UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

BRUNO FURIERI
LORENA BECCALLI DE CASTILHO

ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE APERFEIÇOAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO EM UMA UNIDADE INDUSTRIAL: PROCESSAMENTO FINAL DE CIMENTO PORTLAND

VITÓRIA
2009

BRUNO FURIERI
LORENA BECCALLI DE CASTILHO

ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE APERFEIÇOAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO EM UMA UNIDADE INDUSTRIAL: PROCESSAMENTO FINAL DE CIMENTO PORTLAND

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Neyval Costa Reis Junior.

VITÓRIA
2009

BRUNO FURIERI
LORENA BECCALLI DE CASTILHO

ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE APERFEIÇOAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO EM UMA UNIDADE INDUSTRIAL: PROCESSAMENTO FINAL DE CIMENTO PORTLAND

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovado em 13 de Julho de 2009

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Neyval Costa Reis Junior
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Profª. Drª. Jane Méri Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

Msc. Rafael Sartim
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

“Se uma pessoa fizesse apenas o que entende, jamais avançaria um passo”

(Clarice Lispector)

AGRADECIMENTOS

À Deus pela força;

À Cimentos Mizu, por abrir suas portas para nosso projeto, principalmente ao Eng. Humberto, e aos técnicos Claudia e Leonardo por nos acompanharem;

Ao Eng. Marcos e toda equipe da empresa EuroAir, pelas informações técnicas;

Ao Eng. Maurício e toda equipe da empresa Bernauer, pelas informações técnicas;

Ao nosso orientador Neyval Costa Reis Junior;

Aos nossos examinadores Prof. Jane Méri Santos e Eng. Rafael Sartim;

Aos nossos irmãos pela ajuda, e dúvidas técnicas esclarecidas,

Aos nossos pais pelo carinho,

À Kamila e Ederson pelo apoio,

Aos nossos amigos de turma do curso de Engenharia Ambiental,

Aos amigos do laboratório de Recursos Atmosféricos.

RESUMO

O desenvolvimento dos grandes centros tem provocado o rápido crescimento do número de novas unidades industriais, que por vezes não são adequadas a um desenvolvimento sustentável, entrando em operação sem a devida aplicação de metodologias de controle da poluição. Algumas empresas têm como preocupação o simples atendimento às exigências legais, implementando medidas de melhorias somente nas fontes maiores. A busca da excelência ambiental tem sido gradualmente inserida no mercado, à medida que as empresas ampliam seu controle. O objetivo deste trabalho foi diagnosticar a condição da poluição atmosférica existente e elaborar projetos básicos de aperfeiçoamento do sistema de controle de material particulado, tendo como estudo de caso uma unidade industrial de processamento final de cimento Portland. A unidade industrial avaliada recebe os insumos (clínquer, gesso e escória de alto-forno) prontos para a moagem, mistura e ensacamento. Sendo assim, foram diagnosticadas seis regiões principais de emissão atmosférica em que as com maiores deficiências são as relacionadas com o transporte dos insumos, no caso o clínquer. Em três regiões do total analisado, foram discutidas alternativas de intervenção buscando a adequação dos sistemas de ventilação e de controle do material particulado. Na região de descarregamento do clínquer na tremonha de abastecimento da correia transportadora foi percebido o maior quantitativo de emissão de particulado. Para tal, foram dimensionados os captores, sistemas de dutos, equipamentos de controle e ventiladores para quatro diferentes cenários de avaliação. Tais cenários diferenciaram-se principalmente no traçado das tubulações e na tecnologia de tratamento da vazão de captação. A comparação dos cenários, para posterior seleção da melhor alternativa, deu-se em função da concentração de poluentes do efluente final e dos custos anuais uniformizados. A melhor alternativa prevê a instalação de um novo filtro de mangas, mantendo em operação o filtro já existente e a concentração final de poluentes está de acordo com as exigências legais pertinentes. Para as demais regiões analisadas as análises qualitativas mostraram que as principais melhorias estão relacionadas a melhor adequação da captura dos poluentes e de boas práticas no desenvolvimento das operações.

Palavras-chave: 1) Poluição Atmosférica; 2) Material Particulado; 3) Controle de Emissões; 4) Cimento Portland; 5) Ventilação Industrial; 6) Filtro de mangas; 7) Ciclone; 8) Avaliação econômica de projetos.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Exemplo de distribuição de diâmetros para um particulado. 20

Tabela 2-2 – Padrões de Qualidade do Ar para os parâmetros Partículas Totais em Suspensão e Partículas Inaláveis. 26

Tabela 2-3 – Limites de emissão de Material Particulado para processos da fabricação de Cimento Portland. 27

Tabela 2-4 – Fatores de emissão para diferentes poluentes de uma planta de produção de cimento Portland. 28

Tabela 2-5 – Fatores de emissão de material particulado e específicas classificações para limpeza a seco de plantas industriais. 28

Tabela 2-6 – Classificações de qualidade e respectivas definições dos fatores de emissão. 29

Tabela 2-7 – Faixas de velocidade de captura em função das condições de geração. 35

Tabela 2-8 – Faixas de velocidade de captura em função da operação praticada. 35

Tabela 2-9 – Escolha da região da faixa de velocidades mais apropriada de acordo com as características do ambiente, contaminante e produção. 36

Tabela 2-10 – Valores do coeficiente de entrada e coeficiente de perda de carga para as diferentes formas de entrada de captores. 38

Tabela 2-11 – Velocidade do ar em canalizações segundo a ASHRAE. 39

Tabela 2-12 – Relação de dimensões de padrões de ciclones 48

Tabela 2-13- Efeito de mudanças de condições de operação na eficiência de ciclones. 51

Tabela 2-14 – Velocidades máximas de filtragem para vários tipos de poeira indicados para filtros de jato pulsante. 56

Tabela 3-1 – Fatores de emissão de algumas etapas no processo de fabricação de Cimento Portland. 67

Tabela 3-2 – Distribuição de diâmetros para etapa de processamento em fornos. 67

Tabela 3-3 – Distribuição de diâmetros para etapa de Resfriamento de Clinquer. 68

Tabela 4-1– Pontos de captação e equipamentos referentes aos quatro cenários propostos 93

Tabela 4-2 – Características do sistema de despoeiramento instalado para o ponto de emissão E3. 99

Tabela 4-3 – Características gerais e especificação do ventilador de exaustão projetado para o Cenário I da Região B. 100

Tabela 4-4 – Dados básicos do filtro de mangas e do ventilador de exaustão do Cenário II-A da Região B. 104

Tabela 4-5 – Dados básicos do filtro de mangas e do ventilador de exaustão do Cenário II-B da Região B. 106

Tabela 4-6 – Dados básicos do filtro de mangas e do ventilador de exaustão do Cenário III da Região B. 108

Tabela 4-7 – Características Finais do Equipamento de Controle e Ventilador do Cenário I da Região B. 109

Tabela 4-8 – Características Finais do Equipamento de Controle e Ventilador do Cenário II-A da Região B. 110

Tabela 4-9 – Características Finais do Equipamento de Controle e Ventilador do Cenário II-B da Região B. 110

Tabela 4-10 – Características Finais do Equipamento de Controle e Ventilador do Cenário III da Região B. 111

Tabela 4-11 – Custos de operação e manutenção dos sistemas de ventilação e de controle da poluição atmosférica. 113

Tabela 4-12 – Custos envolvidos no projeto de cada cenário proposto, em reais. 114

Tabela 4-13 – Custos de investimento e de operação e manutenção para cada cenário. 114

Tabela 4-14 – Valores do custo anual uniforme para cada cenário proposto, considerando taxa de juros de 10% ao ano. 115

Tabela 4-15 – Concentrações do efluente final do sistema 116

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Diâmetro aerodinâmico, referente a uma partícula de forma qualquer. 18

Figura 2-2 – Faixas de diâmetros para partículas em dispersão 19

Figura 2-3 – Distribuição mássica dos diâmetros plotados em escala linear (a), e em escala logarítmica (b). 20

Figura 2-4 – Representação gráfica da distribuição de diâmetros das partículas. 21

Figura 2-5 – Principais Mecanismos de aderência de partículas em substratos. 22

Figura 2-6 – Deposição de partículas no sistema respiratório. 24

Figura 2-7 - Esquema do trato respiratório humano 24

Figura 2-8 – Fluxograma de caracterização das diferentes formas de ventilação industrial 31

Figura 2-9 – Forma de captor de sistemas de ventilação industrial. (a) captor de fendas; (b) boca de jacaré. 33

Figura 2-10 - Configuração do escoamento ao entrar no captor, denominada vena contracta 37

Figura 2-11 – Peças acessórias e respectivos coeficientes de perda de carga 42

Figura 2-12 – Modelos de ventiladores de sistemas de ventilação 44

Figura 2-13 – Esquema do fluxo de gás dentro de um ciclone padrão. 46

Figura 2-14 – Relação entre eficiência de coleta e tamanho da partícula para ciclones padrões de alta, média e baixa eficiência. 47

Figura 2-15 – Dimensões padrões para ciclones. 48

Figura 2-16 - Eficiência das partículas em função da relação de diâmetros. 50

Figura 2-17 – Esquema representativo do conjunto de um filtro de manga de batimento mecânico. 53

Figura 2-18 – Métodos de limpeza de filtros de manga. (a) batimento; (b) ar reverso; (c) jato pulsante 54

Figura 2-19 – Amortização dos custos de implantação 60

Figura 2-20 – Exemplo da variação dos custos anuais uniformes para dois projetos excludentes. 61

Figura 3-1 – Esquema simplificado de processo produtivo de Cimento Portland 66

Figura 3-2 – Galpão de armazenamento dos insumos do processo produtivo e pátio das pilhas de escória de alto-forno. 69

Figura 3-3 – (a) Correia transportadora da matéria-prima; (b) Visão geral da unidade industrial 70

Figura 3-4 – (a) Moinho de Bolas Polysius; (b) Moinho de Rolos UBE 70

Figura 3-5 – Insumos da produção de Cimento Portland: (a) Clínquer; (b) Escória 72

Figura 3-6 – Representação esquemática da unidade industrial com demarcação dos pontos de emissão visualizados durante análise do estudo de caso 74

Figura 4-1 – Definição dos pontos de avaliação de emissão para a Região B, e demais elementos. 81

Figura 4-2 – Ponto de emissão E1, contendo rolo imantado. 82

Figura 4-3 – Fluxograma de apresentação das operações de descarregamento, transferência e transporte de clínquer a partir do galpão de armazenamento 85

Figura 4-4 – Localização do ponto de recebimento do clínquer na tremonha da Região B. 86

Figura 4-5 – Detalhe da entrada da tremonha onde são descarregados o clinquer e a escoria. 86

Figura 4-6 – Detalhe da emissão de material particulado decorrente da operação de descarregamento de clínquer na tremonha. 87

Figura 4-7 – (a) Configuração atual da forma de descarregamento da matéria-prima na tremonha; (b) Configuração proposta como ideal para o ponto de descarregamento de clínquer. 88

Figura 4-8 – Configuração de melhoria do ponto de chegada de clínquer na tremonha com o dimensionamento de novas tomadas de ar. 89

Figura 4-9 – (a) Visão geral do ponto de emissão da Região D; (b) Captor da Região D, mostrando em detalhes a sua estruturação. 90

Figura 4-10 – (a) Vista lateral do captor do ponto de emissão da Região D; (b) Corte do captor do ponto de emissão da Região D e (c) Isometria do captor 91

Figura 4-11 – (a) Aberturas deixadas na correia de transferência de clinquer podendo ocasionar a umidificação do material; (b) O captor enclausurante da tremonha está com grandes aberturas em sua estrutura podendo ocasionar a perda de matéria por dispersão através destas. 92

Figura 4-12 – Formato das chapas do captor enclausurante do ponto de emissão E1 da Região B. 95

Figura 4-13 – Isometria do captor enclausurante do ponto de emissão E1 da Região B. 96

Figura 4-14 – Forma atual (a) e melhorias propostas (b) no captor de exaustão do ponto de emissão E2. 98

Figura 4-15 – Sistema de Ventilação do Cenário I da Região B. 101

Figura 4-16 –Sistema de Ventilação do Cenário II-A da Região B 103

Figura 4-17 – Sistema de Ventilação do Cenário II-B da Região B..... 105

Figura 4-18 – Sistema de ventilação do Cenário III da Região B. 107

Figura 4-19 – Variação do custo anual uniforme com o período de projeto considerado. Taxa de juros de 10% ao ano. 115

Figura 7-1 – Estruturas de sustentação do ponto de emissão E1. 122

Figura 7-2 – Placas do captor enclausurante que possuem áreas abertas necessárias ao cálculo da vazão de exaustão 123

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

2.1 Material Particulado 17

2.1.1 Distribuição de diâmetros 19

2.1.2 Mecanismos de coleta mecânica de particulado 21

2.1.3 Efeitos à Saúde 23

2.1.4 Limites definidos para MP 25

2.2 Estimativa de Emissões de Poluentes Atmosféricos 27

2.3 Controle da Poluição Atmosférica 29

2.3.1 Captores 32

2.3.2 Sistema de Dutos 39

2.3.3 Ventiladores 42

2.3.4 Equipamentos de Controle da Poluição Atmosférica 45

2.3.4.1 Ciclones 46

2.3.4.2 Filtro de Mangas 52

2.4 Avaliação econômica de projetos 58

2.4.1 Relação Benefício/Custo 59

2.4.2 Comparação de Investimentos Excludentes 59

2.4.2.1 Método do Custo Anual Uniforme 60

2.4.3 Custos Envolvidos com Equipamentos de Controle 61

2.4.4 Internalização dos Custos Ambientais 62

3 MATERIAIS E MÉTODOS 64

3.1 Estudo de caso 64

3.1.1 Escolha da unidade industrial 64

3.1.2 Produção de Cimento Portland 65

3.1.3 Processo produtivo da unidade industrial 68

3.1.4 Insumos e Produto Final 71

3.1.5 Identificação e Análise de Pontos de Emissão de Material Particulado 72

3.2 Metodologia de dimensionamento das partes constituintes dos sistemas de despoeiramento dos cenários apresentados 75

3.2.1 Metodologia de dimensionamento de captores e tubulações 75

3.2.2 Metodologia de dimensionamento de equipamentos de controle: filtros de manga e ciclones 76

3.2.2.1 Dimensionamento de ciclones 76

3.2.2.2 Dimensionamento de filtros 77

3.2.3 Metodologia de aplicação da metodologia de estimativa de emissões 78

3.2.4 Metodologia de análise econômica dos cenários 79

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 80

4.1 Alternativas de Melhoria 80

4.1.1 Região A: Galpões de armazenamento de matéria-prima 80

4.1.2 Região B: Tremonha e rolo imantado 80

4.1.2.1 Cenário I: Dimensionamento de Ciclone 82

4.1.2.2 Cenários II-A e II-B: Dimensionamento de Filtro de Mangas 83

4.1.2.3 Cenário III: Dimensionamento de Ciclone e Filtro de Mangas 83

4.1.3 Regiões C e D: silos de matérias-primas e transferência de correias 83

4.2 Análises Qualitativas de controle da poluição atmosférica 84

4.2.1 Região A: Galpão de Clínquer 84

4.2.2 Região B: Tremonha de alimentação das correias 85

4.2.3 Região D: Transferência de correias 89

4.2.4 Região D: Correia de Alimentação do moinho de Clínquer 91

4.2.5 Cuidados Adicionais 92

4.3 Dimensionamento dos cenários propostos e análise quantitativa 93

4.3.1 Características do captor enclausurante do ponto de emissão E1 93

4.3.2 Características do captor enclausurante do ponto de emissão E2 97

4.3.3 Características do sistema de controle de poluição do Cenário I 98

4.3.4 Características do sistema de controle de poluição do Cenário II 102

4.3.5 Características do sistema de controle de poluição do Cenário III 106

4.3.6 Especificação das partes dos sistemas e seus custos associados 108
4.3.7 Comparação das alternativas propostas a partir das análises econômicas 114
5 CONCLUSÃO 118
6 REFERÊNCIAS 120
7 APÊNDICES 122
8 ANEXOS 145

1 INTRODUÇÃO

A organização que a sociedade humana vem estabelecendo desde o início da revolução industrial tem demandado uma atividade industrial intensa e gerado aglomerações da população em núcleos urbanos. O crescente nível de consumo e a busca do lucro como principal objetivo da cadeia produtiva resultaram em um cenário de grande poluição, principalmente nos locais de grande concentração industrial. Este desenvolvimento econômico não foi acompanhado, muitas vezes, de análises que pudessem avaliar seu impacto sobre o meio ambiente, a toxicidade dos resíduos produzidos e insumos utilizados pelas indústrias, ou os prováveis danos à saúde. (CETESB, 2003)

A qualidade do ar, um fator imprescindível para uma qualidade de vida satisfatória da população, tem sofrido com a ação antrópica. A emissão de gases, provenientes de processos industriais e da queima de combustível, nas indústrias, nas atividades de transporte, e até mesmo nas residências, provocam o aumento da concentração de substâncias nocivas ao meio ambiente e ao equilíbrio da terra.

Um dos fatos marcantes que resultaram nas primeiras relações observadas entre a poluição do ar e a saúde humana surgiu de episódios agudos de contaminação do ar e estudos sobre a ocorrência do excesso de milhares de mortes registradas em Londres, entre 1948 e 1952 (CETESB, 2003). Outros fatos e fenômenos que tiveram sua ligação com a poluição atmosférica reconhecida foram o buraco na camada de ozônio, o *smog* fotoquímico, chuva ácida, e mais atualmente, o aquecimento global.

A crescente preocupação com as questões ambientais e a insatisfação da população, somada à ampliação da discussão sobre as conseqüências da poluição, tem provocado reações dos governos e entidades inter-governamentais, que exigem maiores níveis de controle das atividades poluidoras, aplicando leis específicas.

No Brasil, os avanços com relação ao controle de emissões foram iniciados nos anos 80 e 90. Em 1989, foi criado o Programa Nacional de Controle da Qualidade do ar – PRONAR. Este programa tem como estratégia básica limitar, a nível nacional, as emissões por tipologia de fontes e poluentes prioritários, reservando o uso dos padrões de qualidade do ar como ação complementar de controle. (Resolução CONAMA n°05, 1989)

Posteriormente, foi publicada a resolução CONAMA nº 03 de 1990, que estabelece Padrões de Qualidade para diversos tipos de poluentes. Além disso, dá atribuição aos estados sobre o monitoramento e estabelece os Níveis de Qualidade do Ar para elaboração do Plano de Emergência para Episódios Críticos de Poluição do Ar, visando providências dos governos de Estado e dos Municípios, assim como de entidades privadas e comunidade geral, com o objetivo de prevenir grave e iminente risco à saúde da população (Resolução CONAMA n°03, 1990).

O licenciamento ambiental passou a exigir medidas de adequação das empresas, de modo a manter a qualidade do ar da região de influência das mesmas dentro dos limites padrões. O maior rigor das legislações e as exigências de mercado têm provocado a iniciativa de melhorias nas empresas, que tem buscado um maior controle de suas emissões. Assim, as empresas passaram a elaborar controles mais rigorosos de suas emissões.

Os diversos processos industriais existentes possuem problemas de emissão específicos que abrangem desde gases a materiais particulados. Para cada tipo de atividade e de poluente há uma forma de controle mais adequada. A escolha do controle específico depende de vários fatores, como o tipo de poluente, a quantidade da emissão, e a disponibilidade de tecnologia e capital disponível.

Cabe à engenharia encontrar a solução adequada e viável, para que os limiares de segurança sejam respeitados, proporcionando condições ambientais adequadas à vida humana e à preservação da fauna e flora. (MACINTYRE, 1990). Assim, a análise de investimento em controles de emissão deve levar em conta os benefícios indiretos, que são desde um ambiente laboral asseado até uma boa imagem da empresa junto à comunidade.

O controle adequado da poluição do ar tem início com uma adequada ventilação das operações e processos poluidores da atmosfera, seguindo-se uma escolha adequada de um equipamento para a coleta dos poluentes captados pelo sistema de ventilação. (MESQUITA et al., 1988).

Atualmente, além dos controles de emissões, as grandes empresas têm investido em tecnologias de produção mais eficientes e de menor geração de resíduos, metodologias de Produção Mais Limpa. Neste contexto, os equipamentos de controle de emissão tornam-se parte essencial do processo produtivo, sendo encarados como recuperadores de matéria-prima ou co-produtos.

Motivado pela necessidade atual de investimentos no controle da poluição atmosférica, o que inclui partículas em suspensão, o presente Projeto de Graduação tem como objetivo geral a análise de uma instalação industrial, identificando seus principais pontos de emissão de partículas e propondo soluções de controle.

Assim, os objetivos específicos do Projeto de Graduação são:

- Levantamento de pontos onde há deficiência no controle de emissões;
- Elaboração de projeto básico de sistema de despoeiramento em ponto de maior emissão, de acordo com a tipologia da fonte, comparando-se várias opções;
- Estudo qualitativo de possíveis melhorias do sistema de ventilação e captação da unidade industrial;

- Avaliação econômica, com determinação dos custos de implantação, manutenção e operação, comparando-se a viabilidade econômica dos projetos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo a descrição dos itens da fundamentação teórica deste estudo. Os assuntos abordados servirão de embasamento teórico para a aplicação das metodologias de análise e dimensionamento do sistema de controle da poluição atmosférica. Serão apresentados aspectos teóricos referentes a material particulado, seus tipos de fontes e efeitos ao meio ambiente e saúde humana. No item de caracterização da poluição atmosférica tratar-se-á ainda de importante tema para o desenvolvimento do projeto, a estimativa de emissões de poluentes atmosféricos.

A segunda parte da revisão bibliográfica versará sobre itens pertinentes ao controle da poluição atmosférica. Para tal, serão abordadas as teorias referentes aos sistemas de ventilação e suas partes constituintes, a citar, captores, dutos, acessórios e ventiladores além das teorias de fundamentação do dimensionamento dos equipamentos de controle. O último tópico desta fundamentação teórica trará discussões sobre métodos de avaliação econômica de projetos com o intuito de posteriormente avaliar a viabilidade de cada projeto comparando-os.

2.1 MATERIAL PARTICULADO

Poluente atmosférico é toda e qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (CETESB, 2003).

A interação entre as fontes de poluição, as características do elemento emitido e as condições da atmosfera define o nível de qualidade do ar, que determina por sua vez o surgimento de efeitos adversos da poluição do ar sobre os receptores, que podem ser o homem, os animais, as plantas e os materiais (CETESB, 2003). São vários os tipos de poluentes atmosféricos, podendo ter fonte em fenômenos naturais, como vulcões, ou fonte antropogênica, como chaminés de indústrias e veículos.

Materiais particulados são sólidos ou líquidos de pequenas dimensões que permanecem em suspensão no ar e podem ser dispersos na atmosfera. Podem ser considerados como a maior classe de poluição atmosférica. Dentro desta classe estão particulados de vários tamanhos e formas, e diversificadas características físicas e químicas (COOPER; ALLEY, 2002).

As causas fundamentais da formação de material particulado são: processos industriais, principalmente pelo arraste de materiais em transferência e estocagem, ressuspensão de poeira do solo, processos de combustão, e reações ocorridas na atmosfera, a partir de gases como dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos.

Os efeitos da emissão de particulados incluem redução na visibilidade com formação de fumaça e névoa, desgaste de materiais por corrosão, e alteração no microclima local. Também pode haver danos na saúde humana e animal, e retardamento do crescimento de vegetal (COOPER; ALLEY, 2002).

Por possuírem variadas formas, muitas vezes difíceis de serem definidas, é utilizado como parâmetro o diâmetro aerodinâmico da partícula. O diâmetro aerodinâmico de uma partícula é definido como a equivalência do diâmetro de uma esfera que tem a mesma velocidade de sedimentação da partícula em questão (SCHENELLE; BROWN, 2002).

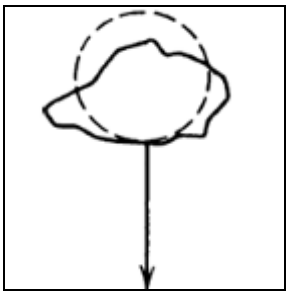


Figura 2-1 - Diâmetro aerodinâmico, referente a uma partícula de forma qualquer.
Fonte: Ruzer e Harley, 2005, apud Trindade, 2009.

As partículas em suspensão na atmosfera possuem diâmetros muito variados, podendo variar desde 0,002 μm até 100 μm (DOCKERY; POPE ,1994 apud TRINDADE, 2009). As partículas com diâmetro acima de 100 μm não permanecem por muito tempo em suspensão e tendem a se sedimentar, exceto em condições com influência de ventos, dependendo de sua intensidade.

Quanto ao tamanho, é comum classificar as partículas em valores parâmetros. O PM_{10} representa o material particulado que é separado com 50% de eficiência para os diâmetros de corte de 10 μm, sendo também chamada de partículas inaláveis. O $PM_{2,5}$, representa portanto, o material particulado separado com as mesmas condições descritas anteriormente para o diâmetro de corte de 2,5 μm de diâmetro aerodinâmico, em que é também classificado de particulado inalável fino. As partículas de diâmetro entre 2,5 e 10 μm são chamadas de partículas inaláveis grossas.

A Figura 2-2, apresenta uma relação entre os materiais típicos e suas faixas de diâmetro de material em suspensão.

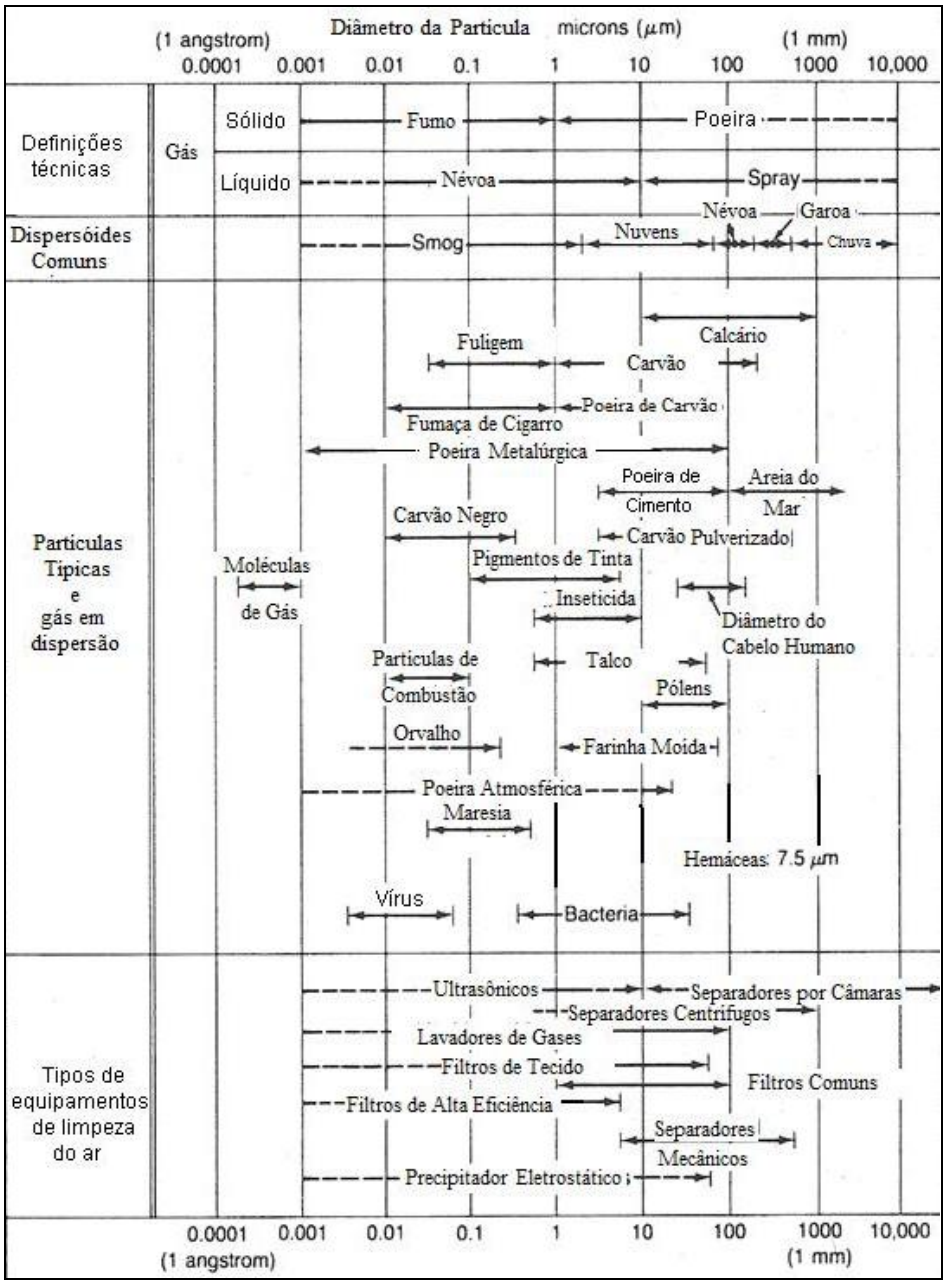


Figura 2-2 – Faixas de diâmetros para partículas em dispersão
Fonte: Cooper e Alley, 2002 (modificado).

A Figura 2.2 mostra, que para as partículas provenientes da poeira de cimento, estas situam-se entre 5,0 e 100,0 μm. Para tal nota-se na parte inferior da figura as faixas de diâmetros que são coletados por cada equipamento de controle específico, como por exemplo, os filtros de tecido que tem características de coleta para as faixas de 0,001 a 100 μm.

2.1.1 Distribuição de diâmetros

As partículas de um material específico em suspensão não possuem um único tamanho, mas sim uma faixa de diâmetros em que varia sua distribuição. Uma das características mais

importantes da suspensão de particulado é a distribuição de tamanhos dos particulados (COOPER; ALLEY, 2002).

A distribuição de tamanho das partículas para um particulado em suspensão é geralmente expressa em termos da distribuição de massa, indicando qual porcentagem da massa de particulado possui diâmetros em uma dada faixa (SCHENELLE; BROWN, 2002). É também muito utilizada a porcentagem acumulada da massa das partículas de diâmetro até o maior diâmetro da faixa.

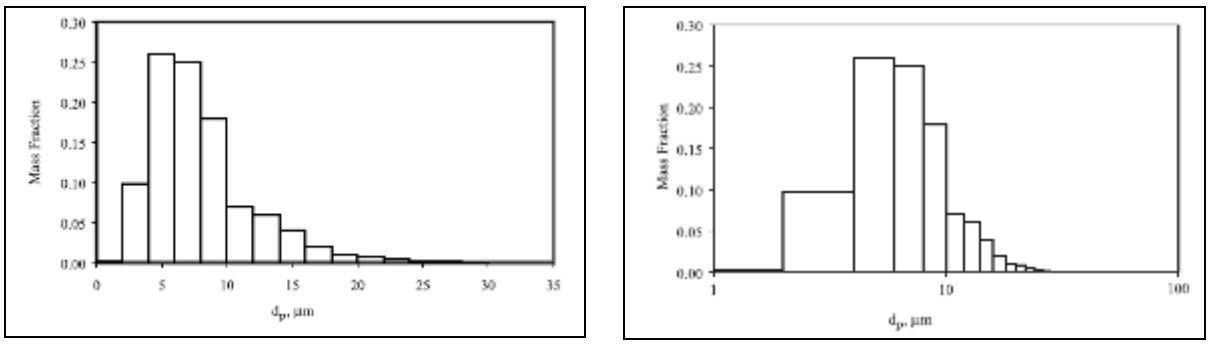
Um exemplo fictício de distribuição de tamanhos é apresentado na Tabela 2-1, em que para tal exemplo, o particulado com faixa de diâmetros entre 9 e 15 mm possui fração de massa igual a 30%. A tabela ainda explica que 90% da massa está abaixo do diâmetro igual a 15 μm.

Tabela 2-1 – Exemplo de distribuição de diâmetros para um particulado.

Faixa de diâmetros (μm)	Fração de Massa (m_j)	Porcentagem acumulativa %
0-2	0.005	0.5
2-5	0.195	20.0
5-9	0.400	60.0
9-15	0.300	90.0
15-25	0.080	98.0
>25	0.020	100.0

Fonte: Cooper e Alley, 2002

Ao ser plotada em papel gráfico linear a curva gerada apresenta uma forma de sino distorcida, como mostrado na Figura 2-3-a. A mesma distribuição, quando plotada com os diâmetros em escala logarítmica pode gerar uma curva de sino, indicando uma distribuição log-normal (SCHNELLE; BROWN, 2002), como mostrado na Figura 2-3-b.



(a) **(b)**

Figura 2-3 – Distribuição mássica dos diâmetros plotados em escala linear (a), e em escala logarítmica (b).
Fonte: Schenelle e Brown, 2002

No papel gráfico de log-probabilidade, uma distribuição log-normal gera uma reta. A Figura 2-4 apresenta a representação gráfica referente ao exemplo citado.

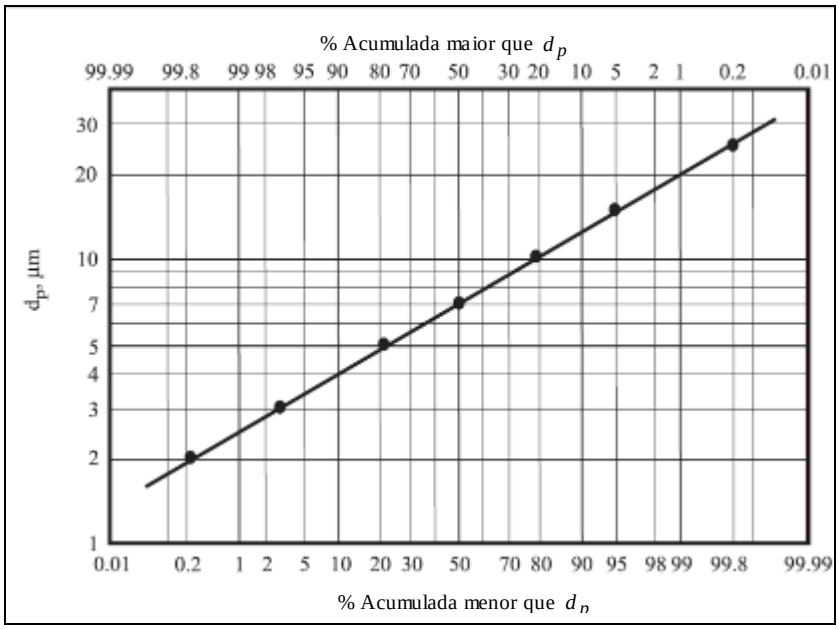


Figura 2-4 – Representação gráfica da distribuição de diâmetros das partículas.
Fonte: Schenelle e Brown, 2002

Distribuições log-normais são comuns para muitas fontes de emissões de particulado, pois uma grande quantidade de massa é concentrada em uma pequena faixa de diâmetros. Outras distribuições também podem ser encontradas. As distribuições bimodais, por exemplo, em que grande massa de partículas estão concentradas em dois diferentes faixas de diâmetros, podendo indicar dois diferentes mecanismos para geração de partículas. Por exemplo, partículas maiores são formadas em processos de moagem, enquanto partículas menores se formam em processo de condensação.

2.1.2 Mecanismos de coleta mecânica de particulado

Ao ser carregada por um fluxo de ar, a partícula pode ser capturada ou coletada de diversas formas, o que depende de suas características e das características do meio. Partículas pesadas tendem a se depositar por gravidade, já partículas mais leves tendem a permanecer em suspensão, dependendo das condições do vento no ambiente.

As partículas podem ser capturadas no ar ao atingirem obstáculos e se aderirem por forças intersuperficiais. Esses obstáculos podem ser gotas em suspensão, gotículas de chuva, fibras de um filtro, ou um substrato qualquer. As partículas se aderem aos substratos por diversos

mecanismos. Os três mais importantes são os mecanismos de impactação, intercepção, e de difusão, representados na Figura 2-5.

Ao passar por um obstáculo, as linhas de corrente de fluxo divergem-se ao se aproximar de forma a contorná-lo. As partículas carregadas pelo fluido tendem a seguir as linhas de fluxo, porém, devido a sua inércia algumas se desviam tangencialmente. Partículas de diferentes diâmetros tendem a se comportar de maneiras diferentes.

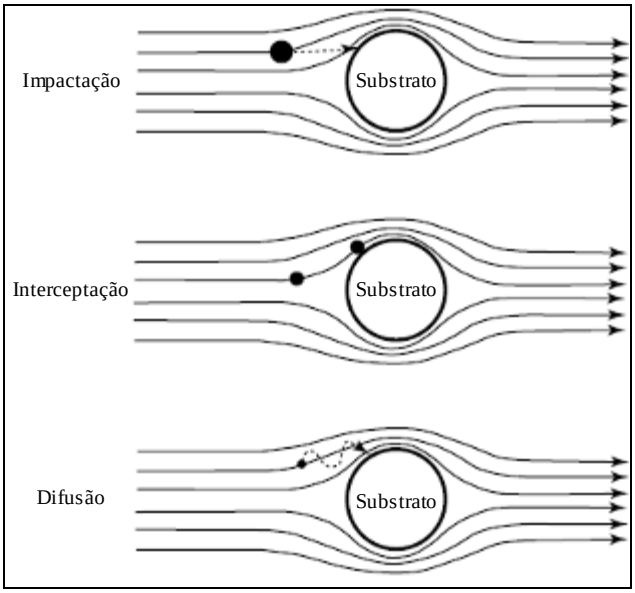


Figura 2-5 – Principais Mecanismos de aderência de partículas em substratos.
Fonte: Schenelle e Brown, 2002

No mecanismo de impactação, as partículas se chocam diretamente com o substrato. As partículas de maior diâmetro, que possuem maior massa, tendem a mover-se em linha reta, deixando a linha de corrente. Quanto maior a massa da partícula, maior a sua inércia, e menor a capacidade de seguir a linha de corrente. O raio da curvatura da trajetória da linha de corrente também possui um efeito muito importante, quanto mais brusca a curvatura, maior a tendência da partícula em seguir reto. Assim, as formas do obstáculo também é um fator de influência.

No mecanismo de intercepção, as partículas, que possuem cerca de 0,1 a 1 μm de diâmetro, são carregados pela linha de fluxo suficientemente próximo à superfície do anteparo que o toca, se aderindo. O mecanismo de intercepção é relativamente fraco para coleta de partícula se comparado ao mecanismo de impactação. São coletadas as partículas que seguem a linha de corrente próximo ao anteparo. Por essa razão que partículas nesta faixa de tamanhos são difíceis de ser coletadas, comparadas a partículas maiores e menores.

Pela mesma razão, partículas nestas faixas de tamanho não são coletadas por mecanismos de limpeza natural das vias nasais e traqueo-bronquiais, e entram nos pulmões onde se alojam nos alvéolos. (SCHENELLE; BROWN, 2002)

A coleta de partículas de diâmetro muito pequeno, submícrons, pelo mecanismo de difusão é o resultado do movimento Browniano. Essas partículas são tão pequenas que o número de colisões com as moléculas de ar é baixo. Por isso, colisões randômicas com moléculas de ar causam movimentos de saltos da partícula. Assim, elas são movidas da linha de corrente inicial para a próxima por movimentos randômicos. Se houver tempo suficiente, e se a distância ao aparato for pequeno, então difusão pode se tornar um mecanismo de coleta efetivo.

Em cada um destes mecanismos, um grande número de obstáculos aumenta a probabilidade da uma partícula se aderir. Assim, um ambiente com muitos obstáculos possui maior eficiência da coleta de partículas.

Outro mecanismo de coleta de partículas é a atração eletromagnética. Se as partículas adquirem uma carga elétrica e o ambiente possui campo elétrico, a força eletrostática moverá as partículas através das linhas de corrente do fluxo de gás. Forças eletrostáticas em pequenas partículas podem ser muito significativas, fazendo desse um mecanismo muito efetivo para coleta de partículas. Esse é o mecanismo utilizado pelos precipitadores eletrostáticos.

A força da gravidade também é utilizada para retirar partículas muito grandes para fora da linha de fluxo. Esse mecanismo é utilizado em alguns separadores mecânicos onde o fluxo é orientado e as partículas de maior massa decantam. Entretanto, a gravidade é um mecanismo fraco para as partículas leves. Assim como a força de gravidade, a força centrífuga também é utilizada para a separação de partículas de maior peso.

2.1.3 Efeitos à Saúde

Segundo a OMS, 50% das doenças respiratórias crônicas e 60% das doenças respiratórias agudas estão associadas à exposição a poluentes atmosféricos. As partículas podem causar danos à saúde humana quando conseguem penetrar no aparelho respiratório. A capacidade de penetração das partículas no sistema respiratório e seus impactos variam com o tipo de particulado e seu tamanho. E a intensidade dos efeitos sobre a saúde depende da capacidade das partículas em penetrarem no sistema respiratório.

Fatores como a composição química das partículas, a concentração, o período da exposição, e a resistência do indivíduo ao poluente também influenciam no nível de risco para a saúde humana que o mesmo representa. Certos poluentes podem ser tóxicos ou cancerígenos.

Em geral, os mecanismos de defesa natural do sistema respiratório são adequados para remover as partículas inaladas maiores que 10 μm (GODISH, 1997 apud TRINDADE, 2009).

A Figura 2-6 mostra a deposição das partículas no sistema respiratório em função do tamanho das partículas. A região traqueo-braqueal, segundo a figura citada, possui fração de deposição em uma grande faixa de diâmetros.

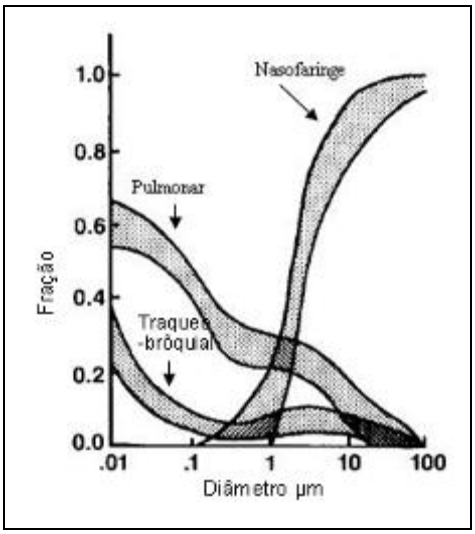


Figura 2-6 – Deposição de partículas no sistema respiratório.
Fonte: Godish, 1997 apud Trindade, 2009

As partículas PM_{10} não penetram nas vias respiratórias (sistema respiratório inferior), ficando retidas no nariz e nasofaringe, de onde são eliminadas pelos mecanismos de deglutição, tosse, espirros e pelo aparelho mucociliar. Já partículas menores $PM_{2,5}$ podem causar graves danos a saúde de humanos e animais, uma vez que conseguem atingir os brônquios e nestes se alojam (Figura 2-7). Essas partículas são denominadas de respiráveis, pois elas entram no sistema respiratório e se depositam no tecido pulmonar (GODISH, 1997).

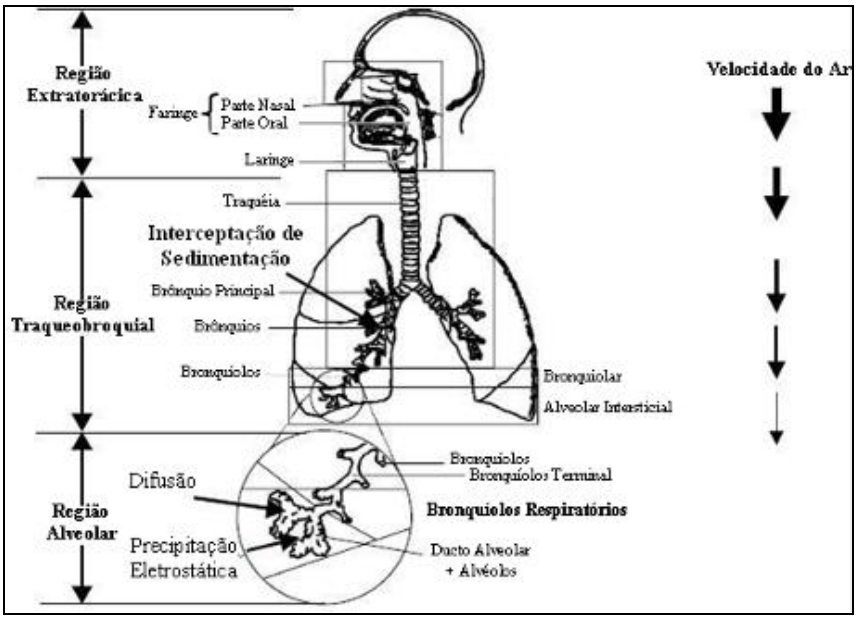


Figura 2-7 - Esquema do trato respiratório humano
Fonte: Ruzer e Harley, 2005 apud Trindade 2009,

As partículas compreendidas entre 1 e 2 μm de diâmetro de diâmetro são capazes de atingir e se depositarem nos alvéolos. As partículas que chegam as regiões mais distais das vias respiratórias são fagocitadas pelos macrófagos alveolares, e assim são retiradas pelo aparelho mucociliar ou pelo sistema linfático.

Estudos epidemiológicos têm demonstrado associações do nível de material particulado com mortalidade e morbidade. No qual, concentrações elevadas de partículas finas causam aumento da taxa de mortalidade, aumento da incidência de asma e bronquite, e aumento das taxas de infecção no sistema respiratório. Além dos danos à saúde, as partículas podem causar outros tipos de incômodos à população. Ao se sedimentarem e se depositarem sobre os materiais, as edificações e os monumentos, causam a descoloração e a decomposição de matérias de construção, além de gerar desconfortos.

As partículas também se depositam nas folhas dos vegetais e reduzem a penetração da luz. Os efeitos dos poluentes do ar sobre as plantas podem ocorrer em todas as partes e em diferentes estágios de desenvolvimento. Nas folhas podem ocorrer sintomas visíveis como descolorações, encurtamento de caules, por exemplo. Há ainda os efeitos invisíveis como a redução no crescimento das plantas e alteração nos processos fisiológicos e bioquímicos. (MAIOLI, 2006)

Buscando evitar os efeitos dos materiais particulados sobre a saúde e meio ambiente, padrões de qualidade do ar têm sido criados em diversos países. Esses padrões têm caráter legal, e limitam indiretamente as emissões de um poluente atmosférico, para garantir proteção da saúde e do bem-estar das pessoas.

Em ambientes industriais, em que há geração dos poluentes, os trabalhadores permanecem em contato com os poluentes por um grande período diário, e se expõem muitas vezes por vários anos. A qualidade do ar interno ao ambiente de trabalho também deve ser levado em conta, é aí que a concentração de poluentes é maior, podendo causar problemas crônicos à saúde dos funcionários. Quando o controle das emissões não é possível, deve-se recorrer a equipamentos individuais de proteção, como máscaras e óculos.

2.1.4 Limites definidos para MP

Um grande passo no sentido de estabelecer estratégias para o controle, preservação e recuperação da qualidade do ar foi a criação da resolução CONAMA n° 05 de 89, que institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar – PRONAR. Este programa estabelece como estratégia básica limitar as emissões, observando o tipo de fonte e poluente.

Os estabelecimentos de limites de emissão e de padrões de qualidade do ar são importantes instrumentos de controle da poluição atmosférica. Estes parâmetros são definidos de acordo

com o tipo de fonte e o tipo de poluente. Outro instrumento que ajuda a definir o nível local da concentração de poluentes é o enquadramento das áreas segundo os usos pretendidos.

Os padrões de qualidade do ar são concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral (Resolução CONAMA n°03, 1990).

Os padrões são divididos em padrões primários e secundários. Os padrões primários são referentes a efeitos na saúde da população humana, já os padrões secundários são referentes a efeitos adversos sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral, por menores que sejam. Os padrões secundários tendem a ser mais restritivos que os primários

A Resolução CONAMA n°03 de 1990 define padrões de qualidade, primários e secundários, para diversos poluentes. Entre os parâmetros citados estão as Partículas totais em suspensão, e Partículas inaláveis, como mostra a Tabela 2-2.

Tabela 2-2 – Padrões de Qualidade do Ar para os parâmetros Partículas Totais em Suspensão e Partículas Inaláveis.

Parâmetro	Padrão Primário (µm/m³)		Padrão Secundário (µm/m³)	
	$\overline{C}_{g-anual}$	$\overline{C}_{-24h}$	$\overline{C}_{g-anual}$	$\overline{C}_{-24h}$
Partículas Totais em Suspensão	80	240	60	150
Partículas Inaláveis	50	150	50	150

$\overline{C}_{g-anual}$ - Concentração média geométrica anual

$\overline{C}_{-24h}$ - Concentração média de 24 horas. Não deve ser excedida mais de uma vez por ano

Fonte: Resolução CONAMA n°03, 1990.

O estabelecimento de limites de emissões de poluentes deve considerar critérios como a capacidade de suporte do meio ambiente, e a viabilidade e acessibilidade técnica e econômica da adoção de tecnologias de controle de emissão de poluentes atmosféricos, já desenvolvidas em escala que permitam sua aplicabilidade prática. A Resolução CONAMA n°382, 2006 apresenta estabelece limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para diversas fontes fixas de diferentes atividades, por poluente e por tipologia de fonte.

Uma das atividades que possui limites de emissão para poluentes atmosféricos definidos pela Resolução CONAMA n° 382, 2006 é a produção de cimento Portland, atividade abordada neste estudo. São definidos para esta atividade limites de emissão de material particulado (Tabela 2-3) e de óxidos de nitrogênio.

Tabela 2-3 – Limites de emissão de Material Particulado para processos da fabricação de Cimento Portland.

Equipamento/Processo	MP (mg/Nm³)
Fornos	50
Resfriadores	50
Moinhos de cimento	50
Secadores de escória e de areia	50
Ensacadeira	50

Fonte: Resolução CONAMA n°382, 2006.

Quando houver emissão de dois ou mais equipamentos diferentes em duto ou chaminé comum e não for possível a verificação do atendimento aos limites individuais, caberá ao órgão ambiental licenciador competente fixar o limite do conjunto, com base nos limites individuais. Na ocorrência de um equipamento com mais de um duto ou chaminé, suas emissões devem ser ponderadas pelas respectivas vazões para efeito de comparação com os limites de emissão propostos (Resolução CONAMA n°382, 2006).

2.2 ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Os fatores de emissão e inventários de emissão de poluentes atmosféricos têm sido ferramentas fundamentais no gerenciamento da qualidade do ar. As estimativas de emissão são importantes para o desenvolvimento de estratégias de controle de emissões determinando a aplicabilidade de licenciamentos e de programas de controle permitindo ainda conhecer os efeitos de determinadas fontes de emissão e estratégias adequadas de mitigação. Mesmo com muitas limitações, a citar a dificuldade de determinação de fatores de algumas fontes ou processos industriais, os fatores de emissão tem sido o melhor ou por vezes o único método disponível para a estimativa de emissões.

Um fator de emissão é o valor representativo que tem o objetivo de relacionar a quantidade de poluentes emitidos por uma fonte com base na taxa de execução de sua atividade. Tais fatores estão expressos como a massa do poluente liberado à atmosfera dividido por unidade de execução da atividade. Pode-se citar como exemplo um fator dizendo que uma fonte emite quilogramas de particulados por toneladas de combustível queimado. Na maioria das vezes tais fatores são médias calculadas de todos os dados disponíveis de qualidade aceitável e são assumidos como representativos para todas as instalações da mesma categoria.

A teoria da estimativa de emissões utilizando fatores de emissões, segundo determinado pela Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (US-EPA) utiliza a seguinte relação básica, mostrada na Equação 2.1 para indicar a quantidade de poluentes emitidos. Especificamente a US-EPA desenvolve e documenta as ferramentas de estimativa de emissões por meio da AP-42 que possui todo o detalhamento dos processos e material suporte de referência.

$$E = A.EF.(1 - ER/100) \quad (2.1)$$

onde E é a emissão, A é a taxa de atividade da operação, EF indica o fator de emissão e ER a eficiência do controle de poluentes atmosféricos.

A forma de abordagem na determinação da taxa de atividade de operação dependerá de como está relacionado o fator de emissão. Se o fator de emissão está relacionando massa de poluente com massa de combustível, como no exemplo anterior, o valor de A seria então a variação temporal de utilização deste combustível – em quilogramas por segundo, por exemplo. Em outro caso se o fator de emissão relacionasse a emissão de poluentes com volume de operação, A seria mostrado em termos de volume por tempo. Em muitas tabelas de fatores de emissão, estes já são indicados com a aplicação de um determinado equipamento de controle, o que forneceria o quantitativo de emissões após passar pelo equipamento indicado. Neste caso é preciso atentar para a aplicação da Equação 2.1 porque nesse caso já está incluído o valor de ER.

Existem para muitas aplicações de fatores de emissão fórmulas para a determinação deste sob a influência de variados parâmetros de processo como temperatura e concentração dos reagentes envolvidos. Nas estimativas de emissão de tanques de armazenamento de petróleo, a metodologia indicada acima contém fórmulas empíricas que relacionam as emissões com variáveis como o diâmetro do tanque, temperatura do líquido e velocidade do vento na região. Este tipo de abordagem tende a ser muito mais realístico na estimativa que os fatores que não o consideram. As Tabela 2-4 e Tabela 2-5 mostram exemplos de indicação de fatores de emissão para dois diferentes tipos de fontes e de abordagem, tratando de resfriadores de clínquer e de limpeza de plantas industriais a seco, respectivamente.

Tabela 2-4 – Fatores de emissão para diferentes poluentes de uma planta de produção de cimento Portland.

Poluente	Tipo de Controle	Fator de Emissão (kg/Mg)		
		Mínimo	Máximo	Média
MP Controlado	Precipitador Eletrostático	0,040	0,055	0,048
MP Controlado	Filtro de mangas	0,012	0,022	0,017
MP Controlado	Ciclone	0,060	0,085	0,070
Ferro Controlado	Filtro de Mangas	-	-	0,014

Fonte: EPA, 1995

Tabela 2-5 – Fatores de emissão de material particulado e específicas classificações para limpeza a seco de plantas industriais.

Operação	Fator de Emissão		
	Kg/ano/(per capita)	g/dia/(per capita)	Classificação
Comercial	0,6	1,9	C
Coin-operated	0,2	0,6	C

Fonte: EPA, 1995

É observado na Tabela 2-4 que o fator de emissão médio para material particulado, incluindo a atuação de precipitador eletrostático é de 0,055 kg/Mg. Para utilização do fator de emissão na formulação descrita anteriormente, deve-se considerar a eficiência básica de um precipitador eletrostático.

Os fatores de emissão podem ser classificado quanto a sua confiabilidade, com base no volume de dados e qualidade das informações empregadas na sua determinação. As classificações de qualidade dos fatores de emissão e respectivas definições segundo a AP-42 estão demonstradas na Tabela 2-6.

Tabela 2-6 – Classificações de qualidade e respectivas definições dos fatores de emissão.

Classificação	Definição
A	Excelente. Fator é desenvolvido segundo metodologia adequada a partir de várias instalações escolhidas aleatoriamente dentre as de mesmas características.
B	Acima da média. Fator desenvolvido segundo metodologia adequada a partir de razoável número de instalações escolhidas aleatoriamente. É suficientemente específico para evitar variabilidade.
C	Média. Pode ter sido desenvolvido segundo metodologia nova ou mesmo não aprovada a partir de número razoável de instalações como base.
D	Abaixo da média. Pode ter sido desenvolvido segundo metodologia nova ou mesmo não aprovada a partir de número baixo de instalações como base.
E	Pobre. Desenvolvido a partir de métodos não aceitáveis, mas que procedem com a ordem de grandeza dos valores corretos. Número baixo de instalações base utilizadas.

Fonte: EPA, 1995

No presente estudo a metodologia de estimativa de emissões revisada acima será empregada na quantificação das emissões provenientes de determinadas fontes, como a determinação da concentração de poluentes necessária no dimensionamento de equipamentos de controle e na comparação com limites estabelecidos de poluição pelo órgão ambiental.

2.3 CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Em um estudo de controle de emissões é essencial o conhecimento de certas características dos particulados, como tamanho das partículas, densidade, corrosividade, reatividade e toxicologia. São também necessárias condições do processo, como vazão de gás, concentração de particulado em arraste, eficiência de remoção requerida e perda de carga

permitida. As características do material particulado em suspensão dependem do tipo de material do qual é desprendido e do processo.

Os diferentes tipos de equipamentos de controle possuem eficiências melhores para tamanhos específicos de particulado em suspensão. Assim, é essencial ter informações sobre a distribuição de tamanhos das partículas para a escolha correta do equipamento a ser utilizado.

Em ambientes industriais é comum e rotineiro a existência de procedimentos operacionais que contribuam com a poluição atmosférica de forma local ou mesmo estendendo-se para limites regionais, fora do sítio industrial e do bairro de localização do empreendimento. Este tipo de poluição pode ser eficientemente controlada pela implementação de sistema de ventilação acrescido de equipamentos de controle, adequados para cada processo industrial. (MACINTYRE, 1990).

A movimentação do ar por meios não naturais constitui-se no principal objetivo dos equipamentos de ventilação, ar condicionado e aquecimento, transmitindo ou absorvendo energia do ambiente, ou mesmo transportando material, atuando num padrão de grande eficiência sempre que utilizados equipamentos adequadamente projetados. A velocidade, a pressão, a temperatura e a umidade envolvem mudanças nas condições ambientais, tornando-as propícias ao bem estar do trabalhador.

O controle adequado da poluição do ar tem início com uma apropriada ventilação das operações e processos industriais (máquinas, tornos, equipamentos, etc.), seguindo-se uma escolha conveniente de um coletor dos poluentes. Entretanto, ao se aplicar a ventilação numa indústria, é preciso verificar antes, as condições das máquinas, equipamentos, bem como o processo existente, a fim de se obter a melhor eficiência na ventilação. A modernização das indústrias, isto é, mecanização ou automação, além de aumentar a produção melhora sensivelmente a higiene do trabalho com relação a poeiras, gases e demais contaminantes.

Por ventilação industrial entende-se o processo de renovação do ar de um recinto com o objetivo fundamental de controlar a pureza e o deslocamento do ar em um ambiente fechado ou mesmo ambientes ao ar livre com substituição local do ar contaminado. Há ainda nesse processo, além da substituição do ar impuro, o controle da temperatura e da umidade do ambiente (MESQUITA et al, 1988). A ventilação industrial possui diferentes formas de atuação. A Figura 2-8 mostra um fluxograma de caracterização da ventilação industrial mostrando as suas variadas formas de atuação.

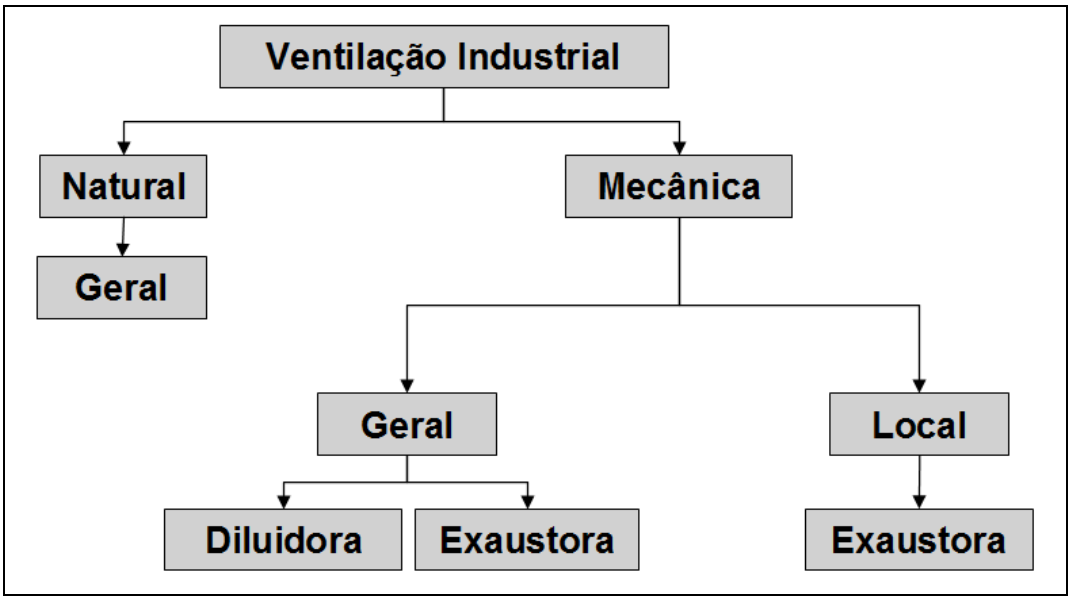


Figura 2-8 – Fluxograma de caracterização das diferentes formas de ventilação industrial

A ventilação natural pode ser ocasionada pela ação dos ventos, que embora intermitente, pode provocar variações horizontais das pressões permitindo a movimentação das massas de ar. Pequenas diferenças de pressão (na ordem de 0,05 mmH_2O) já são suficientes para obtermos correntes de ar satisfatórias, do ponto de vista da ventilação, desde que haja caminho adequado para a sua movimentação. Em muitas situações não são conseguidos resultados satisfatórios somente através da utilização de sistema de ventilação natural. A ventilação natural possui metodologia de aplicação somente da forma geral, como visto na Figura 2-8.

Quando a movimentação do ar de ventilação é obtida por diferenças de pressão criadas mecanicamente, diz-se que a ventilação é artificial, forçada ou mecânica. Adota-se a ventilação mecânica sempre que os meios naturais não proporcionam o índice de renovação do ar desejado, ou ainda, como elemento de segurança quando do funcionamento precário da circulação natural do ar. A ventilação mecânica, diferentemente da natural, pode ser geral ou local. Neste contexto, a ventilação local atua capturando os poluentes junto à fonte que os produz, por meio de uma corrente de ar com velocidade adequada, criada por meio de dispositivos especiais. A ventilação geral tem por objetivo a ventilação do ambiente como um todo, podendo ser realizada de forma natural ou mecânica.

Na ventilação mecânica do tipo geral diluidora, o ar exterior de ventilação é misturado com o ar viciado do ambiente. Consegue-se com isso uma diluição dos contaminantes até limites admissíveis. Em ambientes como auditórios e lojas faz-se o uso de insuflamentos, mas quando a contaminação do ambiente é elevada, torna-se preferível o processo de exaustão geral. Quando se deseja obter a retirada do contaminante, por ser este de grande toxicidade, do ambiente usa-se o processo de insuflamento e exaustão combinados.

Em muitas unidades industriais há a geração de poluentes, por vezes de grande toxicidade ou mesmo gerado em grandes áreas abertas. Assim não é possível a atuação de insuflamento ou quaisquer tipos de ventilação geral. Para tais casos é mais recomendada a ventilação local exaustora, caracterizada como a operação que extrai o contaminante mecanicamente no próprio local em que ele é produzido, anteriormente a se espalhar pelo ambiente.

De forma indireta, a ventilação local exaustora também influencia no bem-estar, na eficiência e na segurança do trabalhador, por exemplo, retirando do ambiente uma parcela do calor liberado por fontes quentes que eventualmente existam. Também no que se refere ao controle da poluição do ar do meio ambiente, a ventilação local exaustora tem papel importante. A fim de que os poluentes emitidos por uma fonte possam ser tratados em um equipamento de controle de poluentes (filtros, lavadoras, etc.), eles têm de ser captados e conduzidos a esses equipamentos, e isso, em um grande número dos casos, é realizado por esse sistema de ventilação descrito. O presente trabalho será então focado no dimensionamento de estruturas de ventilação local exaustora.

Uma instalação de ventilação local exaustora possui usualmente as seguintes partes:

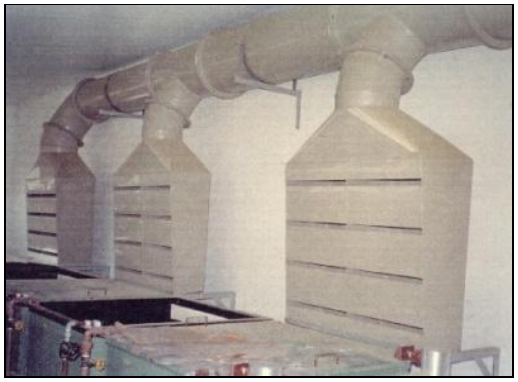
- Captor: dispositivo de captura do ar contaminado;
- Ventilador: produz a rarefação do ar causando o deslocamento do ar do captor até a entrada do ventilador;
- Rede de Dutos: conduzem o ar contaminado do ponto de captura ao ventilador e deste ao exterior ou equipamentos de controle;
- Equipamentos de Controle: retém as partículas ou dissolvem as partículas impedindo que sejam lançados livremente na atmosfera.

2.3.1 Captores

O dimensionamento de captores requer conhecimento adequado do processo produtivo de forma a proceder com a instalação de equipamentos que necessitem de mínimos volumes de exaustão para um controle eficiente dos contaminantes. O controle efetivo de contaminantes de um processo produtivo é realizado inicialmente pela eliminação e minimização de todo o movimento de ar pelo processo e pela captura do ar contaminado por processo de exaustão. O fluxo de sucção deve ser suficientemente alto para manter a velocidade de captura necessária e para evitar correntes de ar opostas. (MACINTYRE, 1990)

A forma do captor, seu tamanho, localização e vazão são importantes considerações do dimensionamento do equipamento. O captor a ser dimensionado deve enclausurar a operação o máximo possível. Se não for possível o enclausuramento da fonte, o captor deve ser alocado o mais próximo possível da fonte e possuir forma que possibilite maior eficiência no controle

dos contaminantes (COSTA[1], 2005). A Figura 2-9 mostra dois exemplos de formas de captores.



(a)

(b)

Figura 2-9 – Forma de captor de sistemas de ventilação industrial. (a) captor de fendas; (b) boca de jacaré.

Fonte: www.logismarket.ind.br. Acesso em 05 de julho de 2009.

São variadas as formas de captor existentes, entre as quais: cabines, enclausuramento, coberturas, aberturas e fendas flangeadas e não flangeadas. O captor é uma peça ou dispositivo no qual, pela diferença de pressões entre o ar ambiente e o existente no captor, estabelece-se uma corrente para o interior do mesmo. A corrente gasosa prossegue pelos dutos até o ventilador. Portanto para que haja velocidade de escoamento, é necessário que no interior do captor exista uma certa rarefação, isto é, vácuo parcial ou depressão.

A maior parte dos captores, entretanto, é constituída por recintos ou simples caixas (campânulas) que envolvem o equipamento, mantendo apenas uma abertura para a captação (boca), por onde entra o ar ambiente. São usados em instalações de contaminantes de moinhos, peneiras, fornalhas, fornos, secadores, dosadores de pó, misturadores, ensacadores, limpadores, jatos de areia, solda, cepilhadeiras, aplainadeiras, lixadeiras, correias transportadoras, dentre outros (COSTA[1], 2005).

Esses captores são projetados especificamente para cada tipo de máquina, de modo que, com uma abertura mínima para a operação, todo o equipamento fique protegido contra a saída de partículas ou outros elementos contaminantes, de uma maneira geral.

Para determinarmos valores de vazão de captores enclausurantes, devem-se determinar a área e velocidade de captura aplicando a expressão a seguir:

$$Q = v_c . A \tag{2.2}$$

onde, Q é a vazão de exaustão, [m^3/s], v_c é a velocidade de captura, [m/s] e A é o somatório das áreas abertas e de frestas do captor, [m^2].
Como definido anteriormente, este tipo de exaustão, pretende impedir que os poluentes emitidos pela fonte atinjam o ambiente saindo pelas frestas existentes no captor. Dessa forma, se for mantida, dentro de captor, uma pressão inferior à atmosférica, o ar do ambiente deverá entrar por essas frestas, o que nos garantirá não estar ocorrendo escape de poluentes.

Para os captores enclausurantes considera-se como a área aberta total, necessária à aplicação da Equação 2.2, o somatório das áreas de frestas e aberturas existentes. As dimensões das áreas abertas são projetadas e conhecidas na fase de projeto conceitual do sistema. Uma vez obtendo-se o valor da área aberta do captor, necessitamos conhecer qual o valor da velocidade do ar na região da fonte poluidora. Valores de velocidade do ar na faixa de 0,40 a 1,00 m/s são recomendadas para esse tipo de captor. (COSTA[1], 2005)

Para o prosseguimento do dimensionamento do captor devem ser definidos a forma, dimensões e posição do captor em relação à fonte poluidora. Para variados tipos de fontes poluidoras existem configurações prontas sob formas básicas de captores, estas provenientes de anteriores experiências com o mesmo tipo de operação.

Velocidade de captura é a velocidade em cada ponto na parte posterior ao captor necessária a superar correntes opostas de ar e capturar o ar contaminado por meio da sucção para o interior do exaustor. O valor da velocidade de captura é função inicialmente da condição de dispersão do contaminante devido ao processo produtivo a que é submetido (ACGIH, 1980).

A velocidade de captura depende do peso específico real, das dimensões e das condições de geração do contaminante, que determinam para este um deslocamento inicial que pode dificultar ou mesmo facilitar sua captura. Tem-se, portanto, que a determinação da velocidade de captura leva em conta principalmente a movimentação inicial das partículas ou o deslocamento do ar no ambiente de captação. Quando é possível o enclausuramento da fonte, ou seja, quando o captor envolve completamente o equipamento gerador de particulado, a velocidade de captura será o valor que impeça suficientemente a fuga destes contaminantes pelas aberturas do captor, sejam elas frestas ou pequenas aberturas indispensáveis para a operação do sistema.

Existem diversas recomendações sobre qual metodologia adotar e qual o valor necessário para a velocidade de captura. As faixas de velocidades de captura são recomendadas em função das condições operacionais de geração do contaminante e em função da operação específica em que se procedem as emissões. A Tabela 2-7 mostra as faixas de velocidades de captura em

função das condições de geração desde a condição de velocidade inicial nula no ar parado até o caso onde há geração com grande força.

Tabela 2-7 – Faixas de velocidade de captura em função das condições de geração.

Condição de Geração	Exemplos de Operação	*v* [m/s]
Sem velocidade inicial no ar parado	Evaporação de tanques, soldas, desengraxamento, eletrodeposição.	0,25 a 0,50
Geração no interior de cabines	Velocidade na abertura da cabine.	0,25 a 1,00
Geração com velocidade inicial baixa	Cabines de pintura, misturadores, enchimento de barris, transferência de transporte (< 1,0 m/s), pesagens e embalagens.	0,50 a 1,00
Geração ativa	Britadores, peneiras, limpeza de peças por trepidação, transferência de transporte (> 1,0 m/s).	1,00 a 2,50
Geração com grande força	Esmerilhamento, jatos abrasivos.	2,50 a 10,00

Fonte: Costa[1], 2005

Considerando a operação específica que se está analisando pode-se consultar a Tabela 2-8 como fonte de recomendações para o valor da velocidade de captura. Por meio da tabela referenciada a operação é relacionada a uma faixa ou valor de velocidade de captura com observações acerca da localização de atuação desta. Por exemplo, na operação denominada silo de funil a velocidade recomendada de 0,75 a 1,00 m/s, no cálculo da vazão de captura, deve ser aplicada na face da coifa.

Tabela 2-8 – Faixas de velocidade de captura em função da operação praticada.

Operação	*v* [m/s]	Observações
Jatos abrasivos	2,5	Em cabines (envolv. total)
	0,3 a 0,5	Em salas (fluxo descendente)
Solda Elétrica	0,5 a 1,0	No ponto de operação
Silo de Funil	0,75 a 1,25	Face da coifa
Transferência de Correias Transportadoras	0,75 a 1,00	Face da coifa
Limpeza de Fundição	1,0	Face do envoltório
Elevadores de Grãos	2,5	Face da coifa
Corte manual de granito	1,0	No ponto de operação
Esmerilhamento	1,0 a 2,0	Grelha de fluxo descendente
Solda de prata	0,5	Face da coifa
Fusão de Quartzo	0,75 a 1,00	Face da cabine

Fonte: Costa[1], 2005

Para cada categoria de condição de geração e operação uma faixa de velocidades de captura é mostrada. A escolha adequada dos valores depende basicamente de alguns fatores conforme mostrado na Tabela 2-9.

Tabela 2-9 – Escolha da região da faixa de velocidades mais apropriada de acordo com as características do ambiente, contaminante e produção.

Valor Mínimo da Faixa	Valor Máximo da Faixa
Correntes de ar mínimas no ambiente ou favoráveis para a captura.	Correntes de ar perturbam a captura no ambiente.
Contaminantes com baixa toxicidade.	Contaminantes com alta toxicidade.
Baixa produção, pouco tempo de funcionamento.	Alta produção, uso elevado.
Captor de grande porte – grandes quantidades de ar em movimento.	Captor de pequeno porte – somente controle local.

Fonte:ACGIH, 1985

A vazão de ar a ser captada para o interior de um captor deve ser tal que garanta que todos os poluentes gerados pela fonte sejam capturados. Tal vazão, no entanto, não deve prejudicar o processamento industrial como no caso de haver arraste de produto ou matéria-prima juntamente com a corrente de ar exaurido. Quanto maior a vazão exaurida, maior o custo do sistema de ventilação local exaustora. O que devemos determinar, portanto, é qual a mínima vazão de exaustão que nos permita uma eficiente captura dos poluentes emitidos.

Geralmente, os requisitos determinadores de vazão são resolvidos de acordo com os requisitos de velocidade dos gases ou do ar nos pontos de geração de poluentes e da área aberta determinada pela forma do captor e sua posição relativa à fonte. Descrevendo de outra maneira, o captor deverá aspirar uma vazão tal que induza em todos os pontos de geração dos contaminantes uma velocidade maior que a velocidade do ar no ambiente, e obviamente dirigida para o captor.

Quando um sistema de ventilação local está sendo dimensionado deve ser prevista a quantidade de energia necessária para executar todo o trabalho. Esta energia está diretamente associada a diversos fatores técnicos do sistema, tais como: a vazão de exaustão, velocidade do ar nos dutos, perda de carga na entrada do captor, perda de carga distribuída ao longo do captor e perda de carga localizada em órgãos acessórios às tubulações principais (curvas, cotovelos, flanges, expansões, contrações, etc.).

Quando ar flui para dentro do sistema de captura, mais especificamente para dentro do captor, o fluxo de ar adquire uma configuração como apresentada na Figura 2-10. Tal configuração denominada *vena contracta* significa a máxima convergência das linhas de fluxo de ar.

Ocorre juntamente com esta estrutura a conversão de pressões, dinâmica e estática, acarretando perda de energia.

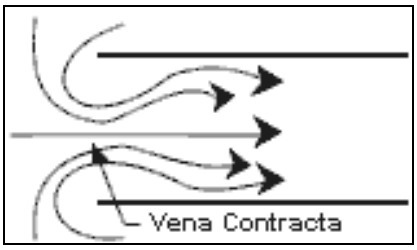


Figura 2-10 - Configuração do escoamento ao entrar no captor, denominada *vena contracta*

Fonte: Mesquita et al., 1988

A perda de carga devido a transformação de pressão resulta em uma diminuição da vazão que entra no duto, quando comparada com a vazão que entraria se não houvesse essas perdas. Essa queda no valor da vazão é indicada pelo coeficiente de entrada (Ce) que representa a razão entre a vazão real e a vazão ideal que seria obtida se a transformação de pressão estática em dinâmica não acarretasse perdas. A Equação 2.3 demonstra essa relação e ainda demonstra outra relação entre o coeficiente e pressões dinâmica e estática.

$$C_e = \frac{vazãoreal}{vazãoteórica} = \sqrt{\frac{h_v \gamma}{(p_e)}} \tag{2.3}$$

onde, h_v é a pressão dinâmica no duto, [Pa]; γ é o peso específico do fluido [N/m³] e p_e é a pressão estática no duto, [Pa].

A perda de carga na entrada do captor é denominada Δp. A pressão estática (em valor absoluto) é a soma da pressão dinâmica com a perda de carga descrita acima. Assim, a energia de pressão se transforma em pressão dinâmica e em pressão para vencer as perdas de carga. A Equação 2.4 mostrada abaixo insere a perda de carga Δp na relação com as pressões estática e dinâmica:

$$p_e = h_v \gamma + \Delta p \tag{2.4}$$

Aplicando a Equação 2.4 na Equação 2.5 temos a seguinte seqüência de substituições até a determinação da forma final, descrita na Equação 2.6, da perda de carga na entrada do captor.

$$C_e = \sqrt{\frac{h_v}{h_v + \Delta p}} \tag{2.5}$$

$$\Delta p = \frac{h_v}{C_e^{\,2}} - h_v = \frac{(1 - C_e^2)}{C_e^2}.h_v = F.h_v \tag{2.6}$$

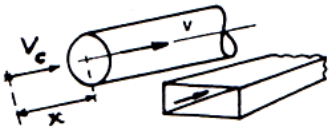
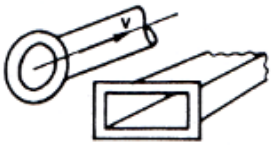
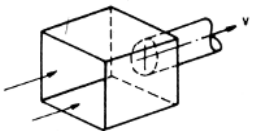
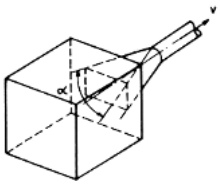
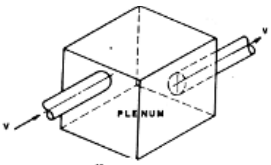
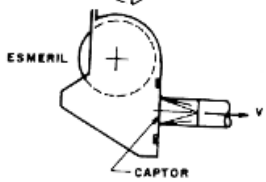
onde F é o fator de perda de carga.

A pressão dinâmica no duto é dada pela Equação 2.7:

$$h_v = \frac{v^2}{2g}\gamma \tag{2.7}$$

onde, h_v é a pressão dinâmica no duto, [Pa]; v é a velocidade do ar no duto, [m/s]; g é a aceleração da gravidade, [m/s^2] e γ é o peso específico do ar no duto, [N/m^3].

Tabela 2-10 – Valores do coeficiente de entrada e coeficiente de perda de carga para as diferentes formas de entrada de captores.

Entradas de Captores	Coeficiente de Entrada C_e		Coeficiente de Perda de Carga F	
	0,93		0,72	
	0,49		0,82	
	0,82		0,50	
	Ângulo α	C_e	Ângulo α	F
	15º	0,93	15º	0,25
	30º	0,96	30º	0,16
	45º	0,97	45º	0,15
	60º	0,96	60º	0,17
	90º	0,93	90º	0,25
	0,63		1,5	
	0,78		0,65	

Fonte: Macintyre, 1988

2.3.2 Sistema de Dutos

As canalizações dos sistemas de ventilação local exaustora devem, sempre que possível, ter seção circular, para evitar arestas ou zonas de velocidade reduzida, que possibilitam a estagnação dos contaminantes. O material dos dutos usualmente é a chapa de aço preta, soldada, ou chapa de aço galvanizada, rebitada, quando se trata de trabalho sob temperaturas inferiores a 200 ºC. Torna-se importante que os materiais apresentem boa estanqueidade quanto à entrada de impurezas e tenham resistência mecânica e durabilidade. As bitolas adotadas para o caso de contaminantes não corrosivos são selecionadas de acordo com o diâmetro da canalização e a classificação dos serviços. Curvas, ângulos, junções e captores devem ser produzidas com chapa de bitola dois pontos mais espessa que a do duto correspondente.

A velocidade do ar nas canalizações de ventilação local exaustora deve possuir magnitude suficiente para transportar as partículas dos contaminantes e para mantê-las em suspensão. Define-se como velocidade do material (v_m) a velocidade necessária para movê-lo ao longo das canalizações e velocidade de flutuação (v_f) a velocidade suficiente para posicionar as partículas em suspensão. A velocidade de flutuação depende do peso específico do material e de sua granulometria (diâmetro médio das partículas). O cálculo da velocidade de flutuação é dado pela relação de equilíbrio entre o peso do material e a resistência oposta ao deslocamento do ar.

A velocidade do material será dependente do peso específico real deste e está normalmente na faixa entre 10 e 25 m/s. Na prática, é preferível selecionar diretamente velocidades únicas e globais, que venham a garantir simultaneamente a flutuação e o transporte adequado das partículas. A Tabela 2-11 mostra algumas recomendações para a velocidade do ar em canalizações para diferentes tipos de material segundo a ASHRAE.

Tabela 2-11 – Velocidade do ar em canalizações segundo a ASHRAE.

Material	v (m/s)
Vapores, gases, fumos, poeiras muito finas (< 0,5 μm)	10,0
Poeiras secas finas	15,0
Poeiras industriais médias	17,5
Partículas grossas	17,5 a 22,5
Partículas grandes, material úmido	> 22,5

Fonte: Costa[1], 2005

A teoria de determinação da perda de carga em trechos retos de tubulações está relacionada com o balanço de forças dentro destas devido ao movimento do ar contaminado. Em trechos retos de tubulações com diâmetro constante tem-se a perda de carga distribuída. A perda de

carga em órgãos acessórios como junções, curvas e expansões é denominada de perda de carga localizada. A Equação 2.8 mostra a determinação da perda de carga total a partir do cálculo das perdas de carga distribuída e localizada.

$$\Delta P = \Delta P_{DISTRIBUIDA} + \Delta P_{LOCALIZADA} \tag{2.8}$$

Nos trechos retos de tubulações, há queda de pressão estática entre dois pontos devido ao atrito em suas paredes. A força resultante entre dois pontos de fluido devido a perda de pressão estática está demonstrada na Equação 2.9.

$$F_R = (p_{e1} - p_{e2})A \tag{2.9}$$

onde F_R é a força resultante, [N]; p_{e1} e p_{e2} são as pressões estáticas em pontos distintos da tubulação, [Pa] e A é a área da seção reta da tubulação, [m²].

A força de atrito deve ser balanceada com a força resultante descrita anteriormente. Tal força é considerada homogênea por toda a tubulação e possui a seguinte forma conforme a Equação 2.10:

$$F_A = kPL\rho\frac{v^2}{2g} \tag{2.10}$$

onde, F_A é a força de atrito, [N]; k é coeficiente de rugosidade do duto; P e L são o perímetro e comprimento da tubulação respectivamente, [m]; ρ é a massa específica do fluido, [kg/m³], v é a velocidade do ar, [m/s] e g é a gravidade, [m/s²].

Na Equação 2.11 está representada a relação de igualdade entre as forças mencionadas, e uma relação intermediária, dada pela Equação 2.12. Nesta relação a variável D representa o diâmetro do duto.

$$F_R = F_A \tag{2.11}$$

$$\frac{(p_{e1} - p_{e2})}{L} = \frac{k4\rho v^2}{D2g} \tag{2.12}$$

Definindo o coeficiente de atrito como $f = 4k$, sendo Δp a perda de carga no trecho reto, e D o diâmetro da tubulação, expressando a velocidade v em m/s, e substituindo o valor da aceleração da gravidade,

$$\Delta p_r = f \frac{L}{D} \rho \left[\frac{v}{1096{,}5} \right]^2 \tag{2.13}$$

Para efeito do dimensionamento dos sistemas de ventilação a Equação 2.13 pode ser tabelada e plotada para condições normais. Em tais gráficos são fornecidos os valores de perda de carga a cada metro de tubulação (perda de carga linear) para dutos redondos comercialmente disponíveis. O Anexo 1 mostra os diagramas de cálculo da perda de carga em função da vazão, velocidade e diâmetro do duto, plotados a partir da Equação 2.13.

Observando o ábaco exposto no Anexo 1 tem-se, para um caso genérico, uma vazão de ar contaminado de 3,0 m³/s admitindo-se uma velocidade nos dutos de 24,0 m/s. Seguindo as curvas do gráfico encontra-se a determinação de um diâmetro para as tubulações de 400 mm e conseqüentemente a perda de carga linear de 1,5 mmH_2O/m.

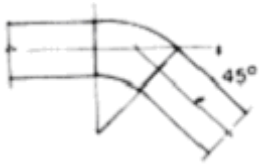
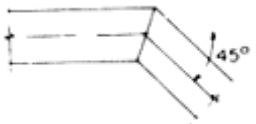
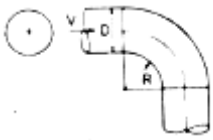
As definições apresentadas anteriormente estão relacionadas à perda de carga distribuída ao longo de trechos retos de tubulações. Deve-se ainda considerar contribuições importantes de perda de carga, estas devidas às peças especiais que compõem o sistema de dutos. Estas peças contribuem para aumentar a perda de carga do sistema, em razão do atrito, das turbulências e das variações de velocidade que provocam.

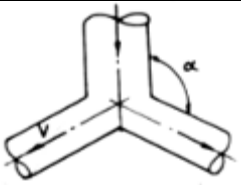
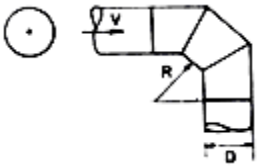
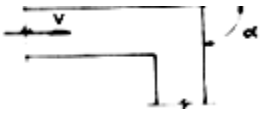
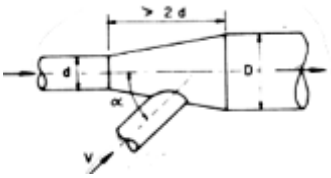
As principais peças especiais nas tubulações são: bocas de captação ou tomadas de ar, bocas de saída, grelha de insuflamento sem registros ou com registros de regulagem de vazão, curvas e cotovelos, alargamentos graduais ou expansões, reduções e filtros. Na prática da ventilação industrial é o mais usual a determinação individual das perdas de carga correspondente a cada peça, em unidades de mmH_2O ou mH_2O. As perdas de carga localizadas (valor de Δp fornecido pela Equação 2.15) são calculadas diretamente com o produto dos seguintes fatores: K que é a constante de perda de carga tabelada para peça e h_v, a pressão dinâmica dada pela Equação 2.14 abaixo. O valor de v deve ser utilizado em m/s sendo os resultados, expressos em Pa nas unidades do SI. Os valores de pressão dinâmica e perda de carga são mais usualmente expressos em mmH_2O ou mH_2O. A transformação da Equação 2.14 está considerando transformação de unidades e a densidade da água e ar.

$$h_v = \frac{\rho v^2}{2}[Pa] = \frac{v^2}{16{,}34}[mmH_2O] \tag{2.14}$$

$$\Delta p = K.h_v \tag{2.15}$$

Os diagramas mostrados na Figura 2-11 mostram os valores de K para as principais estruturas especiais presentes nos sistemas de tubulações.

Acessório	K
	0,10
	0,50
	0,25

Acessório	K
	
	
	
	

α	Circ.	Retang.
90º	1,0	1,5
135º	0,6	0,9

R/D	K (3 peças)	K (5 peças)
0,25	0,8	0,5
0,50	0,4	0,3
1,00	0,3	0,2

α	Circ.	Retang.
90º	0,85	1,25
60º	0,65	0,95
45º	0,44	0,63
30º	0,22	0,30

α	K
15º	0,09
20º	0,12
30º	0,18
45º	0,28
50º	0,32
60º	0,44
90º	1,00

Figura 2-11 – Peças acessórias e respectivos coeficientes de perda de carga
Fonte: Macintyre, 1988

2.3.3 Ventiladores

Conforme citado anteriormente, as instalações de ventilação por insuflamento ou por exaustão de ar necessitam de ventiladores como objeto específico para criar o gradiente energético que permite o necessário escoamento do ar. A função básica de um ventilador é mover uma dada quantidade de ar (por vezes, ar mais poluentes) por um sistema de ventilação em que ele está ligado e é peça fundamental.

O objetivo geral deste equipamento é gerar condições de pressão estática em valores suficientes para vencer todas as perdas de carga do sistema e uma pressão dinâmica para manter o ar em movimento. Ao entrar em movimento, o ar nele contido é centrifugado, recebendo um incremento de energia, sendo o vazio criado no ventilador preenchido com novo ar, pela ação da pressão atmosférica, a uma velocidade suficiente para repor a quantidade que foi descarregada.

Existem vários critérios segundo os quais se podem classificar os ventiladores. A seguir serão mencionados os critérios mais usuais, segundo:

- o nível energético que estabelecem: baixa pressão (até 200 mmH_2O), média pressão (entre 200 e 800 mmH_2O), alta pressão (entre 800 a 2500 mmH_2O), altíssima pressão (entre 2500 a 10000 mmH_2O);
- a modalidade construtiva: centrífugos, helicoidais e axiais;
- a forma das pás: radiais retas, inclinadas para trás, inclinadas para frentes, curvas de saída lateral;
- o número de entradas de aspiração no rotor: simples aspiração e dupla aspiração;
- o número de rotores: de simples estágio (um rotor) e de duplo estágio (dois rotores).

Os ventiladores centrífugos de pás são considerados os mais interessantes para os sistemas de ventilação local exaustora. (MACINTYRE, 1987) O ventilador centrífugo de pás para frente tem eficiência mais elevada, maior capacidade exaustora a baixas velocidades, mas não é adequado para trabalhos de alta pressão. Não é adequado para altas cargas de poeira, apresentando problemas freqüentes de corrosão. O ventilador centrífugo de pás para trás possui duas importantes vantagens, a citar, maior eficiência e autolimitação da potência significando que o motor não será sobre carregado. A Figura 2-12 mostra alguns exemplos de modelos de ventiladores.

Figura 2-12 – Modelos de ventiladores de sistemas de ventilação
Fonte: Bernauer, 2009

Quando se representam as parcelas de energia que a unidade de peso de um fluido possui, para deslocarem-se entre dois determinados pontos, expressas em altura de coluna de líquido de peso específico γ, elas se denominam alturas de elevação. A altura de elevação representa, então, o desnível energético entre dois pontos, e este desnível pode ser de pressão, de energia cinética ou de ambos, conforme o caso considerado.

Para a determinação da potência útil (analisada posteriormente) do ventilador utiliza-se o conceito de altura útil de elevação que é a energia total ganha pelo fluido em sua passagem pelo ventilador. Para tal, esta altura útil refere-se às perdas de carga existentes ao longo de todo o sistema anterior a localização do ventilador. O trabalho efetuado ou a energia cedida para efetuar trabalho na unidade de tempo constitui a potência. Portanto, a cada altura de elevação corresponde a uma potência com a mesma designação. A potência útil, então, é a potência ganha pelo fluido em sua passagem pelo ventilador. Quando se menciona potência do ventilador nos catálogos faz-se referência a potência útil. A Equação 2.16 mostra como é determinado o valor da potência útil a partir do cálculo da altura útil segundo Macintyre (1990).

$$N_u = \frac{\gamma . Q . H_u}{\eta} \tag{2.16}$$

onde, N_u a potência útil, [kW]; γ o peso específico do fluido, [N/m^3]; Q a vazão que passa pelo ventilador, [m^3/s]; H_u a altura útil de elevação do sistema, [mH_2O] e η o rendimento do ventilador.

A presença de partículas no ar que passa pelos ventiladores diminui o seu rendimento ocasionando conseqüentemente o aumento da potência requerida.

2.3.4 Equipamentos de Controle da Poluição Atmosférica

Existem vários equipamentos de controle da poluição do ar, que visam à retirada de poluentes específicos. As diferentes classes de equipamento de controle de particulado incluem separadores mecânicos, como ciclones e coletores gravitacionais, filtros de manga, precipitadores eletrostáticos, e lavadores de gás. Cada tipo de equipamento utiliza mecanismos diferenciados para a coleta dos poluentes.

Os coletores gravitacionais consistem em câmaras onde o gás nele circulando perde velocidade e capacidade de arrasto das partículas, permitindo que estas se depositem por gravidade. Os ciclones removem partículas promovendo uma circulação em espiral do gás afluente dentro de um tubo, e usando a força centrífuga para que as partículas maiores sejam deslocadas tangencialmente para as extremidades e colidam com as paredes do tubo, caindo até a base do ciclone, de onde são retiradas. O gás limpo escapa pela parte superior do equipamento.

Nos filtros de manga, o ar carregado de partículas é obrigado a atravessar por um tecido poroso (mangas), onde as partículas ficam retidas, passando o ar limpo. periodicamente o particulado retido é removido através de vibração mecânica das mangas, ou por passagem reversa de ar.

Os precipitadores eletrostáticos aplicam força elétrica para separar partículas do gás afluente. O ar e as partículas passam entre placas onde se estabelece um campo eletrostático. As partículas recebem carga elétrica por uma descarga induzida e são atraídas e coletadas por uma placa de carga oposta, enquanto o ar limpo passa pelo equipamento. Periodicamente as placas são limpas por um pulso vibratório da placa que retira a camada de particulado. O particulado é coletado por um silo no fundo do equipamento.

Outro equipamento utilizado é o lavador de gás, que emprega os princípios da impactação e intercepção de partículas de poeira por gotículas de água. As partículas de água, maiores e mais pesadas, são facilmente separadas do ar por gravidade, carregando as partículas.

Para a escolha do equipamento deve-se levar em conta o tipo de particulado e de gás, e também os custos e eficiência de cada coletor para o dado problema. Além disso, devem ser analisados os benefícios propiciados, muitas vezes exigidos pela lei.

Neste estudo, será abordada a utilização dos equipamentos ciclone e filtro de manga aplicados no despoeiramento nas etapas finais da produção de cimento Portland. Nas seções seguintes será apresentado com mais detalhes o princípio de funcionamento destes equipamentos e discutidos alguns parâmetros de projeto para cada um.

2.3.4.1 Ciclones

Os ciclones são equipamentos muito utilizados em processos químicos e industriais, como em refinarias, processamento de alimentos. Devido ao seu design, as partículas são separadas do ar fazendo-se uso da força centrífuga (ação do campo centrífugo) e gravitacional. Um ciclone é constituído por uma região cilíndrica acoplada a uma seção cônica. (SCHENELLE; BROWN, 2002)

O ar carregado de partículas entra tangencialmente no corpo do ciclone pela parte superior e, devido ao seu formato cilíndrico, é forçado a descender em forma de espiral. Devido à inércia, as partículas tendem a se deslocar tangencialmente, colidindo com a parede do ciclone, e então caem através da superfície até a base, onde são coletadas. Próximo a base do ciclone, o fluxo descendente de ar se reverte para uma ascensão em um espiral menor, através de um tubo localizado na parte central. Assim, o ar limpo sai do equipamento pela parte superior. Um esquema representativo do fluxo de ar dentro do corpo do ciclone é mostrado na Figura 2-13.

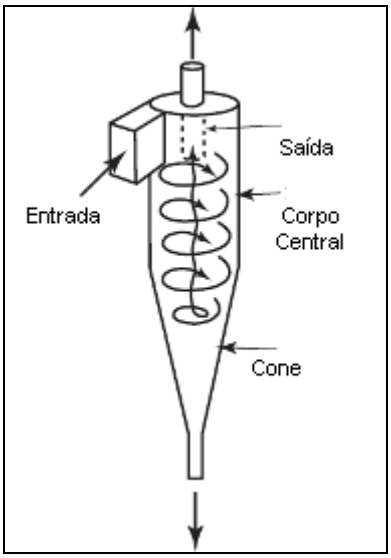


Figura 2-13 – Esquema do fluxo de gás dentro de um ciclone padrão.
Fonte: Schenelle e Brown, 2002

Entre as vantagens da implantação de ciclones estão: reduzido custo inicial do investimento e baixos custos e esforços para manutenção, não sendo necessárias manutenções constantes. Além disso, os ciclones podem ser utilizados em condições severas de operação e requerem pouco espaço para instalação. Entre as desvantagens estão a baixa eficiência de coleta, se comparado com outros equipamentos, e maior perda de carga. (COOPER; ALLEY, 2002)

Quando comparados a outros equipamentos de controle, os ciclones apresentam menor eficiência de limpeza, não sendo indicados em casos onde é necessária uma redução rigorosa dos níveis de poluentes. Nestes casos possuem aplicação como pré-tratadores, instalados em

série com equipamentos mais eficientes. Como pré-tratador, o ciclone diminui a concentração de particulado encaminhada para os equipamentos seguintes, podendo gerar economia, devido ao seu baixo custo de investimento e manutenção. (COOPER; ALLEY, 2002)

A eficiência dos ciclones varia significativamente de acordo com as dimensões do material particulado. Quanto maior o diâmetro da partícula, maior a ação das forças de corpo atuantes (força centrífuga e de gravidade), e assim, maior a eficiência de coleta.

O design do projeto dos ciclones também influencia significativamente a eficiência dos ciclones. Com melhorias no projeto pode-se alcançar, em certas situações, uma eficiência de 90% para partículas maiores que 10 μm, e de até 99% de eficiência para partículas maiores que 5 μm (COOPER; ALLEY, 2002).

Com relação a eficiência, os ciclones podem ser classificados como de alta eficiência, convencional e de baixa eficiência. Em geral, o aumento da eficiência acarreta aumento dos custos de operação, primeiramente devido ao aumento da perda de carga. Curvas médias de eficiência em função do tamanho característico do particulado, para os três tipos de ciclone são apresentadas na Figura 2-14.

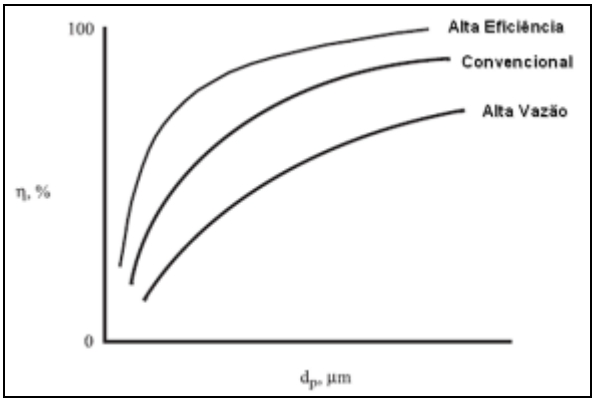


Figura 2-14 – Relação entre eficiência de coleta e tamanho da partícula para ciclones padrões de alta, média e baixa eficiência.
Fonte: Schenelle e Brown, 2002

Shepherd e Lapple (1939, 1940), apud Cooper e Alley (2002), desenvolveram empiricamente designes padrões de ciclones relacionando os parâmetros geométricos do equipamento com o diâmetro do corpo principal. As geometrias desenvolvidas são utilizadas usualmente para o dimensionamento de ciclones. A Tabela 2-12 apresenta as relações dos ciclones padrões desenvolvidas por Shepherd e Lapple, para ciclones de alta, moderada e baixa e eficiência, e a Figura 2-15 apresenta as dimensões do ciclone em que se baseia as relações.

Tabela 2-12 – Relação de dimensões de padrões de ciclones

	Ciclones Padrões					
Dimensões	**Alta Eficiência**		**Convencional**		**Baixa Eficiência**	
D/D	1	1	1	1	1	1
H/D	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
W/D	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
De/D	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
S/D	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Lb/D	1.5	1.4	2	1.75	1.5	1.7
Lc/D	2.5	2.5	2	2	2.5	2
Dd/D	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

Fonte: Cooper e Alley, 2002

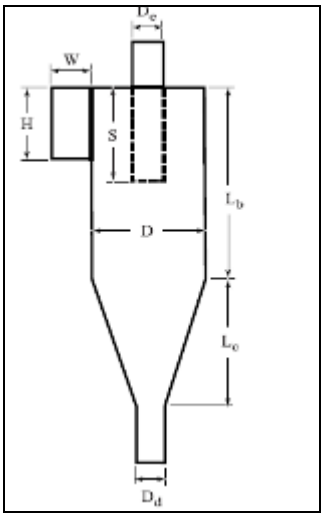


Figura 2-15 – Dimensões padrões para ciclones.
Fonte: Schenelle e Brown, 2002

A eficiência de coleta do ciclone pode ser dada por um modelo numérico que considera o efeito da geometria e design adotados. Este modelo utiliza o conceito de número efetivo de revoluções N_e, que está relacionado com o tempo de residência das partículas no ciclone. O número N_e é obtido aproximadamente pela Equação 2.17.

$$N_e = \frac{1}{H}\left[L_b + \frac{L_c}{2}\right] \tag{2.17}$$

onde, N_e é o número de voltas efetivas, H é a altura do duto de entrada do ciclone, [m]; L_b é o comprimento do corpo do ciclone, [m] e L_c é o comprimento (vertical) do cone do ciclone [m].

Para serem coletadas, as partículas devem se chocar contra a parede dentro do espaço de tempo em que o gás se desloca no vórtice externo. O tempo de residência do gás no vórtice externo é calculado pela Equação 2.18.

$$\Delta t = 2\pi R N_e / V_i \tag{2.18}$$

onde, Δt é o tempo de residência do gás [s], R é o raio do corpo do ciclone [m] e V_i é a velocidade de entrada do gás [m/s].

A distância radial máxima trafegada por qualquer partícula é igual ao próprio comprimento do duto de entrada (W [m]). É assumido que a força centrífuga acelera rapidamente a partícula até sua velocidade terminal na direção radial. A velocidade terminal é alcançada quando a força de arraste se iguala à força centrífuga. Assim, a velocidade terminal que permitirá as partículas serem coletadas no tempo Δt é de:

$$V_t = W / \Delta t \tag{2.19}$$

onde V_t é a velocidade terminal da partícula na direção radial [m/s].

Assumindo regime de escoamento de Stokes e as partículas esféricas, podemos obter a velocidade terminal da partícula, em função do seu tamanho, através da Equação 2.20.

$$V_t = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g) V_i^2}{18 \mu R} \tag{2.20}$$

onde, V_t é a velocidade terminal [m/s]; d_p é o diâmetro da partícula [m]; ρ_p é a massa específica da partícula [kg/m³]; μ é a viscosidade do gás [$\frac{N}{m^3} s$] e ρ_g é a massa específica do gás [kg/m³].

Substituindo a Equação 2.18 na Equação 2.19 elimina-se a variável Δt. Assim, igualando a Equação 2.19 e a Equação 2.20 de forma a eliminar V_t, rearranjando as variáveis, obtém-se:

$$d_p = \left[\frac{9 \mu W}{\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)} \right]^{1/2} \tag{2.21}$$

Teoricamente, d_p é o tamanho da menor partícula a ser coletada [m]. Infere-se que todas as partículas maiores ou de igual tamanho que d_p são coletadas com 100% de eficiência.

Pela Equação 2.21 observa-se que, em teoria, o menor diâmetro das partículas coletadas com 100% de eficiência é diretamente relacionado com a viscosidade do gás e o comprimento do duto de entrada, e inversamente proporcional ao número de voltas efetivas, à velocidade de entrada do gás, e à diferença entre a massa específica das partículas e do gás.

A eficiência de coleta depende dos parâmetros citados, entretanto, o modelo proposto pela Equação 2.21 considera que todas as partículas de diâmetro superior a d_p é coletado com a eficiência de 100%, o que não é correto. Na prática, cada faixa de partícula é coletada com uma eficiência, que é maior quanto maior for o diâmetro.

Uma relação semi-empírica foi desenvolvida por Lapple (1951) apud Cooper e Alley (2002) com o intuito de calcular o diâmetro das partículas coletadas com 50% de eficiência d_{pc}:

$$d_{pc} = \left[\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i \left(\rho_p - \rho_g\right)} \right]^{1/2} \tag{2.22}$$

onde, d_{pc} é o diâmetro da partícula coletada com 50% de eficiência [μm].

Lapple então desenvolveu uma curva para os ciclones padrões, através do qual é possível encontrar a eficiência de coleta para cada tamanho de partícula (Figura 2-16). Com essa relação, se a distribuição de tamanho das partículas é conhecida, a eficiência de coleta de cada faixa de diâmetros pode ser prevista.

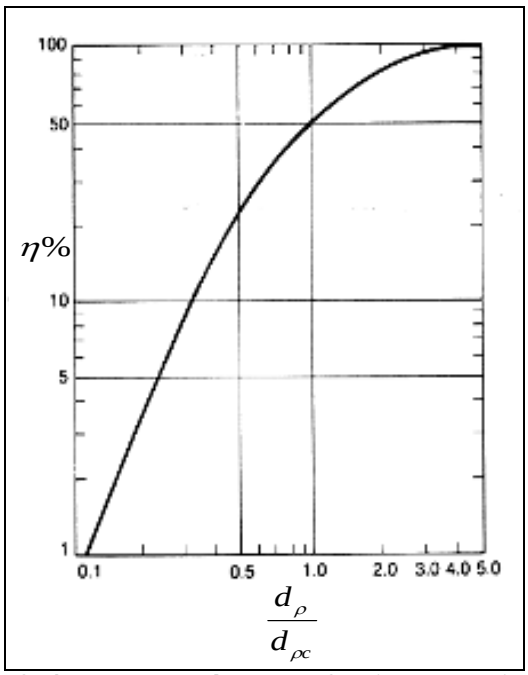


Figura 2-16 - Eficiência das partículas em função da relação de diâmetros.
Fonte: Cooper e Alley, 2002

Uma relação algébrica elaborada por Theodore e DePaola (1980) apud Cooper e Alley (2002) para a curva mostrada Figura 2-16 é apresentada a seguir:

$$n_j = \frac{1}{1+\left(d_{pc}/\overline{d}_{pj}\right)^2} \tag{2.23}$$

onde, n_j é a eficiência de coleta para a j-ésima de tamanhos de diâmetros e $\overline{d}_{pj}$ é o diâmetro característico da j-ésima faixa de diâmetros.

A eficiência total do ciclone é dada pela média das eficiências de coleta para os variados tamanhos de partículas:

$$\eta_o = \sum \eta_j m_j \tag{2.24}$$

onde, η_o é a eficiência total do ciclone e m_j é a fração de massa de partículas com diâmetro contidos na j-ésima faixa.

Mudanças nos parâmetros de operação do equipamento, como mudança de vazão, ou propriedades do ar e do particulado, ocasionam variação na fração de particulado que ultrapassa pelo coletor. A fração penetrante, que não é coletada pelo equipamento, é relacionada com a eficiência de coleta, como mostra a Equação 2.25.

$$Pt = 1 - \eta_o \tag{2.25}$$

Se as condições mudam devido a uma única variável, permanecendo as outras constantes, podem ser usadas relações para estimar a nova "penetração", como as mostradas na Tabela 2-13.

Tabela 2-13- Efeito de mudanças de condições de operação na eficiência de ciclones.

Variável	Relação
Vazão do gás	$Pt_2 / Pt_1 = \left(Q_1 / Q_2\right)^{0.5}$
Viscosidade do gás	$Pt_2 / Pt_1 = \left(\mu_1 / \mu_2\right)^{0.5}$
Diferença de densidade	$Pt_2 / Pt_1 = \left[\left(\rho_p - \rho_g\right)_1 / \left(\rho_p - \rho_g\right)_2\right]^{0.5}$
Concentração de particulado	$Pt_2 / Pt_1 = \left(L_1 / L_2\right)^{0.18}$

Fonte: Cooper e Alley, 2002

Geralmente, maiores eficiências são obtidas ao se forçar a passagem do gás a altas velocidades, devido a influência sobre a força centrífuga. Entretanto isso resulta em um aumento da perda de carga. O aumento da perda de carga ao passar no ciclone exige maior trabalho do ventilador.

Existem diversos modelos para o levantamento da perda de carga em ciclones. Usaremos a aproximação de Shepherd e Lapple, que possui precisão comparável a outros modelos. A perda de carga é dada pela Equação 2.26:

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho_g V_i^2 C_{pd} \tag{2.26}$$

onde, ΔP é a perda de carga e C_{pd} é o coeficiente de perda de carga devido à pressão dinâmica. O coeficiente C_{pd} é calculado segundo a Equação 2.27.

$$C_{pd} = K\frac{HW}{D_e^2} \tag{2.27}$$

onde, K é uma constante que depende da configuração do ciclone e condições de operação.

Teoricamente, K pode variar consideravelmente, mas para os ciclones padrões, em que o ar entra tangencialmente, esta constante varia entre 12 e 18 (Caplan (1962) apud Cooper e Alley (2002)). Sendo recomendado $K = 16$ por Licht (1982) apud Cooper e Alley (2002).

A perda de carga de um ciclone varia em torno de 250 a 4000 Pa. Uma vez calculada a perda de carga, a potência requerida pode ser obtida da seguinte forma:

$$\dot{w}_f = Q\Delta P \tag{2.28}$$

onde, $\dot{w}_f$ é a referida potência e Q é a taxa volumétrica de fluido (vazão volumétrica) [m³/s].

2.3.4.2 Filtro de Mangas

Filtro de mangas é um equipamento de separação de partículas onde o fluido carregado é direcionado a passar por filtros, que são cortinas de tecido, deixando a poeira retida em suas fibras. A estrutura do filtro de manga é composta pela cabine de mangas, compartimentos de entrada e saída de ar, pelas mangas e suas estruturas de suporte e assessórios (Figura 2-17).

Os tecidos, instalados na forma de mangas em câmaras onde passam o ar capturado, retém as partículas por filtragem. Existem mangas de vários tipos de materiais, com diferentes formas de organização das fibras, e vários tamanhos de filtros. Também são possíveis diferentes

arranjos de mangas nas câmaras de mangas, e ainda diferentes sentidos possíveis de fluxo dentro do filtro.

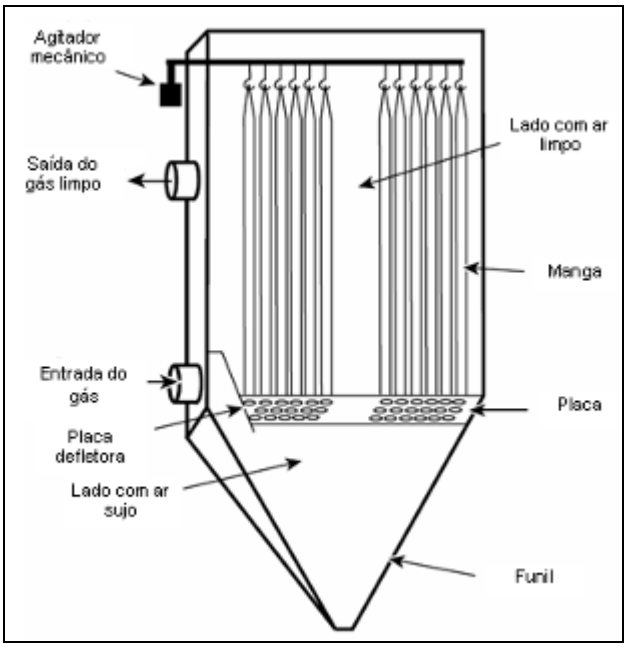


Figura 2-17 – Esquema representativo do conjunto de um filtro de manga de batimento mecânico.

Ao reter as partículas em suas fibras por impactação ou intercepção as mangas dão suporte para uma camada de poeira que se acumula em sua superfície. A camada de poeira que se forma contribui para a filtragem de particulado, pois promovem a filtragem de partículas menores que àquelas possíveis de se filtrar pelas fibras do tecido, aumentando assim a eficiência na filtragem de partículas menores. A participação desta camada de poeira na filtragem do particulado varia de acordo com o tipo da fibra (COOPER; ALLEY, 2002).

Após um período de funcionamento, as fibras acumulam uma quantidade de particulado que precisa ser retirada para que a filtragem não seja interrompida. Assim, é feita uma limpeza para a retirada da poeira acumulada. Existem vários tipos de métodos usados na limpeza. Os três tipos mais comuns de filtros de manga são: filtros de ar reverso, jato pulsante e por sacudimento mecânico.

Os filtros de ar reverso apresentam a melhor tecnologia atual e são utilizados com mais freqüência. O filtro por de limpeza por sacudimento mecânico foi o primeiro filtro de uso freqüente na indústria para despoeiramento, sendo muito comercializado a partir da década de 20. A tecnologia de ar reverso passou a ser utilizada anos depois (PACHECO, 2007).

Nos filtros de limpeza por agitação, as mangas são sacudidas periodicamente para deslocar as partículas previamente coletadas. No sistema de ar reverso, ar limpo é insuflado periodicamente pelas mangas na direção oposta ao do fluxo normal a fim de desprender as partículas da camada aderida. Nos dois casos, no momento da limpeza das mangas é

paralisado o fluxo da filtragem. Para que o filtro não pare de receber a vazão a ser tratada, este é projetado em compartimentos, e no momento de limpeza das mangas, um compartimento é isolado do fluxo de fluido. Durante a limpeza, aglomerados de partículas de caem em um compartimento cônico. As partículas são periodicamente removidas do silo e dispostos para reuso, se for aplicável.

No método de jato pulsante o ar é filtrado através das mangas de fora para dentro. Uma estrutura de arcos metálicos dentro de cada manga impede que esta se deforme. As mangas são fechadas na base e presas por um engate à câmara de saída de ar limpo no topo. As mangas são limpas por curtos assopros de ar (30-100 ms) de alta pressão (90 – 100psi). O pulso de ar é direcionado através de um tubo Venturi e dá inicio a uma onda de choque que flexiona as mangas e desloca a camada de partícula agregada. Cada manga é impulsionada a cada período de minutos.

A principal vantagem do método de jato pulsante é que o fato de limpar algumas mangas enquanto o ar carregado continua a fluir através das mangas. Não há compartimentos e mangas extras, o que reduz o tamanho e o custo. A Figura 2-18 mostra a representação dos três tipos de filtros de manga.

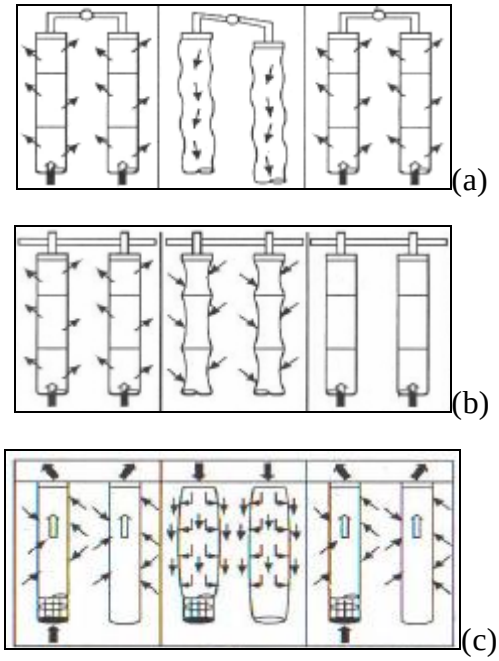


Figura 2-18 – Métodos de limpeza de filtros de manga. (a) batimento; (b) ar reverso; (c) jato pulsante

Entre as vantagens do uso de filtro de mangas, com relação a outros equipamentos, estão: a grande eficiência de coleta, mesmo para partículas muito pequenas; a possibilidade de operar para uma grande variedade de tipos de particulado; poder ser projetado em módulos, com

partes pré-moldadas a serem montadas; e poder ser usado sob uma grande faixa de taxas de vazão volumétrica; além de causar pequena perda de carga.

Entre as desvantagens destes equipamentos estão: a necessidade de grandes áreas para instalação, no caso de grandes vazões; serem restritos a condições físico-químicas do fluido (altas temperaturas e agentes corrosivos podem provocar danos nos tecidos); e não poderem ser operados em ambientes úmidos, pois os tecidos podem tornar-se blindados; possuem risco potencial de fogo.

Inicialmente, após ocorrer a limpeza dos tecidos, a eficiência de coleta de cada manga é relativamente baixa, pois uma grande parte do particulado passa direto ou penetra o tecido. Entretanto, devido aos mecanismos de intercepção e difusão, as partículas de poeira rapidamente se acumulam nas fibras e formam pontes nos vazios. Uma vez formada esta película de particulado sobre as fibras do tecido, a eficiência de filtração cresce substancialmente.

A camada de particulado funciona como um filtro muito eficiente, porém, provoca aumento na resistência ao fluido. A perda de carga no filtro de manga dada uma taxa de fluxo é devido ao tecido, à camada de particulado e à estrutura física do equipamento.

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p + \Delta P_S \tag{2.29}$$

onde, ΔP é a perda de carga total, ΔP_f é a perda de carga devido ao tecido, ΔP_p é a perda de carga devido a camada de particulado aderida ao tecido e ΔP_S é a perda de carga devido a estrutura da câmara de filtros.

A perda de carga devido à estrutura é baixa, e pode ser desconsiderada nos cálculos. As perdas de carga devido ao tecido e à camada de particulado depende da velocidade de filtragem, da viscosidade do gás, da espessura da respectiva camada e da permeabilidade dos materiais utilizados.

A eficiência de coleta de um filtro de manga não é usualmente um problema no projeto de filtros. Um filtro de manga bem projetado, operado corretamente, geralmente coleta partículas de uma faixa de tamanho de submícron a muitas centenas de mícrons de diâmetro, com eficiências maiores que 99%.

Adotando como dado uma alta eficiência, o projeto da câmara de filtros envolve a otimização da velocidade de filtragem V para balancear os custos de instalação, que varia com o tamanho do filtro, e de operação, que varia com a perda de carga.

A velocidade de filtragem superficial, também conhecido como razão ar-pano é igual à vazão de fluxo dividido pela área do tecido, como indicado na Equação 2.30.

$$V = \frac{Q}{A_{total}} \tag{2.30}$$

onde, Q é a vazão do gás, [m^3/s] e A_{total} é a área total de filtragem, [m²].

Para a escolha da velocidade de projeto, V, devem ser consideradas as experiências anteriores de aplicações em problemas com poeira similar, as características das fibras, as características das partículas, e as características da linha de corrente.

O valores de V podem ser ajustados em casos específicos, dependendo da concentração de particulado, espessura das partículas e outros fatores. Por exemplo, é aceitável decréscimo dos valores tabelados de V de 10 a 15%, para ar com carregamento de particulado acima de 1,4 kg/m³, e acréscimo de velocidade V por mais que 20% de carregamento de poeira menor que 0,2 kg/m³. Similarmente, para tamanho de particulado menor que 3 μm (ou maior que 50 μm), os valores tabelados de V podem ser decrescidos (ou acrescidos) de até 20%.

Valores de V muito altos podem conduzir a uma penetração excessiva das partículas, blindando as fibras, e reduzindo a vida útil do filtro. A seleção dos tecidos, incluindo o tipo de trançado, é importante e é baseado, em parte, pelas suas propriedades de desprendimento das partículas.

A Tabela 2-14 dá alguns dados de velocidade de filtragem para aplicação de jatos pulsantes. Uma maior velocidade de filtragem reduz a área líquida exigida, reduzindo mais o tamanho e o custo. Recentemente, tem havido uma tendência para razões ar-pano menores que os apresentados na Tabela 2-14, com o intuito de diminuir a penetração das partículas (COOPER; ALLEY 2002).

Tabela 2-14 – Velocidades máximas de filtragem para vários tipos de poeira indicados para filtros de jato pulsante.

Tipo de particulado	Velocidade Máxima de Filtragem (m/min)
Carbono, Grafite, Fumo de Metalúgicas, Sabão, Detergentes, Óxido de Zinco	1,5 – 1,8
Cimento (matéria prima), Argila (cru), Plásticos, Pigmentos de pintura, Amido, Açúcar, Pó de Madeira, Zinco (metálico)	2,1 – 2,4
Óxido de alumínio, Cimento (final), Argila (vitrificada), Cal, Calcário, Gesso, Mica, Quartzo, Soja, Talco	2,7 – 3,4
Cacau, Chocolate, Farinha, Grãos, Poeira de couro, Tabaco, Serralha	3,6 – 4,3

Fonte: Cooper e Alley, 2002

Adotado o valor da relação ar-pano, e conhecida a vazão de projeto, determina-se a área total de filtragem das mangas (Equação 2.30). O tamanho das mangas a serem utilizadas é definido através das experiências anteriores de aplicação, e da disponibilidade do mercado. Dada a área unitária das mangas, calcula-se o número de mangas necessárias no projeto.

$$N_{mangas} = A_{total} / A_{manga} \tag{2.31}$$

Os filtros de jato pulsante requerem geralmente apenas cerca da metade da área de instalação dos filtros de ar reverso, o que é um fato importante a se considerar em espaços limitados.

Os filtros de jato pulsante têm sido muito aplicados nas indústrias atualmente. Por indicação de fabricantes, e pelas vantagens que se apresentam, neste trabalho foram utilizados para a análise apenas filtros do tipo jato pulsante.

O método de jatos pulsantes possui algumas desvantagens. Devido ainda haver fluxo de gás dentro da manga quando o pulso de ar agita o tecido, muito da poeira que é capturada pelo filtro é ressuspensa e retorna para a mesma manga, ou para manga vizinha, sendo refiltrado.

Com uso deste sistema de jato pulsante, o comprimento das mangas é limitado devido a rapidez com que o pulso de ar dissipa suas energias. Inicialmente, mesmo com mangas pequenas (2,44 metros de comprimento), o terço inferior das mangas não era devidamente limpo. Este problema foi solucionado com o desenvolvimento do tubo difusor. O tubo difusor é um cilindro metálico perfurado que se ajusta dentro da manga e induz o pulso de ar a se propagar com menor dissipação.

Partículas penetram através do sistema de jato pulsante em uma forma diferente se comparado aos sistemas convencionais; a maior parte da penetração ocorre quando o tecido se reestrutura rapidamente sobre a armação após um pulso de ar (Leith e First (1977), apud Cooper e Alley (2002)).

Tal penetração pode ser muito reduzida, reduzindo gradualmente a pressão do ar no final do pulso filtrante em vez de usar uma interrupção brusca (Leith, Gibson, e First (1978), apud Cooper e Alley (2002)). Entretanto, a modificação nos pulsos requer um aumento de uso de ar comprimido.

O uso de ar comprimindo é a principal despesa da operação neste tipo de filtro. Tipicamente, a vazão volumétrica do ar comprimido é cerca de 0,2 a 0,8% da vazão do ar filtrado quando os dois estão corrigidos na mesma temperatura e pressão. O custo para o trabalho de compressão pode ser igual ao do ventilador principal. A equação para a potência do compressor é:

$$\dot{w} = \frac{1}{\eta}\frac{\gamma}{\gamma-1}P_1Q_1\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1\right] \tag{2.32}$$

onde, $\dot{w}$ é potencia real no compressor, η a eficiência do compressor, γ é razão entre as capacidades caloríferas a pressão e volume constantes (C_p / C_v) do gás a ser comprimido, P_1, P_2 são as pressões inicial e final (absolutas) e Q é a vazão compressor (na entrada).

A perda de carga do filtro de manga está relacionada com velocidade de filtragem, pressão de pulso, e densidade superficial de poeira depositado durante o ciclo de filtragem (Leith e First, 1977). Um modelo, desenvolvido para coleta de cinzas em mangas de poliester pode ser expresso pela Equação 2.33.

$$\Delta P = 2{,}72 \cdot \Delta W^{0.45} P^{-1.38} V^{2.34} \tag{2.33}$$

onde, ΔP, perda de carga através do meio filtrante, [cmH_2O]; V é a velocidade de filtragem, [cm/s]; ΔW é a densidade superficial de poeira agregada entre duas limpezas consecutivas ($\Delta W = LVt_f$), [mg/cm^2].

2.4 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS

A avaliação de um projeto de engenharia começa com a identificação de todos os custos e benefícios envolvidos. Caso haja mais de uma alternativa de engenharia, mutuamente excludentes, para um mesmo projeto, estas serão avaliadas para se decidir pela mais viável em termos sociais, ambientais e econômicos (GOMES, 2005).

Para avaliar economicamente um projeto devem ser levantados, além dos custos e benefícios envolvidos o tempo de alcance do projeto. O alcance do projeto corresponde ao período de atendimento das estruturas físicas projetadas, tanto para equipamentos como obras civis. Este período depende de vários fatores, como:

- planejamento de ampliação da produção ou modificação na linha de produção;
- vida útil dos equipamentos e estruturas;
- disponibilidade financeira para investimentos.

Os custos envolvidos no projeto podem ser custos de implantação e de operação e manutenção. Os custos de implantação são os gastos fixos iniciais da implantação do projeto, e podem ser diretos e indiretos. Os custos diretos são os empregados para a aquisição dos equipamentos das instalações, como tubulações, motores, equipamentos de controle; e as

obras de estruturas. Os custos indiretos compreendem os gastos com os projetos de engenharia, fiscalização de obra, consultoria e outros. (GOMES, 2005).

Os custos de operação incluem os custos com energia dos sistemas de ventiladores, bombas, e outros sistemas elétricos ou mecânicos, e também custos com mão de obra e insumos. Os custos de operação e manutenção podem ser variáveis no tempo e ocorrem em parcelas mensais ou anuais. (GOMES, 2005).

Os benefícios representam o retorno do investimento, podendo ser retorno financeiro sobre a venda de produtos, economia de recurso, e ganhos em geral. Os benefícios podem ser diretos, quando são resultados imediatos de um investimento, ou indiretos, quando proporcionado pelos resultados do projeto. (GOMES, 2005).

Alguns benefícios não são possíveis de serem quantificados monetariamente de forma direta, são os chamados benefícios intangíveis. São exemplos os ganhos na saúde pública de investimentos em saneamento, o ganho de uma empresa em sua credibilidade e imagem. Já os benefícios tangíveis são aqueles que podem ser quantificado monetariamente, por exemplo o recebimento da venda de algum produto, a economia gerada após a troca de um equipamento.

2.4.1 Relação Benefício/Custo

O critério de avaliação econômica de projetos foi inicialmente desenvolvido para estudo de viabilidade de projetos públicos, em que se devem considerar os efeitos sobre a sociedade e o meio ambiente, tanto os diretos como os indiretos. Nestes casos o lucro não é a prioridade do investimento. (TORRES, 2006)

De modo geral, benefício torna-se tudo que é favorável aos objetivos do projeto, e custo, tudo que é desfavorável. (TORRES, 2006). Quando o investimento gera benefícios intangíveis, a relação benefício/custo se torna mais subjetiva. O investimento será justificado se houver um entendimento de que os benefícios gerados são maiores que os custos investidos.

Comparando-se dois projetos, se ambos possuem os mesmos benefícios opta-se pelo de menor custo. Se ambos tiverem o mesmo custo, opta-se por aquele que traga mais benefícios econômicos, sociais e ambientais.

2.4.2 Comparação de Investimentos Excludentes

A comparação de diferentes projetos deve considerar as despesas de implantação e as despesas rotineiras da operação e manutenção, que serão aplicadas em períodos, assim como os recebimentos e benefícios. O custo deve ser avaliado dentro do período de vida útil esperada do projeto.

Em projetos cujos benefícios não são quantificados diretamente a análise econômica torna-se restrita aos custos do projeto. Os benefícios desejados devem então ser limitantes ou ponderador ao investimento. Da mesma forma, para dois ou mais projetos em que se mantêm iguais os benefícios a comparação entre as alternativas considera apenas a variação dos custos.

2.4.2.1 Método do Custo Anual Uniforme

Este método caracteriza-se pela transformação de todos os fluxos de caixa do projeto considerado, numa série uniforme de pagamentos equivalentes, indicando desta forma o valor do custo por período demandado pela alternativa de investimento. (OLIVEIRA, 1982)

Para compor os valores uniformes, considera-se que o custo de investimento necessário para a implantação do projeto é pago ao longo do tempo, ou da vida útil do projeto. O investimento é amortizado mediante parcelas anuais ou mensais. (GOMES, 2005)

Definidos a vida útil do projeto e o período de incidência das parcelas, mensal ou anual, e assim o número de parcelas de pagamento durante a vida útil, as parcelas referentes à amortização do custo de investimento são definidas pela Equação 2.34.

$$U = P \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{2.34}$$

onde, U é o valor das parcelas, P é o valor do custo de investimento, n é o número de parcelas e i é o valor do juros aplicado no mercado.

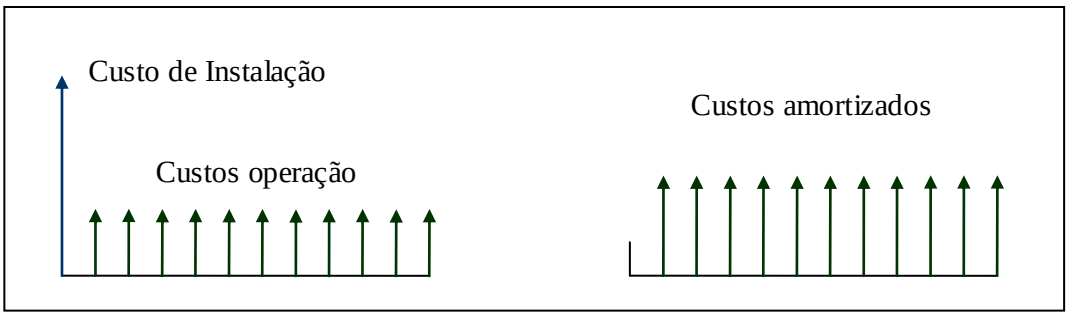


Figura 2-19 – Amortização dos custos de implantação

Desta forma, o projeto mais atrativo será aquele que possuir menor custo anual/mensal uniforme, somando-se os custos de instalação amortizados e os custos rotineiros, de operação e manutenção.

A seleção do projeto de menor custo pode variar com a vida útil definida para o projeto. Isto porque quanto menor a vida útil definida, maior o valor da parcela referente ao custo de implantação amortizado.

A Figura 2-20 mostra um exemplo considerando os projetos P1 e P2, com valores de custo inicial de R$100.000,00 e R$200.000,00 e custos rotineiros mensais de R$2.500,00 e R$ 1.000,00, respectivamente, e considerando a taxa de juros de 1% ao mês. Neste exemplo, considerando um período de 96 meses (8anos) as parcelas mensais seriam de R$ 4125,00 para P1 e R$ 4250,00 para P2, indicando P1 como mais viável. Já se fosse considerado um período de 144 meses (12 anos) as parcelas mensais seriam de R$ 3814,00 para P1 e R$ 3627,00 para P2, indicando P2 como mais viável.

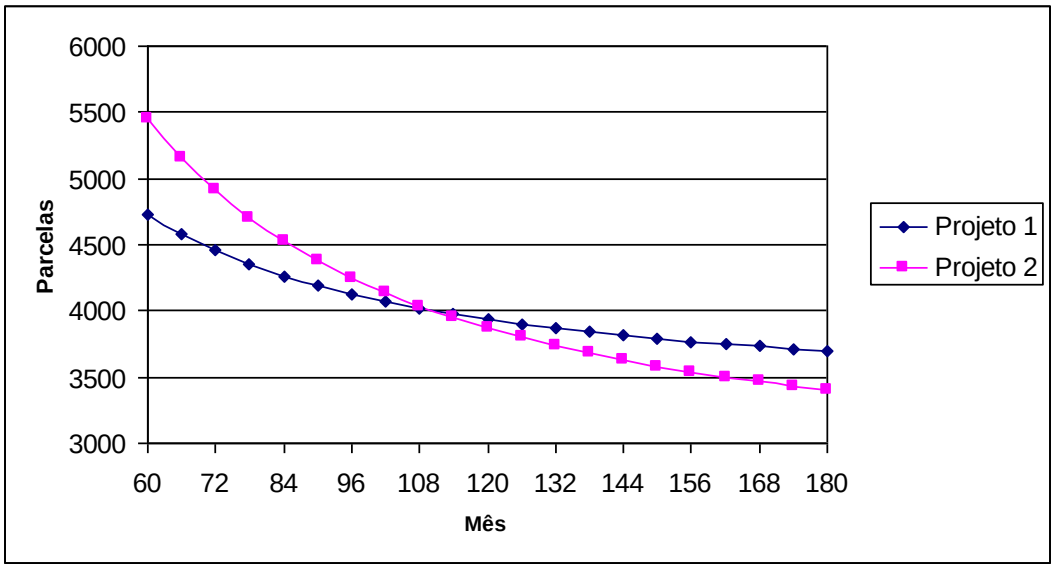


Figura 2-20 – Exemplo da variação dos custos anuais uniformes para dois projetos excludentes.

2.4.3 Custos Envolvidos com Equipamentos de Controle

A análise dos custos envolvidos na instalação de equipamentos de controle de particulado deve englobar os custos gerais do sistema de despoeiramento, incluindo os captores, as tubulações, os próprios equipamentos de controle e ventiladores.

Os custos iniciais são os custos de compra e instalação dos equipamentos. Os captores dependem da forma de captação escolhida, do número de pontos de captação e das dimensões projetadas. Os custos de tubulação variam com a vazão calculada para a captação e o esquema do traçado das tubulações, considerando as partes lineares e os acessórios do sistema. O custo dos equipamentos varia com o tipo de equipamento escolhido, que pode depender do nível de eficiência desejado, e com as dimensões, que depende da vazão de ar tratada. O custo do ventilador depende do seu tipo, de sua potência e da vazão.

Os custos de operação é o custo da energia gasta pelo ventilador para manter a vazão a ser filtrada e de outros equipamentos que utilizem algum mecanismo elétrico. Citam-se também para o caso de lavadores de gases os insumos como a água utilizada no tratamento. Os custos de manutenção incluem a manutenção da parte física de todos os equipamentos: troca de peças danificadas, limpeza e reparos, e substituição de partes com vida útil limitada. Incluem também o gasto com mão de obra e equipamentos auxiliares.

O custo inicial de um ciclone, por exemplo, varia com as suas dimensões. Este, por sua vez, é escolhido de acordo com a perda de carga e a eficiência desejada. Para a uma mesma vazão, um diâmetro menor leva a uma maior perda de carga e também maior eficiência. Os custos de manutenção são os mínimos, visto que não é necessária a troca regular de nenhuma parte. Dentro do sistema de despoeiramento, o ciclone contribui com uma perda de carga localizada a ser vencida, que deve ser incluída no cálculo do custo de operação do sistema.

O custo inicial do filtro de manga depende de suas dimensões e do tipo de fibra utilizado. Quanto maior a vazão a ser filtrada, maior o filtro. Além dos custos de implantação, são considerados também os custos de manutenção, do filtro, devido à necessidade da substituição periódica das mangas, que possuem uma vida útil limitada. As mangas devem ser substituídas após um período por volta de 12 e 18 meses. O custo de operação é referente à perda de carga localizada, provocada pela passagem do ar neste equipamento, que deve ser superada através de um ventilador ou exaustor.

O sistema de despoeiramento promove diversos benefícios intangíveis, como preservação ambiental, manutenção ou melhoria da saúde ambiental e ocupacional, limpeza no ambiente industrial, e melhoria da imagem da empresa junto à sociedade. Quando é possível a recuperação de materiais, há também benefícios indiretos pela economia do material que seria perdido para atmosfera.

2.4.4 Internalização dos Custos Ambientais

As atividades industriais afetam a região de entorno de várias formas, mudando a dinâmica local. Quando a atividade de um agente econômico afeta o bem-estar ou o lucro de outros agentes e não há nenhum mecanismo de mercado que faça com que este último seja compensado por isso, ocorre o que é chamado de externalidades (COSTA[2], 2005). Uma indústria qualquer pode, por exemplo, ao lançar gases poluentes no ar, afetar a saúde da comunidade vizinha.

Em indústrias, os sistemas de tratamento de efluentes finais não fazem, em geral, parte do processo de produção, sendo sistemas auxiliares. Sua existência não beneficia economicamente a produção, e gera gastos que são contabilizados nos custos globais da empresa.

O investimento em sistemas de tratamento, que incluem os sistemas de despoeiramento, é uma internalização de parte dos custos ambientais provocados pelo processo industrial. Ao modificar uma área ou gerar efluentes e resíduos, uma indústria promove uma externalidade negativa, que pode ser expresso como o valor aplicado na recuperação da qualidade ambiental do local, ou gastos com a saúde da população da área de influência.

Os investimentos em sistemas ou melhorias na planta industrial diminuem as externalidades negativas, de forma a minimizar os possíveis impactos. Os custos ambientais internalizados, ou seja, o investimento promovido para diminuir as externalizações negativas, devem ser considerados na avaliação econômica de um investimento, influenciando na sua viabilidade. São exemplos deste tipo de investimentos os sistemas de tratamento de efluentes líquidos de indústrias, e sistemas de controles de emissões atmosféricas.

As internalizações dos custos ambientais são justificadas por vários motivos, entre eles exigências ambientais para o licenciamento do empreendimento e comprimento de legislação, pressões de mercado, e investimentos na imagem da empresa pela aquisição de certificados e selos ambientais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem a função de detalhar todos os procedimentos práticos realizados durante a elaboração do projeto de graduação além da inserção do estudo de caso que foi realizado dentro do contexto do controle da poluição atmosférica. Após toda a fundamentação teórica do estudo ter sido discutida na seção de Revisão Bibliográfica surge a necessidade de se explicar como foram aplicadas todas as equações e tabelas expostas. Serão desenvolvidas abordagens referentes à escolha e análise preliminar da unidade industrial, onde foram determinados todos os pontos de emissão de material particulado, às características do processo produtivo da unidade industrial, à descrição dos cenários de estudo e à metodologia de dimensionamento das partes constituintes dos sistemas propostos.

3.1 ESTUDO DE CASO

Esta seção tem por objetivo discorrer detalhadamente sobre os pontos de emissão pertinentes da unidade industrial escolhida. Como dito anteriormente, esta é uma empresa do ramo da produção de cimento. Serão descritos os processos produtivos realizados na fábrica assim como a exposição das características das matérias-primas que são utilizadas no processo. Uma das matérias-primas utilizadas é, inclusive, a maior fonte de material particulado e terá suas características principais abordadas de forma mais detalhada. Por fim será descrito de forma resumida o produto final, no caso, o Cimento Portland.

3.1.1 Escolha da unidade industrial

O presente trabalho, como já descrito nas seções de justificativa e objetivos, está relacionado ao controle de material particulado para proporcionar melhorias à saúde do trabalhador e ao meio ambiente. No processo de escolha da unidade industrial foram levados em consideração os seguintes aspectos:

- características do material contaminante;

- condições atuais das fontes de emissão da unidade industrial e

- possibilidades de intervenções objetivando melhorias através da instalação de sistemas de ventilação e equipamentos de controle.

Para este trabalho, foi buscada uma indústria cujo processo produtivo gerasse emissões de material particulado. Este tipo de poluente é apontado pela população da região de estudo

como significativo fator gerador de incômodo. A região possui diversas empresas de grande e médio porte que possuem a mesma problemática.

As metodologias de controle de emissões de material particulado tratadas no presente estudo são aplicáveis a outras unidades industriais que apresentem problemas similares aos diagnosticados no estudo de caso.

Foi observado que em grande parte das unidades industriais o controle das emissões é focado nas grandes fontes. As fontes menores, por muitas vezes, devido ao menor grau de poluição, não sofrem intervenções no sentido de interromper as emissões. Contudo, é importante para a unidade industrial implementar em um máximo número de fontes, sistemas de controle de poluição atmosférica, mesmo estes, por exemplo, não sendo objetos de condicionantes ambientais.

Aplicando os objetivos propostos na escolha do estudo de caso, buscaram-se unidades industriais que possuíssem fontes pontuais de emissão de material particulado com controle inadequado ou insuficiente dos contaminantes ou mesmo sem controle algum.

Escolheu-se como estudo de caso para as análises qualitativa e quantitativa dos problemas de poluição atmosférica a Cimentos Mizu, uma indústria do ramo cimenteiro. Tal unidade industrial escolhida como estudo de caso seguiu as características descritas anteriormente. O material particulado é a principal emissão da indústria Mizu, dados os tipos de matéria-prima e como é o processamento destas. Outro fator importante foram as possibilidades de intervenção nas fontes de emissão.

3.1.2 Produção de Cimento Portland

A produção do cimento portland possui várias etapas desde a extração mineral de matéria prima para produção de clínquer, matéria prima principal do cimento, até a mistura com outros insumos para formação do produto final.

As partes mais importantes do processo de produção do clínquer são o piroprocessamento e o resfriamento. O calcário passa por um processo de queima em fornos, por via seca ou úmida, e depois é resfriado através de ventilação em tanques, gerando o clínquer. A Figura 3-1 apresenta, resumidamente as etapas de produção do clínquer desde a extração até a estocagem do material.

O objetivo desta demonstração é fornecer conhecimento acerca da existência do processo provendo base para aplicação de parte da metodologia de estimativas de emissões mais adiante. A metodologia adotada de estimativa de emissões não possui a descrição da granulometria do clinquer para a etapa desejada (transporte por correias) sendo necessária a admissão de valores de outro processo que seja similar. Quando for tratada a metodologia de

dimensionamento de ciclones será útil a explicação do modo de determinação do tamanho das partículas por meio da utilização do modelo de emissão AP-42 (EPA, 1995).

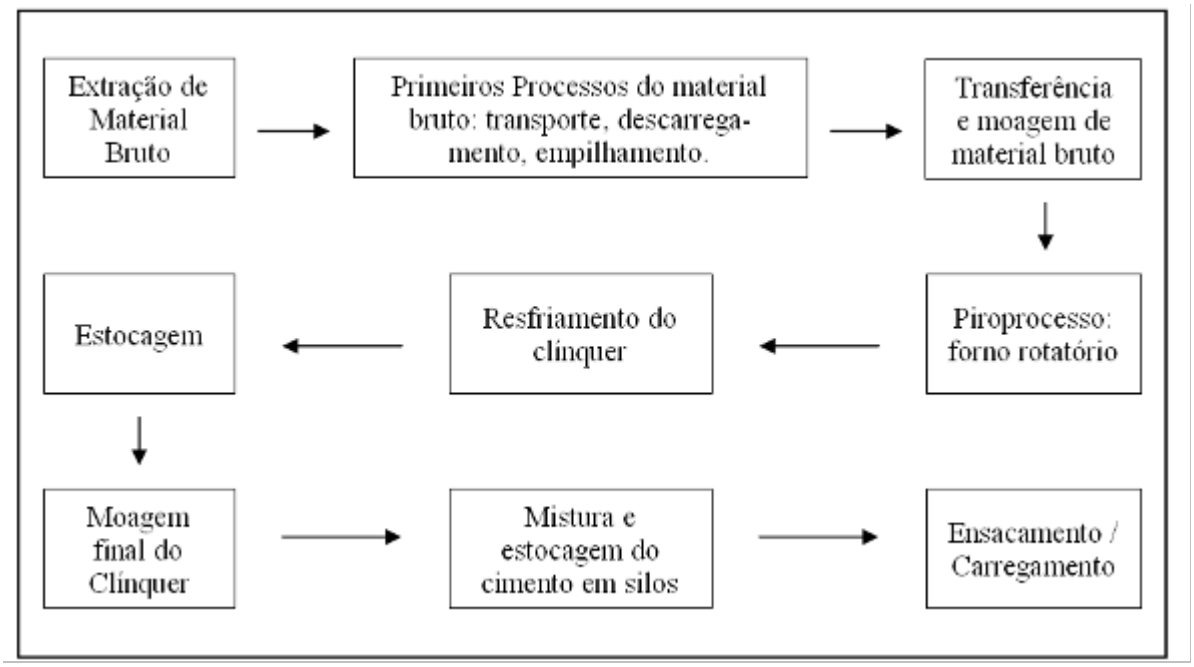


Figura 3-1 – Esquema simplificado de processo produtivo de Cimento Portland

Em uma indústria de Cimento, as fontes de material particulado incluem processos de mineração, estocagem de matéria-prima, moagem e mistura, processos de produção do clínquer, moagem final do clinquer e aditivos, e ensacamento e carregamento.

As maiores emissões de MP em plantas de cimento ocorrem no sistema de piroprocessamento, que inclui o forno, e no sistema de exaustão da câmara de resfriamento do clínquer. Fontes adicionais de emissão de particulado são as pilhas de estocagem, correias de transporte, silos, e ensacadores.

As fontes fugitivas de poeira incluem operações de extrações e mineração, tráfego de veículos durante a extração e na planta industrial, pilhas de estocagem de material bruto e de clinquer. A quantificação usada no controle de emissões para estas fontes fugitivas de particulado é semelhante à utilizada para indústrias de produtos minerais.

O controle de emissões em vias com tráfego de veículos inclui pavimentação e umedecimento das vias (rega). Outros tipos de controles que são aplicados a fontes abertas de poeira incluem aspersão de água, podendo conter surfactantes**,** *wind fence*, e modificações no processo para reduzir alturas de queda de materiais, ou enclausuramento de operações nos estoques.

As fontes fechadas de emissões fugitivas, que envolvem manejo e transferência de materiais, operações de moagem de material bruto no processo a seco, e operações finais de moagem e

ensacamento, tipicamente são controladas através da captura da poeira por sistemas de ventilação e coleta em filtros de manga e outros equipamentos. Alguns arranjos usam um sistema contendo um ou vários coletores mecânicos com um filtro de manga em série. Como a poeira destas unidades retornam ao processo, eles são considerados unidades do processo tanto quanto equipamento de controle de emissões.

Para processos fugitivos, os diferentes sistemas atingem tipicamente emissões de particulado de 45 mg/m³. A Tabela 3-1 apresenta alguns fatores de emissões para MP na fabricação de cimento portland, na manipulação da matéria bruta e no processo de produção (EPA, 1995).

Tabela 3-1 – Fatores de emissão de algumas etapas no processo de fabricação de Cimento Portland.

Processo	PM (kg/Mg)	Classificação
Forno do Processo por Via Úmida	65	D
Pré-queimador com Filtro de Mangas	0,130	C
Resfriador de clinquer com Filtro de Mangas	0,048	D

Fonte: EPA, 1995

Na Tabela 3-1 nota-se a coluna de classificação dos dados de fatores de emissão, em que, C são dados de qualidade média e D dados de qualidade mais inferiores.

A distribuição de tamanho das partículas varia para os diferentes processos da produção. A distribuição dos diâmetros para os processo de via úmida e via seco (forno) e do processo de resfriamento do clínquer são apresentadas na Tabela 3-2 e na Tabela 3-3:

Tabela 3-2 – Distribuição de diâmetros para etapa de processamento em fornos.

Tamanho da Partícula (μm)	Porcentagem acumulativa de massa com menor ou igual tamanho.	
	Processo por via úmida	Processo por via seca
2,5	7	18
5,0	20	ND
10,0	24	42
15,0	35	44
20,0	57	ND

Fonte: EPA, 1995

Tabela 3-3 – Distribuição de diâmetros para etapa de Resfriamento de Clinquer.

Tamanho da Partícula (μm)	Porcentagem acumulativa de massa com menor ou igual tamanho.
2,5	0,54
5,0	1,5
10,0	8,6
15,0	21
20,0	34

Fonte: EPA, 1995

O processo produtivo da Mizu possui apenas a parte final da planta de cimento, onde ocorre a moagem final do clínquer e de outras matérias primas, e a mistura, dosando-se a porcentagem correta de cada insumo, gerando o produto final. O clínquer chega à unidade industrial pronto para o processo de moagem visto que a unidade industrial não é uma fábrica de cimento completa.

3.1.3 Processo produtivo da unidade industrial

A Mizu iniciou sua produção em função do advento da inauguração do segundo alto forno da indústria siderúrgica próximas ao sítio industrial citado. O subproduto da siderurgia, a escória, é considerada atualmente matéria-prima para a fabricação do cimento, devido ao aumento da resistência final do produto, sendo adicionada após a moagem do clínquer, juntamente com o gesso. Desta forma, o processo produtivo da Mizu está caracterizado, como de reaproveitamento de resíduos industriais (escória granulada de alto-forno).

O processo produtivo da fábrica é restrito a parte final, de moagem e mistura do clínquer e subprodutos, uma vez que esse processo não contempla a etapa de produção de clínquer, portanto não realiza extração de calcário e operação de alto-forno. A Mizu possui planta produtiva totalmente automatizada, que utiliza tecnologia japonesa e alemã nos processos de moagem. Um processo de inovação tecnológica que permite ajustar o grau de finura adequado para cada material, o que não é possível nos processos tradicionais, onde a moagem é realizada em conjunto.

Para a descrição das etapas produtivas da Mizu considerou-se o sistema produtivo principal. As matérias-primas utilizadas para a produção final de cimento são recebidas na unidade industrial por meio de caminhões e descarregadas de forma diferenciada nos galpões de armazenamento.

A escória, que não possui a necessidade de ser abrigada da chuva, permanece estocada em área aberta na forma de grandes pilhas. O material não possui características de emissão mesmo sofrendo ação dos ventos na região. Devido às características físicas e químicas

específicas do clínquer é necessário que suas pilhas permaneçam abrigadas. O clínquer que entra em contato com água não pode mais ser utilizado no processo produtivo, pois não produzirá o mesmo efeito esperado para o produto final. O clínquer recebido pela empresa fica armazenado em um grande galpão onde são despejados e remanejados. A Figura 3-2 mostra uma visão do galpão de armazenamento do clínquer e parte das pilhas de escória.

Figura 3-2 – Galpão de armazenamento dos insumos do processo produtivo e pátio das pilhas de escória de alto-forno.

A depender da demanda de matéria-prima para a produção do cimento há a alimentação da tremonha que direciona o material para a cabeceira da correia transportadora. Tal correia tem a função de elevar o material para outros dois silos de acumulação de matéria-prima anteriores a moagem.

Na parte inicial da transferência encontra-se em funcionamento um equipamento denominado rolo imantado que tem a função de retirar, dadas as suas características, as partículas metálicas indesejáveis à produção de cimento dentro das especificações técnicas. Este ponto foi diagnosticado como de grande importância nas análises de melhoria do sistema de despoeiramento da unidade industrial analisada. Tal correia, como pode ser avaliada na Figura 3-3, possui cobertura impedindo que ocorra a umidificação do material e a dispersão das poeiras de clínquer durante a operação.

(a)

(b)

Figura 3-3 – (a) Correia transportadora da matéria-prima; (b) Visão geral da unidade industrial

Cada matéria-prima segue para um silo de estocagem diferenciado, o qual serve de ponto de acumulação do material antes de ser direcionado ao processo de moagem. A escória de alto forno segue por correia específica até o moinho de rolos UBE. Após a moagem, o material está pronto para o processo de mistura com o clínquer moído, seguindo para as câmaras de estocagem. O clínquer após ser recebido no silo segue para uma correia transportadora com cobertura, em que, existe um sistema de aquecimento do clínquer para retirar a umidade. Este segue para o moinho de bolas denominado *Polysius*, e a matéria-prima é estocada juntamente com a escória de alto forno nas células de estocagem. A Figura 3-4 mostra os moinhos UBE e *Polysius* e suas respectivas correias transportadoras.

(a)

(b)

Figura 3-4 – (a) Moinho de Bolas *Polysius*; (b) Moinho de Rolos UBE

A operação de ensacamento é realizada por meio de duas unidades com capacidade para 4800 sacos/hora, em sistema semi-automático, com reaproveitamento do material desconforme e destinação de embalagens danificadas. O cimento é expedido a granel (carregamento direto no caminhão) através de três caminhos de carregamento distintas, embalado em saco (expedidas por meio de *pallets* ou somente ensacadas ou ainda em big-bags). A expedição ferroviária é realizada em sacos por vagões.

3.1.4 Insumos e Produto Final

O cimento é um aglomerante hidráulico constituído basicamente de óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro que quando misturado com água (em certas proporções) endurece. O produto final pode ter várias composições na mistura, formando vários tipos de cimento, cada um com aplicações específicas.

O componente principal dos diversos tipos de cimento é o clínquer Portland. O segundo componente essencial dos diferentes tipos de cimento é o sulfato de cálcio (gesso). Durante a moagem é adicionado gesso (natural ou artificial). A adição de gesso é necessária para regular o processo de endurecimento do cimento. Outro grupo de componentes, como por exemplo, calcário puro, escória de alto forno, cinza violante, pozolanas naturais ou artificiais, podem estar presentes nos cimentos, formando os diversos tipos definidos por norma, tendo cada características próprias. Estes componentes contribuem em geral para melhorar algumas propriedades específicas destes cimentos.

- Clínquer: basicamente, resulta de um processo de calcinação e sinterização a elevadas temperaturas (1350-1500°C) de compostos químicos de uma mistura de matérias-primas naturais, tais como calcários, argilas, areias ou, minoritariamente, compostos de ferro e alumínio, devidamente dosificados e moídos até alcançar tamanho adequado (mais que 85% inferior a 88mm). Trata-se do principal constituinte do cimento após um processo de moagem. É um produto obtido da queima em forno rotativo de uma mistura adequada de calcário e argila. É formado em sua maior parte por silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas e em menor proporção de aluminatos e ferroaluminatos cálcicos.

- Escória: a escória de alto forno é um subproduto do tratamento de minério de ferro em alto forno, adquirindo a forma granulada por meio de resfriamento brusco. É constituído em sua maior parte de silicatos e aluminossilicatos de cálcio. Sua composição química deve obedecer à uma relação específica. O potencial hidráulico da escória exige a presença de um componente químico, que possa atuar como catalisador, para iniciar toda a sua atividade hidráulica e transformá-la em energia dinâmica. O componente que atua neste caso é o hidróxido de cálcio, liberado durante a hidratação dos silicatos componentes do clínquer. A escória possui características mais úmidas e durante o seu transporte e armazenamento não é objeto de preocupação por parte do estudo de caso.

(a)

(b)

Figura 3-5 – Insumos da produção de Cimento Portland: (a) Clínquer; (b) Escória

3.1.5 Identificação e Análise de Pontos de Emissão de Material Particulado

A unidade industrial foi analisada preliminarmente em toda a sua totalidade quanto aos pontos de emissão de material particulado. Este tópico tem por objetivo expor todos os pontos da planta industrial onde há emissão e situá-los em relação à existência de controle e caso existindo se está em bom funcionamento, não havendo assim, necessidade de quaisquer intervenções.

O reconhecimento e a localização dos pontos de emissão de material particulado foram elaborados após a realização de variadas visitas técnicas à unidade industrial. A Figura 3-6 mostra a planta da unidade industrial com a referência destacada dos pontos de emissão de poluentes. Todos os pontos foram enumerados facilitando a descrição que será realizada nos parágrafos seguintes. Como destacado na Figura 3-6, as regiões de emissão de particulados estão dispostos ao longo de toda a unidade industrial desde a recepção e o armazenamento dos insumos até a expedição, passando pelos processos de transferência e moagem.

A região A representa os galpões de armazenagem de clínquer, escória de alto-forno e de outros aditivos. Como mostrado na descrição do processo produtivo, os caminhões de carregamento de clínquer (maior causador da poluição devido a material particulado da indústria) dispõem os insumos nos galpões de tal forma que causa a geração de grande quantitativo de emissão de material particulado. O problema se excede quando há a limpeza das caçambas e transporte destes materiais dentro dos galpões. Nesta região não há controle do material particulado que entra em dispersão, seja de forma geral (o galpão é completamente aberto em todas as laterais) ou local.

A região B, é depois dos galpões, a fonte de poluentes em que é mais perceptível a concentração de material particulado que é emitida durante a produção de cimento. São três os pontos principais de emissão de poeira de clínquer dentro desta região: no recebimento de matéria-prima na tremonha, queda de material no *shut* e passagem pelo rolo imantado. A emissão nestes pontos ocorre em períodos intermitentes, dependendo da passagem de matérias

pelas correias. A alimentação da tremonha e o *shut* já possuem um sistema de captura de particulado, ligado a um filtro de mangas. Apesar deste controle tais pontos merecem uma análise quanto a melhorias passíveis de serem implementadas. O terceiro ponto, onde se localiza o rolo imantado, não possui controle algum de partículas.

Na região C localizam-se os silos de armazenamento temporário das matérias-primas, que recebem o clínquer e a escória, respectivamente, e alimentam as correias transportadoras que levam os materiais para os moinhos, de acordo com a necessidade do processo. Neste ponto ocorre a emissão de particulado devido a movimentação do clínquer durante a sua chegada e saída. Existe um controle das emissões por meio de filtro de mangas, mas ainda é ineficiente.

Seguindo pela correia de transferência do clínquer para o moinho de bolas existe uma transferência de correias definida como região D. Também nesta fonte há um controle ineficaz dos contaminantes, seja no processo de captura seja no tratamento do ar contaminado.

Nas fontes designadas pela letra E estão situados os moinhos UBE e *Polysius*. Para cada uma das fontes existem filtros de manga de grandes dimensões capturando os poluentes por meio de captores bem enclausurados. Não será, portanto, objeto de análise deste estudo de caso dado que pontos mais críticos de poluição já foram diagnosticados.

Por fim nos pontos analisados da região F estão localizados o silo multicâmara e os armazéns de carregamento e expedição do produto final. Os pontos diagnosticados de emissão de particulado nesta região possuem controle adequado da poluição atmosférica e não serão, assim como o anterior, analisados para compor os resultados finais do projeto. A poluição é decorrente da movimentação dos produtos das câmaras de armazenamento até o ensacamento, estando incluídos como poluentes nesta etapa o clínquer e o cimento pronto.

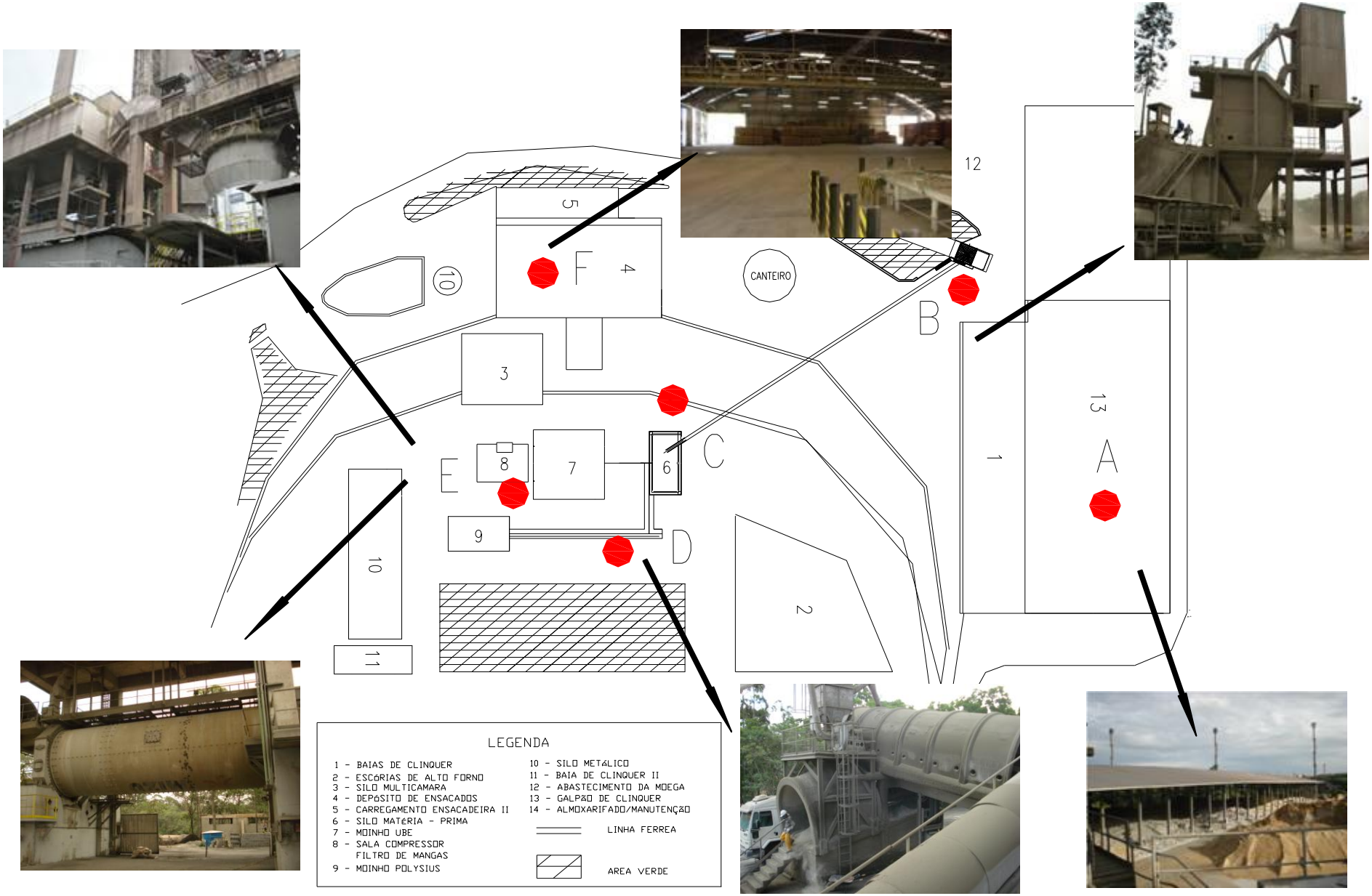


Figura 3-6 – Representação esquemática da unidade industrial com demarcação dos pontos de emissão visualizados durante análise do estudo de caso

3.2 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DAS PARTES CONSTITUINTES DOS SISTEMAS DE DESPOEIRAMENTO DOS CENÁRIOS APRESENTADOS

3.2.1 Metodologia de dimensionamento de captores e tubulações

O dimensionamento dos captores para o presente estudo de caso foi realizado conforme a seguinte seqüência de passos descrita nesta seção de metodologia. Os resultados finais e pranchas com o layout básico das estruturas pertencentes ao sistema de captura do ar contaminado estão em capítulo específico, o designado Resultados e Discussões. Compõem também esta seção as etapas de dimensionamento das tubulações que levam o ar contaminado dos captores aos equipamentos de controle e destes para os ventiladores.

A partir de visitas técnicas à unidade industrial e das fotografias de vários ângulos da região de implantação do sistema de captura deve-se traçar os cortes preliminares da forma das chapas que comporão o captor enclausurante final. Para tal foram levados em consideração os equipamentos de suporte e sustentação das estruturas da fonte analisada. O layout das chapas é traçado permitindo a designação das aberturas e frestas existentes.

A partir de visualização das placas construídas que irão servir de captor enclausurante para a fonte obtém-se o valor da área total aberta, que servirá de base de cálculo para a vazão requerida pelo sistema de exaustão das partículas em suspensão. Obtido o valor da área total aberta na estrutura de captação é necessária a determinação da velocidade de captura. O valor da velocidade de captura será determinado segundo as recomendações técnicas dos autores referência do trabalho e do Manual de Ventilação Industrial da ACGIH. Tais recomendações técnicas estão dispostas nas Tabela 2-7, Tabela 2-8 e Tabela 2-9. O valor da velocidade deverá seguir uma interpolação das tabelas indicadas, dado que faixas diferentes de valores são fornecidas. O fator importante a se levar em consideração diz respeito ao valor ótimo que pode ser admitido obtendo a maior captura dos contaminantes sem gastos excessivos devido a uma vazão super dimensionada.

Assim, determinado o valor da velocidade de captura é calculada a vazão de exaustão requerida para o sistema de controle de partículas. Como já explicado na seção de fundamentação teórica do estudo, a vazão requerida de exaustão para o captor enclausurante é fornecida segundo a Equação 2.2 que é resolvida após indicação dos valores de áreas abertas e velocidade de captura.

Estando a vazão de captura calculada deve o engenheiro projetista definir a velocidade do ar dentro das tubulações que se seguem, segundo as recomendações indicadas pela Tabela 2-11. A velocidade do ar nos dutos deve ser escolhida a partir dos dados de vazão e velocidade pode-se calcular, por meio dos diagramas expostos na Anexo 1 os valores dos diâmetros comercialmente disponíveis em milímetros e da perda de carga linear em mmH_2O/m. Estabelecendo outros valores para a velocidade do duto o projetista pode variar a sua gama de

cenários finais, analisando mais criticamente cada uma delas. Por exemplo, valores maiores de velocidade provocam a diminuição do diâmetro, mas incrementam o valor da perda de carga linear. Uma avaliação econômica dos custos de investimento, manutenção e operação pode ser utilizada na escolha do resultado final.

O dimensionamento do sistema de exaustão segue, após a determinação da vazão de exaustão, com a determinação das características do sistema de dutos que interligam o captor ao equipamento de controle. A definição do traçado das tubulações deve estar claro neste momento. As localizações do ponto de união de tubulações, dos equipamentos de controle e dos obstáculos de forma geral, que possam impedir a passagem dos dutos, são conhecidas e é possível a determinação de todas as peças especiais que serão necessárias assim como o comprimento dos trechos retos.

Tendo em vista as peças acessórios que serão necessárias ao sistema de dutos juntamente com o comprimento total das tubulações a perda de carga é calculada e somada a perda de carga existente na entrada do captor. A perda de carga na entrada do captor é calculada segundo a forma que possui. Esta então possui valores característicos de coeficiente de entrada e fator de perda de carga. Foram então definidos após cálculos específicos: desenhos e dimensões das placas que compõem o captor enclausurante, velocidade de captura, vazão de exaustão, velocidade do ar nas tubulações e extensão das mesmas além das peças acessórias.

Como já descrito o objetivo final deste trabalho é a determinação da configuração completa de todo o sistema de ventilação, equipamentos de controle e ventilação. A seção seguinte expõe como são aplicados os conceitos expostos na fundamentação teórica do estudo no dimensionamento de ciclones e filtros de manga, incluindo as perdas de carga associadas, e os ventiladores necessários para cada cenário. Por fim, ainda neste capítulo, serão expostas as metodologias de avaliação econômica dos cenários com análise dos custos de investimento, operação e manutenção em um tempo determinado.

3.2.2 Metodologia de dimensionamento de equipamentos de controle: filtros de manga e ciclones

3.2.2.1 Dimensionamento de ciclones

Inicialmente são definidas as dimensões do ciclone, seguindo o design dos ciclones padrões. Escolhido o valor do diâmetro, D, calcula-se as outras dimensões do ciclone, através das proporções estabelecidas (Tabela 2-12).

A vazão de projeto é definida no cálculo dos captores. A velocidade de entrada no corpo do ciclone, V_i, é então calculada em função da vazão de projeto e de das dimensões da entrada do ciclone, como mostrado na Equação 2.19.

Também em função de parâmetros de dimensão do ciclone é calculado o número de voltas efetivas das partículas no ciclone, de acordo com a Equação 2.17.

Para o cálculo do diâmetro das partículas coletadas com 50% de eficiência é utilizada a relação apresentada pela Equação 2.22, em função da viscosidade do gás, da massa específica da partícula e da massa específica do gás, que devem ser definidas.

A distribuição dos diâmetros de partículas adotada foi a mesma distribuição definida para o processo de resfriamento do clínquer, pela metodologia da US-EPA, mostrada na Tabela 3-3. O diâmetro característico para cada faixa de diâmetro é definido como uma média entre o menor e o maior diâmetro das partículas contidas neste intervalo.

Em seguida, são definidas as razões entre os diâmetros característicos de cada faixa e o diâmetro das partículas coletadas com 50% de eficiência, e as eficiências de coleta das partículas para cada faixa de diâmetro, através da Equação 2.23.

Foi calculada, então, a eficiência total, dada pela soma entre cada faixa de diâmetro das partículas da multiplicação entre a eficiência de coleta referente àquela faixa e a porcentagem de massa de partículas que estão compreendidas naquela faixa.

Para o calculo da perda de carga são usadas as relações apresentadas pelas Equações 2.26 e 2.27.

3.2.2.2 Dimensionamento de filtros

No cálculo de um filtro de mangas, usualmente não é estimada a eficiência do filtro, que já é esperada alta. O problema se foca em calcular a perda de carga e os tamanhos adequados ao caso, usando muitas vezes de parâmetros indicados em literatura.

A velocidade de filtragem superficial (relação ar/pano) pode ser adotada como a velocidade máxima de filtragem de projeto dependendo do tipo de poluente (Tabela 2.14).

Dado a vazão de projeto, é possível calcular a área total de filtragem, pela Equação 2.30. E com o tamanho unitário da manga utilizada, calcula-se o número de mangas (Equação 2.31).

A perda de carga dos filtros de manga pode ser estimada por equações empíricas, como a Equação 2.33. É usual adotar-se valores adquiridos através da experiência de aplicações em casos semelhantes.

3.2.3 Metodologia de aplicação da metodologia de estimativa de emissões

Para o estudo de caso proposto serão quantificadas as emissões dos três pontos da Região B (Figura 3-6) para dois momentos: anteriormente ao tratamento e após a passagem pelos equipamentos de controle.

As emissões de uma atividade podem ser equacionadas em função de seus fatores de emissão, como mostrado na Equação 2.1. O fator de emissão específico para este tipo de processamento industrial é adquirido segundo as tabelas fornecidas pela US-EPA na seção sobre a produção, transporte e armazenamento de clínquer na produção de cimento Portland, dispostos no capítulo que trata da indústria de produtos minerais.

As tabelas trazem uma lista muito extensa de fatores de emissão para todas as etapas de produção do clínquer. Tratando-se do estudo de caso será utilizado o fator de emissão referente ao transporte do material por correias. Este fator de emissão é indicado nas tabelas como sendo aplicado após a passagem por filtros de mangas, devendo ser considerada a sua eficiência padrão para se calcular o fator de emissão sem nenhum tipo de controle.

Calculado o fator de emissão, conforme explicado anteriormente, é necessária a determinação do valor da "taxa de atividade" para a aplicação da equação e cálculo da emissão em unidades de kg/s. Este parâmetro representa a variação temporal de determinada quantia característica do processo produtivo em destaque. No caso da correia transportadora tal valor é expresso em massa de clínquer transportada por unidade de tempo através das correias. Em relação a emissão no ponto da tremonha (Região B), cuja atividade é o despejo de material na tremonha por meio de caminhões, deve-se considerar a massa de clínquer que preenche as caçambas dos caminhões e adotar uma taxa média de passagem dos caminhões pelo ponto analisado.

O valor da taxa de atividade é calculado em unidades de massa por tempo resultando em valores de emissão de clínquer da mesma maneira já que os fatores de emissão do estudo de caso são expressos em unidades de massa por massa.

A concentração de poluentes, parâmetro de interesse desta seção, é dada pela razão entre os valores de emissão e a vazão de exaustão, como mostrado na Equação 3.1.

$$C = E / Q \tag{3.1}$$

onde, E é a emissão [kg/s]; Q é a vazão de exaustão [m³/s] e C é a concentração de poluentes [kg/m³]. As unidades são exemplos de como estas podem ser calculadas, havendo variações.

O memorial de cálculo mostra em detalhes os procedimentos de determinação da taxa de atividade para cada ponto de emissão, assim como, os valores da concentração de poluentes.

3.2.4 Metodologia de análise econômica dos cenários

Inicialmente, foram levantados os custos de aquisição dos elementos componentes do sistema de despoeiramento: placas para captores, tubulações, ventiladores e equipamentos de controle. Os custos de montagem e instalação dos sistemas não foram considerados, pois são aproximadamente os mesmos para as diferentes propostas, não influenciando significativamente na comparação.

Foram identificados também os custos de operação e manutenção de cada sistema proposto. Os custos de operação foram baseados no custo energético dos ventiladores, projetados para vencer a perda de carga do sistema. Os custos de manutenção dos filtros representam os custos gastos com a troca das mangas no final de suas vidas úteis. O tempo de utilização das mangas foi estabelecido de acordo com o indicado por fornecedores do equipamento, assim como o custo unitário das novas mangas.

Para a comparação dos quatro cenários foi utilizado o método de análise de investimento de Custo Uniforme Anual. O valor do investimento inicial foi então amortizado, gerando um valor de parcela única para todos os anos do período considerado para a análise. A expressão utilizada para amortização foi a Equação 2.34. Para compor o valor total das parcelas foram somados os custos rotineiros anuais e o custo de investimento amortizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo expõe os resultados obtidos na análise das emissões e propostas de cenários para o estudo de caso. Os resultados estão apresentados em três seções. Na primeira são identificados os pontos a serem abordados na análise de melhorias, qualitativa e quantitativa, para os pontos de emissão indicados no capítulo de Materiais e Métodos, seção 3.1.5. Na segunda seção são apresentadas análises qualitativas de melhorias, mostrando ensaios conceituais para cada unidade. Na terceira seção, e última, é apresentadas propostas de projetos de sistemas de despoeiramento para uma região, analisando não apenas os projetos conceituais, mas também o dimensionamento e determinação de custo.

4.1 ALTERNATIVAS DE MELHORIA

Estando detalhadas as regiões de interesse do estudo de caso, serão apresentados cenários alternativos para implantação de melhorias. Nesta seção serão descritas detalhadamente as alternativas de melhoria que serão estudadas. Haverá dois enfoques diferenciados para as regiões detalhadas na seção anterior: em algumas regiões serão elaboradas análises qualitativas das possíveis melhorias e em outra o dimensionamento das propostas e análises qualiquantitativas dos cenários propostos.

4.1.1 Região A: Galpões de armazenamento de matéria-prima

Para a Região A serão elaboradas somente propostas qualitativas das melhorias que poderiam ser realizadas na estrutura do galpão de armazenamento de clínquer ou nos procedimentos de descarregamento dos caminhões. As soluções propostas para essa região estarão relacionadas a: construção de estruturas especiais para o descarregamento das caçambas dos caminhões, modificações na configuração das áreas abertas do galpão, instalação de sistemas de ventilação adequados, dentre outras proposições.

4.1.2 Região B: Tremonha e rolo imantado

A Região B, como já descrito anteriormente, possui três pontos de emissão de material particulado. Serão elaborados diferentes cenários com sistemas de controle de particulados envolvendo um ou mais equipamentos de controle, e considerando as três fontes da região.

A Figura 4-1 mostra em um plano geral a localização dos três pontos de emissão, situados na região da tremonha, correia transportadora e rolo imantado. A correia transportadora, na Figura 4-1, está representada pelo código C1. Listam-se, ainda, as fontes pontuais de emissão

E1, E2 e E3. A tubulação principal de passagem do ar de exaustão para o filtro já existente no sistema está representada pelo código T1. O filtro de mangas já existente está representado pelo código F1.

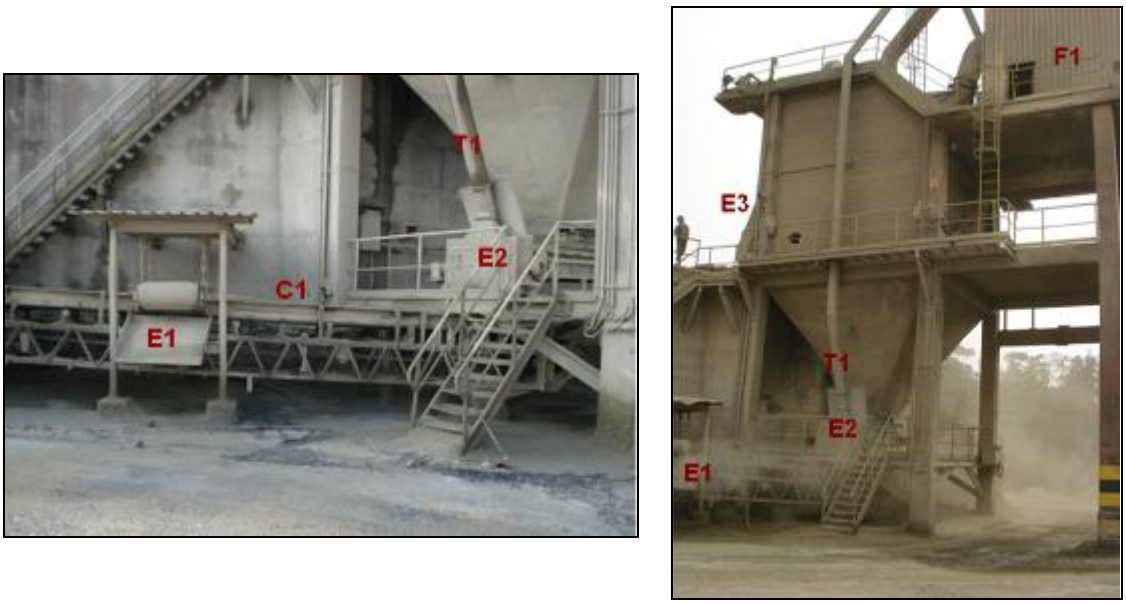


Figura 4-1 – Definição dos pontos de avaliação de emissão para a Região B, e demais elementos.

Conforme descrito anteriormente, no capítulo de detalhamento do processo produtivo da unidade industrial escolhida, a tremonha recebe ora clínquer ora escória de alto-forno, sendo estes direcionados diretamente para a correia transportadora. A escória, dadas as suas características físicas e químicas, não promove emissões de particulado durante a transferência. Já o material clínquer, dado suas características, permite a liberação de grande quantidade de material particulado para o ambiente. O ponto E2 possui já instalado um sistema de captura, tubulações e controle de ar, mas será objeto de análises dado a quantidade de material particulado que mesmo com o sistema instalado é liberado por esta fonte.

A fonte pontual de emissão E1 é a mais crítica com relação ao quantitativo de material particulado liberado diretamente ao ambiente, uma vez que tal fonte não possui nenhum sistema de exaustão instalado. O ponto citado é caracterizado por conter uma faixa da correia transportadora sem a cobertura isoladora, para permitir a atuação do rolo imantado, como mostra a Figura 4-2. O rolo imantado tem a função de retirar do material que é transportado pela correia partículas metálicas indesejáveis na composição do produto final. A movimentação do rolo imantado em velocidade elevada e em sentido perpendicular ao movimento das correias faz com que parte do material se desloque do sentido principal e se disperse na atmosfera, dadas as suas características físicas.

Figura 4-2 – Ponto de emissão E1, contendo rolo imantado.

Nesta seção serão detalhadamente descritos os três principais cenários propostos para a solução das problemáticas relacionadas às emissões atmosféricas na região citada. A partir dos cenários propostos serão comparadas características do sistema final como a efetividade do tratamento dos efluentes gasosos e o custo total, estando incluídos: instalação, operação e manutenção dos sistemas propostos. A efetividade do tratamento é função da estimativa da eficiência dos equipamentos de controle projetados. Com relação aos custos incluem-se nas análises os gastos de compra do equipamento de controle, instalação, operação e manutenção de cada etapa do sistema.

4.1.2.1 Cenário I: Dimensionamento de Ciclone

O primeiro cenário prevê o projeto de um sistema de captura, este ainda inexistente, para o ponto E1. O captor da fonte de emissão E1 será do tipo enclausurante. O sistema de captura do ponto de emissão E2 será reavaliado e um novo valor da vazão de exaustão será calculado, possivelmente para um valor superior.

Com o objetivo de evitar gastos excessivos com a potência do ventilador requerida para a exaustão e com tubulações desnecessárias tentar-se-á ao máximo o enclausuramento da fonte e que as tubulações sigam o caminho mais curto, com o menor número de acessórios até o ponto de encontro com a tubulação de exaustão da fonte E2, para minimizar a perda de carga. A tubulação de consolidação das vazões de ar contaminado é direcionada para a etapa da descontaminação do ar realizado pelo ciclone.

O primeiro cenário propõe o dimensionamento de um único equipamento de controle que receberia os volumes capturados de ar das fontes de emissão E1 e E2, sendo neste caso específico a implantação de um ciclone, ou dependendo da situação, de ciclones em paralelo

ou multiciclones. Nesta situação, o filtro de mangas existente seria utilizado para o tratamento exclusivo do ar capturado do ponto de emissão E3.

4.1.2.2 Cenários II-A e II-B: Dimensionamento de Filtro de Mangas

O segundo cenário prevê a construção de um novo equipamento de controle, sendo este um filtro de mangas. Este cenário foi divido em duas diferentes configurações. No Cenário II-A será projetado um novo filtro que receberá as vazões de exaustão dos três pontos de emissão da Região B, substituindo o filtro de mangas existente. No Cenário II-B será dimensionado um filtro de mangas para o tratamento do gás contaminado proveniente dos captores instalados em E1 e E2, e será mantido o filtro de mangas existente ligado ao ponto E3. Para ambos os casos será necessário o dimensionamento de novos ventiladores e diferentes traçados das tubulações serão adotados.

O sistema de controle local dos contaminantes (ponto de emissão E1 e E2) por meio de ventilação local exaustora será da mesma forma como foi dimensionado para o Cenário I. As modificações a serem realizadas se dão a partir da instalação da coifa, ou seja, no grupo de tubulações que farão parte do sistema. A captura de gases instalada no ponto E2 será reformulada da mesma forma como proposto para o Cenário I.

4.1.2.3 Cenário III: Dimensionamento de Ciclone e Filtro de Mangas

A vazão consolidada das fontes E1 e E2 será tratada por meio da ação do ciclone e encaminhado para o filtro de mangas F1 para finalização do processo de limpeza do gás. Deverá ser necessário o dimensionamento de um novo filtro de mangas para se adequar à nova vazão final de exaustão.

As características de remoção de particulado do ciclone aplicam-se a uma determinada gama de dimensões das partículas, especificamente as maiores. As partículas de menor granulometria serão removidas, conseqüentemente, até um certo nível de eficiência, pelo filtro de mangas.

4.1.3 Regiões C e D: silos de matérias-primas e transferência de correias

As Regiões C e D estão em seqüência no fluxo produtivo da indústria. Nestas regiões serão expostas propostas de melhoria no controle das emissões, cujas deficiências foram mostradas em tópicos anteriores. As propostas a ser apresentadas terão cunho qualitativo com o diagnóstico dos principais problemas, determinação das melhores alternativas de captura e de controle dos poluentes.

4.2 ANÁLISES QUALITATIVAS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

4.2.1 Região A: Galpão de Clínquer

A logística de utilização da matéria-prima na unidade industrial estabelece que sejam formadas pilhas de material nos galpões após o descarregamento dos caminhões. A partir destas outro tipo de maquinário abastece caminhões menores quando é decidida a partida da fábrica. Tais caminhões alimentam a tremonha da Região B. Toda esta movimentação descrita ocasiona uma grande movimentação de clínquer, cujas partículas de menor granulometria são emitidas para atmosfera.

As emissões ocorridas no galpão de armazenamento de clínquer são de difícil controle. Uma solução seria o enclausuramento e exaustão da região onde é descarregado o material, porém a área de armazenagem é grande e se trabalha com uma grande quantidade de material. O número de baias a se implantar seria muito grande e a instalação de captores demandaria um custo elevado.

O clínquer possui características específicas que não permitem a adoção de medidas de umidificação das pilhas de armazenamento para diminuir os impactos da dispersão de poluentes. Esta é uma medida, por vezes usada, para a diminuição das emissões nas pilhas de determinados materiais.

Para a instalação de baias seria necessário também que os caminhões de clínquer tivessem a forma de descarregar padronizada. Esta é considerada uma iniciativa de melhoria inicial , precedendo a aplicação de metodologia mais grandiosa objetivando a minimização das emissões de material particulado. Havendo tal padronização, é possível a instalação de baias específicas para o descarregamento deste material com adequado controle das emissões.

A alternativa proposta foi analisada somente quanto ao benefício ambiental de sua implantação, não sendo considerados os custos de implantação, operação e manutenção envolvidos. A melhoria consiste no melhor tratamento da movimentação do material prevendo a construção de unidades específicas, dentro dos galpões, para o despejo de tais insumos de produção.

As unidades específicas de descarregamento de material possuiriam um captor interligado a sistema de exaustão de material particulado. Tais unidades devem permitir que o descarregamento dos caminhões ocorra normalmente. Outra baia isolada deverá ser construída permitindo o abastecimento dos caminhões que levarão o clínquer para a tremonha. Esta transferência é realizada por meio de pás carregadeiras.

O material coletado nos captores de exaustão pode ser tratados por meio de ciclones e/ou multiciclones que possuem custo reduzido em comparação a outros equipamentos de controle. Tal material coletado poderia ainda ser reaproveitado dada a metodologia de coleta do particulado por ciclone resultar em um material mais homogêneo.

O fechamento dos galpões não se torna interessante para o trabalhador que lida diretamente com o manejo do clínquer. O enclausuramento dos galpões demandaria a construção de um sistema de ventilação e sistema de controle de grandes dimensões, estes haveriam de renovar o ar interior ao galpão em períodos de tempo específicos, a depender do tipo de operação realizada.

A Figura 4-3 mostra, a partir de um fluxograma, uma proposta de novo desenvolvimento das operações de descarregamento, transferência e transporte do clínquer a partir do galpão de armazenamento.

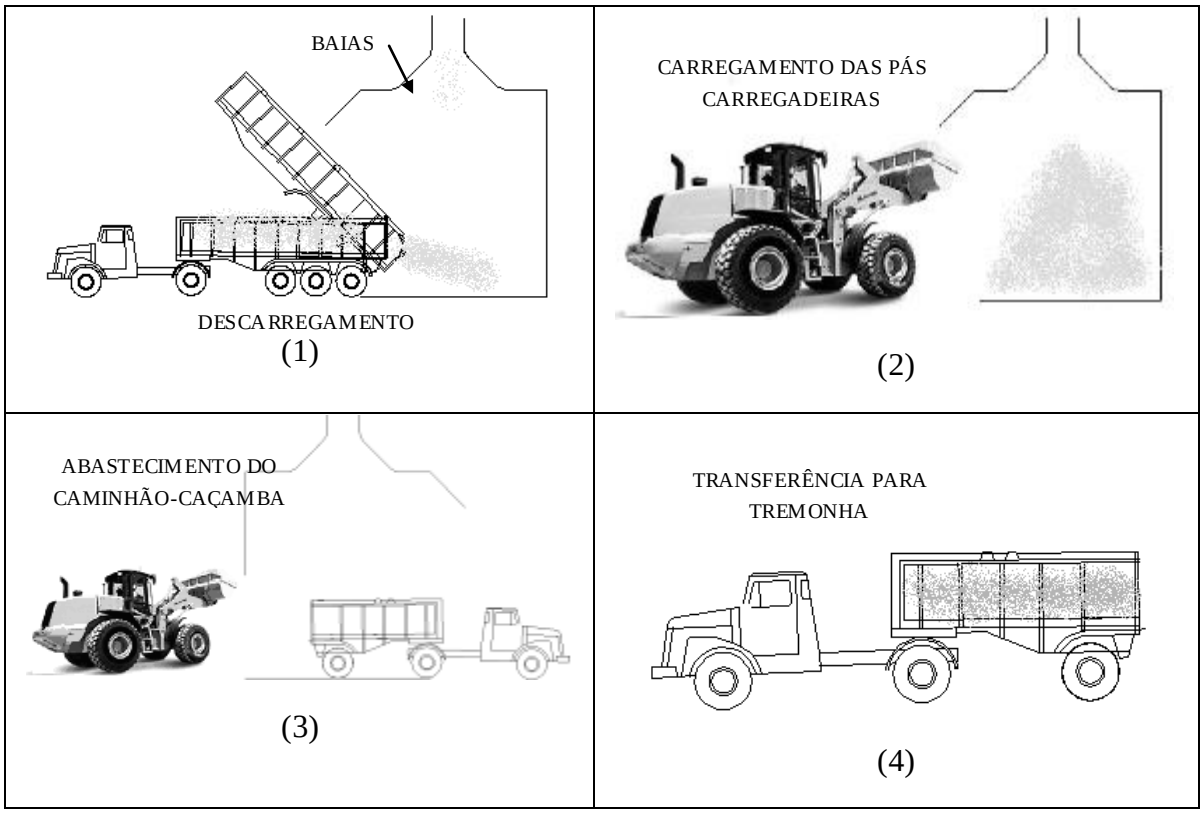


Figura 4-3 – Fluxograma de apresentação das operações de descarregamento, transferência e transporte de clínquer a partir do galpão de armazenamento

4.2.2 Região B: Tremonha de alimentação das correias

A tremonha de alimentação de correia apresenta uma captura ineficiente do particulado. A tremonha possui em sua parte superior uma cabine com um ponto de exaustão de ar e com a entrada lateral coberta por uma cortina de tiras de borracha que visam impedir a transferência de particulado para o ambiente externo. A Figura 4-4 mostra a forma e localização do ponto de descarregamento do material sendo possível analisar a presença das tiras de borracha caracterizadas anteriormente.

Ao ser descarregado o material na tremonha, através do caminhão basculante, as partículas mais finas se dispersam no ar devido ao arraste na queda. Na saída do caminhão a parte

superior do material toca a cortina e se dispersam para o ambiente, não sendo coletados por exaustão, já que há uma barreira entre a região de dispersão e o interior da cabine. Após a saída do caminhão a cortina volta a sua posição vertical exercendo sua função de barreira. As Figura 4-6 e Figura 4-6 mostram em detalhe a emissão de material particulado decorrente da operação de descarregamento do caminhão na tremonha.

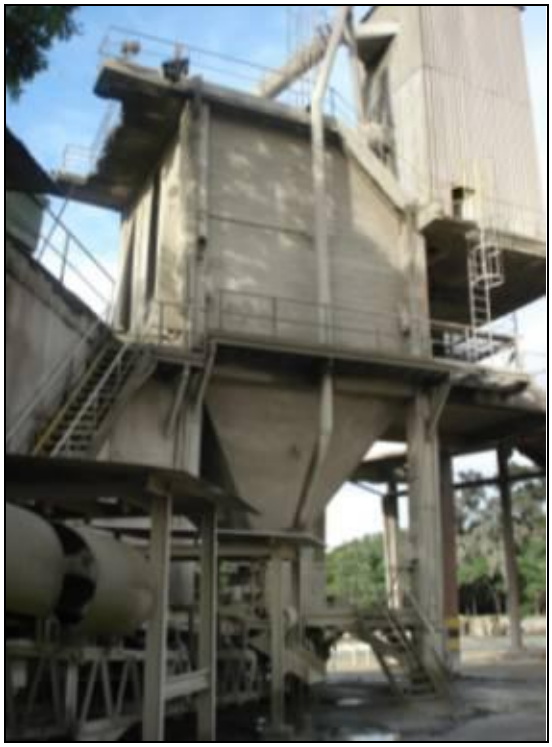
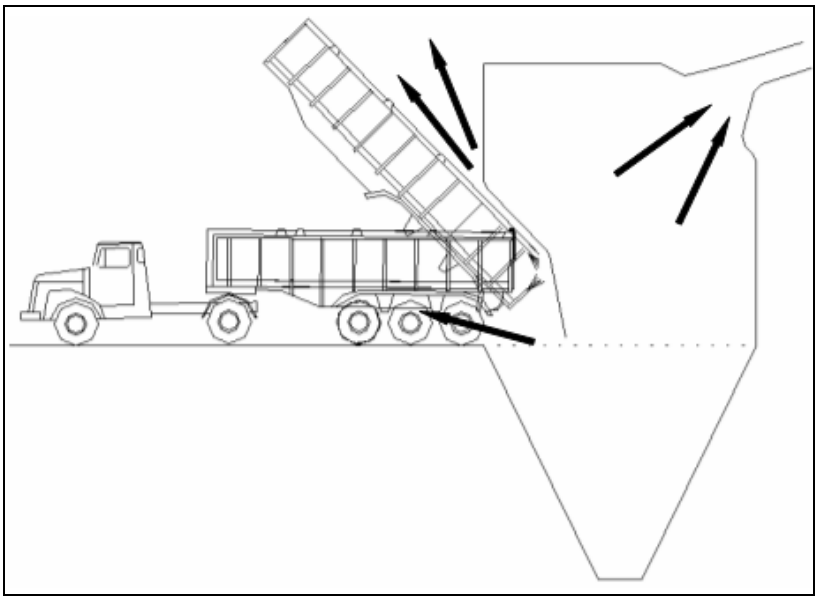


Figura 4-4 – Localização do ponto de recebimento do clínquer na tremonha da Região B.

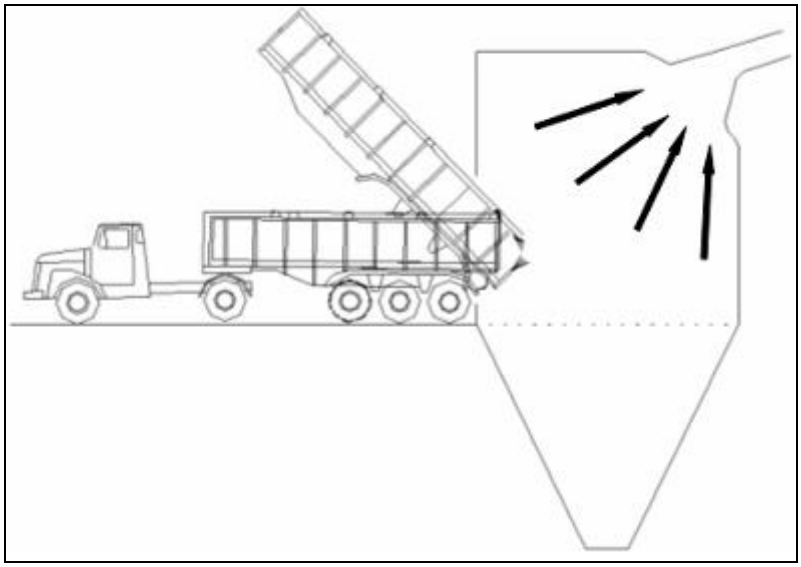
Figura 4-5 – Detalhe da entrada da tremonha onde são descarregados o clinquer e a escoria.

Figura 4-6 – Detalhe da emissão de material particulado decorrente da operação de descarregamento de clínquer na tremonha.

O arraste das partículas devido ao atrito com a cortina pode ser eliminado se for instalada uma cortina que cobrisse apenas parte da área, do teto até a altura da seção de área ocupada pela caçamba do caminhão ao despejar material. Aparentemente a área aberta aumentaria, aumentando a quantidade de particulado saindo para o ambiente externo, porém deve-se considerar a área ocupada pelo próprio caminhão, que pode permanecer no ponto até considerável captura dos poluentes que estão em sedimentação por alguns segundos. A Figura 4-7 mostra de forma esquemática a configuração atual e a configuração proposta como ideal para a entrada do ponto de chegada da matéria-prima.



(a)



(b)

Figura 4-7 – (a) Configuração atual da forma de descarregamento da matéria-prima na tremonha; (b) Configuração proposta como ideal para o ponto de descarregamento de clínquer.

Outra modificação que pode ser implementada é na posição do ponto de exaustão. Na configuração atual o ponto de captação se encontra na parte superior da cabine. Desta forma a velocidade na parte inferior da seção aberta tende a ser menor. Objetivando uma melhor coleta da partícula na face aberta, é interessante a colocação de um ou mais captores nas partes inferiores das paredes dos captores. Nesta configuração, o ar é coletado mais próximo da altura de descarregamento e entrada da moega. O particulado que escapa para a parte superior da cabine tende a se depositar por gravidade e ser coletado pelos captores. A Figura

4-8 em perspectiva geométrica as melhorias que podem ser realizadas na configuração do sistema de controle da poluição nesse ponto.

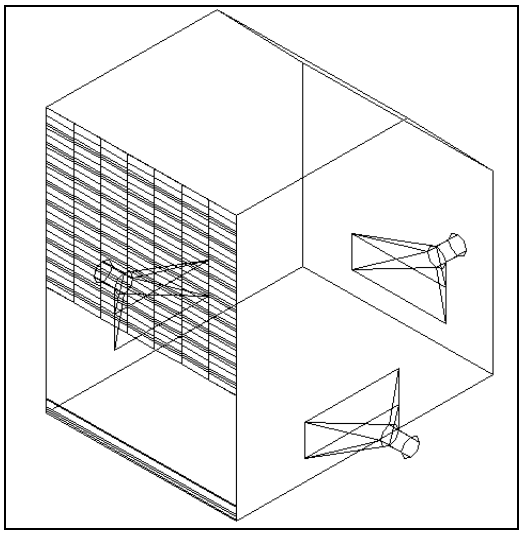


Figura 4-8 – Configuração de melhoria do ponto de chegada de clínquer na tremonha com o dimensionamento de novas tomadas de ar.

Cabe ressaltar, através de análise da Figura 4-8, a localização das novas estruturas de captura, estas mais próximas do local de queda da matéria-prima e ainda as tiras de borracha remodeladas, se adequando de forma mais interessante à operação.

É importante salientar que estes estudos são apenas ensaios conceituais. A elaboração de simulações baseadas no uso de Mecânica dos Fluidos Computacional seria desejável para a determinação dos padrões de escoamento resultantes e a efetividade das modificações propostas.

4.2.3 Região D: Transferência de correias

O ponto de transferência de correias, pertencente à Região C, necessita de melhor enclausuramento e de uma vazão maior de captação. Seria interessante também que a distância entre as correias fosse menor, gerando uma menor altura de queda, o que minimizaria a emissão de particulado. A diminuição da altura de queda entre as correias demandaria modificações na estrutura da correia pelo qual o material chega, para que esta tivesse uma inclinação menor. A Figura 4-9-a e a Figura 4-9-b mostram fotografias da Região D detalhando a forma das correias.

(a)

(b)

Figura 4-9 – (a) Visão geral do ponto de emissão da Região D; (b) Captor da Região D, mostrando em detalhes a sua estruturação.

Pode-se notar analisando a Figura 4-9, as consideráveis aberturas existentes na configuração do ponto de captação e em detalhes vê-se o captor existente na sua atual forma.

As melhorias de configuração na forma do captor enclausurante da transferência de correias estão demonstradas nas imagens a seguir. A Figura 4-10-a, a Figura 4-10-b e a Figura 4-10-c mostram a isometria e cortes do captor desenhado para substituir o atual.

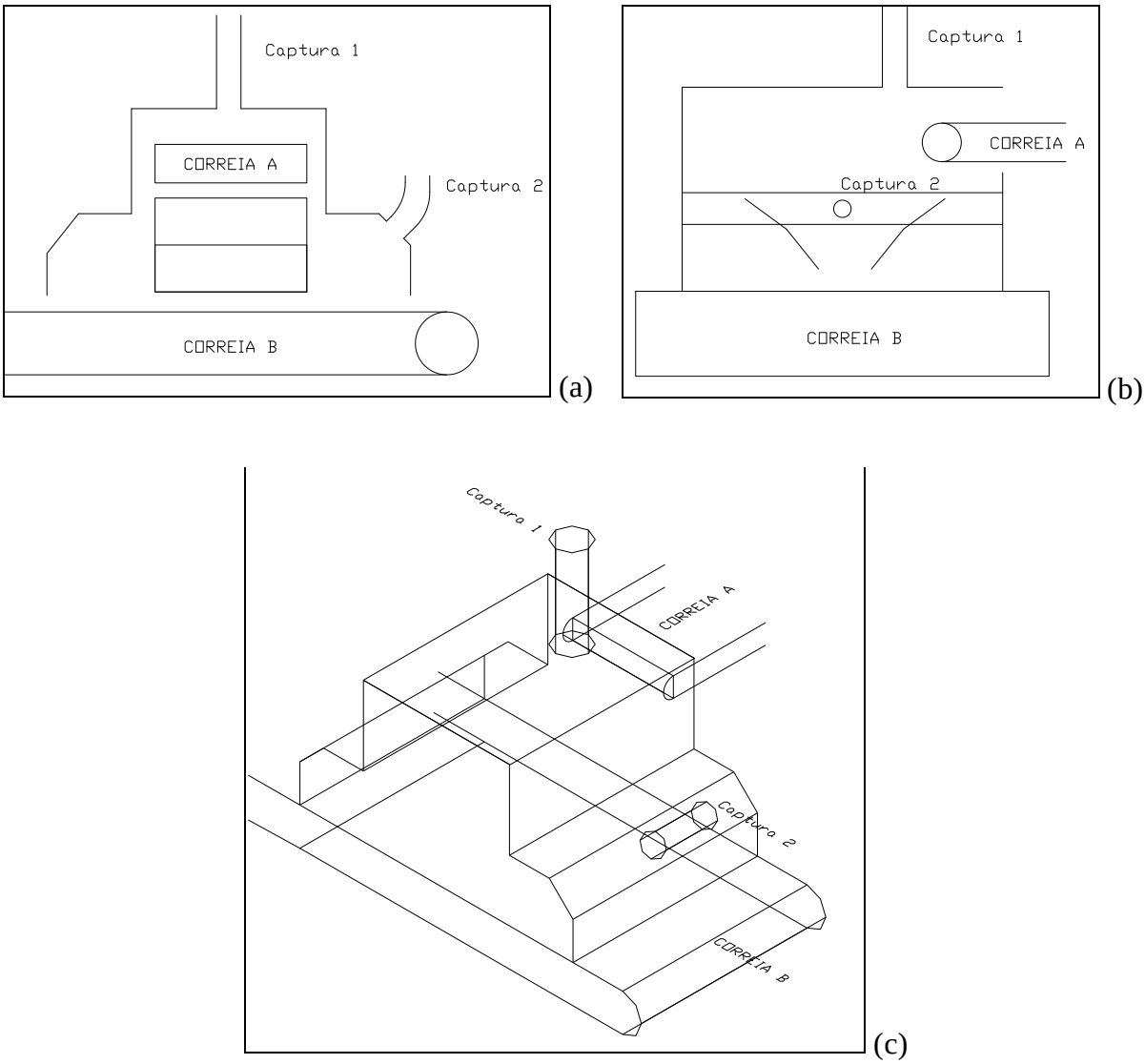


Figura 4-10 – (a) Vista lateral do captor do ponto de emissão da Região D; (b) Corte do captor do ponto de emissão da Região D e (c) Isometria do captor

4.2.4 Região D: Correia de Alimentação do moinho de Clínquer

A correia transportadora que carrega o clínquer do ponto de transferência de correias até o silo do moinho de bolas possui uma cobertura com a correia transportadora com orifícios para a saída de ar. Esta configuração foi instalada para que o clínquer pudesse passar por um processo de desumidificação durante a passagem pela correia. Um jato de ar quente passa, a cada período de tempo, pelo material e sai pelos orifícios da cobertura. Ao ser aplicado o ar, uma quantidade de particulado é arrastada pelo fluxo.

Uma opção para este ponto seria promover captura do ar através de um sistema de exaustão que envolvesse todo o comprimento da correia. Porém, o sistema de exaustão funcionaria continuamente, enquanto as emissões ocorrem periodicamente, e devido a uma corrente de ar.

Nesta região é possível considerar a necessidade de implantação de um novo sistema de desumidificação, que passe a emitir menor quantidade de particulado ou que tenha uma emissão mais pontual e constante, sendo assim de mais fácil controle.

4.2.5 Cuidados Adicionais

Durante as operações rotineiras, deve-se atentar para o estado de conservação dos equipamentos e estruturas, assim como promover, de acordo com o indicado, a manutenção corretiva e preventiva do sistema.

Para reconhecer os pontos em que a empresa deve e pode melhorar, mesmo com simples atitudes, os funcionários devem ser capacitados através de cursos sobre como se dá o transporte de particulado, os conceitos básicos. Assim, os funcionários devem reconhecer os problemas para que sejam feitos reparos ou melhorias.

(a)

(b)

Figura 4-11 – (a) Aberturas deixadas na correia de transferência de clinquer podendo ocasionar a umidificação do material; (b) O captor enclausurante da tremonha está com grandes aberturas em sua estrutura podendo ocasionar a perda de matéria por dispersão através destas.

4.3 DIMENSIONAMENTO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS E ANÁLISE QUANTITATIVA

Nesta seção serão expostos os resultados encontrados a partir do dimensionamento das partes constituintes do sistema de controle de poluição dos cenários propostos para a Região B, conforme classificação realizada na seção 3.1.5. Os pontos presentes nesta região, como já explicado, foram o foco para as análises quantitativas do estudo de caso.

Para cada cenário serão mostrados: forma do captor enclausurante projetado, traçado das tubulações e características de escoamento, ventilador escolhido e respectiva potência, somatório das perdas de carga envolvidas, cálculo das emissões de particulado, dimensões e eficiências dos equipamentos de controle pertinentes. Conclui-se com a estimativa dos custos de compra, implantação, operação e manutenção ao longo de um período determinado de tempo.

O dimensionamento das partes foi elaborado para os pontos de emissão da região B, declarada na seção de caracterização do estudo de caso. Para cada um dos três cenários propostos os itens diferenciais são o sistema de dutos, equipamentos de controle e ventilador. Assim, os captores foram projetados de forma singular sendo aplicados para as quatro diferentes situações descritas.

A Tabela 4-1 apresenta os equipamentos de controle utilizados em cada cenário e os pontos de captação do ar a ser tratado nos mesmos.

Tabela 4-1– Pontos de captação e equipamentos referentes aos quatro cenários propostos

	Equipamentos de controle propostos	***Pontos de captação***
Cenário I	1 Ciclone	E1, E2 e E3
Cenário II – A	1 Filtro novo	E1, E2 e E3
Cenário II – B	1 Filtro novo	E1 e E2
	1 Filtro antigo	E3
Cenário III	1 Filtro novo, seguido de 1 ciclone	E1, E2 e E3

4.3.1 Características do captor enclausurante do ponto de emissão E1

A forma do captor enclausurante foi elaborada levando-se em consideração todas as estruturas de sustentação da fonte e objetivando manter as funcionalidades durante a operação. A Figura 4-12 expõe as formas das placas que compõem o captor referente ao sistema de captura da

fonte E1. Adicionalmente às imagens das placas vista plana pode-se considerar uma visão isométrica do captor como mostrado na Figura 4-13 permitindo uma melhor compreensão por parte do leitor da sua forma e localização.

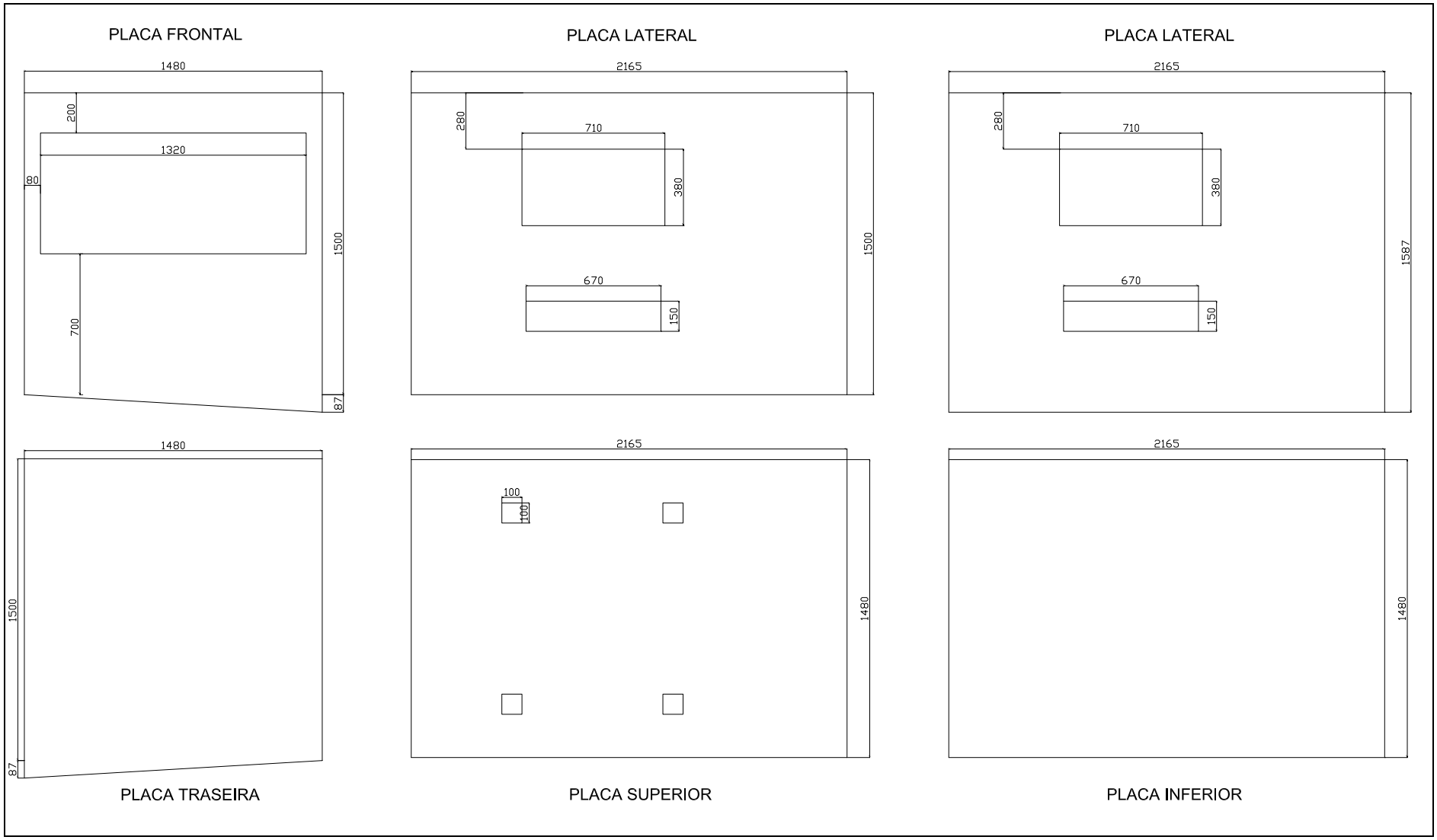


Figura 4-12 – Formato das chapas do captor enclausurante do ponto de emissão E1 da Região B.

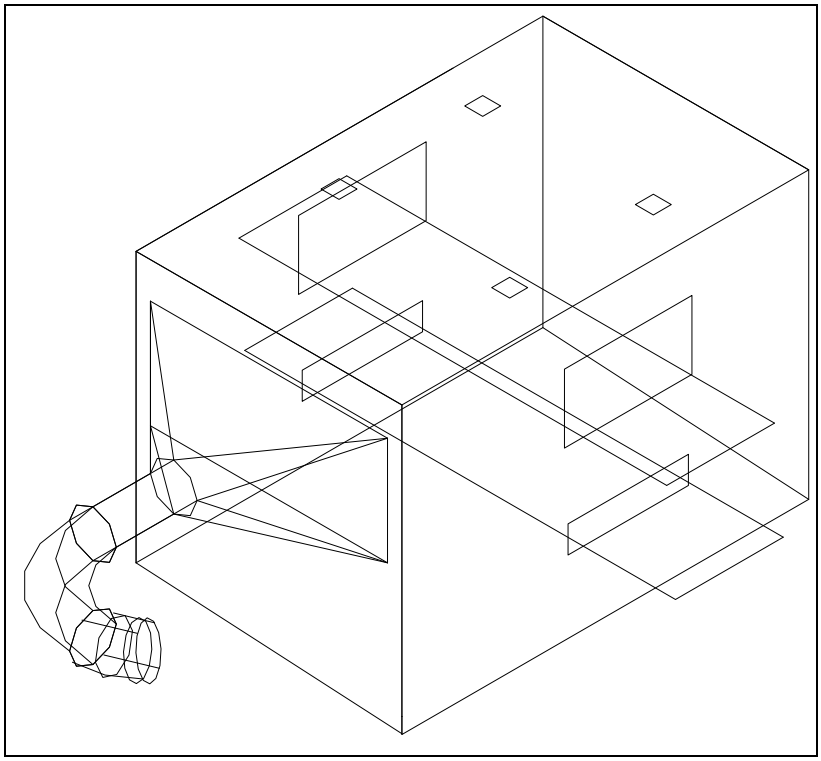


Figura 4-13 – Isometria do captor enclausurante do ponto de emissão E1 da Região B.

Conforme pode ser observado na imagem exposta na Figura 4-13 o captor enclausura a fonte ao máximo permitido. Além da abertura para saída da tubulação de exaustão, notam-se algumas aberturas indispensáveis para o funcionamento das operações na correia transportadora. Nas placas laterais as aberturas permitem a passagem das correias, na placa traseira à estrutura do rolo imantado provoca a construção de outra abertura e por fim, na placa superior, pequenas aberturas são notadas devido aos cabos de sustentação do rolo citado.

A partir da definição da forma do captor a vazão de exaustão foi calculada com base na área das aberturas do captor enclausurante e na velocidade de captura adotada conforme referência específica. A vazão de exaustão, calculada com base na Equação 2.2 para a fonte E1 tem o valor de:

$$Q = 1{,}20\ {m^3}/{s} = 4280\ {m^3}/{h}$$

Os valores intermediários utilizados para o cálculo da vazão de exaustão como a velocidade de captura e somatório das áreas abertas do captor estão dispostos no memorial de cálculo presente no Apêndice A.1.

O captor possui duas regiões características importantes para o seu funcionamento. A primeira é a porta de inspeção projetada para a placa traseira objetivando a adequação da nova estrutura aos procedimentos de operação e manutenção. Outra porta de inspeção foi projetada

para a placa inferior. Tal placa é inclinada em 5º, principalmente devido às características da fonte, e tem importante função de direcionar as partículas sedimentadas para uma região de coleta. A portinhola, então, serve para a retirada deste material. Possivelmente este material coletado tem condições de ser reaproveitado no processo, se o mesmo não sofrer algum tipo de ação que comprometa a sua disponibilidade de reutilização como entrar em contato com fontes úmidas.

A saída do captor tem angulação de 45º segundo uma tomada de ar tronco-piramidal e suas características de perda de carga são calculadas conforme os coeficientes demonstrados na Tabela 2-10. As chapas que compõem o captor são chapas de aço grossas, de espessura igual a 15 mm. Conforme descrito na fundamentação teórica deste estudo a bitola das chapas do captor deve ser dimensionada dois pontos mais espessa que a dos dutos correspondentes.

As características do captor projetado permitem que o clínquer que entra em suspensão permaneça em seu interior, sedimentando-se, ou que seja levado junto à corrente de sucção do ar para dentro das tubulações dos sistemas de ventilação. Posteriormente este material succionado será retirado do ar permitindo a obtenção de um fluxo de ar limpo para a atmosfera.

Os custos de compra do material para a construção dos captores estão diretamente relacionados ao volume e peso final que possuem as chapas. O preço das chapas é fornecido pelas empresas especializadas de acordo com a espessura e o material. Assim, o custo final de compra e construção do captor enclausurante da fonte de emissão E1 é de:

$$C_{CAPTOR_E1} = R\$1050{,}00$$

Para o cálculo do valor final do custo das chapas do captor foi orçado separadamente o valor de cada placa. Estão incluídos nos orçamento os custos da tomada de ar troco-piramidal e da montagem das chapas.

4.3.2 Características do captor enclausurante do ponto de emissão E2

De forma diversa ao captor enclausurante da fonte de emissão E1, a fonte E2 já possui sistema de exaustão instalado em que o ar poluído é tratado pelo filtro de mangas existente. O captor da fonte E2 é mais complexo que o captor da fonte E1. A estrutura de funcionamento da fonte não permite o ideal enclausuramento como foi projetado para a fonte E1. A matéria-prima, mais especificamente, o clínquer, sai da tremonha e sofre a queda até o contato com a correia transportadora C1.

Este tipo de procedimento provoca considerável dispersão de particulado, esta podendo alcançar o ambiente. O captor desta fonte não será projetado novamente, mas tão somente a

sua vazão de exaustão. De acordo com as áreas abertas analisadas no captor e da velocidade de captura, foi possível o cálculo da vazão de exaustão para o ponto de emissão E2, a partir da Equação 2.2 sendo igual à:

$$Q = 1{,}60\ {m^3}/{s} = 5760\ {m^3}/{h}$$

Esta vazão é bem similar à projetada para o ponto E1 em que as tubulações possuirão o mesmo diâmetro de saída da boca do captor. As modificações propostas para o captor E2 estão relacionadas à localização da tomada de ar para exaustão. A tomada de ar atual é localizada muito acima do ponto de queda do material. Assim, a pluma de poluentes ascendente antes de chegar a tomada de ar encontra as aberturas e frestas existentes saindo à atmosfera. A comparação das mudanças de localização das tomadas de ar está disposta no Figura 4-14. A nova tomada de ar projetada é mais próxima ao encontro do clínquer com a correia transportadora tornando mais eficiente o processo de captura do ar poluído.

Assim como explicado no item anterior, esta exposição dos resultados propostos para a fonte de emissão E2 é válida para todos os cenários de alternativas de melhoria.

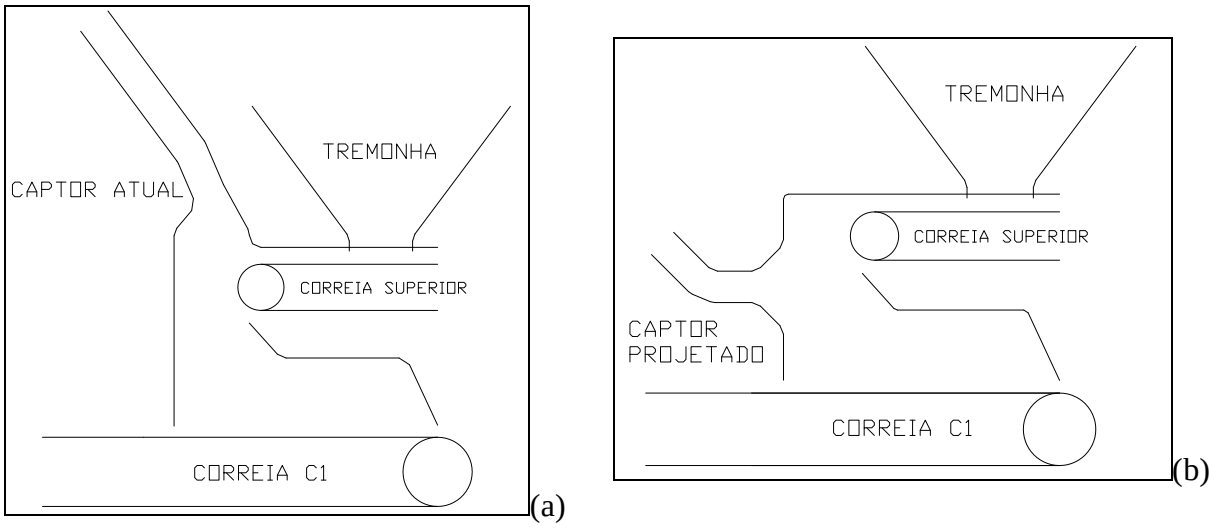


Figura 4-14 – Forma atual (a) e melhorias propostas (b) no captor de exaustão do ponto de emissão E2.

4.3.3 Características do sistema de controle de poluição do Cenário I

O Cenário I tem como proposta principal de alternativa de controle de particulado a instalação de um ciclone para o tratamento das menores vazões, provenientes dos captores de menor porte. Sendo assim, a vazão de exaustão da fonte E3 será direcionada para o filtro de mangas já existente. Este filtro e seu respectivo ventilador já se encontram instalados com as seguintes

especificações mostradas na Tabela 4-2. As especificações do filtro já instalado foram fornecidas pela manutenção da unidade industrial.

Tabela 4-2 – Características do sistema de despoeiramento instalado para o ponto de emissão E3.

Ventilador	
Vazão	5,60 m³/s
Potência	29 KW

Filtro de Mangas	
Área Filtrante	220 m²
Relação Ar-Pano	1,52 m³/m²/min
Perda de Carga	100 mmH_2O
Mangas (Quant./Diâmetro/Comprimento)	120/160 mm/3600 mm

O Cenário I possui três principais regiões para análise e dimensionamento do sistema de dutos provenientes dos captores e direcionados ao ciclone. Existem, portanto, as tubulações e acessórios: do captor E1 à junção situada próximo ao ciclone, do captor E2 à junção e da junção ao ciclone seguindo para o ventilador. Na Figura 4-15 é apresentada a planta superior da Região B com a localização destacada dos pontos de emissão E1, E2 e E3 assim como a localização do ciclone a ser implantado e do filtro de mangas já existente.

Por tal vista do desenho técnico pode-se notar o traçado elaborado para as tubulações e alguns dos órgãos acessórios utilizados. O ciclone está localizado bem próximo das instalações do captor E2 por motivos técnicos de logística de movimentação de caminhões e tratores dentro da fábrica. A extensão além dos limites da correia causada pela inserção do captor da fonte E1 é aceitável dentro dos parâmetros de operação das estruturas da fábrica.

No Apêndice B estão listadas as características gerais dos dutos dimensionados para o Cenário I da Região B, a citar: diâmetro, comprimentos, velocidade do ar nos dutos, quantitativo dos materiais utilizados, coeficientes de perda de carga das peças acessórias, especificação da perda de carga dos captores e totalização das perdas de carga localizada e distribuída.

O mesmo apêndice ainda demonstra as características de projeto do ciclone dimensionado para o cenário, tal como as dimensões e a perda de carga correspondente. A partir das características mostradas no Apêndice B, procede-se com a especificação do ventilador. A Tabela 4-3 mostra os dados básicos de vazão e altura útil de elevação necessários para a indicação do rendimento e da potência do ventilador após consulta a fabricantes especializados.

Tabela 4-3 – Características gerais e especificação do ventilador de exaustão projetado para o Cenário I da Região B.

Ventilador		
Vazão	2,8	m^3/s
Altura útil de elevação	134,52	mmH_2O
Peso Específico do Ar	1,176	kgf/m^3
Rendimento		Fabricante

Potência	Fabricante

A vazão do ventilador é a mesma que passa através do ciclone e a altura útil de elevação é o somatório das perdas de carga distribuídas, localizadas, perdas na entrada do captor e dos equipamentos de controle. O rendimento e a potência do ventilador serão especificados mais adiante, pois foram obtidos diretamente com o fabricante consultado.

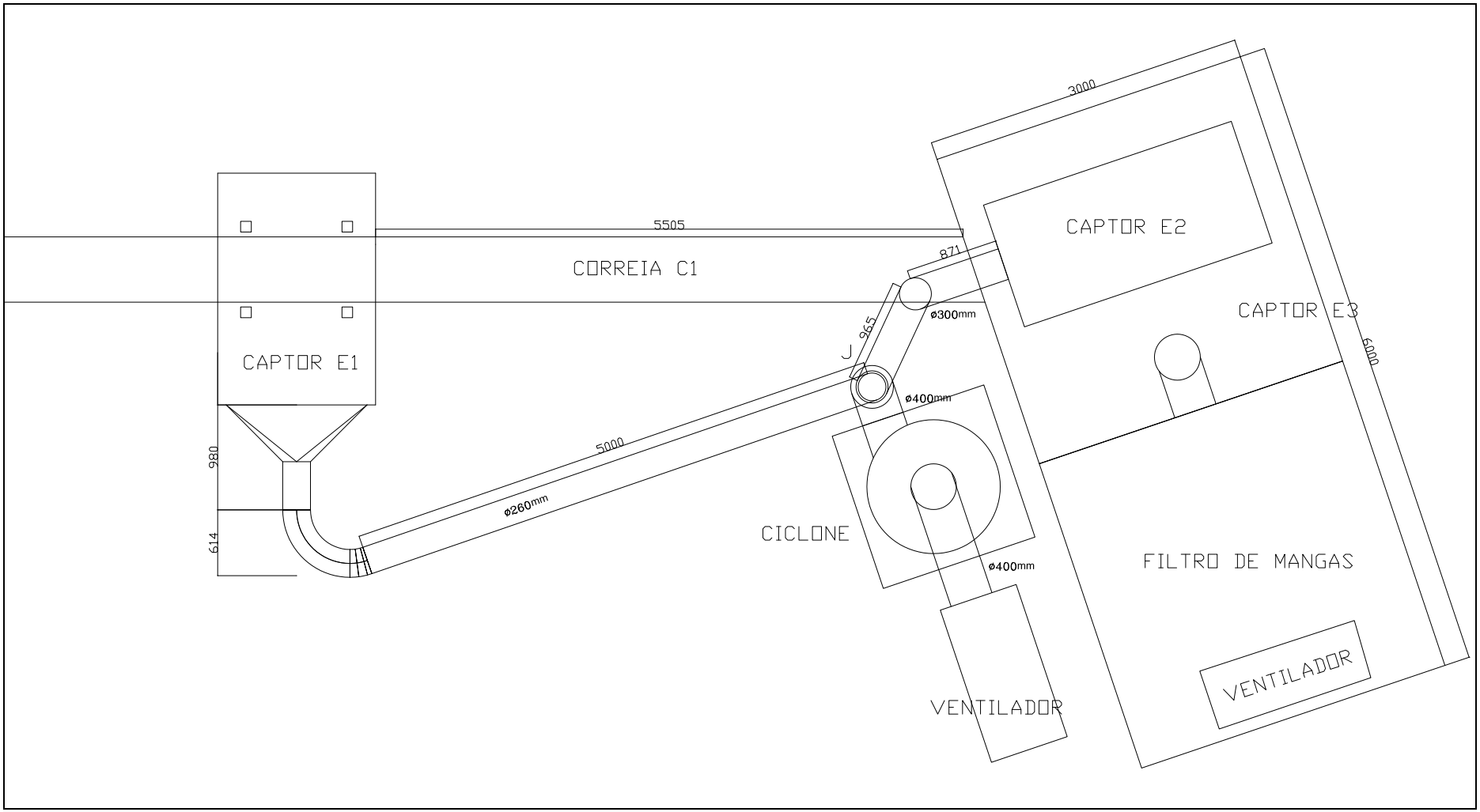


Figura 4-15 – Sistema de Ventilação do Cenário I da Região B.

Cabe salientar que na definição da altura útil de elevação para sistemas de dutos que possuem junções de diferentes trechos considera-se no somatório final somente a maior perda de carga entre os dois trechos que se unem. Neste caso específico, entre os trechos E1 – J e E2 – J, foi considerada somente a perda de carga referente ao primeiro. As especificações finais do ciclone e do ventilador escolhidos para compra, estão demonstrados em item posterior no presente trabalho.

4.3.4 Características do sistema de controle de poluição do Cenário II

O Cenário II propõe o dimensionamento somente de filtros de mangas como alternativa de melhoria, diferente do Cenário I em que foi tratado do projeto de ciclone. Anteriormente a comparar este cenário com os demais, foram diagnosticadas duas configurações com filtro de mangas conforme explicado na seção anterior. Lembrando, que a primeira mostra um filtro de mangas dimensionado para receber as vazões dos captores E1 e E2 mantendo o filtro de mangas existente para tratar a vazão de exaustão de E3. A outra opção é do projeto do filtro de mangas para tratar as vazões provenientes dos três captores, substituindo o filtro existente.

A Figura 4-16 expõe o projeto conceitual dos traçados das tubulações e localizações dos equipamentos projetados para a configuração proposta para o Cenário II-A. Considerando a situação com somente um filtro de mangas o ponto de encontro das tubulações está situado bem próximo ao captor E2 a partir de onde a tubulação principal sobe direcionando-se à primeira junção denominada J. Da junção J a tubulação sofre expansão devido ao aumento da vazão e se liga à junção K expandindo ainda mais a tubulação. O último trecho liga a junção K até o filtro de mangas e em seguida para o ventilador.

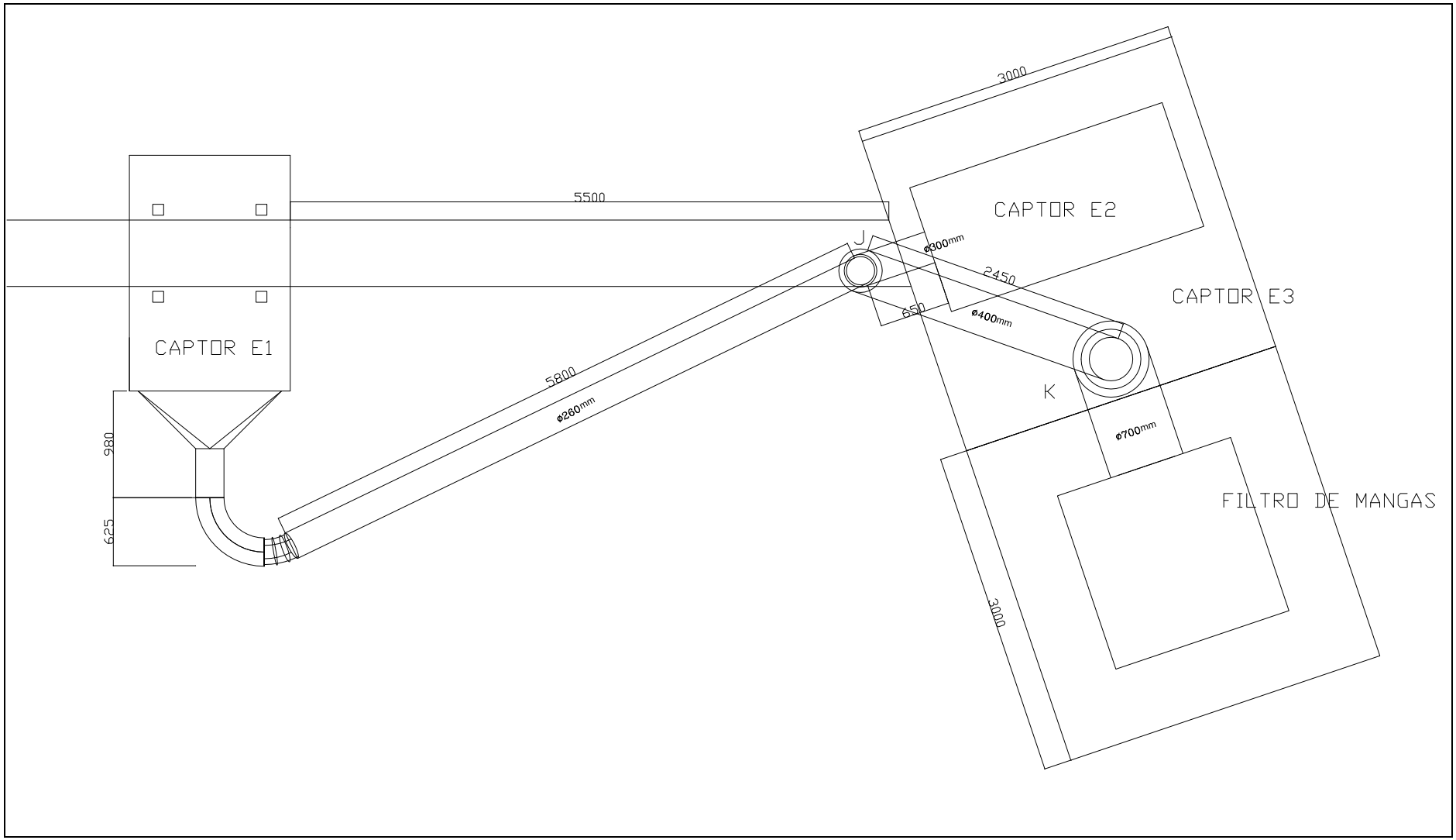


Figura 4-16 –Sistema de Ventilação do Cenário II-A da Região B

O Apêndice C apresenta os dados característicos dos dutos e dos equipamentos projetados para o Cenário II-A da Região B. Observando o Apêndice C, notam-se os valores de vazão de cada trecho assim como os respectivos diâmetros comerciais adotados. A perda de carga unitária e a definição das peças acessórias permitem o cálculo das perdas de carga distribuída e localizada. A Tabela 4-4 mostra as características básicas calculadas para o filtro de mangas e para o ventilador do Cenário II-A. Na tabela referente ao filtro de mangas nota-se que os dados de perda de carga e dimensões do filtro são fornecidos pelo fabricante, devido a estas serem características bastante empíricas e fruto de experiência dos estudiosos da área. A relação ar-pano é inicialmente indicada, mas pode sofrer modificações a depender das indicações fornecidas pelo fabricante. Estes dados serão indicados em item específico que trata das especificações finais dos equipamentos.

Tabela 4-4 – Dados básicos do filtro de mangas e do ventilador de exaustão do Cenário II-A da Região B.

Filtro de Mangas		
Área Filtrante	336	m²
Relação Ar-Pano	1,50	m³/m²/min
Perda de Carga	Fabricante	
Mangas:		
Quantidade	285	
Diâmetro/Comprimento	125/3000	mm
Dimensões do Filtro	Fabricante	

Ventilador		
Vazão	8,4	m³/s
Altura útil de elevação	196,8	mmH_2O
Peso Específico do Ar	1,176	kgf/m³
Rendimento	Fabricante	
Potência	Fabricante	

A segunda configuração, o Cenário II-B, está disposta na Figura 4-17. Neste caso, assim como no Cenário I, nada é modificado na captação E3 e no filtro de mangas já existente. Na configuração da parte inferior acontecerá de forma bem semelhante ao que aconteceu no cenário descrito anteriormente.

As características do Cenário II-B estão dispostas no Apêndice D. A Tabela 4-5 mostra os dados básicos do filtro de mangas e do ventilador de exaustão do Cenário II-B. Os dados expostos nesta tabela foram calculados conforme o executado para os demais cenários. Cabe ressaltar que o controle das emissões do ponto E3 será realizado pelo filtro de mangas já existente, cujos dados principais foram expostos na Tabela 4-2.

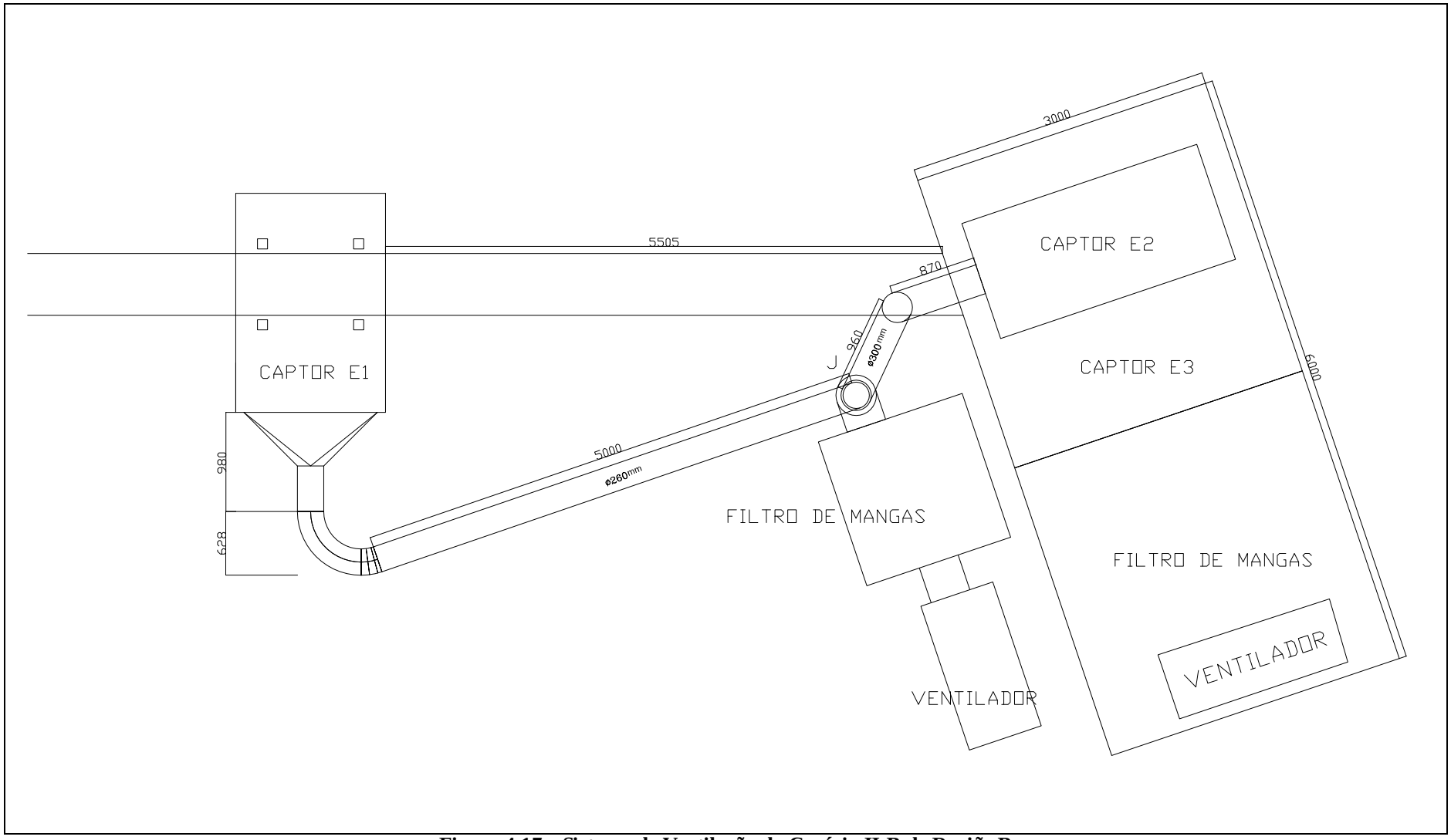


Figura 4-17 – Sistema de Ventilação do Cenário II-B da Região B

Tabela 4-5 – Dados básicos do filtro de mangas e do ventilador de exaustão do Cenário II-B da Região B.

Filtro de Mangas		
Área Filtrante	112	m²
Relação Ar-Pano	1,50	m³/m²/min
Perda de Carga	Fabricante	
Mangas:		
Quantidade	95	
Diâmetro/Comprimento	125/3000	mm
Dimensões do Filtro	Fabricante	

Ventilador		
Vazão	2,8	m³/s
Altura útil de elevação	187,4	mmH_2O
Peso Específico do Ar	11,76	N/m³
Rendimento	Fabricante	
Potência	Fabricante	

A configuração com melhor viabilidade técnica e econômica será determinada conforme metodologia de avaliação dos custos de implantação, operação e manutenção, além da eficiência do tratamento dos sistemas propostos. O filtro de mangas do cenário II-A demandará um grande custo inicial, mas possivelmente um menor gasto energético ou de manutenção. O Cenário II-B apesar de indicar um menor custo de investimento pode possuir um custo mais elevado de operação, somando os dois filtros. Tais análises serão realizadas no capítulo de avaliação econômica e ambiental dos cenários.

4.3.5 Características do sistema de controle de poluição do Cenário III

O Cenário III diferencia-se dos demais anteriores por propor a aplicação de dois equipamentos de controle em série para a formação de uma eficiência mais elevada na retirada dos poluentes. Na Figura 4-18 notam-se os traçados adotados para o sistema de dutos do Cenário III mostrando com mais ênfase a localização das junções, noção dos diâmetros dos dutos em relação as demais partes e localização dos equipamentos de controle.

Para a adequação do sistema de dutos à esta configuração foi necessária a admissão de duas junções com derivações. O ciclone está localizado em um aparato estrutural especial sobre o solo. O filtro de mangas situa-se no segundo pavimento da estrutura assim como o ventilador de exaustão a ele relacionado.

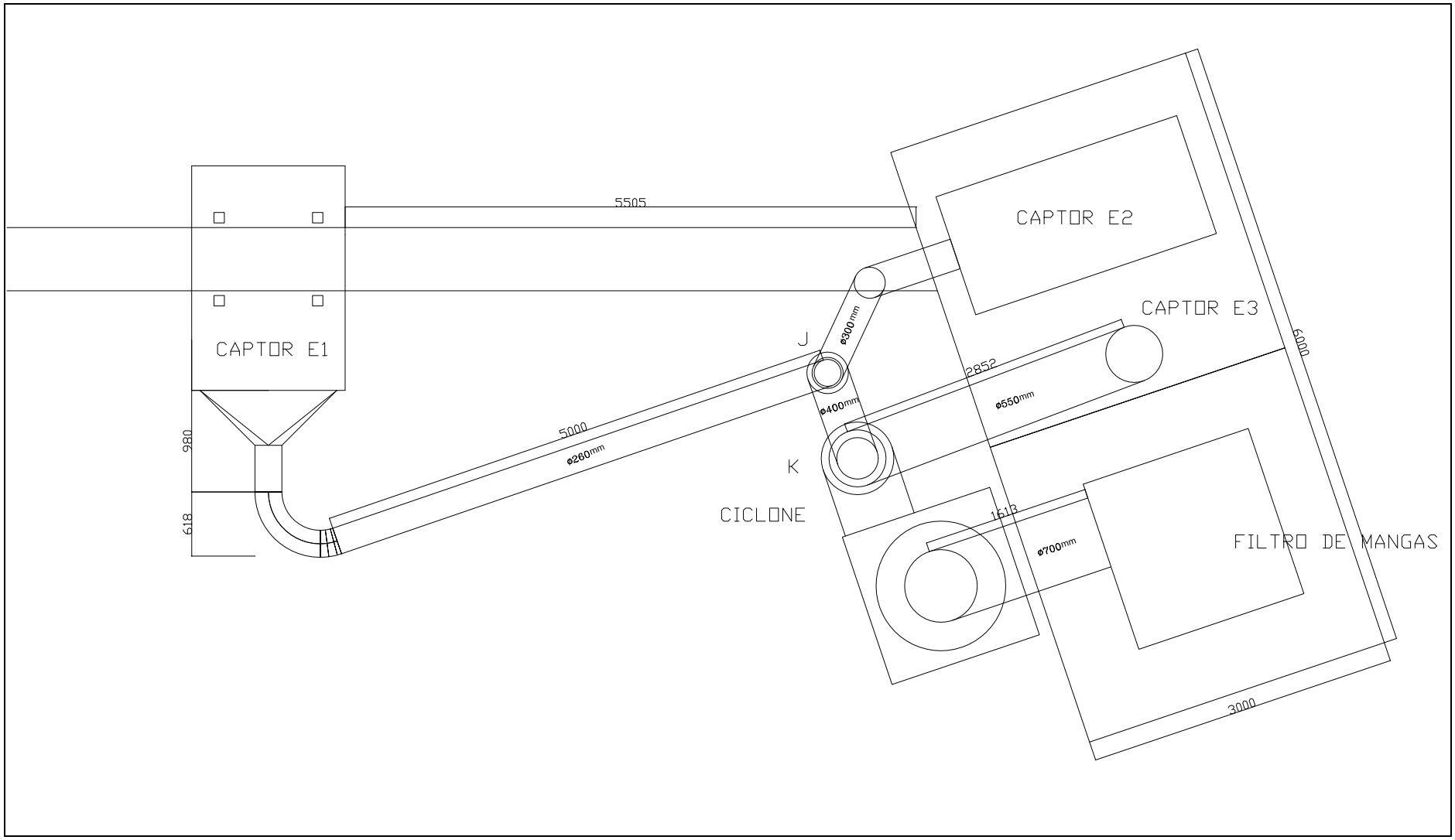


Figura 4-18 – Sistema de ventilação do Cenário III da Região B.

O Apêndice E mostra as características do sistema de dutos para cada trecho considerado, inclusive os valores de perda de carga úteis ao cálculo da potência requerida pelo ventilador.

A Tabela 4-6 mostra as características básicas dos equipamentos de controle projetados segundo a fundamentação teórica embasada e os dados técnicos do ventilador já considerado após análise conjunta com o fabricante. Os mesmos dados do filtro de mangas são fornecidos pelo fabricante assim como explicado nos cenários anteriores.

Tabela 4-6 – Dados básicos do filtro de mangas e do ventilador de exaustão do Cenário III da Região B.

Filtro de Mangas		
Área Filtrante	336	m²
Relação Ar-Pano	1,50	m³/m²/min
Perda de Carga	Fabricante	
Mangas:		
Quantidade	285	
Diâmetro/Comprimento	125/3000	mm
Dimensões do Filtro	Fabricante	

Ventilador		
Vazão	8,4	m³/s
Altura útil de elevação	250	mmH_2O
Peso Específico do Ar	11,76	N/m³
Rendimento	Fabricante	
Potência	Fabricante	

4.3.6 Especificação das partes dos sistemas e seus custos associados

A presente seção tem por objetivo expor as características finais dos equipamentos de controle do sistema de despoeiramento cujos resultados estão dispostos nos itens anteriores deste capítulo. Tais características foram obtidas junto aos fabricantes especializados destes equipamentos durante o processo de obtenção dos custos.

Os custos de compra dos dutos, equipamentos de controle e ventiladores, assim como os custos associados a operação e manutenção também estarão expostos nesta seção. A concentração de poluentes na saída chaminé depois dos ventiladores é outro dado de suma importância descrito neste item. A especificação do ventilador é dependente, dentre outras coisas, de tal informação.

Nos itens anteriores foram expostos os resultados obtidos a partir da aplicação da teoria de equipamentos de controle existente. Os resultados obtidos para os captores e diâmetro de tubulações já são projetados comercialmente. Os equipamentos de controle, principalmente, são os projetos em que se observam algumas divergências entre o projetado e o escolhido para compra. As divergências ocorrem devido a aplicação da teoria ser baseado em valores médios, o que pode não ocorrer na prática. A experiência dos fabricantes é essencial no momento de especificar um equipamento de controle.

No caso dos ciclones projetados as diferenças são visíveis nas suas dimensões gerais e na perda de carga calculada. No filtro de mangas o fabricante indica a admissão de outros valores para a relação ar-pano, o que conseqüentemente modifica os valores de área de filtragem, quantidade de mangas e dimensões do filtro.

No caso de ventiladores de exaustão são fornecidos ao fabricante dados de vazão, altura de elevação, concentração de particulado no ar que passa por ele, temperatura do fluido e respectivo peso específico.

Os dados fornecidos a seguir foram obtidos através de pesquisa em fabricantes especializados de equipamentos de sistemas de ventilação e de controle de poluição atmosférica. Os custos associados à compra e instalação de cada está incluído nos resultados. Para tal, da Tabela 4-7 à Tabela 4-10 estão resumidas as principais características e os respectivos custos dos equipamentos de controle e ventiladores utilizados em todos os cenários proposto para a Região B. Os dados de concentração de poluentes também estão incluídos nas tabelas citadas. A concentração final de poluentes efluente aos sistemas projetados foi calculada com base na Equação 3.1, aplicando adequadamente os valores de emissão, vazão e eficiência dos equipamentos de controle utilizados.

Tabela 4-7 – Características Finais do Equipamento de Controle e Ventilador do Cenário I da Região B.

Ciclone		
Vazão	2,8	m³/s
Perda de Carga	80	mmH_2O
Dimensões		
D	1,12	m
H	0,90	m
W	0,40	m
D_e	0,85	m
S	0,95	m
L_b	1,90	m
L_c	2,25	m
D_d	0,45	m
Custo de Implantação	R$ 32.000,00	

Ventilador		
Temperatura do Ar	35	°C
Altura Útil	170	mmH_2O
Potência	5,29	KW
Concentração de Poluentes	808	mg/Nm³
Especificação do Ventilador	Ventilador centrífugo, simples sucção, construção II/1 (acoplamento eixo do motor com eixo do ventilador através de luva flexível, dois mancais de rolamento à graxa).	
Custo de Implantação	R$ 25.000,00	

Tabela 4-8 – Características Finais do Equipamento de Controle e Ventilador do Cenário II-A da Região B.

Filtro de Mangas			Ventilador		
Vazão	8,4	m³/s	Temperatura do Ar	35	°C
Perda de Carga	100	mmH_2O	Altura Útil	197	mmH_2O
Área Filtrante	397	m²	Potência	19,40	KW
Relação Ar-Pano	1,27	m³/m²/min			
			Concentração de Poluentes	27	mg/Nm³
Mangas:					
Quantidade	337		Especificação do Ventilador	Ventilador centrífugo, simples sucção, construção II/1 (acoplamento através de luva flexível, dois mancais de rolamento à graxa).	
Diâmetro/Comprimento	125/3000	mm			
Dimensões do Filtro: 5280 x 2400 x H:7000					
Custo de Implantação	R$ 182.000,00		Custo de Implantação	R$ 45.000,00	

Tabela 4-9 – Características Finais do Equipamento de Controle e Ventilador do Cenário II-B da Região B.

Filtro de Mangas			Ventilador		
Vazão	2,8	m³/s	Temperatura do Ar	35	°C
Perda de Carga	100	mmH_2O	Altura Útil	187	mmH_2O
Área Filtrante	170	m²	Potência	5,29	KW
Relação Ar-Pano	0,99	m³/m²/min			
			Concentração de Poluentes	54	mg/Nm³
Mangas:					
Quantidade	144		Especificação do Ventilador	Ventilador centrífugo, simples sucção, construção II/1 (acoplamento através de luva flexível, dois mancais de rolamento à graxa).	
Diâmetro/Comprimento	125/3000	mm			
Dimensões do Filtro: 2640 x 2400 x H:7000					
Custo de Implantação	R$ 93.330,00		Custo de Implantação	R$ 25.000,00	

Tabela 4-10 – Características Finais do Equipamento de Controle e Ventilador do Cenário III da Região B.

Filtro de Mangas		
Vazão	8,4	m³/s
Perda de Carga	100	mmH_2O
Área Filtrante	397	m²
Relação Ar-Pano	1,27	m³/m²/min
Mangas:		
Quantidade	337	
Diâmetro/Comprimento	125/3000	mm
Dimensões do Filtro:		
5280 x 2400 x H:7000		
Custo de Implantação	R$ 182.000,00	

Ventilador		
Temperatura do Ar	35	°C
Altura Útil	299	mmH_2O
Potência	33,21	KW
Concentração de Poluentes	11	mg/Nm³
Especificação do Ventilador	Ventilador centrífugo, simples sucção, construção II/1 (acoplamento eixo do motor com eixo do ventilador através de luva flexível, dois mancais de rolamento à graxa).	
Custo de Implantação	R$ 45.000,00	

Ciclone		
Vazão	8,4	m³/s
Perda de Carga	80	mmH_2O
Dimensões		
D	1,25	m
H	1	m
W	0,4375	m
D_e	0,9375	m
S	1,0625	m
L_b	2,125	m
L_c	2,5	m
D_d	0,5	m
Custo de Implantação	R$ 60.000,00	

Os custos de implantação, expostos nas tabelas anteriores, foram obtidos diretamente através de consulta a fabricantes especializados, sendo adotados os valores fornecidos pela Euroair Brasil. Adicionalmente aos custos de implantação dos equipamentos de controle e ventiladores devem ser contabilizados os custos de implantação de dutos e acessórios. Cabe relembrar que o custo das placas do captor foi fornecido no item de exposição destes resultados específicos.

O cálculo dos custos de compra e instalação dos dutos e acessórios do sistema de ventilação é realizado a partir do preço por quilograma do material, ainda estando ligado ao diâmetro destes dutos. O Apêndice F mostra detalhadamente os custos finais de compra e montagem dos dutos e acessórios. Os gastos estão divididos por cenários. As espessuras dos dutos foram admitidos segundo as dimensões normalizadas de acordo com as Normas ANSI B.36.10 e B.36.19 cujos valores principais estão dispostos no Anexo 2. O preço por quilograma de material foi admitido como média para o valor de R$ 14,00/kg. Sendo assim, a partir da espessura do material conhecendo-se o comprimento calcula-se o peso. Conseqüentemente multiplicando pelo valor indicado por fabricante especializado obtém-se o custo de compra e instalação dos dutos.

Além destes, caracterizados como custos de investimento, existem os custos anuais referentes às atividades de operação e manutenção. Os custos de operação foram considerados, para a análise posterior de custos, como sendo o valor referente ao consumo de energia elétrica dos equipamentos constituintes. Para tal será tomado como base para o cálculo dos custos de operação, a potência requerida pelo ventilador de exaustão. Considerar-se-á o valor de energia estabelecido para consumidores industriais fornecido pela concessionária de energia local. Sendo assim, para cada kWh de energia utilizada calcula-se o valor de R$ 0,212.

A manutenção dos sistemas de ventilação e de controle está relacionada às intervenções necessárias em dutos, acessórios, ventiladores e equipamentos de controle. Através de uma análise preliminar simplificada notou-se que o custo de compra e troca das mangas filtrantes foi mais relevante comparativamente aos demais. Neste caso, serão adotados os valores unitários médios das mangas e o prazo estabelecido para a troca descrita.

A Tabela 4-11 mostra a compilação dos gastos operação e manutenção, incluído os valores chave utilizados para a sua determinação. Cabe ressaltar que tais gastos são considerados anualmente.

Tabela 4-11 – Custos de operação e manutenção dos sistemas de ventilação e de controle da poluição atmosférica.

Operação		
Valor da Energia Elétrica	0,212	R$/kWh
Tempo de Funcionamento Médio do Sistema	6	h/dia
Cenário I		
Potência Total Requerida	34,29	kW
Consumo de Energia Elétrica Anual	75095	kWh
Custo de Operação	R$ 16596,00	
Cenário II-A		
Potência Total Requerida	48,40	kW
Consumo de Energia Elétrica Anual	105996	kWh
Custo de Operação	R$ 23425,00	
Cenário II-B		
Potência Total Requerida	34,29	kW
Consumo de Energia Elétrica Anual	75095	kWh
Custo de Operação	R$ 16596,00	
Cenário III		
Potência Total Requerida	52,21	kW
Consumo de Energia Elétrica Anual	114339	kWh
Custo de Operação	R$ 25269,00	

Manutenção		
Custo Unitário das Mangas	R$ 50,00	
Cenário I		
Intervalo de Trocas	1,0	ano
Quantidade de Mangas	120	
Custo Anual	R$ 6000,00	
Cenário II-A		
Intervalo de Trocas	1,0	ano
Quantidade de Mangas	336	
Custo Anual	R$ 16800,00	
Cenário II-B		
Intervalo de Trocas	1,0	ano
Quantidade de Mangas	264	
Custo Anual	R$ 13200,00	
Cenário III		
Intervalo de Trocas	1,5	Anos
Quantidade de Mangas	336	
Custo Anual	R$ 11200,00	

Analisando a Tabela 4-11, observa-se que os maiores custos anuais de operação pertencem ao Cenário III. Já os custos de manutenção são maiores no Cenário II-A, devido ao fato de que o filtro de manga associado a este cenário é o maior, superando inclusive o número de mangas dos dois filtros do Cenário II-B juntos. Os valores de custos dos sistemas propostos em cada cenário podem ser comparados através da Tabela 4-12 a seguir:

Tabela 4-12 – Custos envolvidos no projeto de cada cenário proposto, em reais.

	Cenário I	Cenário II-A	Cenário II-B	Cenário III
		Custo de investimento		
Captores	1.050,00	1.050,00	1.050,00	1.050,00
Dutos	10.323,00	12.850,00	10379,00	11.256,00
Acessórios	3.200,00	4.400,00	3.600,00	4.800,00
Ciclone	32.000,00	-	-	60.000,00
Filtro de Mangas	-	182.000,00	93.330,00	182.000,00
Ventilador	25.000,00	47.000,00	25.000,00	47.000,00
Custo total de investimento	**71.573,00**	**247.300,00**	**133.359,00**	**306.106,00**
		Custos rotineiros anuais		
Operação	16.596,00	23.425,00	16.896,00	25.269,00
Manutenção	6.000,00	16.800,00	13.200,00	11.200,00
Custos totais rotineiros	**22.596,00**	**40.225,00**	**29.796,00**	**36.469,00**

4.3.7 Comparação das alternativas propostas a partir das análises econômicas

Os cenários propostos possuem custos de investimento e operação variados, devido aos diferentes arranjos e equipamentos utilizados. Os benefícios gerados por cada um também varia. Cada conjunto possui uma eficiência de coleta de material diferente. Na Tabela 4-13, a seguir, são sintetizados os custos iniciais e rotineiros de cada cenário.

Tabela 4-13 – Custos de investimento e de operação e manutenção para cada cenário.

	Cenário I	Cenário II-A	Cenário II-B	Cenário III
Custo Total de Investimento (R$)	71.573,00	247.300,00	13.360,00	306.106,00
Custo Total Anual (R$)	22.596,00	40.252,00	29.796,00	36.469,00

Como dito anteriormente, os benefícios do sistema de despoeiramento são intangíveis. São dados pela eficiência de coleta de material, e das conseqüências positivas do controle. A avaliação dos benefícios é subjetiva, visto que uma opção pode ser a melhor do ponto de vista ambiental, mas demandar um custo não justificável ou inviável. Os benefícios serão limitantes quando não forem alcançadas as metas mínimas para atender a legislação.

Assim, foi escolhido o método dos custos anuais uniformes para o estudo econômico dos cenários propostos. A Tabela 4-14 mostra os valores das parcelas anuais totais, após amortização dos custos de instalação, para vários períodos de projeto.

Considerou-se uma taxa de 10% ao ano como custo de oportunidade dos investimentos realizados ao longo dos anos, isto é, outras alternativas poderiam ser viabilizadas com os recursos ora empregados neste projeto. Foi considerada a taxa de juros indicada, sendo esta um valor representativo para o contexto atual tendo uma relação com a taxa livre de risco no Brasil, a taxa SELIC. (GITMAN, 2006). A taxa de juros aplicada corrige os valores das parcelas. A Figura 4-19 mostra como os custos anuais uniformes variam com a vida útil considerada no projeto.

Tabela 4-14 – Valores do custo anual uniforme para cada cenário proposto, considerando taxa de juros de 10% ao ano.

		Custo Anual Uniforme (R$)			
		Cenário I	**Cenário II-A**	**Cenário II-B**	**Cenário III**
Período (anos)	**10**	34.244,25	66.436,39	51.499,70	77.090,74
	20	31.002,99	55.237,20	45.460,40	63.228,47
	30	30.188,46	52.422,83	43.942,72	59.744,86
	40	29.915,06	51.478,19	43.433,31	58.575,58

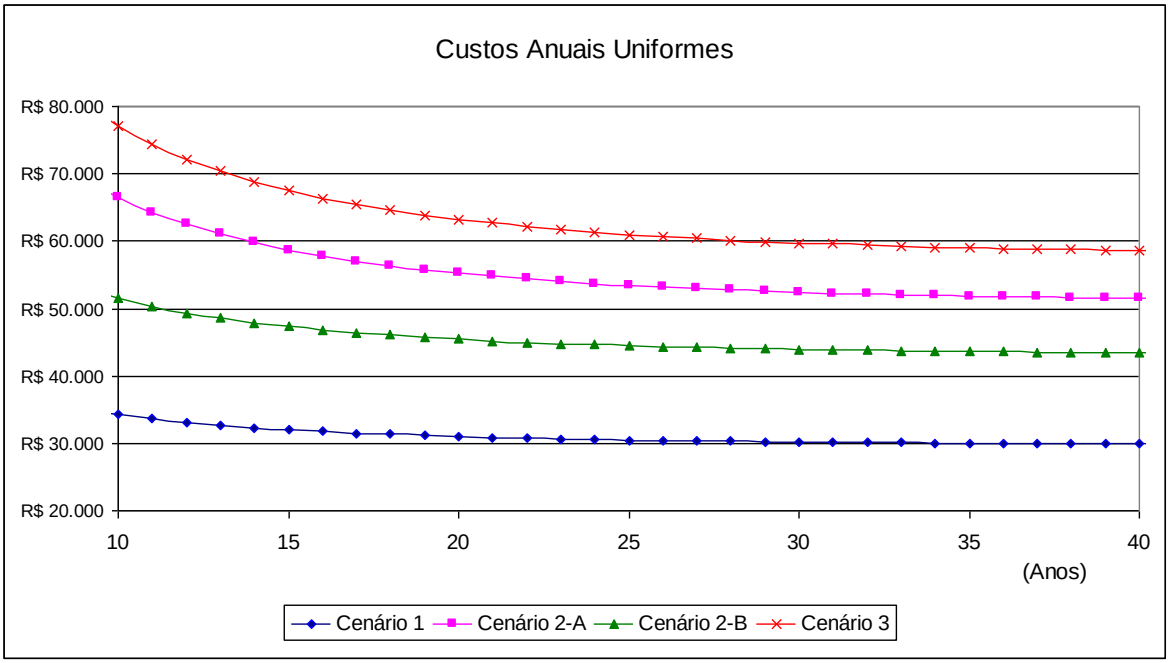


Figura 4-19 – Variação do custo anual uniforme com o período de projeto considerado. Taxa de juros de 10% ao ano.

A concentração do material na saída de cada sistema também varia, pois os conjuntos de equipamentos possuem diferentes eficiências. A Tabela 4-15 mostra, comparativamente, as concentrações finais de particulado no ar na saída do sistema de despoeiramento.

Tabela 4-15 – Concentrações do efluente final do sistema

Concentração de Particulado no ar efluente final (mg/Nm³)			
Cenário I	**Cenário II-A**	**Cenário II-B**	**Cenário III**
808,35	27	54	11

O Cenário I possui o menor custo anual uniforme, para qualquer período de projeto adotado. Por manter o filtro de manga atual da região da tremonha em funcionamento para o ponto de captação da cabine da tremonha, os custos de investimento são baixos. Além disso, o próprio ciclone tem um custo para compra mais baixo que os filtros de manga.

Outro fator vantajoso para esta configuração é que a manutenção do ciclone não é considerada no levantamento dos custos, por ser mínimo. O uso do ciclone é muito interessante quando se deseja recuperar material para o processo, por ser o particulado coletado mais puro e homogêneo.

Do ponto de vista econômico o Cenário I se apresenta como mais vantajoso, porém, como o ciclone não é um equipamento de grande eficiência, a emissão de particulado é grande em comparação com as outras opções. Assim, o controle pode não ser suficiente para que sejam atendidos os limites da legislação.

O Cenário III propõe um controle composto por ciclone e filtro em série, o que aumenta a eficiência da coleta, além de ser vantajoso para o reaproveitamento do material. Porém, a perda de carga do filtro praticamente não diminui com o pré-tratamento por ciclone, o que faz com que a perda de carga do filtro permaneça a mesma, e a perda de carga total contenha as perdas pontuais devido ao ciclone e filtro.

Além disso, os custos iniciais para este cenário englobam o ciclone e um novo filtro, capaz de suportar maior vazão. O custo total uniforme torna-se, então, elevado, sendo pouco viável em comparação com os outros. Englobando outros pontos na análise, deve-se considerar a existência do filtro atual, que pode ser realocado para outra posição, evitando novas compras.

O Cenário II-A e o Cenário II-B apresentam configurações apenas utilizando filtros de manga. Comparando-se os dois arranjos pelo método do custo anual uniforme (Tabela 4-14), conclui-se que o Cenário II-B, que inclui aquisição de um novo filtro e utilização do filtro antigo, apresenta-se como solução economicamente mais vantajosa.

O cenário II-A, apesar de ter o menor custo rotineiro, possui um maior custo de investimento (Tabela 4-14). Já o cenário II-B possui custos rotineiros maiores, porém um custo de investimento menor. Cabe ressaltar que no cenário II-A o filtro de manga atual não é utilizado, mas continua disponível para a empresa para o caso de novo ponto de controle, desde que sua capacidade seja suficiente.

O ponto do processo estudado não possui limite de emissão definido pela resolução CONAMA 382/06. Na indústria de cimento Portland, processos como queima em fornos e moagem do cimento possuem um limite de emissão de 50mg/Nm³, como mostrado na Tabela 2-3. Considerando este valor para comparação, observamos que o valor estimado para a emissão no cenário II-B ultrapassa um pouco o valor limite proposto. Já o cenário II-A possui um valor estimado para a emissão dentro do limite, com um intervalo desejável, o que pode ser de grande benefício caso a indústria tenha intenção de aumentar o volume de produção dentro do prazo definido como tempo de projeto. Assim, considera-se que o cenário II-A é o que apresenta maior viabilidade técnico-econômica, entre os cenários estudados.

Deve-se observar que os valores limites estabelecidos através da resolução CONAMA possuem dimensão de concentração. Isso permite, em alguns casos, que a emissão final possa ser diluída, e assim, que sejam alcançados os padrões definidos. Este artifício pode ser utilizado em casos em que os valores de emissão são próximos dos valores limites.

No caso em que os custos de diferentes opções de projeto sejam muito significativos, visto o porte do empreendimento, e o projeto viável economicamente não atender os limites por uma pequena diferença, deve-se considerar a possibilidade de implantação de tal projeto, usando-se de diluição do efluente, ou de flexibilidade do órgão ambiental, para a promoção do tratamento.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho atuou no diagnóstico e na elaboração de alternativas de melhoria para sistemas de ventilação e despoeiramento de uma unidade industrial de produção de cimento. Para a busca dos pontos de emissão realizaram-se variadas visitas à fábrica em que foram analisadas in loco, as problemáticas de poluição do ar.

Como aspectos de grande relevância percebidos no estudo podem ser citados a necessidade de conhecimento de grande variedade de informações para o dimensionamento dos sistemas e a possibilidade de indústrias em conformidade com a legislação ambiental aplicável buscarem a excelência ambiental a partir do desenvolvimento de operações de melhoria em seus processos.

O diagnóstico da unidade industrial resultou na determinação de seis principais regiões de emissão de material particulado na fábrica. Dentre as regiões indicadas em três delas, a citar:

- galpão de armazenamento de matéria prima;
- descarregamento de matéria prima e transporte;
- transferência de correias;

Os problemas de emissão em galpões, pilhas, descarregamento de materiais e transporte por correias são comuns em indústrias de minerais. Grande parte destas empresas possui dificuldades para se adequar sistemas de despoeiramento, principalmente as empresas de menor porte e menor verba. Muitas vezes os sistemas utilizados são insuficientes.

Neste estudo, foram necessárias proposições de alternativas de melhoria nos sistemas existentes, ou mesmo, o dimensionamento de novas intervenções a serem executadas. Todas as avaliações consideraram somente as emissões provenientes da movimentação de clínquer, dado que a escória de alto-forno não apresenta características de dispersão devido às suas características físico-químicas.

A região de emissão que inclui a tremonha foi classificada como a de maior porte, considerando o quantitativo de emissões, além de possuir um ponto de considerável emissão de particulado, sem controle das partículas. Para este ponto, o captor foi projetado objetivando o máximo enclausuramento possível da fonte, interligando-o a um novo sistema de controle de particulado juntamente aos demais pontos desta região.

Nas análises de seleção do equipamento de controle para o dimensionamento realizado para a região da tremonha, o filtro de mangas foi entendido como a melhor solução levando-se em conta principalmente a dimensão ambiental. Comparando-se principalmente com o ciclone, para este, os custos de investimento e custos rotineiros foram consideravelmente inferiores. Entretanto, para o tipo de particulado estudado, não foi alcançada, no projeto, ótima eficiência. As emissões de material particulado para o cenário considerando somente a

atuação do ciclone foram superiores à concentração estabelecida por resolução ambiental específica.

Entre as demais alternativas foi indicada como a mais interessante aquela em que o custo anual uniforme foi o menor ao longo do tempo de vida útil do sistema considerado. A alternativa que considera a implantação de um filtro de mangas de menor porte mantendo em funcionamento o filtro já existente possui o custo de investimento bem inferior aos demais, sendo o fator preponderante para a melhor viabilidade econômica para a empresa.

As análises qualitativas, em um senso geral, resultaram na proposição de melhorias na captação dos poluentes, ou seja, na implantação de um sistema de controle eficaz a partir de captores bem localizados e bem dimensionados. Neste contexto inserem-se as regiões da transferência de correias e da tremonha, esta em qual também foram efetuadas as análises quantitativas a partir do dimensionamento dos sistemas de captação e controle.

Cita-se ainda o problema de controle das pilhas de clínquer localizadas nos galpões de armazenamento, em que, dadas as suas grandes dimensões, demanda alto investimento e modificações na logística de recebimento e transporte dos insumos. A necessidade de manutenção constante dos equipamentos de controle foi também percepção do diagnóstico elaborado.

Para estudos posteriores na mesma fábrica ou para a aplicação da metodologia utilizada em outros tipos de processos industriais, sugerem-se para melhoria das discussões e mais acurácia dos resultados obtidos, as seguintes recomendações:

- utilização de softwares de mecânica dos fluidos computacionais na previsão do comportamento do escoamento no interior dos captores objetivando a escolha mais adequada de sua localização, definição das aberturas e velocidade de captura; comportamento da coleta do material particulado nos equipamentos de controle, podendo prever assim, de forma mais apropriada, a perda de carga e eficiência de coleta;
- elaboração de estudos mais apurados de metodologias de controle de emissão de pilhas de materiais como o clínquer, em que não é possível a umidificação dos pátios;
- realização de estudos de tecnologias de controle de material particulado que permita o reaproveitamento nos processos industriais, do material coletado nos equipamento de controle;
- realizações de análises da qualidade do ar no ambiente do galpão de carregamento do produto final para venda, onde o fluxo de caminhões e carregadores é alto.

6 REFERÊNCIAS

ACGIH - American Conference of Governamental Industrial Hygienists. **Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Pratice.** 12th Edition – 1980

BERNAUER. Ventiladores Centrífugos – VBR. Catálogo Técnico Disponível em: http://www.bernauer.com.br/Catalogue.aspx [Abr 2009]

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução número 005 de 15 de junho de 1989**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=81. [2009 Fev 9]

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução número 003 de 28 de junho de 1990**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100. [2009 Fev 9]

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução número 382 de 26 de dezembro de 2006**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=520. [2009 Fev 9]

CETESB. **Qualidade do ar – Informações.** Disponível em <URL: http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_historico.asp [2009 Mai 5]

COOPER, C.D.; ALLEY, F.C. **Air Pollution Control: A design approach.** 3° Ed Waveland. Long Grove, Illinois. 2002

COSTA[1], E. C. **Ventilação.** São Paulo: E. Blücher, 2005. xv, 256 p.

COSTA[2], S. S. T. INTRODUÇÃO À ECONOMIA DO MEIO AMBIENTE**. Análise**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 301-323, ago./dez. 2005

EPA - Environmental Protection agency. **Portland Cement Manufaturing**. Compilation of Air Pollutant Emission Factors [online] 1995. Disponível em <URL: http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s06.pdf> [2008 Nov 18]

GOMES, H. P. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento**: Análise econômica em Saneamento. Rio de Janeiro. ABES, 2005

GITMAN, Lawrence J. **Princípios de administração financeira.** 10. ed. - São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2006. 745 p.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Ventilação industrial e controle de poluição**. 2. ed. - Rio de Janeiro: Guanabara, 1990.

MAIOLI, Otávio Luiz Gusso; **Parâmetros bioquímicos indicadores da qualidade do ar das espécies Licania tomentosa (Benth.) e Bauhinia forficata (Link.) no biomonitoramento na Região da Grande Vitória, ES/Brasil**. 2006. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

MESQUITA, Armando Luis de Souza; GUIMARÃES, Fernando de Araújo; NEFUSSI, Nelson. **Engenharia de ventilação industrial**. São Paulo: CETESB, 1988. 442p.

OLIVEIRA, J. A. N. **Engenharia Econômica: uma abordagem às decisões de investimento.** Ed. MacGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1982

PACHECO, T. A. **A história do controle da poluição atmosférica** CONSELHO em revista | nº 39. 2006. Disponível em <URL: http://saturno.crea-rs.org.br/crea/pags/revista/39/CR39_area-tecnica-artigo6.pdf > [2009 Abr 03]

SCHENELLE, K. B.; BROWN, C.A.. **Air Pollution Control Technology Handbook**. Ed. CRC Press LLC. Nova York. 2002

TORRES, Oswaldo F. **Fundamentos da Engenharia Econômica e da Análise Econômica de projetos.** São Paulo Thomson Learning, 2006

TRINDADE, Camila Carnielli; **Avaliação do uso de diferentes modelos receptores com dados de PM2,5: Balanço Químico de Massa (BQM) e Fatoração de Matriz Positiva (FMP).** 2009. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

7 APÊNDICES

Apêndice A– Memoriais de Cálculo do dimensionamento das partes constituintes dos sistemas de controle de poluição atmosférica

Apêndice A.1 – Dimensionamento do captor de exaustão do ponto de emissão E1 da Região B

O presente memorial de cálculo tem por objetivo a exposição das aplicações das equações propostas na metodologia, admissão de valores segundo a teoria apresentada e visualizações gráficas realizadas no dimensionamento do sistema de captura do ponto de emissão, ora denominado E1.

a) Definição da forma do captor enclausurante

O captor enclausurante do ponto de emissão E1 permitiu o fechamento máximo das áreas abertas necessárias à operação do equipamento. Observando as Figura 7-1 (a) e (b), notam-se vigas metálicas que dão suporte para as correias (equipamento de fina espessura na cor preta), cabos de sustentação do rolo imantado, bases metálicas de suporte de forma geral, placas metálicas de proteção, dentre outros.

Figura 7-1 – Estruturas de sustentação do ponto de emissão E1.

As placas do captor desenhadas que contém aberturas estão mostradas na Figura 7-2. Todos os desenhos contêm as cotas necessárias para a determinação do somatório das áreas das aberturas e frestas existentes. A seguinte seqüência de cálculos definiu o valor da área objetivando o cálculo da vazão requerida de exaustão. As placas do captor foram subdivididas em: placa frontal (P_F), placas laterais (P_L), placa traseira (P_T), placa superior (P_S) e placa inferior (P_I). As placas inferior e traseira não possuem áreas abertas. A área da placa frontal não influencia no valor da vazão de exaustão.

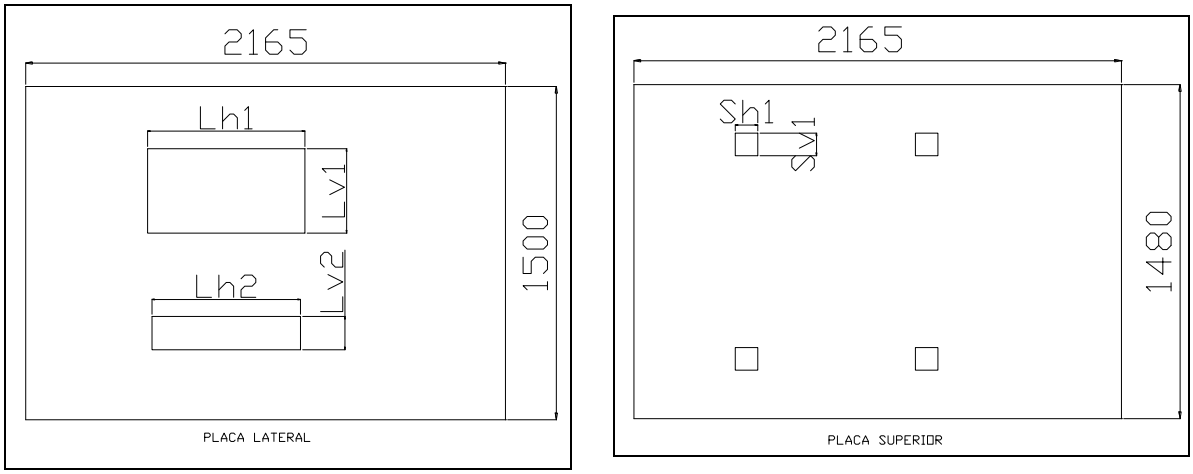


Figura 7-2 – Placas do captor enclausurante que possuem áreas abertas necessárias ao cálculo da vazão de exaustão

$$AP_L = l_{H1}\, x\, l_{V1} + l_{H2}\, x\, l_{V2}$$

$$AP_L = 710x380 + 670x150 = 749600mm^2 = 0{,}7496m^2$$

$$AP_S = 4(s_{H1}\, x\, s_{V1})$$

$$AP_S = 4x(100x100) = 40000mm^2 = 0{,}0400m^2$$

onde, AP_L é a área aberta da placa lateral; AP_S é a área aberta da placa superior; l_H , l_V , s_H , s_V são as dimensões horizontais e verticais das aberturas na Figura 7.2.

A relação a seguir mostra o valor final do somatório das áreas abertas incluindo as áreas das frestas. Tais frestas foram consideradas em todas as junções com pequenas aberturas, como por exemplo, nas regiões em que necessitarão ser construídas portas de inspeção para ação dos operadores.

$$A_T = 2AP_L + AP_S + A_f$$

$$A_T = 2x0{,}7496 + 0{,}0400 + 0{,}0119 = 0{,}8000[m^2]$$

b) Determinação da velocidade de captura

A Tabela 2-7 diz que para operações com geração ativa de contaminantes para transferência de transporte com velocidades maiores que 1,0 m/s a faixa de velocidades de captura está entre 1,0 a 2,5 m/s. A Tabela 2-8, que separa os valores de velocidade por operação específica, estabelece como recomendação para a operação "Transferência de Correias Transportadoras" o valor entre 0,75 e 1,00 m/s. Ponderando as duas condições supracitadas escolheu-se o valor de 1,5 m/s para a velocidade de captura.

Observando simplesmente as faixas fornecidas, o valor de 1,0 m/s seria o mais indicado, mas como a faixa mais ampla estende-se até o valor de 2,5 m/s, a velocidade de 1,5 m/s proporciona mais segurança ao projetista quanto à ótima captura dos contaminantes. Assim tem-se a formulação do valor da velocidade de captura:

$$v_C = 1{,}50\, m/s$$

c) Cálculo da vazão do sistema de exaustão

A vazão de exaustão requerida para o sistema de captura dos poluentes da fonte de emissão E1 é fornecida, segundo os fundamentos teóricos apresentados, pela **(2.2**. Como já foram calculados os valores da área total aberta e da velocidade de captura tem-se:

$$Q = v_c A = 1{,}50x0{,}80 = 1{,}20 m^3/s = 4328 m^3/h$$

Apêndice A.2 – Dimensionamento do sistema de dutos do Cenário I da Região B

O Cenário I foi separado em diferentes trechos para o dimensionamento das partes do sistema de dutos e ventilador: trecho E1 – J, E2 – J e J – Ciclone/ventilador. Assim, estão descritos a seguir, os cálculos realizados para se alcançar os resultados expostos.

a) Trecho E1 – J

- $Q = 1{,}20\, m^3/s$, vazão de exaustão.
- $v = 24\, m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 260\, mm$, como o diâmetro adotado e $p = 2{,}5\, mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .\ L = 2{,}5x7{,}35 = 18{,}4\, mmH_2O$
- Considerando o coeficiente de perda de carga na entrada do captor igual a 0,15 calcula-se a perda na entrada do captor: $pc = 0{,}15x(24\text{^}2)/16{,}34 = 5{,}29\, mmH_2O$
- Curva 90º: $k = 0{,}25$, $p_{curva90} = 0{,}25x(24\text{^}2)/16{,}34 = 8{,}81\, mmH_2O$
- Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}35\, mmH_2O$
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de uma curva de 45° e duas curvas de 90° tem-se $p_{ac} = 2x8{,}81 + 3{,}35 = 21{,}2\, mmH_2O$.
- Perda de Carga Total do Trecho E1 – J: $p_{TOTAL} = 5{,}29 + 18{,}38 + 21{,}15 = 44{,}81\, mmH_2O$

b) Trecho E2 – J

- $Q = 1{,}60\, m^3/s$, vazão de exaustão.
- $v = 24\, m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 300\, mm$, como o diâmetro adotado e $p = 2{,}3\, mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .\ L = 2{,}3x3{,}00 = 6{,}90\, mmH_2O$.
- Considerando o coeficiente de perda de carga na entrada do captor igual a 0,15 calcula-se a perda na entrada do captor: $pc = 0{,}15x(24\text{^}2)/16{,}34 = 5{,}29\, mmH_2O$.
- Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}53\, mmH_2O$.
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de duas curvas de 45° tem-se $p_{ac} = 2x3{,}53 = 7{,}05\, mmH_2O$.

– Perda de Carga Total do Trecho E1 – J: $p_{TOTAL} = 5{,}29 + 6{,}90 + 7{,}05 = 19{,}24\, mmH_2O$.

c) Trecho J – Ciclone/Ventilador

– $Q = 2{,}80\, m^3/s$, vazão de exaustão.

– $v = 24\, m/s$, velocidade do ar nos dutos.

– Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 400\, mm$, como o diâmetro adotado e $p = 1{,}5 mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .\ L = 1{,}5x7{,}00 = 10{,}5\, mmH_2O$.

– Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}53 mmH_2O$.

– Mudança de Circular para Retangular: $k = 0{,}15$,

$p_{mudança} = 0{,}15x(24\text{^}2)/16{,}34 = 5{,}29 mmH_2O$.

– Derivação: $k = 0{,}28$, $p_{derivação} = 0{,}28x(24\text{^}2)/16{,}34 = 9{,}87 mmH_2O$.

– Chaminé: $k = 0{,}22$, $p_{chaminé} = 0{,}22x(24\text{^}2)/16{,}34 = 7{,}76 mmH_2O$.

– Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de três curvas de 45°, uma mudança, uma derivação e uma chaminé tem-se $p_{ac} = 3x3{,}53 + 9{,}87 + 5{,}29 + 7{,}76 = 33{,}49 mmH_2O$.

– Perda de Carga Total do Trecho E1 – J: $p_{TOTAL} = 33{,}49 + 10{,}50 = 43{,}99\, mmH_2O$.

Apêndice A.3 – Dimensionamento do sistema de dutos do Cenário II-A da Região B

O Cenário II-A foi separado em diferentes trechos para o dimensionamento das partes do sistema de dutos e ventilador: trecho E1 – J, E2 – J, J – K e K – Filtro/ventilador. Assim, estão descritos a seguir, os cálculos realizados para se alcançar os resultados expostos.

a) Trecho E1 – J

- $Q = 1{,}20 m^3/s$, vazão de exaustão.
- $v = 24 m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 260 mm$, como o diâmetro adotado e $p = 2{,}5 mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .L = 2{,}5x8{,}35 = 20{,}88 mmH_2O$
- Considerando o coeficiente de perda de carga na entrada do captor igual a 0,15 calcula-se a perda na entrada do captor: $pc = 0{,}15x(24\text{^}2)/16{,}34 = 5{,}29 mmH_2O$
- Curva 90º: $k = 0{,}25$, $p_{curva90} = 0{,}25x(24\text{^}2)/16{,}34 = 8{,}81 mmH_2O$
- Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}35 mmH_2O$
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de duas curvas de 45° e uma curva de 90° tem-se $p_{ac} = 8{,}81 + 2x3{,}35 = 15{,}86 mmH_2O$.
- Perda de Carga Total do Trecho E1 – J: $p_{TOTAL} = 5{,}29 + 20{,}88 + 15{,}86 = 42{,}03 mmH_2O$

b) Trecho E2 – J

- $Q = 1{,}60 m^3/s$, vazão de exaustão.
- $v = 24 m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 300 mm$, como o diâmetro adotado e $p = 2{,}3 mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .L = 2{,}3x3{,}05 = 8{,}05 mmH_2O$.
- Considerando o coeficiente de perda de carga na entrada do captor igual a 0,15 calcula-se a perda na entrada do captor: $pc = 0{,}15x(24\text{^}2)/16{,}34 = 5{,}29 mmH_2O$.
- Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}53 mmH_2O$.
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de duas curvas de 45° tem-se $p_{ac} = 2x3{,}53 = 7{,}05 mmH_2O$.

– Perda de Carga Total do Trecho E2 – J: $p_{TOTAL} = 5{,}29 + 8{,}05 + 7{,}05 = 20{,}39 mmH_2O$.

c) Trecho J – K

– $Q = 2{,}80 m^3/s$, vazão de exaustão.

– $v = 24 m/s$, velocidade do ar nos dutos.

– Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 400 mm$, como o diâmetro adotado e $p = 1{,}5 mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .L = 1{,}5x7{,}00 = 10{,}5 mmH_2O$.

– Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}53 mmH_2O$.

– Curva 90º: $k = 0{,}25$, $p_{curva90} = 0{,}25x(24\text{^}2)/16{,}34 = 8{,}81 mmH_2O$

– Derivação: $k = 0{,}28$, $p_{derivação} = 0{,}28x(24\text{^}2)/16{,}34 = 9{,}87 mmH_2O$.

– Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de uma curva de 45°, uma curva de 90° e uma derivação tem-se $p_{ac} = 3{,}53 + 8{,}81 + 9{,}87 = 22{,}21 mmH_2O$.

– Perda de Carga Total do Trecho Ciclone – : $p_{TOTAL} = 10{,}50 + 22{,}21 = 32{,}71 mmH_2O$.

d) Trecho K – Filtro/Ventilador

– $Q = 8{,}40 m^3/s$, vazão de exaustão.

– $v = 24 m/s$, velocidade do ar nos dutos.

– Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 700 mm$, como o diâmetro adotado e $p = 0{,}9 mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .L = 0{,}9x1{,}00 = 0{,}9 mmH_2O$.

– Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}53 mmH_2O$.

– Chaminé: $k = 0{,}22$, $p_{chaminé} = 0{,}22x(24\text{^}2)/16{,}34 = 7{,}76 mmH_2O$.

– Derivação: $k = 0{,}28$, $p_{derivação} = 0{,}28x(24\text{^}2)/16{,}34 = 9{,}87 mmH_2O$.

– Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de uma curva de 45°, uma curva de 90° e uma derivação tem-se $p_{ac} = 3{,}53 + 7{,}76 + 9{,}87 = 21{,}15 mmH_2O$.

– Perda de Carga Total do Trecho Ciclone – : $p_{TOTAL} = 21{,}15 + 0{,}90 = 22{,}05 mmH_2O$.

Apêndice A.4 – Dimensionamento do sistema de dutos do Cenário II-B

a) Trecho E1 – J

- $Q = 1{,}20\,m^3/s$, vazão de exaustão.
- $v = 24\,m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 260\,mm$, como o diâmetro adotado e $p = 2{,}5\,mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .\ L = 2{,}5x7{,}5 = 18{,}75\,mmH_2O$
- Considerando o coeficiente de perda de carga na entrada do captor igual a 0,15 calcula-se a perda na entrada do captor: $pc = 0{,}15x(24\text{^}2)/16{,}34 = 5{,}29\,mmH_2O$
- Curva 90º: $k = 0{,}25$, $p_{curva90} = 0{,}25x(24\text{^}2)/16{,}34 = 8{,}81\,mmH_2O$
- Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}35\,mmH_2O$
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de uma curva de 90° e duas curvas de 45° tem-se $p_{ac} = 8{,}81 + 2x3{,}35 = 15{,}86\,mmH_2O$.
- Perda de Carga Total do Trecho E1 – J: $p_{TOTAL} = 5{,}29 + 18{,}75 + 15{,}86 = 39{,}90\,mmH_2O$

b) Trecho E2 – J

- $Q = 1{,}60\,m^3/s$, vazão de exaustão.
- $v = 24\,m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 300\,mm$, como o diâmetro adotado e $p = 2{,}3\,mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .\ L = 2{,}3x3{,}00 = 6{,}90\,mmH_2O$.
- Considerando o coeficiente de perda de carga na entrada do captor igual a 0,15 calcula-se a perda na entrada do captor: $pc = 0{,}15x(24\text{^}2)/16{,}34 = 5{,}29\,mmH_2O$.
- Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}53\,mmH_2O$.
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de duas curvas de 45° tem-se $p_{ac} = 2x3{,}53 = 7{,}05\,mmH_2O$.
- Perda de Carga Total do Trecho E2 – J: $p_{TOTAL} = 5{,}29 + 6{,}90 + 7{,}05 = 19{,}24\,mmH_2O$.

c) Trecho J – Filtro de Mangas

- $Q = 2{,}80\,m^3/s$, vazão de exaustão.

- $v = 24 m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 400 mm$, como o diâmetro adotado e $p = 1{,}5 mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .\ L = 1{,}5x7{,}00 = 10{,}5 mmH_2O$.
- Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}53 mmH_2O$.
- Curva 90º: $k = 0{,}25$, $p_{curva90} = 0{,}25x(24\text{^}2)/16{,}34 = 8{,}81 mmH_2O$
- Derivação: $k = 0{,}28$, $p_{derivação} = 0{,}28x(24\text{^}2)/16{,}34 = 9{,}87 mmH_2O$.
- Chaminé: $k = 0{,}22$, $p_{chaminé} = 0{,}22x(24\text{^}2)/16{,}34 = 7{,}76 mmH_2O$.
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de três curvas de 45°, uma mudança, uma derivação e uma chaminé tem-se $p_{ac} = 3x3{,}53 + 9{,}87 + 8{,}81 + 7{,}76 = 37{,}01 mmH_2O$.
- Perda de Carga Total do Trecho J – Filtro de Mangas: $p_{TOTAL} = 37{,}01 + 10{,}50 = 47{,}51 mmH_2O$.

Apêndice A.5 - Dimensionamento do sistema de dutos do Cenário III da Região B

a) Trecho E1 – J

- $Q = 1{,}20\,m^3/s$, vazão de exaustão.
- $v = 24\,m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 260\,mm$, como o diâmetro adotado e $p = 2{,}5\,mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .\ L = 2{,}5x8{,}35 = 20{,}88\,mmH_2O$
- Considerando o coeficiente de perda de carga na entrada do captor igual a 0,15 calcula-se a perda na entrada do captor: $pc = 0{,}15x(24\text{^}2)/16{,}34 = 5{,}29\,mmH_2O$
- Curva 90º: $k = 0{,}25$, $p_{curva90} = 0{,}25x(24\text{^}2)/16{,}34 = 8{,}81\,mmH_2O$
- Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}35\,mmH_2O$
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de duas curvas de 45° e uma curva de 90° tem-se $p_{ac} = 8{,}81 + 2x3{,}35 = 15{,}86\,mmH_2O$.
- Perda de Carga Total do Trecho E1 – J: $p_{TOTAL} = 5{,}29 + 20{,}88 + 15{,}86 = 42{,}03\,mmH_2O$

b) Trecho E2 – J

- $Q = 1{,}60\,m^3/s$, vazão de exaustão.
- $v = 24\,m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 300\,mm$, como o diâmetro adotado e $p = 2{,}3\,mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .\ L = 2{,}3x3{,}05 = 8{,}05\,mmH_2O$.
- Considerando o coeficiente de perda de carga na entrada do captor igual a 0,15 calcula-se a perda na entrada do captor: $pc = 0{,}15x(24\text{^}2)/16{,}34 = 5{,}29\,mmH_2O$.
- Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}53\,mmH_2O$.
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de duas curvas de 45° tem-se $p_{ac} = 2x3{,}53 = 7{,}05\,mmH_2O$.
- Perda de Carga Total do Trecho E2 – J: $p_{TOTAL} = 5{,}29 + 8{,}05 + 7{,}05 = 20{,}39\,mmH_2O$.

c) Trecho J – K

- $Q = 2{,}80\,m^3/s$, vazão de exaustão.

- $v = 24 m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 400 mm$, como o diâmetro adotado e $p = 1{,}5 mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .\ L = 1{,}5x3{,}00 = 4{,}50 mmH_2O$.
- Curva 45°: $k = 0{,}10$, $p_{curva45} = 0{,}10x(24\text{^}2)/16{,}34 = 3{,}53 mmH_2O$.
- Curva 90º: $k = 0{,}25$, $p_{curva90} = 0{,}25x(24\text{^}2)/16{,}34 = 8{,}81 mmH_2O$
- Derivação: $k = 0{,}28$, $p_{derivação} = 0{,}28x(24\text{^}2)/16{,}34 = 9{,}87 mmH_2O$.
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de uma curva de 45°, uma curva de 90° e uma derivação tem-se $p_{ac} = 3{,}53 + 8{,}81 + 9{,}87 = 22{,}21 mmH_2O$.
- Perda de Carga Total do Trecho Ciclone – : $p_{TOTAL} = 4{,}50 + 22{,}21 = 26{,}71 mmH_2O$.

d) Trecho K – Ciclone

- $Q = 8{,}40 m^3/s$, vazão de exaustão.
- $v = 24 m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 700 mm$, como o diâmetro adotado e $p = 0{,}9 mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .\ L = 0{,}9x2{,}00 = 1{,}8 mmH_2O$.
- Mudança de Circular para Retangular: $k = 0{,}15$, $p_{mudança} = 0{,}15x(24\text{^}2)/16{,}34 = 5{,}29 mmH_2O$.
- Derivação: $k = 0{,}28$, $p_{derivação} = 0{,}28x(24\text{^}2)/16{,}34 = 9{,}87 mmH_2O$.
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de uma curva de 45°, uma curva de 90° e uma derivação tem-se $p_{ac} = 5{,}29 + 9{,}87 = 15{,}16 mmH_2O$.
- Perda de Carga Total do Trecho Ciclone – : $p_{TOTAL} = 15{,}16 + 1{,}80 = 16{,}96 mmH_2O$.

e) Ciclone – Filtro de Mangas

- $Q = 8{,}40 m^3/s$, vazão de exaustão.
- $v = 24 m/s$, velocidade do ar nos dutos.
- Observando o ábaco disposto no Anexo 1 obtém-se $D = 700 mm$, como o diâmetro adotado e $p = 0{,}9 mmH_2O/m$ como a perda de carga linear. Perda de Carga Distribuída: $\Delta p = p\ .\ L = 0{,}9x3{,}00 = 2{,}70 mmH_2O$.

- Curva 90º: $k = 0{,}25$, $p_{curva90} = 0{,}25x(24\text{^}2)/16{,}34 = 8{,}81 mmH_2O$
- Derivação: $k = 0{,}28$, $p_{derivação} = 0{,}28x(24\text{^}2)/16{,}34 = 9{,}87 mmH_2O$.
- Perda de Carga devido a Acessórios: a partir de uma curva de 45°, uma curva de 90° e uma derivação têm-se $p_{ac} = 8{,}71 + 7{,}76 = 16{,}57 mmH_2O$.
- Perda de Carga Total do Trecho Ciclone – $p_{TOTAL} = 16{,}57 + 2{,}70 = 19{,}27\, mmH_2O$.

Apêndice A.6 - Dimensionamento do equipamento de controle projetado para o Cenário I da Região B

Para o Cenário I foi projetado um ciclone como equipamento de controle adicional para o tratamento das emissões provenientes de um novo ponto de captura de poluentes projetado.

- $Q = 2{,}80\, m^3/s$, vazão de exaustão.
- $D = 1000\, mm$, diâmetro do corpo do ciclone.
- $\left| H \;\; W \;\; D_e \;\; S \;\; L_b \;\; L_c \;\; D_d \right| = D \cdot \left| 0{,}80 \;\; 0{,}35 \;\; 0{,}75 \;\; 0{,}85 \;\; 1{,}70 \;\; 2 \;\; 0{,}4 \right|$
  $\left| H \;\; W \;\; D_e \;\; S \;\; L_b \;\; L_c \;\; D_d \right| = 1{,}00 \cdot \left| 0{,}80 \;\; 0{,}35 \;\; 0{,}75 \;\; 0{,}85 \;\; 1{,}70 \;\; 2 \;\; 0{,}4 \right|$, em que foi
  $\left| H \;\; W \;\; D_e \;\; S \;\; L_b \;\; L_c \;\; D_d \right| = \left| 0{,}80 \;\; 0{,}35 \;\; 0{,}75 \;\; 0{,}85 \;\; 1{,}70 \;\; 2 \;\; 0{,}4 \right|$
  utilizada a metodologia de dimensionamento de alta eficiência.
- $V_i = Q/(HW) = 2{,}80/(0{,}80 * 0{,}35) = 28{,}0 m/s$
- Número de revoluções da partícula no interior do ciclone: $N_e = \frac{1}{H}\left[L_b + \frac{L_c}{2}\right] = \frac{1}{0{,}80}\left[1{,}70 + \frac{2}{2}\right] = 5{,}5$
- Diâmetro das partículas coletadas com 50% eficiência: $d_{pc} = \left[\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)}\right]^{1/2} = \left[\frac{9 * 0{,}075 * 0{,}35}{2\pi * 5{,}5 * 28(1200 - 1{,}2)}\right]^{1/2} = 7{,}52 \mu m$.
- As tabelas a seguir mostram dados característicos do ciclone:

$d_{p,j+}$	$d_{p,j-}$	$d_{p,j}$	$d_{p,j}/d_{pc}$	$\eta_j = \frac{1}{(1+\frac{d_{p,j}}{d_{pc}})}$	$\eta_0 = \sum \eta_j m_j$
0	2,5	$(0+2{,}5)/2 = 1{,}25$	$1{,}25/7{,}52 = 0{,}166$	0,027	0,015
2,5	5,0	$(2{,}5+5)/2 = 3{,}75$	$3{,}75/7{,}52 = 0{,}498$	0,199	0,191
5,0	10,0	$(5+10{,}0)/2 = 7{,}50$	$7{,}50/7{,}52 = 0{,}997$	0,498	3,538
10,0	15,0	$(10{,}0+15{,}0)/2 = 12{,}5$	$12{,}5/7{,}52 = 1{,}661$	0,734	9,103
15,0	20,0	$(10{,}0+20{,}0)/2 = 17{,}5$	$17{,}5/7{,}52 = 2{,}326$	0,844	10,972
20,0	50,0	$(20{,}0+50{,}0)/2 = 35{,}0$	$35/7{,}52 = 4{,}652$	0,955	63,09

- Eficiência Total: $\eta_0 total = (0{,}015 + 0{,}191 + 3{,}538 + 9{,}103 + 10{,}972 + 63{,}09 = 86{,}9\%$

– Pressão Dinâmica: $H_V = K\dfrac{HW}{D_e^2} = 16*\dfrac{(0{,}80*0{,}35)}{(0{,}75^2)} = 7{,}467mm$

– Perda de Carga do Ciclone:

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho_g V_i^2 H_v = \frac{1}{2}1{,}2*28^2*7{,}647 = 448\ Pa = 46\,mmH_2O$$

Apêndice A.7 – Dimensionamento do equipamento de controle projetado para o Cenário II-A da Região B.

Para o Cenário II-A foi projetado um filtro de mangas como equipamento de controle adicional para o tratamento das emissões provenientes de um novo ponto de captura de poluentes projetado.

- $Q = 8{,}40\, m^3 / s$, vazão de exaustão.
- Definição da Velocidade de Filtragem: $V_m = 1{,}50 m^3 / m^2 / \min = 0{,}025 m / s$
- Área Total de Filtragem: $A = Q / V_m = 8{,}40 / 0{,}025 = 336{,}0 m^2$
- Para as mangas possuindo as seguintes dimensões: $130 mm / 3000 mm$
- Número Total de Mangas: $N_m = A / A_{manga} = 336{,}0 / 1{,}18 = 285$

A perda de carga e demais considerações do filtro de mangas estão expostas na descrição dos dados dos fabricantes.

Apêndice A.8 – Dimensionamento do equipamento de controle projetado para o Cenário II-B da Região B.

Para o Cenário II-B foi projetado um filtro de mangas como equipamento de controle adicional para o tratamento das emissões provenientes de um novo ponto de captura de poluentes projetado.

- $Q = 2{,}80 m^3/s$, vazão de exaustão.
- Definição da Velocidade de Filtragem: $V_m = 1{,}50 m^3/m^2/\min = 0{,}025 m/s$
- Área Total de Filtragem: $A = Q/V_m = 2{,}80/0{,}025 = 112{,}0 m^2$
- Para as mangas possuindo as seguintes dimensões: $130mm/3000mm$
- Número Total de Mangas: $N_m = A/A_{manga} = 112{,}0/1{,}18 = 95$

A perda de carga e demais considerações do filtro de mangas estão expostas na descrição dos dados dos fabricantes.

Apêndice A.9 – Dimensionamento do equipamento de controle projetado para o Cenário III da Região B.

Para o Cenário III foram projetados um filtro de mangas e um ciclone como equipamentos de controle para o tratamento das emissões provenientes de um novo ponto de captura de poluentes projetado.

DIMENSIONAMENTO DO FILTRO DE MANGAS

- $Q = 8{,}40\, m^3/s$, vazão de exaustão.
- Definição da Velocidade de Filtragem: $V_m = 1{,}50 m^3/m^2/\min = 0{,}025 m/s$
- Área Total de Filtragem: $A = Q/V_m = 8{,}40/0{,}025 = 336{,}0 m^2$
- Para as mangas possuindo as seguintes dimensões: $130mm/3000mm$
- Número Total de Mangas: $N_m = A/A_{manga} = 336{,}0/1{,}18 = 285$

A perda de carga e demais considerações do filtro de mangas estão expostas na descrição dos dados dos fabricantes.

DIMENSIONAMENTO DE CICLONE

- $Q = 2{,}80\, m^3/s$, vazão de exaustão.
- $D = 1250\, mm$, diâmetro do corpo do ciclone.
- $\left| H \;\; W \;\; D_e \;\; S \;\; L_b \;\; L_c \;\; D_d \right| = D \cdot \left| 0{,}80 \;\; 0{,}35 \;\; 0{,}75 \;\; 0{,}85 \;\; 1{,}70 \;\; 2 \;\; 0{,}4 \right|$
  $\left| H \;\; W \;\; D_e \;\; S \;\; L_b \;\; L_c \;\; D_d \right| = 1{,}00 \cdot \left| 0{,}80 \;\; 0{,}35 \;\; 0{,}75 \;\; 0{,}85 \;\; 1{,}70 \;\; 2 \;\; 0{,}4 \right|$, em que foi
  $\left| H \;\; W \;\; D_e \;\; S \;\; L_b \;\; L_c \;\; D_d \right| = \left| 0{,}80 \;\; 0{,}35 \;\; 0{,}75 \;\; 0{,}85 \;\; 1{,}70 \;\; 2 \;\; 0{,}4 \right|$
  utilizada a metodologia de dimensionamento de alta eficiência.
- $V_i = Q/(HW) = 2{,}80/(1{,}00 * 0{,}4375) = 53{,}8{,}0 m/s$
- Número de revoluções da partícula no interior do ciclone: $N_e = \frac{1}{H}\left[L_b + \frac{L_c}{2}\right] = \frac{1}{1{,}00}\left[2{,}125 + \frac{2}{2}\right] = 5{,}5$
- Diâmetro das partículas coletadas com 50% eficiência: $d_{pc} = \left[\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)}\right]^{1/2} = \left[\frac{9 * 0{,}075 * 0{,}35}{2\pi * 5{,}5 * 28(1200 - 1{,}2)}\right]^{1/2} = 6{,}07\, \mu m$.
- As tabelas a seguir mostram dados característicos do ciclone:

$d_{p,j+}$	$d_{p,j-}$	$d_{p,j}$	$d_{p,j}/d_{pc}$	$\eta_j = \frac{1}{(1+\frac{d_{p,j}}{d_{pc}})}$	$\eta_0 = \sum \eta_j m_j$
0	2,5	$(0+2,5)/2 = 1,25$	$1,25/7,52 = 0,166$	0,027	0,015
2,5	5,0	$(2,5+5)/2 = 3,75$	$3,75/7,52 = 0,498$	0,199	0,191
5,0	10,0	$(5+10,0)/2 = 7,50$	$7,50/7,52 = 0,997$	0,498	3,538
10,0	15,0	$(10,0+15,0)/2 = 12,5$	$12,5/7,52 = 1,661$	0,734	9,103
15,0	20,0	$(10,0+20,0)/2 = 17,5$	$17,5/7,52 = 2,326$	0,844	10,972
20,0	50,0	$(20,0+50,0)/2 = 35,0$	$35/7,52 = 4,652$	0,955	63,09

- Eficiência Total: $\eta_0 total = (0,015 + 0,191 + 3,538 + 9,103 + 10,972 + 63,09 = 90,1\%$

- Pressão Dinâmica: $H_V = K\frac{HW}{D_e^2} = 16 * \frac{(0,80 * 0,35)}{(0,75^2)} = 7,467 mm$

- Perda de Carga do Ciclone: $\Delta P = \frac{1}{2}\rho_g V_i^2 H_v = \frac{1}{2} 1,2 * 28^2 * 7,647 = 448\ Pa = 168\, mmH_2O$.

Apêndice B – Características do sistema de dutos e do equipamento de controle para o Cenário I da Região B.

Trecho E1 – J		
Vazão	1,2	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	260	mm
Coef. Perda de Carga Captor	0,15	
Perda de Carga Captor	5,3	mmH_2O
Perda de Carga Linear	2,5	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	7,35	m
Perda de Carga Distribuída	18,4	mmH_2O
2 Curvas 90º	0,25	
Curva 45º	0,1	
Perda de Carga Localizada	21,2	mmH_2O
Perda de Carga Trecho E1 – J	44,8	mmH_2O

Trecho E2 – J		
Vazão	1,6	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	300	mm
Coef. Perda de Carga Captor	0,15	
Perda de Carga Captor	5,3	mmH_2O
Perda de Carga Linear	2,3	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	3	m
Perda de Carga Distribuída	6,9	mmH_2O
2 Curvas 45º	0,1	
Perda de Carga Localizada	7,1	mmH_2O
Perda de Carga Trecho E2 – J	19,2	mmH_2O

Trecho J – Ciclone/Ventilador		
Vazão	2,8	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	400	mm
Perda de Carga Linear	1,5	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	7	m
Perda de Carga Distribuída	10,5	mmH_2O
Bifurcação	0,25	
Curva 45º	0,1	
Mudança Retangular	0,15	
Chaminé	0,22	
Perda de Carga Localizada	33,5	mmH_2O
Perda de Carga Trecho J – Ciclone/Ventilador	44,8	mmH_2O

Ciclone		
Vazão	2,8	m³/s
Perda de Carga	45,7	mmH_2O
Eficiência	87	%
D	1,00	m
H	0,80	m
W	0,35	m
D_e	0,75	m
S	0,85	m
L_b	1,70	m
L_c	2,00	m
D_d	0,40	m

Apêndice C – Características do sistema de dutos e do equipamento de controle para o Cenário II-A da Região B.

Trecho E1 – J		
Vazão	1,2	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	260	mm
Coef. Perda de Carga Captor	0,15	
Perda de Carga Captor	5,3	mmH_2O
Perda de Carga Linear	2,5	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	8,35	m
Perda de Carga Distribuída	20,88	mmH_2O
2 Curvas 45º	0,1	
Curva 90º	0,25	
Perda de Carga Localizada	15,86	mmH_2O
Perda de Carga Trecho E1 – J	42,0	mmH_2O

Trecho E2 – J		
Vazão	1,6	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	300	mm
Coef. Perda de Carga Captor	0,15	
Perda de Carga Captor	5,3	mmH_2O
Perda de Carga Linear	2,3	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	3,5	m
Perda de Carga Distribuída	8,1	mmH_2O
2 Curvas 45º	0,1	
Perda de Carga Localizada	7,1	mmH_2O
Perda de Carga Trecho E2 – J	20,4	mmH_2O

Trecho J – K		
Vazão	2,8	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	400	mm
Perda de Carga Linear	1,5	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	7	m
Perda de Carga Distribuída	10,5	mmH_2O
Derivação	0,28	
Curva 45º	0,1	
Curva 90º	0,25	
Perda de Carga Localizada	22,2	mmH_2O
Perda de Carga Trecho J – K	32,7	mmH_2O

Trecho K – Filtro de Mangas/Ventilador		
Vazão	8,4	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	700	mm
Perda de Carga Linear	0,9	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	1	m
Perda de Carga Distribuída	0,9	mmH_2O
Derivação	0,28	
Curva 45º	0,1	
Chaminé	0,22	
Perda de Carga Localizada	21,2	mmH_2O
Perda de Carga Trecho J – Filtro de Mangas/Ventilador	22,1	mmH_2O

Apêndice D – Características do sistema de dutos e do equipamento de controle para o Cenário II-B da Região B.

Trecho E1 – J		
Vazão	1,2	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	260	mm
Coef. Perda de Carga Captor	0,15	
Perda de Carga Captor	5,3	mmH_2O
Perda de Carga Linear	2,5	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	7,5	m
Perda de Carga Distribuída	18,8	mmH_2O
2 Curvas 45º	0,1	
Curva 90º	0,25	
Perda de Carga Localizada	15,86	mmH_2O
Perda de Carga Trecho E1 – J	39,9	mmH_2O

Trecho E2 – J		
Vazão	1,6	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	300	mm
Coef. Perda de Carga Captor	0,15	
Perda de Carga Captor	5,3	mmH_2O
Perda de Carga Linear	2,3	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	3,0	m
Perda de Carga Distribuída	6,9	mmH_2O
2 Curvas 45º	0,1	
Perda de Carga Localizada	7,1	mmH_2O
Perda de Carga Trecho E2 – J	19,2	mmH_2O

Trecho J – Filtro de Mangas/Ventilador		
Vazão	2,8	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	400	mm
Perda de Carga Linear	1,5	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	7,0	m
Perda de Carga Distribuída	10,5	mmH_2O
Derivação	0,28	
Curva 45º	0,1	
Curva 90º	0,25	
Derivação	0,28	
Chaminé	0,22	
Perda de Carga Localizada	37,0	mmH_2O
Perda de Carga Trecho J – K	47,5	mmH_2O

Apêndice E – Características do sistema de dutos e do equipamento de controle para o Cenário III da Região B.

Trecho E1 – J		
Vazão	1,2	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	260	mm
Coef. Perda de Carga Captor	0,15	
Perda de Carga Captor	5,3	mmH_2O
Perda de Carga Linear	2,5	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	8,4	m
Perda de Carga Distribuída	20,9	mmH_2O
2 Curvas 45º	0,1	
Curva 90º	0,25	
Perda de Carga Localizada	15,86	mmH_2O
Perda de Carga Trecho E1 – J	39,9	mmH_2O

Trecho E2 – J		
Vazão	1,6	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	300	mm
Coef. Perda de Carga Captor	0,15	
Perda de Carga Captor	5,3	mmH_2O
Perda de Carga Linear	2,3	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	3,5	m
Perda de Carga Distribuída	8,1	mmH_2O
2 Curvas 45º	0,1	
Perda de Carga Localizada	7,1	mmH_2O
Perda de Carga Trecho E2 – J	20,4	mmH_2O

Trecho J – K		
Vazão	2,8	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	400	mm
Perda de Carga Linear	1,5	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	3,0	m
Perda de Carga Distribuída	4,5	mmH_2O
Derivação	0,28	
Curva 45º	0,1	
Curva 90º	0,25	
Perda de Carga Localizada	22,2	mmH_2O
Perda de Carga Trecho J – K	26,7	mmH_2O

Trecho K – Ciclone/Ventilador		
Vazão	2,8	m³/s
Velocidade do Ar	24	m/s
Diâmetro Comercial	700	mm
Perda de Carga Linear	1,5	mmH_2O/m
Comprimento Tubulações	3,0	m
Perda de Carga Distribuída	4,5	mmH_2O
Curva 90°	0,25	
Chaminé	0,22	
Derivação	0,28	
Mudança Circ. Retang.	0,15	
Perda de Carga Localizada	31,7	mmH_2O
Perda de Carga Trecho K– Ciclone Ventilador	36,2	mmH_2O

Apêndice F – Custos envolvidos na compra e implantação de dutos e acessórios do sistema de ventilação.

Cenário I		
Diâmetro	260	mm
Espessura	4,19	mm
Comprimento do Trecho	7,35	m
Diâmetro	300	mm
Espessura	4,57	mm
Comprimento do Trecho	3,00	m
Diâmetro	400	mm
Espessura	6,35	mm
Comprimento do Trecho	7,00	m
Custo dos Dutos	R$ 10323,00	

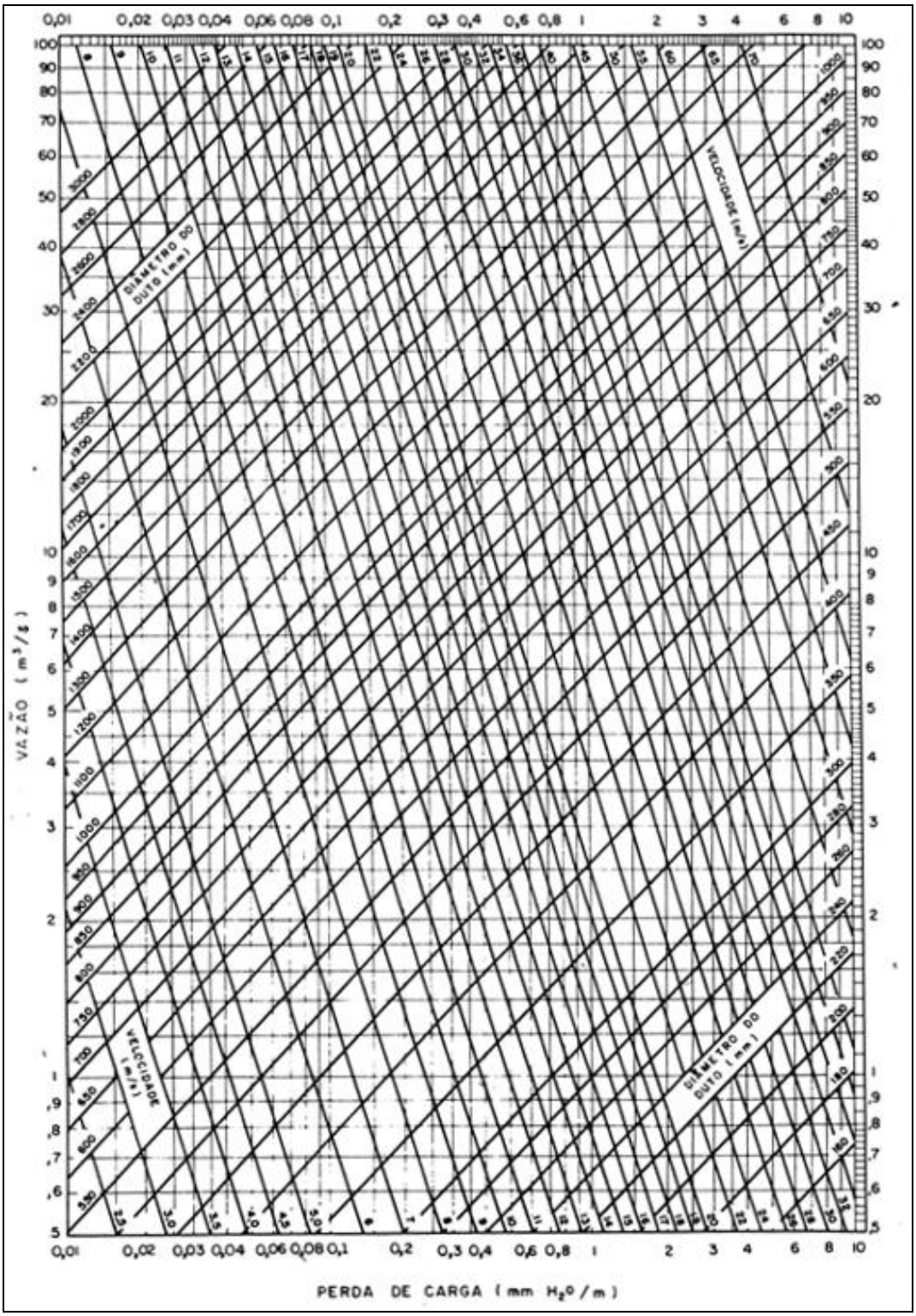
Cenário II-A		
Diâmetro	260	mm
Espessura	4,19	mm
Comprimento do Trecho	8,35	m
Diâmetro	300	mm
Espessura	4,57	mm
Comprimento do Trecho	3,50	m
Diâmetro	400	mm
Espessura	6,35	mm
Comprimento do Trecho	7,00	m
Diâmetro	700	mm
Espessura	7,92	mm
Comprimento do Trecho	1,50	m
Custo dos Dutos	R$ 12850,00	

Cenário II-B		
Diâmetro	260	mm
Espessura	4,19	mm
Comprimento do Trecho	7,50	m
Diâmetro	300	mm
Espessura	4,57	mm
Comprimento do Trecho	3,50	m
Diâmetro	400	mm
Espessura	6,35	mm
Comprimento do Trecho	7,00	m
Custo dos Dutos	R$ 10379,00	

Cenário III		
Diâmetro	260	mm
Espessura	4,19	mm
Comprimento do Trecho	8,35	m
Diâmetro	300	mm
Espessura	4,57	mm
Comprimento do Trecho	3,50	m
Diâmetro	400	mm
Espessura	6,35	mm
Comprimento do Trecho	7,00	m
Diâmetro	700	mm
Espessura	7,92	mm
Comprimento do Trecho	1,50	m
Custo dos Dutos	R$ 11256,00	

8 ANEXOS

Anexo 1 – Ábaco de representação dos parâmetros de dimensionamento de dutos de sistemas de ventilação



Fonte: Macintyre, 1988

Anexo 2 – Dimensões normalizadas de tubos de aço de acordo com as Normas ANSI B.36.10 e B.36.19

Diâmetro Nominal (mm)	Designação de Espessura	Espessura de Parede (mm)	Área de Seção Livre (cm²)	Área de seção de metal (cm²)
250	5S	3,40	556,8	29,20
	10S	4,19	550,3	35,40
300	5S	4,19	782,0	42,10
	10S	4,57	722,0	101,50
350	10	6,35	923,3	69,70
	40	11,10	872,9	120,10
400	10	6,35	1217,5	79,80
	40	12,70	1140,1	157,10
450	10	6,35	1551,7	89,90
	40	14,30	1443,3	198,70
500	10	6,35	1926,6	100,10
	40	15,10	1793,6	233,50
600	10	6,35	2800,2	120,30
	40	17,40	2593,7	324,50
700	10	7,92	4374,4	187,70
	20	15,90	4264,8	298,70