

RYSZARD MAJEWSKI

**CONCEPÇÃO, DESENVOLVIMENTO E TESTE DE UM
LAVADOR DE GASES**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

**São Paulo
2002**

**CONSULTA
FD-3230**

RYSZARD MAJEWSKI

**CONCEPÇÃO, DESENVOLVIMENTO E TESTE DE UM
LAVADOR DE GASES**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Arildo Tribess

São Paulo
2002

Ryszard Majewski

Em especial a Deus Pai de nós todos, à minha
Esposa pela ajuda direta e indireta (libertando-me de
algumas obrigações profissionais), aos meus Filhos
que construíram este equipamento, ao Prof. Dr.
Arlindo Tribess, Orientador deste trabalho, e a todos
os Colegas que colaboraram na elaboração deste
trabalho.

Agradecimentos.

SUMÁRIO

Lista de Tabelas
Lista de Figuras
Lista de Símbolos
Resumo
Abstract

1	1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1	1.1. Preliminares	1
1	1.2. Objetivos	1
3	1.3. Fontes de poluição	3
3	1.4. A indústria da poluição	3
6	1.5. Técnicas de controle da poluição	6
7	1.6. Equipamentos de controle da poluição	7
8	1.6.1. Controle de vapores e gases	8
9	1.6.2. Controle de material particulado	9
12	2. O LAVADOR DE GASES	12
12	2.1. Princípios de funcionamento de ciclones	12
13	2.1.1. Separação por via seca	13
13	2.1.2. Separação por via úmida	13
14	2.2. O ciclone "americano"	14
15	2.3. O lavador de gases desenvolvido	15
20	2.4. Testes realizados	20
21	3. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	21
21	3.1. Introdução	21
21	3.2. Determinação da vazão de água de pulverizadores	21
22	3.3. Sistema de medição da vazão de ar	22
25	3.4. Determinação da umidade do ar	25
27	3.5. Dosagem do material particulado	27
27	3.5.1. Escolha do material particulado	27
29	3.5.2. Sistema de dosagem do material particulado	29
30	3.6. Medição de concentração residual de material particulado	30

33	4. ENSAIOS REALIZADOS
33	4.1. Introdução
33	4.2. Condições gerais de ensaio
33	4.3. Resultados dos ensaios
33	4.3.1. Ensaio para a verificação da umidificação do ar
33	4.3.1.1. Ensaio sem pulverização de água.....
34	4.2.1.2. Ensaio com injeção de água utilizando bicos pulverizadores
39	4.3.2. Ensaio para a verificação da eficiência do lavador de gases
39	4.3.2.1. Resultados de eficiência utilizando um bico pulverizador
40	4.3.2.1. Resultados de eficiência utilizando quatro bicos pulverizadores.....
42	5. CONSIDERAÇÕES FINAIS
44	6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
46	7. BIBLIOGRAFIA
	ANEXO A
	ANEXO B

LISTA DE TABELAS

24	Dados geométricos da placa de orifício	Tabela 3.1
26	Parâmetros de calibração dos termopares	Tabela 3.2
34	Resultados dos ensaios sem injeção de água (valores médios)	Tabela 4.1a
34	Resultados dos ensaios sem injeção de água (valores calculados)	Tabela 4.1b
35	Resultados dos ensaios com injeção de água de 21,7 °C, em um bico pulverizador (valores médios)	Tabela 4.2a
35	Resultados dos ensaios com injeção de água, em um bico pulverizador (valores calculados)	Tabela 4.2b
35	Resultados dos ensaios com injeção de água de 21,7 °C, em dois bicos pulverizadores (valores médios)	Tabela 4.3a
36	Resultados dos ensaios com injeção de água, em dois bicos pulverizadores (valores calculados)	Tabela 4.3b
36	Resultados dos ensaios com injeção de água de 21,7 °C, em três bicos pulverizadores (valores médios)	Tabela 4.4a
36	Resultados dos ensaios com injeção de água, em três bicos pulverizadores (valores calculados)	Tabela 4.4b
37	Resultados dos ensaios com injeção de água de 21,7 °C, em quatro bicos pulverizadores (valores médios)	Tabela 4.5a
37	Resultados dos ensaios com injeção de água, em um quatro bicos pulverizadores (valores calculados)	Tabela 4.5b
37	Resultados dos ensaios com injeção de água de 21,7 °C, em cinco bicos pulverizadores (valores médios)	Tabela 4.6a
38	Resultados dos ensaios com injeção de água, em um cinco bicos pulverizadores (valores calculados)	Tabela 4.6b
38	Resultados dos ensaios com injeção de água de 21,7 °C, em seis bicos pulverizadores (valores médios)	Tabela 4.6a
38	Resultados dos ensaios com injeção de água, em um seis bicos pulverizadores (valores calculados)	Tabela 4.6b
40	Resultados dos ensaios de eficiência de coleta utilizando um bico pulverizador	Tabela 4.7
41	Resultados dos ensaios de eficiência de coleta utilizando quatro bicos pulverizadores	Tabela 4.8
A.2	Equipamentos separadores/coletores de material particulado por via seca	Tabela A.1
A.17	Equipamentos separadores/coletores de material particulado por via úmida	Tabela A.2
A.26	Quadro comparativo das características de alguns lavadores de gases	Tabela A.3

LISTA DE FIGURAS

12	Escoamento no interior do ciclone	Figura 2.1
15	Características geométricas de um ciclone americano	Figura 2.2
16	Representação esquemática do lavador de gases com acessórios	Figura 2.3
17	Vista geral do lavador de gases instalado	Figura 2.4
17	Detalhe do lavador de gases mostrando a instalação dos bicos pulverizadores	Figura 2.5
18	Detalhe do segundo cone, do funil de decantação e do selo de água	Figura 2.6
19	Detalhe do sistema de bombeamento da água	Figura 2.7
19	Detalhe do exaustor montado na parte superior do lavador de gases	Figura 2.8
21	Vazão de pulverizador com pastilha de orifício de 3,2 mm	Figura 3.1
24	Vazão de ar na placa de orifício	Figura 3.2
25	Termopares instalados no duto de entrada e captação do ar	Figura 3.3
25	Termopares instalados no duto de saída e exaustão do ar	Figura 3.4
26	Barcada de medição de temperaturas	Figura 3.5
27	Quartzo micronizado ($95\% < 20 \mu\text{m}$)	Figura 3.6
28	Fragões finas na combustão do carvão pulverizado	Figura 3.7
28	Distribuição típica de partículas na combustão de carvão pulverizado	Figura 3.8
29	Dosador de material particulado	Figura 3.9
31	Instalação para amostragem da concentração de material particulado	Figura 3.10
32	Compressor conectado à câmara de coleta do material particulado na sucção	Figura 3.11
32	Câmara de coleta de material particulado contendo o filtro	Figura 3.12
A.7	Partes componentes básicas de um ciclone	Figura A.1
A.9	Dimensões de um ciclone	Figura A.2
A.10	Características de um ciclone Laple	Figura A.3
A.11	Características de um ciclone Niggas 11	Figura A.4
A.12	Características de um ciclone B4	Figura A.5
A.13	Características de um ciclone tipo C2-1	Figura A.6
A.14	Características de um ciclone ϕ 1000	Figura A.7
A.16	Características de um ciclone americano	Figura A.8
A.22	Ciclone úmido com pulverizadores instalados nas paredes	Figura A.9

A.23	Ciclone scrubber	Figura A.10
A.24	Lavador ciclônico com injeção de água na entrada do gás	Figura A.11
A.24	Lavador ciclônico com injeção de água no ventilador	Figura A.12
A.25	Lavador de gases multi-ciclone	Figura A.13

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>C</i>	Coefficiente de descarga, adimensional
<i>D</i>	Diámetro, m
<i>d</i>	Diámetro, m
<i>l</i>	Distância, m
<i>k</i>	Relação entre calores específicos, adimensional
<i>p</i>	Pressão, kPa (bar)
<i>q_m</i>	Vazão mássica, kg/s
TBS	Temperatura de bulbo seco, °C
TBU	Temperatura de bulbo úmido, °C
Letras Gregas	
<i>β</i>	Coefficiente de expansão volumétrica
Δ <i>p</i>	Diferença de pressão, kPa (bar)
<i>ε</i>	Fator de compressibilidade, adimensional
<i>φ</i>	Umidade relativa, %
<i>η</i>	rendimento, adimensional
<i>μ</i>	Viscosidade absoluta, kg/m.s
<i>ρ</i>	Massa específica, (kg/m ³)
<i>ω</i>	Umidade absoluta, kg vapor d'água/kg ar seco

RESUMO

O ar, principalmente nas grandes cidades e centros industriais, apresenta níveis de gases e de partículas extremamente elevados, razão pela qual o controle da poluição têm merecido maior atenção por parte da sociedade e dos órgãos governamentais. Neste trabalho é realizado o estudo de um lavador de gases industrial modificado, tipo ciclone americano duplo cone com bicos pulverizadores laterais, de baixo custo, na coleta de material particulado.

O estudo compreende as principais etapas de um projeto de um lavador de gases: a concepção do lavador de gases, a construção e montagem do equipamento e a sua avaliação experimental.

Foram realizados testes para a verificação das condições de umidificação do ar e da eficiência de coleta do material particulado. Nos primeiros testes foi definido o número de bicos pulverizados que maximiza a umidificação e, consequentemente, maximiza a capacidade de retenção de material particulado.

Nos ensaios para a verificação da eficiência na coleta de material particulado foi utilizado material micronizado de quartzo ($1\mu\text{m} \leq d_{\text{part}} \leq 30\mu\text{m}$), com diâmetro médio de $7,5\mu\text{m}$, cuja distribuição granulométrica é semelhante às frações mais finas do material particulado volátil emitido na combustão do carvão pulverizado em caldeiras.

Foram utilizadas concentrações de material micronizado na corrente de alimentação na faixa de 20 a 100 mg/m^3 de ar, para as quais foram obtidas eficiências de 92 a 96% , com a utilização de um bico pulverizador, e de $93,9$ a $98,6\%$, com a utilização de quatro bicos pulverizadores. Estas eficiências caracterizam uma performance muito boa do lavador de gases na coleta de material particulado.

ABSTRACT

Air, mainly in big cities and industrial regions, shows extremely high levels of gas and particles. Therefore, the society and governmental institutions have focused more attention on the pollution control. In this paper the study of a modified industrial gas cleaner for particulate receiving is done. This cleaner is an American double cone cyclone with low cost lateral pulverize outlets.

The analysis involves the main phases of the design of a gas cleaner: gas cleaner conception, assembling and experimental evaluation.

Tests were made to check the air humidification conditions and receiving efficiency of particulate. In the first tests the number of pulverized outlets was defined in order to maximize the humidification and, consequently, maximize the retention of particulate.

For the test for efficiency analysis of particulate receiving was used quartz micronize material ($1\mu\text{m} \leq d_{\text{part}} \leq 30\mu\text{m}$), with an average diameter of $7,5\mu\text{m}$. The granulometric distribution is similar to the finest fractions of volatile particulate send by coal combustion, pulverized in boilers.

Concentrations of micronize material in the range of 20 to $100\text{mg}/\text{m}^3$ was used in the feeding stream. For those, efficiencies of 92% to 96 % were obtained, using one pulverized outlet, and 93,9 to 98,6%, using four pulverized outlets. Those efficiencies characterize a very good performance of the gas cleaner for particulate receiving.

Capítulo I

INTRODUÇÃO E

OBJETIVOS

1.1 Preliminares

Desde os primórdios, quando se iniciava o processo de endurecimento da crosta terrestre, com a queda da temperatura, chuvas torrenciais lavavam a atmosfera e, ao entrarem em contato com a crosta aquecida, a água transformava-se novamente em vapor, iniciando um dos mais antigos ciclos da natureza: o ciclo da água.

Com a evolução gradativa do sistema e abaixamento das temperaturas, este velho método de tratar os gases para manter a qualidade do ar, sempre se mostrou a mais eficiente e importante forma de diminuir ou até eliminar os gases tóxicos, vapores agressivos e material particulado, tornando a atmosfera do planeta viável para o surgimento e manutenção da vida na terra, que surgiu adaptada a este sistema.

Atualmente, os mesmos princípios continuam atuantes, absorvendo grande parte dos poluentes liberados inclusive pela atividade industrial humana. Porém devido à falta de controle nos processos, o crescimento segue desordenado, provocando uma distribuição concentrada de poluentes nos polos industriais e grandes centros urbanos, dificultando a atuação do processo natural.

A queima de combustíveis (fósseis ou não) para a geração de energia, envolve no mundo industrializado uma grande massa de gases, fumos e partículas que contaminam a atmosfera. O ar na natureza, também não é necessariamente limpo, sendo constantemente contaminado por poeira, bactérias, pólen, gases de combustão e com a queimada de matas. Nos grandes polos industriais, a emissão de gases e partículas é extremamente elevada e dispersa em uma área muito reduzida, gerando concentrações anormais de contaminantes.

1.2 Objetivos

Para reduzir os riscos da poluição uma das formas de controle é por meio de equipamentos que removem os poluentes antes que os mesmos sejam lançados na atmosfera. Para a redução na emissão de material particulado, que é o objeto de estudo deste trabalho, isto pode ser feito através do uso de ciclones.

Contudo, a teoria existente para o projeto de ciclones para a coleta de material particulado, com condições de coleta preestabelecidas, ainda é pouco precisa e insuficiente (Rader e Marple, 1985; Marple e Willeke, 1976; Lidén e Gudmundsson, 1997). Além disto, otimizações baseadas somente em modelos teóricos, muitas vezes não produzem um ciclone melhor (Dirgo e Leith, 1985). Por isso, é comum que novos ciclones sejam baseados em modificações de projetos antigos, em que algumas poucas dimensões do ciclone são variadas experimentalmente para obter um ciclone mais eficiente (Moore e McFarland, 1993, Kenny e Gussman, 1995; Moore e McFarland, 1996).

Assim, neste trabalho é realizado o estudo de um lavador de gases industrial modificado, tipo ciclone “americano” duplo cone com bicos pulverizadores laterais, de baixo custo, na coleta de material particulado. Este estudo compreende as principais etapas de um projeto de um lavador de gases: a concepção do lavador de gases, a construção e montagem do equipamento e a sua avaliação experimental.

Meios para consolidar os objetivos

Como se trata de um ciclone de utilização não convencional, inicialmente foi necessário fazer um estudo pormenorizado sobre as formas de se projetar, construir e operar um ciclone típico, compreendendo:

- Pesquisa da literatura profissional e de bibliografia nacional e estrangeira;
- Ensaios realizados e observações sobre ciclones industriais construídos para este fim;
- Ações corretivas, guiadas pelos resultados das medições e experiência;
- Direcionar o processo para a diminuição de emissão de material particulado no ambiente;
- Coleta de material particulado na região mais favorável do ciclone;
- Utilização de sistema de reciclo;
- Utilização de equipamentos de separação e purificação adequados para os padrões desejados, etc.

Optou-se por desenvolver um lavador de gases que utiliza como base para o seu desenvolvimento um ciclone tipo “americano”. Este tipo de ciclone possui um diâmetro maior e uma altura menor que os outros tipos de ciclones, tornando-o mais adequado para utilização em galpões industriais com pé direito baixo, muito comum no Brasil.

1.3 Fontes de poluição

As fontes de poluição podem ser classificadas em fontes específicas e em fontes múltiplas. As fontes específicas são aquelas que normalmente ocupam uma área relativamente limitada, sendo quase todas de natureza industrial e possibilitam a avaliação da emissão na base, fonte por fonte. Tais fontes são chamadas fixas ou estacionárias.

As fontes múltiplas geralmente se encontram dispersas e a sua avaliação por meio do esquema fonte por fonte é inviável. Tais fontes podem ser fixas ou móveis. Neste conjunto estão incluídas aquelas fontes que queimam combustível (lavanderias, veículos, hospitais etc.), evaporação de produtos de petróleo, queima de resíduos sólidos e atividades que produzem odores (restaurantes, aviários etc.). A despeito dessa classificação, as fontes de poluição do ar podem ser consideradas como fixas e móveis.

As indústrias são as fontes mais significativas ou de maior potencial poluidor. Cada fonte industrial de poluição atmosférica apresenta problema específico de poluição, pois as emissões são resultantes das características do processo de fabricação. Entre tais características podem ser citados:

- ✓ matérias-primas e combustíveis utilizados;
- ✓ processos e operações adotados;
- ✓ produtos fabricados;
- ✓ eficiência do processo industrial;
- ✓ medidas de controle adotadas.

As indústrias normalmente são classificadas em categorias (metalúrgicas, mecânicas, têxtil, bebidas, químicas, etc.), em função das quais pode se calcular o potencial de poluição do ar gerado.

1.4 A indústria da poluição

A seguir são apresentadas algumas categorias consideradas-se a natureza da atividade e os tipos de poluentes emitidos.

A) *Indústrias de minerais não metálicos*

Incluem principalmente as indústrias que fabricam produtos de material cerâmico e refratário, cimento, cimento-amianto, vidro, concreto, produtos de gesso e produtos abrasivos. Os principais processos e operações poluidoras são constituídas pelas operações de redução de tamanho (britagem, moagem e peneiramento), manipulação e transporte da

materia-prima, processos de desidratação, calcinação, oxidação da matéria orgânica e ionferroso e formação de silicatos em estufas e fornos, operações e acabamento como de esmaltação, e os processos de combustão em geral.

Tipos de poluentes

- ✓ Postras - principalmente provenientes das operações de redução de tamanho;
- ✓ Fumaça e fumos - principalmente dos processos de combustão e de secagem e cozimento em fornos.

B) Industrias Metalurgicas – Fundições

Incluem as fundições primárias que se referem aquelas que produzem o metal do minério, e as fundições secundárias que incluem aquelas que recuperam o metal de sucatas e que produzem ligas e lingotes. No Brasil tem grande importância, entre as fundições primárias, as siderúrgicas.

Tipos de poluentes

- ✓ Fumos de óxidos metálicos, poeira e produtos de combustão da operação de fusão, dependendo da volatilidade e impurezas dos metais, sucata ou minério;
- ✓ Dióxido de enxofre, dependendo do conteúdo do enxofre no minério, no carvão e no combustível utilizado.

C) Industrias Metalurgicas de Produtos

Envolvem as industrias que produzem peças forjadas, laminadas, principalmente as treliças de barras e arames, as fabricas de parafusos, as industrias de estruturas metálicas e as caldeirarias, as cutelarias, as fabricas de ferramentas, e fabricantes de peças por estamparias. Comumente envolvem fusão do metal, serviços de oficina, acabamento do metal e revestimento da superfície.

Tipos de poluentes

Os principais poluentes do ar são fumos metálicos, postras das fundições, névoas e vapores de solventes provenientes da aplicação do revestimento de proteção nos departamentos de acabamento.

D) Indústria de Madeira e Mobiliário

Incluem as indústrias de desdobramento, compensação e produção de chapas de madeira prensada, de fabricação de peças e estruturas de madeira aparelhada, fabricação de artigos de cortiça, fabricação de artigos diversos de madeira e produtos afins, e fabricação de móveis e artigos de colchoaria.

Tipos de poluentes

- ✓ Material particulado;
- ✓ Gotículas de tinta, solventes;
- ✓ Fumaça de equipamentos que queimam resíduos.

E) Indústrias Químicas e Farmacêuticas

Incluem a fabricação de ilimitada variedade de produtos: elementos químicos e produtos químicos inorgânicos e orgânicos: matérias plásticas básicas e fios artificiais; pólvoras e explosivos, óleos brutos, essências vegetais e matérias graxas animais, preparados para limpeza e polimento; desinfetantes, inseticidas, germicidas e fungicidas; tintas, esmaltes, lacas, vernizes, impermeabilizantes e solventes; produtos derivados de petróleo, produtos derivados da destilação de carvão de pedra e da madeira, produtos farmacêuticos e medicamentos; e produtos de perfumaria, sabões e velas.

Tipos de poluentes

- ✓ A tecnologia química produz todas as formas de poluição do ar.

F) Indústrias Têxteis

Incluem as indústrias de beneficiamento de matérias têxteis de origem vegetal e animal, as fiações, as teceLAGENS, as malharias e outras indústrias de artefatos têxteis.

Tipos de poluentes

- ✓ Material particulado (fibras e fios) é emitido dos resíduos de produção;
- ✓ Vapores orgânicos e névoas de tinturaria, descoloramento e lavagem são também emitidas, além de material particulado e dióxido de enxofre dos equipamentos de combustão.

G) Indústrias de Papel e Papelão

O processo mais utilizado é o “Kraft” que remove a lignina da celulose através de uma solução de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio.

Tipos de poluentes

- ✓ Material particulado e substâncias odoríferas (mercaptanas e sulfeto de hidrogênio).

H) Indústrias de Produtos Alimentares e Bebidas

Incluem beneficiamento, torrefação e moagem de produtos alimentares, preparação de conservas de frutas, legumes, especiarias e condimentos vegetais, abate de animais e preparação de conservas de carne e pescado, pasteurização do leite e fabricação de laticínios: fabricação e refino de açúcar, fabricação de balas, fabricação de produtos de padaria, fabricação de massas alimentícias e biscoitos, fabricação de vinhos, aguardentes e outras bebidas espirituosas, fabricação de bebidas não alcoólicas e outros produtos.

Tipos de poluentes

- ✓ Odores podem ocorrer nas diversas fases do processamento dos produtos;
- ✓ Poeiras são emitidas das operações de beneficiamento e moagem.

1.5 Técnicas de controle da poluição

Conforme apresentado em Derisio (1992), no estudo do problema da poluição do ar podem ser consideradas quatro etapas, a saber: a produção, a emissão, o transporte e a recepção de poluentes. Em cada uma dessas etapas é possível intervir para reduzir os riscos da poluição e aplicar, na maioria dos casos, métodos científicos e técnicos já conhecidos. Dentre esses métodos têm sido considerados os seguintes:

- ✓ Planejamento territorial e zoneamento;
- ✓ Eliminação e minimização de poluentes;
- ✓ Concentração dos poluentes na fonte para tratamento antes do lançamento;
- ✓ Diluição e mascaramento dos poluentes;
- ✓ Equipamentos de controle de poluentes.

O planejamento territorial e o zoneamento se mostram como ferramentas úteis no controle da poluição a medida em que se viabilize a proibição de tipos de indústrias em

certas áreas; haja uma limitação no número de fontes em função dos padrões de emissão e qualidade do ar; e exista possibilidade de implantação de áreas de proteção sanitária.

Com relação à eliminação ou minimização de poluentes, deve-se considerar o uso de matérias-primas e combustíveis de baixo potencial poluidor; a alteração de processos para aqueles com menor emissão de poluentes; a adequada manutenção e operação de equipamentos e dos processos; o emprego de "lay-out" adequado e a manutenção dos edifícios industriais.

Quanto à concentração dos poluentes na fonte, o ponto mais importante se relaciona ao uso de sistemas de ventilação local exaustora como meio para juntar os poluentes que, após tratados, serão lançados na atmosfera.

A diluição ou mascaramento dos poluentes consiste basicamente no uso de chaminés elevadas e emprego de substâncias que possibilitem reduzir a emissão de substâncias desagradáveis.

Os equipamentos de controle por sua vez são dispositivos que visam remover os poluentes antes que os mesmos sejam lançados na atmosfera. A seguir serão abordados alguns aspectos sobre tais equipamentos, hoje utilizados como uma das formas de se controlar a poluição do ar.

1.6 Equipamentos de controle da poluição

Inicialmente, os problemas, por serem novos e devido ao desconhecimento por grande parte dos profissionais, dos efeitos, perigos e formas de controle e avaliação destes, bem como a falta de literatura especializada na maioria dos casos, levou ao desenvolvimento de soluções e equipamentos adaptados a cada situação particular.

O trabalho de técnicos ligados ao problema, foi pioneiro e diversos protótipos de câmaras gravitacionais, separadores ciclônicos, filtros e lavadores rudimentares foram desenvolvidos. Com base nestas experiências, estudos foram feitos, iniciando-se trabalhos e levantamentos de dispersão dos contaminantes na atmosfera.

O adensamento das metrópoles, e concentração dos pólos industriais, motivaram o aparecimento de outra alternativa mais racional e eficiente. A nova função dos aparelhos, era a remoção dos materiais agressivos do fluxo gasoso.

Desenvolveram-se nesta fase, inicialmente, separadores gravitacionais e ciclônicos para a remoção das partículas de fuligem, emriquecidas de SO₂, extremamente danosas. Seguiram-se os filtros, tecidos e os filtros eletrostáticos, chegando-se por fim nos lavadores de gases.

A escolha do equipamento deve ser realizada levando-se em consideração:

- a) *Estado físico do poluente*: em se tratando de gases e vapores, os equipamentos de controle mais utilizados são as torres de absorção, os condensadores e os incineradores. A coleta de material particulado, sólido ou líquido, é em geral, realizada em coletores inerciais, coletores centrífugos, lavadores, filtros e precipitadores eletrostáticos;

- b) *Gravidade da limpeza desejada*: esta relacionado à existência de padrões de emissões e de qualidade e se constitui num fator importante a ser considerado. Neste caso a eficiência do equipamento é o principal ponto a ser observado

- c) *Propriedade do gás transportador*: em que devem ser considerados a sua composição química, temperatura, viscosidade, umidade, combustibilidade, reatividade química e propriedades elétricas;

- d) *Propriedades do contaminante*: em que devem ser considerados a concentração do poluente ou carga, a solubilidade, a capacidade adsorptiva, a combustibilidade, a reatividade química, as propriedades elétricas, a hidrosolubilidade, o tamanho, a forma e a densidade de partículas;

- e) *Custo*: outro fator fundamental é o custo de equipamento ou do sistema, dado pela soma do custo de capital e do custo de operações.

Dentre os equipamentos de controle é possível distingui-los entre aqueles mais utilizados na remoção de gases e vapores e aqueles usados na remoção de partículas.

1.6.1 Controle de gases e vapores

Entre as várias maneiras 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.

A absorção ocorre quando um gás ou vapor em solução gasosa é posto em íntimo contato com um líquido no qual ele é solúvel, havendo transferência de massa do gás para o líquido, proporcionalmente à solubilidade do gás no líquido e ao diferencial de concentração. Essa transferência de massa é conseguida em equipamentos onde o soluto (gás ou vapor) é posto em íntimo contato com o solvente (líquido), e cujos principais tipos são as torres de enchimento, torres de pratos, torres de spray e os lavadores do tipo Venturi. Nelas a absorção é provocada pelo grau de difusão molecular e turbulenta entre as

fases (gasosa e líquida). A escolha do solvente é de grande importância para que altas eficiências sejam obtidas.

A adsorção é a capacidade de certos poluentes por substâncias de alta superfície específica (alta porosidade) por forças intermoleculares ou por afinidade química, que pode ser usada na coleta de poluentes em equipamentos chamados leitos de adsorção, Os materiais mais utilizados são o carvão ativado, a alumina ativada e a sílica gel. A adsorção tem se mostrado um método eficiente e de, baixo custo para poluentes com concentrações não superiores a 500 ppm.

Em caso do poluente ser emitido na forma de vapor, o controle pode ser atingido, transformando esse poluente para a fase líquida e restando-o 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. 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 das vezes, os condensadores têm sido utilizados como pré-tratamento para outros equipamentos, tais como pós-queimadores, adsorvedores e filtros de manga.

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 naturais transforma-se na fonte ou na causa de emissão de poluentes em outro recurso. 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. Os equipamentos mais empregados na incineração de gases e vapores são os flares, os queimadores de chama direta e os queimadores catalíticos.

1.6.2 Controle de material particulado

Neste caso são utilizados principalmente os chamados coletores que podem ser divididos em gravitacionais, inerciais, centrífugos e úmidos. Além dos coletores tem-se os precipitadores térmicos, os filtros, e os precipitadores eletrostáticos.

Os precipitadores térmicos, a exemplo dos sônicos, não têm sido utilizados largamente no campo industrial. O princípio de funcionamento baseia-se na aplicação de um diferencial de temperatura ocorrendo a migração das partículas da zona mais quente para a mais fria.

Os filtros por outro lado têm sido um dos mais antigos métodos de remoção de partículas de um fluxo gasoso, e podem apresentar altas eficiências para uma ampla faixa de tamanhos de partícula. O fluxo de gás carregado de partículas é forçado através de um meio poroso, onde as partículas são coletadas. O meio poroso pode ser composto de material granulado ou fibroso, podendo ser disposto na forma de leitos, compactado nas formas de painéis ou na forma de tecido. Em função do tipo de material filtrante, os filtros podem ser classificados em filtros de tecidos, leitos filtrantes, painéis compactados, ultrafiltros e sólido poroso. No campo do controle da poluição os filtros de tecidos são aqueles mais utilizados até então. Os filtros de tecidos têm sido mais aplicados em indústrias de minerais não metálicos, fornos elétricos de aço, fornos de recuperação de chumbo, dióxido de titânio, cereais, madeira etc. Dentre as vantagens deste tipo de equipamento podem ser ressaltadas a alta eficiência, a perda de carga não excessiva e a resistência à corrosão. Uma das desvantagens é o seu alto custo.

Os coletores gravitacionais utilizam como princípio de funcionamento a disposição gravitacional das partículas transportadas pelo fluxo gasoso. Para tanto, é necessário que a velocidade do gás seja substancialmente reduzida, para possibilitar a deposição das partículas dentro do coletor. Os usos mais comuns são como um pré-coletor em operações de refinamento de metais (para as partículas mais grossas), em indústrias alimentícias (cascas e películas) em caldeiras alimentadas a carvão (coleta das cinzas) etc.

Nos coletores inerciais o gás carregado de partículas é levado a chocar-se contra obstáculos, com mudanças bruscas de direção, após aumento de sua velocidade. Isso faz com que as partículas, com inércia, não evitem o choque, sejam impactadas e, em sua maioria, coletadas. Tais coletores também são mais utilizados como pré-coletores visando diminuir a carga de poeira de maior tamanho.

Os coletores sônicos apesar de terem um princípio de coleta promissor, não têm sido utilizados industrialmente no campo de controle da poluição do ar. Nestes coletores as partículas são aglomeradas pela passagem do gás através de intensas ondas sonoras. Após essa aglomeração as partículas são retidas por meio de coletores convencionais.

Os coletores centrífugos, também conhecidos por ciclones, têm como princípio de funcionamento o uso da força centrífuga. Estes são classificados em coletores secos (“ciclones secos”) e em coletores úmidos (ciclones úmidos). Os principais tipos de lavadores de gases ou coletores úmidos, objeto de estudo neste trabalho, são:

a) *Lavador de ar convencional*. Este lavador é usado quando a concentração de pó é grande e as partículas > 10 µm, mas atende razoavelmente para partículas de 1 a 10 µm.

b) *Precipitador dinâmico, tipo úmido*. Um ventilador é usado para impactar as partículas contra suas pás, ao mesmo tempo que se mantém atomizadas sobre elas, obtendo-se eficiências de coleta em torno de 95% para partículas > 2 µm.

c) *Lavador tipo torre com enchimento* (coletores de impactação). O ar atravessa, de baixo para cima, uma camada de enchimento, que em certos casos lembra uma colmeia, que recebe o borrfio de água de aspersores colocados acima do enchimento. Permite coleta de partículas até 1 µm.

d) *Lavadores Venturi*. O fluxo gasoso tem sua velocidade aumentada ao passar através de uma constrigão (garganta), onde o líquido é injetado e atomizado pela alta velocidade do gás. Também permite coleta de partículas de até 1 µm.

e) *Ciclone úmido*. Constitui-se de um ciclone ao qual é adaptado um sistema de borrfamento de água, de modo que as partículas tendem a escorrer pela superfície do coletor até a tremonha, onde é feita a coleta do material reído, sob a forma de lodo ou lama. Permite coleta de partículas de até 1 µm.

f) *Ciclone úmido com ventilador*. No interior do ciclone existe um rotor helicoidal que comunica às partículas trajetórias que fazem com que sejam lançadas de encontro às paredes do ciclone e, já umedecidas pelo borrfio dos aspersores, escoem para o fundo da tremonha. Também permite coleta de partículas até 1 µm.

g) *Ciclone scrubber*. Interação turbulenta entre partículas a serem separadas e as gotículas de água obtidas através de bicos pulverizadores. Consegue coletar partículas de até 0,5 µm com eficiência > 75%. A eficiência de coleta geral chega a 99 % (Krammes e Büttner, 1994).

No Anexo A são apresentados mais detalhes com relação a diversos tipos de equipamentos de separação de partículas sólidas, por via seca e via úmida, com ênfase nos processos de separação por ciclones.

O LAVADOR DE GASES

Capítulo 2

2.1 Princípios de funcionamento de ciclones

Conforme apresentado no Capítulo 1 e no Anexo A, é possível encontrar-se na literatura uma série de separadores e lavadores de gases para o controle de material particulado, bem como para o resfriamento e absorção de gases e vapores tóxicos tais como SO_2 , SO_3 , H_2SO_4 , HF , HCl , P_2O_5 , NO_2 e outros.

Em alguns destes equipamentos a separação/remoção é feita com o uso de um ciclone, no qual um exaustor disposto na parte superior do equipamento, força o escoamento do gás que contém o material particulado e/ou vapores, conforme apresentado esquematicamente na Fig. 2.1.

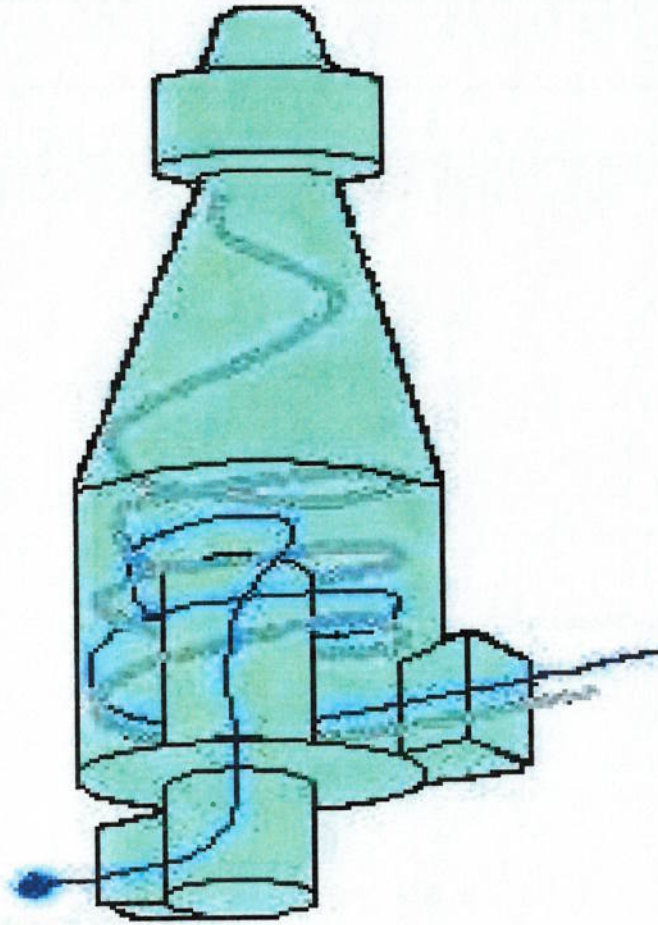


Figura 2.1 - Escoamento no interior do ciclone

2.1.1 Separação por via seca

Na separação por via seca os elementos de separação do material particulado da corrente gasosa, conforme apresentado na Fig. 2.1, são a força centrífuga e a densidade das partículas. A força centrífuga aplicada sobre as partículas é várias vezes mais intensa do que a força da gravidade, empurrando as partículas na direção das paredes do ciclone e separando-as da corrente gasosa.

Este processo de separação, conhecido como via seca, é bastante utilizado na indústria, principalmente pela utilização de equipamentos simples e de menor custo..

As principais vantagens no uso deste tipo de coletor residem na baixa eficiência para partículas inferiores a 5µm, à abrasão excessiva e à possibilidade de entupimento pela presença de altas concentrações de poeira.

Um dos fatores responsáveis pela baixa eficiência dos ciclones com separação por via seca é o rebatimento das partículas na parede e o seu arraste para a saída. Este fator pode ser reduzido pela injeção de água, com consequente umidificação das partículas e das paredes do ciclone, oferecendo uma maior aderência. Além disto a umidificação das partículas aumenta a sua densidade facilitando a sua coleta.

2.1.2 Separação por via úmida

No coletor úmido ou lavador de gases o transportador das partículas 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, aumentando de tamanho, o que torna a sua coleta mais fácil.

Estes coletores têm como vantagem, por exemplo, a possibilidade de coletar gases e partículas de diâmetros menores e como desvantagem a criação de resíduos líquidos.

Por estar baseado num contato íntimo entre os gases e um fluido ou água de lavagem, o processo de lavagem de gases é tão mais eficiente no processo de separação quanto melhor for o contato entre ambos. Com o contato entre os fluidos podem ocorrer processos de condensação em que vapores contidos nos gases mudam de fase e se agregam ou dissolvem na água de lavagem. Outros gases e vapores têm a característica de se dissolverem no fluido de lavagem, até o ponto de saturação. Gases extremamente reativos, reagem com a água de lavagem e são neutralizados.

Para haver uma perfeita remoção dos gases agressivos pelos sistemas de lavagem é, portanto, importante que haja um contato íntimo entre as duas fases, e que o fluido

neutralizante ou água de lavagem ofereça uma condição adequada para a solubilização, condensação e reação com os gases a serem tratados.

Por outro lado, os efeitos físicos de bombardeamento, ciclonação, interceptação, adesão, higroscopia, etc. podem promover a remoção do material particulado contido no gás, com bastante eficiência por via úmida, pois o fluido de lavagem quando atinge a partícula, aumenta seu peso e agrega-se ao fluido, eliminando-a do fluxo gasoso.

2.2 O ciclone “americano”

Um tipo de ciclone particularmente interessante na separação de partículas por via seca é o ciclone americano, cujas características geométricas são apresentadas na Fig. 2.2 e que foi utilizado na concepção do lavador de gases desenvolvido e testado neste trabalho.

Este ciclone possui um diâmetro maior e uma altura menor que os outros tipos de ciclones, que o torna mais adequado para utilização em galpões industriais com pé direito baixo, muito comum no Brasil. Contudo, estas características o tornam menos eficiente na coleta do material particulado.

Assim, é de interesse dotar o ciclone americano de bicos pulverizadores de água para aumentar a sua eficiência na coleta de material particulado. A instalação de pulverizadores de água confere a este tipo de ciclone características de um lavador de gases.

A eficiência na coleta de material particulado dos lavadores de gases é fortemente influenciada pela variação da vazão do gás, isto é, pelo tamanho do lavador. Sendo assim, a construção de unidades industriais, montadas em baterias com modulação do funcionamento de acordo com a vazão é frequentemente utilizado e será objeto de estudo neste trabalho.

Além disto, no projeto de um lavador de gases, devem ser levados em consideração principalmente os seguintes aspectos:

- ✓ Construção simples e compacta;
- ✓ Baixo custo de investimento;
- ✓ Eficiência elevada para uma larga escala de tamanhos das partículas;
- ✓ Pequeno consumo de água e de energia elétrica;
- ✓ Insensibilidade na variação de temperatura;
- ✓ Possibilidade de absorção de vapores e gases tóxicos inflamáveis e explosivos;
- ✓ Possibilidade de resfriamento de gases quentes;
- ✓ Umidificação do ar para condições de saturação.

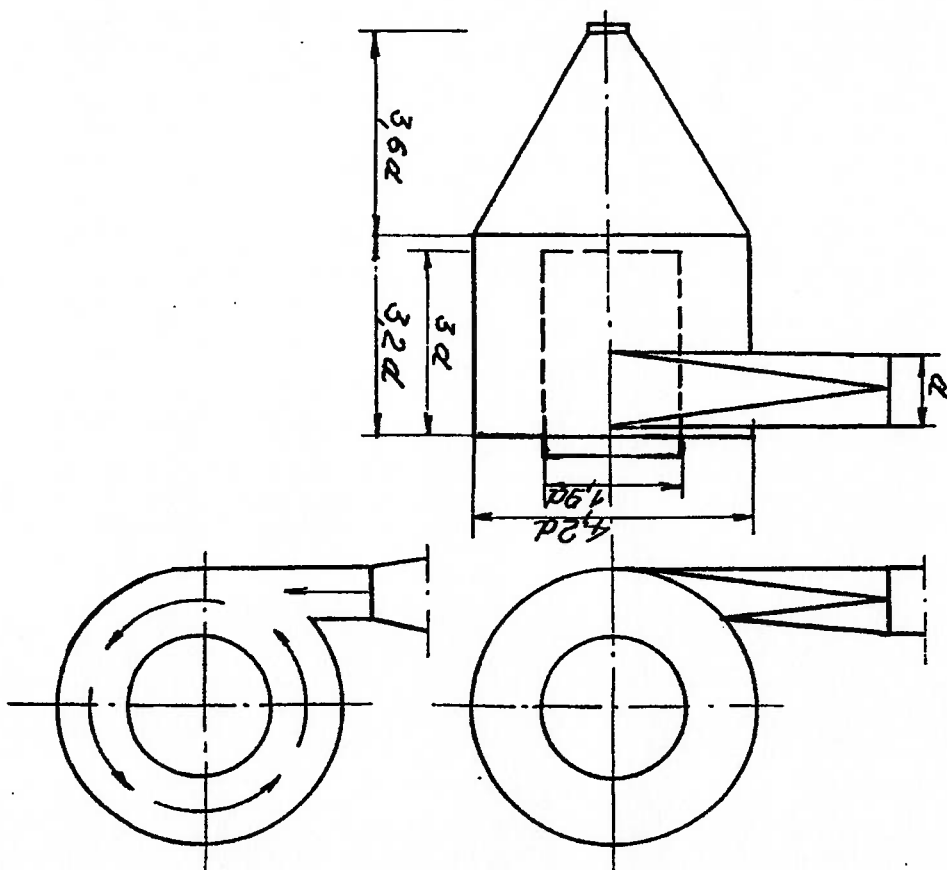


Figura 2.2 - Características geométricas de um ciclone americano.

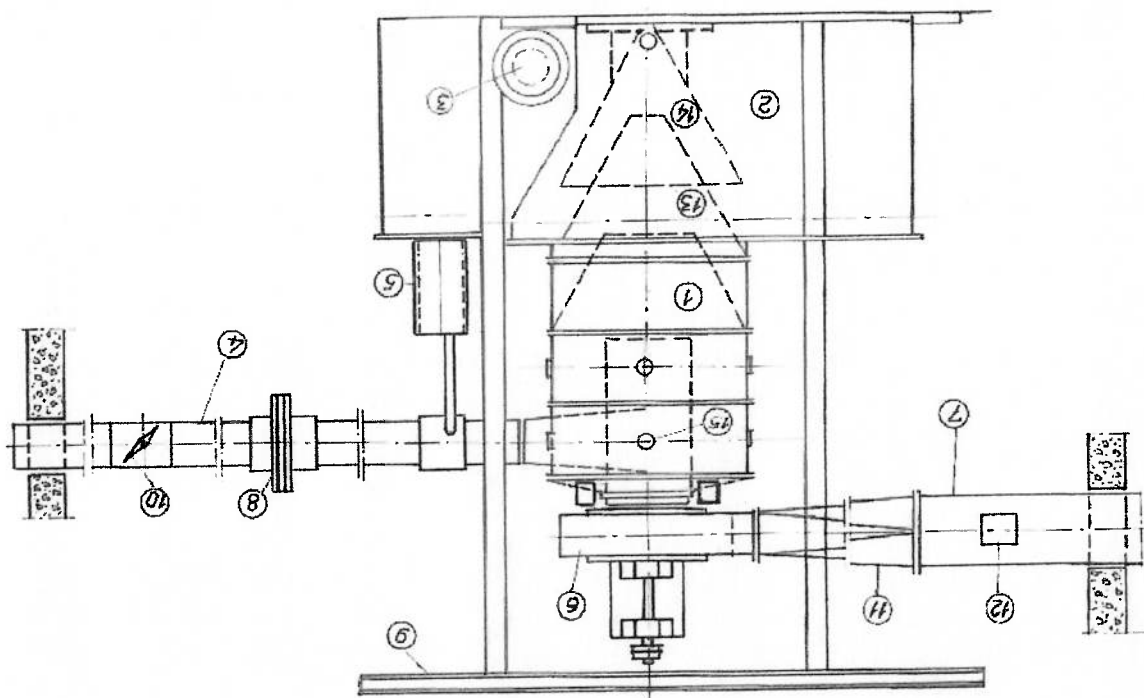
Tendo-se por base os aspectos acima mencionados, foi projetado um lavador de gases industrial para coleta de material particulado, apresentado esquematicamente na Figura 2.3, cujas características são apresentadas a seguir.

2.3 O lavador de gases desenvolvido

O lavador de gases tipo ciclone americano duplo cone é composto de um ciclone de 900 mm de diâmetro e de altura total da parte funcional de 1418 mm, montado sobre uma caixa de coleta de água de lavagem, com um sistema de bombeamento e de separação das partículas contidas na água. Uma vista geral do equipamento instalado é apresentada na

Fig. 2.4.

A parte cilíndrica é composta por três anéis de 345 mm de altura, sendo que o terceiro anel tem a função de suportar o segundo cone como elemento de separação. Os anéis são interligados por meio de parafusos nos flanges com juntas de borracha. Nos dois anéis superiores foram confeccionados quatro orifícios para a instalação dos bicos pulverizadores de água, conforme apresentado na Fig. 2.5.



Legenda:

- 01 – Ciclone;
- 02 – Caixa de água;
- 03 – Bomba hidráulica;
- 04 – Duto de entrada;
- 05 – Dosador de material particulado;
- 06 – Exaustor;
- 07 – Duto de saída;
- 08 – Placa de orifício;
- 09 – Estrutura metálica de sustentação;
- 10 – Válvula borboleta;
- 11 – Cone adaptador;
- 12 – Termopares;
- 13 – Cone de selo hidráulico;
- 14 – Cone de decantação;
- 15 – Bicos pulverizadores

Figura 2.3. Representação esquemática do lavador de gases com acessórios

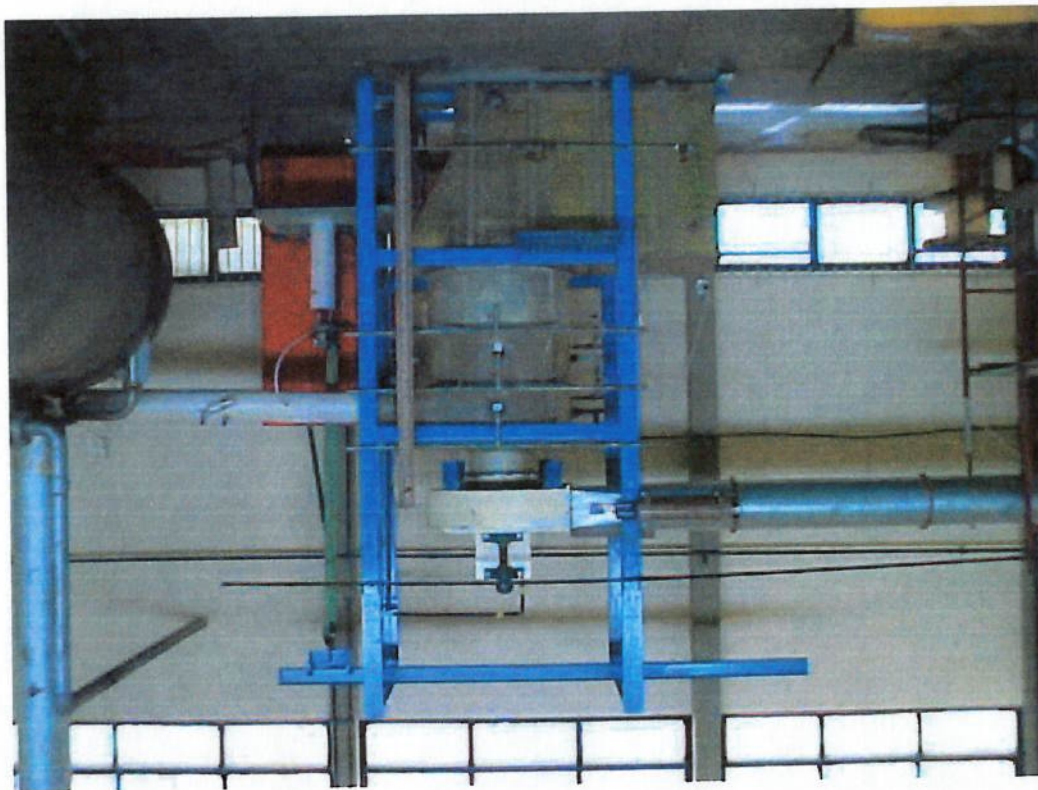


Figura 2.4 - Vista geral do lavador de gases instalado.

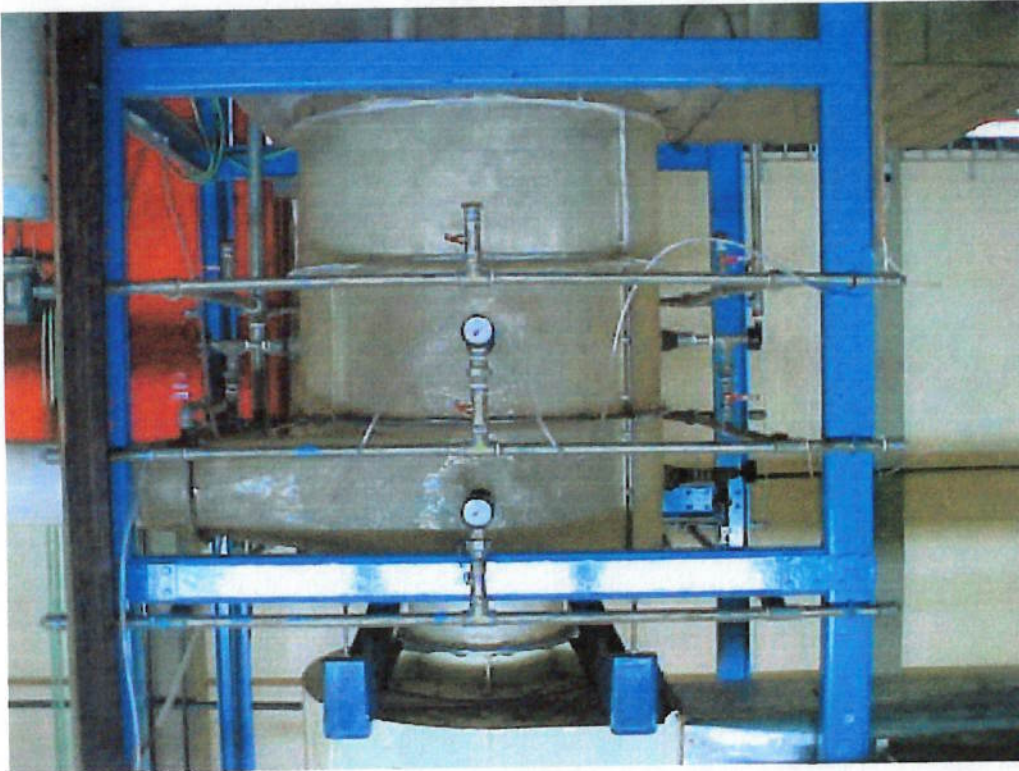


Figura 2.5 - Detalhe do lavador de gases mostrando a instalação dos bicos pulverizadores.

A parte cônica do ciclone tem as dimensões típicas de um ciclone americano (Koch & Licht, 1977). A altura do cone é reduzida oferecendo o deslocamento do fluxo para o segundo cone, que é mergulhado na água contida na caixa de coleta e de purificação, conforme apresentado na Fig. 2.6, formando um selo hidráulico.



Figura 2.6 - Detalhe do segundo cone, do funil de decantação e do selo de água.

Conforme apresentado na Fig. 2.6, o ciclone com seu anel adicional, é montado sobre uma caixa retangular, de dimensões úteis de 1,9 m x 0,91 m x 1,05 m, que corresponde a um volume de 2,5 m³, para coleta e contenção da água de lavagem do ar com um sistema de separação (decaantação) das partículas contidas na água, oferecendo assim a possibilidade de purificação e reutilização. O sistema de purificação, isto é, separação das partículas, é baseado na utilização das forças da gravidade e do tempo de residência.

Os quatro bicos pulverizadores de água de cada módulo são dotados de manômetros tipo Bourdon, ligados a uma bomba hidráulica, apresentada na Fig. 2.7, responsável pela pulverização e pelo fluxo da água.

Na Fig. 2.8 é apresentado o exaustor, disposto na parte superior do ciclone, que causa a depressão que força o escoamento do gás para o corpo do ciclone. O exaustor é acionado por um motor elétrico com potência nominal de 5 HP e rotação de 1730 rpm.

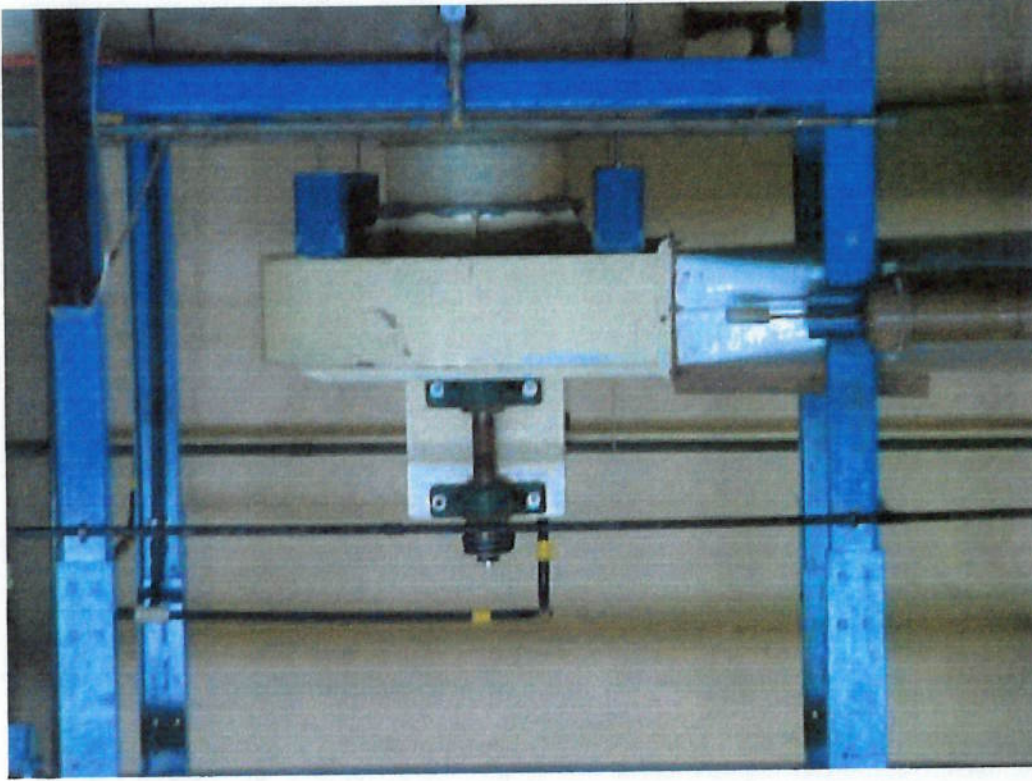


Figura 2.8 - Detalhe do exaustor montado na parte superior do lavador de gases.

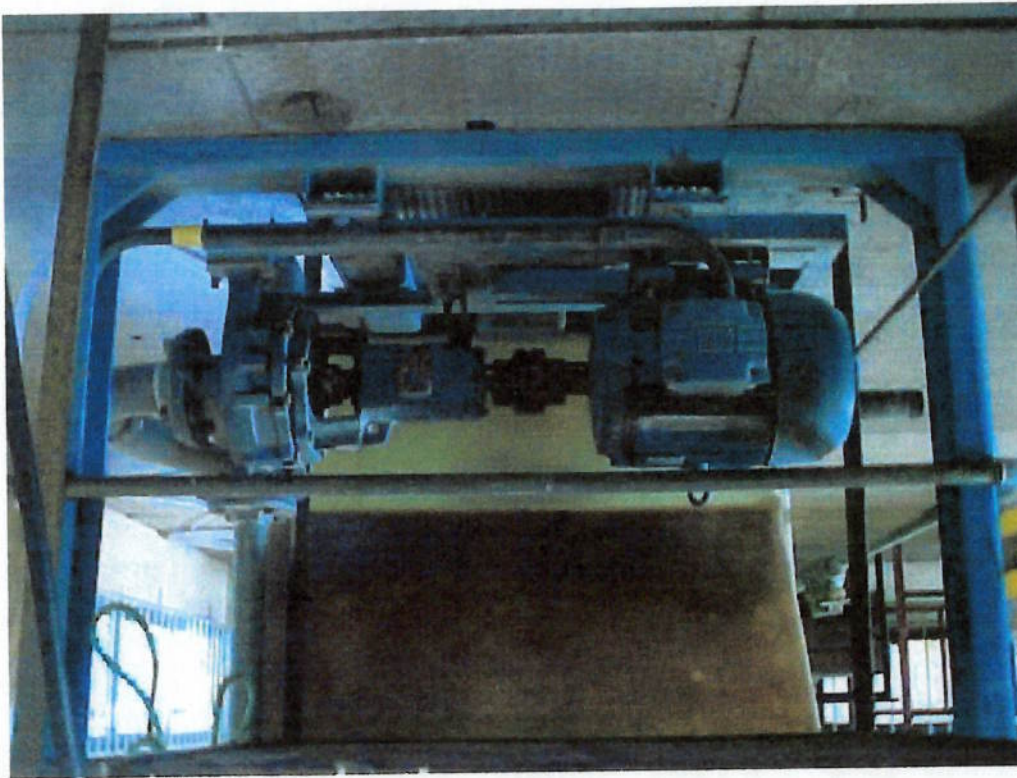


Figura 2.7 - Detalhe do sistema de bombeamento da água.

O diâmetro do duto de alimentação do lavador de gases é de 200 mm, enquanto o duto circular na saída do lavador é de 300 mm. O lavador de gases foi todo construído em fibra de vidro, com relativa transparência, para oferecer a possibilidade de observação do comportamento do fluxo em seu interior.

2.4 Testes realizados

O objetivo principal na construção do lavador de gases industrial, tipo ciclone americano modificado de duplo cone com bicos pulverizadores laterais, é o da retenção de material particulado. Assim, para testar o desempenho do equipamento desenvolvido e instalado, foram realizados ensaios de:

- ✓ verificação das condições de umidificação do ar (que é um indicativo da capacidade de retenção de material particulado);
- ✓ verificação da eficiência do equipamento quanto à coleta de material particulado.

Para a realização dos testes o lavador de gases foi dotado de uma série de aparatos experimentais para a medição de:

- ✓ vazão de água de pulverização;
- ✓ vazão de ar;
- ✓ umidade do ar;
- ✓ dosagem do material particulado (concentração inicial);
- ✓ concentração residual de material particulado.

A realização destas medições é necessária para relacionar as condições de operação do equipamento com a sua eficiência na coleta do material particulado.

Os detalhes da instalação destes aparatos experimentais, bem como os procedimentos necessários para a realização das medições e os resultados obtidos são apresentados nos próximos capítulos.

EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Capítulo 3

3.1 Introdução

Para a realização dos testes do lavador de gases foi necessário inicialmente fazer-se o levantamento das condições de operação dos equipamentos acessórios do lavador. A seguir são apresentados detalhes da instalação e os procedimentos necessários para a medição da vazão de água de pulverização, da vazão de ar, da umidade do ar, da dosagem do material particulado e da concentração residual de material particulado.

3.2 Determinação da vazão de água nos pulverizadores

Para realizar a pulverização da água foram instalados doze pulverizadores, com bico tipo *sprinklers*, nos anéis do ciclone. Estes pulverizadores possuem pastilhas no bico aspersor, que são responsáveis pela pulverização da água, que irá potencializar a eficiência de retenção de partículas no ciclone. Das pastilhas testadas, a que apresentou melhores resultados quanto à qualidade na pulverização da água com a formação de névoa foi a de diâmetro de 3,2 mm.

No levantamento das curvas de vazão de água em função da pressão foram cronometrados os tempos necessários para o enchimento de tanques com capacidade de 30 a 60 kg de água. Foram efetuados três ensaios para a determinação de cada ponto da curva. A Fig. 3.1 apresenta os resultados para um pulverizador com esta pastilha.

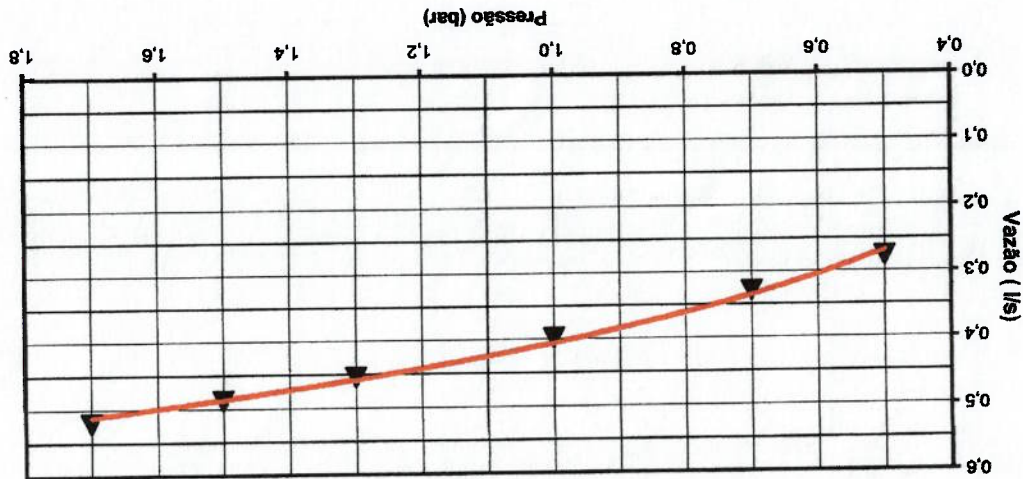


Figura 3.1 - Vazão de pulverizador com pastilha de orifício de 3,2 mm.

3.3 Sistema de medição da vazão de ar

Inicialmente foi projetado e fabricado o medidor de vazão segundo a norma ISO-5167 (ISO, 1989) para a medição de vazão de fluidos no interior de dutos circulares. Por ser uma norma de difícil interpretação, foram consultados também os livros *Flow Measurement Engineering Handbook* (Miller, 1989) e *Manual de medição de vazão através de placas de orifício, bocais e venturis* (Martins, 1998), que apresentaram os conceitos e orientações desta norma de maneira bem mais acessível, além de apresentarem esquemas e desenhos das instalações e detalhes construtivos.

Considerando a avaliação da incerteza apresentada pelos diversos dispositivos (placa de orifício, bocal, venturi, etc.), optou-se pelo uso da placa de orifício, que apresenta um custo significativamente menor, facilidade de fabricação, embora de maneira geral proporcione perda de carga permanente superior aos demais.

Construiu-se uma placa de orifício de diâmetro, D , de 120 mm em material acrílico, fixa por flanges no duto de 200mm, proporcionando um coeficiente de expansão volumétrica, β , igual a 0,6 com tomadas de pressão do tipo D e $D/2$. A estimativa de perda de carga para este dispositivo para as vazões de trabalho do ciclone mostraram-se razoáveis, de maneira a não comprometer as vazões requeridas para os ensaios (até 1800 m^3/h).

Segundo a norma, a vazão mássica, q_m , de ar através da placa de orifício é dada por:

$$q_m = \varepsilon C \frac{1}{\beta^2} \pi \frac{\sqrt{1-\beta^4}}{4} \sqrt{2 \rho \Delta p} \quad (3.1)$$

onde ε é o fator de compressibilidade:

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35\beta) \frac{\Delta p}{k.p} \quad (3.2)$$

e C o coeficiente de descarga dado pela equação de Stolz (Martins, 1998):

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,1840\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5} \left(\frac{Re_D}{10^6} \right)^{0,75} + 0,0900 \frac{D}{I} \beta^4 - 0,0337 \frac{D}{I^2} \beta^3 \quad (3.3)$$

onde:

d (m)	- Diâmetro do orifício da placa;
ρ (kg/m^3)	- Massa específica do ar nas condições do escoamento;
Δp (Pa)	- Pressão diferencial das tomadas de pressão;
k	- Relação entre os calores específicos a pressão e a volume constantes (ar a 25°C , $k=1,40 \text{ kJ/kg.K}$);
p (Pa)	- Pressão estática a montante da placa;
l_1 (m)	- Distância entre o centro da tomada de pressão a montante da placa e a face de entrada da placa;
l_2 (m)	- Distância entre o centro da tomada de pressão a jusante da placa e a face de saída da placa;
Re_D	- Número de Reynolds do escoamento,

O Número de Reynolds do escoamento, Re_D , é definido em função da vazão mássica, q_m , do diâmetro do duto, D , e da viscosidade dinâmica do ar nas condições do escoamento, μ , como:

$$Re_D = 4 \frac{q_m}{\pi D \mu} \quad (3.4)$$

onde a vazão através da placa de orifício depende diretamente do coeficiente de descarga que, por ser função do Número de Reynolds, é também função da própria vazão, estabelecendo-se uma relação implícita para a vazão, determinável através de método numérico iterativo.

As Eqs.3.1, 3.2 e 3.3 são aplicáveis para os escoamentos em que as instalações e o próprio elemento primário são construídos segundo a norma e desde que satisfaçam as condições:

1. Diâmetro interno do duto entre 50 mm e 1200 mm;
2. Número de Reynolds maior que $1,26\beta D$.
3. Escoamento subsônico;

Estas condições de uso requeridas foram satisfeitas neste trabalho, quais sejam:

- ✓ o diâmetro interno do duto de captação do ar é de 200 mm;
- ✓ as vazões estudadas estão no intervalo de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ a $5000 \text{ m}^3/\text{h}$, que para o escoamento de ar a temperatura próxima de 25°C , de massa específica $1,2 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade dinâmica $18,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m.s}$, correspondem a um número de Reynolds mínimo de $1,1 \cdot 10^6$;

✓ velocidade máxima de escoamento de 44,3 m/s, portanto muito maior que 9,1.10³ (segunda condição) e muito inferior a 347 m/s (limite para o escoamento subsônico nessas condições de escoamento).

O conjunto de medição de vazão é composto pelo elemento primário feito de material acrílico, conforme dimensões principais apresentadas na Tab. 3.1, e o elemento secundário, que inclui as tomadas de pressão de látex rosqueadas ao duto, que são conectadas por meio de duas mangueiras emborrachadas a um manômetro diferencial com escala de até 300 mmca. O líquido manométrico é a água.

O elemento primário escolhido foi uma placa de orifício concêntrica de cantos vivos, projetada e construída segundo a norma ISO-5167 (ISO, 1989), com os dados geométricos apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Dados geométricos da placa de orifício

Diâmetro da placa	300	mm
Diâmetro do orifício	120	mm
Diâmetro do duto	200	mm
Relação entre os diâmetros	0,6	-
Espessura	10	mm

A Fig. 3.2 apresenta os resultados do programa computacional desenvolvido para o cálculo da vazão através da placa de orifício e denominado de CalcPlaca, que se encontra no Anexo B.

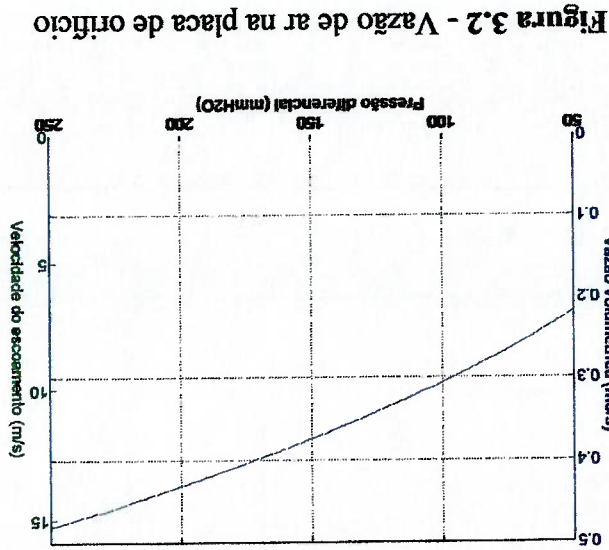


Figura 3.2 - Vazão de ar na placa de orifício

3.4 Determinação da umidade do ar

Para a determinação da umidade do ar foi feita a medição das temperaturas de bulbo seco (TBS) e de bulbo úmido (TBU) do ar de entrada e de saída do ciclone por meio de quatro termopares instalados nos dutos de captação e exaustão de ar. A medição de temperatura foi realizada por meio de termopares tipo T (cobre/constantan) com proteção metálica e conectores compensados, instalados em cinco pontos distintos: dois no duto de captação de ar, dois no duto de exaustão de ar e um no duto de retorno (by pass) da rede de distribuição de água. Nas Figs 3.3 e 3.4 são mostrados os termopares instalados, respectivamente, no duto de captação e exaustão de ar, para medição de TBS e TBU.



Figura 3.3 – Termopares instalados no duto de entrada e captação de ar



Figura 3.4 – Termopares instalados no duto de saída e exaustão do ar

Na Fig. 3.5 é mostrada a bancada de medição da força eletromotriz dos termopares, cujo sinal é levado por meio dos cabos de extensão a um selector de canais com um multímetro digital de precisão (HP 3478A) e uma cuba com gelo fundente (zero físico da junta de referência) para leitura e conversão dos valores. A calibração dos termopares foi realizada para uma faixa de temperaturas entre 10 e 30 °C. Foi tomado o cuidado de isolar com placas de isopor os contatos de materiais não termopares para se evitar a influência de correntes de ar com temperaturas diferentes que pudessem interferir no sinal.



Figura 3.5 – Bancada de medição de temperaturas

Na Tab. 3.2 são apresentados os parâmetros obtidos na calibração dos termopares, com os quais obtve-se a seguinte equação de calibração:

$$T = 24,4 U - 2,1 \pm 0,3^{\circ}\text{C} \quad (3.5)$$

onde U é a diferença de potencial medida e δ é a incerteza resultante das incertezas dos termômetros padrão (com escalas de 0 a 20°C e de 20 a 40°C, aferidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas), das leituras e da regressão linear.

Tabela 3.2 – Parâmetros de calibração dos termopares

Termopar	Posição	a (°C/mV)	b (°C)	δ(°C)
1	TBS – entrada	24,4	2,0	0,2
2	TBU – entrada	24,4	2,0	0,2
3	TBS – saída	24,3	2,0	0,2
4	TBU – saída	24,5	2,0	0,3

A partir dos resultados de TBS e TBU, o valor das unidades relativa e absoluta do ar nas diversas situações de funcionamento do ciclone, foram obtidas por meio do Programa Energy Equation Solver (EES, 1992).

3.5 Dosagem de material particulado

Nesta parte do trabalho são apresentadas as considerações na escolha do material particulado, bem como o sistema de dosagem do material particulado e a sua determinação.

3.5.1 Escolha do material particulado

Nos ensaios de testes de eficiência na coleta de material particulado foi utilizado material micronizado de quartzo ($1\mu\text{m} \leq d_{\text{part}} \leq 30\mu\text{m}$), com diâmetro médio de 7,5 μm . Na Fig. 3.6 é mostrada a distribuição granulométrica deste material, obtida pelo método de contagem em suspensão a laser realizada pelo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP.

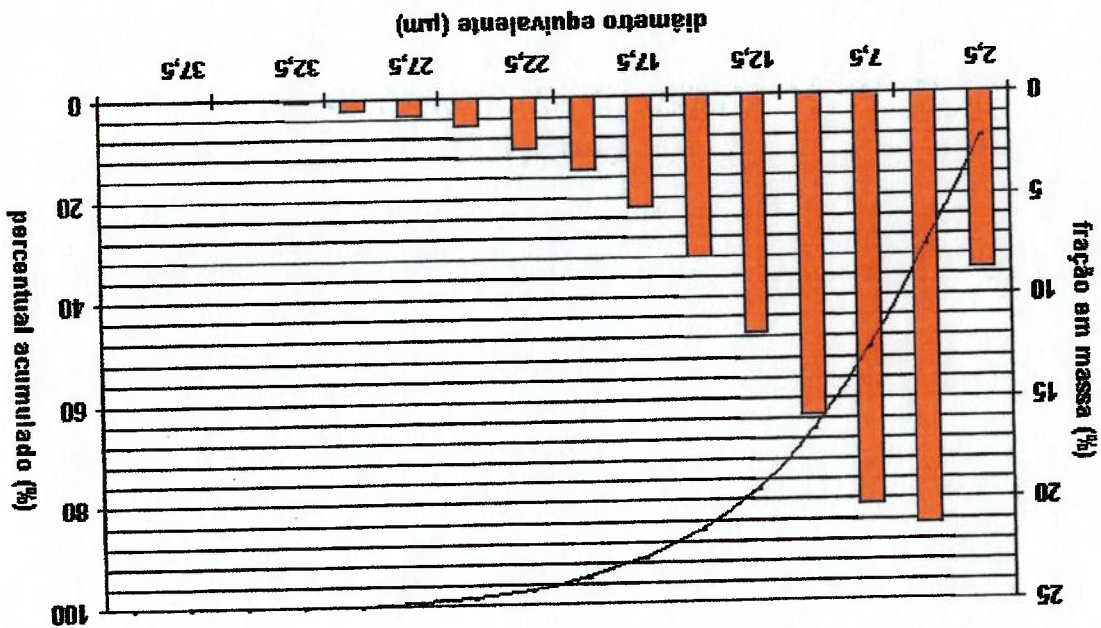
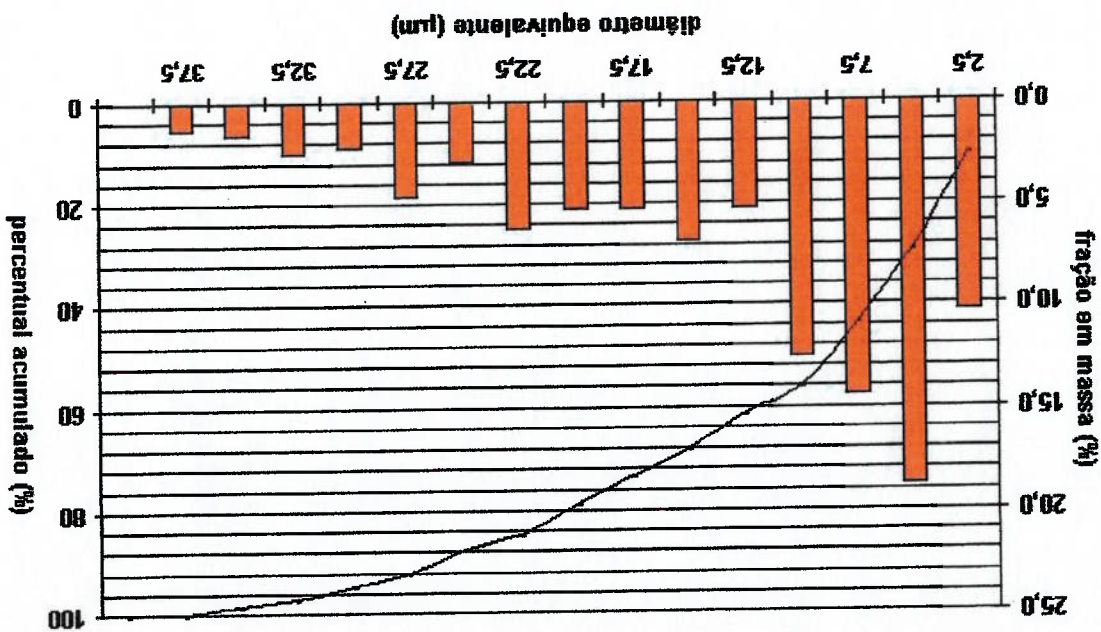


Figura 3.6 – Quartzo micronizado (95% < 20 μm).

Foi escolhido este material micronizado por possuir uma granulometria semelhante às frações mais finas do material particulado volátil emitido na combustão do carvão pulverizado em caldeiras (Singer, 1981), cuja distribuição granulométrica é apresentada na

Figura 3.7 – Frações finas na combustão do carvão pulverizado (Singer, 1981)



Na Fig. 3.8 é apresentada a distribuição típica de diâmetros de partículas emitidas na queima em caldeira de carvão pulverizado, que contempla 18% em massa de partículas com diâmetro maior que 30 µ.

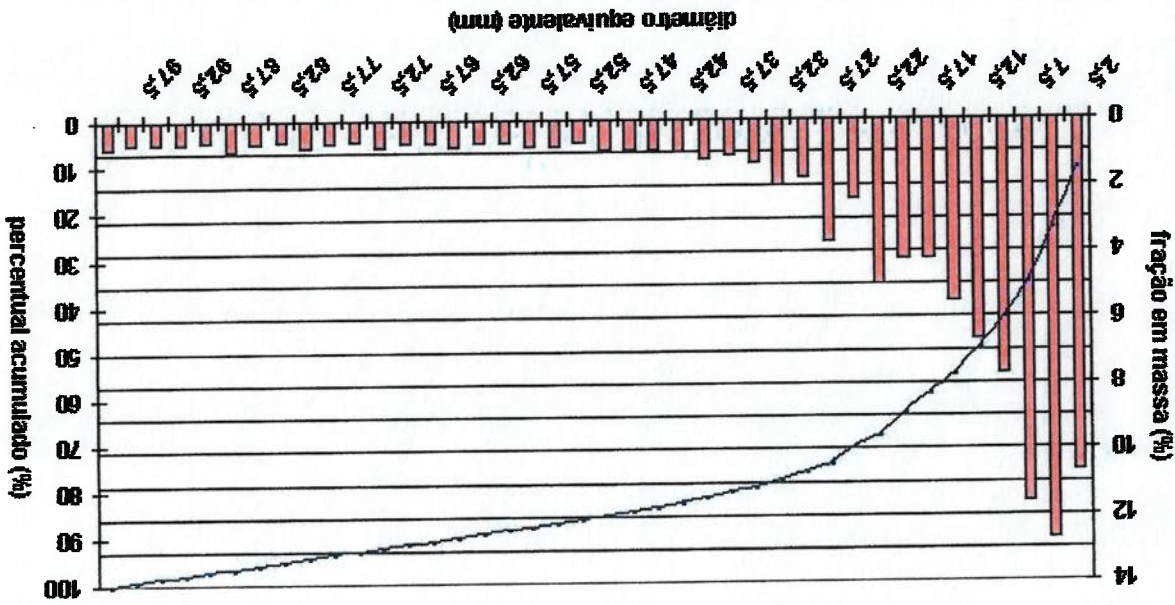


Figura 3.8 – Distribuição típica de partículas na combustão de carvão pulverizado (Singer, 1981).

Observa-se a partir da análise das Figs. 3.6, 3.7 e 3.8 que a distribuição granulométrica média das frações de material micronizado de quartzo (Fig. 3.6) é menor que a daquela das frações mais finas do material particulado volátil emitido na combustão do carvão pulverizado em caldeiras (Fig. 3.7), e bem menor que a distribuição típica de partículas na combustão de carvão pulverizado (Fig. 3.8), cujo aspecto torna este material bastante interessante para a utilização em testes de lavadores de gases, uma vez que está se utilizando material com uma maior dificuldade na coleta de partículas.

3.5.2 Sistema de dosagem de material particulado

O sistema de dosagem de material particulado é constituído por uma câmara cilíndrica pressurizada, ligada à rede de ar comprimido, que possui em seu interior uma haste homogeneizadora, dotada de uma hélice com rotação de 120 rpm para a destruição dos canais preferenciais formados pela sucção durante a fluidização do material micronizado.

Para manter uma certa uniformidade na dosagem do material micronizado foi montado um circuito constituído por válvulas e um manómetro em U para controle da pressão de ar comprimido no dosador. Na Fig. 3.9 o dispositivo dosador de material particulado, com o motor do homogeneizador, e o sistema de regulação da pressão de fluidização é mostrado.

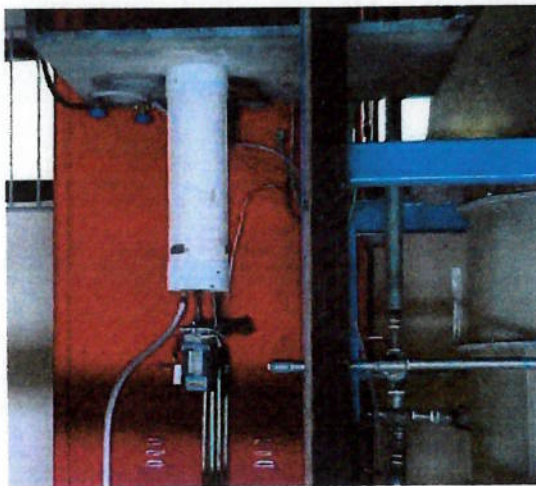


Figura 3.9 – Dosador de material particulado

Foram realizados uma série de testes para a verificação da dosagem do material micronizado, tendo sido fixado uma pressão de fluidização de 400 mmca.. Devido à

influência da variação da vazão de ar, da perda de carga no ciclone, da quantidade de material com a qual o dosador é alimentado (quantidade inicial) e da não uniformidade do material no dosador, a dosagem de material particulado, para esta pressão de fluidização utilizada nos ensaios, variou de 20 a 100 mg/m³ de ar.

3.6 Medição de concentração residual de material particulado

Para a determinação da concentração em massa por volume de material particulado nos gases de saída do ciclone, o método EPA n.º 5 da FGR-40 (USEPA, 1991) propõe um procedimento padronizado de amostragem para a determinação da concentração de materiais particulados e umidade em gases de chaminé.

O método consiste em recolher isocineticamente, por meio de uma sonda aquecida, amostras de gás ao longo de seis pontos da seção do duto da chaminé de forma contínua e passando-as através de um filtro de fibra de vidro com eficiência de 99,99% para partículas maiores que 0,3 µm.

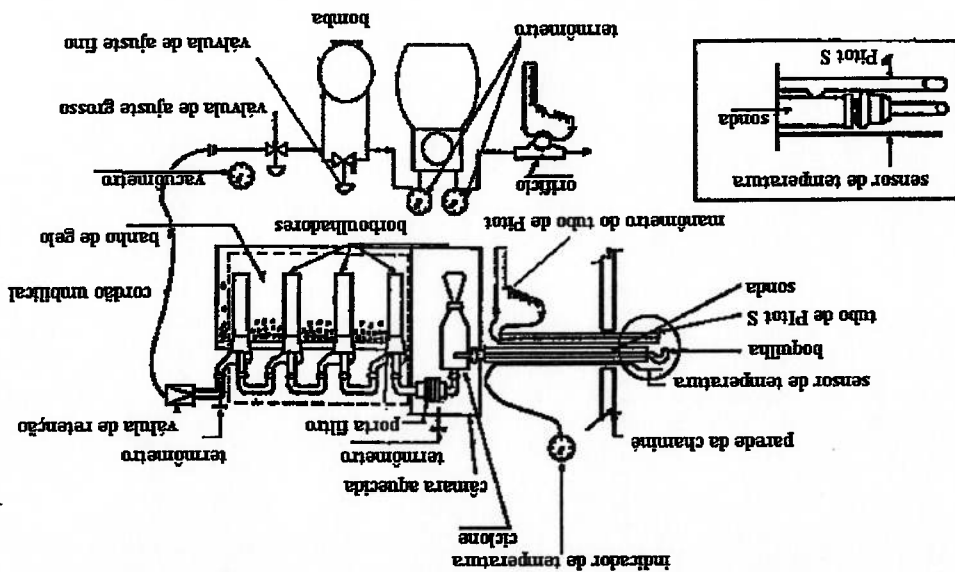
A condição isocinética é mantida pelo uso simultâneo de um medidor de velocidade do tipo tubo de Pitot e uma bomba de vácuo que aspira o gás que passa também por borbulhadores de vidro vedados e resfriados em uma cuba com gelo fundente e por fim num gásômetro seco.

A câmara contendo o filtro deve ser aquecida a uma temperatura de 120°C para evitar condensação de água, o que diminuiria a eficiência do filtro e elevaria muito a perda de carga no circuito.

Indicadores de temperatura calibrados são instalados ao longo de várias posições para o monitoramento das condições do gás e dos arredores, inclusive um termopar inserido junto à sonda e ao Pitot para a determinação da temperatura de referência do escoamento.

A Fig. 3.10 mostra um desenho esquemático da instalação onde o gásômetro seco mede o volume total de gases amostrado relativo à massa de material particulado acrescida ao filtro. Um orifício situado a uma distância superior a oito vezes o diâmetro do duto a partir da última singularidade (admitida como o início do duto de seção circular) deve ser feito para a introdução da sonda.

Figura 3.10 – Instalação para amostragem da concentração de material particulado (USEPA, 1991).



Adaptação do Método EPA n.º 5

Para a medição da concentração residual de material particulado de acordo com as recomendações contidas no método EPA no.5, foi construído um aparato experimental composto de:

- a) um compressor alternativo, funcionando como bomba de vácuo, apresentado na Fig.3.11;

- b) uma câmara de coleta de material particulado não aquecida, apresentada na Fig. 3.12, instalada na sucção do compressor, contendo filtro de fibra de vidro com eficiência de 99,99% para partículas maiores que 0,3 µm e ligada à sonda inserida no duto de descarga do ciclone;

- c) Uma sonda inserida no duto de descarga do ciclone em um orifício de 70 mm situado a uma distância superior a oito vezes o diâmetro do duto a partir do início do duto de seção circular de 300 mm de diâmetro;

- d) Um medidor Pitot instalado no duto de descarga do ciclone junto à sonda, para verificação da coleta isocinética.

A seção da sonda do sistema de coleta do material particulado foi calculada para garantir coleta isocinética a partir do levantamento da velocidade no duto de descarga do ciclone e do volume de sucção do compressor.

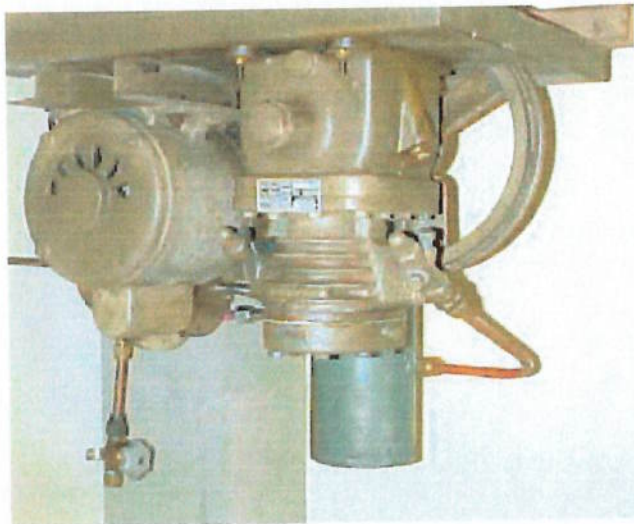


Figura 3.11 Compressor conectado à câmara de coleta do material particulado na sucção



Figura 3.12 Câmara de coleta de material particulado contendo o filtro

Para a determinação do material particulado coletado foram pesados os filtros antes e depois da coleta utilizando balança digital com 0,1 g de precisão.

Capítulo 4

ENSAIOS REALIZADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados com o objetivo de se fazer os testes necessários do lavador de gases tipo ciclone americano modificado. Inicialmente são apresentadas as condições gerias de ensaio e, posteriormente, os resultados dos ensaios para a verificação das condições de umidificação e de eficiência do equipamento quanto à coleta de material particulado.

4.2 Condições gerias de ensaio.

Os ensaios foram realizados com diferentes condições ambientais, com as seguintes condições operacionais:

- ✓ Vazão de água de cada bico pulverizador constante e igual a 1,8 m³/h, correspondente a uma pressão manométrica de 1,6 kgf/cm².
- ✓ Vazão de ar de 1430 a 1800 m³/h.
- ✓ Dosagem de material particulado com concentrações que variaram de 20 a 100 mg/m³ de ar.

4.3 Resultados dos ensaios

4.3.1 Ensaios para a verificação da umidificação do ar

Primeiro foram realizados ensaios sem injeção de água, para a verificação da influência do selo hidráulico do ciclone. Depois foram realizados ensaios utilizando-se bicos pulverizadores. Todos os ensaios foram realizados sem injeção de material particulado.

4.3.1.1 Ensaios sem pulverização de água

Os resultados dos ensaios sem pulverização de água, realizados para a verificação da influência do selo hidráulico do ciclone na umidificação do ar, são apresentados na Tab. 4.1a. Na Tabela 4.1b são apresentados os resultados calculados a partir dos valores de meios nos ensaios. Os ensaios foram realizados com temperatura da água de pulverização a 22,3 °C.

Tabela 4.1a - Resultados dos ensaios sem injeção de água (valores medidos)

Nº	Vazão de ar (m³/h)	Ar entrada	Ar saída	onde: Δp = diferença de pressão	
				TBS = temperatura de bulbo seco	TBU = temperatura de bulbo úmido
1	175	137	28,0	19,6	24,8
2	175	135	28,8	19,8	25,0
3	170	132	29,0	20,2	25,0
4	170	130	28,8	19,7	25,1

onde: Δp = diferença de pressão
 TBS = temperatura de bulbo seco
 TBU = temperatura de bulbo úmido

Tabela 4.1b - Resultados dos ensaios sem injeção de água (valores calculados)

Nº	Vazão de ar (m³/h)	Ar entrada		Ar saída		$\Delta \omega$ (g/kg)
		ϕ (%)	ω (g/kg)	ϕ (%)	ω (g/kg)	
1	1430	47	11,7	60	12,4	0,7
2	1430	45	11,9	59	12,2	0,3
3	1410	46	12,0	58	12,0	0,0
4	1410	44	11,7	57	12,1	0,4

onde: ϕ = umidade relativa
 ω = umidade absoluta

4.3.1.2 Ensaios com injeção de água utilizando bicos pulverizadores

Os resultados dos ensaios utilizando bicos injetores são apresentados nas Tabs. 4.2a e 4.2b; Tabs. 4.3a e 4.3b; Tabs. 4.4a e 4.4b; Tabs. 4.5a e 4.5; Tabs. 4.6a e 4.6b; Tabs. 4.7a e 4.7b respectivamente, para um bico injetor, dois bicos injetores, três bicos injetors, quatro bicos injetores; cinco bicos injetores e seis bicos injetores. As temperaturas da água de pulverização foram, respectivamente, 21,7 °C, 19,9 °C, 19,8 °C, 18,8 °C, 18,6 °C e 18,5 °C.

Tabela 4.2a - Resultados dos ensaios com injeção de água em um bico pulverizador (valores medidos)

Ar saída	Ar entrada				Δp placa orifício (mmH ₂ O)	Δp ciclone (mmH ₂ O)
	TBS (°C)	TBU (°C)	TBS (°C)	TBU (°C)		
20,4	27,0	19,8	30,1	140	185	1
20,6	27,0	19,8	30,2	140	185	2
20,6	27,0	19,8	30,6	140	185	3
20,5	27,2	20,1	30,6	140	185	4

Tabela 4.2b - Resultados dos ensaios com injeção de água em um bico pulverizador (valores calculados)

Δω (g/kg)	Ar saída		Ar entrada		Vazão de ar (m ³ /h)	φ (%)	ω (g/kg)
	ω (g/kg)	φ (%)	ω (g/kg)	φ (%)			
1,8	13,2	56	11,4	40	1475	40	11,4
2,1	13,4	58	11,3	39	1475	39	11,3
2,4	13,4	58	11,0	38	1475	38	11,0
2,1	13,3	56	11,2	38	1475	38	11,2

Tabela 4.3a - Resultados dos ensaios com injeção de água em dois bicos pulverizadores (valores medidos)

Ar saída	Ar entrada				Δp placa orifício (mmH ₂ O)	Δp ciclone (mmH ₂ O)
	TBS (°C)	TBU (°C)	TBS (°C)	TBU (°C)		
19,5	21,5	16,0	18,0	152	200	1
19,8	22,0	16,0	18,0	152	200	2
19,8	22,0	16,5	18,4	152	200	3
19,6	22,0	17,0	18,5	152	200	4

Tabela 4.3b - Resultados dos ensaios com injeção de água em dois bicos pulverizadores (valores calculados)

Nº	Vazão de ar (m³/h)	Ar entrada			Ar saída		Δω (g/kg)
		φ (%)	ω (g/kg)	φ (%)	ω (g/kg)		
1	1550	88	11,2	86	14,3	3,1	
2	1550	88	11,2	84	14,6	3,4	
3	1550	89	11,5	85	14,6	2,9	
4	1550	87	12,2	83	14,2	2,0	

Tabela 4.4a - Resultados dos ensaios com injeção de água em três bicos pulverizadores (valores medidos)

	Δp placa orifício (mmH ₂ O)	Δp ciclone (mmH ₂ O)	Ar entrada			Ar saída	
			TBS (°C)	TBU (°C)	TBS (°C)	TBU (°C)	
1	200	152	19,0	17,0	22,2	19,8	
2	200	152	20,0	16,6	22,2	19,2	
3	200	152	21,2	16,6	21,5	19,5	
4	200	152	21,2	17,0	22,0	19,5	

Tabela 4.4b - Resultados dos ensaios com injeção de água em três bicos pulverizadores (valores calculados)

Nº	Vazão de ar (m³/h)	Ar entrada			Ar saída		Δω (g/kg)
		φ (%)	ω (g/kg)	φ (%)	ω (g/kg)		
1	1550	83	12,0	84	14,4	2,4	
2	1550	74	11,1	75	13,7	2,6	
3	1550	65	10,8	85	14,1	3,3	
4	1550	65	11,2	80	14,1	2,9	

Tabela 4.5a - Resultados dos ensaios com injeção de água em quatro bicos pulverizadores (valores medidos)

Ar saída	Ar entrada				Δp placa orifício (mmH ₂ O)	Δp ciclone (mmH ₂ O)	TBS (°C)	TBU (°C)	TBS (°C)	TBU (°C)
	TBU (°C)	TBS (°C)	TBU (°C)	TBS (°C)						
19,4	22,8	17,5	24,0	152	152	24,0	17,5	22,8	19,4	
19,3	23,0	18,0	24,0	152	152	24,0	18,0	23,0	19,3	
19,2	23,2	18,0	26,0	152	152	26,0	18,0	23,2	19,2	
19,5	23,5	18,0	26,0	152	152	26,0	18,0	23,5	19,5	

Tabela 4.5b Resultados dos ensaios com injeção de água em quatro bicos pulverizadores (valores calculados)

Nº	Vazão de ar (m ³ /h)	Ar entrada		Ar saída		Δω (g/kg)
		φ (%)	ω (g/kg)	φ (%)	ω (g/kg)	
1	1550	55	10,5	72	13,4	2,9
2	1550	57	11,2	73	14,4	3,2
3	1550	47	10,5	73	13,2	2,7
4	1550	47	10,5	70	13,5	3,0

Tabela 4.6a - Resultados dos ensaios com injeção de água em cinco bicos pulverizadores (valores medidos)

Ar saída	Ar entrada				Δp placa orifício (mmH ₂ O)	Δp ciclone (mmH ₂ O)	TBS (°C)	TBU (°C)	TBS (°C)	TBU (°C)
	TBU (°C)	TBS (°C)	TBU (°C)	TBS (°C)						
19,8	24,0	18,8	28,0	152	152	28,0	18,8	24,0	19,8	
19,8	24,0	19,0	28,4	152	152	28,4	19,0	24,0	19,8	
19,8	24,4	19,2	29,0	152	152	29,0	19,2	24,4	19,8	
20,0	24,5	19,2	29,2	152	152	29,2	19,2	24,5	20,0	

Tabela 4.6b - Resultados dos ensaios com injeção de água em cinco bicos pulverizadores (valores calculados)

Nº	Vazão de ar (m³/h)	φ (%)	Ar entrada		Ar saída		Δω (g/kg)
			ω (g/kg)	φ (%)	ω (g/kg)	φ (%)	
4	1550	41	10,9	67	13,7	2,8	2,8
3	1550	41	10,9	67	13,7	2,8	2,8
2	1550	43	10,8	69	13,8	3,0	3,0
1	1550	43	10,8	69	13,8	3,0	3,0

Tabela 4.7a - Resultados dos ensaios com injeção de água em seis bicos pulverizadores (valores medidos)

	Δp placa orifício (mmH ₂ O)	Δp ciclone (mmH ₂ O)	Ar entrada		Ar saída	
			TBS (°C)	TBU (°C)	TBS (°C)	TBU (°C)
4	210	152	30,8	20,8	25,0	20,5
3	210	152	30,5	20,5	25,0	20,2
2	210	152	30,5	20,0	25,0	20,2
1	210	152	30,2	19,8	25,0	20,0

Tabela 4.7b - Resultados dos ensaios com injeção de água em seis bicos pulverizadores (valores calculados)

Nº	Vazão de ar (m³/h)	φ (%)	Ar entrada		Ar saída		Δω (g/kg)
			ω (g/kg)	φ (%)	ω (g/kg)	φ (%)	
4	1628	40	11,8	68	14,2	2,6	
3	1628	40	11,5	65	13,8	2,3	
2	1628	39	11,3	65	13,8	2,5	
1	1628	39	11,2	66	13,6	2,4	

Observa-se pela análise dos resultados apresentados na Fig. 4.1a até a Fig. 4.6b que:

- a) A influência do selo hidráulico na umidificação do ar é pequena, mas não é desprezível;
- b) Não existe uma variação significativa no aumento da umidificação com o aumento no número de bicos injetores, exceto da utilização de um bico para um número maior que um.

Assim, os ensaios para a verificação da eficiência da lavador de gases na coleta de material particulado foram realizados utilizando-se um e quatro bicos pulverizadores.

4.3.2 Ensaios para a verificação da eficiência da lavador de gases

Os ensaios para a verificação da eficiência da lavador de gases foram realizados utilizando-se uma pressão de fluidização de material particulado no dosador em torno de 400 mmca. O tempo de cada ensaio foi de 60 minutos. A eficiência de separação foi calculada a partir da relação:

$$\eta = \frac{conc_{ent} - conc_{sai}}{conc_{ent}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

onde:

η é a eficiência (%), $conc_{sai}$ é a concentração de material particulado na saída do lavador de gases (mg/m^3) e $conc_{ent}$ é a concentração de material particulado na entrada do lavador de gases (mg/m^3).

4.3.2.1 Resultados de eficiência utilizando um bico pulverizador

Na Tab. 4.8 são apresentados os resultados de eficiência de coleta do material particulado utilizando-se um bico pulverizador, em que se verifica que esta eficiência varia de 92 a 96%.

Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de eficiência de coleta utilizando um bico pulverizador

Nº	Vazão de ar (m ³ /s)	Dosagem de material particulado (mg/s)	Conc. ent. (mg/m ³)	Particulado residual (g)	Conc. saída (mg/m ³)	Eficiência (%)
1	0,502	17,05	33,70	3,9	2,16	93,6
2	0,502	22,30	44,40	4,2	2,33	94,7
3	0,502	19,60	39,10	4,3	2,38	93,9
4	0,502	19,72	38,70	5,6	2,77	92,8
5	0,502	16,94	33,70	2,8	1,55	95,4
6	0,502	16,02	31,87	5,6	3,11	90,2
7	0,502	23,53	46,80	6,1	3,38	92,7
8	0,502	24,22	96,35	8,6	4,77	95,0
9	0,502	10,55	25,50	4,5	2,53	90,0
10	0,502	12,67	30,60	3,3	1,82	94,0
11	0,502	8,50	20,50	2,2	1,17	94,0
12	0,502	26,17	63,20	7,5	4,17	93,0
13	0,502	14,83	2,96	4,2	2,35	92,0
14	0,502	24,50	5,92	4,0	2,23	96,0

4.3.2.1 Resultados de eficiência utilizando quatro bicos pulverizadores

Na Tab. 4.8 são apresentados os resultados de eficiência de coleta do material particulado utilizando-se quatro bicos pulverizadores, em que se verifica que esta eficiência varia de 93,9 a 98,6 %.

Nº	Vazão de ar (m³/s)	Dosagem de material particulado (mg/s)	Conc. ent. (mg/m³)	Particulado residual (g)	Conc. saída (mg/m³)	Eficiência (%)
1	0,502	16,94	35,20	3,9	2,16	93,9
2	0,502	22,30	46,40	4,2	2,33	94,9
3	0,502	19,66	40,92	4,3	2,38	94,1
4	0,502	23,22	48,32	2,0	1,11	97,7
5	0,502	25,97	54,04	4,9	2,70	95,0
6	0,502	31,8	63,20	2,0	1,10	96,8
7	0,502	35,7	71,00	1,0	0,55	98,6
8	0,502	47,7	95,00	4,5	2,53	95,1
9	0,502	35,64	71,00	3,9	2,17	94,4
10	0,502	49,04	97,70	2,3	1,30	97,6

Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de eficiência de coleta utilizando quatro bicos pulverizadores

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentadas as fases de projeto e teste de um lavador de gases para coleta de material particulado. Como base para o desenvolvimento do lavador de gases optou-se pelo uso de um ciclone "americano", que apresenta altura compatível para utilização em galpões industriais com pé direito baixo, muito comum no Brasil, e permite a coleta de material particulado de até 5µm.

Objetivando à aplicação na coleta de material particulado de gases de combustão de caldeiras com diâmetros de partículas até 1µm, o ciclone foi dotado de bicos pulverizadores de água, conferindo a este tipo de ciclone características de um lavador de gases.

Nos ensaios para a verificação da eficiência na coleta de material particulado foi utilizado material micronizado de quartzo ($1\mu\text{m} \leq d_{\text{part}} \leq 30\mu\text{m}$), com diâmetro médio de 7,5 µm, cuja distribuição granulométrica é semelhante às frações mais finas do material particulado volátil emitido na combustão do carvão pulverizado em caldeiras.

Foram utilizadas concentrações de material micronizado na corrente de alimentação na faixa de 20 a 100 mg/m³ de ar, para as quais foram obtidas eficiências de 92 a 96%, com a utilização de um bico pulverizador, e de 93,9 a 98,6 %, com a utilização de quatro bicos pulverizadores. Estas eficiências caracterizam uma performance muito boa do lavador de gases na coleta de material particulado.

Aliado a uma boa eficiência de coleta, o lavador de gases desenvolvido apresenta características que tornam o seu uso atrativo para aplicações industriais, apresentando as seguintes características construtivas e operacionais:

✓ Construção simples e compacta: área ocupada de 9 m², para uma vazão de 3600 m³/h;

✓ Baixo custo de investimento: R\$ 22.000,00 ;

✓ Operação simples e de baixo custo: R\$ ~2,00/h;

✓ Manutenção e reposição das peças, R\$ 0,70/h;

✓ Pequeno consumo de água: 5 litros / hora;

✓ Pequeno consumo de energia elétrica: 7,00 kWh;

✓ Insensibilidade na variação de temperatura: 0 à 130 °C;

✓ Possibilidade de absorção de vapores e gases tóxicos inflamáveis e explosíveis;

- ✓ Possibilidade de resfriamento de gases quentes: tempo de residência de 3 s;
- ✓ Umidificação do ar para condições de saturação, antes de exaustor;
- ✓ Eficiência muito boa para uma larga escala de tamanhos das partículas: 30 à 1 μm ;
- ✓ Custo operacional de R\$ 9,84/h, o que corresponde a R\$ 2,73 por cada 1000 m^3 de ar mais limpo.

CONTINUIDADE DO TRABALHO

Os testes realizados mostraram que o lavador de gases desenvolvido é apropriado para a coleta de material particulado com diâmetros na faixa $1 \mu\text{m} \leq d_{\text{part}} \leq 30 \mu\text{m}$, apresentando uma eficiência de coleta de até 98,6% para material micronizado.

Para uma melhor avaliação do potencial do lavador de gases poderiam ser realizados testes complementares de verificação da eficiência de coleta, envolvendo:

- ✓ gases de combustão de caldeiras na queima de carvão (grelha, leito fluidizado), óleo combustível (leve, pesado), etc.
- ✓ alterações geométricas no ciclone;
- ✓ formas de dispersão da água no ciclone;
- ✓ faixas maiores de vazão e de dosagem de material particulado, etc.

Outro aspecto importante a ser estudado é a utilização do lavador de gases no controle de temperatura e umidade em ambientes condicionados.

Capítulo 6

REFERÊNCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

- Dertiso, J. C. (1992). *Introdução ao controle da poluição ambiental*. CETESB, São Paulo.
- Dirgo, J.; Leith, D. (1985). Performance of theoretically optimised cyclones. *Filt. Sep.*, 22, 119-125.
- ISO (1989). *Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full - ISO-5167*, International Standardization Organization, Geneva.
- Kenny, L. C.; Gussman, R. A. (1995). Characterization and modeling of a family of cyclone aerosol pre-separators. *J. Aerosol Sci.* 26, S777-S778.
- Krames, J.; Büttner, H., (1994). The Cyclone Scrubber – a High Efficiency Wet Separator, *Chem. Eng. Technol.* 17, 73-80.
- Koch, W. H.; Licht, W. (1977). New design approach boosts cyclone efficiency. *Chem. Eng.*, 80-88.
- Liden, G.; Gudmundsson, A. (1997). Semi-empirical Modelling to Generalise the Dependence of Cyclone Collection Efficiency on Operating Conditions and Cyclone Design. *J. Aerosol Sci.*, 28, n. 5, 853-874.
- Marple, V. A.; Willeke, K. (1976). Impactor design. *Atmos. Envir.*, 10, 891-896.
- Martins, N. (1998). *Manual de medição de vazão através de placas de orifício, bocais e venturis*. Editora Interciência, Rio de Janeiro.
- Miller, R. W. (1989). *Flow Measurement Engineering Handbook*, 2^{ed}. McGraw-Hill Ed. New York.
- Moore, M. E.; McFarland, A. R. (1993). Performance modeling of single-inlet aerosol sampling cyclones. *Environ. Sci. Technol.* 27, 1842-1848.
- Moore, M. E.; McFarland, A. R. (1996). Design methodology for multiple inlet air sampling cyclones. *Environ. Sci. Technol.* 30, 271-276.

Rader, D. J.; Marple, V. A. (1985). Effect of ultra-Stokesian drag and particle interception on impaction characteristics, *Aerosol Sci. Technol.* 4, 141-156.

Singer, J. G. (1981). *Combustion fossil power systems*. Combustion Engineering, Inc., UK.

USEPA (1991). *Environmental Protection Agency (EPA) - Method 5*. Codigal Federal Register 40, Annex A, United States Environmental Protection Agency, New York.

_____. 1997, EES - *Engineering Equation Solver Software - User's Guide*, F-Chart Software.

Batel W. (1973). Der Waschenstauber – Entwicklungsstand und Tendenzen staub
33,12,491.
Barth W. (1975). Grundlagende untersuchung über die reinigungsleistung von
wassertropfen staub 19,5,175.
Ciborowski J. (1973). Inżynieria chemiczna. Inżynieria Procesowa. Wyd. 2, Warszawa. WNT

Clift, C ; Ghadiri M. (1991) A critique of two models for cyclone performance AiChE
Journal, 37, nr. 2, 285-289.
Enliang, L. ; Yingmin, W (1989). A new collection theory of cyclone separators, AiChE
Journal, 35 nr. 4, 666-669.

Gieseke J.A. (1972). Deposition of aerosol, air pollution control, Part II. Ed. W. Strauss.
N.Y., London. J. Willey.

Gordon, G ; Piesakhov, I. (1971). Dust collection and gas cleaning, Mir Publishers,
Moscow.

Gutowski W. (1973) Inżynieria Chemiczna, 3(3), 477.

Gutowski. W. (1980). Fizyczne własności pyłow. Katowice.

Hybrid Scrubber Cuts Costs. Chem Eng., 82 (9), 66 (1975).

Kabsch .P. (1975). Dwustopniowy odpylacz mokry ZOA –1 Ochrona powietrza IX, 5m

135.

Kabsch P. Kuklinski A (1976). Ciklone z wirujaca cieczą, Prace naukowe Inst. Ochr.

Stod. Pol Wrocław.

Lapple C. Kamack H. (1955). Performance of wet dust scrubbers, Chem Eng. Prog. 51.

Li. P. M. ; Lin, S. ; Vatisas, G. H. (1987). Predicting collection efficiency of separation
cyclones: A momentum analysis. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 65. 730-

735.

Macintyre. A. J. (1990) Ventilação industrial e controle da poluição. Ed. Guanabara,

2 ed. Rio de Janeiro.

BIBLIOGRAFIA

Capítulo 7

- Matejski R. (1967). Nove rozwiązania polki obrotowej i szczelnimowej w zastosowaniu do odpylaczy pianowych Ochrona Powietrza 1.1.7.
- Mesquita, A.L. S. ; Guimarães, F. A. ; Nefussi, N. (1977). Engenharia de ventilação industrial, CETESB – Edgard Blucher Ltda, São Paulo.
- Newton G.J., Raabe O.G., Mokler B.V.: J. (1977). Aerosol Sci., 8 (5), 339..
- Nielsen K.A., Hill J.C. (1977). Environ. Sci. Technol., 8 (8), 767.
- Orzechowski Z.(1976) Popzylanie cieczy. Warszawa. WNT .
- Pera, H. (1990) Geradores de vapor: Um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia, Editora Fama, São Paulo.
- Piekarczyk J. Jansohn L. (1967). Badania skrubera uderzeniowego . Ochrona powietrza 1.1.11.
- Pilat M.J., Prem A.(1976) Atmosph. Environ., 10, 13.
- Pilat M.J.: J. (1977). Air Pollution Control Assoc., 27 (10), 982
- Porstendorfer J., Genhart J., Röbbig (1977). J Aerosol Sci., 8, 371
- Ryszka E.(1969). Pomiar zapylenia gazow w przewodach. Katowice. Slask.
- Salcedo, R. (1993). Collection efficiencies and particle size distributions from sampling cyclones - Comparison of recent theories with experimental data, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 71, 20 – 27.
- Semrau K. (1962). *Neuere Erkenntnisse auf gebiet der nassentstauber* . Staub 22. 5.184.
- Slim W.G.N. (1977). Water, Air and Soil Poll., 7, 513 .
- Strauss W.(1975). Industrial gas cleaning. ED. 2. London. Pergamon Press.
- Torreira, R. P. (1995) Geradores de vapor, Cia. Melhoramentos, São Paulo.
- Weber E. (1963) *Die Nassentstaubung der kupfolsofenabgase* staub 23.11. 515.

Catálogos técnicos.

- 1 - Abas Berlin (RFN)
- 2 - Batische Maschinenfabrik, Karlsruhe (RFN)
- 3 - Beth, Maschinenfabrik, Lubbeck (RFN)
- 4 - Concordia – Elektrizitäts (CEAG) Dortmund (RFN)
- 5 - Ducon Micropul (United States Filter Corp) Manchester
- 6 - Elex-Oski Zurich.
- 7 - Hartmann, Maschinenfabrik Offenbach (RFN)
- 8 - Lurgi, Frankfurter Main (RFN)
- 9 - Part-Daniel. Paris.
- 10 - Tunzini (American Air Filter) Paris.
- 11 - Turbofilter, Essen (RFN)
- 12 - Wedag Bochum (RFN)

ANEXO A

A.1 – Introdução

Os primeiros equipamentos de separação de material particulado foram utilizados já no antigo Egito. Foram elementos de processo de beneficiamento ou purificação de produtos. A utilização destes equipamentos também como elementos de despoluição começaram na década de 1930. Inicialmente, a simplicidade de construção e de operação foram associados a um funcionamento deficiente. Atualmente, contudo, o objetivo é a instalação de equipamentos simples, baratos e funcionais.

Na Tab. A.1 são apresentados uma série de equipamentos separadores/coletores de material particulado, por via seca, na maioria de concepção bastante simples, dos quais o ciclone constitui-se em um dos equipamentos mais utilizados. As principais aplicações de ciclones na separação de partículas sólidas são:






- ✓ Transporte pneumático em geral.
- ✓ Captações de material particulado em ambientes industriais.
- ✓ Captação de fuligem de combustão.
- ✓ Separações de gotículas de água ou de outros líquidos do ar ou do gás portador

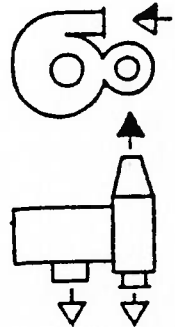
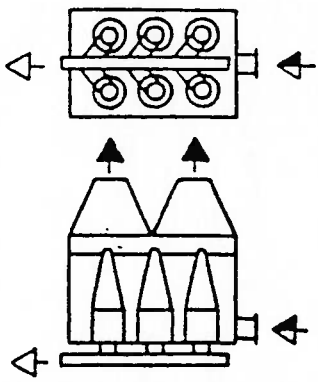
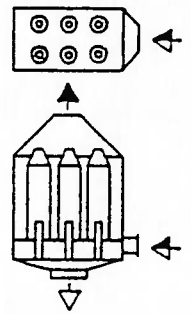
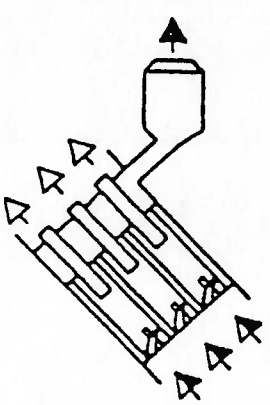
A.2 – Os ciclones

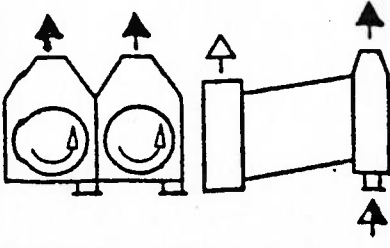
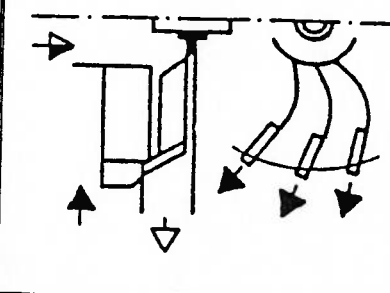
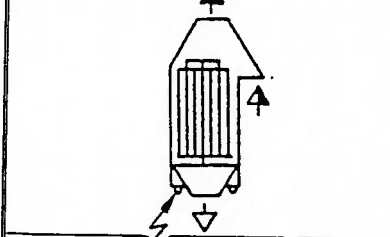
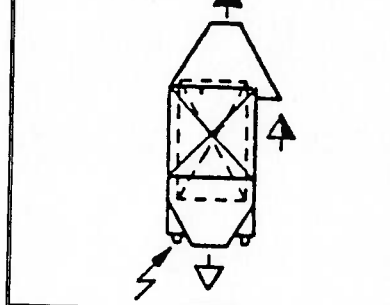
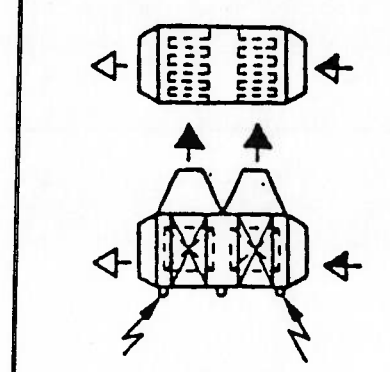
Os ciclones são equipamentos de separação e coleta de partículas da corrente gasosa sob a ação de uma força centrífuga que pode variar entre 5 a 2500 vezes o seu peso, o que permite captar partículas de 0,1 a 200 µm. Os ciclones, por serem equipamentos estacionários não oferecem dificuldade para o trabalho em altas temperaturas (1000 °C) e elevadas pressões (50 ata).

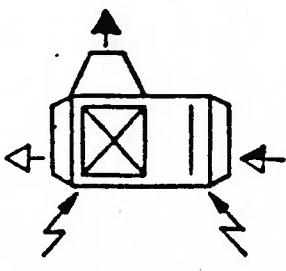
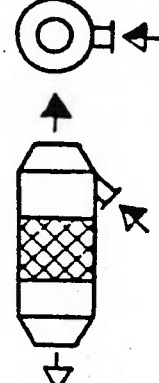
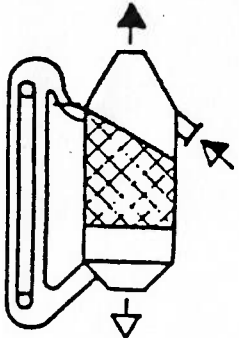
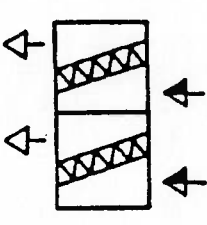
São equipamentos que podem ser utilizados separadamente ou em série. O seu uso em série é recomendado quando no gás portador existe uma ampla faixa de tamanhos de partículas, com partículas muito pequenas e muito grandes de elevada abrasão, e também nos casos em que as partículas tem uma tendência a flotar.

Tabela A.1 – Equipamentos separadores/coletores de material particulado por via seca.

Classificação	Nome do separador	Agente de separação	Desenho simplificado
1.1.1.	Câmara de assentamento simples	Força de gravidade	
1.1.2.	Câmara de assentamento com prateleiras horizontais	Força de gravidade	
1.2.1.	Separador de inércia	Força de inércia	
1.3.1.	Separador com labirintos em forma de chicanas	Força de gravidade e Força de inércia	
1.4.1.	Ciclone simples	Força centrífuga	

<p>Desenho simplificado</p>	<p>Agente de separação</p>	<p>Nome do separador</p>	<p>Classificação</p>
	<p>Força centrífuga</p>	<p>Ciclone simples com separador de fluxo de gás</p>	<p>1.4.2.</p>
	<p>Força centrífuga</p>	<p>Multiclone.</p>	<p>1.4.3.</p>
	<p>Força centrífuga</p>	<p>Multiclone com mudança da direção de fluxo de gás</p>	<p>1.4.4.</p>
	<p>Força centrífuga</p>	<p>Multiclone axial.</p>	<p>1.4.5.</p>

Classificação	Nome do separador	Agente de separação	Desenho simplificado
1.4.6.	Separadores com movimento rotativo no cilindro	Força centrífuga	
1.5.1.	Separadores por meio de rotor	Força centrífuga e aceleração de Coriolis.	
1.6.1.	Separador eletrostático tubular	Força eletrostática	
1.6.2.	Separador eletrostático de placa com fluxo de gás vertical.	Força eletrostática	
1.6.3.	Separador eletrostático de placa com fluxo de gás horizontal.	Força eletrostática	

Simbolo de classificação	Nome do separador	Agente de separação	Desenho simplificado
1.6.4.	Separador eletrostático com separação da zona de ionização e separação de particulado	Força eletrostática	
1.7.1.	Separador com a camada de filtração composta de materiais granulados com regeneração periódica.	Filtração – força de inércia, força de difusão e força eletrostática.	
1.7.2.	Separador com a camada de filtração composta de materiais granulados com regeneração contínua.	Filtração – força de inércia, força de difusão e força eletrostática.	
1.7.3.	Separador com a camada de filtração composta de folhas de papel, tecidos de fibras naturais e sintéticas etc.	Filtração – força de inércia, força de difusão e força eletrostática.	

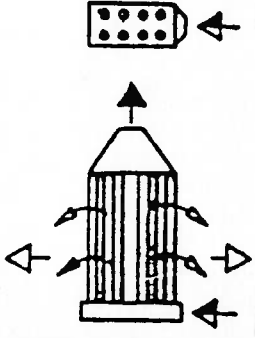
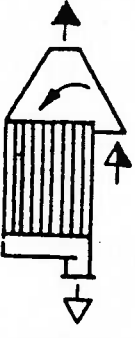
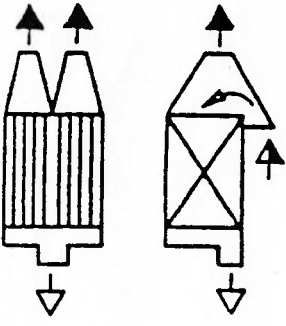
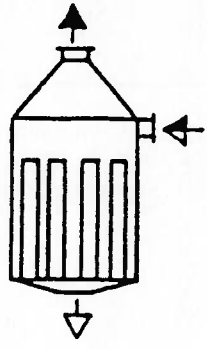
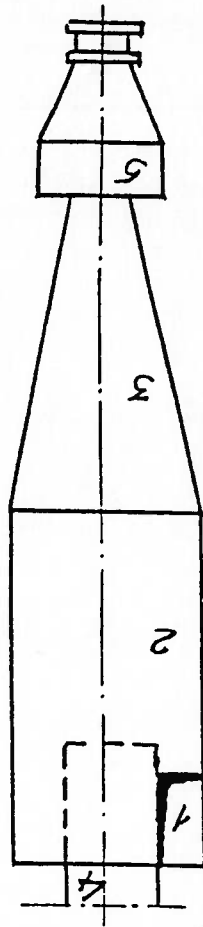
Classificação	Nome do separador	Agente de separação	Desenho simplificado
1.7.4.	Separador com a camada de filtração composta de mangas de tecidos e fibras naturais e sintéticas trabalhando sobre pressão.	Filtração – força de inércia, força de difusão e força eletrostática	
1.7.5.	Separador com a camada de filtração composta de mangas de tecidos e fibras naturais e sintéticas trabalhando sob pressão.	Filtração – força de inércia, força de difusão e força eletrostática	
1.7.6.	Separadores de tecidos	Filtração – força de inércia, força de difusão e força eletrostática	
1.7.7.	Separador com os elementos de filtração compostos de cilindros de cerâmica de fibras naturais e sintéticas trabalhando sob pressão.	Filtração – força de inércia, força de difusão e força eletrostática	

Figura A.1 - Partes componentes básicas de um ciclone



O ciclone é composto de cinco elementos, conforme apresentado na Fig. A.1, onde (1) é a entrada de fluido no ciclone, (2) é a parte cilíndrica do ciclone, (3) é a parte cônica do ciclone, (4) é o tubo de saída (chaminé) e (5) é o tubo de coleta de partículas.

Alta tensão	
Líquido com particulado em suspensão.	
Líquido (água, óleo e outros)	
Particulado	
Gás (ar) poluído	
Gás (ar) limpo.	

A.2.1 Fatores importantes no projeto de um ciclone

Os fatores mais importantes no projeto de um ciclone são:

- ✓ O diâmetro do ciclone, que é o fator mais importante no projeto. É em função do diâmetro que são determinadas as demais dimensões do ciclone. Um diâmetro menor implica em eficiência de coleta maior, porém com uma perda de carga maior também.
- ✓ A velocidade de entrada, que deve estar na faixa de 6 à 30 m/s. Usualmente é admitida uma velocidade de 15 m/s, mas é a perda de carga no ciclone que determina a velocidade que deve ser usada.

A.2.2 Função e funcionamento de um ciclone

A coleta de partículas carregadas por gases é processada nos ciclones. Essa separação é obtida introduzindo-se o portador tangencialmente em alta velocidade num vaso cilíndrico estacionário, produzindo assim um movimento helicoidal. A força centrífuga atuante na partícula contida no portador é deslocada para a parede do ciclone e com a força da gravidade para o depósito. Se no tempo de permanência no ciclone a partícula não conseguir atingir a parede do mesmo, ela será removida com o fluxo que deixa o ciclone.

O ar ou qualquer substância gasosa carregando o poluente é introduzida tangencialmente ao ciclone pelo elemento de altura H e largura B . Após algumas voltas pelo interior do corpo cilíndrico de diâmetro D_c e comprimento L , o ar sai pelo tubo vertical com diâmetro D_s e profundidade W , deixando no ciclone o pó que é recolhido na parte cônica de profundidade Z , que por sua vez é descarregado pelo tubo de diâmetro J , conforme mostrado na Figura A. 2.

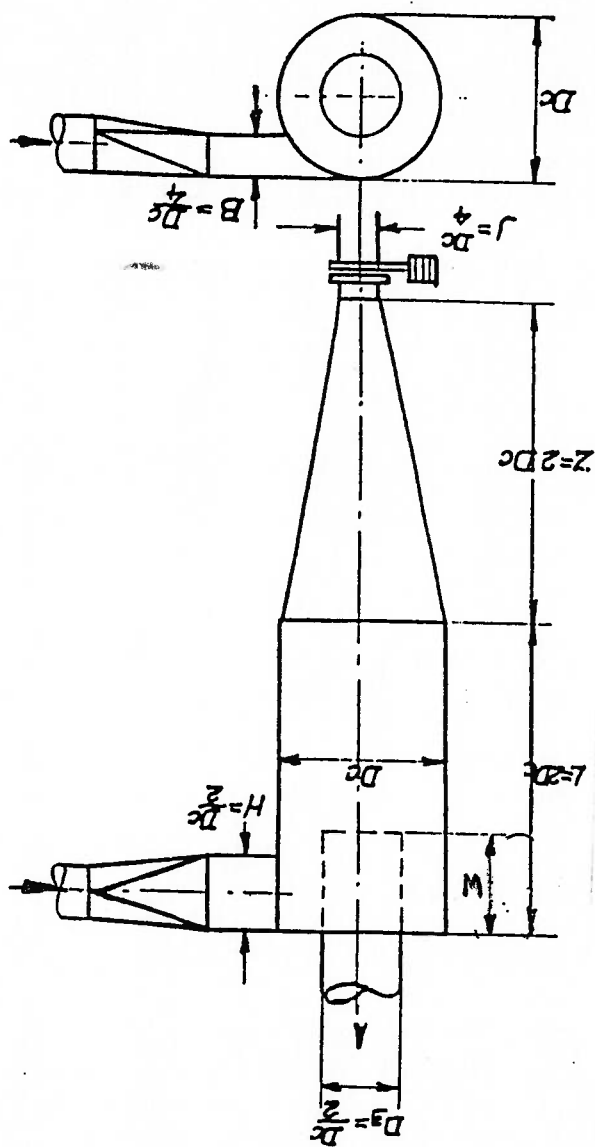
As relações de geometria mais comumente encontradas nos ciclones são apresentadas

abaixo:

$$\begin{aligned} D_s &= 0,50 D_c & H &= 0,50 D_c \\ B &= 0,25 D_c & W &= 0,62 D_c \\ L &= 2,00 D_c & Z &= 2,00 D_c \\ J &= 0,25 D_c \end{aligned}$$

Nas Figs. A3 a A.7 são apresentadas as características geométricas e físicas de alguns ciclones com separação por via seca.

Figura A.2 - Dimensões de um ciclone



Relações de dimensões

- Bc/Dc - 0,25
- Dc/Dc - 0,50
- Hc/Dc - 0,50
- Lc/Dc - 2,00
- Sc/Dc - 0,13
- Zc/Dc - 2,00
- Jc/Dc - 0,25

Velocidade de entrada

$$6 < u < 21 \text{ [m/s]}$$

Diametro de corte

$$\frac{D_c}{D} = 0,095 \left[\frac{\mu \cdot D_c}{\rho} \cdot \frac{Q \cdot (\rho_s - \rho)}{z} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Queda de pressão

$$\Delta p = 4 \cdot \rho \cdot u^2$$

Eficiência de coleta

$$\eta = \left[1 + \left(\frac{D_c}{D} \right)^{1,25} \right]^{\frac{2}{2,64}} \left[\frac{D_c}{D} \right]^{\frac{3}{2}}$$

Figura A.3 - Características de um ciclone Lapple

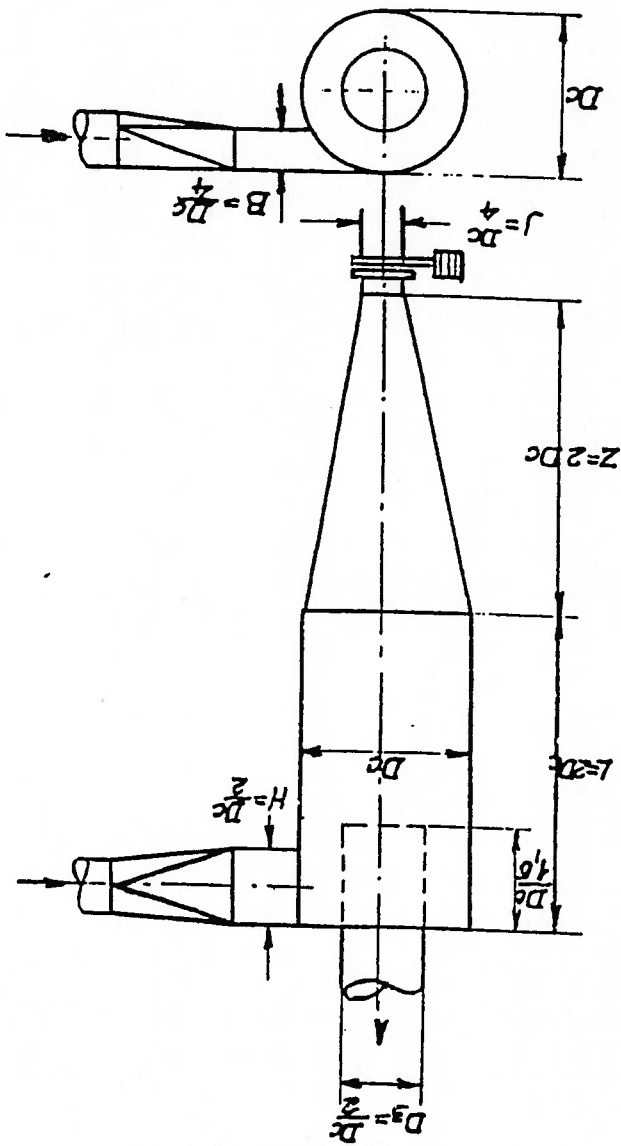
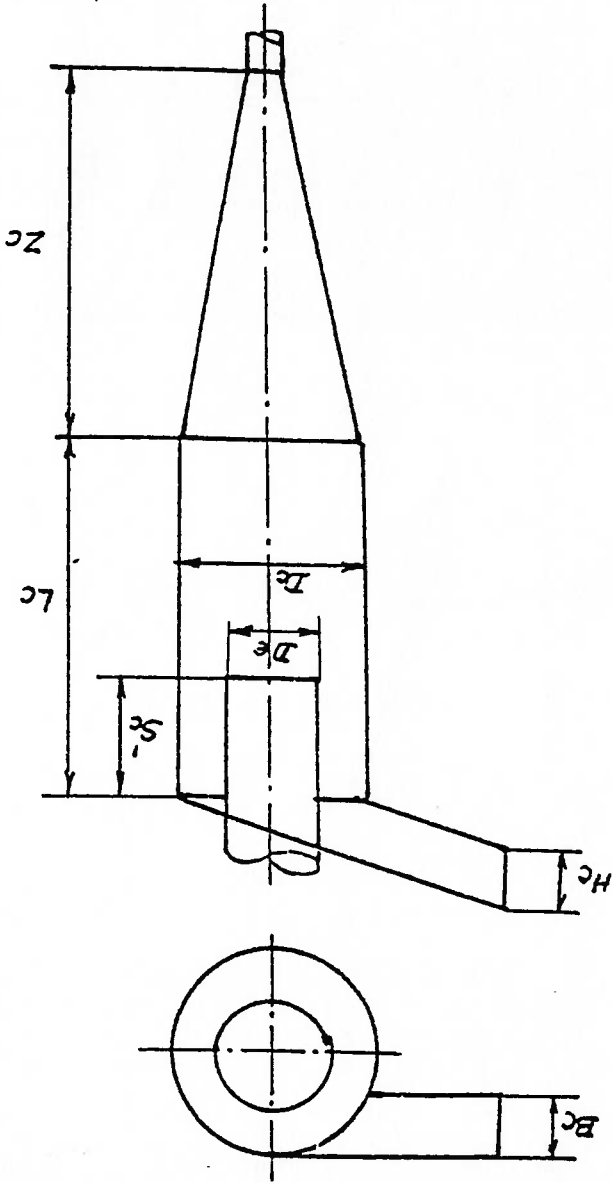


Figura A.4 - Características de um ciclone Nugas II



Relações de dimensões

B_c/D_c	-	0,26
D_e/D_c	-	0,60
H_c/D_c	-	0,48
L_c/D_c	-	2,08
S_c/D_c	-	1,30
Z_c/D_c	-	2,00
J_c/D_c	-	0,22

Inclinação de entrada: -1°

Velocidade de entrada

$$15 < u < 24 \text{ [m/s]}$$

Diâmetro de corte

$$\frac{D_c}{D} = 0,128 \cdot \left[\frac{\mu \cdot D_c}{\rho} \cdot \frac{Q \cdot (\rho_s - \rho)}{z} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Eficiência de coleta

$$\eta = \left[\left(\frac{D_c}{D} \right)^{1,25} \right]^{0,40} + \left[\left(\frac{D_c}{D} \right)^{8,71} \right]^{0,40}$$

Queda de pressão

$$\Delta p = 2 \cdot \rho \cdot u^2$$

Figura A.5 - Características de um ciclone B4

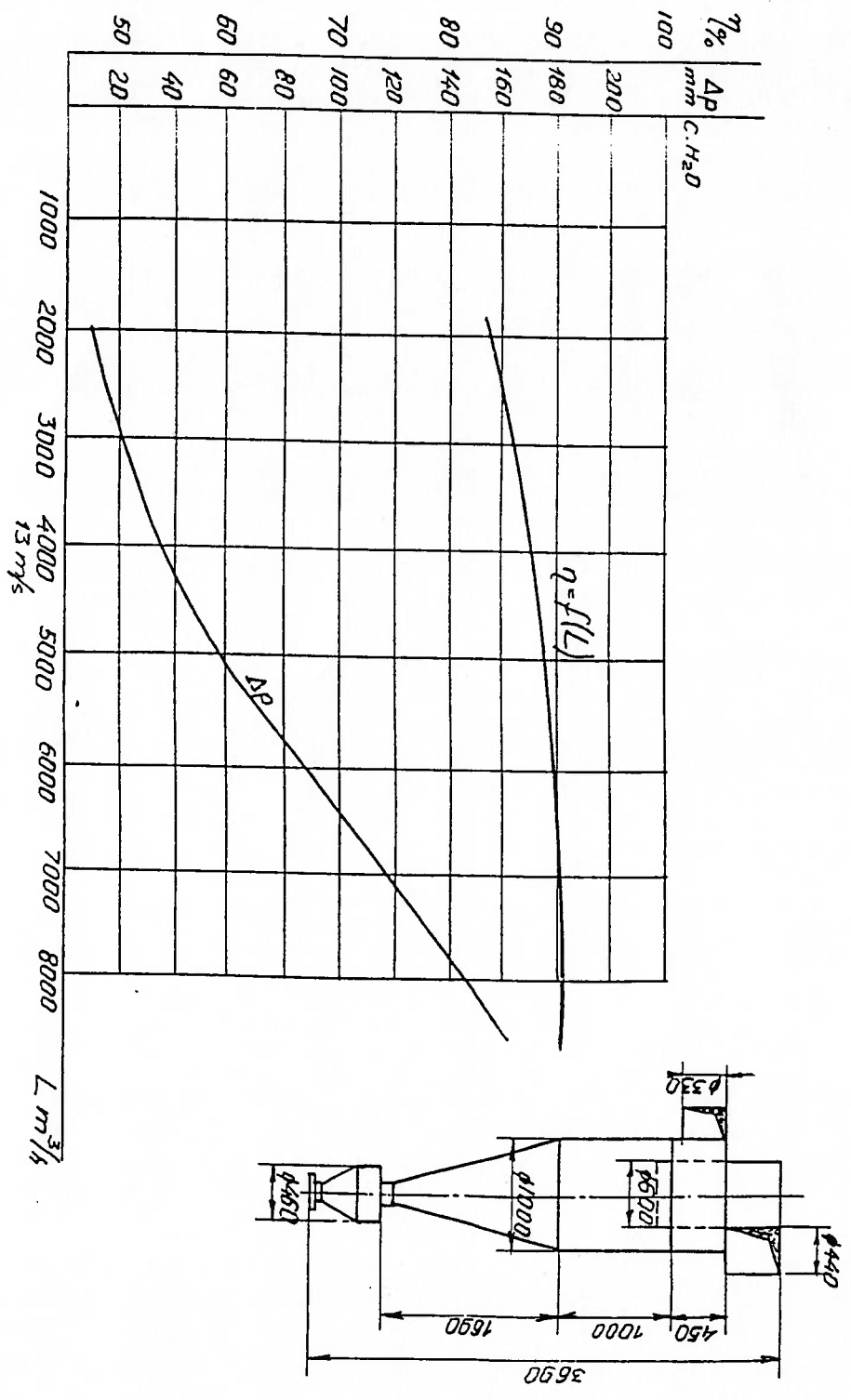


Figura A.6 - Características de um ciclone tipo C₂ - 1

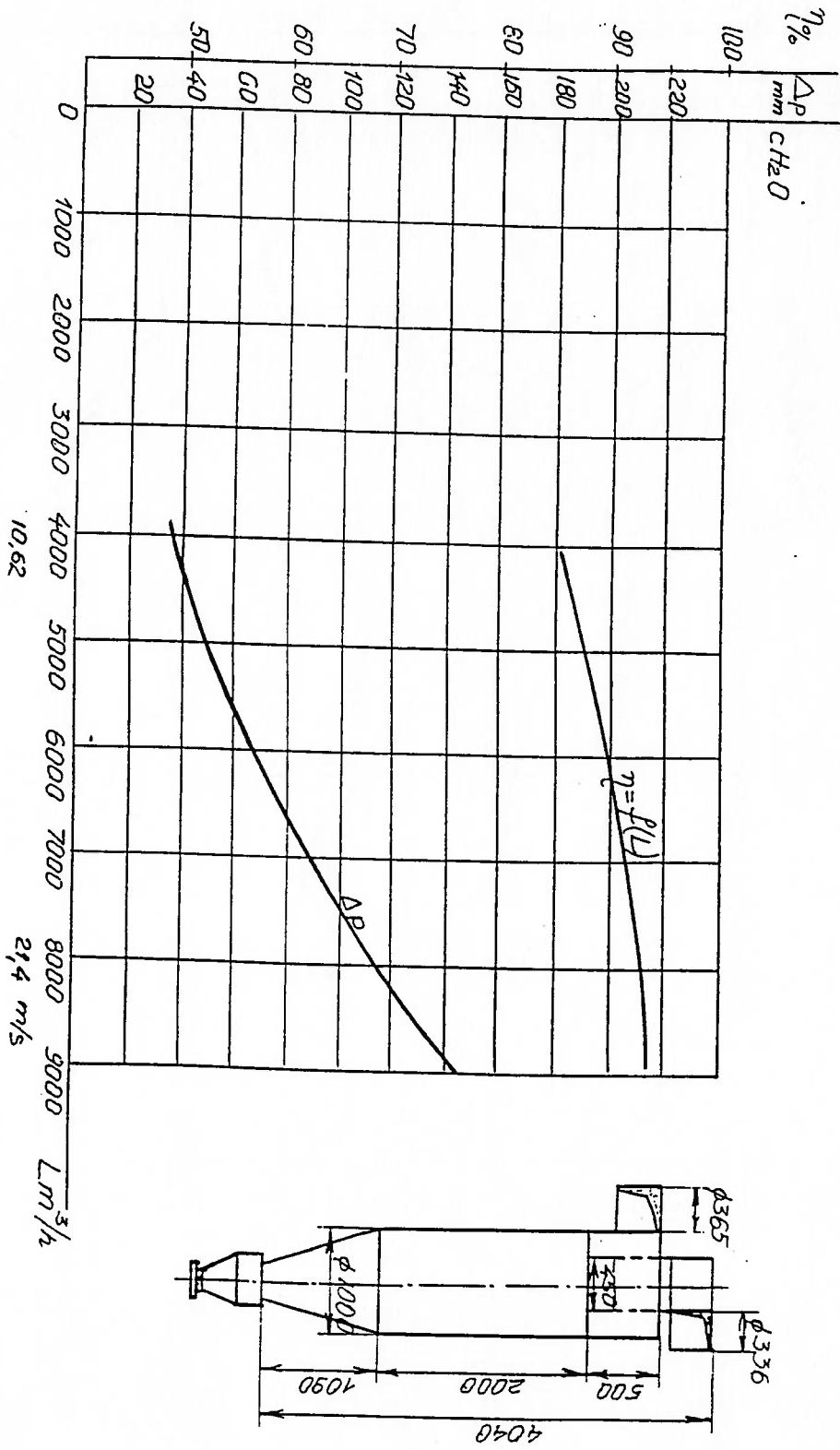
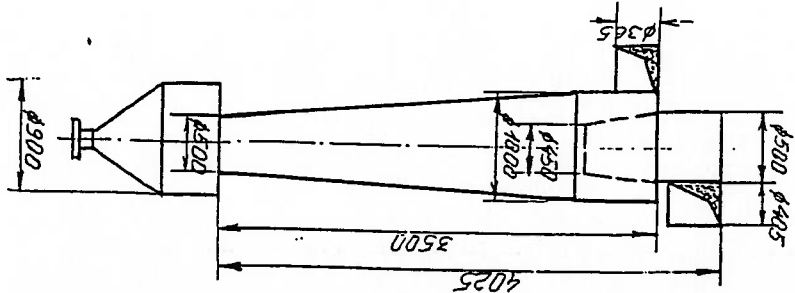
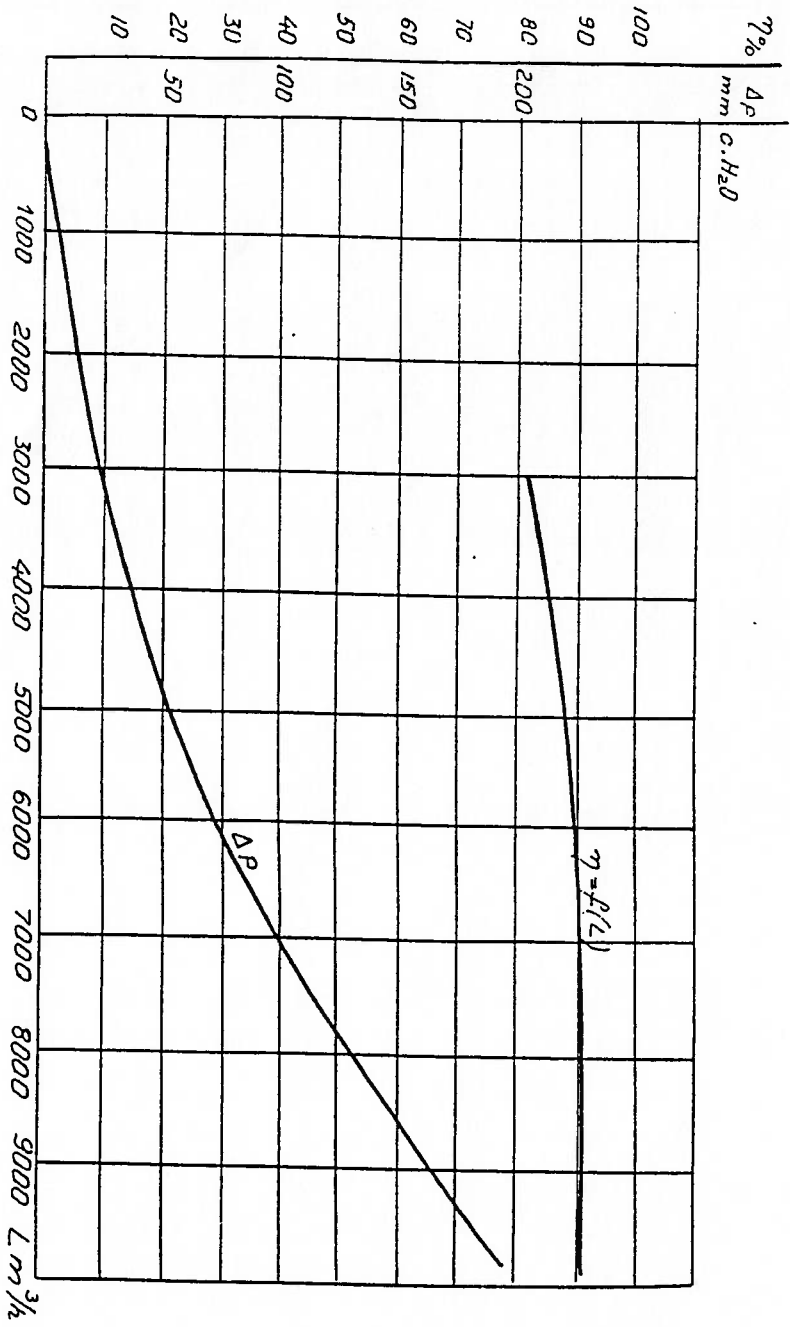


Figura A.7 - Características de um Ciclone ϕ 1000



A.2.3 Movimento do gás e partículas no ciclone

A seguir é apresentada uma análise bastante simplificada, semi-empírica, utilizada frequentemente para definir o dimensionamento orientativo de um ciclone. Por meio de um balanço de forças agindo sobre uma partícula que gira num ciclone obtém-se a velocidade terminal da menor partícula que o ciclone irá coletar, dada por:

$$u_t = \frac{H \cdot (L + Z) \cdot D_c \cdot G}{0.2 \cdot A_1^2 \cdot D_c \cdot \rho \cdot g} \quad (A.1)$$

onde:

u_t - velocidade terminal da menor partícula (m/s)

A_1 - área transversal de entrada do gás no ciclone (m²)

G - vazão mássica de gás (kg/s)

L, Z, D_c, D_e - valores indicados na Fig. A.2 (m)

g - 9,81 (m/s²)

ρ - massa específica do gás (kg/m³)

Esta expressão permite concluir que para um dado diâmetro de partícula, quanto maior for a velocidade terminal da partícula, mais fácil será sua captação. Também pode-se concluir que as menores partículas são separadas no duto de saída. As partículas que não atingem a parede no duto de saída do ciclone são levadas com o gás portador.

A.2.4 - Ciclone americano

Um tipo de ciclone particularmente interessante na separação de partículas por via seca é o ciclone americano, cujas características geométricas são apresentadas na Fig. A.8 e que foi utilizado na concepção do lavador de gases objeto de estudo nesta Dissertação.

Este ciclone possui um diâmetro maior que o usual com uma altura menor, que o torna mais adequado para utilização em galpões industriais com pé direito baixo, muito comum no Brasil. Mas, por outro lado, estas características o tornam menos eficiente na coleta do material particulado e, portanto, de interesse no estudo da influência da umidificação no seu desempenho.

A.2 - Lavadores de gases

Um dos fatores responsáveis pela baixa eficiência dos ciclones com separação por via seca é o rebatimento das partículas na parede e o arraste para a saída. Este fator pode ser reduzido pela injeção de água, com consequente umidificação das partículas e das paredes do ciclone, oferecendo uma maior aderência. Além disto a umidificação das partículas aumenta a sua densidade facilitando a sua coleta.

No parque industrial podem ser encontrados uma série de lavadores de gases com separação de partículas por via úmida. Alguns deles são apresentados na Tabela A.2.

Figura A.8 - Características de um ciclone americano

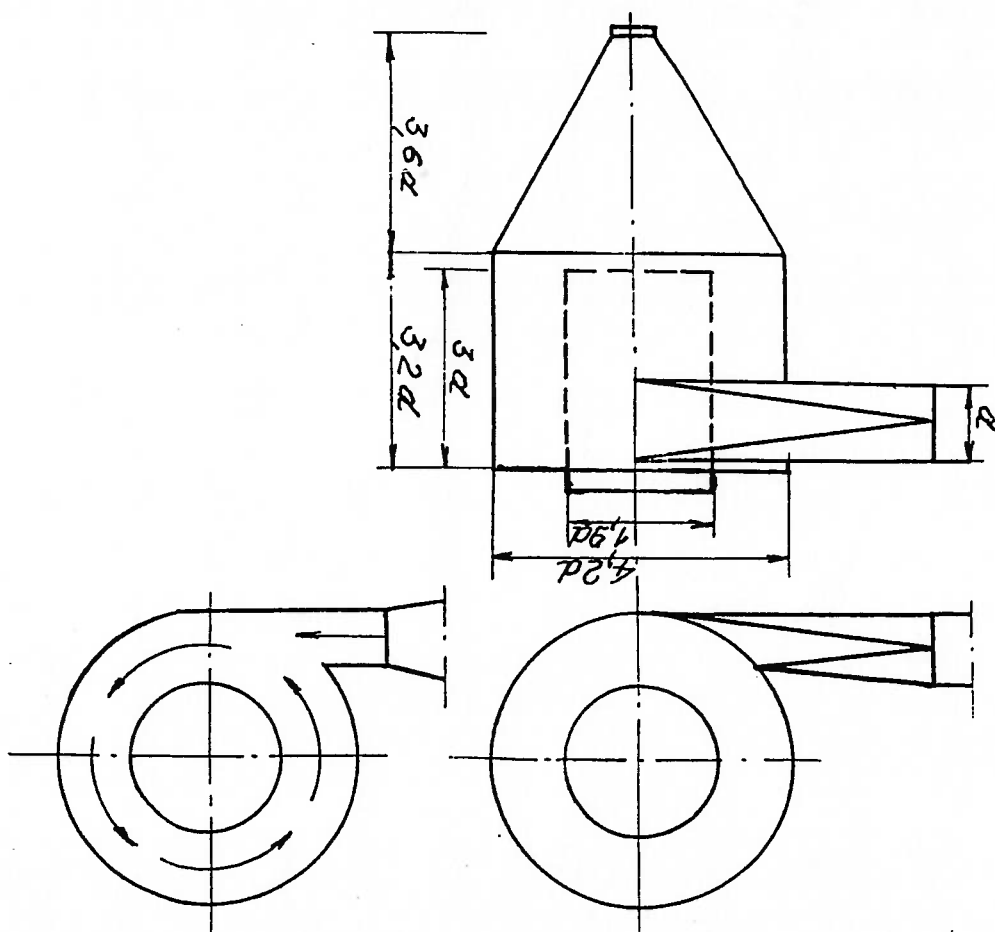
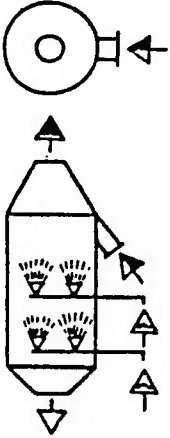
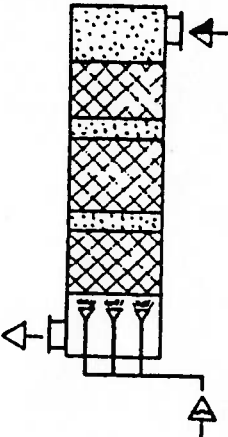
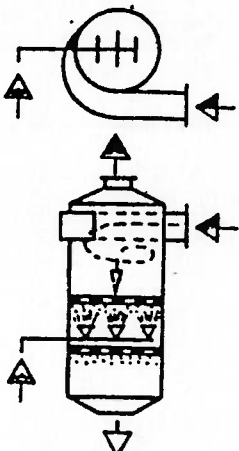
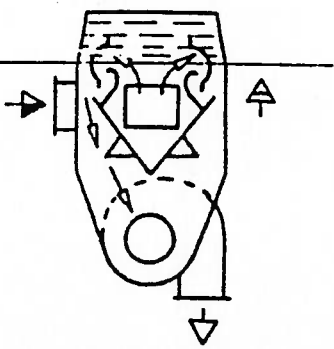
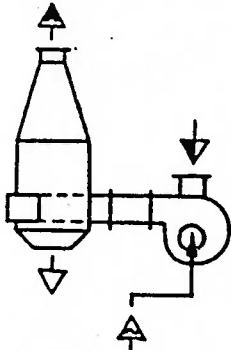
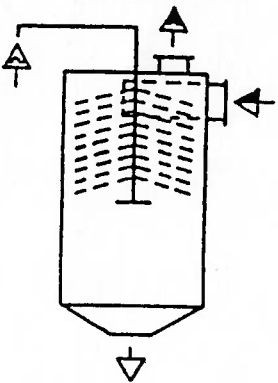
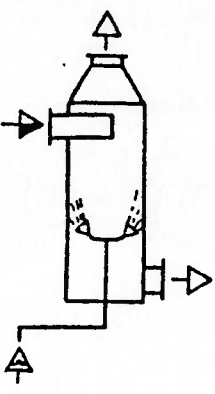
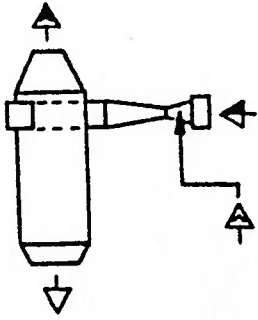
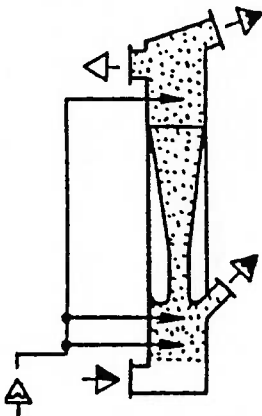
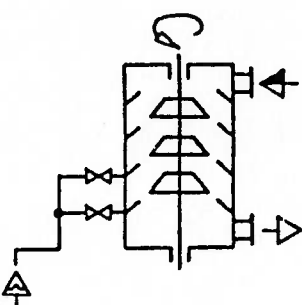
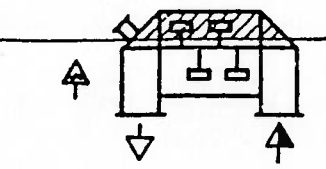
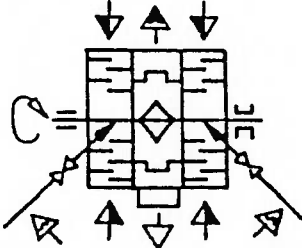
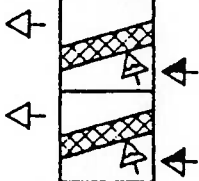
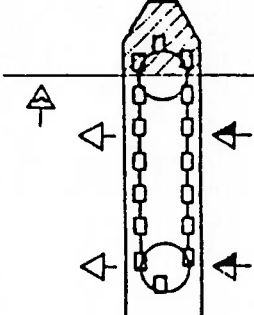
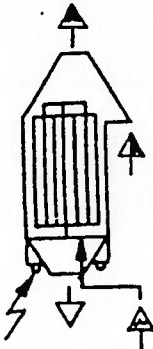


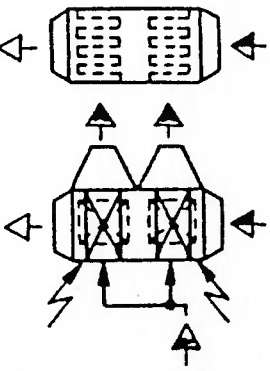
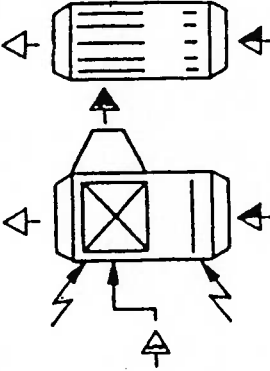






Tabela A.2 – Equipamentos separadores/coletores de material particulado por via úmida

Classificação	Nome do separador	Agente de separação	Desenho simplificado
2.1.1.	Lavador de coluna sem enchimento	Força de gravitação e de inércia: efeito da atuação dessas forças aumentado pelo assentamento de partículas sobre as gotas.	
2.1.2.	Lavador de coluna com enchimento (materiais granulados, anéis Rasching e outros)	Força de gravitação e de inércia: efeito da atuação dessas forças aumentado pelo assentamento de partículas sobre as gotas.	
2.1.3.	Lavador de coluna com separadores de chicanas, horizontais ou perfurados (filtros de espuma) de espuma)	Força de gravitação e de inércia: efeito da atuação dessas forças aumentado pelo assentamento de partículas sobre as gotas.	

Classificação	Nome do separador	Agente de separação	Desenho simplificado
2.1.4.	Separador úmido com fluxo de gás pelo labirinto fechado com água	Força de gravitação e de inércia: efeito da atuação dessas forças aumentado pelo assentamento de partículas sobre as gotas.	
2.2.1.	ciclone úmido com injeção de água na entrada do ciclone	Força centrífuga e de inércia: efeito da atuação dessas forças aumentado pelo assentamento de partículas sobre as gotas.	
2.2.2.	ciclone úmido com injeção radial de água.	Força centrífuga e de inércia: efeito da atuação dessas forças aumentado pelo assentamento de partículas sobre as gotas.	
2.2.3.	ciclone úmido com paredes umidificadas	Força centrífuga, água aplicada somente para retirada de particulado da parede	

Classificação	Nome do separador	Agente de separação	Desenho simplificado
2.3.1.	Separador com a restrição de Venturi como elemento de entrada	Condensação de vapor sobre as partículas de particulado e força de inércia	
2.3.2.	Separador com a restrição de Venturi	Condensação de vapor sobre as partículas de particulado e força de inércia	
2.4.1.	Lavador rotativo vertical	Força centrífuga e de inércia: efeito da atuação dessas forças aumentado pelo assentamento de partículas sobre as gotas.	
2.4.2.	Lavador rotativo horizontal	Força centrífuga e de inércia: efeito da atuação dessas forças aumentado pelo assentamento de partículas sobre as gotas.	

Desenho simplificado	Agente de separação	Nome do separador	Classificação
	<p>Força centrífuga e de inércia: efeito da atuação dessas forças aumentado pelo assentamento de partículas sobre as gotas.</p>	<p>Lavador rotativo com elevação de pressão no desintegrador.</p>	<p>2.4.3.</p>
	<p>Filtração – força de inércia, de difusão e de eletrostática.</p>	<p>Filtros de óleo.</p>	<p>2.5.1.</p>
	<p>Filtração – força de inércia, de difusão e eletrostática.</p>	<p>Filtros de óleo com sistema auto limpante.</p>	<p>2.5.2.</p>
	<p>Filtração eletrostática – água aplicada para retirada de particulado dos eletrodos.</p>	<p>Filtros eletrostáticos tubulares, úmidos</p>	<p>2.6.1.</p>

Classificação	Nome do separador	Agente de separação	Desenho simplificado
2.6.2.	Filtros eletrostáticos de placa, úmido (com fluxo de gás horizontal)	Filtragem eletrostática -água aplicada para retirada de particulado dos eletrodos	
2.6.3.	Filtros eletrostáticos úmidos com a separação da zona de ionização e de separação de particulado.	Filtragem eletrostática -líquido aplicado para retirada de particulado dos eletrodos	
<p>Gas (ar) limpo. </p> <p>Gas (ar) poluído </p> <p>Particulado </p> <p>Líquido (água óleo e outros) </p> <p>Líquido com Particulado em suspensão. </p> <p>Alta tensão </p>			

A.2.1 – Ciclones úmidos

Os ciclones úmidos são construídos como torres com a passagem de gás com fluxo ciclônico e pulverizadores que poderão ser instalados na entrada do gás, nas paredes coletoras ou na parte central do ciclone.

Na Fig. A.9 é apresentado um exemplo de ciclone com pulverizadores de água instalados na parede. Este tipo de ciclone apresenta elevada eficiência de coleta (98 a 99%) para partículas maiores que 1 μm , com perda de carga de 1000 Pa e consumo de água de 0,67 a 0,8 l/m^3 de gás.

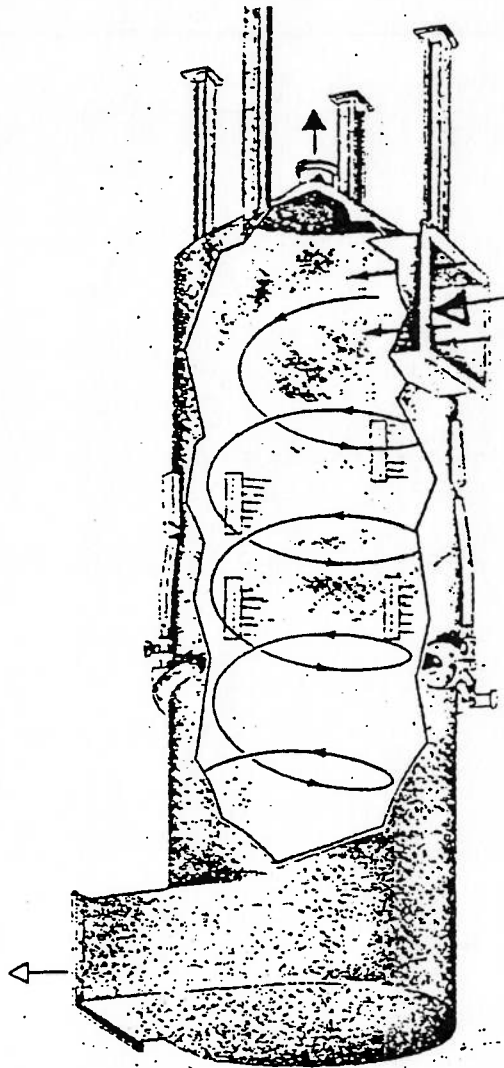


Figura A.9 - Ciclone úmido com pulverizadores instalados nas paredes

Na Fig. A.10 é apresentado um ciclone scrubber com injeção na parte central do ciclone. Um exaustor instalado na parte superior do ciclone força a entrada do gás na parte inferior. A pressão da água de alimentação dos pulverizadores é de 0,5 a 1,0 MPa e são obtidas gotículas de água de 25 a 50 μm . A velocidade do gás na entrada do ciclone pode ser de 7 a 25 m/s. O consumo de água é de 0,7 a 1,4 l/m^3 e a perda de carga da ordem de 500 a 1000 Pa. Consegue coletar partículas menores que 0,5 μm com eficiência de até 99%.

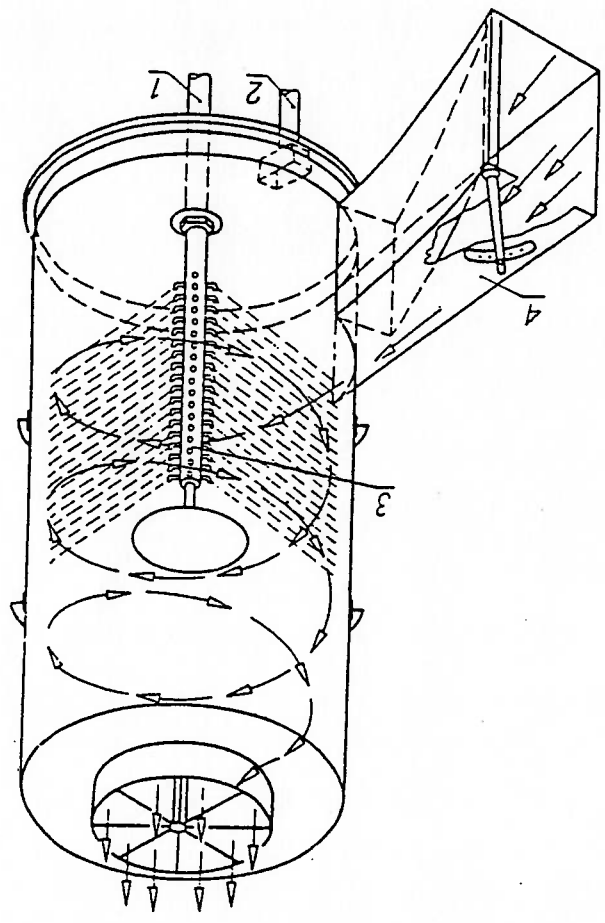


Figura A.10 - Ciclone scrubber

Nas Figs. A.11 e A.12 são apresentados lavadores ciclônicos, respectivamente, com injeção de água na entrada do gás e no ventilador de insuflamento.

Figura A.12 - Lavador ciclônico com injeção de água no ventilador

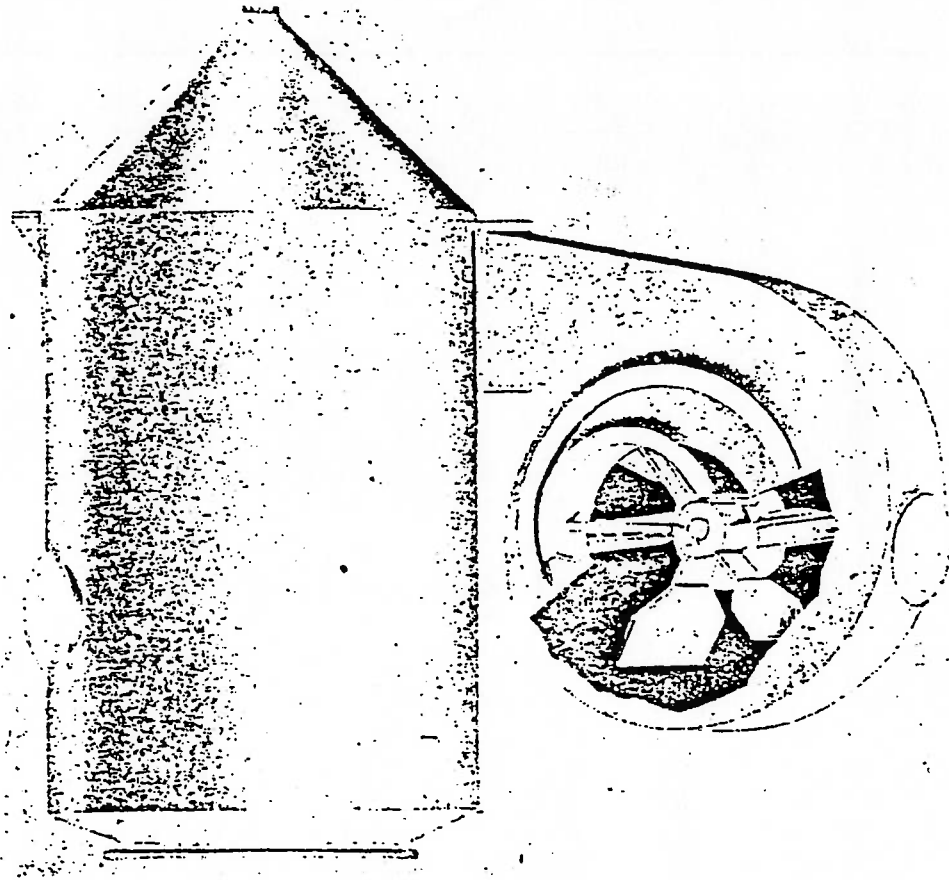
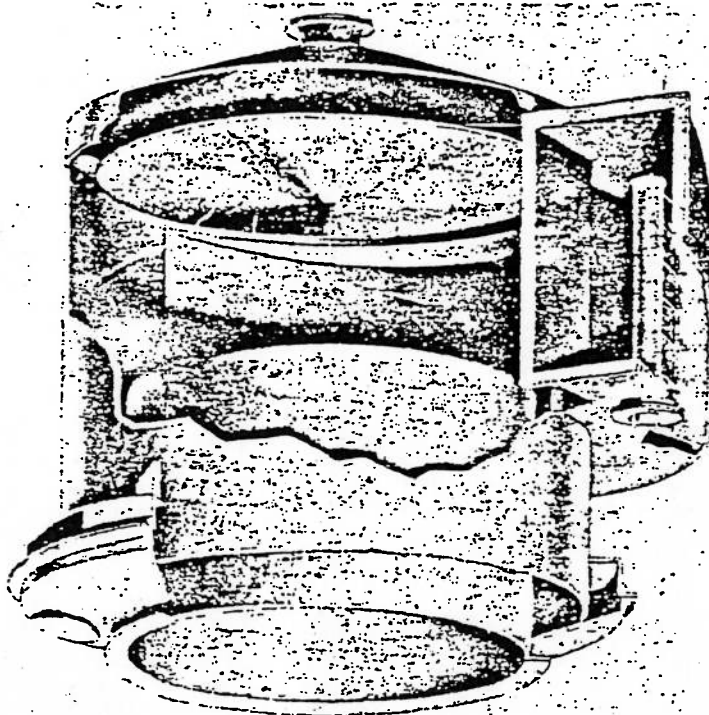


Figura A.11 - Lavador ciclônico com injeção de água na entrada do gás



A injeção de água por intermédio de injetores oferece melhor dispersão, melhor mistura com o gás e é mais eficiente. A necessidade de usar água purificada, sem partículas que poderão entupir os bicos, como no caso do ciclone scrubber, acarreta consumo de água e custo maior de operação.

Para a variante de injeção de água sobre o ventilador o processo é feito com bico pulverizador de grande diâmetro, aprox. 15 mm. O consumo de água é menor com a possibilidade de utilização de água reciclada com elevado grau de sujidade. Este tipo de lavador, contudo, em função da dificuldade de pulverização homogênea de água, possui eficiência de coleta menor.

Na linha de ciclones unidos merece destaque o tipo de lavador apresentado na Fig. A.13. O lavador é composto de vários mini-ciclones fundidos de vidro, de poliestireno ou de cerâmica, em blocos com 5 ou 10 unidades. O lavador tem eficiência de coleta de 99,93 a 99,97% para partículas de até 1 μm . Para uma vazão de 32500 m^3/h necessita-se de 80 conjuntos, e o lavador terá as dimensões de 2860 x 2940 mm, com velocidade de gás nos mini-ciclones de 10 a 15 m/s, perda de carga de 200 a 500 Pa e vazão de água de 2,4 a 4 l/s por conjunto.

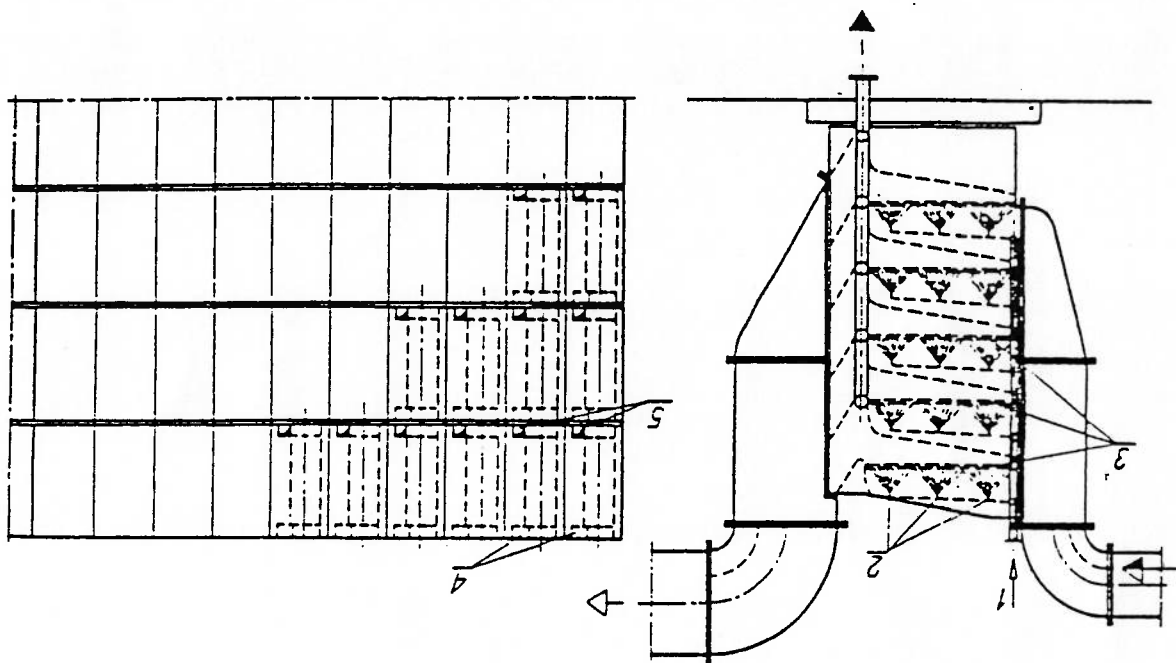


Figura A.13 - Lavador de gases multi-ciclone

A.2.2 – Comparação entre lavadores de gases

Os lavadores de gases formam um grupo de equipamentos de separação bastante diversificado. Na Tab. A.3 são apresentados os principais parâmetros de alguns tipos de lavadores.

Tabela A.3 – Quadro comparativo das características de alguns lavadores de gases

Tipo de separador	Característica	η ($d_p > 1\mu\text{m}$) %	Δp Pa	consumo de água l/m^3	característica e aplicação	
Lavador de torre	enchimento sem enchimento	50-80	100-300	até 6	resfriadores, para separação inicial, construção pesada	
	enchimento com enchimento	80-95	100-1000	1-20	resfriadores, para separação inicial, construção pesada	
Lavadores de transbordo	de colisão	90-99	1500-3000	0,2-0,5	para particulado de materiais triturados mecanicamente com fácil umidificação	
	de espuma	90-95	1400-2000	0,3-1,0	para particulado de difícil umidificação e de alta segurança do trabalho.	
	transbordo	95-99	1300-2000	0,05-0,1	para particulado de difícil umidificação e de alta segurança do trabalho.	
Lavadores rotativos		95-99,5	2500-4000	0,5-0,3	construção complicada, elevado consumo de água, aplicado para todos os tipos de particulados	
Ciclone úmido		90-99	500-1000	0,5-1,4	particulado de fácil umidificação, maior consumo de água	
Ciclone com movimento da água		90-99	1000-2500	0,01-0,05	pequeno consumo de água, para particulado $> 1\mu\text{m}$.	
Lavadores Venturi	de elevada velocidade	> 99	5000-20000	0,5-1,5	para particulado de difícil umidificação $< 1\mu\text{m}$, construção compacta, maior consumo de energia.	
	de baixa velocidade	90-99	1000-3000	0,02-0,5	para particulado $> 1\mu\text{m}$, baixo consumo de água.	

ANEXO B

Programa CalcPlaca em Matlab, para cálculo da vazão da placa de orifício.

```

clear;
d = 120;
D = 200;
mi = 0.0000184;
ro = 1.16;
P = 92672;
k = 1.4;
min = 10;
max = 250;
delta = 1;
n = 1;
A = (pi*(d/1000)^2)/4;
beta = d/D;
entrada = min;
while entrada ~= max
    C1 = 0.61;
    C0 = 0;
    DP = 9.7968*entrada;
    e = 1-(0.41+0.35*beta^4)*DP/(k*P);
    while abs(C1-C0) > 0.0001
        Qm = e*A*C1*((2*ro*DP)/(1-beta^4))^0.5;
        Re = 4*Qm*ro/(pi*D/1000*mi);
        T1 = 0.5961 + 0.0261*beta^2 - 0.261*beta^8 + 0.000521*(10^6*beta/Re)^0.7;
        T2 = (0.0188+0.0063*(19000*beta/Re)^0.8)*beta^3.5*(10^6/Re)^0.3;
        T3 = (0.043+0.08*exp(-10)-0.123*exp(-7*0.47))*(1-0.11*(19000*beta/Re)^0.8)*beta^4/(1-beta^4);
        T4 = 0.031*(2*0.47/(1-beta)-0.8*(2*0.47/(1-beta))^1.1)*beta^1.3;
        C0 = C1;
        C1 = T1 + T2 + T3 + T4;
    end
    volu(n) = Qm/ro;
    velo = volu/A*beta^2;
    reyn = ro*velo*D/(1000*mi);

```

```
entrada = entrada + delta;
n = n + 1;
end
pres = linspace(min,max,max-min);
figure:1;
plot(pres,voln);
figure:2;
plot(pres,velo);
figure:3;
plot(pres,rey);
```