entrada do exaustor
3. Filtro na saída do exaustor

- Tanto em vista e parâmetros dos materiais, cuidados especiais são necessários.

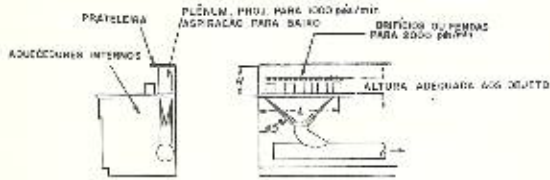


Q = 100 - 150 pés/mín. por pé de área de porta aberta
 ΔP = 0,25 VP
 W = 1000 - 2000 pés/mín.

- para substituições técnicas, ver VS-204

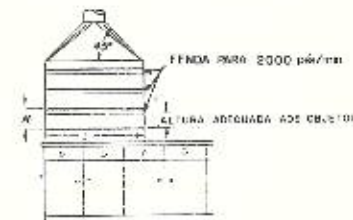
- para saída periódica, ver nota de suplemento: seção de 50% no topo de exaustão, ver VS-204

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
 CAIXA PARA TRABALHO COM MATERIAL RADIOATIVO OU ALTAMENTE TÓXICO
 DATA 1-66 VS-202



BANCADA DE EVAPORAÇÃO

Q = 50 pés/mín. por pé linear de capor ou BOM.
 W = 2000 pés/mín.
 ΔP = 1,78 VP ± 0,25 VP

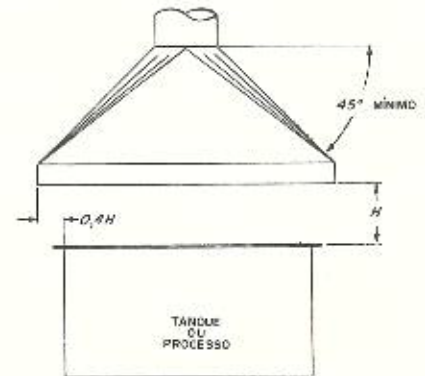


CAPTOR DE EVAPORAÇÃO

Q = 20 pés/mín. por pé
 pés/mín. por pé linear de prateleira (50 H.L.) para caso problema
 W = 2000 pés/mín.
 ΔP = 1,78 VP ± 0,25 VP

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
 CAPTORES ESPECIAIS LABORATÓRIO
 DATA 1-68 VS-206

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
 CAPTOR DE LABORATÓRIO
 DATA 1-72 VS-203

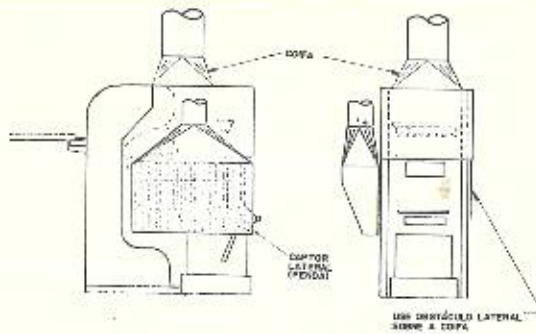


Não deve ser usado quando o material for tóxico e/ou o operador se incline sobre o tanque. No caso de correntes cruzadas, deve-se usar correntes laterais.

- Q = 4 PHV Para cofas abertas
- P = Perímetro do tanque, pés
- V = 50 - 500 pés/mín.
- Q = W + LHV Para cofas laterais fechadas
- W = L, 200 as dimensões das laterais abertas
- V = 50 - 500 pés/mín.
- Q = WHV ou LHV Para cofas laterais fechadas
- V = 50 - 500 pés/mín.

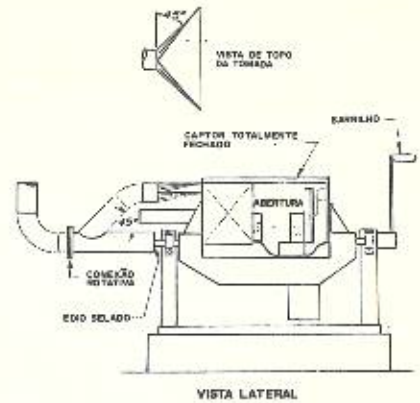
ΔP = 0,25 VP
 W = 1000 - 3000 pés/mín.

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
 COFAS
 DATA 1-70 VS-903



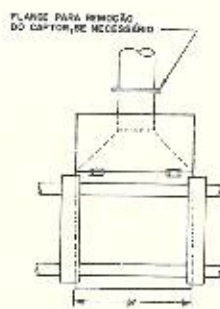
$Q = 250 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pe^2 de caixa (1 unidade);
 $150 \text{ pés}^3/\text{min}$ por pe^2 de caixa (2 unidades);
 $\Delta P_s = 0,25 \text{ VP}$ para inclinação trunco-piramidal;
 A fenda lateral é para aspiração de fumaça (resina).
 Velocidade de captura mínima: $75 \text{ pés}/\text{min}$.
 $Q = 75(10x + \text{área da caixa})$
 $\Delta P_s = 1,78 \text{ VP}_s + 0,25 \text{ VP}_d$
 Transportadoras ou áreas de refinamento requerem ventilação para peças grandes. Transportador de suca pode necessitar ventilação.

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
"SHELL MOLDING"	
DATA 1-70	VS-114

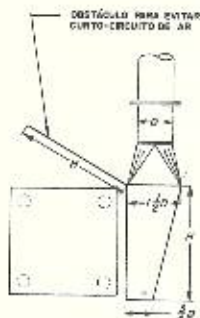


$Q = 200 \text{ pés}^3/\text{min}$ por face aberta
 $V_d = 3500 \text{ pés}/\text{min}$ máximo
 $\Delta P_s = 0,25 \text{ VP}_d$

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
MÁQUINA DE FAZER MACHOS	
DATA 1-70	VS-115



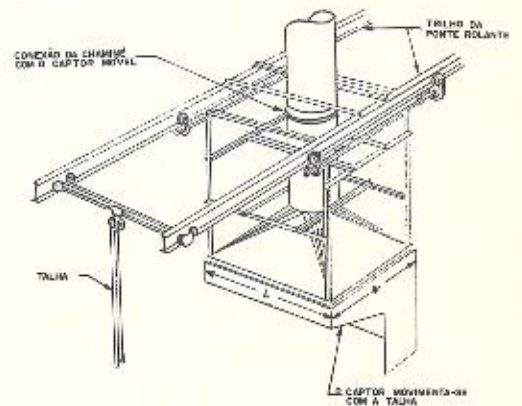
NOTA: Colocar o captor o mais próximo possível da máquina. Se distar mais de 4" da parte de trás da máquina, usar obstáculos.



NOTA: Computar, se necessário, produtos de combustão.

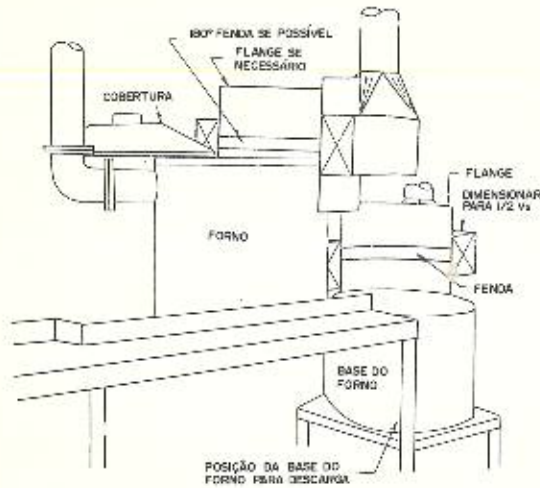
$Q = 300 \text{ m}^3/\text{h}$
 $\Delta P_s = 0,25 \text{ VP}_d$
 $V_d = 2.500 - 3000 \text{ pés}/\text{min}$

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
FUNDAÇÃO SOB PRESSÃO	
DATA 1-70	VS-904



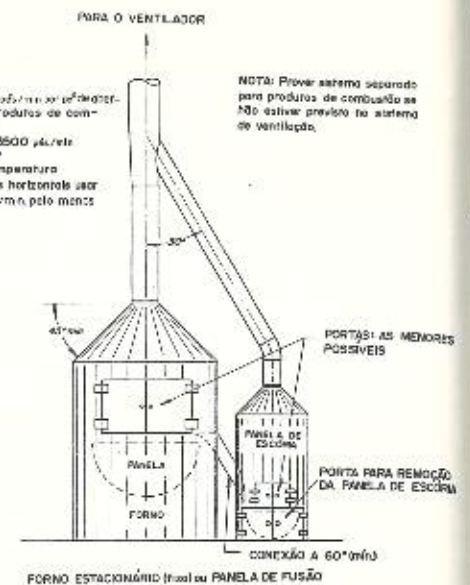
$Q = 500 \text{ m}^3/\text{h}$
 $V_d = 1000 - 3000 \text{ pés}/\text{min}$
 $\Delta P_s = 0,25 \text{ VP}_d$

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
FUNDAÇÃO SOB PRESSÃO OU FORNO DE FUSÃO	
DATA 1-70	VS-905

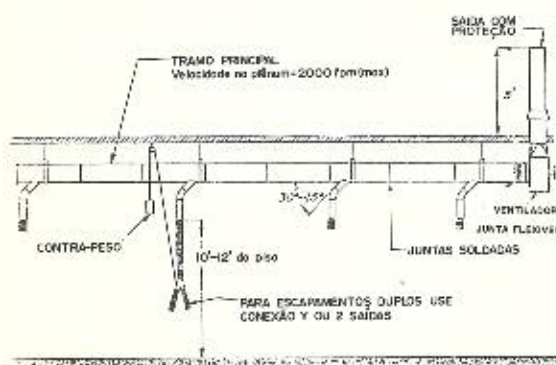


Q=175 pés/min. por pé² de topo do forno para fenda curva e flanges
 Vel 2000 pés/min.
 Vs= 3500 pés/min.
 ΔP = 1,78 VP=4-0,25 VP

AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
**FORNO CADINHO PARA FUSÃO
 DE MATERIAL MUITO TÓXICO**
 DATA 1-64 VS-201



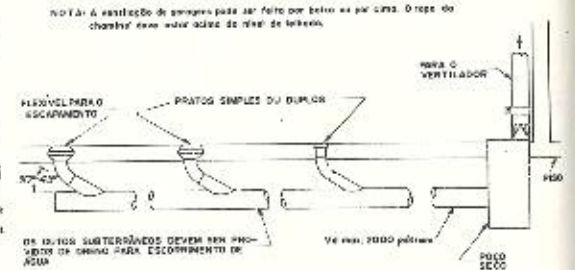
AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
**PANELA DE FUSÃO DO FORNO
 NÃO-BASCULANTE**
 DATA 1-70 VS-906



POTÊNCIA DO VEÍCULO	pés ² /min. por VEÍCULO	Ø DUTO FLEXÍVEL	CONEXÃO (TRAMO)
até 200HP	100	3"	4"
Maio de 200HP	200	4"	4"
Diesel	400	4 1/2"	6"

Em reses com diâmetro:
 - carros e caminhões leves = 2x o nível doabela
 - caminhões pesados = 1200 pés/min. (mínimo)
 Para perda de carga no flexível, consulte o fabricante.

AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
**VENTILAÇÃO SUPERIOR DE
 GARAGENS DE SERVIÇO**
 DATA 1-68 VS-907



SISTEMA SUBTERRÂNEO
 VEZES REQUERIDAS*

TIPO	pés/min. por VEÍCULO	Ø FLEXÍVEL (mín.)
Autos e caminhões até 200HP	100	3"
Autos e caminhões acima de 200HP	200	4"
Diesel	400	4 1/2"

* em diâmetro de reses
 - carros e pequenos caminhões = 2x a velocidade
 - caminhões grandes = 1200 pés/min. (mínimo)
 48 pés/min. para 25' para carros com ventilador adequado, para perda de carga no flexível, consulte o fabricante.
 com veículos em movimento é necessário ventilação para 10000
 5.000 pés/min. por carro em movimento
 10.000 pés/min. por caminhão
 100 pés/min. HP para Diesel
 Para aterramento, ver tabela B

AMERICAN CONFERENCE OF
 GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS
**VENTILAÇÃO SUBTERRÂNEA DE
 GARAGENS DE SERVIÇO**
 DATA 1-70 VS-908

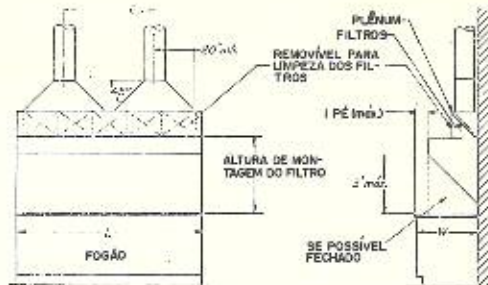


CAPTOR CONTRA PAREDE
 $Q = 80$ pés/min por pé de área do captor (80/WL) $P = 2W + 2L =$
 Não menos de 50 cm/pé² de face (50PH) PERIFILTRO
 $Vd = 1000 - 4000$ pés/min
 $\Delta P = 0,25$ (filtro) + 0,50 VPd



CAPTOR TIPO ILHA
 $Q = 125$ pés/min por pé de área do captor (125/WL)
 Não menos de 50 cm/pé² de face (50PH)
 $Vd = 1000 - 4000$ pés/min
 $\Delta P = 0,25$ (filtro) + 0,50 VPd

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
CAPTOR DE COZINHA	
DATA	1-72 VS-910



CAPTOR DE PAREDE
 $Q = 200$ pés/min. por pé² de superfície de cozimento (200/L)
 $Vd = 1000 - 4000$ pés/min
 $\Delta P = 0,25$ (filtro) + 0,25 VPd

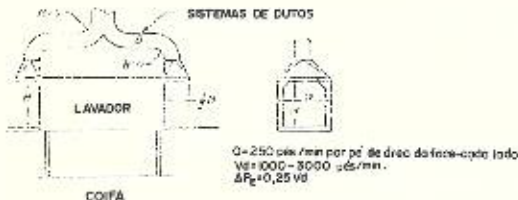
FILTROS

1. Selecionar o tamanho adequado
2. Determinar o número de filtros a partir dos dados do fabricante
3. instalar a 45° - 60° (nunca horizontal)
4. altura (posiç) do filtro a contar da parte mais baixa
 - a. cozimento sem chama exposta 2 1/2" (mínimo)
 - b. carvão e similares 4 1/2" (mínimo)
 - c. outros com chama exposta 3 1/2" (mínimo)
5. Proteger de calor radiante com barreiras
6. Prover um recipiente para receber pingos de gordura
7. Fazer limpeza regularmente

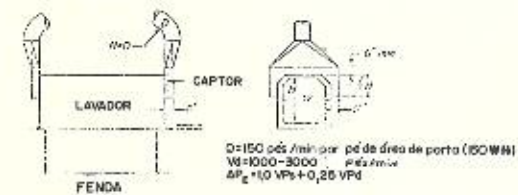
VENTILADORES

1. Selecionar o ventilador em função de perda de carga total (filtro + duto)
2. Especificá-lo para temperatura de trabalho.

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
CAPTOR PARA FOGÃO	
DATA	1-74 VS-911



SISTEMAS DE DUTOS
 $Q = 250$ pés/min por pé de área do face-cabo lado
 $Vd = 1000 - 3000$ pés/min
 $\Delta P = 0,25$ VPd



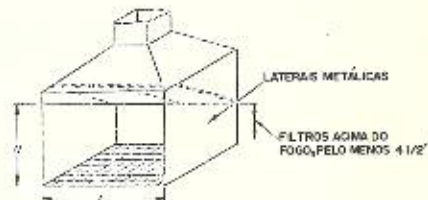
CAPTOR
 $Q = 150$ pés/min por pé de área da porta (150/WL)
 $Vd = 1000 - 3000$ pés/min
 $\Delta P = 1,0$ VPd + 0,25 VPd



CURTINAS (no vestibulo)
 $Q = 150$ pés/min por pé de área de entrada e saída
 $Vd = 1000 - 3000$ pés/min
 $\Delta P = 0,50$ VPd

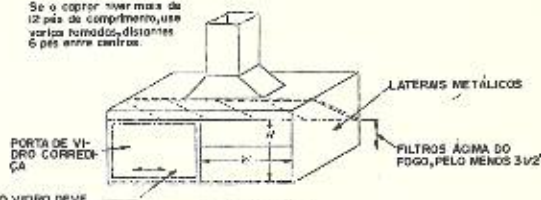
NOTA: Se estabelecer conexões para exaustão no corpo do lavador, tapar e usar aspirador externo.

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
LAVADORES DE PRATOS	
DATA	1-70 VS-912



GRELHA - CARVÃO
 $Q = 100$ LH
 $Vd = 1000 - 3000$ pés/min
 $\Delta P = 0,25$ (filtro) + 0,25 VPd

Se o captor tiver mais de 12 pés de comprimento, use varais removíveis distantes 6 pés entre centros.



O VIDRO DEVE SER PNEU

CHURRASQUEIRA
 $Q = 100$ WH (para máx. abertura)
 $Vd = 1000 - 3000$ pés/min
 $\Delta P = 0,25$ (filtro) + 0,25 VPd

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS	
GRELHA E CHURRASQUEIRA	
DATA	1-70 VS-913

7 ESCOLHA DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE

INTRODUÇÃO

Os poluentes exauridos do ambiente de trabalho devem algumas vezes ser coletados para evitar sua emissão para a atmosfera, criando problemas de poluição do ar. A coleta do poluente pode ser feita por uma série de equipamentos projetados especificamente para esse fim. A escolha do equipamento de controle que melhor cumprirá sua função de coleta do poluente nem sempre é um problema de simples solução, tendo-se em vista o número de fatores intervenientes. Esses fatores não têm todos a mesma importância, sendo alguns deles de importância fundamental na escolha do equipamento. Quase todos os tipos de mecanismos, tanto para coleta de material particulado quanto para coleta de gases e vapores, podem ser encontrados no item referente a aerodispersóides, gases e vapores.

No início deste capítulo serão apenas abordados alguns aspectos relativos à escolha de equipamentos de controle em função dos fatores intervenientes. A seguir, uma análise mais detalhada dos diversos tipos de equipamento de controle é feita.

De uma forma geral, pode-se dizer que a escolha depende de fatores relativos às propriedades do contaminante, relativos às propriedades do gás carreador e relativos a aspectos econômicos e práticos. Há que se considerar na escolha de equipamentos de controle, vários fatores, como segue.

Estado físico do poluente

Para coleta de gases e vapores, os equipamentos de controle mais usualmente utilizados são as torres de absorção, os leitos de adsorção, os condensadores e os incineradores. A coleta de material particulado, sólido ou líquido, é em geral feita com coletores inerciais, coletores centrífugos, lavadores, filtros e precipitadores eletrostáticos.

Grau de limpeza desejado

A eficiência de coleta fixada em função dos regulamentos limitantes da quantidade do poluente que pode ser emitida é um dos fatores importantes a ser considerado. Como veremos posteriormente, a eficiência dos equipamentos de controle dependem de várias propriedades do poluente e do gás carreador, e a escolha deve ser feita em função do que é requerido em termos de eficiência.

Propriedades do gás carreador

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Só é importante quando afeta as propriedades físicas e químicas do gás carreador. As propriedades químicas são importantes quando há a possibilidade de haver reações químicas entre o gás carreador, o contaminante e o coletor.

TEMPERATURA

As principais influências da temperatura são sobre volume do gás carreador e efeitos sobre os materiais de construção do coletor. O volume tem consequências sobre o tamanho do coletor que, dessa forma, provocará alteração no custo do equipamento. A temperatura também afetará a viscosidade e a densidade, que, por sua vez, afetará o rendimento de coleta. Assim, adsorção é impraticável a altas temperaturas, e a solubilidade de gases (absorção) é variável com a temperatura. A resistividade elétrica de partículas varia com a temperatura, e é uma importante propriedade na precipitação elétrica de partículas. Coletores úmidos algumas vezes não podem ser utilizados devido à grande quantidade de água que se evapora, e filtros podem ser danificados pela passagem de gases excessivamente quentes.

VISCOSIDADE

As principais influências da viscosidade se relacionam com o aumento da potência requerida com o aumento da viscosidade, e com a alteração que provocará na eficiência de coleta de material particulado.

UMIDADE

Alta umidade contribui para empastamento das partículas sobre o coletor, principalmente coletores inerciais e centrífugos, e filtros, provocando seu entupimento. Pode, ainda, agravar problemas de corrosão, além de ter grande influência sobre a resistividade elétrica das partículas e, portanto, em sua precipitação eletrostática. Em adsorção, pode agir como fator limitante da capacidade do leito se este adsorver vapor d'água.

COMBUSTIVIDADE

Quando o gás carreador é inflamável ou explosivo, algumas precauções especiais devem ser tomadas. A principal precaução é assegurar que se esteja acima do limite superior de explosividade ou abaixo do limite inferior de explosividade da mistura. Nesses casos, lavadores são preferidos e precipitadores eletrostáticos raramente usados.

REATIVIDADE QUÍMICA

É importante em alguns casos como, por exemplo, quando se filtra um gás contendo compostos de flúor com filtros de lã de vidro, danificando os mesmos. Em geral, deve-se evitar que haja reação entre o gás e o coletor, de forma a danificar o mesmo.

PROPRIEDADES ELÉTRICAS

São importantes quando se trata da coleta de partículas com precipitador eletrostático, pois a maior ou menor facilidade de ionização do gás influencia o mecanismo básico de coleta.

Outros fatores, como pressão, densidade, toxicidade, etc., são, em geral, de menor importância e não serão aqui abordados.

Propriedades do contaminante

CARGA

A carga, ou concentração do poluente, na entrada do equipamento de controle, e suas variações afetam diferentemente os vários tipos de coletores. Assim é que a eficiência de coleta de ciclones aumenta com a carga, mas aumenta também a possibilidade de entupimento do mesmo. Alguns equipamentos exigem mesmo a presença de pré-coletores para evitar sobrecarga em sua operação.

SOLUBILIDADE

É importante em absorvedores e lavadores em geral, pois, em geral, quanto maior a solubilidade do poluente, maior o rendimento de coleta.

CAPACIDADE ADSORTIVA

Importante em adsorção de gases e vapores. De uma forma geral, só se recomenda esse tipo de coletor para gases e vapores com massa molecular superior a 45 e, principalmente, na retenção de solventes e substâncias odoríferas.

COMBUSTIVIDADE

Importante se se pretende a eliminação do poluente por incineração, sendo também um fator a considerar para evitar riscos de explosão.

REATIVIDADE QUÍMICA

A reatividade química constitui-se num fator que pode ser utilizado na coleta do contaminante, por exemplo, na absorção química. Contudo pode também criar problemas quando, por exemplo, o contaminante reage com o material de construção do corpo coletor, danificando-o.

PROPRIEDADES ELÉTRICAS

A resistividade elétrica de partículas tem uma influência decisiva em sua coleta, nos precipitadores eletrostáticos. Partículas com altíssima, ou baixíssima, resistividade apresentam dificuldades de coleta em precipitadores.

HIGROSCOPICIDADE

É importante por influir na possibilidade de entupimento (principalmente coletores inerciais, centrífugos e filtros) por formação de pasta devido à absorção de umidade pelas partículas.

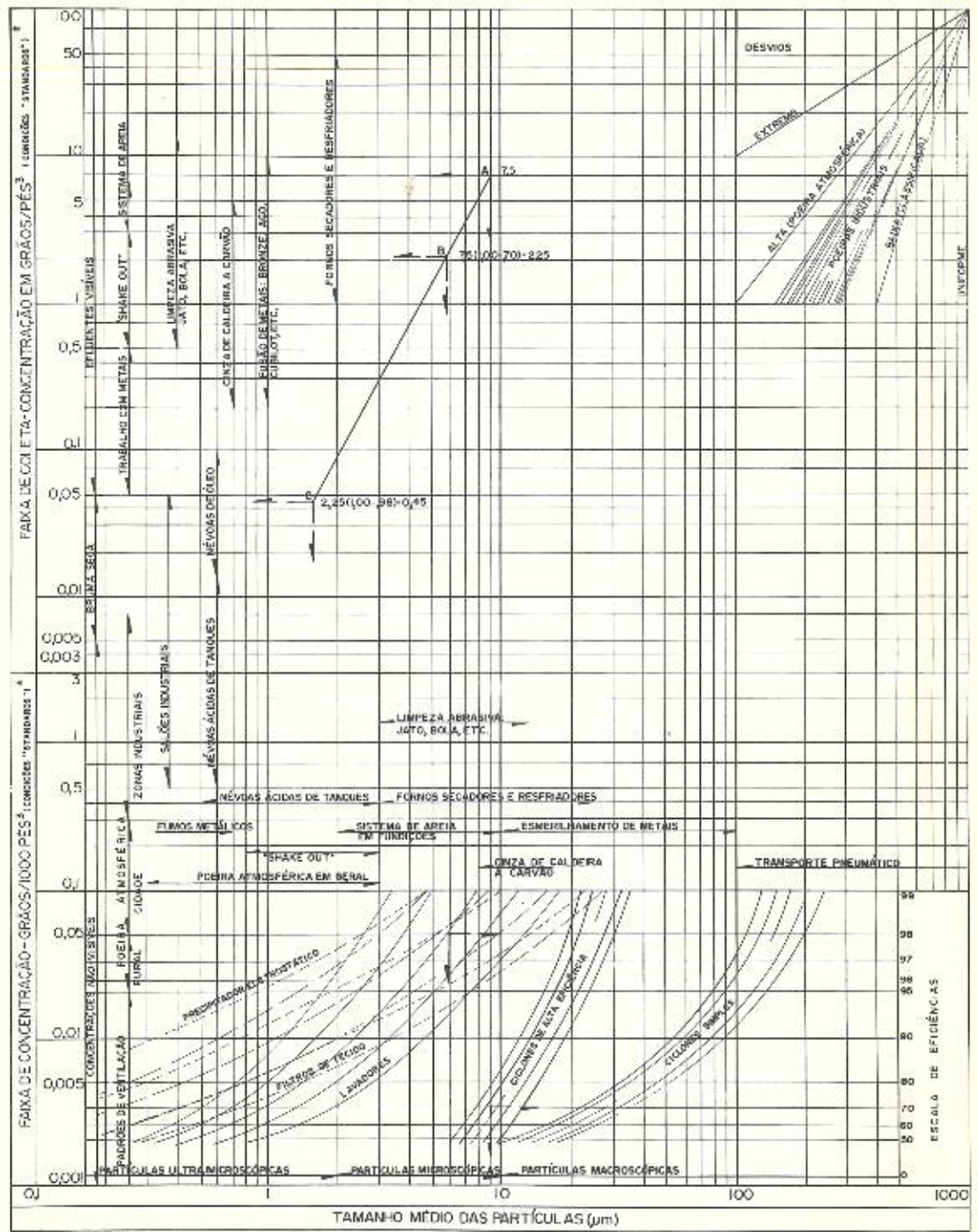
TABELA 7.1 Coletores recomendados para diversas operações industriais

Operações	Tipo de carga	Granulometria	Ciclones	Coletores úmidos e lavadores de gases			Precipitadores eletrostáticos
				Multiciclones	Filtros	Filtros de fibra de vidro	
Produtos químicos em grãos							
Manipulação	Leve a forte	Fina a grossa	Eventualmente	Frequente	Habitualmente	Não	Não
Moagem	Moderada a forte	Fina a grossa	Eventualmente	Frequente	Habitualmente	Não	Não
Pesagem e peneiramento	Leve a moderada	Fina a média	Não	Não	Frequente	Não	Não
Caldeirões							
Secadores e resfriadores	Forte	Média a grossa	Eventualmente	Frequente	Habitualmente	Eventualmente	Não
Ventilação de silos	Leve	Fina a média	Não	Raro	Eventualmente	Não	Não
Minas de carvão e centrais de forças							
Manipulação	Moderada	Média	Eventualmente	Eventualmente	Habitualmente	Não	Não
Ventilação de carvoeiras	Forte	Fina	Não	Raro	Frequente	Não	Não
Serra							
Serradores pneumáticos	Moderada	Média a grossa	Raro	Raro	Habitualmente	Eventualmente	Não
Secagem	Forte	Fina	Eventualmente	Raro	Habitualmente	Não	Eventualmente
Caldeiras							
Carvão, grelha metálica	Leve	Fina	Raro	Habitualmente	Não	Não	Não
Pulverizado	Forte	Fina	Raro	Eventualmente	Não	Eventualmente	Habitualmente
Madeira	Variável	Grossa	Frequente	Eventualmente	Não	Não	Não
Fundição, siderurgia e trabalhos em metais							
Limpeza por abrasão	Moderada a fina	Fina a média	Não	Eventualmente	Habitualmente	Não	Não
Rebolos fixos e pendulares	Moderada	Média a grossa	Frequente	Eventualmente	Eventualmente	Não	Não
Desmoldagem	Leve a média	Fina	Não	Eventualmente	Frequente	Não	Não
Limpeza com areia	Moderada	Fina a média	Não	Eventualmente	Habitualmente	Não	Não
Tambor giratório para limpeza	Forte	Média a grossa	Não	Eventualmente	Habitualmente	Não	Não
Forno elétrico	Leve	Fina	Não	Não	Eventualmente	Frequente	Raro
Cubilot	Moderada	Variável	Não	Eventualmente	Eventualmente	Eventualmente	Raro
Fusão de não-ferrosos	Variável	Fina	Não	Não	Eventualmente	Eventualmente	Não

Conversores	Moderada	Muito fina	Não	Não	Eventualmente	Eventualmente	Eventualmente	Frequente
Forno Siemens-Martin	Leve	Leve	Não	Não	Eventualmente	Não	Raro	Frequente
Limpeza	Moderada	Fina	Não	Não	Eventualmente	Raro	Raro	Frequente
Decapagem	Moderada	—	Não	Não	Habitual (lavador)	Habitual	Não	Não
Fornos de aglomeração Auxiliares de aglomeração	Moderada a forte	Fina a média	Eventualmente	Eventualmente	Eventualmente	Raro	Raro	Raro
	Moderada a forte	Fina a média	Não	Eventualmente	Habitualmente	Raro	Não	Raro
Mínus e extração a céu aberto								
Manipulação	Moderada	Fina a grossa	Eventualmente	Frequente	Habitualmente	Habitualmente	Frequente	Não
Moagem e peneiramento	Forte	Média	Raro	Frequente	Habitualmente	Frequente	Frequente	Não
Secadores	Moderada a forte	Média a grossa	Raro	Frequente	Habitualmente	Não	Não	Não
Dispositivos de resfriamento	Moderada	Grossa	Raro	Frequente	Eventualmente	Frequente	Não	Não
Cerâmica								
Manipulação	Leve	Fina	Raro	Raro	Frequente	Frequente	Frequente	Não
Rebarbação e moagem	Moderada a forte	Fina a média	Não	Não	Frequente	Eventualmente	Não	Não
Cimentaria								
Trituração	Forte	Fina a média	Não	Não	Habitualmente	Habitualmente	Não	Não
Tratamento do cru	Moderada	Média	Eventualmente	Não	Frequente	Raro	Não	Não
Dispositivo de resfriamento	Moderada	Média a forte	Não	Frequente	Não	Não	Não	Não
Secadores	Forte	Fina a média	Raro	Não	Não	Não	Não	Frequente
Cereais								
Manipulação de grãos								
Manipulação de fertilizantes	Leve	Média	Frequente	Raro	Não	Habitualmente	Não	Não
Produtos farmacêuticos	Moderada	Média	Raro	Não	Habitualmente	Habitualmente	Não	Não

TABELA 7.1 (Continuação)

Operações	Teor de carga	Granulometria	Ciclones	Multiciclones	Coletores úmidos e lavadores de gases	Filtros	Filtros de fibra de vidro	Precipitadores eletrostáticos
Mistura, moagem e pesagem	Leve	Média	Raro	Frequente	Frequente	Frequente	Não	Não
Pressagem	Variável	Fina a média	Não	Não	Habitual	Frequente	Não	Não
Indústria de borracha								
Misturadores Banbury	Moderada	Fina	Não	Não	Eventualmente	Habitualmente	Não	Não
Talagem	Moderada	Média	Não	Não	Eventualmente	Frequente	Não	Não
Moagem	Moderada	Grossa	Habitualmente	Não	Frequente	Eventualmente	Não	Não
Forno de curvêo	Moderada	Grossa	Não	Não	Raro	Eventualmente	Habitualmente	Não
Trabalho em madeira								
Serra	Moderada	Variável	Habitualmente	Não	Não	Eventualmente	Não	Não
Lixamento	Moderada	Fina	Eventualmente	Não	Frequente	Eventualmente	Não	Não
Resíduos	Forte	Variável	Habitualmente	Não	Não	Raro	Não	Não
Diversas								
Vapores ácidos	Leve	—	Não	Não	Habitualmente (lavador)	Não	Não	Não
Decapagem ácida	Moderada	—	Não	Não	Habitualmente	Não	Não	Não
Fabricação de lonas de freio	Forte	Média	Eventualmente	Raro	Eventualmente	Eventualmente	Não	Não
Algodão	Leve	Média	Habitualmente	Não	Não	Raro	Não	Não
Acumuladores elétricos	Leve	Fina a média	Não	Não	Habitualmente	Frequente	Não	Não
Tratamento superficial do couro	Moderada	Média	Eventualmente	Não	Raro	Eventualmente	Não	Não
Corte de papel	Moderada	Média	Frequente	Raro	Não	Eventualmente	Não	Não
Plásticos								
Manipulação	Moderada	Métua	Eventualmente	Eventualmente	Frequente	Frequente	Não	Não
Acabamento	Leve	Fina a média	Frequente	Não	Eventualmente	Frequente	Não	Não
Aplicar-pesagem, empacotamento	Leve	Fina a média	Não	Não	Frequente	Habitualmente	Não	Não
Granulador de açúcar	Moderada	Fina a média	Não	Não	Frequente	Não	Não	Não



* 20 °C e 1 atm

FIGURA 7.1 Carta de Sylvan

TAMANHO, FORMA E DENSIDADE DE PARTÍCULAS

Estes são fatores fundamentais por exercerem influência sobre a eficiência de coleta de partículas por quase todos os mecanismos utilizados na prática, podendo-se mesmo dizer que a variação da eficiência com o tamanho da partícula é um dos aspectos mais importantes a serem considerados na escolha do coletor. O equacionamento acurado desses fatores é complexo e trabalhoso, e simplificações têm sido feitas no sentido de tornar mais fácil e rápida a escolha de um equipamento para coleta de material particulado, levando-se em conta sua distribuição de tamanho. Uma das formas é através da Tab. 7.1, onde a teoria simplificada e os dados experimentais condensados permitem uma rápida porém preliminar escolha do equipamento.

No Cap. 4 a teoria de aerodispersóides encontra-se apresentada em detalhe, e sugere-se sua leitura antes de prosseguir neste capítulo. Outra possibilidade é escolher-se o equipamento com o auxílio da carta de Sylvan, apresentada na Fig. 7.1.

Tomemos um exemplo de utilização da carta de Sylvan: escolher o equipamento coletor para um forno de calcinação em que a concentração de poeira no efluente é 7,5 grãos/pé³ e o tamanho médio da partícula é 9 μm .

a) Com os valores dados, determina-se o ponto *A* na carta, cuja projeção vertical indica:

ciclone comum – rendimento inferior a 50%;

ciclone de alta eficiência – eficiência de 60 a 70%;

filtros de tecido, precipitadores eletrostáticos e coletores úmidos – eficiência em torno de 97%.

b) Escolhendo-se um ciclone de alta eficiência ($\eta = 70\%$) como pré-coletor, teremos concentração na saída = $7,5(1 - 0,7) = 2,25$ grãos/pé³.

c) Marcando essa concentração sobre a linha paralela à de poeiras industriais (canto direito superior da carta), obtemos o ponto *B*, cuja projeção vertical fornece:

o tamanho médio de partícula;

o ciclone de alta eficiência, inferior a 50%;

o coletor úmido, eficiência de 98%.

d) Escolhendo um coletor úmido, teremos

$$\text{concentração no efluente} = 2,25(1 - 0,98) = 0,045 \text{ grãos/pé}^3.$$

e) A marcação desse valor sobre o prolongamento do segmento *AB* fornece o ponto *C*, cuja projeção vertical fornece o valor do tamanho médio de partícula no efluente (1,6 μm).

Custo do sistema

Finalmente, outro fator fundamental é o custo total do sistema, dado pela soma do custo de capital e do custo de operações. Estudos extensivos sobre o custo desses equipamentos têm sido realizados, e esses estudos têm sido resumidos, a fim de possibilitar uma análise mais rápida do problema. A Tab. 7.2 oferece dados para uma rápida observação dos custos envolvidos na utilização de alguns tipos de equipamentos de controle de poluentes.

TABELA 7.2 Comparações econômicas de vários sistemas coletores⁽¹⁾ (60.000 pés³/min; 68 °F; 5 grãos/pé³)

Equipamento	Eficiência, (%)	Custo capital		Perda de carga (pol de água)	Força (1.000 \$/ano)	Água recirculada (1.000 pé ³ /ano)	Custo de água (1.000\$/ano)	Manutenção (1.000\$/ano)	Custo total de operação (1.000\$/ano)	Taxas ⁽⁵⁾ (1.000\$/ano)	Custo total do sistema (1.000\$/ano)	Ccont ⁽⁶⁾ por 1.000 pé ³
		total ⁽²⁾ por 1.000 pé ³ /min	total ⁽³⁾ por 1.000 \$									
Ciclone simples	65,3	9,240	0,14	3,7	4,732	—	—	0,168	4,900	1,924	5,824	0,020
Ciclone de alta eficiência	84,2	17,640	0,28	4,9	6,328	—	—	0,168	6,496	1,764	8,260	0,029
Ciclone irrigado	91,0	21,840	0,36	3,9	5,634	4,0	1,848	0,420	7,932	2,184	10,116	0,034
Multiciclone	93,8	19,320	0,31	4,3	5,544	—	—	0,168	5,712	1,932	7,644	0,027
Precipitador eletrostático	94,1	85,960	1,43	0,6	1,736	—	—	0,700	2,436	8,596	11,032	0,038
Eletrostático irrigado	99,0	147,840	2,46	0,6	3,136	2,5	1,232	1,120	5,488	14,784	20,272	0,070
Filtro-manga convencional	99,9	49,280	0,81	4,0	5,264	—	—	8,940 ⁽³⁾	14,168	4,928	19,096	0,060
Filtro de manga com jato reverso	99,9	47,600	0,78	5,0	11,172	—	—	7,560 ⁽³⁾	18,732	4,700	23,432	0,082
Torre de "spray" gravitacional	96,3	51,240	0,84	1,4	6,650	18,0	9,240	0,840	16,730	5,124	21,854	0,075
Lavador úmido de impulsão	97,9	28,840	0,48	6,1	8,120	3,0	1,540	0,840	10,500	2,884	13,384	0,047
Lavador auto-induzido	93,5	24,360	0,42	6,1	7,896	0,6	0,308	0,560	8,764	2,436	11,200	0,038
Lavador venturi	99,7	42,000	0,70	22,0	29,596	7,0	3,388	0,840	33,824	4,200	38,024	0,128
Desintegradores	98,5	66,640	1,12	—	63,560	5,0	2,380	0,560	66,500	6,664	73,164	0,257

⁽¹⁾Inclui acessórios⁽²⁾Inclui uma troca total das mangas cada ano⁽³⁾Inclui uma troca total das mangas duas vezes ao ano⁽⁴⁾Supõe 8.000 h/ano de operação⁽⁵⁾10% do custo capital⁽⁶⁾Ccont = 0,01\$

Finalmente, a prévia experiência do engenheiro no campo e os conhecimentos prático e teórico desses equipamentos são fatores fundamentais para uma escolha adequada. Casos inusitados devem ser resolvidos por verdadeiros especialistas, a fim de evitar danos econômicos irreparáveis devido à escolha inadequada de um equipamento que, via de regra, após instalado, não terá qualquer outra utilização a não ser aquela para a qual foi projetado. Com o objetivo de auxiliar aqueles que ainda não adquiriram conhecimentos mais profundos sobre o assunto é que introduzimos os itens que se seguem.

EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE PARTÍCULAS

COLETORES GRAVITACIONAIS

Princípio de funcionamento

Esse tipo de equipamento de controle utiliza a deposição gravitacional das partículas carregadas pelo fluxo gasoso. Para tanto, é necessário que a velocidade do gás seja substancialmente reduzida, para possibilitar a deposição das partículas dentro da câmara. Na Fig. 7.2, pode-se observar uma esquematização de uma chamada câmara gravitacional.

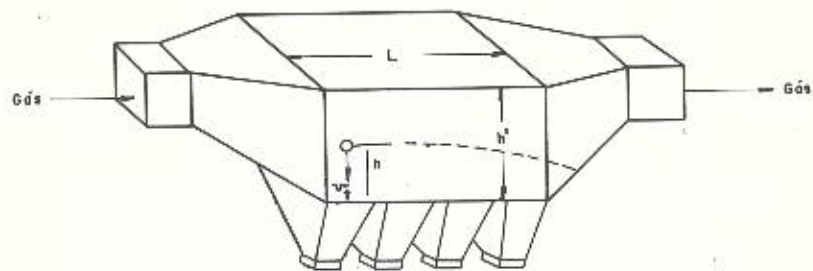


FIGURA 7.2 Esquema de uma câmara gravitacional

Através da relação seguinte, podem ser determinadas as dimensões de uma câmara de sedimentação. A velocidade de passagem recomendada (v_a) é da ordem de 10 pés/s. A velocidade de sedimentação está representada por v_s :

$$\frac{L}{v_a} = \frac{h'}{v_s}$$

Fixa-se uma dimensão e calcula-se a outra.

Classificação

Há inúmeras maneiras de se classificarem as câmaras de sedimentação, de acordo com a forma, com a complexidade, com o tipo de partícula a coletar, etc. Estas classificações, no entanto, em nada auxiliam quando da elaboração do projeto ou da avaliação de sua eficiência. Vale apenas destacar a existência da chamada câmara de sedimentação tipo Howard onde uma série de bandejas são colocadas no interior da mesma para diminuir a altura de queda da partícula, aumentando, todavia, as dificuldades de limpeza.

Características gerais

EFICIÊNCIA DE COLETA

Câmaras de sedimentação são equipamentos de controle para coleta de material particulado de dimensões razoavelmente grandes para que eficiências elevadas sejam atingidas. Desde logo vale ressaltar que as equações apresentadas representam simplificações para o regime de Stokes, não levando também em conta a influência da velocidade do gás e da forma geométrica da partícula. Experimentos realizados com partículas de quartzo (não-esféricas) a uma velocidade de 1 pé/s revelaram valores, para a velocidade de sedimentação, 50% inferiores às calculadas pela lei de Stokes.

Relações práticas e teóricas têm sido desenvolvidas para estimar a eficiência (η) de coleta de câmaras gravitacionais. Entre elas podemos mencionar:

$$\eta = \frac{gd_p^2 Lb}{36\mu Q} \quad (7.1)$$

onde

- g = aceleração da gravidade,
- d_p = diâmetro da partícula,
- L = comprimento da câmara,
- b = largura da câmara,
- μ = viscosidade do gás carreador,
- Q = vazão dos gases.

Uma das formas mais comuns de se expressar a eficiência de coleta de uma câmara de sedimentação é através do cálculo do tamanho da partícula captada com 100% de eficiência:

$$d_p(\text{min}) = \sqrt{\frac{18\mu h' v_a}{(\rho_p - \rho_g)gL}} \quad (7.2)$$

onde ρ_p é a densidade da partícula e ρ_g é a densidade do gás carreador. Essa equação é apenas teórica, e um tamanho de partícula rígida não pode ser obtido, principalmente devido a turbulências no fluxo.

PERDA DE CARGA

A perda de carga através de uma câmara gravitacional é baixa e, em geral, não representa um acréscimo ponderável à perda de carga total do sistema, podendo ser facilmente calculada através da soma das perdas de expansão, contração e perda no tramo reto correspondente ao comprimento da câmara.

Fatores que afetam a utilização e o rendimento de coleta

Como já foi dito anteriormente, a velocidade de passagem deve ser fixada de modo a permitir a sedimentação e a evitar a reentrada de partículas no fluxo. Além disso, essa velocidade não pode ser extremamente reduzida, por implicar valores excessivos nas dimensões da câmara, que, via de regra, representa um dos fatores limitantes na utilização desse equipamento de controle. No entanto o fator limitante mais importante para as câmaras gravitacionais é o tamanho das

partículas a serem coletadas, uma vez que, como já foi visto, para partículas inferiores a $50\ \mu\text{m}$, a eficiência cai sensivelmente.

Principais utilizações — vantagens e desvantagens

Os usos mais comuns de câmaras gravitacionais são como um pré-coletor em operações de refino de metais (para as partículas grossas), em indústrias alimentícias (cascas e películas), em caldeiras alimentadas a carvão (para coletar as cinzas carregadas), etc. As maiores vantagens estão relacionadas com o baixo custo, pequeno desgaste, pequena potência consumida, simplicidade de projeto, construção e instalação, e pelo fato de que pode ser utilizada com efluentes gasosos a altas temperaturas. Como já foi mencionado, os principais inconvenientes são a baixa eficiência para partículas pequenas e o grande espaço requerido.

COLETORES INERCIAIS

Princípio de funcionamento

Existem vários tipos. Um dos mais comumente utilizados é a chamada câmara de impactação. Faz-se o gás carreador das partículas "chocar-se" contra obstáculos, com mudanças bruscas de direção, após aumentar-se sua velocidade. Isso faz com que as partículas, com inércia, não evitem o choque, sejam impactadas e, em sua maioria, coletadas.

Características gerais

EFICIÊNCIA DE COLETA

A eficiência de coletores inerciais tem sido determinada experimentalmente, na maioria dos casos. A eficiência depende do número de obstáculos, da velocidade de impactação, do diâmetro da partícula, do ângulo da mudança de direção, da densidade da partícula e de outros fatores. De uma forma geral, pode-se dizer que esses coletores apresentam eficiências comparáveis às câmaras gravitacionais. Experimentos forneceram 95% de eficiência para gotas de $40\ \mu\text{m}$ impactadas com velocidades de 25 pés/min, provocando uma perda de carga de 1 a 2 pol de H_2O . Na Tab. 7.3 estão alguns dados de eficiência obtidos experimentalmente.

PERDA DE CARGA

Em câmaras inerciais, a perda de carga varia com o número de obstáculos e/ou com o número e o ângulo das mudanças de direção, velocidade do gás, material de construção, acabamento das superfícies, etc. De forma geral, pode-se dizer que a perda de carga varia de 1 a 3 pol de H_2O .

Fatores que afetam a utilização e o rendimento de coleta

Como no caso das câmaras gravitacionais, o tamanho das partículas e o espaço requerido são fatores limitantes. Em câmaras de impactação, a eficiência pode ser aumentada através do aumento do número de obstáculos. Também

TABELA 7.3 Eficiência de um coletor inercial

Tamanho partícula, μm	Carvão em pó, %	Cinza, %
> 200	0	2,08
120-200	1,84	7,08
90-120	2,92	14,88
75-90	6,48	5,28
60-75	13,52	10,08
< 60	75,24	60,60

	Velocidade na entrada, pés/s	Concentração, g/m^3	Eficiência, %
Carvão	24,2	34,9	74,3
	32,4	91,0	63,0
	39,8	23,4	47,0
Cinza	17,6	19,8	79,7
	28,6	21,1	70,5
	44,4	10,3	55,5

Observa-se que a eficiência cai com a velocidade. Isso se deve à turbulência criada, que provoca a reentrada das partículas no fluxo

nesse caso há que se considerar que a perda de carga excessiva limita o número de obstáculos a serem utilizados.

Principais utilizações — vantagens e desvantagens

Também os coletores inerciais são mais utilizados como pré-coletores para diminuir a carga de poeira de maior tamanho, para posterior coleta no coletor principal. Como nas câmaras gravitacionais, as inerciais são de baixo custo, geralmente simples de construir, consomem pouca potência e podem ser utilizadas para limpeza de efluentes a altas temperaturas. As desvantagens são o baixo rendimento para partículas pequenas e o grande espaço requerido. Em algumas instalações, as câmaras são providas com chuveiros de água para melhorar sua eficiência e para evitar a reentrada das partículas coletadas.

COLETORES SÔNICOS

Princípio de funcionamento

Apesar de o princípio de coleta desses equipamentos ter sido bastante promissor, eles não têm sido utilizados industrialmente e, com frequência, no campo de controle da poluição do ar. A coagulação sônica de partículas por si só não representa um equipamento de coleta, mas, sim, provoca a coagulação das partículas, aumentando seu tamanho e, portanto, possibilitando a retenção por meio de coletores convencionais.

Nos coletores sônicos, as partículas são aglomeradas pela passagem do gás através de uma coluna onde o gás é submetido a intensas ondas sonoras. Após a aglomeração, as partículas, ou melhor, os conjuntos de partículas aglomeradas, são coletadas por um ciclone ou por qualquer outro coletor convencional.

Classificação

A classificação mais usual de coletores sônicos é feita com relação ao método de produção das ondas sonoras. Os quatro principais métodos são:

- vibração de cristais e cerâmicas piezoelétricas (quartzo, turmalina e cerâmicas à base de titanato de bário);
- vibração de um cilindro;
- apitos (geradores estáticos);
- sirenes (geradores dinâmicos).

Os dois primeiros são geralmente usados em laboratório pelo fato de emitirem sons de alta-frequência, mas de intensidade não suficientemente elevada. Em escala industrial, os apitos e sirenes têm sido mais utilizados.

Características gerais

EFICIÊNCIA DE COLETA

A coleta de aerossóis por vibração sonora depende de uma série de parâmetros, como frequência e intensidade das ondas sonoras, grau de turbulência, tempo de residência, concentração de material particulado, etc. Industrialmente são encontradas frequências da ordem de 1 a 4 kHz. Para frequências superiores, há dificuldades de obtenção das grandes intensidades necessárias [superiores a 150 dB. O valor mínimo para se notar floculação é 130 dB (10^{-3} W/cm²)].

A concentração de partículas de 1 a 10 μ m deve ser superior a 1-2 grãos/Nm³, sendo 5 grãos/Nm³ considerado o valor mais adequado. Para concentrações muito elevadas (200 grãos/Nm³), há uma atenuação das ondas sonoras pelas partículas, com conseqüente perda de energia.

O tempo de exposição é um importante parâmetro, e encontram-se, em aplicações práticas, valores da ordem de 4 s. Para intensidades superiores a 170 dB, o tempo pode ser reduzido a 2 s.

O projeto de um aglomerador sônico é bastante simples. Velocidades do gás da ordem de 100 cm/s têm sido sugeridas como adequadas e, desse valor, pode-se calcular o diâmetro da torre.

PERDA DE CARGA

Um dado típico de perda de carga através de um coletor sônico é da ordem de 1,5 a 4,5 HP/1 000 pés³/min, o que representa aproximadamente de 6 a 12 pol de H₂O.

FATORES QUE AFETAM A UTILIZAÇÃO E O RENDIMENTO

Dentre os fatores limitantes ao uso de coletores sônicos, vale ressaltar o alto custo de operação e de manutenção, sendo o custo da instalação cerca de 15% menos dispendioso que o de um precipitador eletrostático de igual capa-

cidade. Já foi mencionado que fatores como intensidade e frequência do som, concentração de aerossóis e tempo de exposição influem na eficiência de coleta.

PRINCIPAIS UTILIZAÇÕES, VANTAGENS E DESVANTAGENS

As principais vantagens são a simplicidade do projeto e da instalação e a possibilidade de utilização a altas temperaturas e com gases corrosivos. Coletores sônicos têm sido utilizados para coleta de névoa de ácido sulfúrico com eficiência de 96 a 99,5%, dependendo do tempo de residência (0,6 a 3 s). Um dos fatores que tem limitado seu uso é a enorme energia necessária e o ruído.

Também negro-de-fumo tem sido aglomerado com intensidades de 155 dB e frequências de 3 a 4 kHz. Eficiências de 82% foram obtidas para concentrações de 8 a 10 g/Nm³ e tempo de residência de 4,5 s.

Finalmente, tem sido utilizado em fornos de fundição de ferro-gusa, para captação de óxido de zinco (78% de eficiência) e óxidos de chumbo (95 a 98%, 15 kHz).

PRECIPITADORES TÉRMICOS

Princípio de funcionamento

Assim como coagulação sônica, os precipitadores térmicos não têm sido utilizados largamente no campo industrial. Termoforese é o fenômeno pelo qual partículas sujeitas a um diferencial de temperatura migram da zona mais quente para a zona mais fria. A razão para a existência de forças térmicas sobre as partículas tem sido dada de acordo com o tamanho das partículas e como esse tamanho se compara com o espaço livre intermolecular. Essa comparação é feita através do chamado número de Knudsen (Kn).

$$Kn = \frac{\lambda}{r_p}, \quad (7.3)$$

onde λ é o espaço livre intermolecular e r_p o raio da partícula.

Para partículas muito pequenas ($Kn \gg 1$), a força térmica (F_t) é aplicada pelo impacto das moléculas do gás em movimento, para transmissão do calor para as zonas mais frias, valendo, segundo Epstein e Cawood,

$$F_t = -\frac{1}{2} \frac{\pi d_p^2}{4} \lambda P \frac{dT}{dX}, \quad (7.4)$$

sendo P a pressão do gás e dT/dX o gradiente térmico no gás.

Para partículas com tamanhos comparáveis ao espaço livre intermolecular e maiores ($Kn \leq 1$), a chamada teoria do rastejamento térmico é aceita; ela se baseia na força aplicada na interface gás/sólido entre a partícula e o gás envolvente. Quando a temperatura do gás aumenta ao longo da superfície, as moléculas que deixam a superfície terão um maior componente de velocidade na direção do aumento de temperatura do que quando elas chegam à superfície. O resultado é um tênue fluxo de gás das regiões mais frias para as regiões mais quentes, ao longo da superfície da partícula e, em contrapartida, a superfície experimenta uma força na direção das zonas frias.

Características principais

EFICIÊNCIA DE COLETA

A utilização de precipitadores térmicos tem se restringido especialmente ao campo da amostragem de material particulado, onde eficiências altíssimas são obtidas para partículas de 0,01 a 5,0 μm . No campo industrial eficiências estão entre 94 e 98%.

PERDA DE CARGA

A perda de carga através de precipitadores térmicos é bastante reduzida, não chegando a valores superiores a 0,5 pol de H_2O .

Fatores que influenciam a utilização e a eficiência de coleta

Em precipitadores térmicos, o efeito da temperatura é marcante na força térmica. A análise teórica das equações apresentadas mostra que, para partículas maiores que 1 μm a velocidade de migração aumenta com a temperatura e, caso contrário, para partículas menores de 1 μm , independentemente do gradiente térmico.

Principais utilizações — vantagens e desvantagens

Pouco se pode dizer sobre a utilização de precipitadores térmicos como equipamento coletor de partículas, pois sua utilização tem sido rara. Tem sido sugerido que a precipitação térmica tem grande importância na coleta de partículas carregadas por um gás a altas temperaturas passado através de um leito fixo a baixa temperatura.

Tendo-se em vista o estreitamento das passagens no leito, temperaturas do gás da ordem de 50 $^{\circ}\text{C}$ podem representar gradientes de 1000 $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. Cálculos mostram eficiências de 98,8% na coleta de partículas de 0,1 μm em um leito de 9 pol com o gás a 500 $^{\circ}\text{C}$.

COLETORES CENTRÍFUGOS — CICLONES

Princípio de funcionamento

Nos coletores centrífugos, pretende-se fazer agir sobre as partículas a força centrífuga para possibilitar sua coleta. A força centrífuga aplicada sobre as partículas é várias vezes mais intensa do que a força da gravidade, empurrando a partícula na direção das paredes do ciclone, retirando-a do fluxo gasoso. A Fig. 7.3 mostra o esquema de um ciclone e suas respectivas dimensões (nomenclatura), que serão utilizadas daqui por diante.

O gás, entrando tangencialmente no topo do ciclone, cria um fluxo espiral descendente entre a parede e o duto da saída. Esta, chamada espiral principal, estende-se até a base do cone e retorna em movimento espiral ascendente interno. É a chamada espiral interna, que se estende até o duto de saída, dando descarga ao "gás limpo". Convém salientar que, no topo do ciclone, surgem turbulências secundárias, cuja eliminação deve ser tentada.

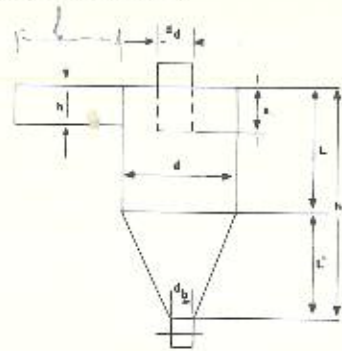


FIGURA 7.3 Esquema de um ciclone. d , diâmetro do ciclone; d_s , diâmetro do duto de saída; l , largura da entrada; h , altura da entrada; s , profundidade da saída; L , comprimento da parte cilíndrica; L' , comprimento da parte cônica; h_c , altura do ciclone ($= L + L'$); d_b , diâmetro da base do ciclone

Classificação

A quantidade de tipos de ciclones e outros coletores centrífugos é enorme, e apenas alguns tipos serão aqui mencionados. Alguns dos principais coletores utilizados na prática são os seguintes (Fig. 7.4):

- ciclone simples de entrada tangencial,
- ciclone simples de entrada envolvente,
- ciclone simples de entrada curva,
- ciclone simples de entrada axial,
- ciclone simples de corpo cilíndrico,
- ciclone simples de corpo cilíndrico/cônico,
- ciclone simples de corpo curvo,
- ciclones múltiplos,
- coletores *scroll*,
- ventilador induzido,
- coletor tipo turbocompressor.

Convém ressaltar que tipos mistos são utilizados com ou sem a adição de água por aspersão.

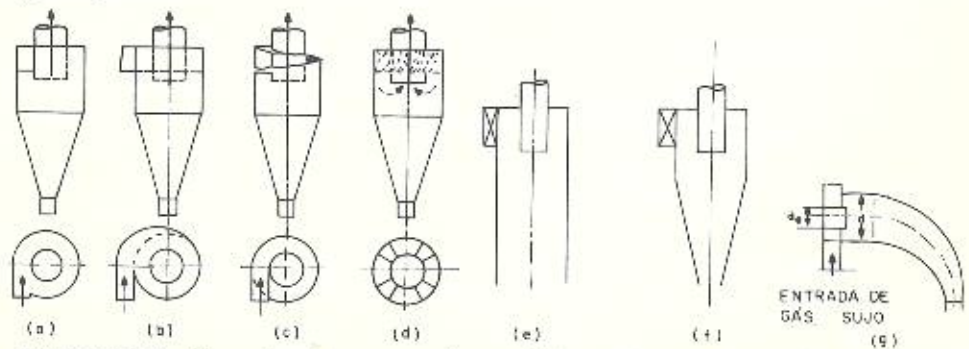


FIGURA 7.4 Tipos de coletores centrífugos. Ciclones simples: de entrada tangencial (a), de entrada envolvente (b), de entrada curva (c), de entrada axial (d), de corpo cilíndrico (e), de corpo cilíndrico/cônico (f), de corpo curvo (g)

Teoria e principais equações

Teórica e praticamente, as relações que expressam movimento, velocidade, tempo de residência, eficiência, perda de carga, etc., têm sido estudadas exaustivamente por inúmeros profissionais. Na bibliografia fornecida encontram-se informações mais completas a respeito do assunto e, neste trabalho, apenas as equações de maior interesse serão apresentadas de forma simplificada.

A força centrífuga (F_c) a que está submetida uma partícula de massa m , em movimento espiralado de raio de giração r , vale

$$F_c = m \frac{v_t^2}{r}, \quad (7.5)$$

sendo v_t a velocidade tangencial da partícula.

O chamado fator de separação (f_s) é definido como a relação entre a força centrífuga que age na partícula e a força da gravidade. Assim,

$$f_s = \frac{F_c}{F_g} = \frac{m(v_t^2/r)}{mg} = \frac{v_t^2}{rg},$$

$$f_s = \frac{v_t^2}{rg}. \quad (7.6)$$

Características gerais

EFICIÊNCIA DE COLETA

Inúmeras tentativas têm sido feitas teoricamente para se fazer uma previsão da eficiência (η) de coleta de um coletor centrífugo seco. Também na prática, inúmeros coletores têm sido testados com relação a sua eficiência de coleta e equações experimentais determinadas. Neste trabalho serão abordadas algumas formas teóricas e práticas de determinação de um coletor centrífugo e de que forma o valor obtido se aproximaria do valor real.

ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA ATRAVÉS DO DIÂMETRO CRÍTICO DE PARTÍCULA

Define-se como diâmetro crítico de partícula o diâmetro de partícula que é coletado com 100% de eficiência pelo ciclone. Admite-se inicialmente que a partícula será coletada se alcançar a parede do ciclone, que não há interação entre as diversas partículas, que, uma vez coletadas, não tornam a entrar no fluxo gasoso, que é válida a Lei de Stokes, que o efeito de empuxo é desprezível, e que a velocidade das partículas é constante e independente da posição.

ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA ATRAVÉS DO DIÂMETRO DE CORTE

As hipóteses feitas não têm sido totalmente verificadas na prática, o que fez com que se procurasse a determinação de eficiências com base em dados experimentais. O chamado diâmetro de corte de um ciclone é o diâmetro de partícula coletado com 50% de eficiência. Essa teoria baseia-se no fato de que partículas girando no ponto de máxima velocidade tangencial têm 50% de chance de serem coletadas.

ESTIMATIVA DE EFICIÊNCIA POR SIMILARIDADE

Se, durante o projeto de um ciclone, optar-se por um tipo anteriormente padronizado em termos de proporcionalidade dimensional, ou, durante a revisão de um projeto de um ciclone cujas dimensões são proporcionais a um ciclone-padrão para o qual se conhece a curva de eficiência fracionada, pode-se estimar a eficiência do ciclone projetado, ou a ser projetado, por meio de similaridade de comportamento, tendo-se em vista a proporcionalidade de dimensões. Assim sendo, inicialmente se faz necessária a fixação dos ciclones-padrão bem como o conhecimento de suas curvas de eficiência fracionada (Tabs. 7.4 e 7.5).

De posse desses dados, as curvas de eficiência em função do diâmetro da partícula podem ser plotadas. Essas curvas supõem fundamentalmente:

a) o gás carreador como sendo o próprio ar a, aproximadamente, 20 °C e 1 atm, ou seja,

$$\begin{aligned}\mu &\cong 1,8 \times 10^{-4} \text{ poise,} \\ \rho &\cong 1,3 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3, \\ m &\cong 29 \text{ (massa molecular);}\end{aligned}$$

b) velocidade de entrada, $u_e \cong 50$ pés/s;

c) partículas esféricas de densidade igual a $\rho_p = 2,0$ g/cm³;

d) diâmetro do ciclone, $d = 8$ pol.

TABELA 7.4 Ciclone-padrão A: alta eficiência; capacidade média; vazão usual = 300 d^2 pés³/min

Dimensão	l	h	s	d_d	L	L'	d		
Fator multiplicativo do diâmetro	0,2	0,5	0,5	0,5	1,5	2,5	1		
Tamanho da partícula (μm)	2,5	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0
Eficiência (%)	20,0	40,0	81,0	86,0	92,0	94,0	95,0	96,0	97,0
Tamanho da partícula (μm)	45,0	50,0	55,0	50,0	55,0	70,0	75,0	80	> 80
Eficiência (%)	97,5	98,0	98,5	99,0	99,2	99,5	99,5	99,7	100

TABELA 7.5 Ciclone-padrão B: média eficiência; capacidade média; vazão usual = 900 d^2 pés³/min

Dimensão	l	h	s	d_d	L	L'	d		
Fator multiplicativo do diâmetro	0,375	0,75	0,875	0,75	1,5	2,5	1		
Tamanho da partícula (μm)	2,5	5	10	15	20	25	30	35	40
Eficiência (%)	9,0	20,0	35,0	42,0	55,0	60,0	67,0	75,0	80,0
Tamanho da partícula (μm)	45	50	55	60	65	70	75	80	> 80
Eficiência (%)	82,0	85,0	89,5	92,0	93,0	95,0	96,5	98,0	99,0

Assim sendo, para o ciclone a ser projetado ou revisado, o tamanho da partícula que será coletada com a mesma eficiência será obtido multiplicando o valor do tamanho de partícula para uma dada eficiência na tabela pelos seguintes fatores de correção:

fator de correção de densidade,

$$f_p = \sqrt{\frac{2,7}{\rho_p (\text{g/cm}^3)}}; \quad (7.7)$$

fator de correção de vazão (ou velocidade de entrada),

$$f_Q = \sqrt{\frac{50}{v_e (\text{fps})}}; \quad (7.8)$$

fator de correção de viscosidade,

$$f_\mu = \sqrt{\frac{\mu (\text{poise})}{1,8 \times 10^{-4}}}; \quad (7.9)$$

fator de correção de diâmetro,

$$f_d = \sqrt{\frac{d(\text{pol})}{8}}. \quad (7.10)$$

Outros fatores influentes no rendimento não tiveram seus fatores de correção quantificados e, portanto, deixam de ser aqui apresentados.

PERDA DE CARGA

Várias perdas parciais contribuem para a perda de carga total através de um ciclone. Essas perdas parciais são perdas por atrito no duto de entrada, perdas devido à expansão ou contração na entrada, perdas na entrada do duto de saída, perda de pressão estática entre os dutos de entrada e de saída, e recuperação de energia no duto de saída. Diferentes autores têm se dedicado a obter estimativas de perda de carga total através do ciclone.

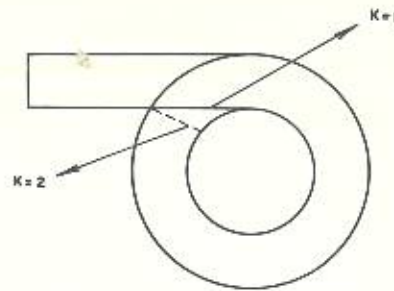
Primeira equação:

$$\Delta p = \frac{2,7 \times 10^{-3} \times Q^2}{K d_a^2 l h \sqrt[3]{L/d} \sqrt[3]{L'/d}}, \quad (7.11)$$

onde

- K é uma constante dependente das condições de entrada,
- $K = 0,5$, para entrada simples sem guias,
- $K = 1,0$, para entrada com guias retas,
- $K = 2,0$, para entrada com guias expansoras.

As dimensões lineares são em pés, a vazão em pés cúbicos por segundo e a perda de carga em polegadas de água.



Segunda equação:

$$\Delta p = \frac{12lh}{Kd_o^2 \sqrt[3]{L/d} \sqrt[3]{L/d}} \quad (7.12)$$

Terceira equação:

$$\Delta p = \frac{K_b Q^2 P_e \rho_g}{T_e} \quad (7.13)$$

onde

- Q = vazão (pés³/min),
- K_b = constante avaliada experimentalmente,
- P_e = pressão na entrada (atm),
- T_e = temperatura do gás na entrada (°R),
- ρ_g = densidade do gás (lb/pé³).

Fatores que afetam a utilização e o rendimento de coleta

Serão aqui resumidos os principais fatores, e de que forma afetam a eficiência e a perda de carga através do ciclone. Indicamos a seguir os efeitos dos diversos parâmetros sobre a perda de carga e sobre a eficiência.

Variável	Perda de carga	Eficiência
Vazão		
Densidade do gás	$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \frac{Q_1^2}{Q_2^2} \times \frac{T_2}{T_1} \times \frac{\rho_1}{\rho_2}$ (7.14)	$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}$ (7.15)
Temperatura		$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_g)_2}{(\rho_p - \rho_g)_1}}$ (7.16) indiretamente
Viscosidade	Desprezível	$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\mu_2}}$ (7.17)
Densidade da partícula	Desprezível	$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_g)_2}{(\rho_p - \rho_g)_1}}$ (7.18)
Tamanho da partícula	Desprezível	Avaliado através da variação do diâmetro crítico. A variação da eficiência é evidente

Variável	Perda de carga	Eficiência
Carga de poeira	$\frac{\Delta p \text{ (sujo)}}{\Delta p_2 \text{ (limpo)}} = \frac{1}{0,013 \sqrt{G+1}} \quad (7.19)$	$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \left[\frac{G_2}{G_1} \right]^{0,075} \quad (7.20)$
Presença de guias de entrada	Diminui de acordo com a Eq. (7.11)	Diminui devido à diminuição do número de revoluções
Aumento da altura da entrada e largura, h, l	Diminui de acordo com a Eq. (7.11)	Diminui
Aumento de s/d_2	—	Aumenta até $s/d_2 = 1$ e depois cai
Aumento de d/d_2	—	Aumenta até $d/d_2 = 3$ Valor ideal, entre 2 e 3
Aumento da altura do ciclone (h_c)	Diminui um pouco, de acordo com a Eq. (7.11)	Aumenta devido ao aumento do número de revoluções, etc.
Presença da parte cônica	Desprezível	Desprezível
Aumento da velocidade de entrada	Aumenta de acordo com a Eq. (7.11)	Aumenta, mas, a partir de um dado valor, a turbulência é muito alta e a eficiência cai
Aumento do diâmetro do ciclone	—	Diminui
Aumento do diâmetro do duto de saída	Diminui de acordo com a Eq. (7.11)	Diminui

Alguns fatores limitantes da utilização de ciclones se referem à erosão dos mesmos devido a altas cargas de poeira, poeira de alta dureza, altas velocidades, etc., e ao entupimento quer do duto de saída quer pela formação de uma casca sobre a parede interna. O entupimento é geralmente causado por poeiras pegajosas, por excessiva carga de poeira ou pela condensação de vapor d'água dentro do ciclone, ou sobre partículas higroscópicas.

Principais utilizações — vantagens e desvantagens

Coletores centrífugos têm encontrado uma enorme aplicação na indústria para a coleta de material particulado. Seria até mesmo desnecessário e impossível enumerar e citar as diversas aplicações de ciclones em indústrias, não só como equipamento de controle de poluentes, mas também como equipamento do próprio processamento industrial. Suas principais vantagens residem no baixo custo, na baixa potência consumida, na simplicidade de projeto, manutenção e construção, e pelo fato de inexistir uma temperatura dos gases que seja limitante. Suas principais desvantagens estão ligadas à baixa eficiência para partículas inferiores a $5 \mu\text{m}$, à abrasão excessiva e à possibilidade de entupimento pela presença de altas concentrações de poeiras, principalmente as de menor diâmetro, mais moles, mais higroscópicas e mais pegajosas.

COLETORES ÚMIDOS

Princípio de funcionamento

O gás, carreando material particulado, é forçado através de uma aspersão de gotas, com as quais as partículas se chocam, se depositam por difusão, e também agem como núcleo de condensação de água, conseqüentemente aumentando de tamanho, o que torna sua coleta mais fácil. Portanto podemos dizer que os quatro mecanismos de coleta mais importante num coletor úmido são a impactação, a interceptação, a difusão e a condensação.

Classificação

Os tipos de lavadores de gases são inúmeros, havendo o contínuo aparecimento de novos modelos de eficiências similares apresentando algumas vantagens e desvantagens. Neste item do trabalho, vamos nos limitar à listagem e apresentação dos tipos de coletores úmidos mais difundidos. No item referente a características gerais de eficiência e perda de carga, além de um subitem de caráter geral, cada um dos diversos tipos de lavadores será analisado separadamente. Os tipos mais utilizados de lavadores são (Fig. 7.5):

- câmaras de borrifo,
- lavadores ciclônicos,
- lavadores auto-induzidos,
- lavadores mecânicos,
- coletores úmidos de impactação,
- lavadores ventúri,
- lavadores *jet*,
- lavadores de orifício com pressão variável (ou lavadores de disco inundado),
- torres de enchimento úmidas,
- precipitadores dinâmicos úmidos,
- desintegradores,
- lavadores de espuma.

Características gerais

Várias relações têm sido propostas para expressar o rendimento dos diversos tipos de lavadores de gases para coleta de material particulado. Essas relações variam para cada um dos tipos de lavadores mencionados, dependendo de como se dá a aspersão do líquido, da direção e sentido do gás com relação ao líquido e vários outros fatores. Mais recentemente, Semrau desenvolveu experimentalmente o conceito de "potência de contato", que, em essência, relaciona a eficiência de coleta de partículas com a energia gasta no processo de contato entre gás e líquido. O conceito de potência de contato afirma que, no contato gás-líquido, potência é dissipada em turbulência dos fluidos e como calor.

Essa potência consumida em termos de potência por unidade volumétrica do gás é denominada de potência de contato, não estando nela incluídas as potências por perdas elétricas e mecânicas, nem por perdas por atrito nas partes secas do lavador. Esse conceito, apesar de carecer de maior base teórica, tem se

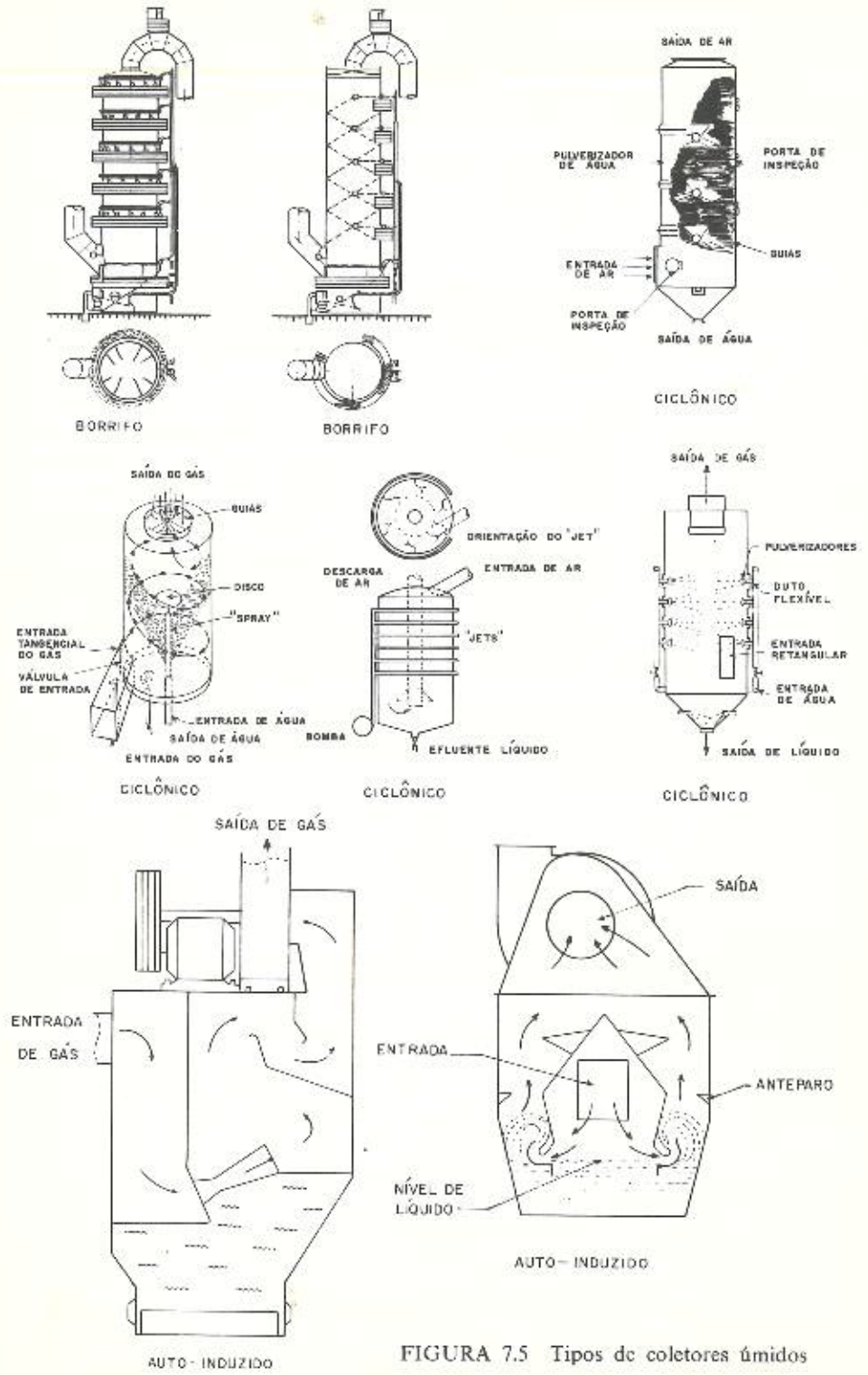


FIGURA 7.5 Tipos de coletores úmidos

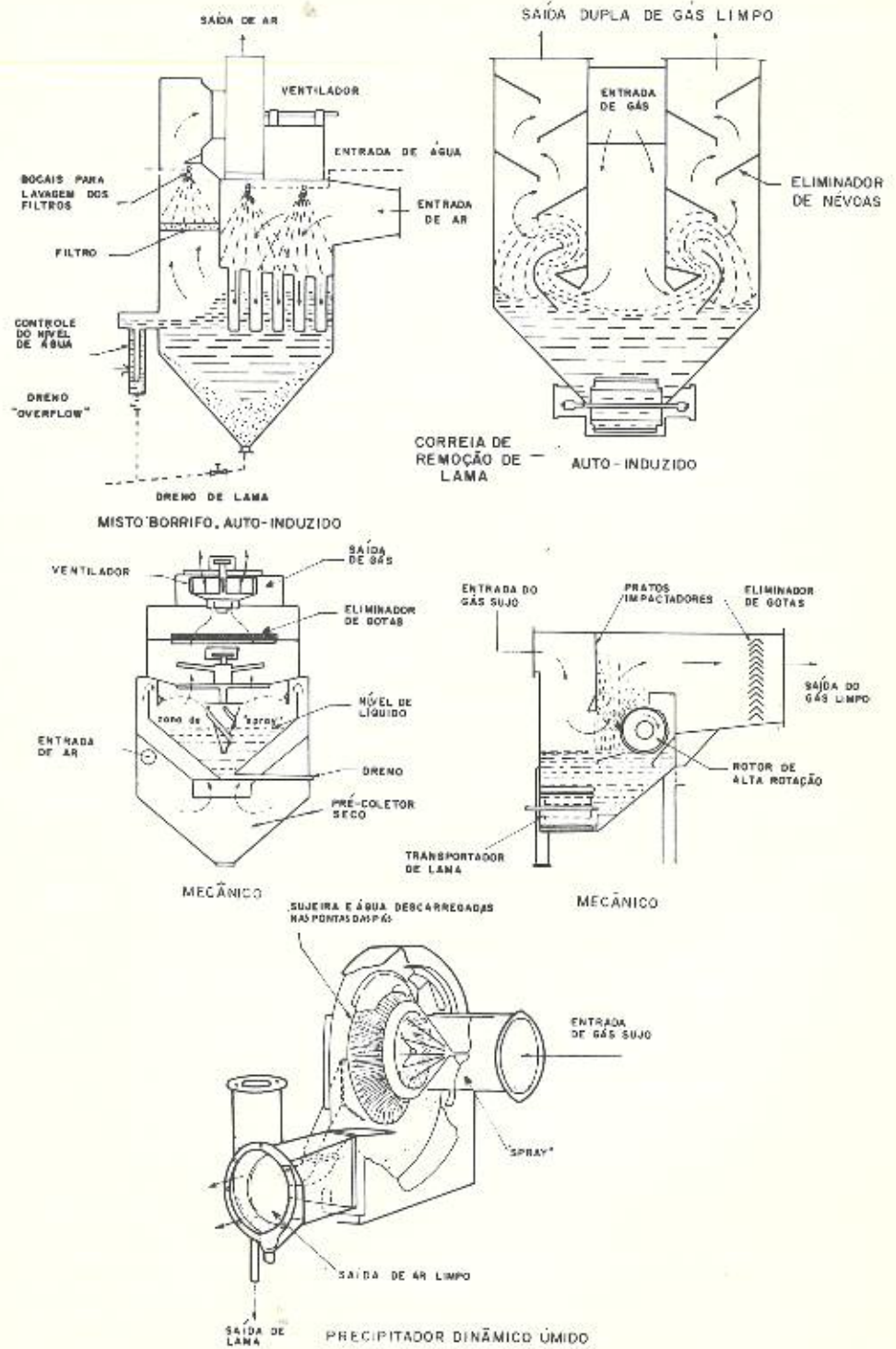


FIGURA 7.5 (Continuação)

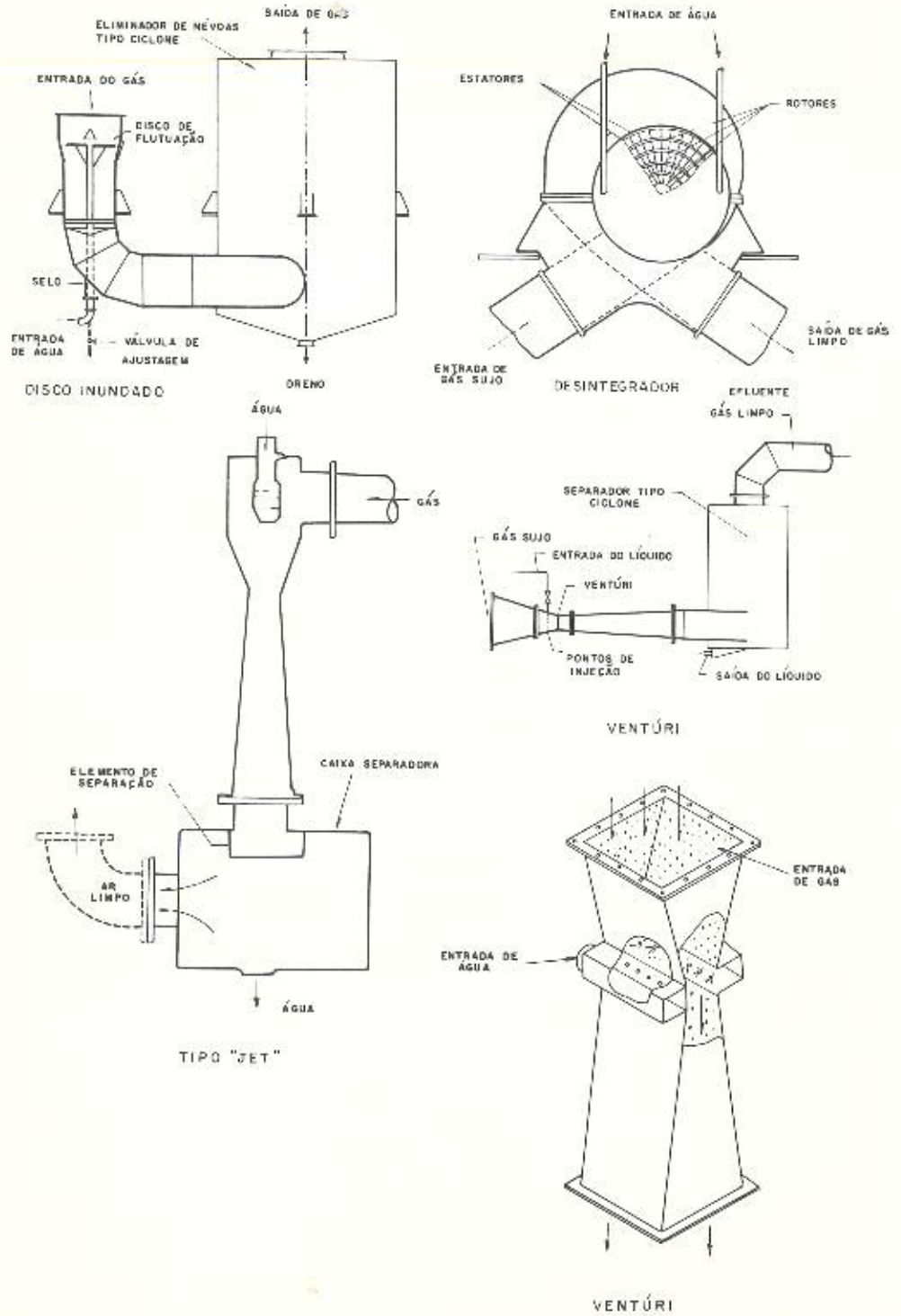


FIGURA 7.5 (Continuação)

mostrado aproximadamente válido na prática. Matematicamente tem sido apresentado em termos de número de unidades de transferência (eficiência) e potência de contato (HP/1 000 pés³/min).

$$N = 2,3 \log \frac{1}{1-\eta}, \quad (7.21)$$

$$N = \alpha \delta_t^\beta, \quad (7.22)$$

onde

- N = número de unidades de transferências,
- η = eficiência,
- γ = constante adimensional – coeficiente angular da reta plotada em papel logarítmico,
- α = valor de interceptação na ordenada,
- α, β = dependem do tamanho e de outras propriedades das partículas,
- δ_t = potência de contato total.

Passemos agora a analisar separadamente os diversos tipos de lavadores, principalmente com relação à eficiência de coleta por eles apresentada.

CÂMARA DE BORRIFO

É o mais simples dos coletores úmidos. As gotas, geralmente com diâmetro de 0,1 a 1 mm caem e se chocam com as partículas em movimento ascendente, sendo impactação o principal mecanismo de coleta das partículas. São características gerais desses coletores:

- velocidade ascendente do gás, 2 a 4 pés/s;
- tamanho das gotas, 100 a 1 000 μm ;
- tamanho da gota para máxima eficiência, 800 a 900 μm .

Na Tab. 7.6 estão resumidas as principais características de torres de borrifo.

TABELA 7.6 Características de câmaras de borrifo

Parâmetro	Faixa
Vazão de gás	Acima de 70 000 pés ³ /min
Temperatura do gás	2 000 °F, reduzindo para 300 °F
Velocidade do gás	2-5 pés/s
Tempo de resistência	20-30 s
Perda de carga	1 pol de H ₂ O
Concentração	Alta, acima de 5 grãos/pé ³
Composição da partícula	Sólido, líquido; alguma corrosão
Água recirculada	2-18 gal/1 000 pés ³

LAVADORES CICLÔNICOS

Nesses coletores úmidos, lança-se mão de um aumento da velocidade relativa entre as gotas e as partículas. Dessa forma, consegue-se aumentar consideravelmente a eficiência de coleta em comparação com a obtida em câmaras de borrifo. A coleta se dá principalmente por impactação, sendo que a difusão só é efetiva para partículas da ordem de 0,001 μm .

Há basicamente três tipos de lavadores ciclônicos, como segue. Um em que se movimenta tangencialmente o gás fazendo-se com que ele entre de modo tangencial na base do corpo cilíndrico. O lavador mais comum desse tipo é o chamado lavador ciclônico Pease Anthony. No segundo tipo, o movimento espiralado é provocado no gás através de sua passagem por seções helicoidais: são os chamados lavadores ciclônicos irrigados. O terceiro tipo é um ciclone convencional em que o gás entra tangencialmente pela base e a injeção de água se faz na entrada.

Nesses coletores, determinou-se experimentalmente que o mais efetivo tamanho de gota é da ordem de $100 \mu\text{m}$. Por essa razão, não se recomenda sua utilização com fins de resfriamento, sendo mesmo recomendado que os gases estejam saturados na entrada do coletor, particularmente se o gás estiver a uma temperatura superior à do líquido. Na Tab. 7.7 estão resumidas as principais características dos lavadores ciclônicos.

TABELA 7.7 Características de lavadores ciclônicos

Parâmetro	Faixa	
	Tipo irrigado	Tipo Pease-Anthony
Vazão do gás	Até 50 000 pés ³ /min	Até 25 000 pés ³ /min
Temperatura do gás	Ilimitada	Pré-resfriamento ou saturação necessários
Velocidade do gás	200-500 pés/min	—
Velocidade tangencial	—	50-200 pés/s
Perda de carga	2,5-6 pol de H ₂ O	2-6 pol de H ₂ O
Água recirculada	3-5 gal/1 000 pés ³	3-10 gal/1 000 pés ³
$\Delta p = f(\text{vazão})$	$\Delta p = KQ^2$	—
Potência	—	1-3 HP/1 000 pés ³ /min
Eficiência	90% $\geq 5 \mu\text{m}$	95% $\geq 5 \mu\text{m}$
Efeito da umidade na eficiência	Nenhum	Nenhum

LAVADORES AUTO-INDUZIDOS

São também chamados de lavadores inerciais de orifício. A aspersão de água é induzida pela própria passagem do fluxo gasoso através do líquido, "quebrando-o" em gotas. A quantidade de subtipos desses lavadores é imensa, indo desde o mais simples *wet cap* usado no topo de fornos Cubilot até os tipos mais sofisticados. As velocidades de passagem através do líquido variam de um tipo para o outro, sendo uma faixa comum entre 50 e 200 pés/s.

Dados experimentais indicam que, para velocidades de 50 pés/s, as gotas formadas têm um diâmetro de 300 a 400 μm (veja a Tab. 7.8).

LAVADORES MECÂNICOS

São também chamados de lavadores equipados com aspersores mecânicos. O mecanismo predominante de coleta nesses lavadores é a impactação, os quais se valem de um dispositivo mecânico para promover a formação das gotas (Fig. 7.5). Uma vantagem desses lavadores, tal como nos auto-induzidos, é o pequeno consumo de água e a pequena possibilidade de entupimento. Vale

TABELA 7.8 Características gerais de lavadores auto-induzidos

Parâmetros	Faixa		
	<i>Wet-cap</i>	Rotoclone <i>N</i>	Em geral
Eficiência	Alta, > 15 μm	93% 5 μm 85% 3 μm 40% 1 μm	94% > 5 μm
Uso de água	Variável	10-40 gal/1 000 pés ³	—
Consumo de água	Variável	—	0,25 gal/1 000 pés ³
Concentração de entrada	Qualquer	40 grãos/pé ³	—
Perda de carga	0,25 pol de H ₂ O	2,5-6 pol de H ₂ O	2-8 pol de H ₂ O
Corrosão	Sim	Sim	Sim
Potência consumida	—	—	2,3 HP/1 000 pés ³ /min

frisar que, na maior parte da bibliografia existente, esses coletores são subclassificados conjuntamente com os desintegradores e com os precipitadores dinâmicos úmidos. Neste trabalho, apenas por conveniência didática, cada um deles está classificado em um item separado. A eficiência e o consumo de potência estão relacionados com a rotação e a vazão do gás.

COLETORES ÚMIDOS DE IMPACTAÇÃO

Os coletores de impactação são torres verticais equipadas com um ou mais obstáculos de impactação. O obstáculo de impactação corresponde a um prato perfurado com 600 a 3 000 furos por pé², tendo sobre eles plaquetas a uma distância correspondente à seção da *vena contracta* do fluido que passa pelos furos (seção de maior velocidade).

O fluxo gasoso entra pela base da torre, em uma câmara provida de bicos aspersores de baixa pressão para, inicialmente, sofrer um processo de resfriamento, umidificação e coleta das partículas mais grosseiras. O gás, passando através dos furos a velocidades entre 75 e 100 pés/s, atomiza o líquido descendente em gotas da ordem de 100 μm .

A velocidade do gás, ao passar pelos furos, é da ordem de 20 pés/s. Convém salientar que a coleta do material particulado ocorre predominantemente pela impactação com as gotas, e menos pela impactação contra a plaqueta (cerca de 3/16 pol de dimensão). Isso é facilmente compreensível, tendo-se em vista que o diâmetro do corpo coletor é muito grande, no caso da plaqueta, sendo, portanto, o parâmetro de impactação menor. As principais características desses lavadores estão resumidas na Tab. 7.9.

LAVADOR VENTÚRI

Nesses lavadores o fluxo gasoso tem sua velocidade aumentada ao passar através de uma constricção (garganta), onde o líquido é injetado e atomizado pela alta velocidade do gás. Os principais mecanismos de coleta são impactação (mais importante), interceptação e condensação. Em seguida ao ventúri um coletor secundário (normalmente um ciclone), é instalado para coletar as partículas (que tiveram seu tamanho aumentado no ventúri). As velocidades do gás na

TABELA 7.9 Características de lavadores de impactação

Parâmetro	Faixa
Concentração de poeira	40 grãos/pé ³ são facilmente tratados
Perda de carga	1,5 a 8 pol de H ₂ O; geralmente de 4 a 6
Eficiência	95%, 4 µm; 90%, 2 µm; 80%, 1 µm
Consumo de água	0,25 gal/min para cada 1 000 pés ³ /min
Água recirculada	3 gal/min/1 000 pés ³ /min
Capacidade	500-40 000 pés ³ /min
Velocidade do gás nos furos	20 pés/s
Velocidade de formação de gotas	75-100 pés/s

garganta (da ordem de 12 000 a 24 000 pés/min) atomizam quantidades de água, que variam entre 3 a 10 galões/1 000 pés³, em gotas cujo tamanho médio pode ser estimado na faixa de 50 µm. Perdas de carga entre 10 e 30 pol de H₂O são valores comuns, mas perdas mais elevadas não são raras e correspondem a maiores eficiências de coleta.

A condensação é um mecanismo efetivo de coleta em um lavador ventúri. Se o gás, na região de baixa pressão (correspondente à garganta do ventúri), está completamente saturado (de preferência super-saturado), haverá condensação sobre as partículas na região de mais altas pressões (correspondente ao expansor do ventúri). A partícula cresce, sua superfície molhada auxilia a aglomeração e sua posterior coleta. Na Tab. 7.10 estão resumidas as principais características dos lavadores ventúri.

TABELA 7.10 Características de lavadores ventúri

Volume de gás	200-145 000 pés ³ /min
Velocidade na garganta	200-600 pés/s
Perda de carga	Usualmente de 10 a 30 pol de H ₂ O
Temperatura do gás	Ilimitada, desde que o gás chegue completamente saturado à garganta, ou que se injete água suficiente para compensar a evaporação
Eficiência	98% ≥ 1 µm
Água recirculada	2-10 gal/1 000 pés ³

LAVADORES TIPO JET

A efetividade de um lavador está diretamente relacionada com a energia despendida no processo. A mudança de energia cinética (ΔE_c) num sistema de impactação gás-líquido vale

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \frac{m_g m_l}{(m_g + m_l)} (v_g^2 - v_l^2), \quad (7.23)$$

onde m_g é a massa de gás, m_l a massa de líquido, v_g a velocidade do gás, e v_l a velocidade do líquido. Essa relação mostra que, se o líquido é injetado na garganta do ventúri, o dispêndio de energia é grande pois $v_l = 0$. Isso faz com que, no lavador tipo *jet*, o líquido seja aspergido por um atomizador central com alta velocidade, desse modo fornecendo uma disponibilidade de pressão que

varia de 1 a 3 pol de H_2O . As principais características dos lavadores tipo *jet* estão condensadas na Tab. 7.11.

TABELA 7.11 Características dos lavadores tipo *jet*

Parâmetro	Faixa
Capacidade	Até 100 000 pés ³ /min
Eficiência	—
Pressão disponível	1-3 pol de H_2O
Água recirculada	50-100 gal/1 000 pés ³

LAVADORES DE ORIFÍCIO INUNDADO

Na Fig. 7.5 podemos observar que a regulagem possível na posição do disco possibilita uma variação na perda de carga e, portanto, na eficiência, permitindo a utilização do lavador numa ampla faixa de eficiências de coleta. Esses lavadores podem apresentar altas eficiências para altas perdas de carga, quando maiores velocidades de passagem do gás criam gotas de menores dimensões. Na Tab. 7.12 estão relacionadas as principais características desses lavadores.

TABELA 7.12 Características dos lavadores de pressão variável

Parâmetro	Faixa
Água recirculada	5-35 gal/1 000 pés ³
Perda de carga	Variável de 10 a 60 pol de H_2O
Eficiência	Comparável à do ventúri

TORRE DE ENCHIMENTO ÚMIDA

Torres idênticas às utilizadas para absorção de gases e vapores podem ser utilizadas para coleta de material particulado. O enchimento utilizado é do mesmo tipo e em condições normais, isto é, abaixo do ponto de inundação, as eficiências observadas são baixas para partículas menores que $5 \mu m$, tendo-se em conta os relativamente altos valores de perda de carga.

O problema de entupimento é comum e, portanto, torres de enchimento são mais usadas para coleta de névoas que de poeira. Uma variante que vem sendo utilizada são as torres com leito flutuante, onde o enchimento é de material de baixa densidade e permanece continuamente em flutuação, evitando o problema de entupimento ($\Delta p = 4$ pol de H_2O). As características estão na Tab. 7.13.

TABELA 7.13 Características de torres de enchimento úmidas

Parâmetro	Faixa
Capacidade	1 200-25 000 pés ³ /min
Eficiência	Cerca de 88% para névoa de H_2SO_4
Perda de carga	Calculada como para torres de absorção

PRECIPITADORES DINÂMICOS ÚMIDOS

Utilizam um ventilador para impactar as partículas contra suas pás, ao mesmo tempo que se mantêm atomizadores sobre elas. As principais características estão na Tab. 7.14.

TABELA 7.14 Características dos precipitadores dinâmicos úmidos

Parâmetro	Faixa
Perda de carga	< 1 pol de H ₂ O
Concentração	< 1 grão/pé ³
Eficiência	~ 95 %, > 2 µm
Água recirculada	0,5-1 gal/1 000 pés ³

DESINTEGRADORES

Para coleta de partículas da ordem de 1 µm, as gotas devem ser de pequena dimensão, para possibilitar a coleta. Essas gotas podem ser obtidas nos desintegradores através da passagem do líquido injetado axialmente entre o estator e o rotor (girando entre 350 e 750 rpm). As principais características dos desintegradores são mostradas na Tab. 7.15.

TABELA 7.15 Características dos desintegradores

Parâmetro	Faixa
Eficiência	Alta
Perda de carga	< 1 pol de H ₂ O
Potência consumida	10-20 HP/1 000 pés ³ /min
Concentração	0,25-0,5 grãos/pé ³
Temperatura	Até 125 °F
Consumo de água	Elevado
Rotação do rotor	350-750 rpm
Velocidade dos gases	200-300 pés/s
Tamanho das gotas	50-80 µm

LAVADORES DE ESPUMA

Para coletar partículas finas, lavadores de espuma têm sido considerados de alta eficiência, em virtude da grande área superficial de coleta apresentada.

TABELA 7.16 Características de coletores de espuma

Parâmetro	Faixa
Eficiência	99 %, > 2 µm
Perda de carga	Pequena
Capacidade	1 000-50 000 pés ³ /min
Quantidade do espumante	0,001 gal/1 000 pés ³
Altura da camada de espuma	4-20 cm

Esses coletores geralmente possuem um pré-coletor para reter as partículas mais grossas, sendo as mais finas coletadas por uma camada de espuma. A espuma é geralmente obtida pela adição à água de 0,001 gal/1 000 pés³ de gás de óleo à base de terebintina. Eliminadores de gotas são colocados em seguida ao equipamento. As principais características desses coletores estão na Tab. 7.16.

Fatores que afetam a utilização e o rendimento de coleta

De uma forma geral, a eficiência aumenta com:

- aumento do tamanho da partícula;
- aumento da perda de carga;
- aumento da velocidade relativa partícula/gota;
- aumento da vazão de líquido;
- diminuição do tamanho da gota (nem sempre).

Principais usos — vantagens e desvantagens

Os usos de lavadores são extraordinariamente diversificados e inútil seria listá-los, ainda que parcialmente. Útil, no entanto, é relacionar as principais vantagens e desvantagens no uso de coletores úmidos.

Vantagens:

- pode coletar partículas e gases ao mesmo tempo;
- dissolve partículas solúveis;
- executa a função secundária de resfriamento;
- gases e névoas corrosivas podem ser coletados e neutralizados;
- evita riscos de explosão pela presença de gases e poeiras combustíveis;
- seu tamanho em geral é pequeno;
- seu custo inicial é mais baixo.

Desvantagens:

- recristaliza materiais solúveis;
- necessita de leito de sedimentação para partículas insolúveis;
- cria resíduos líquidos;
- partículas submicrométricas são coletadas com baixa eficiência;
- as partículas não-molháveis são difíceis de coletar;
- gotículas podem sair pelo efluente do coletor;
- o efluente tem alta umidade relativa e baixo ponto de orvalho;
- alta taxa de corrosão;
- possibilidade de congelamento do líquido em zonas frias;
- locais com deficiências no abastecimento de água;
- excessiva evaporação do líquido para gases quentes;
- excessivo consumo de potência em alguns casos.

FILTROS

Princípio de funcionamento

Trata-se de um dos mais antigos métodos de remoção de partículas de um fluxo gasoso, e pode apresentar altas eficiências para uma ampla faixa de ta-

manhos de partícula. O fluxo de gás carregado de partículas é forçado através de um meio poroso, onde as partículas são coletadas por alguns dos mecanismos de coleta já mencionados. O meio poroso pode ser composto de material granulado ou fibroso, podendo ser disposto na forma de leitos, compactado em painéis ou na forma de tecido.

Classificação

Inúmeras são as classificações baseadas no tipo de material filtrante, em sua forma de arranjo, no tipo de mecanismos de limpeza, etc. Neste trabalho, os filtros serão classificados em (Fig. 7.6):

- filtros de tecido;
- leitos filtrantes;
- painéis compactados;
- ultrafiltros (painéis);
- sólido poroso.

Os filtros de tecido podem ser de fios tecidos ou de fios compactados, construídos na forma de tubos, sacos ou envelopes. Estes serão os filtros enfatizados neste trabalho, por serem os de mais ampla aplicação no campo de controle da poluição do ar. Na Fig. 7.6, são apresentados alguns tipos de filtros.

Teoria e principais equações

Em filtração, os principais mecanismos de coleta são os seguintes:

- impactação inercial;
- interceptação;
- difusão;
- deposição gravitacional;
- precipitação eletrostática;
- precipitação térmica (desprezível).

Além desses mecanismos convencionais, em filtração, há que se considerar a ação de peneiramento puro, que, via de regra, não representa uma eficiente função na coleta, uma vez que os espaços entre as fibras é grande, comparado com o tamanho das partículas.

Características gerais

EFICIÊNCIA

O conhecimento simples da eficiência unitária de coleta, que, por si só, já é de difícil obtenção, não é suficiente. O conhecimento de uma estimativa da eficiência global de um filtro é necessário para a confecção ou revisão de um projeto.

Filtros de tecidos. Em filtros de tecido que ainda não tenham sido utilizados, a eficiência de coleta é baixa (da ordem de 60%) e, tão logo material particulado começa a se depositar, a eficiência sobe para valores da ordem de 90% ou mais. Assim sendo, observa-se que a real coleta é exercida pela camada

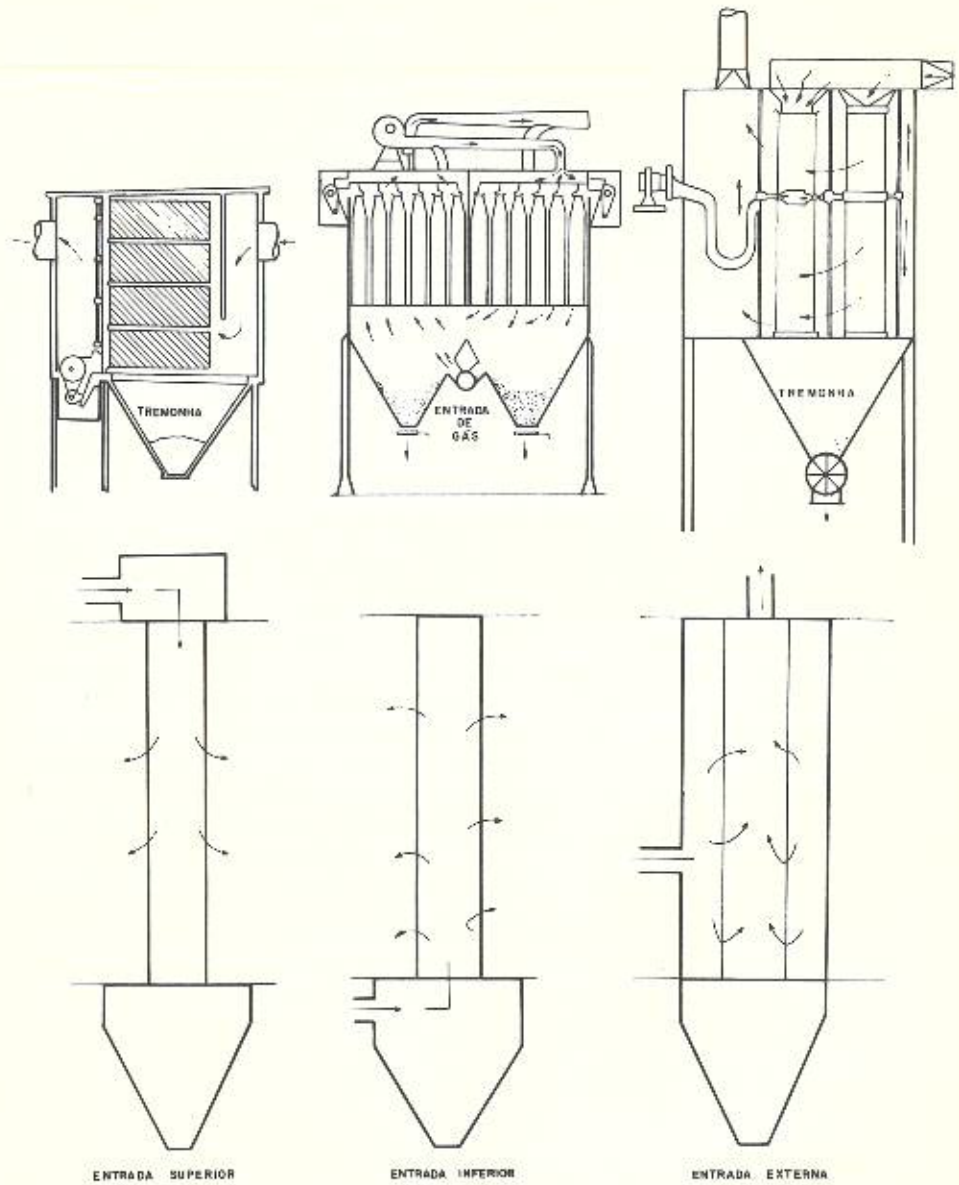


FIGURA 7.6 Tipos de filtros

de partículas já depositadas suportadas pelas fibras do tecido. Na Fig. 7.7, eficiências de coleta em filtros de tecido podem ser observadas em função da quantidade de poeira depositada, velocidade e tamanho de filtros de tecido.

Pela Fig. 7.7, pode-se observar que a velocidade de filtração é um parâmetro básico com relação à eficiência de coleta. Por esse motivo, inúmeras determinações experimentais de velocidades ótimas de filtração para diversas operações industriais foram feitas. Na Tab. 7.17, valores de velocidade de filtração recomendados são apresentados.

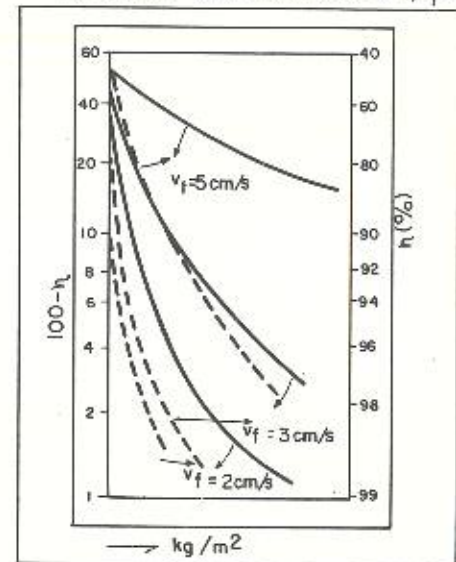
POLIÉSTER COM PARTÍCULAS DE $1,8\mu\text{m}$ 

FIGURA 7.7 Eficiência de coleta

TABELA 7.17 Velocidades de filtração recomendadas

Material	Máx. veloc. filtr., $\text{pés}^3/\text{min}/\text{pé}^2$	Material	Máx. veloc. filtr., $\text{pés}^3/\text{min}/\text{pé}^2$
Alumina	2,25	Gesso	2,50
Óxido de alumínio	2	Grafita	2
Abrasivos	3	Minério de ferro	2
Asbestos	2,75	Óxido de ferro	2
Bauxita	2,50	Couro	3,50
Poeira de bronze	2	Cimento	1,50
Carvão mineral	2,25	Óxido de chumbo	2,25
Carvão vegetal	2,25	Manganês	2,25
Cacau	2,25	Mica	2,25
Chocolate	2,25	Pigmentos	2
Poeira cerâmica	2,50	Papel	3,50
Argila	2,25	Plástico	2,50
Minério de cromo	2,50	Quartzo	2,75
Algodão	3,50	Sílica	2,75
Cosméticos	2	Sabão	2,25
Feldspato	2,50	Amido	2,25
Fertilizantes (resfriamento, secagem)	2	Açúcar	2,25

Leitos filtrantes e painéis compactados. São filtros normalmente utilizados para coleta eficiente de partículas grosseiras. As altas velocidades de filtração (200 a 700 pés/min) e os grandes espaços vazios entre as fibras fazem com que esses filtros apresentem baixo rendimento de coleta para partículas submicro-métricas. Na Tab. 7.18 são apresentados alguns valores de eficiência de coleta para partículas com tamanho médio de $8,5\mu\text{m}$ em leitos de 1,5 pol de espessura.

TABELA 7.18 Eficiência de coleta em % de peso de leitos filtrantes

Diâmetro das fibras	70 °F		1400 °F	
	110 pés/min	400 pés/min	400 pés/min	700 pés/min
2	99	98	91	85
8	99	99	94	84
20	—	—	79	71

Ultrafiltros. São filtros raramente utilizados no campo industrial, devido ao alto custo, alta perda de carga, baixa capacidade de armazenamento, e não são passíveis de limpeza. Apresentam altíssimas eficiências de coleta e são utilizados onde essas eficiências se fazem necessárias, como no caso de coleta de partículas radioativas, em sistemas de ventilação de dependências onde a presença de material particulado em suspensão é indesejável. O principal mecanismo de coleta desses filtros é difusão, devido às baixas velocidades de filtração utilizadas (4-5 pés/min).

PERDA DE CARGA

Filtros de tecido. Para maior clareza do que sucede em um filtro de tecido, acompanharemos o apresentado na Fig. 7.8. À medida que a poeira vai se depositando no filtro, a perda de carga vai aumentando gradativamente até atingir um valor máximo, quando o sistema de limpeza é acionado e a poeira coletada é descarregada. Uma vez que nem todas as partículas são descarregadas, o reinício se dá com um residual de perda de carga através da camada de pó depositado (Δp_d), e, assim,

$$\Delta p = \Delta p_o + \Delta p_d, \quad (7.24)$$

onde

$$\Delta p_o = K_o v_f, \quad (7.25)$$

sendo v_f a velocidade de filtração e K_o o fator básico de resistência do tecido, dependente principalmente da espessura da poeira, do tipo de tecido e da intensidade do mecanismo de limpeza.

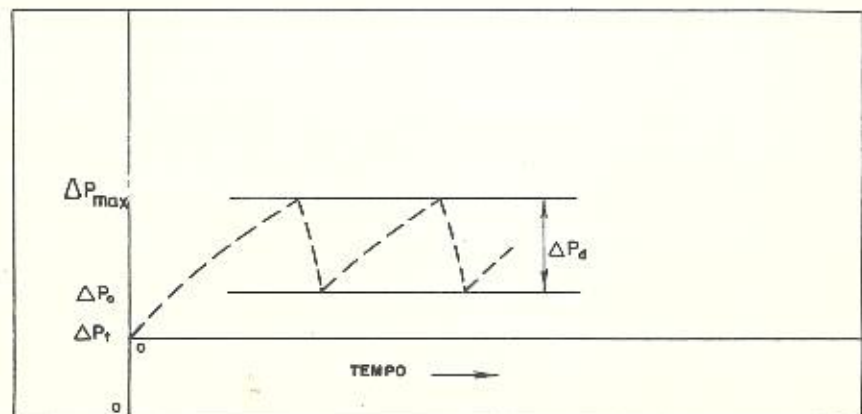


FIGURA 7.8 Variação da perda de carga

TABELA 7.19 Valores de K_0

Tipo de poeira	Área filtrante	K_0	Observações
Coletores de pano em saco			
Moagem de pedra	250	0,83	
Moagem de pedra	250	0,49	
Moagem de pedra	500	0,83	
		0,78	Vibração pneumática para limpeza
		0,75	
		0,74	
		0,79	
Moagem de pedra	2 250	0,79	
Moagem de pedra	9 000	1,01	
Moagem de abrasivos sintéticos	—	0,80	
Moagem de terra seca	500	1,60	
Coletores de pano em manga			
Moagem de pedra	2 150	0,47	
		0,45	
		0,60	
Moagem de pedra	4 300	0,45	
		0,37	
Moagem de pedra	1 500	0,40	
Cinzelamento de pedra	400-1 000	0,17-0,27	
Fumos de solda elétrica	10	0,70	
Poeiras de fundição - desmoldagem	5 200	0,28	
		0,25	
		0,58	
Limpeza a granalha	2 350	0,63	
		0,39	
		0,39	
Limpeza pneumática	950	0,34-0,36-0,59	
Moagem de terra seca	500	0,60	

Na Tab. 7.19 alguns valores de K_0 são apresentados. A partir da relação de Carmem-Kozcny para a perda de carga através de leitos filtrantes, supondo-se constantes a concentração homogênea de poeira, c a velocidade de deposição sobre o tecido chega-se à

$$\Delta p_s = K_1 v_f q, \quad (7.26)$$

onde q é a carga de poeira (onças/pé² de filtro);

$$q = C v_f t, \quad (7.27)$$

e K_1 é o fator básico de resistência da camada de poeira, o qual depende de vários parâmetros do fluido e da camada de poeira;

$$K_1 = \frac{K \mu A_p^2 (1 - \alpha)^2}{\rho_g V_p \alpha^4 \rho_p}, \quad (7.28)$$

onde

$$\begin{aligned}
 K &= \text{constante,} \\
 \mu &= \text{viscosidade do gás,} \\
 \rho_g &= \text{densidade do gás,} \\
 A_p &= \text{área superficial da partícula,} \\
 V_p &= \text{volume da partícula,} \\
 \alpha &= \text{porosidade} \\
 &= \frac{\text{volume de vazio}}{\text{volume total da camada}}, \\
 \rho_p &= \text{densidade da partícula.}
 \end{aligned}$$

Pela Eq. (7.28), vê-se que pequenas variações na porosidade da camada (α) provocam grandes variações em K_1 e, portanto, em Δp_d . Como já foi visto, Δp_d varia com o tempo,

$$\Delta p_d = K_1 C t v_f^2, \quad (7.29)$$

onde t é o tempo (s), C a concentração (onças/pé³), v_f a velocidade de filtração (pés/s), e q = onças/pé² de filtro.

Alguns dos valores de K_1 são apresentados na Tab. 7.20. A Tab. 7.21 apresenta valores práticos de K_0 , K_1 e q . Na prática, os valores de Δp são da ordem de 0,3 a 0,8 pol de H₂O por pé/min, enquanto que se recomendam, como valores de Δp imediatamente antes da limpeza, os da ordem de 4 a 6 pol de H₂O.

TABLA 7.20 Valores de K_1

Tipo de poeira	Carga de poeira no pano, q onças/pé ²	K_1
Moagem de pedra	5	0,18
	12	0,12
	14	0,08
	17	0,12
	22	0,11
	25	0,02
	28	0,07
Moagem de pedra	7	0,16
	8	0,10
	8	0,08
Moagem de pedra	1	0,82
Fundição, limpeza de peças	0,2	0,82
Granalha	0,3	0,25
	1,3	0,25
Pneumática	0,2	0,66
	2,4	0,46
Desmoldagem	0,2	0,50
	0,1	0,68
Jato de areia	7	0,20

TABELA 7.21 Valores práticos de K_0 , K_1 e q

K_0 para filtro de manga	0,25
K_0 para filtro de tecido tipo envelope	0,80
K_1 para poeira	0,20
q para ferramenta pneumática	0,5 a 2 lb/h/homem
q para jateamento de areia	4 a 7 lb/h/homem
q para acabamento superficial	15 a 20 lb/h/homem

Materiais utilizados

Vários tipos de material têm sido testados ou definitivamente usados na confecção de filtros. Cada material usado tem suas vantagens e desvantagens, as quais estão resumidas na Tab. 7.22.

TABELA 7.22 Propriedades dos tecidos dos filtros

Tecido	Temperatura de fusão	Máxima temperatura de operação	Resistência a ácidos	Resistência a alcalinos	Abrasão
Algodão	Decompõe-se a 302 °F	180 °F	Pobre	Muito bom	Muito bom
Lã	Queima a 572 °F	200 °F	Muito bom	Pobre	Razoável a bom
Náilon 6,6	480 °F	200 °F	Razoável	Excelente	Excelente
HT-1	Queima a 700 °F	400 °F	Melhor que o náilon; pior que Dacron e Orlon	Pior que o náilon; melhor que Dacron e Orlon	Bom
Dacron	482 °F	275 °F	Bom para a maioria dos ácidos minerais. Dissolve-se parcialmente em ácido sulfúrico	Bom em bases fracas; razoável em bases fortes	Muito bom
Orlon	Amolece a 482 °F	260 °F	Bom a excelente em ácidos minerais	Razoável a bom em bases fracas	Bom
Creslan	Amolece a 475 °F	250 °F	Bom em ácidos minerais	Bom em bases fracas	Bom a muito bom
Dynel	Amolece a 325 °F	160 °F	Pequeno efeito mesmo a altas concentrações	Pequeno efeito mesmo a altas concentrações	Razoável a bom
Polipropileno	333 °F	200 °F	Excelente	Excelente	Excelente
Terlon	Decompõe-se a 750 °F	Emite gases tóxicos a 450 °F	Inerte, com exceção do flúor	Inerte, com exceção do cloro, trifluoreto e metais alcalinos	Razoável
Fibra de vidro	1 470 °F	550 °F	Razoável a bom	Razoável a bom	Razoável
Filtrol	Amolece a 505 °F	270 °F	Bom a excelente	Bom	Bom a muito bom

Métodos de limpeza

São os seguintes os principais métodos de limpeza de filtros de tecido: por agitação mecânica e raspagem das mangas – estas são agitadas mecânica ou manualmente;

- por ondas sonoras de baixa frequência — uma fonte sonora emite ondas, fazendo vibrar as mangas;
- por meio de colapso das mangas — diferenciais de pressão provocam colapso das mangas, desalojando a poeira coletada;
- por jato de pressão — uma bolha de ar comprimido é injetada no alto da manga;
- por jato reverso — um anel perfurado sopra continuamente ar em sentido inverso, em volta da manga;
- por fluxo reverso — identicamente ao jato reverso, faz-se uma reversão do fluxo gasoso a baixa pressão.

Fatores que afetam a utilização e a eficiência de filtros de tecido

Os principais fatores limitantes da utilização de filtros de tecido são as altas temperaturas dos gases, excessiva umidade (próxima do ponto de orvalho), partículas condensáveis e pegajosas e o grande espaço ocupado.

A eficiência é influenciada por vários fatores e, dentre eles, vale destacar, a velocidade de filtração, a quebra da camada de poeira a deposição heterogênea da poeira, o rompimento das mangas, e as características de tamanho da poeira depositada.

Principais utilizações — vantagens e desvantagens

Filtros de tecido têm sido amplamente utilizados como equipamento de controle da poluição do ar. Algumas das utilizações mais usuais se dão em indústrias de minerais não-metálicos, fornos elétricos de aço, fornos de recuperação de chumbo, dióxido de titânio, cereais, madeira, etc. As principais vantagens são:

- alta eficiência;
- perda de carga não-excessiva;
- resistente à corrosão;

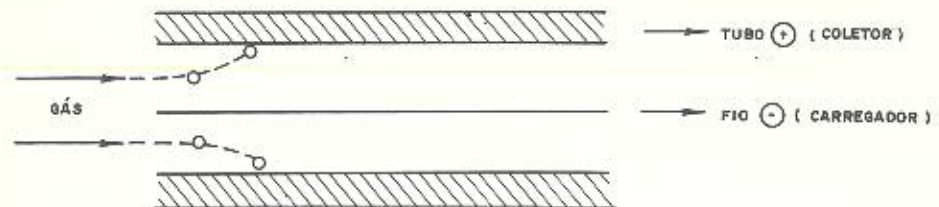
Suas desvantagens são:

- alto espaço requerido;
- alto custo;
- pouca resistência a altas temperaturas;
- empastamento devido a poluentes condensáveis e pegajosos;
- possibilidade de entupimento.

PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS

Princípio de funcionamento

Em contato com uma alta diferença de potencial, o ar se ioniza. Se o fluxo de ar que carrega as partículas passa por uma alta diferença de potencial, o gás se ioniza e os íons chocam-se ou depositam-se nas partículas, carrega-as eletricamente, e faz com que elas migrem em direção ao pólo de carga contrária. Esse é o princípio básico da precipitação eletrostática de partículas, que permite a posterior coleta das mesmas e sua adequada disposição final.



Dentre as várias classificações de precipitadores eletrostáticos, as de maior interesse são as que classificam de acordo com a diferença de potencial utilizada, tipo de corrente corona e número de estágios existentes, ou, respectivamente, de forma reduzida:

Classificação

- 1) a) alta-tensão (30-100 kV)
b) baixa-tensão (10-15 kV)
- 2) a) corona positivo (baixa-tensão – comercial)
b) corona negativo (alta-tensão – industrial)
- 3) a) simples estágio (industrial) tubular
 placas
b) dois estágios (comercial)

Características principais

RENDIMENTO

Precipitadores eletrostáticos apresentam alta eficiência de coleta para uma vasta faixa de tamanho de partículas, desde que garantidas as condições de projeto. Rendimentos de coleta entre 95 e 99% em peso são comuns (de 0,1 a 200 μm).

PERDA DE CARGA

Uma vez que, em precipitadores eletrostáticos, a energia é consumida apenas para carregar as partículas, a perda de pressão é pequena, sendo normalmente da ordem de 0,1 a 0,5 pol de H_2O .

TAMANHO

A velocidade de passagem do fluxo através do precipitador deve ser baixa (de 5 a 10 pés/s) para possibilitar que as partículas se carreguem e que, depois de coletadas, não tornem a entrar no fluxo gasoso. Isso acarretará um aumento do tamanho do precipitador para tratar grandes vazões de gás.

Fatores que afetam a utilização

Os principais fatores intervenientes e sua ação estão resumidos a seguir:
quanto maior a velocidade de migração, maior é o rendimento;
aumentando-se a vazão acima da de projeto, ocorre um decréscimo no rendimento;

as partículas maiores são mais facilmente coletadas;
 quanto maior a área do eletrodo coletor, maior o rendimento;
 quanto maior a viscosidade do gás, menor o rendimento;
 quanto maior a tensão, maior eficiência;
 quanto maior a densidade da partícula, maior a eficiência;
 quando a resistividade da partícula, σ (em $\Omega\text{-cm}$), é

$$\sigma \leq 10^4,$$

o rendimento cai (a carga elétrica muda de sinal); quando

$$\sigma \geq 2 \times 10^{10},$$

o rendimento cai (dá-se o efeito *back corona*). A resistividade elétrica é um dos fatores mais importantes no comportamento da eficiência de coleta de um precipitador eletrostático.

Os limites para a resistividade em precipitadores eletrostáticos para que a coleta se dê eficientemente são:

$$\sigma = 10^{-3} \text{ (carvão),}$$

$$\sigma = 10^{14} \text{ (pó calcário).}$$

A resistividade cresce com a temperatura, atinge um máximo entre 250 e 400 °F e começa a cair. Esse fator deve ser cuidadosamente considerado no uso do precipitador.

Efeito de resistividade elétrica

PARTÍCULAS DE BAIXA RESISTIVIDADE

As partículas de baixa resistividade, ao atingirem o eletrodo coletor, perdem sua carga elétrica quase que instantaneamente, assumindo, dessa forma, a mesma polaridade de eletrodo de coleta. Se as forças de atração molecular entre partículas e eletrodo forem fracas, as partículas serão repelidas em direção ao fluxo gasoso, sendo novamente recarregadas e reprecipitadas até que saiam da zona de influência do eletrodo coletor, escapando assim para a atmosfera.

Para partículas de carvão fortemente condutoras e geralmente de diâmetro grosseiro, a força de atração intermolecular é praticamente desprezível, promovendo o fenômeno de repulsão da partícula em direção ao fluxo gasoso. Para prevenção desse fenômeno, devem ser utilizados pré-coletores para retirada das partículas de carvão, o que resultará em aumento da eficiência de coleta.

PARTÍCULAS DE ALTA RESISTIVIDADE

As partículas de alta resistividade ($> 2 \times 10^{10} \Omega\text{-cm}$) geram o efeito denominado *back corona*. As partículas, ao se depositarem sobre a superfície do eletrodo de coleta, vão formando camadas que chegam a atingir de $\frac{1}{8}$ a $\frac{1}{2}$ pol.

A corrente gerada pelo eletrodo de descarga, para atingir a superfície do eletrodo coletor, deverá atravessar a camada de partículas de alta resistividade formada. Nessas circunstâncias, será criada uma alta diferença de potencial entre a superfície da camada mais afastada e a superfície do eletrodo coletor, que aumentará com o número de novas partículas precipitadas até que o gás

existente nos interstícios da camada existente se ionize, criando centelhamento e emissão de íons positivos, que virão a comprometer as partículas já coletadas, as quais tenderão a se deslocar para o fluxo de ar.

PARTÍCULAS DE RESISTIVIDADE INTERMEDIÁRIA

As partículas de resistividade intermediárias ($10^4 < r < 2 \times 10^{10} \Omega\text{-cm}$) são as apropriadas para coleta em precipitadores eletrostáticos.

CONDICIONAMENTO DAS PARTÍCULAS

O efeito *back corona* só pode ser eliminado com o uso de um agente que condicione a resistividade na faixa de resistividade intermediária.

Agentes condicionantes. Os agentes químicos condicionadores, quando introduzidos no efluente gasoso, formam um filme monomolecular sobre as partículas, estabelecendo um aumento da condutividade, que possibilita a redução da resistividade a um valor abaixo do ponto crítico ($2 \times 10^{10} \Omega\text{-cm}$). Entre os agentes condicionadores podemos incluir a amônia, a trietilamina (usada em partículas de caráter ácido), os sais ácidos, o ácido sulfúrico e o SO_3 (para partículas de caráter básico).

EFEITO DA UMIDADE E DA TEMPERATURA SOBRE A RESISTIVIDADE (Fig. 7.9)

a) A porção crescente da curva varia de acordo com a umidade adsorvida na superfície da partícula. A umidade, juntamente com os agentes condicionadores vai diminuindo com o aumento da temperatura, resultando um aumento de resistividade.

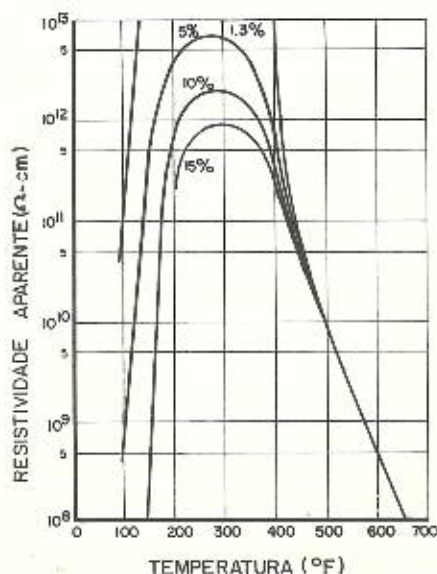


FIGURA 7.9 A curva representa a resistividade superficial de fumos de chumbo provenientes de uma sinterização

- b) A porção decrescente da curva se deve ao aumento da condutividade térmica.
- c) O ponto máximo será atingido quando não houver umidade na superfície da partícula.

Vantagens e desvantagens

As principais vantagens no uso de precipitadores eletrostáticos são:

- a) pode tratar grandes vazões de gás a altas temperaturas;
- b) a perda de carga (pressão) é muito pequena;
- c) apresenta alta eficiência de coleta numa faixa de tamanho de partículas;
- d) os custos de operação e de manutenção são baixos (0,2 a 0,6 HP/1 000 pés³/min);
- e) permite a colocação de células adicionais.

As principais desvantagens são:

- a) alto custo inicial;
- b) requer grande espaço;
- c) apresenta perigos causados pela alta-tensão;
- d) só serve para material particulado.

Principais utilizações

Precipitadores eletrostáticos têm sido freqüentemente utilizados em usinas termoeletricas, fábricas de cimento, aciarias, fundição de metais não-ferrosos e em fábricas de celulose.

CONTROLE DE GASES E VAPORES

INTRODUÇÃO

Entre as várias possibilidades de se separar e coletar um contaminante gasoso de seu meio de solução gasosa, as mais usuais são a absorção, a adsorção, a condensação e a incineração (direta ou catalítica). Cada uma dessas alternativas apresenta impossibilidades, vantagens e desvantagens, fazendo parte do escopo deste capítulo uma rápida abordagem de cada um deles, com o objetivo de fornecer alguns subsídios que auxiliem a opção.

ABSORÇÃO DE GASES E VAPORES

Princípios

Quando um gás ou vapor em solução gasosa é posto em íntimo contato com um líquido no qual ele é solúvel, há transferência de massa do gás para o líquido, proporcionalmente à solubilidade do gás no líquido e ao diferencial de concentração. Nos casos onde, além dessa afinidade física, o gás reage com o líquido (ou com alguma substância nele dissolvida), ocorre a chamada absorção com reação química, fato que geralmente aumenta a eficiência de coleta.

Essa transferência de massa é conseguida em equipamentos onde o soluto (gás ou vapor contaminante) é posto em íntimo contato com o solvente (líquido),

e cujos tipos principais são as torres de enchimento, torres de prato, torres de spray (borrifo) e os lavadores tipo ventúri. Neles a absorção é provocada pelo grau de difusão molecular e turbulenta entre as fases (gasosa e líquida), para o qual várias teorias explanativas existem como, por exemplo, a teoria dos filmes, de Whitman e Lewis, que não serão aqui abordadas, uma vez que o objetivo do capítulo é bem mais superficial.

A escolha do solvente é de grande importância para que altas eficiências sejam obtidas. Alguns desses fatores são: alta solubilidade do gás no líquido, baixa volatilidade do solvente, baixa corrosividade, baixa viscosidade, baixa toxicidade, baixa inflamabilidade, alta estabilidade química, baixo custo e grande disponibilidade comercial. A recuperação do solvente e do soluto é, algumas vezes, economicamente interessante, e o resíduo deve ser adequadamente tratado para evitar problemas de poluição das águas.

Torres de enchimento

A Fig. 7.10 ilustra uma torre de enchimento. Nelas, o íntimo contato soluto/solvente é conseguido através da passagem, usualmente em contracorrente, dos fluidos, através de um enchimento cujos material e forma devem favorecer a maior área superficial de contato possível. O enchimento além dessas características deve ser resistente, quimicamente inerte, e de baixo custo. Os principais tipos de enchimento são mostrados na Fig. 7.11.

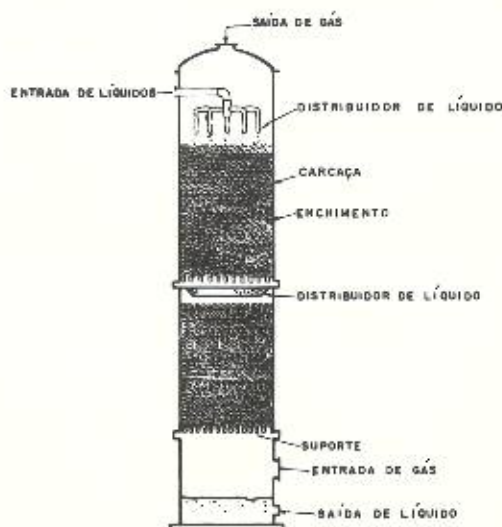


FIGURA 7.10 Torre de enchimento

A capacidade de uma torre de enchimento é determinada pelo ponto de transbordamento (*flooding point*) e pelo ponto de carga (*load-point*). Sendo este de difícil determinação, as torres são projetadas para trabalhar entre 40 e 70% do ponto de transbordamento.

O projeto de uma torre de enchimento implica na determinação do diâmetro da torre, da altura da torre (altura de enchimento), quantidade de solvente



ANÉIS DE RASCHIG



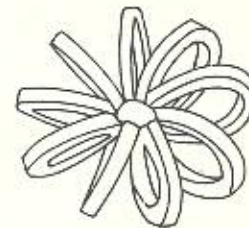
SELA DE BERL



SELA DE INTALOX



ANÉIS DE PALL



TELLERETTE

FIGURA 7.11 Tipos de enchimento

a utilizar (vazão) e perda de carga na torre. Os métodos de cálculo são disponíveis em bibliografia especializada. No entanto dados necessários para projeto são escassos, devendo o leitor utilizar-se das referências para obtenção dos mesmos.

Torres de prato

A diferença existente entre as torres de pratos e as torres de enchimento se relaciona basicamente com o método utilizado para promover o contato íntimo do soluto com o solvente. Nas torres de prato, o contato é feito em vários estágios (pratos) conforme pode ser observado na Fig. 7.12, que ilustra uma torre desse tipo, e na Fig. 7.13, que mostra o detalhe dos borbulhadores no prato. A escolha, além de outros fatores, depende das vazões de gás e de líquido, e do grau de corrosividade.

Comparação entre torres de enchimento e torres de pratos

a) As torres de enchimento com diâmetros inferiores a 2 pés têm menor custo que as torres de pratos. Isso se deve ao tipo de material empregado, que, nas últimas, deve ser resistente à corrosão.

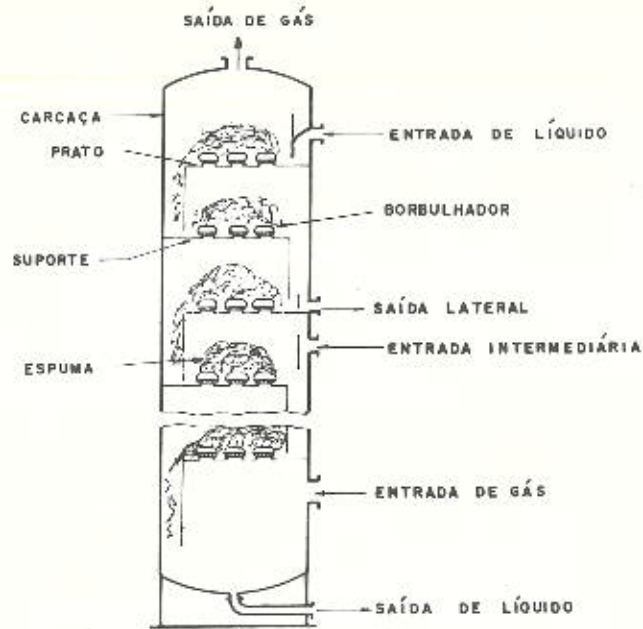


FIGURA 7.12 Torre de pratos

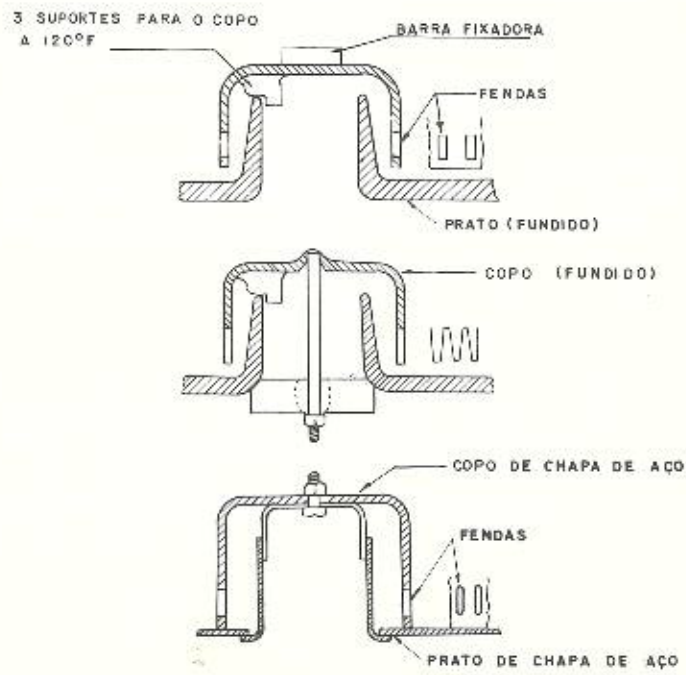


FIGURA 7.13 Detalhe dos borbulhadores

b) As torres de enchimento oferecem menor perda de pressão, sendo mais adequadas em operações a pressões negativas do que as torres de prato projetadas para as mesmas condições.

c) Para os líquidos com tendência a formar espuma, devem ser usadas torres de enchimento.

d) A quantidade de líquido necessária é em geral menor nas torres de enchimento.

e) Quando o líquido contiver material sólido em suspensão, devem ser usadas torres de pratos, pois as de enchimento entopem mais rapidamente.

f) Em torres de grandes dimensões, onde existem problemas de *channelling* e de peso, dá-se preferência às torres de pratos. Nessas circunstâncias, o uso das torres de enchimento fica condicionado à adoção de bandejas de redistribuição de líquido.

g) Quando houver apreciáveis diferenças de temperatura, devem ser usadas as torres de prato, pois a contínua contração e expansão do material usado como enchimento pode causar o colapso do mesmo.

h) Em operações onde exista calor de solução a remover, utilizam-se torres de pratos, uma vez que estas admitem a instalação de serpentina para troca de calor na superfície dos pratos.

O projeto de uma torre de pratos implica na determinação do diâmetro da torre, do número de pratos, do espaçamento entre os pratos, da vazão do solvente e da perda de carga através da torre. Treybal recomenda os dados que seguem como usuais em torres de prato.

DIMENSÕES E CARACTERÍSTICAS RECOMENDADAS EM TORRES DE PRATO

Espaço entre pratos. O espaço entre pratos (l) é função do diâmetro da torre (d):

$d \leq 4$ pés	$l = 6$ pol (mín.)
$d \leq 4$ pés	$l = 18$ à 20 pol
$d = 4-10$ pés	$l = 24$ pol
$d = 10-12$ pés	$l = 30$ pol
$d = 12-24$ pés	$l = 36$ pol

Vazão de líquido. Não deve ultrapassar $0,22$ pés³/s por pé de diâmetro para torres em contracorrente de passagem simples.

Perda de carga por prato. Recomenda-se:

Pressão	Perda de carga
1 atm	0,07 a 0,12 lb/pol ²
300 lb/pol ²	0,15 lb/pol ²

Torres de spray e absorvedores tipo ventúri

A utilização de torres de borrifo e de absorvedores tipo ventúri no controle de gases e de vapores é menor que a das torres de enchimento e de pratos, pois há limitações daqueles com referência à absorção de gases e de vapores. Torres de borrifo e lavadores tipo ventúri estão devidamente caracterizados no item relativo a lavadores usados para controle de material particulado.

ADSORÇÃO

A capacidade de retenção de certos poluentes por substâncias de alta superfície específica (alta porosidade) por forças de atração intermoleculares (Van der Waals) ou por afinidade química, pode ser usada na coleta de poluentes em equipamentos chamados leitos de adsorção. Os materiais capazes de adsorver seletivamente gases e vapores de massa molecular superior a 45 são os chamados adsorvedores, e os mais utilizados são o carvão ativado, a alumina ativada e a sílica-gel.

TABELA 7.23 Adsorção de vários componentes para carvão ativo

Poluente	Índice	Poluente	Índice
Acetaldeído	2	Gás carbônico	1
Ácido acético	4	Monóxido de carbono	1
Acetona	3	Tetracloro de carbono	4
Acroleína	3	Cloro	3
Álcool	4	Cloropicrina	4
Aminas	2	Fumaça de cigarro	4
Amônia	2	Cresol	4
Anestésicos	3	Fumaça de óleo Diesel	3
Odores animais	3	Desinfetantes	4
Benzeno	4	Acetato de etila	4
Odores corporais	4	Etileno	1
Butano	2	Óleos essenciais	4
Álcool butílico	4	Formaldeído	2
Ácido butírico	4	Gasolina	4
Odor de câncer	4	Odores hospitalares	4
Ácido caprílico	4	Cheiro caseiro	4
Gás sulfúrico	3	Álcool isopropílico	4
Agentes mascaradores	4	Mercaptanas	4
Ozono	4	Perfumes e cosméticos	4
Suor	4	Fenol	4
Propano	2	Piridina	4
Frutas amadurecidas	4	Smog	4
Solventes	3	Abafado (lugar)	4
Toluceno	4	Turpentina (Terebintina)	4

4. Alta capacidade para todos os materiais dessa categoria. Uma libra adsorve 20 a 50% de seu próprio peso (média $33\frac{1}{3}\%$). Essa categoria engloba quase todos os odores.

3. Capacidade satisfatória. Adsorve entre 10 e 25% do peso (média 16,7%).

2. Razoável em função das condições de operação, requerendo estudos específicos.

1. Baixa capacidade de adsorção por carvão ativo, não sendo recomendado seu uso.

TABELA 7.24(a) Dados sobre adsorventes

Material	Área, m ² /g	Volume dos poros, cm ³ /g	Diâmetro médio dos poros, Å
Carvão ativo	500-1 500	0,6-0,8	20-40
Sílica-gel	200-600	0,4	30-200
Alumina ativada	175	0,39	90
Terras diatomáceas e fuller	4,2	1,14	22 000

TABELA 7.24(b) Dados sobre adsorventes

Substâncias	Área, m ² /g
Catalisadores ferrosos	0,5-10
Vidro poroso	125
Gel de óxido crômico	185
Sílica-gel	614
Carvão ativo	775
Carvão ativo especial, poro = 15 Å	15 000

Segundo Summer

TABELA 7.25(a) Capacidade de adsorção e retentividade do carvão ativo para materiais orgânicos

Substâncias	Capacidade de adsorção, % peso	Retenção após remoção, % peso
Tetracloroeto de carbono	180-110	27-30
Gasolina	10-20	2-3
Benzeno	45-55	5,9
Metanol	50	1,2
Etanol	50	1,05
Isopropanol	50	1,15
Acetato de etila	57,5	4,87
Acetona	51	3,0
Ácido acético	70	2,5

TABELA 7.25(b) Capacidade de retenção

Solvente	Capacidade de retenção, lb solvente/100 lb carvão	
	Resultados experimentais	Resultados de Sleik e Turk
Metiletilcetona	4-14	25
Tolueno	2,5-20	20
Decano		25
Nonano		25
Turpentina		32
Espíritos minerais	7-24	
Acetato de etila	3-7	19

Como já foi mencionado, nem todos os gases e vapores podem ser adsorvidos. Uma idéia geral dessa capacidade é dada na Tab. 7.23, na qual a possibilidade relativa de adsorção de vários componentes é apresentada para carvão ativo.

A Tab. 7.24 fornece algumas propriedades de adsorvedores usuais, e a Tab. 7.25 fornece dados de capacidade de adsorção e retentividade de algumas substâncias pelo carvão ativo. Os equipamentos usados são, em geral, recipientes metálicos em cujo interior se dispõem leitos de carvão ativado de 0,5 a 3 pés de espessura, através do qual o fluido carreando o poluente a ser adsorvido é feito passar a velocidades da ordem de 30 pés/min (odores) ou 60 pés/min (solventes e outras substâncias). Antes de passar pelos leitos de adsorção o fluido deve ser previamente condicionado, de forma a evitar a presença de partículas em suspensão, excesso de umidade (a umidade relativa deve ser inferior a 50%) e temperatura excessiva (deve ser inferior a 50 °C), para evitar danos ao carvão ativado e queda de eficiência de adsorção.

À medida que o contaminante vai sendo adsorvido, o adsorvedor vai sendo saturado, devendo, ao fim de certo tempo, ser regenerado pela passagem de vapor (100-150 °C). O tempo de serviço de um leito de carvão ativado na adsorção de compostos orgânicos pode ser calculado aproximadamente por

$$t = 1,3 \times 10^4 \frac{w}{QC}, \quad (7.30)$$

onde t é o tempo de serviço (h); w o peso de carvão ativado (lb); Q a vazão do fluido (pés³/min); e C a concentração do contaminante (ppm).

A perda de carga pode ser estimada em função da velocidade, da espessura do leito e da granulometria do carvão com o uso da Fig. 7.14.

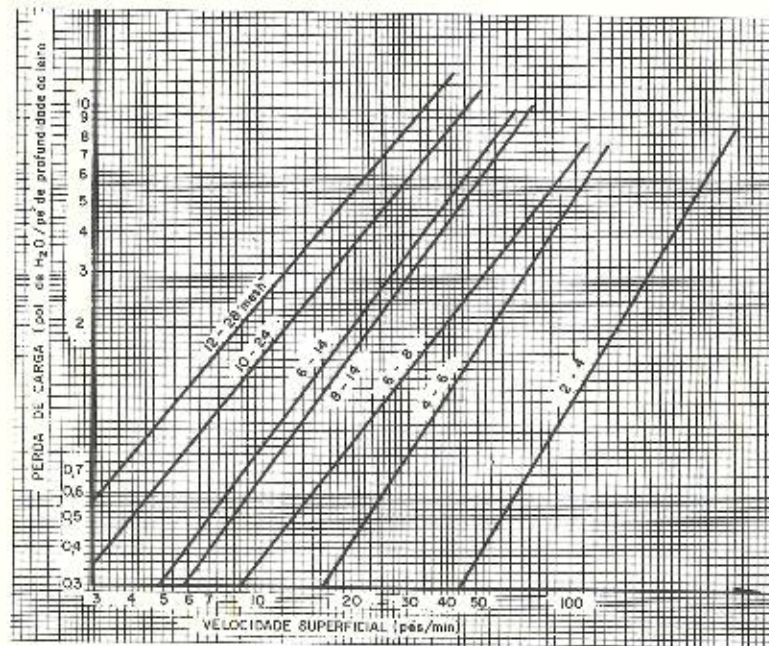


FIGURA 7.14 Perda de carga: leitos de carvão ativo

Leitos de carvão ativado podem coletar com grande eficiência (não depende da concentração) solventes, odores, etc. Na prática as seguintes aplicações são usuais:

- limpeza a seco de tecidos;
- desengraxamento com solventes orgânicos;
- pintura;
- banhos diversos para tratamento de superfícies;
- extração de solventes;
- plastificação e emborrachamento;
- fabricação de produtos químicos e farmacêuticos;
- impregnação de papel e tecidos com resinas;
- fabricação de tintas e vernizes;
- fabricação e beneficiamento de alimentos.

A adsorção é um eficiente método de controle para esses casos e de baixo custo quando as concentrações não ultrapassam 500 ppm, pois, para maiores concentrações, os custos se tornam elevados. Alguns custos de leitos de adsorção estão na Tab. 7.26.

TABELA 7.26 Custo do equipamento (dólares/pés³/min)

pés ³ /min (25 °C, 1 atm)	Concentração do solvente (gal/h por 1 000 pés ³ /min, 25 °C e 1 atm)					
	0,02	1	2,5	5	10	20
1 000	13,00	14,00	16,00	19,00	21,00	22,00
2 000	9,00	10,00	10,00	12,50	16,00	19,50
4 000	6,00	7,75	8,75	10,05	12,00	17,50
8 000	5,25	6,25	7,25	8,45	10,25	15,50
15 000	3,95	4,35	4,75	7,05	9,00	13,00
30 000	3,15	3,40	4,25	6,65	8,40	11,35
60 000	2,35	2,50	3,75	6,25	8,20	
100 000	2,15	2,20	3,30	6,00	8,00	
150 000	1,95	2,00				

INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS GASOSOS

Introdução

O papel desempenhado pelos processos de combustão no problema da manutenção ou poluição dos recursos do ambiente é ambíguo e paradoxal. Os processos combustivos são poluidores mas, com relação a alguns aspectos e tipos de poluição, podem mesmo ser considerados de suma importância. A combustão tem sido largamente empregada como meio de evitar que poluentes sejam lançados nas águas, no ar e no solo. Algumas vezes, entretanto, a utilização de processos de combustão para controlar a poluição de um dos recursos, transforma-se na fonte ou na causa da emissão de poluentes em outro recurso.

Tendo em vista esses importantes e inusitados aspectos do papel desenvolvido pelos processos combustivos, a apresentação e o fornecimento de infor-

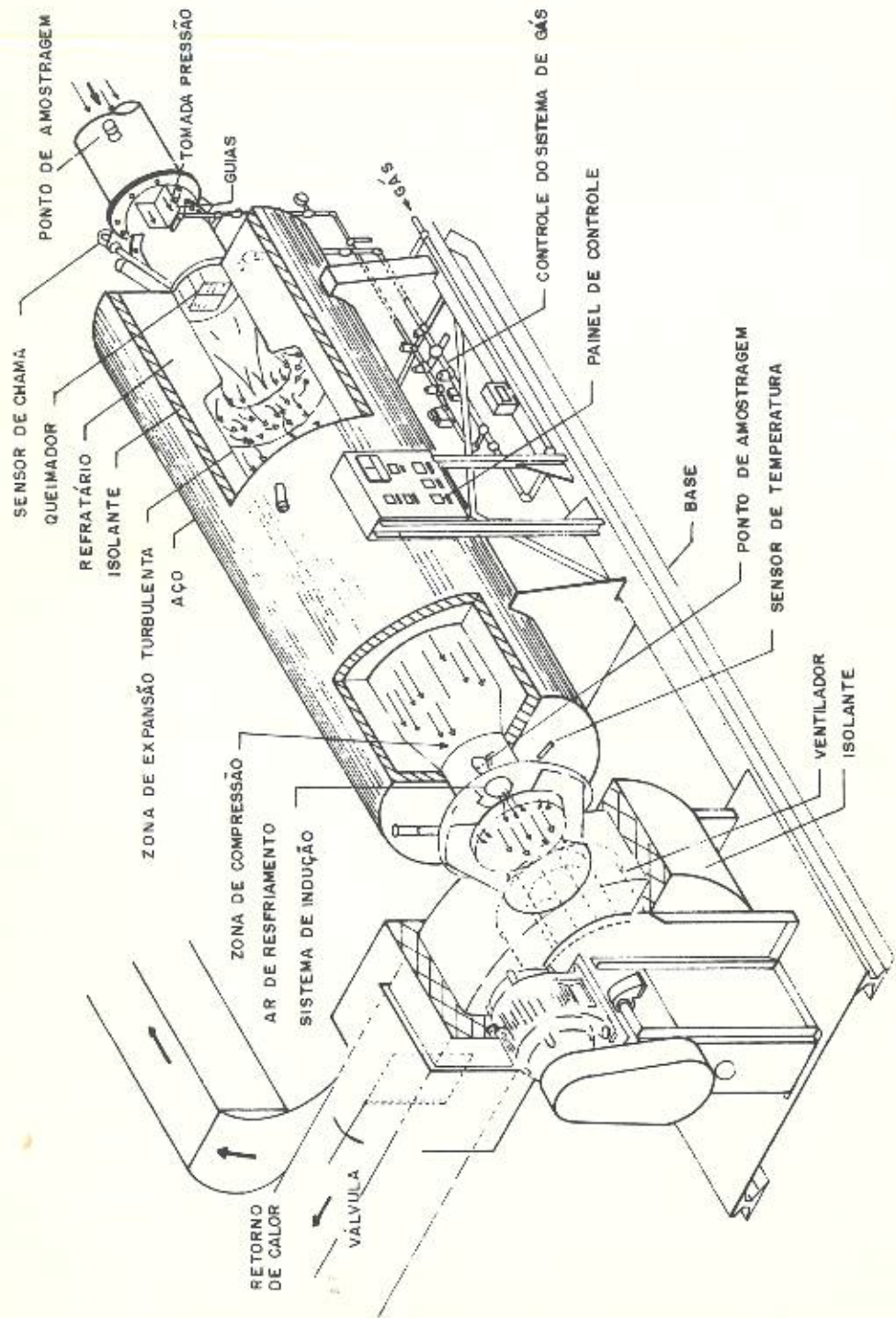


FIGURA 7.15 Pós-queimador de chama direta

mações relacionadas ao uso da combustão de substâncias como método de controle da poluição do ar são necessários.

Como já foi mencionado anteriormente, a queima incompleta de combustíveis dá lugar à emissão de substâncias poluentes tais como monóxido de carbono, material particulado (fuligem), aldeídos, ácidos orgânicos, hidrocarbonetos não-queimados, etc. A presença de enxofre no combustível possibilitará a emissão de dióxido de enxofre, um dos principais poluentes da atmosfera, e cuja quantidade emitida depende basicamente da porcentagem de enxofre contida no combustível. Óxidos de nitrogênio, poluentes emitidos em processos de combustão, são originados pela reação do nitrogênio do ar utilizado. Quanto

TABELA 7.27(a) Temperaturas recomendadas em pós-queimadores (°F)

Indústria	Recomendado por lei de Los Angeles	Dado pesquisado prático	Literatura
Oxidação de asfalto		1 000-2 000	
Fermentação		1 100-1 250	
Torrefação de café	1 200-1 500		1 050
Recobrimento de artigos		1 200-1 500	1 300
Fornos de cura-fundições	1 400	2 000	
Aplicação de cobertura		1 450	
Carbonização de tecido	1 800		
Fritura em gordura	1 200		
Secador de goma de rótulos			1 250
Lã mineral - cura de lã de vidro		1 000*	1 310
Controle de odores em geral	1 300-1 500	1 100-1 250	1 300-1 425
Gás de esgoto	1 300-1 500	1 100-1 250	1 300-1 425
<i>Hardboard tempering</i>		1 200	1 200
Fumaças com óleos e graxa**	1 200-1 400	900*-1 600	
Fornos de secagem de tintas	1 200-1 500	1 100-1 500	1 240
Digestor - fábrica de papel			
Cobertura de tubos	1 400		1 350
Recuperação de restos de animais	1 200	1 200-1 300	1 200
Produtos de borracha		1 300-1 400	1 300
Refino de produtos de petróleo		1 300-2 000	
Impressão e litografia		1 300-1 500	
Fundição e refino		1 300-1 650	
Queima de capa de fio		1 300-1 650	
Operação de defumação	1 200	800*-1 200	
Controle de solventes	1 300-1 500		
Cozinhadores de verniz	1 200	1 000*-1 500	1 200-1 400
Cozinhadores de resinas	1 200	1 000*-1 500	1 200-1 400
Cura de vinil-plastisol	1 200-1 400	1 200	900*
Preparação da madeira			1 200
Recobrimento de fios com resina			1 300-1 400
Anidrido ftálico		1 250-1 440	
Forno de secagem de tecido		1 350	

*Para odor e fumaça. Não destrói fumos

**Recuperação de cavaco, têmpera, banho em óleo

TABELA 7.27(b) Pós-queimador – tempo e temperatura

Categoria	Tempo (s)	Temperatura (°F)
HC(90% +)***	0,3-0,5	1 100-1 250*
HC + CO (90% +)	0,3-0,5	1 250-1 500
Ódores		
(50-90%)	0,3-0,5	1 000-1 200
(90-99%)	0,3-0,5	1 100-1 300
(99% +)	0,3-0,5	1 200-1 500
Fumaças e plumas só		
fumaça branca (100%)	0,3-0,5	800-1 000**
HC + CO (90% +)	0,3-0,5	1 250-1 500
Fumaça preta	0,7-1,0	1 400-2 000

HC, hidrocarbonetos; CO, monóxido de carbono

*Temperaturas de 1 400-1 500 °F podem ser necessárias se o efluente contiver CH₄, Cellosolve ou aromáticos (benzeno, tolueno, etc.)

**Não se recomenda apenas a eliminação da pluma, pois a invisibilidade não elimina a emissão de hidrocarbonetos e odores em geral

***Eficiência de controle entre parênteses

maior o excesso de ar utilizado e quanto maior a temperatura de queima na câmara de combustão, maior será a quantidade de óxidos de nitrogênio formada e emitida.

Convém ainda frisar que, em geral, a quantidade de poluentes emitida depende de vários outros fatores, tais como tipo de combustão, tipo de equipamento onde a combustão se processa, dimensões e projetos desse equipamento, tipo e composição do combustível utilizado, e outros, além das condições gerais de operação e manutenção dos equipamentos.

Tipos principais

Materiais combustíveis lançados na atmosfera através de um efluente gasoso de uma chaminé podem ser queimados a substâncias menos tóxicas ou a substâncias que provoquem menos inconvenientes ao bem-estar público. Gases, vapores orgânicos e outras substâncias odoríferas são mais comumente controlados por incineração. É importante lembrar que a combustão desses resíduos deve ser completa, para evitar que substâncias mais tóxicas ou incômodas que a primitiva sejam lançadas, em consequência da combustão parcial do material.

Os equipamentos (ou métodos) mais empregados para incineração de gases e vapores são os *flares*, os queimadores de chama direta e os queimadores catalíticos. Para os de chama direta, os princípios básicos de combustão são aplicáveis, e as condições exigidas para garantir combustão completa devem ser atendidas. Como norma geral, para garantir a queima completa, todo efluente (velocidades de 15-25 pés/s) deve ser levado a temperaturas entre 900 e 1 400 °F, durante 0,2 a 0,5 s, providenciadas as condições de turbulência e o oxigênio necessário. A Fig. 7.15 ilustra um tipo de pós-queimador de chama direta.

PÓS-QUEIMADORES DE CHAMA DIRETA

Os fatores que promovem uma boa combustão são importantes e devem ser considerados no projeto, na instalação, na operação e na manutenção dos pós-queimadores. Ou seja, no pós-queimador, devem-se providenciar boas condições de turbulência, tempo de residência e temperatura adequada, além de oxigênio, fatores necessários para a completa combustão dos poluentes. Estudos experimentais possibilitaram a obtenção de dados recomendados para projetos de pós-queimadores de chama direta, e estão apresentados na Tab. 7.27.

As principais vantagens do pós-queimador de chama direta residem na alta eficiência de controle de gases, vapores e partículas orgânicas submicrométricas, na fácil construção e manutenção e no pequeno espaço requerido. Seu peso, custo operacional e possibilidade de riscos de incêndios representam as principais desvantagens.

PÓS-QUEIMADORES CATALÍTICOS

Descrição e operação

Esse equipamento é basicamente uma câmara na qual se encontra um leito de catalisador através do qual o poluente combustível, gás ou vapor é forçado a passar. O catalisador é uma substância que aumenta a taxa de combustão e que, teoricamente, não é modificada pelo processo de combustão. A combustão catalítica ocorre na superfície do catalisador sem chama e a uma temperatura bem inferior à temperatura autógena. A combustão catalítica é um fenômeno de superfície, envolvendo a difusão das moléculas reagentes através de um filme fluido estagnado, que envolve o catalisador, adsorção dos reagentes na superfície do catalisador, reação química (oxidação) dos reagentes, adsorção dos produtos de combustão formados e difusão desses produtos de combustão para o fluxo gasoso. O fenômeno de adsorção é exotérmico e, portanto, fornece a energia necessária para a combustão dos reagentes, os quais estão a altas concentrações na superfície do catalisador.

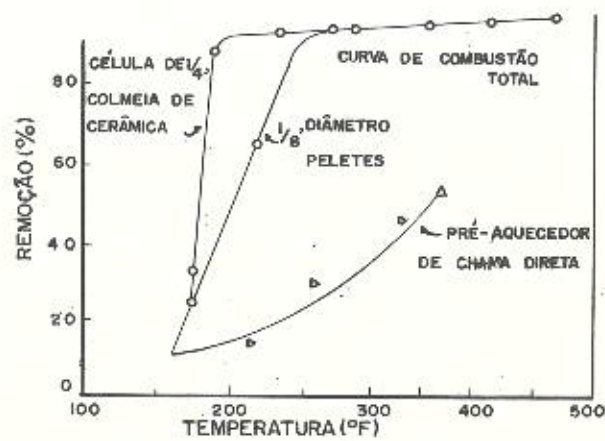
Os elementos catalisadores que vêm sendo utilizados são metais ou óxidos metálicos, especialmente os da família da platina. Uma vez que a combustão catalítica é um fenômeno de superfície, apenas uma pequena quantidade de catalisador é utilizada sobre a superfície de meios de suporte altamente expandidos, isto é, com grande área específica, de forma a se obter, também, uma grande área do catalisador. A Tab. 7.28 apresenta algumas das características do catalisador e do meio de suporte. Alguns fatores que podem influenciar na eficiência de pós-queimadores catalíticos são dados a seguir.

Temperatura do leito de catalisador

A temperatura está usualmente na faixa de 650 a 1 000 °F. Muitas vezes o fluxo gasoso não está nessa faixa de temperaturas, sendo, então necessário um aumento de temperatura. Isso é conseguido passando-se o gás por um pré-aquecedor, onde um combustível auxiliar, usualmente gás, é queimado. As Figs. 7.16 e 7.17 mostram a influência da temperatura de entrada na eficiência de remoção. Essas figuras mostram também a remoção na câmara de pré-aquecimento.

TABELA 7.28 Algumas características de catalisadores para oxidação

Catalisador	Meios de suporte	Composição	Forma	Área superficial específica m ² /g	Densidade, lb/pe ³
MnO ₂	Alumina ativada	19% MnO ₂ 81% Al ₂ O ₃	Tabletes	69	70
MnO ₂	Sílica	2% MnO ₂ 98% SiO ₂	Grãos	258	30
V ₂ O ₅	Alumina inerte	10% V ₂ O ₅ 90% Al ₂ O ₃	Esferas	1	80
V ₂ O ₅	Alumina altamente ativada	10% V ₂ O ₅ 90% Al ₂ O ₃	Tabletes	115	60
V ₂ O ₅	Alumina ativada	10% V ₂ O ₅ 90% Al ₂ O ₃	Esferas	214	61
V ₂ O ₅	Alumina ativada	10% V ₂ O ₅ 90% Al ₂ O ₃	Tabletes	78	59
V ₂ O ₅	Sílica-alumina	10% V ₂ O ₅ 90% sílica-alumina	Tabletes	139	54
Oxidos metálicos	Alumina inerte	5% V ₂ O ₅ 3% MnO ₃ 92% Alumina		1	82
Metal sobre metal	—	60% Ni 20% Cr 20% Fe		—	—

FIGURA 7.16 Eficiência de remoção para *n*-heptano*Peso molecular do hidrocarboneto*

Hidrocarbonetos de baixo peso molecular reagem mais rapidamente devido à maior taxa de difusão, porém a estabilidade da molécula deve também ser considerada. Moléculas muito estáveis são mais difíceis de oxidar. A Fig. 7.18 mostra a influência de um hidrocarboneto de baixo carbono e molécula bem estável, na eficiência de remoção de um queimador catalítico.

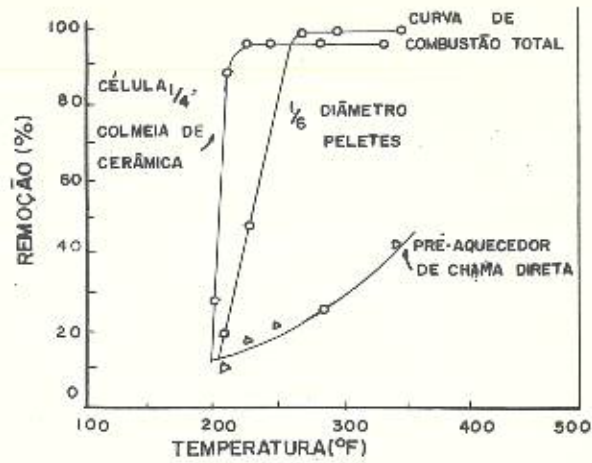


FIGURA 7.17 Eficiência de remoção para tolueno

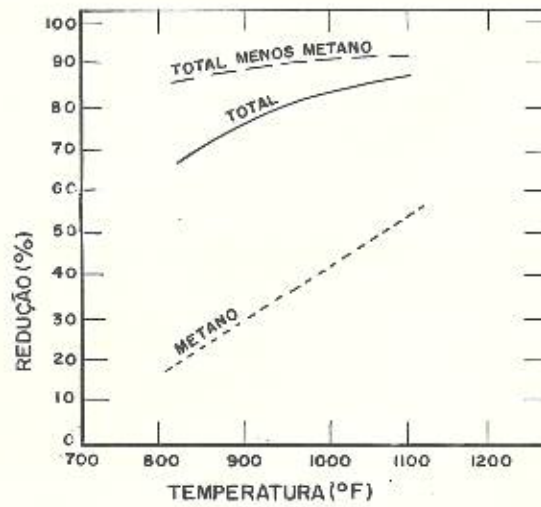


FIGURA 7.18 Influência do metano na eficiência de um pós-queimador catalítico

Contato entre poluente e superfície do catalisador

Vários fatores podem influenciar esse contato, conforme veremos a seguir.

Superfície do catalisador e tipo de fluxo de gás através do leito catalisador. Esses dois aspectos são determinados pelo meio de suporte do catalisador. Quanto maior a área do catalisador por unidade de volume, maior eficiência pode ser esperada. O tipo de caminho seguido pelo gás através do catalisador é um parâmetro importante, conforme se verifica pelas Figs. 7.16 e 7.17. Quanto mais intrincado o caminho, maior a eficiência.

Velocidade do gás. Para melhor contato, devemos ter fluxo turbulento. Porém, acima de um certo valor da velocidade, a eficiência decresce com aumento

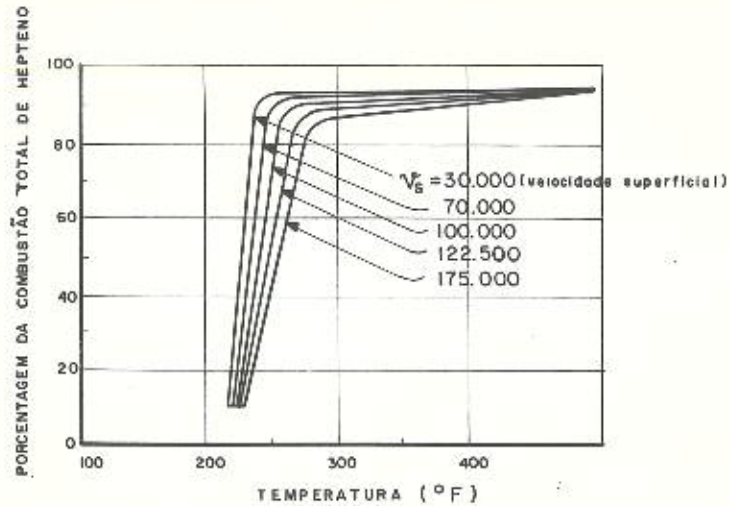


FIGURA 7.19 Efeito da velocidade na eficiência de remoção

na velocidade. Isto é, provavelmente devido a um decréscimo no tempo necessário para que a difusão ocorra. A Fig. 7.19 mostra o efeito da velocidade na eficiência de remoção.

O fluxo através do leito de catalisador deve ser uniforme e isso é em geral obtido colocando-se o ventilador entre a câmara de pré-aquecimento e o catalisador. Também pás direcionais e pratos perfurados podem ser utilizados. A Fig. 7.20 mostra um típico pós-queimador catalítico.

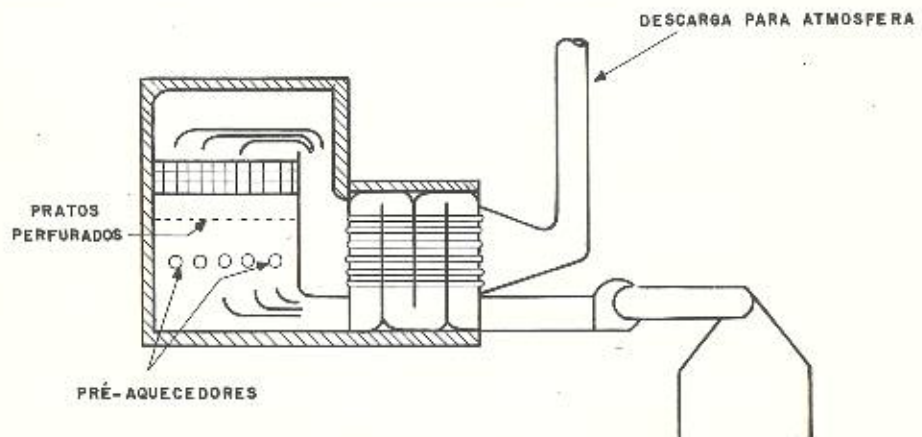


FIGURA 7.20 Pós-queimador catalítico

Vantagens e limitações de pós-queimadores catalíticos

A principal vantagem de um pós-queimador catalítico, em comparação ao de chama direta, é seu baixo custo operacional, devido à menor quantidade de combustível utilizado.

Uma das limitações de pós-queimadores catalíticos é que o fluxo gasoso não deve conter material particulado ou gotas de material orgânico, os quais devem ser evaporados antes de passar pelo catalisador. Esse material particulado ou gotas pode entupir ou danificar o catalisador. Devido à baixa taxa de difusão de partículas, a combustão catalítica não é efetiva para material particulado. Também os produtos de combustão dos vapores orgânicos devem estar na fase gasosa. Outra limitação dos pós-queimadores catalíticos é que algumas substâncias podem "envenenar" o catalisador e, portanto, não devem estar presentes no fluxo gasoso. Algumas dessas substâncias são vapores de metais, tais como mercúrio, arsênico, zinco e chumbo.

Os requisitos de manutenção são maiores nos pós-queimadores catalíticos do que nos de chama direta. O catalisador apresenta uma gradual perda de atividade devido à sujeira e ao desgaste. E, ainda, nenhum fluxo gasoso está completamente livre de partículas; portanto limpezas periódicas e eventual troca do catalisador podem ser necessárias. Normalmente a limpeza do catalisador é conseguida pela simples lavagem com água.

CONTROLE DE VAPORES ATRAVÉS DE CONDENSAÇÃO

Em caso de o poluente ser emitido na forma de vapor, o controle pode ser atingido, transformando esses poluentes para a fase líquida e retendo-os nessa fase. A transformação de um vapor para líquido se faz com um condensador que opera através de um aumento de pressão ou retirando calor do poluente. Nos casos práticos de controle de poluição do ar, os condensadores operam pela retirada de calor.

Em controle de poluição do ar, a condensação pode ser usada como um tratamento único ou ser parte de um tratamento mais complexo. Neste último caso, os vapores, após passarem pelo condensador, seriam encaminhados a um outro equipamento de controle, por exemplo, um pós-queimador. Isso é feito para reduzir a carga do equipamento mais caro, ou para recuperar parte dos poluentes ou para proteger o outro equipamento contra corrosão ou outros danos, ou, ainda, para se atingir um nível de controle que o condensador sozinho não conseguiria.

Os condensadores podem ser de dois tipos: de contato direto ou de mistura, e de contato indireto ou de superfície. O meio de resfriamento é um líquido e, para a grande maioria dos casos, esse líquido é a água.

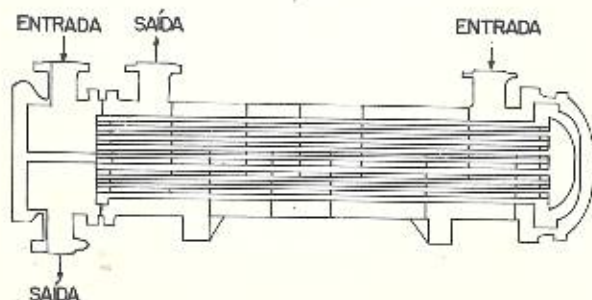


FIGURA 7.21 Típico condensador de superfície

Condensadores de superfície

A maioria dos condensadores de superfície é do tipo multitubular, conforme mostra a Fig. 7.21. A água flui por dentro dos tubos e os vapores condensam-se do lado da carcaça, apesar de que, em alguns casos, pode ocorrer o contrário, ou seja, vapor dentro dos tubos e água do lado da carcaça. Nesse tipo de condensador, em geral a água é recirculada após ser resfriada numa torre de resfriamento.

Condensadores de mistura

Nesse tipo de condensador, o líquido de resfriamento, normalmente água, entra em contato direto com os vapores que se quer condensar. São equipamentos de projeto simples, conforme mostrado na Fig. 7.22.

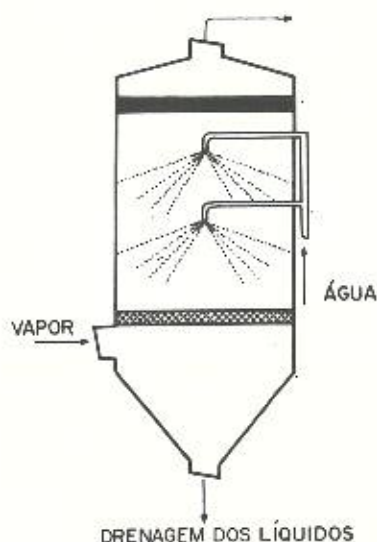


FIGURA 7.22 Típico condensador de contato direto

Vantagens e desvantagens dos dois tipos de condensadores

Quando comparados com os condensadores de superfície, os condensadores de mistura são equipamentos mais flexíveis, são mais simples e consideravelmente mais fáceis de construir, portanto mais baratos. Por outro lado, condensadores de superfície necessitam uma quantidade de água bem menor para operar e, portanto, produzem uma quantidade bem menor de condensado. Note que, no condensador de contato direto, o condensado se constitui da água introduzida mais os poluentes retidos; logo, essa água residual poderá ocasionar um problema de poluição, necessitando, portanto, de um tratamento antes de ser reaproveitada ou lançada no esgoto.

Os condensadores de superfície são os indicados para recuperar produtos que ainda têm valor econômico. Esses condensadores de superfície usualmente necessitam mais equipamentos auxiliares e requerem maior manutenção que os condensadores de mistura.

Os condensadores de mistura, em geral, são mais eficientes para o controle de poluição do ar que os de superfície. Isso se deve à grande quantidade de água introduzida, cerca de 15 lb de água a 60 °F são necessárias para condensar 1 lb de vapor de água a 212 °F, e resfriar o condensado a 140 °F. A diluição resultante de 15:1 reduz bastante a concentração e a pressão de vapor das substâncias que estão em solução ou misturadas com a água.

Utilização de condensadores

No controle de poluição do ar, os condensadores são utilizados, na maioria das vezes, como pré-tratamento para outros equipamentos, tais como pós-queimadores, adsorvedores e filtros de manga. O uso de um condensador é particularmente desejável quando uma grande parte do fluxo gasoso, que carrega os poluentes, é constituída de vapor de água, como, por exemplo, o efluente de uma autoclave de cozimento de restos de animais. Nesse caso, os poluentes (substâncias odoríferas) estão disseminados em vapor de água, que constitui o fluxo gasoso a ser tratado. Passando-se esses gases inicialmente por um condensador, reduzimos bastante o volume dos mesmos, pois, além de condensar parte dos poluentes, ainda condensamos uma grande parte do vapor de água. Os gases restantes, que carregam os poluentes incondensáveis, podem agora ser tratados em um pós-queimador com sensível economia de combustível, pois o volume a ser tratado é bem menor.

Outro exemplo de aplicação de um condensador seria o de utilizá-lo como pré-tratamento de vapores orgânicos, que teriam um tratamento final por adsorção. O condensador, condensando parte dos poluentes, faria com que apenas os incondensáveis fossem para o leito de carvão ativo, aumentando, portanto, o tempo de vida do leito de carvão.

A condensação apenas raramente atinge as necessidades de controle de poluição do ar, não só por seu próprio princípio de operação — isto é, ela tende a fazer com que os gases saiam saturados à temperatura de saída —, mas, também, porque usualmente são emitidos vários poluentes conjuntamente e, entre eles, alguns são incondensáveis.

O projeto de um condensador vai depender do tipo do poluente emitido e dos vapores condensáveis, bem como da concentração com que eles ocorrem no fluxo gasoso a ser tratado.

8 VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

INTRODUÇÃO

Após instalado, um sistema de ventilação deve ser verificado quanto a sua eficiência de funcionamento, tendo-se em vista as características de projeto. Essa verificação deve ser periodicamente efetuada, com a finalidade de garantir-se a manutenção da eficiência de funcionamento do sistema. A verificação consiste basicamente na avaliação das seguintes características:

- vazão exaurida em cada captor;
- velocidade de transporte nos diversos tramos;
- pressão estática e vazão do ventilador;
- perda de carga do sistema.

Essas medidas são realizadas com instrumentos específicos para esse propósito, a respeito dos quais passaremos a discorrer.

MEDIDORES DE VELOCIDADE E DE VAZÃO

Como já sabemos (veja o capítulo sobre princípios de mecânica dos fluidos), a vazão e a velocidade, numa seção transversal de um duto por onde se dá o escoamento de um fluido, estão relacionadas através da equação da continuidade. De forma simplificada,

$$Q = A \times v_{med} \quad (8.1)$$

(Q é a vazão, A a área, v_{med} a velocidade média). Dessa forma, a determinação de v_{med} implica no conhecimento da vazão, pois a área da seção transversal é facilmente determinada. Os principais instrumentos para medida de volume, velocidade e vazão são abordados a seguir.

ESPIRÔMETRO

Por não ser portátil e apresentar exígua faixa de vazão, esse instrumento é fundamentalmente usado em laboratório como padrão primário de calibração de outros instrumentos de campo. O espirômetro (Fig. 8.1) é um instrumento de deslocamento positivo e consiste num cilindro de volume conhecido, fechado em uma extremidade, e tendo a outra submersa em um tanque de água. O cilindro pode ser aberto ou fechado à atmosfera através de uma válvula. Durante a calibração de outro instrumento, o ar do cilindro do espirômetro é forçado a

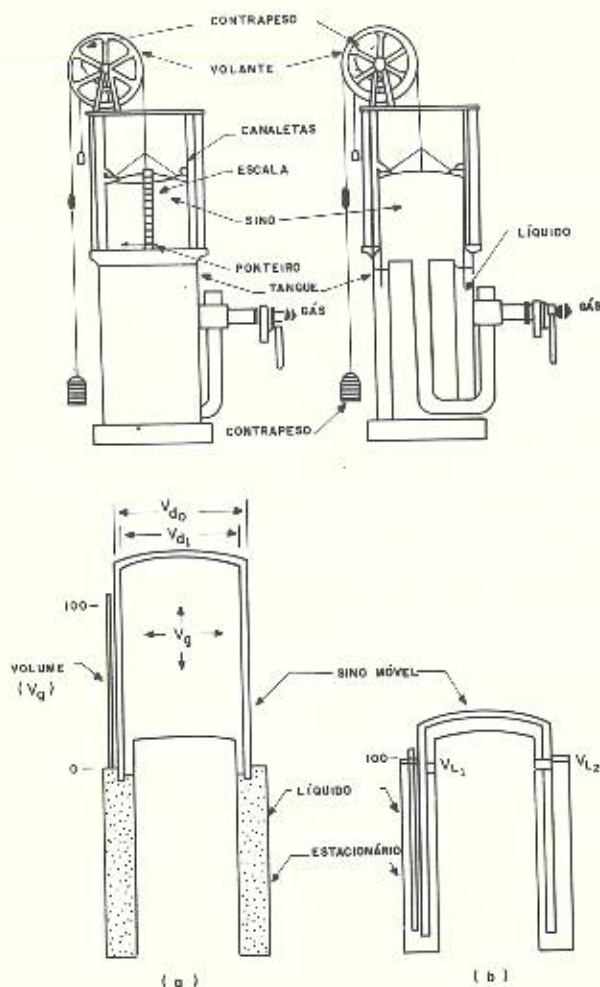


FIGURA 8.1 Espirômetro

passar pelo instrumento, sendo reposto por água à medida que o cilindro submerge. Através da determinação do deslocamento vertical do cilindro e do tempo gasto, o volume do fluxo que passa através do instrumento a ser calibrado pode ser determinado. Durante o procedimento, deve-se estar atento para alguns requisitos:

- deve haver equilíbrio térmico entre a água e o ar;
- o cilindro interno deve estar perfeitamente centrado;
- o sistema deve estar perfeitamente nivelado;
- para evitar a influência da inércia do sistema, deve-se fazer a leitura inicial após o início do movimento, e leitura a final antes da parada do cilindro.

O uso do espirômetro é sugerido para calibração de padrões secundários de baixa resistência e baixas vazões.

GASÔMETROS ÚMIDO E SECO

Esses medidores indicam o volume do fluido gasoso que passa, ou seja, para a determinação da vazão é necessário um cronômetro. Os gasômetros a úmido são instrumentos exatos (considerados padrões secundários) cujos erros não excedem 0,1-0,2% quando calibrados. Esse equipamento requer calibração, uma vez que não há possibilidade de se medir efetivamente o volume dos compartimentos. Como já foi mencionado, sua calibração é feita geralmente com um espirômetro, obtendo-se uma curva de calibração que é mantida por um período de tempo razoavelmente longo. As principais desvantagens de seu uso residem no peso e nas elevadas dimensões, em comparação com a faixa de vazões que pode medir (cerca de 1 200 pés³/h) e da pressão (0,25-0,5 pol de H₂O), o que faz com que esses equipamentos tenham utilização preferencial em laboratórios e pouca utilização no campo.

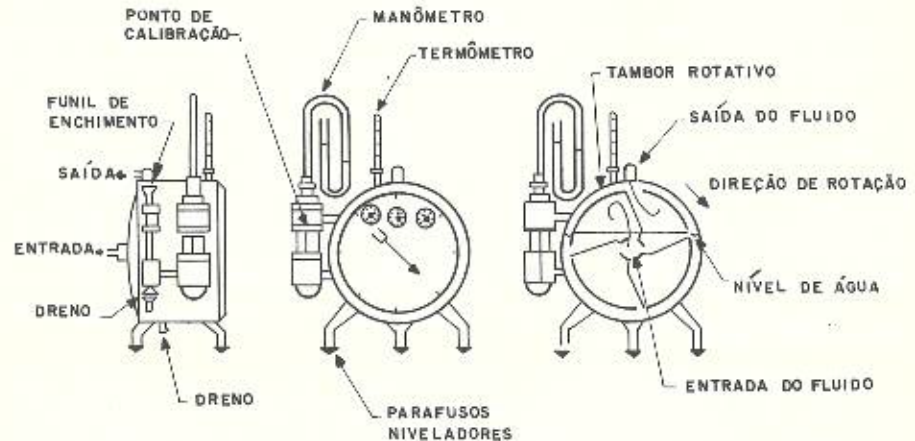


FIGURA 8.2 Gasômetro úmido

Os gasômetros secos utilizam o mesmo princípio, mas dispensam o uso da água, o que os torna menos exatos. Têm maior utilização em trabalhos de campo por serem bem mais leves e rústicos. Finalmente, vale mencionar que esses gasômetros não devem ser usados em fluxos oscilantes.

MEDIDORES DE TURBINA

Estes medidores são muito úteis para medidas de vazões líquidas em dutos, podendo também ser utilizados para medir vazões de fluidos gasosos. O medidor de turbina se parece com anemômetros (serão vistos posteriormente), onde o rotor é totalmente fechado e a rotação do referido rotor é uma medida da velocidade. Esses medidores podem indicar vazões de até 60 000 m³/h, com uma exatidão de $\pm 1\%$, o que os faz superiores aos gasômetros.

MEDIDORES DE BOLHA DE SABÃO

É o mais simples dos medidores de vazão e muito utilizado para medição de pequenas vazões, em laboratórios, e como padrão primário para calibração de outros medidores de pequenas vazões de amostragem.

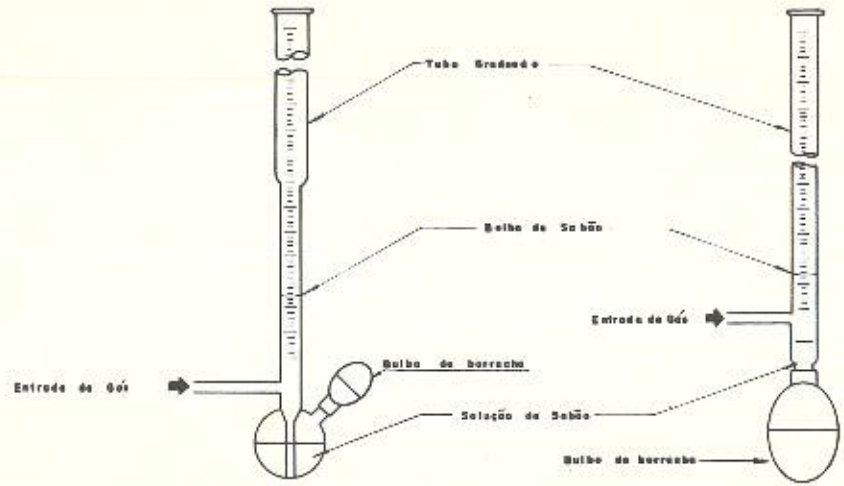


FIGURA 8.3 Medidores de bolha

Trata-se de um tubo de vidro, graduado, no qual se mede o tempo que a película de sabão leva para percorrer um volume conhecido. Esse método tem sido desenvolvido para medir pequenas vazões (até cerca de $75 \text{ pés}^3/\text{h}$). A exatidão da medição de tempo tem sido melhorada com a utilização de detectores fotoelétricos para acusar a passagem da película de sabão. O erro total na determinação de vazões com medidores de bolha está dentro de $\pm 0,5\%$.

ROTÂMETROS

São medidores de vazão de leitura direta. Trata-se de um tubo de forma troncônica contendo em seu interior uma esfera ou corpo de forma especial, pelo qual se faz passar o fluxo gasoso cuja vazão se deseja conhecer. O flutuador é suspenso pela passagem do fluxo, e sua posição relativa à escala gravada no cilindro fornece a vazão. Os flutuadores podem ter as mais variadas formas geométricas, sendo a esférica a mais comum. Outras formas de flutuadores (mais estáveis) estão na Fig. 8.5.

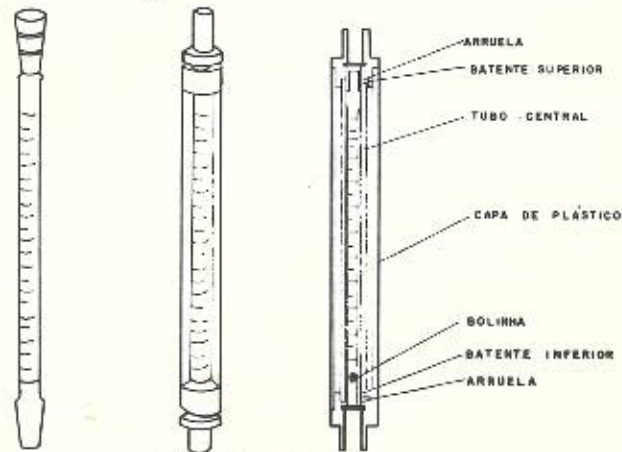


FIGURA 8.4 Rotâmetros

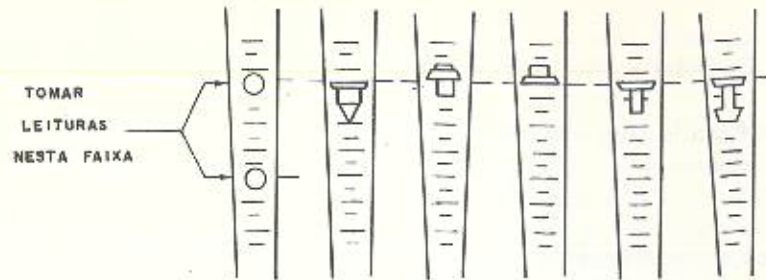


FIGURA 8.5 Outros tipos de flutuadores

Na posição de equilíbrio, o flutuador tem seu peso equilibrado pela força causada pela passagem do fluxo gasoso. A instabilidade da posição do flutuador é um dos principais inconvenientes desse medidor. Como já foi mencionado, a forma esférica é uma das mais usadas, apesar de ser uma das mais instáveis, devido à variação da resistência para pequenas mudanças no número de Reynolds do escoamento. Além disso, esferas tendem a entrar em rotação, com a conseqüente criação de uma força lateral que tende a deslocá-la da posição central do tubo em direção às paredes.

Rotômetros são úteis como indicadores em casos onde a vazão deve ser continuamente acertada para permanecer constante, pois tendem ser facilmente instalados no circuito, de forma a ficarem visíveis para o operador. A teoria de funcionamento de rotômetro pode ser resumida da seguinte forma: a força exercida pelo fluxo (resistência) pode ser expressa como

$$F = k_r \rho A v^2, \quad (8.2)$$

onde F é a força exercida pelo fluido no flutuador, k_r o coeficiente de resistência, A a área da maior seção transversal do flutuador, v a velocidade do fluido, e ρ a densidade do fluido. Nas condições de equilíbrio,

$$F = \text{peso do flutuador } (P),$$

ou

$$k_r \rho A v^2 = V_f (\rho_f - \rho) g, \quad (8.3)$$

sendo V_f o volume do flutuador, ρ_f a densidade do flutuador e g a aceleração da gravidade.

Nos casos usuais de ventilação industrial, a densidade do fluido é desprezível, em comparação com a do flutuador, e temos, para um dado rotômetro,

$$k_r \rho A v^2 = \text{constante}. \quad (8.4)$$

Em geral, para um dado flutuador, k_r depende do número de Reynolds. Algumas formas de flutuadores são desenvolvidas de modo tal que a variação de k_r com o número de Reynolds seja muito pequena para amplas variações de Re , e pode-se escrever

$$Q \sqrt{\rho} = \text{constante}. \quad (8.5)$$

Se o instrumento for usado em condições de temperatura e pressão (p_2 , T_2) diferentes das condições de calibração (p_1 , T_1), o valor real de Q será obtido pela

relação

$$Q = Q_{lido} \times \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (8.6)$$

Quando k , varia com o número de Reynolds, a equação passa a

$$\frac{Q\rho}{\mu} = \text{função de } \left(\frac{\rho}{\mu^2}\right), \quad (8.7)$$

sendo μ a viscosidade. Essa equação serve para construir várias curvas de calibração, o que possibilita a utilização de um dado rotâmetro para determinar vazões de gases com diferentes densidades e viscosidades.

Os rotâmetros são usados para medir vazões líquidas e gasosas. Para fluidos gasosos, uma ampla faixa de vazões pode ser medida com esses medidores (de 0,2 a 3 000 pés³/min) com exatidão de $\pm 2\%$ do valor indicado.

TUBO DE PITOT

No capítulo relativo a princípios de mecânica dos fluidos, os conceitos de pressão estática, cinética, etc., bem como as principais equações relativas ao escoamento de fluidos, foram enfatizados. Uma das aplicações práticas desses conceitos e equações é a determinação de velocidades e vazões em seções transversais em dutos com o auxílio do chamado tubo de Pitot, esquematizado na Fig. 8.6.

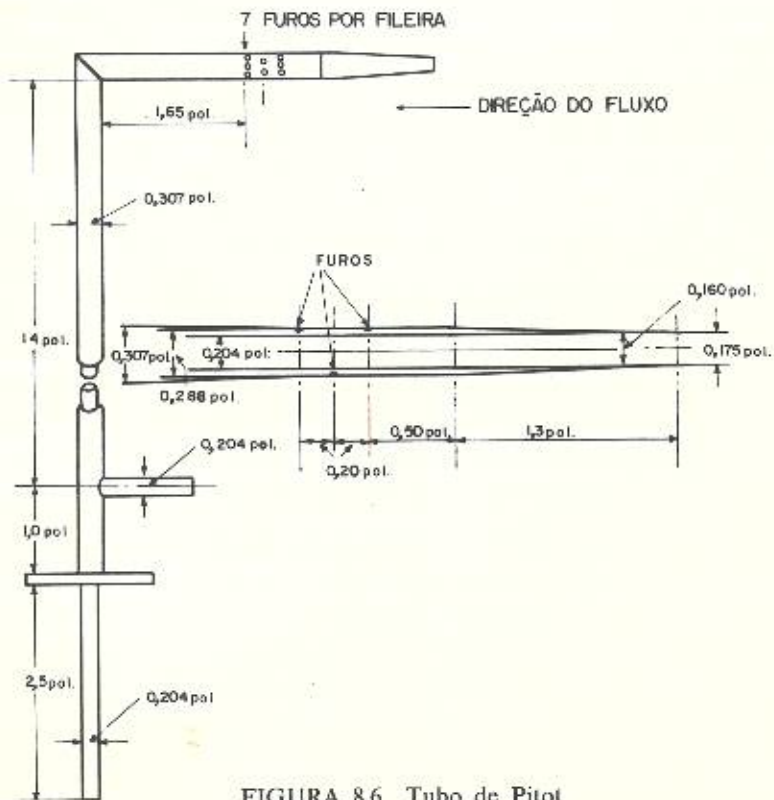


FIGURA 8.6 Tubo de Pitot

Através do tubo de Pitot, podemos conhecer a pressão cinética (p_{cin}), em um ponto da seção transversal, que está relacionada com a velocidade,

$$v = \sqrt{2gp_{cin}}. \quad (8.8)$$

Uma vez que, numa dada seção transversal, o perfil de velocidade é característico do regime de escoamento atingido, localizando-se seu valor máximo no centro da tubulação, há necessidade de avaliar-se a velocidade média na seção para, dessa forma, calcular-se a vazão média através da equação da continuidade,

$$Q_{med} = v_{med}A. \quad (8.9)$$

A velocidade média é calculada por

$$v_{med} = 1/n \sum_{i=1}^n v_i, \quad (8.10)$$

onde v_i é a velocidade em cada ponto e n é o número de pontos em que a velocidade é determinada.

O problema do número de determinações (n) de velocidades na seção transversal tem sido equacionado para seções transversais de dutos circulares e quadrangulares. Em dutos circulares, a seção transversal é dividida em equiáreas, e a relação seguinte fornece o valor da distância dos pontos de medida ao centro do duto em função do diâmetro interno do duto,

$$L_{2n-1} = r \sqrt{\frac{2n-1}{2n}}, \quad (8.11)$$

sendo r o raio do círculo e L_n a distância do ponto de medida ao centro do círculo.

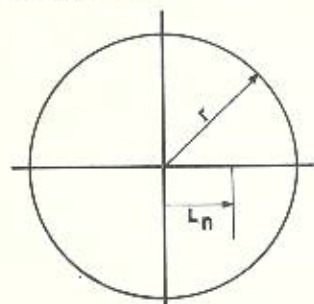


TABELA 8.1 Número de leitura

Diâmetro do duto (pol)	Área transversal (pé ²)	Número de pontos de leitura
até 12	1,0	6
12 à 24	3,0	8
24 à 48	12,0	20
48 à 60	20,0	24
60 ou mais	+ 20,0	Depende do perfil de velocidades

Para evitar cálculos, utilizam-se tabelas práticas já existentes (Tabs. 8.1 e 8.2). A Tab. 8.1 nos dá o número de pontos (n) em que se deve determinar a pressão cinética. Para se localizar esses pontos na seção transversal, usa-se a Eq. (8.12), que dá as distâncias dos pontos onde se vai determinar a pressão cinética ao centro do círculo (L_n), conforme representado na figura que segue.

$$L_n = d \sqrt{\frac{2n-1}{4N}}, \quad (8.12)$$

sendo d o diâmetro da chaminé, ou tubulação, N o número de leituras, n a enésima área, contada a partir do centro, e L_n a distância do centro ao ponto. A Eq. (8.12) é equivalente à Eq. (8.11), utilizando-se o diâmetro da seção transversal do duto, ao invés do raio da mesma.

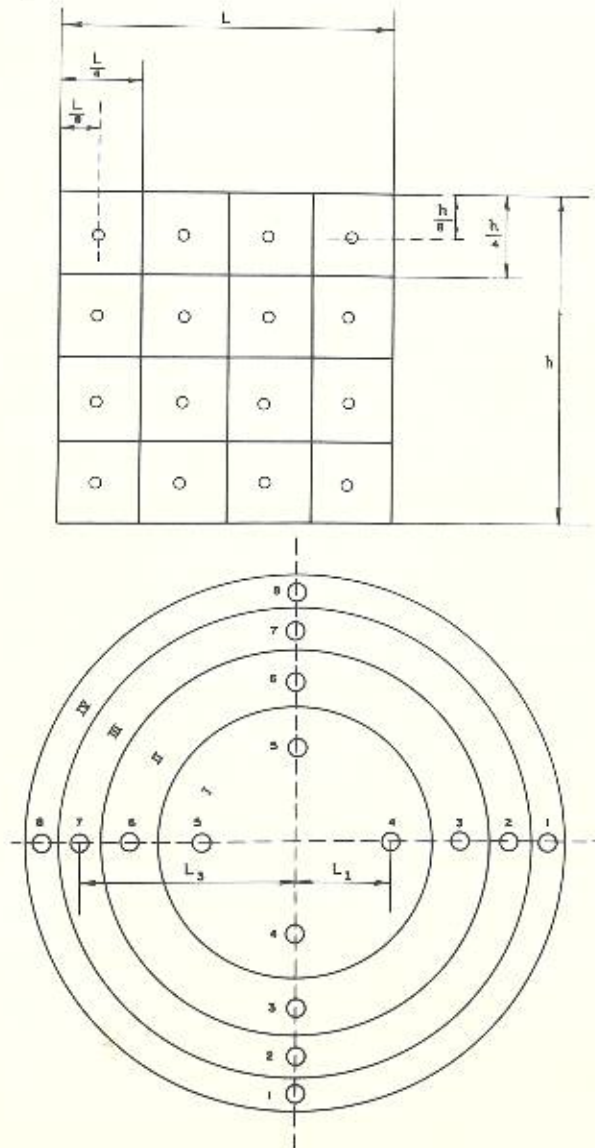


TABELA 8.2 Áreas iguais: porcentagem do diâmetro da chaminé ao ponto de amostragem

Ponto n.º	Número de pontos				
	4	6	8	10	12
1	6,2	4,4	3,3	2,2	2,0
2	25,0	14,7	10,5	8,2	6,7
3	75,0	29,4	19,5	14,5	11,8
4	93,8	70,6	32,1	22,7	17,7
5		85,3	67,9	34,4	25,0
6		95,6	80,5	65,6	35,4
7			89,5	77,3	64,6
8			96,7	85,5	75,0
9				91,8	82,3
10				97,8	88,2
11					93,3
12					98,0

A seção transversal escolhida para se fazer a determinação deve estar distante, pelo menos dez vezes o diâmetro do duto, de singularidades que provoquem distúrbios no perfil de velocidades. Dessa forma, determinam-se vários valores da pressão cinética (p_{cin_i}) e calculam-se as várias velocidades (v_i), onde $i = 1, 2, \dots, n$.

$$v_i = \sqrt{2g(p_{cin_i})}. \quad (8.13)$$

Em geral, para sistemas de ventilação, o fluido exaurido pode ser considerado como ar em condições ambientes, e

$$v_i = 4005 \sqrt{p_{cin_i}}, \quad (8.14)$$

sendo v_i a velocidade (em pés/min) e p_{cin_i} a pressão cinética (em pol de H_2O). Em outras condições, a pressão cinética deve ser corrigida multiplicando-se por k ,

$$k = \frac{P_{e0}}{P_e}, \quad (8.15)$$

onde P_{e0} é o peso específico do ar em condições ambientes e P_e o peso específico do ar nas condições do sistema. Pode-se então calcular a velocidade média e a vazão média na seção. Para determinações rápidas e de menor importância,

$$v_{med} = 0,9v_c, \quad (8.16)$$

onde v_c é a velocidade no centro da seção transversal.

A utilização do tubo de Pitot-padrão é desaconselhada quando o fluido carrega uma grande quantidade de partículas, pois estas entopem os orifícios sensores da pressão estática, falseando os resultados.

O tubo de Pitot S resolve parcialmente esse problema, mas exige calibração constante. Deve-se observar que a precisão das determinações feitas com tubo de Pitot depende muito das características do manômetro utilizado. A utilização de manômetros inclinados, cuidadosamente nivelados, permite leituras exatas de velocidades da ordem de 500 pés/min.

Alguns fatores de ordem prática, na utilização de tubo de Pitot, devem ser considerados. Inicialmente devem ser tomadas precauções para que a colocação

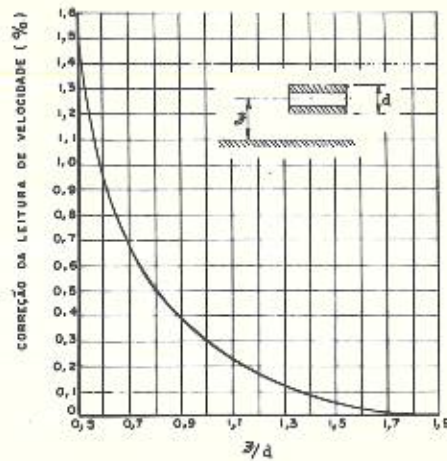


FIGURA 8.7 Fator de correção

do tubo de Pitot se situe perfeitamente na direção do fluxo e com o bico voltado contra o sentido do fluxo. Os buracos feitos no duto devem permitir a entrada do tubo de Pitot sem, no entanto, ser tão grandes que provoquem vazamento, com conseqüente distúrbio no fluxo.

Não é aconselhável a utilização do tubo de Pitot quando o diâmetro do duto é muito reduzido (o diâmetro do duto deve ser igual ou maior que 26 vezes do diâmetro do tubo de Pitot). Caso contrário, haverá alguns efeitos, devido à proximidade excessiva da parede do duto, sendo necessárias correções da leitura feita. A Fig. 8.7 ilustra um caso em que há necessidade de correção. O formato da ponta do tubo de Pitot e seus efeitos têm sido estudados, chegando-se a conclusões como as indicadas na Fig. 8.8.

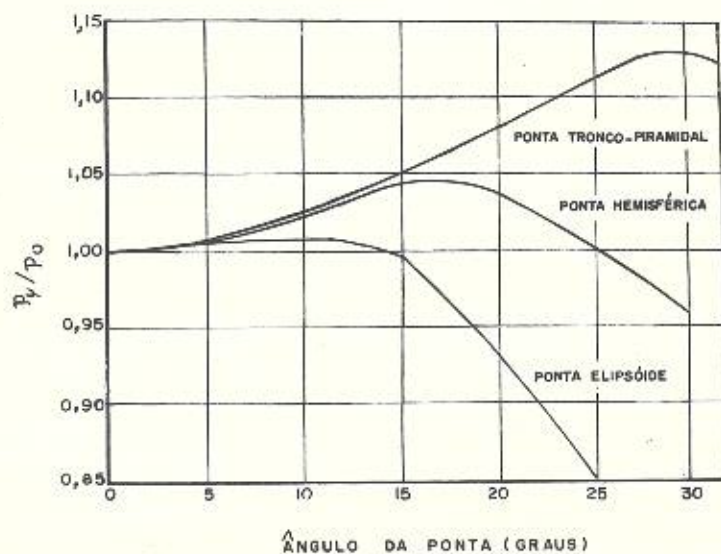
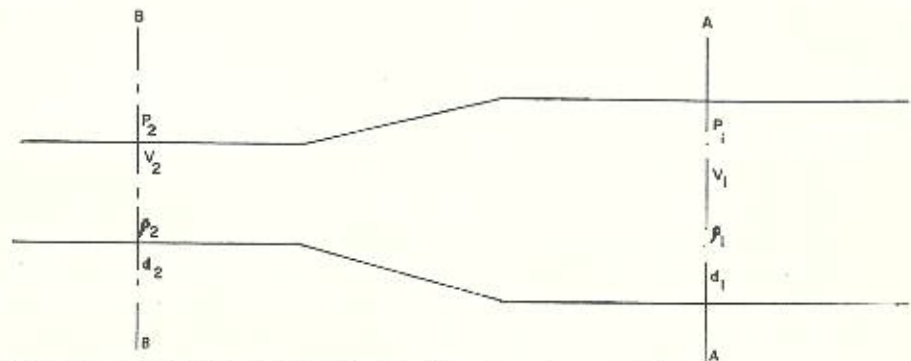


FIGURA 8.8 Efeito da forma da ponta do tubo de Pitot. p_ψ = diferença de pressão a ψ° de inclinação; p_0 = diferença de pressão a 0° de inclinação

MEDIDOR DE ORIFÍCIO

A utilização da diferença de pressão estática provocada por constrições do fluxo é comum na determinação de vazões. Supondo inexistência de atrito e aplicando o teorema de Bernoulli entre as seções AA e BB, temos

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \int_{p_2}^{p_1} \frac{dp}{\rho} \quad (8.17)$$



Supondo fluido incompressível, ou seja, $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, temos

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \frac{p_1 - p_2}{\rho} \quad (8.18)$$

De acordo com a equação da continuidade em peso por unidade de tempo,

$$\rho_g A_1 v_1 = \rho_g A_2 v_2, \quad (8.19)$$

ou

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} \times v_2. \quad (8.20)$$

Substituindo (8.20) em (8.18),

$$v_2^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho [1 - (A_2^2/A_1^2)]}, \quad (8.21)$$

e, portanto, a vazão mássica será

$$Q_{mass} = g\rho A_2 v_2 = A_2 g \sqrt{\frac{2\rho(p_1 - p_2)}{1 - (A_2^2/A_1^2)}}. \quad (8.22)$$

Quando o fluido não é considerado incompressível, pode-se desenvolver uma relação que corrige a vazão, quando se trata de fluidos compressíveis, e chega-se a

$$Q_{mass} = A_2 g \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{1 - (A_2^2/A_1^2)}} \times k_c \times k_f, \quad (8.23)$$

onde k_c é o coeficiente de compressibilidade e k_f o coeficiente de fluxo, sendo

$$k_c = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{A_2^2}{A_1^2}\right) \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{1-\phi} \left(1 - \phi \frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \frac{\phi^2}{\gamma}}{1 - (A_2^2/A_1^2) \times \phi^2/\gamma}} \quad (8.24)$$

c

$$k_f = \frac{k_d}{\sqrt{1 - (A_2^2/A_1^2)}}, \quad (8.25)$$

onde k_d é o coeficiente de descarga dado pela Fig. 8.9 (pelo fato de tratar-se de fluido real, e não ideal), ϕ é a relação entre as pressões p_2/p_1 , e γ é a relação entre o calor específico do fluido a pressão constante e calor específico a volume constante.

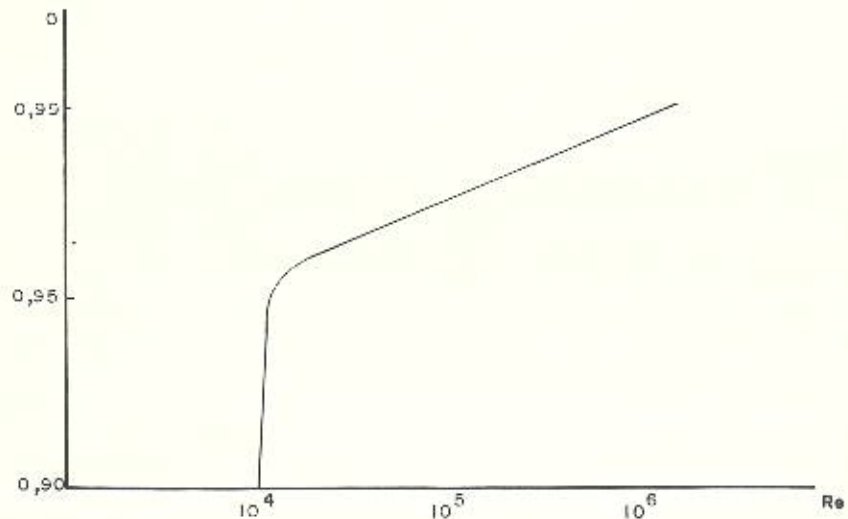
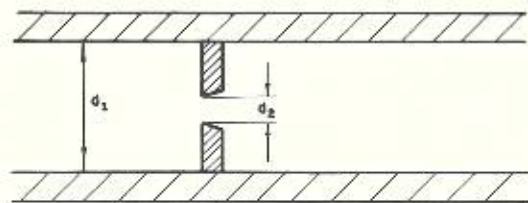


FIGURA 8.9 Coeficiente de descarga. Re é o número de Reynolds ($Re = \rho v/\mu$)

No chamado medidor de orifício, consegue-se a constrição do fluido por meio de um disco perfurado (orifício), conforme esquema que segue.



Tendo em vista que a *vena contracta* tem um diâmetro inferior ao diâmetro do orifício, a tomada de pressão é colocada depois deste. A relação pode ser escrita

$$Q = k_v k_{ca} A_2 \frac{\sqrt{2g \cdot (p_1 - p_2)/W}}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}}, \quad (8.26)$$

onde $W = \rho \cdot g$ nas condições do orifício, k_{ca} o coeficiente de contração (0,61-0,72), e k_v o coeficiente de velocidade (0,95-0,99). Em geral, expressa-se através

do coeficiente,

$$k = \frac{k_{cv} k_v}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} = \frac{k_{dc}}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}}; \quad (8.27)$$

k_{dc} é o coeficiente de descarga ($\cong 0,6$), e k é função do número de Reynolds e da relação d_2/d_1 , variando entre 0,59 e 0,64. Dessa forma,

$$Q = k A_2 \sqrt{2g \frac{p_1 - p_2}{W}}. \quad (8.28)$$

Através da determinação de $p_1 - p_2$, determina-se o valor de Q . Um orifício-padrão é mostrado na Fig. 8.10.

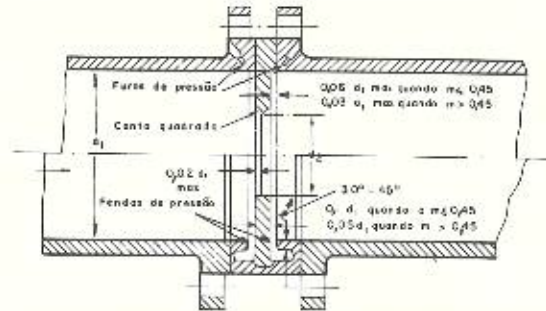


FIGURA 8.10 Orifício-padrão

MEDIDOR VENTÚRI

Emprega o mesmo princípio de contração no fluxo. Um ventúri-padrão está mostrado na Fig. 8.11. A seguinte relação é válida para medidores ventúri:

$$Q = k_{fv} A_2 \sqrt{2g \cdot (p_1 - p_2)/W},$$

onde

$$k_{fv} = \frac{k_{dc}}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}}$$

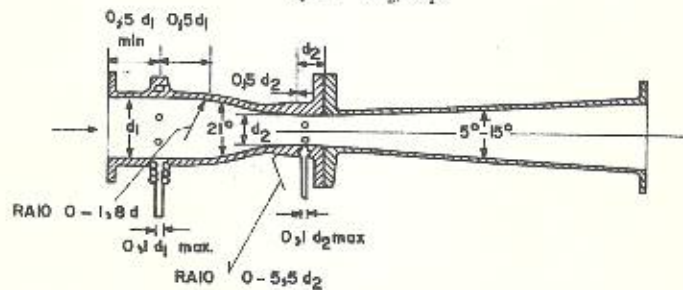


FIGURA 8.11 Medidor ventúri

O coeficiente de descarga (k_{dc}) é obtido do diagrama dado e depende de ρ , μ , p_1/p_2 , v , d_1 , d_2 , da rugosidade do duto e da distribuição da velocidade após a contração. O coeficiente de descarga de medidores ventúri é da ordem de 0,985-0,988.

MEDIDOR DE BOQUILHA

Utiliza o mesmo princípio que o venturi e o orifício. As equações são semelhantes e os valores do coeficiente de descarga são da ordem de 0,924-0,987 em função de $(A_2/A_1)^2$. A Fig. 8.12 apresenta uma boquilha-padrão.

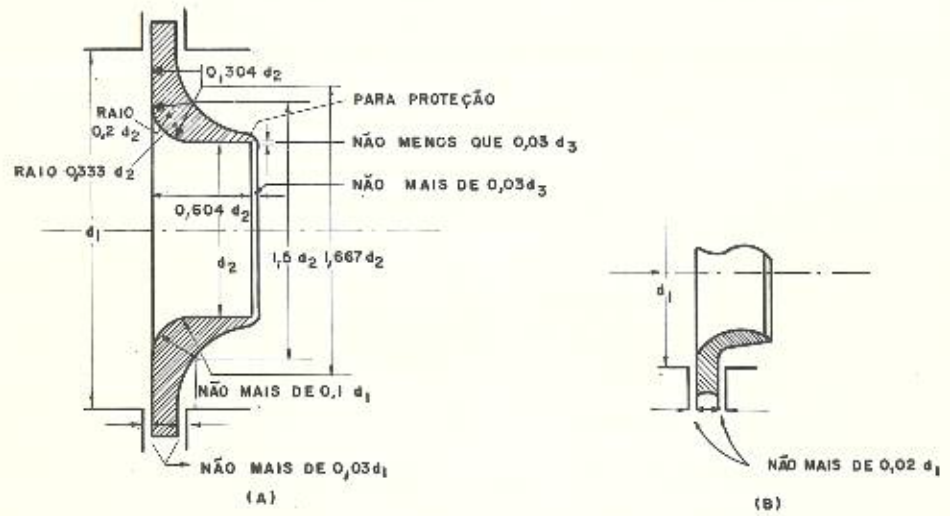


FIGURA 8.12 Boquilha-padrão

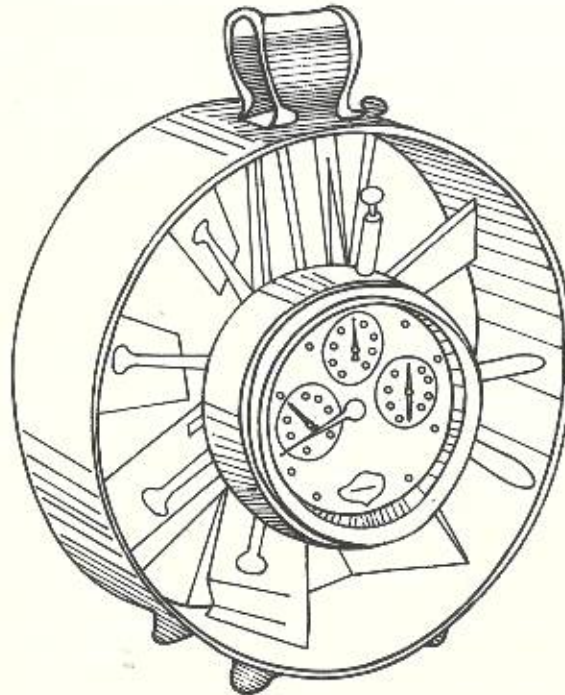


FIGURA 8.13 Anemômetro de pás rotatórias

ANEMÔMETRO ROTATÓRIO

Assemelha-se a um catavento em que um sistema de palhetas gira pela passagem do fluxo, acionando, por meio de engrenagens, os mostradores, os quais indicam diretamente a velocidade do fluido.

Esse instrumento é fabricado em tamanho-padrão, sendo comuns, entretanto, tamanhos de 3,4 e 6 pol de diâmetro. É prático e portátil. Razoavelmente sensível, pode, em alguns casos, indicar velocidades da ordem de 150 pés/min em aberturas, grelhas, cabinas, portas, etc.

A calibração é requerida com freqüência, e não se aconselha seu uso em fluidos contendo substâncias corrosivas. Ower e Pankhurst, em *Air flow measurements* fornecem amplos detalhes sobre a teoria de funcionamento desses instrumentos.

VELÔMETROS (ANEMÔMETRO DEFLETOR)

Trata-se de outro medidor de velocidade muito usado, na prática, graças a sua portabilidade e pela ampla faixa de velocidades que pode medir nas escalas diferentes disponíveis no próprio instrumento. Interiormente possui uma lâmina balanceada, controlada por uma mola, e que pode ser fletida por leves correntes de ar, movendo consigo o ponteiro sobre as escalas graduadas, indicando velocidades de 50 a 6 000 pés/min com erro inferior a 3% do máximo valor da escala.

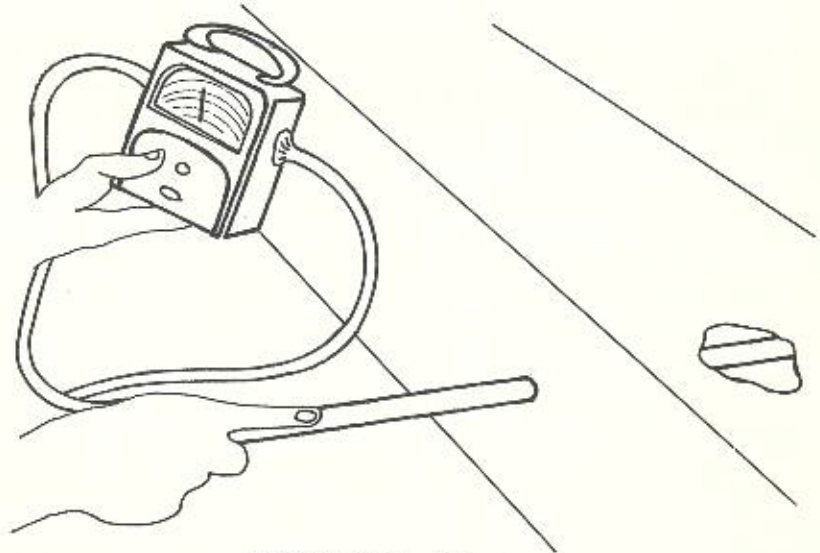


FIGURA 8.14 Velômetro

As escalas são calibradas para os dispositivos (*jets*) fornecidos com o instrumento, trabalhando em condições ambientais. Quando as condições de temperatura e pressão são diferentes, há necessidade de corrigir os valores lidos com os fatores de correção adequados,

$$x_{real} = x_{lido} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (8.29)$$

Como já foi mencionado, esse instrumento vem provido de vários acessórios, que dão uma grande flexibilidade a sua utilização, inclusive permitindo a determinação de pressões, velocidades e vazões no interior de dutos, grelhas, etc. Além disso, esse aparelho é portátil e não necessita alimentação elétrica. Necessita de ajustes e calibrações periódicas e zeragem a cada vez que for usado. Sua alta sensibilidade reflete-se na excessiva flutuação do ponteiro, dificultando a leitura e aumentando o número de leituras necessárias para diminuir a possibilidade de erros. Não se recomenda sua utilização em atmosferas corrosivas ou carregadas de poeira, apesar de o instrumento vir provido de filtro para retenção de partículas.

TERMOANEMÔMETRO (ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE)

Esse instrumento de medir velocidade se baseia na perda de calor, de um corpo aquecido, pela passagem sobre ele de um fluido a uma dada velocidade, que, quanto maior, mais retira calor do corpo. Esses instrumentos de alta sensibilidade a baixas velocidades, alta portabilidade, e alta rapidez de leitura têm o inconveniente de ser frágeis, devido à utilização de resistência feita com um fio finíssimo (0,001 pol de diâmetro ou menos), não podendo, portanto, ser usados em fluxos que possuem partículas em suspensão, ou substâncias que se depositem sobre o fio, viciando a indicação do instrumento.

A perda de calor (ΔC) por unidade de comprimento de cilindro de diâmetro d , mantido a uma temperatura θ , pela passagem de um fluido à velocidade v vale (chamada lei de King).

$$\Delta C = K \cdot \theta + \sqrt{2\pi K C_{esp} \rho} v \times T, \quad (8.30)$$

onde K é a condutividade elétrica do fluido, C_{esp} o calor específico do fluido a volume constante e ρ a densidade do fluido.

Para um fio com $d = 0,001$ pol, aquecido ao dobro da temperatura do fluido (temperatura absoluta), número de Reynolds = 0,1 e a equação pode ser reduzida a

$$\Delta C = f_a \sqrt{v} + f_b$$

onde f_a e f_b são funções das características do fluido e do fio e de suas temperaturas. Dessa forma, aquecendo-se o fio por meio de corrente elétrica e detectando-se a perda de calor à passagem do fluido, por meio de um dispositivo suficientemente sensível, pode-se determinar a velocidade do fluido. A Fig. 8.15 mostra dois tipos de sensores (fios) de termooanemômetros.

Esses instrumentos podem ser acionados com energia elétrica de rede (Hastings B-22) ou por baterias (termooanemômetro, Hastings B-27), indicando alguns deles faixas de 10 a 10 000 pés/min, não sendo recomendados para utilização em atmosferas explosivas.

O problema da fragilidade desses aparelhos tem sido resolvido em parte com a utilização de terminais protegidos ou mais robustos, porém em detrimento do tempo de resposta do instrumento. Além deste, outros problemas surgem durante a utilização desses instrumentos, na forma de fatores que influenciam o resultado fornecido, tais como os efeitos da variação das condições de temperatura do fluido, a deposição de substâncias sobre o fio, etc.

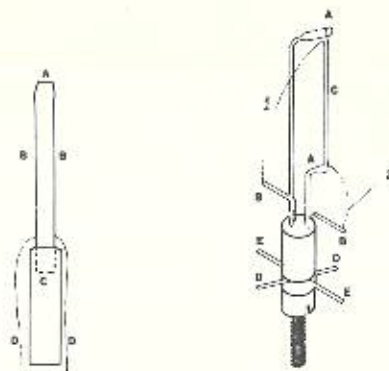


FIGURA 8.15 Sensores de termoanemômetros. A, aquecedores; B, par termoeletrico; C, tubo de silica (comprimento = 23 mm, diâmetro externo = 0,8 mm); D, terminais; E, terminais; 1, constantan; 2, níquelcromo

OUTROS MEDIDORES

Além dos mencionados, vários outros instrumentos são utilizados para determinação de velocidades e vazões. Entre eles, vale mencionar o cateterômetro, os medidores elétricos de vazão, etc.

VERIFICAÇÃO PROPRIAMENTE DITA

INTRODUÇÃO

Como já foi mencionado, o teste de um sistema de ventilação inclui a medida de suas características de operação — vazões, pressões estáticas, velocidades de captura, de transporte e de descarga, temperatura, etc. —, assim como, a avaliação do rendimento do sistema, quanto ao preenchimento dos requisitos para os quais ele foi projetado, mediante a utilização de tubos de fumaça, equipamentos de amostragem, etc. O teste das condições de operação do sistema é geralmente feito mediante a medida da vazão e da velocidade de controle em cada tramo, das pressões estática e total na entrada e na saída do ventilador e da perda de carga através de alguns componentes do sistema.

VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA

Após colocar o sistema em funcionamento, procede-se à verificação das velocidades de captura e vazões em cada captor. Para tanto, é comum o uso de velômetros, anemômetros, termoanemômetros e do tubo de Pitot, dependendo das facilidades de espaço encontradas no local. Em seguida, a vazão total do tramo principal deve ser testada, e isso é normalmente feito com o auxílio do tubo de Pitot. Ainda com esse instrumento, medem-se as pressões estática e total na entrada e na saída do ventilador e a perda de carga através de um eventual equipamento coletor de poluentes que faça parte do sistema.

As seguintes verificações são sugeridas e preenchem as necessidades para inspeções de sistemas de ventilação local exaustora:

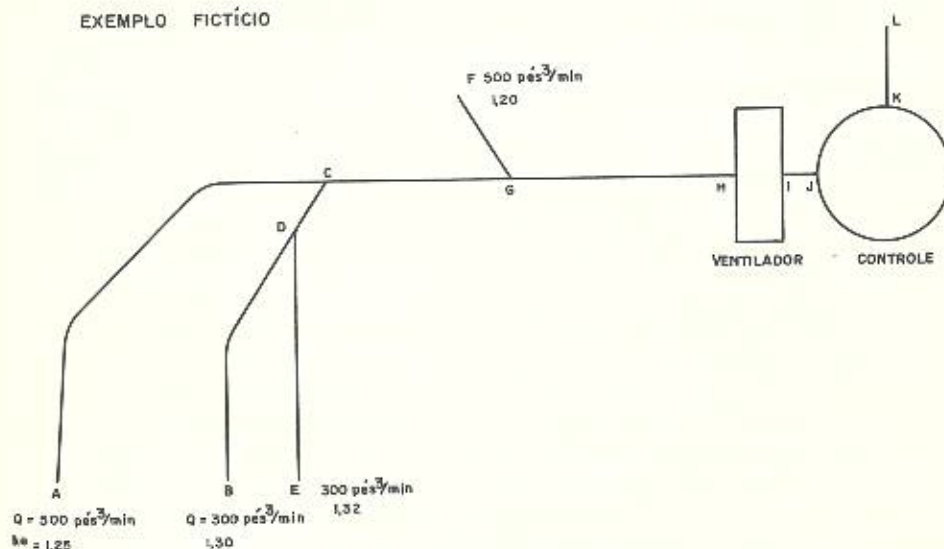
- inspecionar visualmente os captores e os dutos;
- testar a vazão em cada captor; caso não haja válvulas reguladoras no sistema e não tenham havido mudanças no mesmo, a partir da segunda inspeção, pode-se testar apenas a vazão do duto principal;
- testar a vazão total do duto principal; se as vazões de todos os captores estão corretas, não há necessidade desse chequeamento;
- inspecionar visualmente o ventilador quanto a sua rotação, escorregamento de correias, etc.; observar ruído e trepidação excessivas e excesso de temperatura dos rolamentos;
- inspecionar eventual equipamento de controle de poluentes segundo as instruções do fabricante.

EXEMPLO DE VERIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA

Tendo sido construído e instalado um sistema de ventilação local exaustora de acordo com um projeto elaborado, a inspeção do sistema tem início com a elaboração de um esquema do sistema contendo:

- disposição aproximada dos captores;
- vazão em cada captor;
- coeficiente de perda de carga e forma de cada captor;
- dimensões do sistema de dutos;
- localização e características principais dos outros componentes do sistema tais como ventiladores, equipamento de controle de poluentes, etc.

EXEMPLO FICTÍCIO



Tramo	Vazão (pés ³ /min)	Diâmetro (pol)	Comprimento (pés)
AC	500	5	30
BD	300	4½	12
ED	300	4½	12
DC	600	5	8
CG	1 100	7	10
FG	500	5	20
GH	1 600	10	15
IJ	1 600	10	10
KL	1 600	10	30

As vazões são então testadas. Se houver possibilidade de utilização de um equipamento de leitura direta da velocidade de entrada (na face do captor), com um velômetro, por exemplo, pode-se determinar essa velocidade em alguns pontos na face do captor e calcular-se a vazão,

$$Q_{med} = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} = \frac{A \sum v_e}{n}$$

$$Q_1 = v_1 A,$$

$$Q_2 = v_2 A,$$

$$Q_n = v_n A,$$

ou

$$Q_{med} = A x v_{med}.$$

Se o teste for feito com a medida da pressão estática (p_{st}) no captor,

$$p_{st} = p_{cin} + \Delta q,$$

onde Δq é a perda de carga no captor, p_{cin} a pressão cinética no duto (em condições-padrão);

$$Q = 4005 A k_e \sqrt{p_{st}},$$

sendo A a área do duto, k_e o coeficiente de entrada do captor, e Q a vazão (em pés³/min).

Pode-se, pois, medir p_{st} e verificar Q em função do k_e do esquema, sendo

$$k_e = \sqrt{p_{cin}/p_{st}},$$

ou seja, com os k_e dados, calculam-se as p_{st} em cada captor, que são então verificadas na prática, já que sua verificação equivale à verificação de Q .

A desigualdade dos valores medidos com os de projeto pode significar desregulagem de válvulas (quando for o caso), na manutenção dos sistemas de dutos e dos coletores, ou funcionamento do ventilador fora de suas características.

A vazão total exaurida pelo ventilador (1 600 pés³/min no exemplo dado) é verificada com a utilização de um tubo de Pitot na seção transversal de um

trecho reto do duto, e distante $7,5 \times d$ de uma singularidade. Assim:

$$Q_{med} = Av_{med},$$

sendo

$$v_{med} = \frac{\sum v_e}{n}$$

e

$$v_e = 4005 \sqrt{p_{cin}}$$

Para a execução de tal procedimento, o leitor deve reportar-se ao item que indica a utilização do tubo de Pitot.

A potência consumida pelo motor que movimenta o ventilador pode ser medida pela determinação da tensão e da amperagem. A rotação pode ser obtida com o uso de um conta-giros, usado em conjunto com um cronômetro.

A pressão estática do ventilador (p_{st}) é obtida pela determinação com tubo de Pitot (veja a utilização do mesmo) das pressões estática e cinética a montante e a jusante do ventilador,

$$p_{st_v} = p_{st_e} + p_{st_s} - p_{cin_e}$$

(os índices e e s indicam, respectivamente, entrada e saída do ventilador). De posse de todos esses valores medidos e da curva característica do ventilador, podemos verificar se o mesmo está funcionando dentro de suas características. O número de rotações por minuto (rpm) já fornece uma indicação se está havendo deslizamento ou escorregamento na transmissão.

Os valores da pressão estática do ventilador e da potência consumida permitem obter, na curva característica, as vazões correspondentes, que devem ser comparadas com os valores medidos. Diferenças superiores a 15-30% indicam que o exaustor não trabalha segundo sua curva característica; deve-se examinar a possibilidade de má conexão entre o ventilador e o sistema, e há necessidade de revisão do conjunto motor/ventilador.

Se verificarmos que o exaustor funciona segundo sua curva característica, mas o rendimento do sistema é inferior ao esperado, a presença de condições anormais, tais como entupimento de dutos e falsas entradas de ar, é possível.

APÊNDICE

OUTROS DADOS E INFORMAÇÕES TÉCNICAS

TABELA A.1 Propriedades dos líquidos

Líquido a 68 °F e 1 atm (100% ou % em H ₂ O)	Fórmula	Gravidade específica, H ₂ O = 1	Calor específico, Btu/lb-°F	Calor latente, Btu/lb	Pressão de vapor, pol de Hg	Viscosidade absoluta, centipoise
Ácido acético	C ₂ H ₄ O ₂	1,049	0,468	174	0,461	1,22
Acetona	C ₃ H ₆ O	0,791	0,528	237	7,28	0,331
Amônia	NH ₃	0,618	1,13	518	253	0,266
Acetato de amila	C ₇ H ₁₄ O ₂	0,871	0,459			0,806
Anilina	C ₆ H ₅ NH ₂	1,022	0,495	187	0,002	4,47
Acetato de etila	C ₄ H ₈ O ₂	0,901	0,459	183	2,87	0,455
Álcool etílico	C ₂ H ₅ O	0,789	0,622	368	1,73	1,19
Álcool etílico 40%	C ₂ H ₅ O	0,935	0,920			1,25
Ácido hidrocloreídrico 40%	HCl	1,198	0,60	178		
Acetato de metila	C ₃ H ₆ O ₂	0,933	0,468	190	6,68	0,388
Álcool metílico	CH ₃ O	0,792	0,610	499	2,78	0,593
Ácido nítrico	NH ₄ NO ₃	1,502		206		1,77
Azeite de oliva	—	0,92	0,33			84
Ácido sulfúrico 98%	H ₂ SO ₄	1,836	0,336	202		23,0
Água (4 °C)	H ₂ O	1,000	1,005	1 069	0,240	1,567
Água (15 °C)	H ₂ O	0,999	1,000	1 058	0,504	1,140
Água (20,2 °C)	H ₂ O	0,998	0,998	1 054	0,707	1,000
Água (21,1 °C)	H ₂ O	0,998	0,998	1 053	0,739	0,978
Água (100 °C)	H ₂ O	0,958	1,006	970	29,92	0,284
Água do mar	—	1,025	0,94			1,03
Benzeno	C ₆ H ₆	0,879	0,406	188	3,01	0,647
Butano	C ₄ H ₁₀	0,579	0,550	158	61,5	0,187
Clorofórmio	CHCl ₃	1,489	0,234	113	6,27	0,563
Cloro metano	CH ₃ Cl	0,92	0,385	172	144	0,183
Dissulfeto de carbono	CS ₂	1,263	0,240	157	11,60	0,376
Dióxido de enxofre	SO ₂	1,434	0,35	151	96,5	0,27
Éter etílico	C ₂ H ₅ O	0,708	0,503	151	17,4	0,245
Etileno-glicol	C ₂ H ₄ O ₂	1,115	0,57	344	0,002	20,9
Etileno-glicol 50%		1,067	0,70		0,40	4,1
Fenol	C ₆ H ₅ O	1,071	0,561		0,001	12,7
Gás carbônico	CO ₂	1,101	0,92	63,1	1,690	0,071
Gasolina	—	0,687	0,70			0,35
Glicerol	C ₃ H ₅ O ₂	1,261	0,573			1,069
Heptano	C ₇ H ₁₆	0,684	0,508	157	1,30	0,416
Leite	—	1,03	0,93			
Octano	C ₈ H ₁₈	0,703	0,523	156	0,417	0,542
Óleo lubrificante	—	0,91	0,45			200
Óleo vegetal	—	0,92	0,434			40,6
Pentano	C ₅ H ₁₂	0,626	0,527	158		0,240
Propano	C ₃ H ₈	0,585	0,576	150	258	0,14
Querosene	—	0,82	0,50			1,8
Tolueno	C ₇ H ₈	0,866	0,407	178	0,870	0,590
Terebintina	—	0,867	0,472	133	0,17	1,49
Tetracloro de carbono	CCl ₄	1,594	0,201	93,8	3,58	0,958

Tabela obtida da Referência 5

TABELA A.2 Propriedades dos gases

Gás à 29,92 pol de mercúrio	Fórmula	Massa molecular	Gravidade específica (ar = 1)	Calor específico a 59 °F, Btu/lb-°F	Constante dos gases, lbf x pé lb x °F	C _p /C _v a 59 °F	Viscosidade a 59 °F centipoise	Condutividade térmica a 32 °F BTU hora-pé-°F
Acetileno	C ₂ H ₂	26,04	0,906	0,383	(59,15)	1,26	0,009	0,0106
Ar		28,97	1,00	0,240	53,30	1,40	0,181	0,135
Amônia	NH ₃	17,03	0,597	0,523	90,77	1,31	0,010	0,0124
Argônio	A	39,95	1,38	0,125	(38,69)	1,668	0,022	0,0094
Bromo	Br ₂	159,8	5,87	0,055	(9,671)	1,32	0,015	
Butano	C ₄ H ₁₀	58,12	(2,01)	0,456	(26,59)	1,11	0,008	
Butileno	C ₄ H ₈	56,11	(1,94)		(27,54)		0,007	
Brometo de metila	CBr ₄	94,94	(3,28)		(16,28)		0,010	
Cloro	Cl ₂	70,91	2,49		(21,79)	1,27	0,010	0,0042
Cianogênio	(CN) ₂	52,04	1,80	0,115	(29,70)	1,355	0,13	0,0044
Cloreto de metila	CH ₃ Cl	50,49	1,79	0,410	(30,61)	1,256	0,010	
Cloreto de vinila	C ₂ H ₃ Cl	62,50	(2,16)	0,240	(24,73)	1,28	0,010	0,0054
Dissulfeto de carbono	CS ₂	76,14	2,63	0,157	(20,30)	1,63	0,010	0,0039
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,06	2,26	1,52	(24,12)	1,29	0,012	0,0047
Etano	C ₂ H ₆	30,07	1,05	0,386	(51,39)	1,22	0,009	0,0104
Etileno	C ₂ H ₄	28,05	0,975	0,359	(55,09)	1,255	0,010	0,0097
Fluor	F ₂	38,00	1,31	0,196	40,68		0,021	0,0142
Formaldeído	CH ₂ O	30,03	(1,04)		(51,46)			
Fosgênio	COCl ₂	98,92	(4,16)		(15,63)			
Fosfina	PH ₃	34,00	1,15		(45,45)			
Gás carbônico	CO ₂	44,00	1,53	0,199	35,13	1,304	0,015	0,0082
Gás clorídrico	HCl	36,36	1,27	0,194	(42,39)	1,41	0,014	0,0074
Gás sulfídrico	H ₂ S	34,08	1,19	0,253	(45,35)	1,32	0,012	0,0098
Hidrogênio	H ₂	2,016	0,069	3,388	766,5	1,410	0,009	0,0131
Monóxido de carbono	CO	28,01	0,968	0,248	(55,17)	1,404	0,017	0,0174
Metano	CH ₄	16,04	0,554	0,528	(96,35)	1,31	0,011	0,0137
Nitrogênio	N ₂	28,01	0,967	0,248	55,16	1,404	0,017	0,0134
Oxido nítrico	NO	30,01	1,04	0,233	(51,50)	1,400	0,018	0,0085
Oxido nítrico	N ₂ O	44,01	1,53	0,200	(33,11)	1,303	0,014	0,0138
Oxigênio	O ₂	32,00	1,10	0,218	48,31	1,401	0,020	
Ozono	O ₃	48,00	1,66	0,197	32,21			
Propano	C ₃ H ₈	44,11	1,56	0,473	(35,04)	1,13	0,008	
Propileno	C ₃ H ₆	42,08	1,50		(36,73)		0,008	
Trióxido de enxofre	SO ₃	80,06	2,75		(19,30)			
Vapor d'água (212 °F)*	H ₂ O	18,02	0,622	0,484*	85,81	1,324*	0,013*	0,0133*

Tabela obtida da Referência 5

Os valores entre parênteses foram calculados a partir da massa molecular

TABELA A.3 Propriedades dos sólidos

Sólido	Densidade, lb/pé ³	Calor específico, Btu/lb °F	Condutividade térmica, Btu × pol/h × pé ² × °F
Amianto	153	0,20	1,7
Asfalto	82	—	5,2
Argila seca	63	0,22	—
Argila molhada	110	0,55	—
Algodão	5	0,32	0,4
Areia seca	99	0,20	2,7
Ardósia	172	—	10,4
Açúcar	55	0,28	—
Baquelite	86	0,33	—
Bórax	109	0,38	—
Borracha dura	70	0,40	1,3
Borracha mole	60	0,50	0,9
Cimento-amianto	120	—	4,0
Carbonato de cálcio	177	0,19	14,4
Cloreto de cálcio	134	0,16	—
Carborundo	195	0,16	1,5
Celulóide	87	0,36	1,4
Celulose	94	0,37	—
Cimento	94	0,20	2,1
Carvão vegetal	34	0,20	—
Carvão mineral (antracito)	98	0,31	—
Carvão mineral betuminoso	85	0,30	—
Concreto (bloco)	140	0,19	12,5
Cortiça	15	0,48	0,4
Couro seco	56	0,36	1,2
Calcário	163	0,22	12,5
Carbonato de sódio	91	0,27	—
Coque sólido	75	0,20	—
Ebonite	72	0,35	1,2
Estuque	116	—	5,0
Enxofre	126	0,17	1,9
Feldspato	160	0,20	16,2
Flanela	—	—	0,7
Ferragem	20	0,32	—
Gelo	56	0,50	14,5
Gelo seco	97	0,12	—
Gorduras	58	0,46	—
Granito	165	0,19	12,5
Gráfica	99	0,20	306
Gesso comprimido	152	0,26	9,0
Gesso (placas)	50	—	1,4
Mármore	168	0,21	14,0
Mica	183	0,21	5,2
Madeira compensada	34	—	0,8
Madeira dura	45	0,57	1,1
Madeira macia	32	0,47	0,8
Neopreno	77	0,40	0,1
Náilon	70	0,55	—
Nitrato de sódio	141	0,28	—
Óxido de magnésio	17	0,22	0,5
Óxido de zinco	350	0,12	4,1
Papel	58	0,32	0,9
Parafina	56	0,69	1,7
Porcelana	150	0,26	7,2
Quartzo	165	0,21	46,0
Reboco de cimento	116	0,20	5,0
Sal granulado	48	0,21	—
Serragem	13	0,52	0,35
Sulfato de sódio	167	0,21	—
Tijolo comum	120	0,22	5,0
Terra úmida	78	0,44	12,0
Talco	170	0,21	—
Vidro	160	0,16	5,5
Vidro pírex	140	0,20	7,5
Vinil	84	0,24	—

TABELA A.4 Propriedades da atmosfera

Altitude geométrica, pés	Temperatura, °F	Pressão, pol de Hg	Densidade, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 10^{-3}$	Velocidade do som, pés/s	Viscosidade, $\frac{\text{lb}}{\text{pé} \times \text{s}} \times 10^{-5}$	Condutividade térmica, $\frac{\text{Btu}}{\text{s} \times \text{pé} \times ^\circ\text{R}} \times 10^{-3}$
0 000	73,5	29,93	1 192	1 132	1,228	
1 000	70,7	28,89	1 157	1 129	1,223	0,415
2 000	68,0	27,89	1 123	1 126	1,218	0,413
3 000	65,2	26,91	1 090	1 123	1,213	0,411
4 000	62,4	25,96	1 057	1 120	1,209	0,409
5 000	59,7	25,05	1 025	1 117	1,204	0,407
6 000	57,0	24,16	994	1 114	1,199	0,405
7 000	53,9	23,30	964	1 111	1,193	0,403
8 000	50,4	22,46	936	1 107	1,187	0,401
9 000	46,9	21,65	908	1 103	1,180	0,398
10 000	43,4	20,86	881	1 100	1,174	0,396
11 000	40,0	20,09	855	1 096	1,168	0,393
12 000	36,6	19,35	829	1 092	1,162	0,391
13 000	33,2	18,63	803	1 088	1,155	0,389
14 000	29,8	17,94	779	1 085	1,149	0,386
15 000	26,5	17,26	755	1 081	1,143	0,384
16 000	23,1	16,61	731	1 077	1,137	0,381
17 000	19,7	15,97	708	1 073	1,130	0,379
18 000	16,4	15,36	686	1 070	1,124	0,377
19 000	13,0	14,77	664	1 066	1,118	0,374
20 000	9,61	14,19	643	1 062	1,111	0,372
21 000	6,02	13,63	622	1 058	1,105	0,369
22 000	2,44	13,10	602	1 054	1,098	0,367
23 000	-1,14	12,57	583	1 050	1,091	0,364
24 000	-4,72	12,07	564	1 046	1,084	0,361
25 000	-8,31	11,58	545	1 042	1,077	0,359
26 000	-11,9	11,11	527	1 037	1,070	0,356
27 000	-15,5	10,65	510	1 033	1,063	0,353
28 000	-19,0	10,21	492	1 029	1,056	0,351
29 000	-22,6	9,79	476	1 025	1,049	0,348
30 000	-26,2	9,38	460	1 021	1,043	0,346
32 000	-33,3	8,60	428	1 012	1,029	0,340
34 000	-40,4	7,87	399	1 004	1,014	0,335
36 000	-47,6	7,19	371	995	1,000	0,330
38 000	-54,7	6,56	344	987	0,986	0,325
40 000	-61,8	5,98	319	978	0,972	0,319
45 000	-71,5	4,71	258	966	0,952	0,312
50 000	-71,5	3,70	203	966	0,952	0,312
55 000	-71,5	2,91	159	966	0,952	0,312
60 000	-68,8	2,29	125	969	0,957	0,314
65 000	-65,6	1,81	97,5	973	0,964	0,316
70 000	-62,3	1,43	76,4	977	0,970	0,319
75 000	-59,0	1,13	60,2	981	0,977	0,321
80 000	-55,8	0,898	47,2	985	0,984	0,324
85 000	-52,5	0,714	37,3	989	0,990	0,326
90 000	-48,7	0,569	29,4	994	0,998	0,329
100 000	-37,3	0,364	18,3	1 008	1,021	0,337
125 000	-4,6	0,126	5,90	1 046	1,084	0,361
150 000	29,3	0,047	2,06	1 084	1,148	0,386
175 000	32,5	0,019	0,807	1 088	1,154	0,388
200 000	-1,2	0,0071	0,329	1 050	1,091	0,364
250 000	-116,2	0,0007	0,0444	909	0,857	0,278
300 000	-156,6	0,00004	0,0025	855	0,770	0,247

[Handbook of Environmental Control, Vol. I, CRC Press, 1972]

TABELA A.5 Constantes físicas de algumas substâncias

Substância	Fórmula	Peso molecular	Gravidade específica	Limites de explosividade, % em volume	
				Inferior	Superior
Acetaldeído	CH ₃ CHO	44,05	0,821	3,97	57,0
Ácido acético	CH ₃ COOH	60,05	1,049	5,40	—
Anidrido acético	(CH ₃ CO) ₂ O	102,09	1,082	2,67	10,13
Acetona	CH ₃ COCH ₃	58,08	0,792	2,55	12,80
Acroleína	CH ₂ :CHCHO	56,06	0,841	—	—
Acrlonitrila	CH ₂ :CHCN	53,06	0,806	3,05	17,0
Amônia	NH ₃	17,03	0,597	15,50	27,0
Acetato de amila	CH ₃ CO ₂ C ₄ H ₉	130,18	0,879	1,10	—
Álcool isomílico	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CH ₂ OH	88,15	0,812	1,20	—
Anilina	C ₆ H ₅ NH ₂	93,12	1,022	—	—
Arsina	AsH ₃	77,93	2,695	—	—
Acetato de etila	CH ₃ CO ₂ C ₂ H ₅	88,10	0,901	2,18	11,4
Álcool etílico	C ₂ H ₅ OH	46,07	0,789	3,28	18,95
Acetato de metila	CH ₃ CO ₂ CH ₃	74,08	0,928	3,15	15,60
Acetato de propila	CH ₃ CO ₂ CH ₂ C ₂ H ₅	102,13	0,886	1,77	8,0
Benzeno	C ₆ H ₆	78,11	0,879	1,40	7,10
Bromo	Br ₂	159,83	3,119	—	—
Butano	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₃	58,12	2,085	1,86	8,41
Butadieno 1,3	(CH ₂ :CH) ₂	54,09	0,621	2,00	11,50
Butilcelosolve	C ₄ H ₉ OCH ₂ CH ₂ OH	118,67	0,903	—	—
Brometo de etila	C ₂ H ₅ Br	109,98	1,430	6,75	11,25
Brometo de metila	CH ₃ Br	94,95	1,732	13,5	14,5
Celosolve	C ₂ H ₅ O(CH ₂) ₂ OH	90,12	0,931	2,6	15,7
Celosolve (acetato)	CH ₃ CO ₂ C ₄ H ₉ O	132,16	0,975	1,71	—
Cloro	Cl ₂	70,91	3,214	—	—
2-Clorobutadieno	CH ₂ CClCHCH ₂	88,54	0,958	—	—
Clorofórmio	CHCl ₃	119,39	1,478	—	—
1-Cloro-1-nitropropano	NO ₂ ClC ₂ H ₅	139,54	1,209	—	—
Cicloexano	C ₆ H ₁₂	84,16	0,779	1,26	7,75
Cicloexanol	CH ₂ (CH ₂) ₄ CHOH	100,16	0,962	—	—
Ciclohexanona	CH ₂ (CH ₂) ₄ CO	98,14	0,948	—	—
Cicloexeno	CH ₂ (CH ₂) ₃ CH=CH	82,14	0,810	—	—
Ciclopropano	CH ₂ CH ₂ CH ₂	42,08	0,720	2,40	10,40
Cloreto de etila	C ₂ H ₅ Cl	64,52	0,921	3,6	14,80
Cloreto de metila	CH ₃ Cl	50,49	1,785	8,25	18,70
Cloreto de vinila	C ₂ H ₃ Cl	62,50	0,908	4	21,70
Dissulfeto de carbono	CS ₂	76,13	1,263	1,25	50,0
Dicloro-difluor-metano	CCl ₂ F ₂	120,92	1,486	—	—
1,1-Dicloro-etano	CH ₃ CHCl ₂	98,97	1,175	—	—
1,2-Dicloro-etano	ClCH ₂ CH ₂ Cl	98,97	1,257	6,2	15,9
1,2-Dicloro-etileno	ClCH=CHCl	96,95	1,291	9,7	12,8
Dicloro-metano	H ₂ CCl ₂	84,94	1,336	—	—
Dicloro-monofluor-metano	HCCLF	102,93	1,426	—	—
1,1-Dicloro-1-nitroetano	H ₂ CCl ₂ NO ₂	143,97	1,692	—	—
1,2-Dicloro-propano	CH ₂ CHClCH ₂ Cl	112,99	1,159	3,4	14,5
Dicloro-tetrafluor-etano	CClF ₂ CClF ₂	170,93	1,423	—	—
Dimetilamina	(CH ₃) ₂ NC ₂ H ₅	121,18	0,956	—	—
Dimetilsulfato	(CH ₃) ₂ SO ₂	126,13	1,332	—	—
Éter isopropílico	(CH ₃) ₂ CH ₂ O	102,17	0,725	—	—
Dioxano	O(CH ₂) ₄ O	88,10	1,034	—	—
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,07	2,264	—	—
Etilbenzeno	C ₆ H ₅ C ₂ H ₅	106,16	0,867	—	—
Etileno-diamina	NH ₂ CH ₂ CH ₂ NH ₂	60,10	0,899	—	—
Éter etílico	(C ₂ H ₅) ₂ O	74,12	0,713	—	—
Estireno (monômero)	C ₆ H ₅ HC=CH ₂	104,14	0,907	1,1	6,1
Formaldeído	HCHO	30,03	0,815	7,0	73,0
Fosgênio	O=C:Cl ₂	98,92	1,392	—	—
Fosfina	PH ₃	34,0	1,146	—	—
Gás carbônico	CO ₂	44,01	1,53	—	—

TABELA A.5 (Continuação)

Substância	Fórmula	Peso molecular	Gravidade específica	Limites de explosividade, % em volume	
				Inferior	Superior
Gasolina	C_nH_{2n+2}	86	0,660	1,3	6,0
Gás clorídrico	HCl	36,47	1,268	—	—
Gás cianídrico	HCN	27,03	0,688	5,6	40,0
Gás fluorídrico	HF	20,01	0,987	—	—
Heptano	$CH_3(CH_2)_5CH_3$	100,20	0,684	1,1	6,7
Hexano	$CH_3(CH_2)_4CH_3$	86,17	0,660	1,18	7,4
Iodo	I_2	253,82	4,93	—	—
Isopropil-butano	$CH_3COCH(CH_3)_2$	86,13	0,803	—	—
Isopropanol	$(CH_3)_2CHOH$	60,09	0,785	2,02	11,80
Metiletilcetona	$CH_3COC_2H_5$	72,10	0,805	1,81	9,50
Monóxido de carbono	CO	28,10	0,968	12,5	74,2
Metanol	CH_3OH	32,04	0,792	6,72	36,5
Metilcelosolve	$HOCH_2CH_2OCH_3$	76,06	0,965	—	—
Metilcelosolve (acetato)	$CH_3OCH_2CH_2OOCCH_3$	118,13	1,007	—	—
Metilcicloexano	$CH_2(CH_2)_5H_{10}$	98,18	0,769	1,15	—
Metilcicloexanol	$CH_2(CH_2)_5H_9CHOH$	114,18	0,934	—	—
Metilciclohexanona	$CH_2C_5H_9CO$	122,17	0,925	—	—
Metilisobutilcetona	$CH_3COC_4H_9$	100,16	0,801	—	—
Monocloro-benzeno	C_6H_5Cl	112,56	1,107	—	—
Monofluór-triclorometano	Cl_3CF	137,38	1,494	—	—
Mononitrotolueno	$CH_3C_6H_4NO_2$	137,13	1,163	—	—
Metilpropanona	$CH_3COCH_2C_2H_5$	86,13	0,816	1,55	8,15
N-butanol	$C_2H_5CH_2CH_2OH$	74,12	0,810	1,45	11,25
N-acetato de butila	$CH_3CO_2C_4H_9$	116,16	0,882	1,39	7,55
Nafta	$C_nH_n(CH_2)_2$	106,16	0,83	—	—
Níquel-carbonila	$Ni(CO)_4$	170,73	1,31	—	—
Nitrobenzeno	$C_6H_5NO_2$	123,11	1,205	1,8	—
Nitroetano	$CH_3CH_2NO_2$	75,07	1,052	—	—
Nitroglicerina	$C_3H_5(ONO_2)_3$	227,09	1,601	—	—
Nitrometano	CH_3NO_2	61,04	1,130	—	—
2-Nitropropano	$CH_3CHNO_2CH_3$	89,09	1,003	—	—
o-Diclorobenzeno	$Cl_2C_6H_4$	147,01	1,305	—	—
Óxido de etileno	CH_2CH_2O	44,05	0,887	3,0	80,0
Óxidos de nitrogênio	NO	30,0	1,0367	—	—
	N_2O	44,02	1,53	—	—
	N_2O_3	76,02	1,447	—	—
	NO_2	46,01	1,448	—	—
	N_2O_5	108,02	1,642	—	—
Octano	$CH_3(CH_2)_6CH_3$	114,22	0,703	0,95	3,2
Ozona	O_3	48	1,658	—	—
Pentano	$CH_3(CH_2)_4CH_3$	72,15	0,626	1,4	7,8
Propano	$CH_3CH_2CH_3$	44,09	1,554	2,12	9,35
Silicato de etila	$(C_2H_5)_2SiO_4$	208,30	0,933	—	—
Seleneto de hidrogênio	H_2Se	80,98	2,12	—	—
Sulfeto de hidrogênio	H_2S	34,08	1,189	4,3	45,5
Tetracloreto de carbono	CCl_4	153,84	1,595	—	—
Tricloreto de fósforo	PCl_3	137,35	1,574	—	—
1,1,2,2-Tetracloroetano	$Cl_2CHCHCl_2$	167,86	1,588	—	—
Tetracloroetileno	$Cl_2C:CCl_2$	165,85	1,624	—	—
Tolueno	$C_6H_5CH_3$	92,13	0,866	1,27	6,75
Toluidina	$CH_3C_6H_4NH_2$	107,15	0,999	—	—
Tricloroetileno	$ClCHCCl_2$	131,40	1,466	—	—
Terebintina	$C_{10}H_{16}$	136,23	—	0,8	—
Xileno	$C_6H_4(CH_3)_2$	106,16	0,881	1,0	6,0

TABELA A.6 Tamanho de partículas emitidas por alguns processos e operações industriais

Fonte	Porcentagem em peso por faixa de tamanho				
	< 5 μm	5-10 μm	10-20 μm	20-44 μm	> 44 μm
<i>Combustão estacionária</i>					
<i>Carvão betuminoso</i>					
pulverizado	15	17	20	23	25
ciclone	65	10	8	7	10
stoker	4	6	11	18	61
Antracito	35	5	8	7	45
Óleo combustível	50	NA	NA	NA	0
Gás natural	100	—	—	—	—
<i>Queima de lixo (incinerador)</i>	12	10	15	18	45
<i>Veículos automotores</i>					
A gasolina	100	—	—	—	—
A Diesel	63	NA	NA	0	0
Aeronaves	100	—	—	—	—
<i>Processos químicos</i>					
Produção de ácido fosfórico	100	—	—	—	—
Produção de sabões e detergentes	5	15	40	30	10
Produção de ácido sulfúrico	100	—	—	—	—
<i>Alimentação e agricultura</i>					
Desidratação de alfafa	Tamanho médio, 2 a 10 μm		—	—	—
Descaroçamento (algodão)	NA	NA	NA	NA	40
Rações	5	15	20	45	15
Farinha de peixe	1	1	3	8	87
Fertilizantes (fosfato)	6	6	10	8	70
<i>Metalúrgicas</i>					
Alumínio primário	13	12	12	13	50
Zinco primário	14	17	40	NA	NA
<i>Ferro e aço</i>					
sinterização	0	0	0	15	85
alto-forno	NA	NA	NA	NA	70
Siemens-Martin	46	22	17	10	5
BOF (L. D.)	99,5	0,5	0	0	0
conversor Bessemer	—	—	—	100	—
Alumínio secundário	34	30	23	10	3
Bronze e latão	100	—	—	—	—
Ferro cinzento (Cubilot)	18	8	12	14	48
Aço secundário	95	3	2	0	0
Zinco secundário	60	14	11	9	6
<i>Minerais não-metálicos</i>					
Asfalto (batching)	35	25	17	20	3
Asfalto (roofing)	100	—	—	—	—
Cerâmica e argila	36	NA	NA	40	6
Refratários	100	—	—	—	—
Cimento	22	25	25	20	8
Concreto	13	21	27	25	14
Frita	45	15	15	15	10
Vidro	26	NA	NA	NA	0
Gesso	95% < 10 μm		NA	NA	NA
Cal	2	8	24	38	28
Lã mineral	0,5	2,5	10	27	60
Perlita	32	10	10	13	35
Fosfato (rocha)	80	15	15	0	0
<i>Pedreiras</i>					
britagem	5	5	5	10	75
transporte e peneiramento	30	20	20	18	12
<i>Refinaria de petróleo</i>					
Regenerador catalítico	50	15	NA	NA	NA
<i>Madeira</i>					
Laminados	NA	NA	NA	NA	25

TABELA A.7 Pesos atômicos aproximados de alguns elementos

Elemento	Peso atômico	Elemento	Peso atômico
Alumínio	27	Iridio	192
Antimônio	122	Lítio	7
Arsênico	75	Magnésio	24
Bário	137	Manganês	55
Berílio	9	Mercurio	201
Bismuto	209	Molibdênio	96
Boro	11	Níquel	59
Bromo	80	Nióbio	93
Cádmio	112	Nitrogênio	14
Cálcio	40	Ouro	197
Carbono	12	Oxigênio	16
Cério	140	Paládio	106
Césio	133	Prata	108
Cloro	35	Platina	195
Cromo	52	Plutônio	242
Cobalto	54	Polônio	210
Cobre	63	Potássio	39
Chumbo	207	Rádio	226
Estanho	119	Selênio	79
Estrôncio	88	Silício	28
Enxofre	32	Sódio	23
Ferro	56	Tântalo	181
Flúor	19	Telúrio	128
Fósforo	31	Tório	232
Gálio	70	Titânio	48
Germânio	73	Tungstênio	184
Hélio	4	Urânio	238
Hidrogênio	1	Vanádio	51
Índio	115	Zinco	67
Iodo	126	Zircônio	91

TABELA A.8 Densidade de partículas aglomeradas (g/cm³)

Material	Densidade do floco	Densidade normal
Mercurio	1,70	13,6
Óxido de alumínio	1,18	3,70
Óxido de antimônio	0,63	5,57
Óxido de cádmio	0,51	6,5
Óxido de magnésio	0,35	3,65
Óxido estânico	0,25	6,71
Monóxido de chumbo	0,62	9,36
Prata	0,94	10,5
Trióxido de arsênico	0,91	3,7

TABELA A.9 Comparação entre limites de conforto e os limites de tolerância (ppm)

Solvente	Concentração irritante, 8h/dia	Concentração irritante			TLV Limite de tolerância
		Olhos	Nariz	Garganta	
<i>Hidrocarbonetos</i>					
n-Hexano	500				500
Solvente Sttodard	400	400	400	400	200
Terebintina	100	175	175	175	100
Toluol	200	300		300	200
Xilol	100	200	200	200	100
<i>Álcoois</i>					
Butílico	25	50	25	25	100
Cicloexanol	100	100	100	100	50
Diisobutilcarbinol	25	50	50	50	25
Isopropílico	200	800	800	800	400
Isoamílico	100	150	150	100	100
Hexileno glicol	50	50	50	50	
Metilisobutilcarbinol	25	50	50	50	25
Metilvinilcarbinol	25	50	50	50	
<i>Cetonas</i>					
Acetona	200	500	500	500	1 000
2-Butanona (MEK)	200	350	350	350	200
Cicloexanona	25	75	75	75	50
Diisobutilcetona	25	50	50	50	50
Metilisobutilcetona	100	200	200	200	100
<i>Ésteres</i>					
Isopropilacetato	100	200	200	200	250
Metilamilacetato	100	100	100	100	
n-Butilacetato	100	300	300	200	150
n-Amilacetato	100	300	300	200	100
Acetato de etila	100	400	400	400	400
<i>Éteres</i>					
Éter etílico	100		200		400
Éter n-butílico	100	200	200	200	
Éter isopropílico	300	300	300	300	500
<i>Solventes</i>					
Acetaldeído	50	50	200	200	200
Estireno (monômero)	100				100
1,2,3-Tricloropropano	100	100	100	100	100
1-Nitropropano	100	150	150	150	25

TABELA A.10(a) Corrosão de ventiladores em sistemas de exaustão

Material do ventilador	Decapagem	Limpeza alcalina	Anodização	Banho de tintas e lacas	Descarbonização	Desengraxe e limpeza de metais	Endurecimento	Deposição de películas	Lavagem
Aço	E-P	E-R	S-R	E	E-S	E-S	E-S	E-P	E-P
Alumínio	S	S	S	E	—	—	—	S	E
Aço galvanizado	—	B	—	—	—	E-S	E-S	—	—
Ferro fundido	E	E	—	E	E	E	—	E	E
Latão	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Chumbo	E	—	—	—	—	—	—	—	—
Tinta de asfalto	S-P	B-P	E	—	P	—	—	E-S	S-P
Tinta de resina víalica	—	—	B	—	—	—	—	S	—
Tinta de chumbo vermelha	E	—	E	—	—	—	—	—	—
Asfalto quente	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Resina fenólica	S	S	E	S	—	—	—	E-S	—
Borracha dura	B	E-S	E	—	E	—	—	E	E
Borracha macia	E-S	—	—	—	—	—	—	E	E
Neopreno	E	E	E	E	—	—	—	—	—
Everdur	B	E	—	—	R	—	—	—	—
Korolac	R	R	—	—	—	—	—	—	—
Madeira compactada	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Aço inox AISI 316	—	E	—	—	—	—	—	—	—
Bronze	P	—	—	—	—	—	—	—	—

E = excelente (acima de 5 anos de duração); S = satisfatória (de 2 a 5 anos de duração); R = regular (de 6 meses a 2 anos de duração); P = pobre (6 meses de duração)

TABELA A.10(a) (Continuação)

Material usado	Deposição alcalina de película (cobre, cromo e prata)	Deposição de película e anodização (dutos horizontais)	Deposição de película (níquel)	Decapagem (dutos verticais)	Tintura e clareamento	Água fervendo e vapor	Descarbonização	Desengraxeamento (orgânico e mineral)	Banho de tintas e lacas
Aço galvanizado	E-P	—	S-P	P	S	E-P	E	E	E
Ferro preto	E-P	—	S-P	—	—	S-P	—	F	S
Aço inox	—	—	—	—	—	E	—	—	—
Metal mole	—	—	—	—	—	E	—	—	—
Borracha natural	—	—	—	—	S	—	—	—	—
Madeira prensada	E	—	—	—	—	—	—	—	—
Neopreno	S	—	S	—	—	E	—	—	—
Tinta asfáltica (sobre aço, ferro preto ou galvanizado)	E-S	P	E	R	—	E-S	—	—	—
Asfalto quente (180-200° sobre aço galvanizado)	—	S	—	—	—	E	—	—	—
Feltro impregnado de asfalto (três camadas) sobre metal ou madeira	—	E	—	—	—	—	—	—	—
Feltro impregnado de asfalto sobre madeira prensada, pintada	S	—	S	—	—	—	—	—	—
Resina fenólica sobre madeira compensada	—	—	—	F	—	—	—	—	—
Resina fenólica cozida	S	—	—	—	—	—	—	—	—
Cimento-amiante	S	—	—	—	—	E	—	—	—
Tinta de vinilite	S	—	S	—	—	S	—	—	—

TABELA A.10(b) Corrosão de dutos e coifas em sistemas de exaustão

Material usado	Cromação ou anodização	Ácido hidroclórico	Ácido fluorídrico	Ácido nítrico	Ácido oxálico	Ácido sulfúrico	Decapagem (dutos horizontais)	Limpeza alcalina	Limpeza alcalina (solução)
Aço galvanizado	E-P	F-P	P	P	-	P	-	E-P	E
Ferro preto	E-P	P	-	E	-	P	-	E-P	E
Aço inox.	S	S	S	-	E	S	-	E	E
Metáil móvel	-	S	-	-	S	-	-	-	-
Chumbo	E-S	F	-	E	E	E	-	-	-
Alumínio	-	-	-	-	E	E	-	-	-
Borracha dura	-	E	-	-	-	E	-	-	-
Borracha natural	-	E	S	-	-	E	-	-	-
Madeira prensada	S-P	-	-	-	-	P	-	S	-
Neopreno	S	E	-	E	-	E	-	E	E
Terne-plate	S	F	-	-	-	S	-	-	-
Buna S	-	E	-	-	-	-	-	-	-
Koroseal	-	B	-	-	-	-	-	-	-
Tinta asfáltica (sobre aço, ferro preto ou galvanizado)	P	E-R	S	R-P	S	E-P	P	E-S	E
Asfalto quente (180-200° sobre aço galvanizado)	-	S	-	R	-	S	R	-	-
Feltro impregnado de asfalto sobre madeira prensada, pintada	-	S	-	-	-	-	-	S	-
Feltro impregnado de asfalto (3 ca- madas) sobre metal ou madeira	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tinta (resina fenólica)	S-R	-	-	-	-	-	-	-	-
Resina fenólica sobre madeira com- pensada	P	F	-	-	-	-	-	-	-
Resina fenólica cozida	E-R	E-P	E	R	-	E-S	-	S	-
Cimento amianto	-	R	-	-	-	E	-	E	-
Tinta de vinilite	-	E	-	S	-	E-P	-	E	-

E = excelente (acima de 5 anos de duração); S = satisfatória (de 2 a 5 anos de duração); R = regular (de 6 meses a 2 anos de duração); P = pobre (6 meses de duração)

TABELA A.11 Peso de algumas substâncias

Substância	lb/galão	g/litro
Água	8,4	1 000
Asfalto	8,57	1 030
Butano líquido a 60 °F	4,84	579
Gasolina	6,17	739
Óleo cru	7,08	850
Óleo destilado	7,05	845
Óleo residual	7,88	944
Propano líquido a 60 °F	4,24	507

TABELA A.12 Conversão de unidades

Para converter de	Para	Multiplique por
Atmosfera física (At)	cm de Hg	76
Atmosfera física	kg/cm ²	1,033
Atmosfera física	pés de H ₂ O (a 4 °C)	33,90
Atmosfera física	pol de Hg (a 0 °C)	29,92
bária (bares)	atmosfera física (At)	0,9869
Barril (petróleo)	m ³	0,1590
Btu	kcal	0,252
Btu/h	HP	3,931 × 10 ⁻⁴
Btu/h	W	0,2931
Btu/lb	kcal/kg	0,5556
Btu/lb · °F	kcal/kg · °C	1
Btu/lb · °R	kcal/kg · K	1
Btu/min	HP	0,2356
Btu/min	kW	0,01757
Btu/pé ³ · °F	kcal/m ³ · °C	16,02
Btu/pé ³	kcal/m ³	8,900
cv	HP	0,9863
pés ³ /min	litro/s	0,472
°C	°F	(°C × $\frac{9}{5}$) + 32
cm	pés	3,281 × 10 ⁻²
cm ³	pés ³	3,531 × 10 ⁻⁵
cm ³	pintas	2,113 × 10 ⁻³
cm ³	pol ³	0,06102
cm ²	pés ²	1,076 × 10 ⁻³
cm ²	pol ²	0,1550
cm/s	pés/min	1,1969
cm/s	km/h	0,036
dyn	g	1,020 × 10 ⁻³
dyn	J/cm	10 ⁻⁷
dyn	lb	2,248 × 10 ⁻⁶
dyn	pound	7,233 × 10 ⁻⁵
dyn/cm ²	pol de H ₂ O (4 °C)	4,015 × 10 ⁻⁴
dyn	pol de Hg (0 °C)	2,953 × 10 ⁻⁵

TABELA A.12 (Continuação)

Para converter de	Para	Multiplique por
galão (americano)	cm ³	3,785
galão (americano)	galão (inglês)	0,83267
galão (americano)	pé ³	0,1337
galão (americano)	pol ³	231
galão/min	litro/s	0,06308
galão/min	pé ³ /h	8,0208
galão/min	pé ³ /s	2,228 × 10 ⁻³
g	grão (<i>grain</i>)	15,43
g	lb	2,205 × 10 ⁻³
g/cm ³	lb/pol ³	0,03613
g/cm ³	lb/pé ³	62,43
g/litro	lb/pé ³	0,062427
g	onça (<i>troy</i>)	0,03215
g	<i>pound</i>	0,07093
grãos/pé ³	kg/m ³	0,00229
lb/pé ³	g/cm ³	0,01602
m/min	milhas/h	0,03728
m/s	milhas/h	2,237
m/s	pés/min	196,8
μm	m	10 ⁻⁶
milhas terrestre	m	1 609
milhas terrestre	pés	5 280
onça	g	28,349
pés	pol	12
pés	m	0,3048
pés/min	cm/s	0,508
pés/min	galão/s	0,1247
pés/min	km/h	0,01829
pés/min	litros/s	0,472
pés/min	milhas/h	0,01136
pés/min	pés/s	0,01667
pés/s	m/min	18,29
pés/s	milhas/h	0,6818
pés/s	nó	0,5921
pés/s	km/h	1,097
pés ²	cm ²	929
pés ²	m ²	0,0929
pol de Hg	kg/m ²	345,3
pés	cm	30,48
pés ³	galão (liq.)	7,4805
pés ³	litros	28,32
pés ³	m ³ /kg	0,06242
pés ³	m ³	0,02832
pés ³ /min	cm ³ /s	472
pés ³ /min	galão/min	7,48
pés ³	pinta (liq.)	59,84

TABELA A.12 (Continuação)

Para converter de	Para	Multiplique por
pés ³	quarto (liq.)	29,92
pés ³ /s	galão/min	448,831
pol ³	cm ³	16,39
pol ³	galão	$4,329 \times 10^{-3}$
pol ³	litros	0,01639
pol ³	m ³	$1,639 \times 10^{-5}$
pol ³	pés ³	$5,787 \times 10^{-4}$
pol de Hg	atmosferas física	0,03342
pol de Hg	kg/cm ²	0,03453
pol de Hg	lb/pol ²	70,73
pol de Hg	lb/pol ²	0,4912
pol de Hg	pés de H ₂ O	1,133
kg	Libra	2,205
rpm	graus/s	6,0
rpm	rad/s	0,1047
rad/s	rpm	9,549
rad/s	rps	0,1592
slug	kg	14,59
t (curta)	lb	2 000
t (curta)	kg	907,18
t (longa)	lb	2 240
t (longa)	kg	1 016
t	lb	2 205
t (longa)	t (curta)	1 120

ABREVIações EMPREGADAS

Btu = british thermal unit
 °C = graus centígrados
 cv = cavalo-vapor
 cm = centímetro
 dyn = dina
 °F = graus Fahrenheit
 g = grama
 h = hora
 H₂O = água
 Hg = mercúrio
 HP = horse power
 J = joule
 K = kelvin
 kcal = quilocaloria

kg = quilograma
 km = quilômetro
 kW = quilowatt
 lb = libra
 m = metro
 min = minuto
 pol = polegada
 rad = radiano
 rpm = rotações por minuto
 rps = rotações por segundo
 s = segundo
 t = tonelada
 W = watt

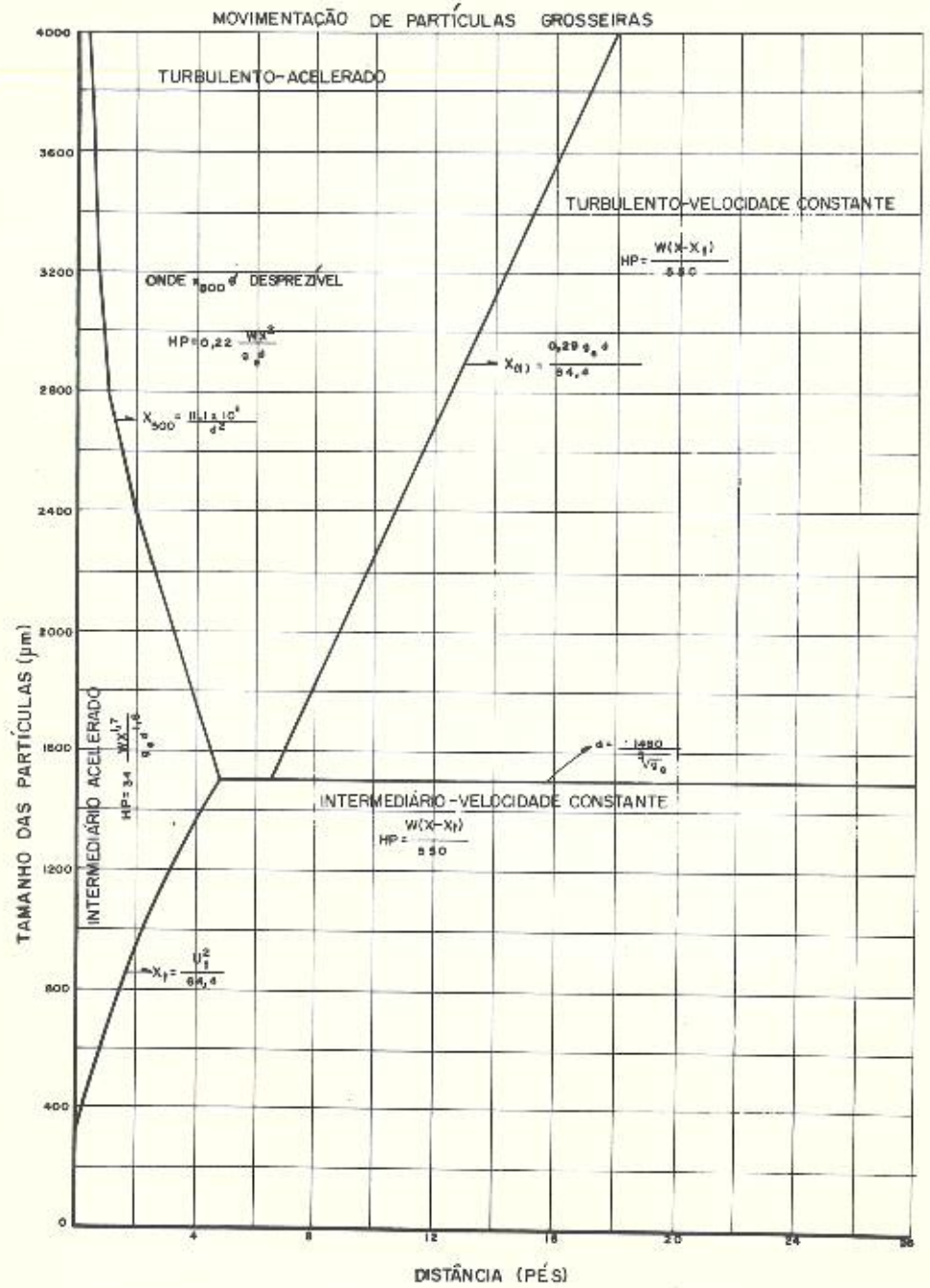


FIGURA A.1 Caracterização do regime de queda de partículas [Ref. 2]

MOVIMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS GROSSEIRAS

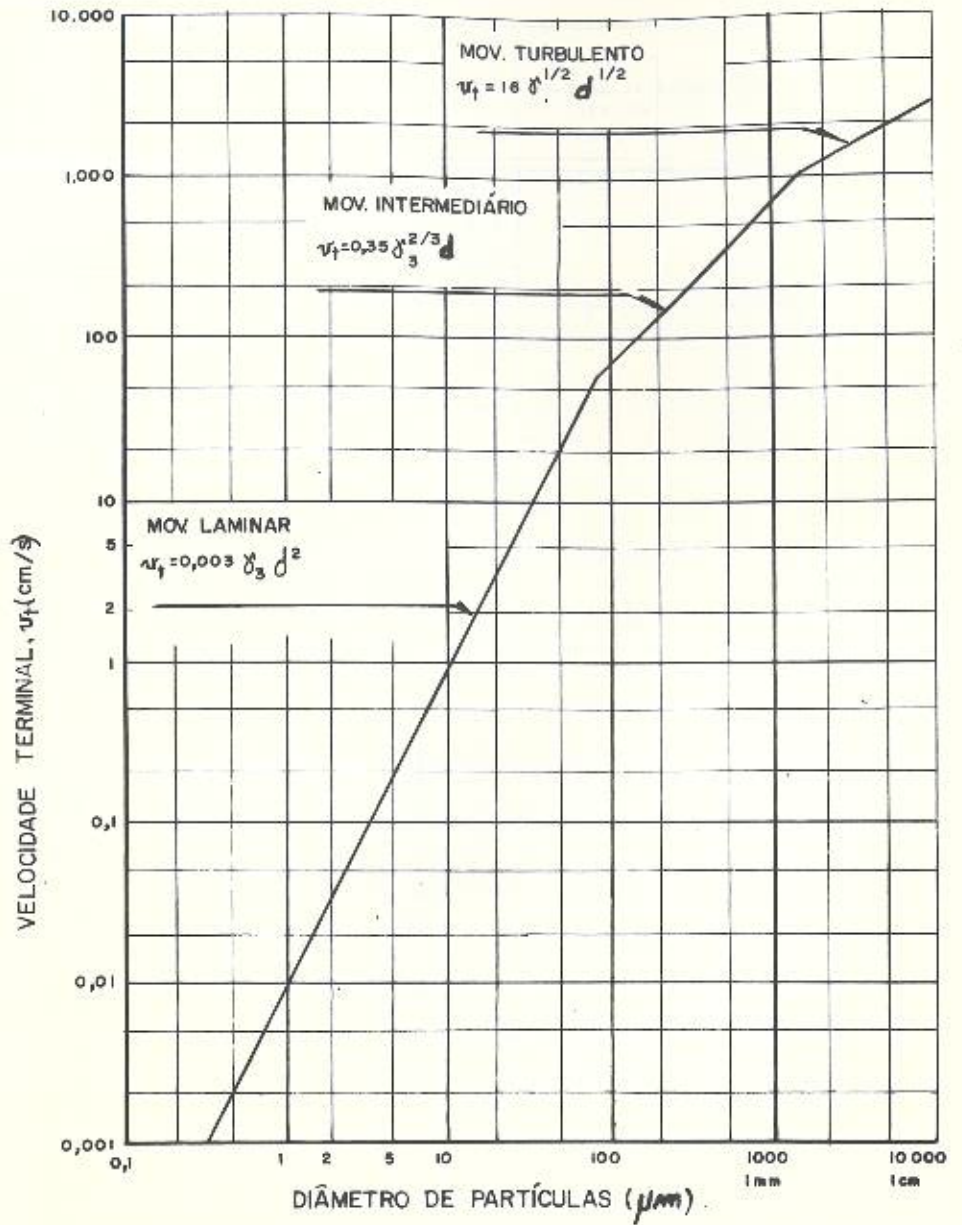


FIGURA A.2 Velocidade terminal de queda de partículas [Ref. 4]

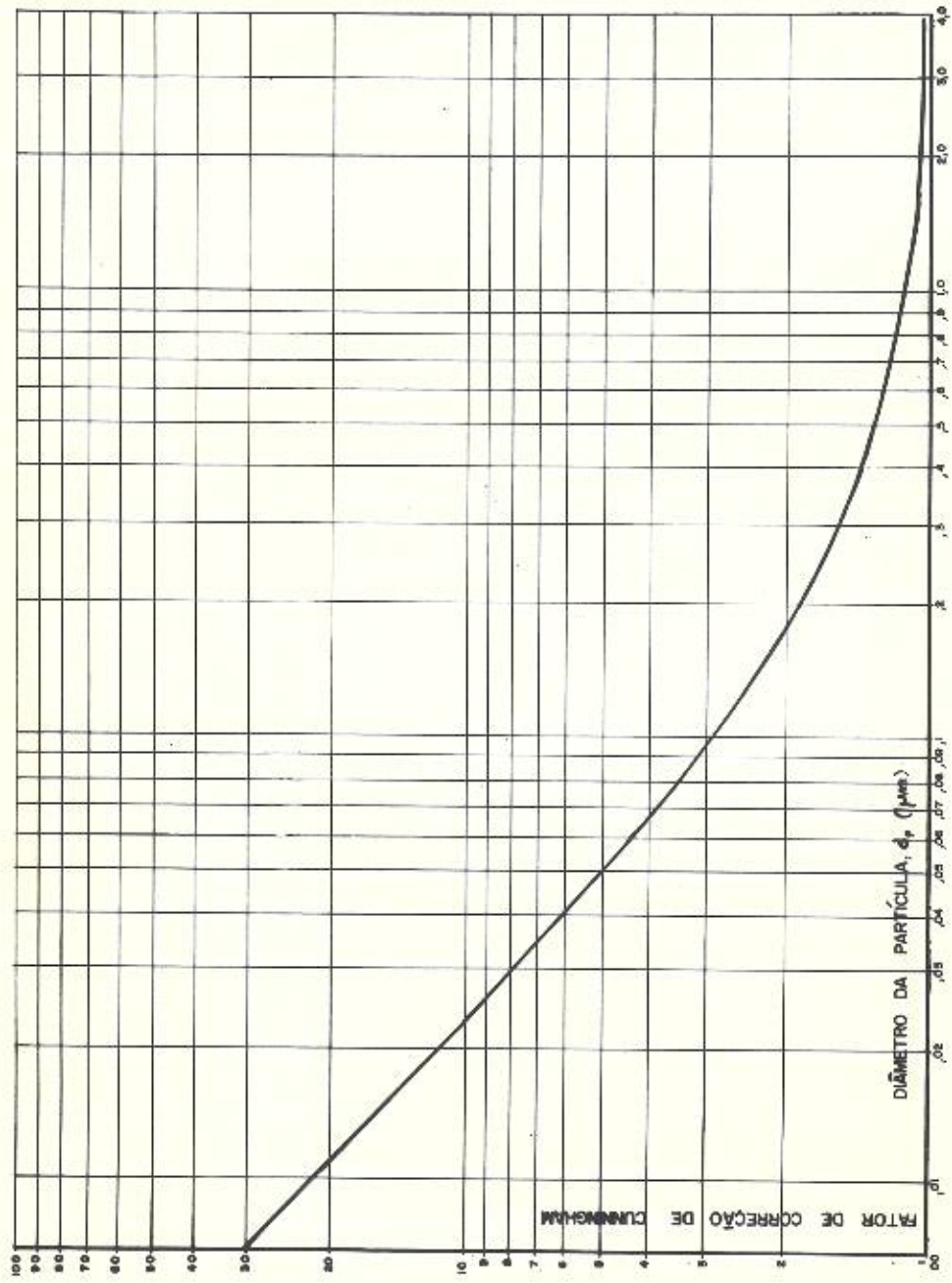


FIGURA A.3 Fator de correção de Cunningham versus diâmetro da partícula

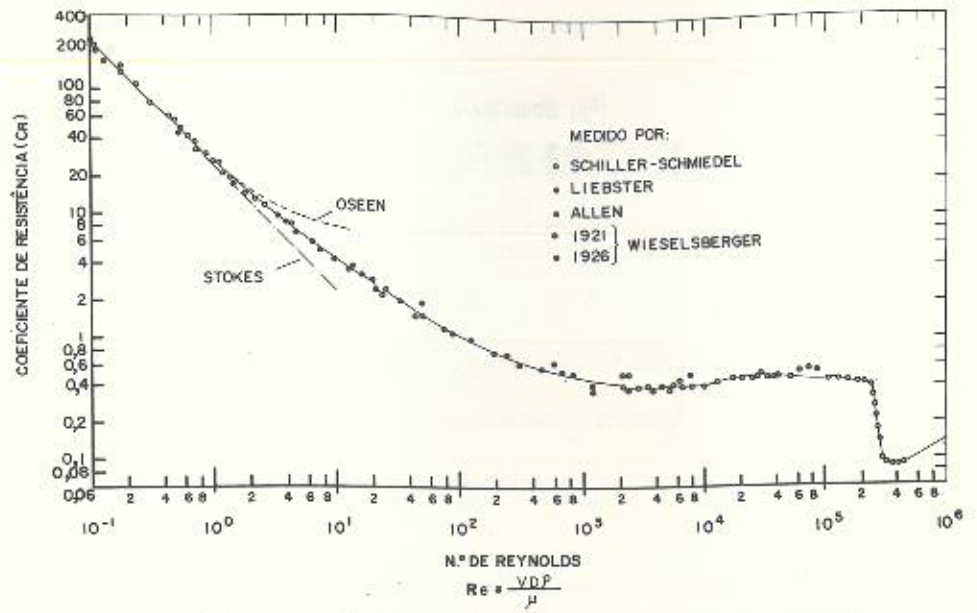


FIGURA A.4 Coeficiente de resistência ao movimento de partículas

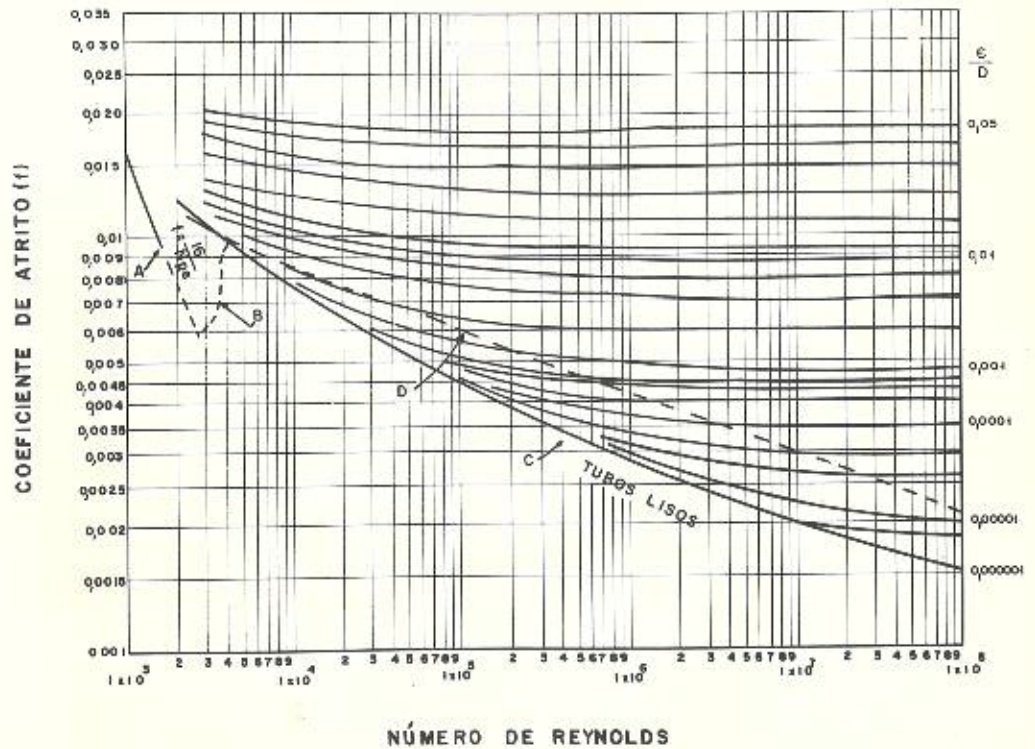


FIGURA A.5 Coeficiente de atrito - escoamento de ar em dutos

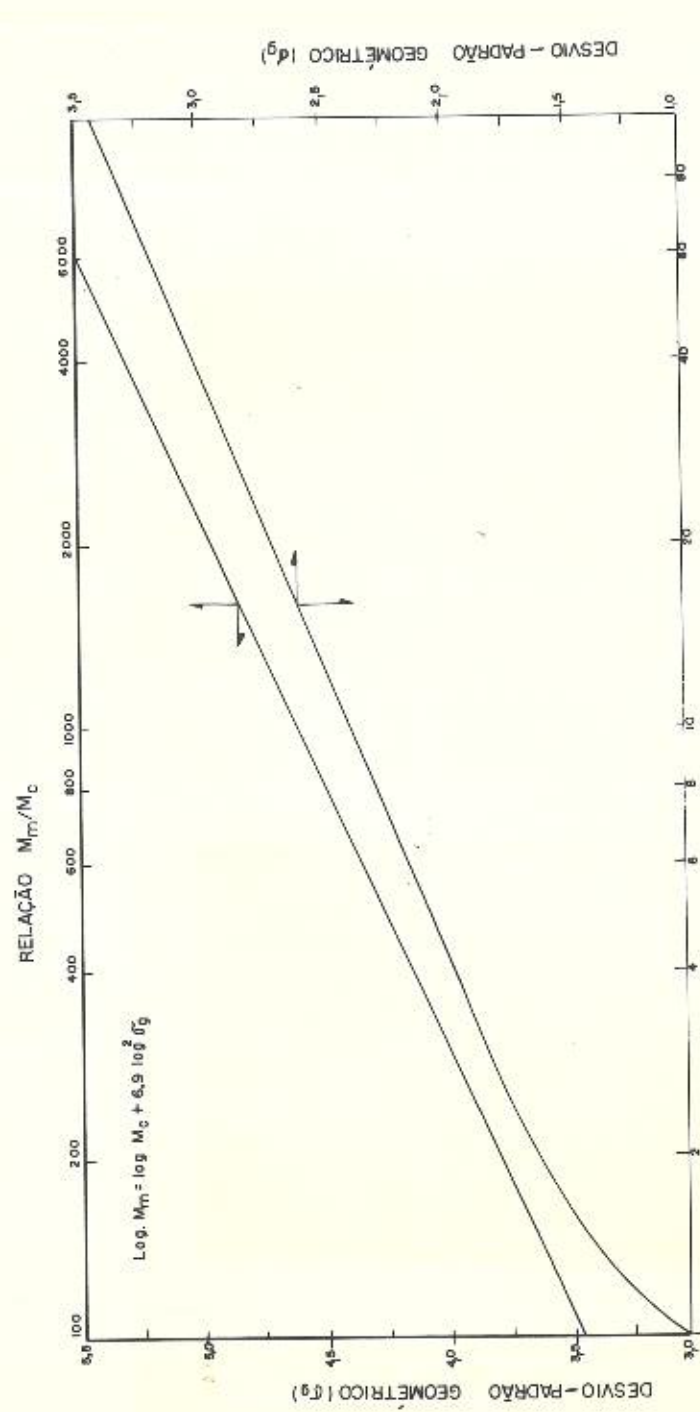


FIGURA A.6 Estimativa gráfica da mediana em massa (M_m) a partir da mediana em número (M_c) e do desvio-padrão geométrico (σ_g)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALDEN, J. L., *Design of industrial exhaust systems*, 3.^a edição, New York, Industrial Press, 1959 (243 p.)
2. HEMEON, W. C. L., *Plant and process ventilation*, 2.^a edição, New York, Industrial Press, 1963 (481 p.)
3. American Conference of Governmental Industrial Hygienists – Committee on Industrial Ventilation, *Industrial ventilation: a manual of recommended practice*, 12.^a edição, Lasing, Michigan, 1972
4. Organização Pan-americana da Saúde. Organização Mundial da Saúde. Comissão Intermunicipal de Controle da Poluição das Águas e do Ar. *Curso intensivo de ventilação industrial*, São Paulo, 1968 (547 p.)
5. JORGENSEN, R., *Fan engineering*, 7.^a edição, New York, Buffalo Forge Company, 1970 (729 p.)
6. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, *ASHRAE guide and data book applications*, New York, 1968 (664 p.)
7. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, *ASHRAE handbook of fundamentals*, 5.^a edição, New York, 1967 (544 p.)
8. BEDFORD, T., *Basic principles of ventilation and heating*, 2.^a edição, Londres, H. K. Lewis & Co., 1966 (438 p.)
9. BERRY, C. H., *Flow and fan*, New York, Industrial Press, 1954 (222 p.)
10. GUIMARÃES, F. A. e NEFUSSI, N., *Curso de ventilação industrial*, São Paulo, Faculdade de Saúde Pública da USP
11. GUIMARÃES, F. A. et alii, *Ventilação de tanques de tratamento superficial de corpos metálicos: projeto de recomendação*, São Paulo, Superintendência de Saneamento Ambiental, 1974, (15 p.)
12. DANIELSON, J. A., *Air pollution engineering manual*, Cincinnati, Ohio, Department of Health, Education, and Welfare, 1967 (892 p.) (Public Health Service Publications n. 999-AP-40)
13. IDEL' CIK, I. E., *Memento des parties de charge*, Eyrolles, Editeur Paris, 1960 (494 p.)
14. OWER, E. e PANKHURST, R. C., *The measurement of air flow*, 4.^a edição, New York, Pergamon Press, 1966 (367 p.)
15. HATCH, T. F. e BARRON-ORONZCO, D., "Air flow in free convection over heated bodies", Pittsburgh, Pa., 1956 – separata de *ASHE Journal Section, Heating, Piping & Air Conditioning*, 117-23, outubro de 1956
16. BRANDT, A. D., *Industrial health engineering*, New York, John Wiley & Sons, 1947 (395 p.)
17. DALLA VALLE, J. M., *The industrial environment and its control*, New York, Pitman Publishing Corporation, 1948
18. REDONDO, S. F., "Notas de aula do curso de Higiene e Segurança", Faculdade de Engenharia Industrial da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 1953
19. REDONDO, S. F., "Notas de aula do curso de Ventilação e Conforto Térmico", São Paulo, Faculdade de Higiene e Saúde Pública da USP, 1955

20. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, *Limites de tolerância para 1972*. São Paulo, Fundacentro, 1973 (72 p.) (Fundação Centro Nacional de Segurança, Higiene e Medicina do Trabalho, Série técnica, H 1)
21. STROCK, C., *Heating and ventilating's - engineering data-book*, 5.ª edição, New York, Industrial Press, 1948
22. Carrier Air Conditioning Company, *Handbook of air conditioning system design*, New York, McGraw-Hill Book Company, 1965
23. WOODS, G., *Woods practical guide to fan engineering*, 2.ª edição, Inglaterra, Woods of Colchester, 1960 (290 p.)
24. American Iron and Steel Institute - Committee on Industrial Hygiene, *Steel mill ventilation*, New York, 1965 (118 p.)
25. STERN, A. C., *Air pollution*, 2.ª edição, New York, Academic Press, 1968, 3 vols.
26. American Petroleum Institute, *Cyclone dust collectors*, New York, 1956 (67 p.)
American Petroleum Institute, *Removal of particulate matter from gaseous waste-wet collectors*, New York, 1961 (47 p.)
27. STRAUSS, W., *Industrial gas cleaning: the principles and practice of the control of gaseous and particulate emissions*. Oxford, Pergamon Press, 1966 (471 p.). (International series of monographs in chemical engineering)
28. FUCHS, N. A. *The mechanics of aerosols*, Oxford, Pergamon Press, 1964 (408 p.)
29. SILVERMAN, L. et alii. *Particle size analysis in industrial hygiene*, New York, Academic Press, 1971 (317 p.)
30. GREEN, H. L. e LANE, W. R., *Particulate clouds: dusts, smokes and mists*, 2.ª edição, Londres, E. & F. N. Spon, 1964 (471 p.) (General and industrial chemistry series)
31. DAVIES, C. N., *Aerosol science*, Londres, Academic Press, 1966 (468 p.)
32. Environmental Protection Agency (EUA), *Control of gaseous emissions*, North Carolina, s.d.
33. Department of Health, Education and Welfare (EUA), *Control of particulate emissions*. North Carolina, s.d.
34. ORR, J. C., *Fundamental theory and selection of fans*, Cambridge, Ontario Research and Development Engineer, Sheldons Engineering, 1974 (21 p.). (Trabalho a ser apresentado; Sheldons Engineering, Sales Conference, My 15-19, 1974)
35. Environmental Protection Agency (EUA), *Atmospheric sampling*, North Carolina, 1973. (Manual: training course 435)
36. GUIMARÃES, F. A. & NEFUSSI, N., *Engenharia de ventilação industrial*, São Paulo, 1973 (166 p.). (Apostila)
37. DORMAN, R. G., *Dust control and air cleaning*, Oxford, Pergamon Press, 1974 (615 p.). (International series of monographs in heating, ventilation and refrigeration, Vol. 9)
38. STROCK, C. e KORAL, R. L., *Handbook of air conditioning heating and ventilating*, 2.ª edição, New York, Industrial Press, 1965, 1472 p.
39. SKOCHINSKY, A. e KOMAROV, V., *Mine ventilation*, tradução de John Scott, Moscou, Mir Publishers, 1969 (580 p.)

Data Anis.:
Valor: Doação
Valor:
Preço: R\$ 1,00
Data Tomba:

Engenharia de Ventilação Industrial foi escrito por três engenheiros da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, de reconhecida capacidade em suas especializações

Apresentam os autores, em oito capítulos do livro:

“Ventilação industrial”, “Princípios de mecânica dos fluidos aplicados à ventilação industrial”, “Toxicologia industrial”, “Propriedades dos aerodispersóides”, “Ventilação geral”, “Ventilação local exaustora”, “Escolha de equipamentos de controle” e “Verificação de sistemas de ventilação”, de fácil compreensão para os profissionais que militam no campo da engenharia de segurança do trabalho e controle de poluição do ar e para aqueles que exercem atividades relacionadas com essas áreas.



CETESB



EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA.

7.35.001.09

06477