

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONOMICA DA SUBSTITUIÇÃO OU
REFORMA DE SISTEMA DE FILTRAGEM: ESTUDO DE CASO**

Karla Dubberstein Tozetti

Vitória
Dezembro de 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONOMICA DA SUBSTITUIÇÃO OU
REFORMA DE SISTEMA DE FILTRAGEM: ESTUDO DE CASO**

Karla Dubberstein Tozetti

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para Obtenção do Título de Engenheira Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Marcon Donatelli.

Vitória
Dezembro de 2008

KARLA DUBBERSTEIN TOZETTI

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONOMICA DA SUBSTITUIÇÃO OU
REFORMA DE SISTEMA DE FILTRAGEM: ESTUDO DE CASO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para Obtenção do Título de Engenheira Mecânica.

Aprovado em 08/12/2008

Comissão Examinadora

Prof. Dr. João Luiz Marcon Donatelli – Orientador,
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Frederico Carlos M. Thom – Co-orientador,
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Juan Sergio Romero Saenz,
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Marcos Aurélio Scopel Simões,
Universidade Federal do Espírito Santo

Dedicatória

Àqueles que me motivaram a nunca desistir e lutar pelos meus objetivos, meus pais.

Agradecimentos

Difícilmente é possível realizar qualquer trabalho sem a ajuda de alguém, só conseguimos concretizá-los com o auxílio daqueles com os quais convivemos e por isso é que usarei esse momento para agradecer:

Primeiro a Deus, porque sem a força e proteção dele não seria possível essa realização.

E segundo a minha família, aos meus pais, Jonacyr e Madalena, que sempre me incentivaram e orientaram a buscar os melhores caminhos. As minhas irmãs Keline e Karin, que são pessoas muito importantes na minha vida, e também aos meus sobrinhos Marcos Paulo, Marcos André e Marco Antônio, ao meu cunhado Marcos Aurélio, e ao meu namorado Egnor por estar sempre perto em todos os momentos.

À Engenheira Maria Aparecida Gozzi, pela sugestão e auxílio. É claro que não gostaria de agradecer somente à profissional, mas gostaria de agradecer a pessoa maravilhosa que ela foi pra mim. Gostaria de agradecer os momentos de conversa, a amizade, pelos ensinamentos e o otimismo dessa pessoa que se tornou um modelo para mim, gostaria com isso demonstrar todo meu respeito e carinho.

Ao professor orientador Dr. João Luiz Marcon Donatelli por todo seu interesse e conhecimento fornecido, durante a realização deste trabalho.

Ao professor Frederico Carlos M. Thom pela revisão do projeto e conhecimento na parte específica.

Aos professores da banca pela disponibilidade em avaliar este projeto.

Ao grupo ArcelorMittal Tubarão pelo fornecimento do estudo necessário para a realização deste trabalho.

Sumário

<i>Lista de Figuras</i>	<i>ix</i>
<i>Lista de Tabelas</i>	<i>x</i>
<i>Lista de Símbolos</i>	<i>xi</i>
<i>Resumo</i>	<i>xii</i>
<i>Abstract</i>	<i>xiii</i>
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivo	17
1.2. Desenvolvimento do Projeto	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E EMBASAMENTO TEÓRICO	18
2.1. Filtração dos Gases Conceitos Gerais	18
2.2. Fundamentos Básicos da Filtração	21
2.3. Filtros	22
2.4. Eficiência do Coletor, Penetração e Penetração Global	23
2.5. Filtros de Tecido (Filtros Manga)	24
2.6. Elementos Filtrantes de Não-Tecido	30
2.7. Métodos de remoção de tortas de filtração de gases	31
2.7.1. <i>Vibração Mecânica</i>	32
2.7.2. <i>Fluxo de Ar Reverso</i>	33
2.7.3. <i>Pulso de Ar Reverso</i>	34
2.8. Perda de Carga no Filtro	35
2.9. Velocidade de Filtração	36
2.10. Eficiência de Coleta de um Filtro	37
2.10.1. <i>Mecanismo Difusional</i>	38
2.10.2. <i>Mecanismo Inercial</i>	39
2.10.3. <i>Interceptação Direta</i>	39
2.10.4. <i>Mecanismo Gravitacional</i>	40
2.11. Comportamentos Típicos das Curvas de Filtração	41
2.12. Ciclos de Filtração	43
2.13. Filtro Bolsa	45
2.13.1. <i>Considerações Gerais</i>	45

2.13.2.	<i>Classificação</i>	47
2.14.	Norma de Classificação dos Meios Filtrantes	49
2.15.	Instalação de Ar Comprimido	50
2.16.	Admissão de Ar no Compressor	51
2.17.	Sistema de Filtragem para os Compressores	52
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1.	Modo de Investigação	55
3.2.	Aspectos Gerais do Equipamento Atual	56
3.2.1.	<i>Localização do Equipamento</i>	56
3.2.2.	<i>Desenho esquemático do sistema</i>	56
3.2.3.	<i>Torre de Capitação de Ar</i>	57
3.2.4.	<i>Sistema de Filtragem</i>	57
3.2.5.	<i>Parâmetros de Funcionamento</i>	58
3.2.6.	<i>Compressores</i>	58
3.2.7.	<i>Principais Problemas</i>	59
3.3.	Soluções Propostas	60
3.3.1.	<i>Alternativa 1: Reforma do Sistema de Filtragem</i>	60
3.3.2.	<i>Alternativa 2: Substituição do Sistema de Filtragem</i>	61
3.4.	Aspectos Gerais do Sistema de Filtragem Proposto	61
3.4.1.	<i>Parâmetros de Funcionamento</i>	62
3.4.2.	<i>Caixa de Filtragem</i>	63
3.4.3.	<i>Filtro Primeiro Estágio de Filtração</i>	64
3.4.4.	<i>Filtro Segundo Estágio de Filtração</i>	64
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1.	Gráficos	66
4.1.1.	<i>Curva de Tendência - Diferencial de Pressão</i>	66
4.1.2.	<i>Curva de tendência - Corrente Elétrica</i>	68
4.1.3.	<i>Revisão documental</i>	69
4.2.	Curva de Confiabilidade	69
4.3.	Análises	71
4.4.	Análise Técnica	71
4.5.	Análise Financeira	72
4.5.1.	<i>Alternativa 1 – Reforma</i>	72

4.5.2.	<i>Alternativa 2 – Troca</i>	73
4.5.3.	<i>Comparação da Análise Financeira</i>	73
4.6.	Discussão dos Resultados	74
4.7.	Justificativas para a escolha	75
5.	<i>PRINCIPAIS CONCLUSÕES</i>	77
6.	<i>SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES</i>	79
7.	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	80
8.	<i>APÊNDICES</i>	82
8.1.	Apêndice A: Cálculo da Potência Consumida pelo Compressor.	82
	<i>Correlação Perda de Carga e Consumo de Energia</i>	82
8.2.	Apêndice B: Dados Experimentais	86

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1: (a) Diagrama esquemático da filtração de gás e (b) esquema de formação de torta. (TIENI, 2005)</i>	20
<i>Figura 2.2: Esquema de limpeza das mangas por vibração mecânica (a), pulso de ar reverso (b) e, fluxo de ar reverso (c).....</i>	32
<i>Figura 2.3: Limpeza por vibração mecânica. Filtração (a), e limpeza (b). (MARTINS, 2001).....</i>	33
<i>Figura 2.4: Limpeza por fluxo de ar reverso. Filtração (a), e limpeza (b). (MARTINS, 2001).</i>	34
<i>Figura 2.5: Limpeza por pulso de ar reverso. Filtração (a), e limpeza (b). (MARTINS, 2001).....</i>	35
<i>Figura 2.6: Coleta de partícula por difusão (AGUIAR, 1995).....</i>	38
<i>Figura 2.7: Coleta de partícula pelo mecanismo inercial (TOGNETTI, 2007).....</i>	39
<i>Figura 2.8: Coleta da partícula por interceptação direta (AGUIAR, 1995).</i>	40
<i>Figura 2.9: Coleta de partícula pelo mecanismo gravitacional (AGUIAR, 1995).</i>	40
<i>Figura 2.10: Curvas de queda de pressão durante a filtração (TIENI, 2005).....</i>	42
<i>Figura 2.11: Exemplos de curvas características para filtro de ar (TIENI, 2005).</i>	42
<i>Figura 2.12: Comportamento do funcionamento de um filtro em caso de regeneração incompleta (patch cleaning), com fluxo e concentração de pó constante(TIENI, 2005).....</i>	44
<i>Figura 2.13: Detalhe da forma geométrica de bolsa do elemento filtrante.</i>	45
<i>Figura 2.14: Pás do compressor danificadas devido a choques com particulados do ar. Fotografia aumentada mostrando detalhe de corrosão nas pás do rotor.....</i>	52
<i>Figura 3.1: Desenho esquemático do filtro e dos estágios de compressão.....</i>	56
<i>Figura 4.1: Gráfico dos valores medidos para o diferencial de pressão do sistema de filtragem atual (manga) em mm c.a.....</i>	67
<i>Figura 4.2: Gráfico dos valores medidos para a corrente elétrica (em ampére) consumida pelo compressor, atendido pelo sistema atual de filtragem (manga).....</i>	68
<i>Figura 4.3: Gráfico comparativo da perda de carga do sistema atual de filtragem e do sistema proposto (filtro bolsa).</i>	71
<i>Figura 8.1: Desenho esquemático da instalação dos estágios do compressor e filtro de manga.</i>	82
<i>Figura 8.2: Comportamento da curva de potência com a variação do diferencial de pressão no filtro.</i>	85

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1: Parâmetros de projetos mais utilizados em processo de filtração de gases.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 2.2: Propriedades das fibras.</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 2.3: Recomendações para aplicações de filtros de ar, segundo a NBR 6401 da ABNT.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 2.4: Danos causados por uso de um sistema de filtragem inadequado.</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 3.1: Parâmetros importantes da torre de captação de ar.</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 3.2 Parâmetros de funcionamento dos filtros atuais.</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 3.3: Características e considerações operacionais do compressor.</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 3.4: Parâmetros de funcionamento dos filtros propostos, filtro bolsa.</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 3.5: Classificação dos estágios de compressão, eficiência e perda de carga.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 4.1: Valor normal, crítico e de alerta do diferencial de pressão do sistema de filtragem atual (manga). </i>	<i>67</i>
<i>Tabela 4.2: Valor normal, crítico e de alerta da corrente elétrica (em ampére) consumida pelo compressor, atendido pelo sistema atual de filtragem (manga).</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 4.3: Tabela comparativa das análises técnicas das alternativas.</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 4.4: Tabela de análise financeira dos custos de reforma do sistema de filtragem atual.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 4.5: Tabela de análise financeira dos custos de manutenção anual para o sistema de filtragem atual do tipo manga.</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 4.6: Tabela de análise financeira do investimento no novo sistema de filtração.</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 4.7: Tabela de análise financeira dos custos de manutenção anual do novo sistema de filtragem.</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 4.8: Tabela comparativa das análises financeiras.</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 8.1: Calores Específicos de Gases Ideais para Alguns Gases Usuais (adaptado).</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 8.2: Valores medidos, valor normal, de alerta e crítico do diferencial de pressão nos filtros atuais manga em mm c.a.</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 8.3: Valores medidos, valor normal, de alerta e crítico de corrente elétrica consumida pelo compressor em ampére (A).</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 8.4: Valores medidos, valor normal, de alerta e crítico do diferencial de pressão nos filtros manga e valores de diferencial de pressão obtidos nos filtros bolsa em mm c.a.</i>	<i>88</i>

Lista de Símbolos

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>
v	<i>Velocidade do gás</i>
ΔP_0	<i>Queda de pressão no tecido limpo</i>
ΔP	<i>Queda de pressão máxima de operação</i>
C	<i>Concentração de pó</i>
ϖ	<i>Massa de pó depositada por unidade de área</i>
η	<i>Eficiência da coleta</i>
ΔP_C	<i>Queda de pressão devido à torta de filtração</i>
P_0	<i>Pressão na entrada do filtro</i>
P_{atm}	<i>Pressão atmosférica</i>
P_{1e}	<i>Pressão de entrada do primeiro estágio de compressão</i>
P_{1s}	<i>Pressão na saída do primeiro estágio de compressão</i>
R_p	<i>Razão das pressões de entrada e saída</i>
η_C	<i>Eficiência do compressor</i>
C_p	<i>Calor específico do ar medido a pressão constante</i>
C_v	<i>Calor específico do ar medido a volume constante</i>
\dot{w}_C	<i>Potência requerida por cada estágio do compressor</i>
w_C	<i>Trabalho de cada estágio do compressor</i>
\dot{m}_{ar}	<i>Vazão mássica do ar</i>
T_{1e}	<i>Temperatura de entrada do compressor</i>
T_{1s}	<i>Temperatura de saída do compressor</i>
K	<i>Razão dos calores específicos</i>

Resumo

O objetivo deste Projeto é fazer um estudo de viabilidade técnica e econômica para a reforma ou substituição do sistema de filtragem de ar de admissão dos compressores das Unidades de Fracionamento de Ar da ArcelorMittal Tubarão. Para a realização deste estudo foram relacionadas às características de funcionamento do sistema antigo de filtragem e do sistema a ser instalado a fim de possibilitar a elaboração de tabelas comparativas entre as alternativas a serem aplicadas que são: a reforma do sistema atual, ou a substituição por outro sistema de tecnologia mais nova, visando com isso ratificar a escolha pelo novo sistema de filtragem. Este estudo fornece também informações básicas sobre definições, conceitos, efeitos e tipos de sistemas para filtragem de ar incluindo informações sobre a classificação dos filtros de acordo com a norma brasileira NBR 6401 da ABNT. Além disso, contém justificativas para escolha dos tipos de elementos filtrantes, do sistema de filtragem e ainda consta de orçamento de engenharia e descrição dos materiais a serem instalados.

Palavras-chave: sistema de filtragem de ar, compressores, elementos filtrantes.

Abstract

The objective of this project is to make a study of technical and economical for retirement or replacement of the filtering system of air compressors of the ArcelorMittal Tubarão. To carry out this study were related to the features of the operating system and filtering system to be installed to enable the compilation of comparative list between the alternatives that are being implemented: the reform of the current system, or replacement by another system, aiming to ratify the choice of the new filtering system. This study also provides basic information on definitions, concepts, effects and types of air-filtration systems to include information regarding the classification of filters according of the ABNT (Technical Standards Brazilian Association) NBR 6401. It also contains justifications for choosing the types of filter elements, the filtering system and also consists of engineering budget and description of materials to be installed.

Keywords: air filtering system compressors, filtration elements.

1. INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial no final do século XIX, e mais precisamente no século XX, com o advento das indústrias e o crescimento econômico dos países, grande esforço científico e tecnológico tem sido dedicado ao desenvolvimento de técnicas para melhorar os processos industriais. Uma grande variedade de equipamentos baseados em princípios físicos distintos estão sendo destinados aos mais variados métodos de produção.

No entanto, devido á ascendente sofisticação do setor industrial, cresce cada vez mais a demanda por equipamentos para utilizações especializadas, o processo de filtração dos gases é um deles, diversificada quantidade de métodos e equipamentos diferenciados tem sido desenvolvidos para melhorar a retenção de partículas do ar industrial na filtração.

É importante, primeiramente, explicitar que o processo de filtração é dividido em duas vertentes, a primeira delas refere-se ao controle de poluição ambiental, que considera o tratamento dos fluidos gerados antes de serem lançados ao meio externo, na atmosfera, no qual temos empregados os filtros tipo barreira, filtros de manga, filtros granulares, precipitadores eletrostáticos, ciclones, lavadores, etc. Já a segunda vertente trata do controle de contaminação ambiental que se refere ao tratamento dos gases existentes no meio externo para não contaminar produto, processo, máquinas e ambientes, para tal aplicação utilizam-se os filtros descartáveis do tipo bolsa e filtros manga.

A filtração de ar vem se desenvolvendo desde 1940, com a criação dos filtros de alta eficiência para ar contendo material particulado. Os filtros manga estão

entre os mais eficazes dispositivos de coleta de partículas para controle de poluição do ar, e como resultado disto, estão entre os mais comuns sistemas de filtração para controle da poluição (TIENI, 2005).

Durante a operação de filtração de gases, o gás contendo as partículas em suspensão se faz passar através das mangas, ficando os particulados fixos no tecido. Após vários ciclos de filtração e limpeza, uma fração desse particulado fica retida permanentemente no tecido, formando a denominada torta de filtração ou *cake*, que, após um determinado tempo de filtração, constitui o meio filtrante definitivo (tecido+torta). Este fenômeno constitui a causa da alta eficiência dos filtros de manga durante a filtração de pequenas partículas, onde a eficiência pode alcançar 99,9% (TIENI, 2005).

A escolha deste tipo de filtro é devido às razões que incluem facilidade de operação, já que sua instalação é relativamente simples, e principalmente por sua grande eficiência na remoção de partículas de uma ampla faixa de tamanhos. Entretanto, estes filtros apresentam uma razoável resistência ao fluxo de gás devido à formação da torta de pó na superfície do filtro, aumentando a perda de carga do sistema. Devido a isto, a camada de pó deve ser removida periodicamente do tecido, a fim de se tornar o processo de filtração novamente viável.

Durante a limpeza, a remoção da torta de filtração acontece frequentemente por um processo conhecido como *patchy cleaning*, ou limpeza por blocos, onde algumas áreas da torta são removidas completamente (exceto uma fina camada residual) e outras não (TIENI, 2005). Isto provoca uma perda de carga residual após a etapa de limpeza, pois o filtro não retoma as propriedades iniciais, devido à torta de pó formada que não é totalmente removida. Como as partículas

ficam aderidas no tecido, há um aumento na perda de carga residual, a qual pode alcançar um valor constante após vários ciclos de filtração e limpeza.

Sendo assim, para aplicações que exigem reduzido valor de perda de carga, como aquelas relacionadas ao controle de particulados do meio ambiente, a utilização dos filtros manga não é apropriada, sendo mais indicado o uso dos filtros descartáveis do tipo bolsa, que apresentam maior área filtrante e menor perda de carga durante o processo de filtração. Uma vez que o meio filtrante é descartável, não há formação da camada de pó residual devido às partículas que ficam aderidas no tecido.

Por outro lado, uma eficiência limitada na filtração dos gases permite que os particulados do ar passem através dos elementos filtrantes e contaminem o ambiente (no caso de filtração para o controle da poluição ambiental), ou os equipamentos constituintes do processo de produção (no caso de filtração do ar ambiente). Pode-se perceber com isso, que a escolha apropriada do sistema de filtração compreende o conhecimento destes dois parâmetros: a eficiência de filtração e a perda de carga no filtro. A fim de se conseguir combinar esses parâmetros de maneira adequada deve-se primeiramente conhecer o processo para o qual se destina o filtro, e saber qual destes parâmetros é o mais crítico para a aplicação. No caso específico deste estudo, os filtros são usados para a separação dos particulados do fluxo de ar fornecido aos compressores da unidade de fracionamento da ArcelorMittal Tubarão.

O sistema de filtração descrito neste trabalho está em funcionamento desde 1983. E, após anos de operação, começa a apresentar características de fim de vida útil, tais como: corrosão na chaparia da casa de filtro e funcionamento inadequado do sistema de limpeza dos meios filtrantes. Além disso, o sistema de

filtração atual (filtros manga) apresenta elevada perda de carga, o que resulta em elevado consumo energético dos compressores.

1.1. Objetivo

Diante do exposto acima, o presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo sobre a viabilidade técnica e econômica da reforma ou troca do sistema de filtração do ar de admissão dos compressores, apresentando a solução e as justificativas que ratificam a escolha da troca do sistema por um mais adequado (filtro bolsa). Para tal finalidade, serão explicitados os principais problemas observados no processo de filtração atual, bem como as características desejadas para o novo equipamento.

1.2. Desenvolvimento do Projeto

O processo de análise e descrição das informações presentes neste estudo foi dividido nas seguintes etapas:

- Leitura flutuante e crítica do material coletado;
- Descrição teórica dos sistemas de filtração no capítulo de Revisão Bibliográfica e Embasamento Teórico;
- Síntese, seleção e descrição das informações obtidas e dos equipamentos envolvidos apresentados no capítulo de Materiais e Métodos;
- Interpretações, análises e conclusões dos resultados, apresentadas nos capítulos de Resultados e Discussão, e, Principais Conclusões, e;
- Propostas subsequentes deste estudo no capítulo de Sugestões para Trabalhos Posteriores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E EMBASAMENTO TEÓRICO

Por se tratar de estudo de interfase com diferentes ramos do conhecimento, serão apresentados, a seguir, algumas definições e conceitos de termos fundamentais com o intuito de facilitar o entendimento deste trabalho.

2.1. *Filtração dos Gases Conceitos Gerais*

A filtração pode ser definida como o processo de retenção de partículas dispersas através de meios porosos, ela ocorre pela passagem do ar através do meio filtrante, aonde as partículas vão se depositando sobre a superfície do filtro. A coleta dessas partículas acontece, devido o contato físico entre elas e o elemento coletor, sendo descrita na forma de mecanismos de captura. Como a coleta é contínua, as partículas chocam-se com aquelas previamente coletadas, sendo formado um depósito denominado de torta de filtração, o qual pode se tornar o principal elemento coletor (DONOVAN, 1985). Esse material coletado deve eventualmente ser removido, pois ele poderá reduzir consideravelmente o fluxo de gás através do filtro. Dentre as várias técnicas de limpeza dos filtros as mais usadas são: vibração mecânica, fluxo de ar reverso e pulso de ar reverso. A filtração é, portanto, um processo cíclico constituído por etapas de coleta e limpeza dos filtros. Além disso, pode-se perceber que este é um meio simples, versátil e econômico para separação dos particulados presentes no ar, sendo, portanto usado em diversas aplicações, tais como proteção respiratória, limpeza de ar dos efluentes de

caldeiras, processo com materiais nucleares, limpeza de ar destinado a processos industriais diversos e recuperação de material particulado.

A filtração pode ser classificada em duas grandes categorias, com base no lugar onde ela acontece no meio filtrante. Inicialmente partículas entram em contato com a superfície do meio filtrante, podendo penetrar na estrutura do filtro. A filtração que ocorre dentro do meio filtrante é denominada de *deep filtration*, ou filtração interna, em que o fluxo de ar passa internamente ao meio filtrante que é responsável pela captura das partículas. Após um intervalo de tempo, ocorre a formação de uma camada de pó, formada na superfície do filtro, que passa ser também responsável pela captura das partículas. Esse tipo de filtração é denominado de filtração superficial, ou *cake filtration* (TIENI, 2005). A maioria das filtrações é realizada por essa camada de pó, denominada de torta de filtração, que é formada na superfície do filtro.

Então, pode-se concluir que a operação de filtração consiste basicamente na passagem de um gás contendo material particulado através de um meio filtrante, tendo como finalidade a separação das partículas contidas na corrente gasosa. Depois de decorrido um determinado período de filtração, a camada de pó acumulada sobre o filtro, denominada de torta de filtração, é que passa a desempenhar o papel de superfície filtrante, na qual a estrutura do tecido fornece apenas a sua superfície para capturar os particulados no início do processo de filtração.

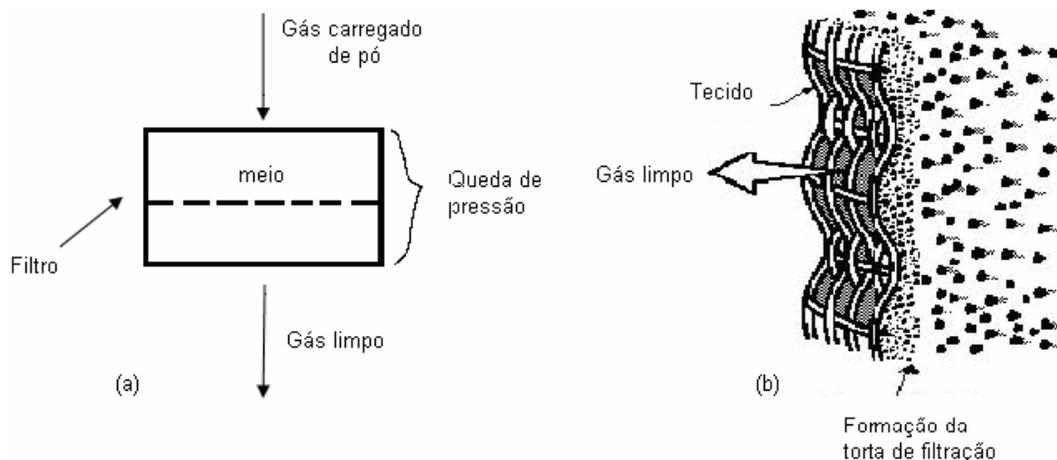


Figura 2.1: (a) Diagrama esquemático da filtração de gás e (b) esquema de formação de torta. (TIENI, 2005)

Existem dois parâmetros muito usados para caracterizar o desempenho de qualquer tipo de coletor de pó, são eles: a eficiência de filtração e a perda de carga. Em geral, esses parâmetros modificam-se com o acúmulo de material particulado na superfície do filtro e com o seu envelhecimento.

No processo de filtração, no qual acontece a deposição de materiais sólidos no meio filtrante e a torta é acumulada, ocorre um aumento da perda de carga através do meio. A perda de carga, como já citado é um parâmetro muito importante na operação de filtração. Com o acúmulo das partículas, a espessura da torta aumenta, fazendo com que a perda de carga no filtro também aumente. Após algum tempo de filtração, certo valor de perda de carga é alcançado e torna-se necessária a limpeza do meio filtrante. Os depósitos de torta são então removidos periodicamente com a limpeza do tecido, de forma a manter a queda de pressão através do filtro dentro dos limites de operação.

2.2. Fundamentos Básicos da Filtração

Os parâmetros de projeto mais importantes na filtração são: velocidade do fluido, queda de pressão nos filtros, concentração de pó e eficiência na coleta de pó. Os valores mais comuns encontrados para esses parâmetros são listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros de projetos mais utilizados em processo de filtração de gases.

Velocidade do gás (v)	0,8 a 10 cm/s
Queda de pressão do tecido limpo (ΔP_0)	6 a 20 mm c.a.
Queda de pressão máxima de operação (ΔP)	50 a 255 mm c.a.
Concentração de pó (C)	0,1 a 100 g/m ³
Massa de pó depositada por unidade de área (w)	200 a 2000 g/m ²
Eficiência da coleta (η)	99,90 a 99,99 %

Fonte: RODRIGUES, 1995.

Existem dois tipos de filtração: estacionária e não estacionaria. Na primeira, a eficiência de colisão da partícula com a superfície coletora é única, isto é, uma vez que a partícula toca a fibra, ela permanece retida, e as novas partículas que se depositam não são influenciadas pelo processo anterior. Neste caso a eficiência de coleta e a queda de pressão do filtro independem do tempo e o processo é dito estacionário. Isto pode ocorrer nos estágios iniciais de filtração e para baixa concentração de partículas que chegam ao coletor.

Na realidade, o processo de filtração é muito mais complexo. As partículas, uma vez depositadas, podem ficar bem separadas das fibras devido à ação de diferentes forças que atuam durante a filtração. As partículas retidas

também podem modificar a forma geométrica do coletor, produzindo, desta forma, modificações estruturais no filtro. Como consequência, a eficiência e a queda de pressão no filtro tornam-se dependentes do tempo e o processo é dito não estacionário, ou transiente.

2.3. Filtros

Um aspecto característico da operação de filtração é a variedade de equipamentos disponíveis para a separação de partículas sólidas de fluidos. Essa variedade tem sido causa da multiplicidade dos problemas de filtração, em que suspensões de alta ou baixa concentração de partículas devem ser separadas de gases ou líquidos, os quais podem ser corrosivos ou altamente viscosos. Apesar desta complexidade, as informações sobre as partículas e o fluido podem ser usadas para racionalizar os métodos de separação. Existem basicamente três arranjos de coletores na filtração de gases (RODRIGUES, 2005):

- Fibras individuais emaranhadas frouxamente dentro de um enchimento;
- Material granular em leito fixo ou fluidizado;
- Fibras tecidas ou feltradas dentro de uma estrutura, sendo utilizadas no formato cilíndrico (manga).

Todos os arranjos são capazes de obter altos valores de eficiência de coleta com razoáveis valores de queda de pressão e tempo de limpeza. A principal limitação para a escolha do filtro está relacionada com a natureza do seu material

constituente. É necessário selecionar um meio filtrante que apresente baixo custo e que tenha uma vida longa sob as condições de operação.

Para o bom funcionamento de um filtro, este deve ter as características descritas a seguir (RODRIGUES, 1995):

- Ser suficientemente poroso para permitir satisfatória vazão de ar a uma queda de pressão compatível com o processo;
- Resistir às forças de tensão causadas pela pressão diferencial, por perturbações mecânicas e por pulsações durante o processo de limpeza, devem também resistir a abrasão com o material com que é preso a tubos metálicos;
- Resistir ao ataque e à ação química entre as fibras e o material filtrado, especialmente se houver umidade presente devido a condensação;
- Resistir às altas temperaturas da exaustão dos gases, cada filtro tem uma temperatura limite definida, além da qual tenderá a uma deterioração acelerada;
- Apresentar textura de superfície que favoreça liberação da torta durante a limpeza. Isto pode ser aparentemente contraditório, pois a superfície tem que reter a torta durante a filtração.

2.4. Eficiência do Coletor, Penetração e Penetração Global

Considere uma corrente de aerossol a uma determinada velocidade e concentração, escoando perpendicularmente a uma fina seção fibrosa de espessura

e área muito maior que o diâmetro da fibra, porém fina o suficiente para se aproximar de uma simples camada de fibras no plano da seção.

A eficiência total de coleta de cada elemento filtrante, η_T , incluindo todos os mecanismos de coleta, para fibra embutida do filtro, pode ser representada por (TIENI, 2005):

$$\eta_T = \frac{\text{Número de partículas no filtro por unidade de tempo}}{\text{Número de partículas que chegam ao filtro por unidade de tempo}} \quad (2.1)$$

Com a observação de dados experimentais, notou-se que a concentração de partículas na corrente gasosa que atravessa o filtro decai exponencialmente com o aumento da espessura do filtro, com o aumento da eficiência individual de coleta do meio filtrante e com a redução no diâmetro do coletor, desde que e se mantenha constante a corrente de ar.

Resumidamente, pode-se perceber que o sucesso no projeto e na operação de filtros, depende de uma boa interação entre as quatro variáveis de projeto, a perda de carga, que resulta na queda de pressão no filtro, a velocidade de filtração, a concentração de pó, e a técnica de limpeza dos meios filtrantes. No decorrer do texto encontra-se uma suscita explicação sobre a perda de carga, velocidade de filtração, e métodos de limpeza dos meios filtrantes.

2.5. Filtros de Tecido (Filtros Manga)

A idéia de usar filtros de tecido para limpar o ar não é recente. A filtração utilizando filtros de tecido era usada desde o Antigo Egito, 5000 anos atrás. Na era bíblica, sacos trançados eram colocados em cima da cabeça e amarrados ao

redor do pescoço para proteger contra minérios expostos de pó de óxido de chumbo (MYCOCK, 1995).

Avanços vieram lentamente. Leonardo Da Vinci defendeu o uso de panos molhados (*wetting cloth*) que eram colocados sob a boca e o nariz para melhorar a eficiência da respiração (filtração). Em 1852, S.T. Jones patenteou nos Estados Unidos um simples projeto de uma manga para recuperação de fumaças de óxido de zinco. A partir de 1980, metalúrgicas passaram a utilizar filtros com milhares de mangas nas indústrias de fundição de chumbo e zinco. Com o desenvolvimento de novos tecidos sintéticos por volta de 1950, a filtração em filtros de tecidos entrou na era moderna (MYCOCK, 1995).

Um filtro de manga é essencialmente um sistema contendo um filtro de tecido no qual retira partículas de uma corrente gasosa. O gás limpo é então ventilado para a atmosfera. O particulado pode ser um produto, como o negro de fumo, ou um subproduto como cinza produzido pela queima de carvão. Quando o particulado é um subproduto, este pode ser reciclado e retornar ao processo, que é o caso, principalmente, do carvão queimado.

O tipo do tecido selecionado para ser usado na filtração depende da temperatura e acidez da corrente de gás, das características do pó, da razão de filtração gás/tecido e do tipo de limpeza das mangas a ser empregada.

A performance de um filtro de tecido depende da escolha adequada da fibra, que deve ser compatível com o ambiente gás/partícula, de um projeto apropriado de geometria do coletor de pó e das condições de limpeza do coletor. Para baixas concentrações de partículas, os filtros fibrosos são uma das soluções mais requeridas.

A produção de tecidos começa com uma unidade estrutural básica, que consiste de uma simples fibra. As fibras nos quais os filtros de tecido são confeccionados se originam da natureza ou de processos industrializados (DONOVAN, 1985).

As fibras naturais podem ser de origem animal, vegetal ou mineral. Filtros com alta qualidade têm sido confeccionados a partir de fibras de algodão e de lã, mas devido às limitações, estes tecidos não têm sido aplicados na filtração de fontes de combustão. Foi somente nos últimos 50 anos que, com o desenvolvimento das fibras têxteis sintéticas, houve o aumento no uso dos filtros de tecido, porque os tecidos passaram a ter alta qualidade e capacidade de resistir a operações a altas temperaturas, que são as requeridas nos processos com fontes de combustão de gases. As novas fibras sintéticas têm oferecido uma maior aplicação na filtração em filtros de tecido. Isto se deve ao baixo custo, a maior resistência química e mecânica e o menor diâmetro das fibras (DONOVAN, 1985). Como exemplos de fibras sintéticas têm-se: o nylon, o poliéster, o acrílico, o polipropileno, o teflon, entre outras.

A tabela 2.2 ilustra as principais propriedades de algumas fibras.

Tabela 2.2: Propriedades das fibras.

Fibra	Resistência ácida	Resistência alcalina	Resistência ao calor Max	Resistência ao calor Pico	Resistência a abrasão
Algodão	Destruída por ácidos concentrados ou diluídos	Resistente, mas incha, pode ser submetido a tratamento	100 °C	120 °C	Moderada à boa
Nylon	Reage com ácidos minerais de todas as concentrações	Boa resistência até para álcalis concentrados fervendo	100 °C	120 °C	Excelente
Poliéster	Boa resistência para 30% HCl 50% H ₂ SO ₄ à 50 °C	Resistência moderada, mas risco de hidrólise	150 °C	180 °C	Excelente

Continuação da Tabela 2.2: Propriedades das fibras.

Acrílico (Dupont)	Boa resistência para 30% HCl 50% H ₂ SO ₄ à 50 °C	Resistência moderada até mesmo à altas temperaturas	130 °C	160 °C	Moderada à boa
Acrílico (Bayer)	Resistente para HCl concentrado e 50% H ₂ SO ₄	Boa resistência: resistente à 25% KOH	140 °C	170 °C	Moderada à boa
Polipropileno	Não afetado para ácidos concentrados, exceto agentes oxidantes	Não afetado por álcalis concentrados, exceto agentes oxidantes	100 °C	120 °C	Boa
Teflon	Resistente a ácidos diluídos ate mesmo a altas temperaturas	Resistente	230 °C	280 °C	Razoável
Vidro	Resistente a todos exceto HF e H ₃ PO ₄ quente	Atacado por álcalis fortes	285 °C	315 °C	Fraco

Fonte: DONOVAN, 1985.

O elemento filtrante ou o meio poroso de filtração pode ser de material granulado ou fibroso, e apresentar-se disposto na forma de leitos de tecidos ou compactado em painéis. São produzidos a partir dos mais variados materiais, tais como algodão, poliéster, polipropileno, nomex, etc., e ainda, pode apresentar os fios trançados, entrelaçados ou compactados, construídos na forma de tubos, bolsas, sacos ou envelopes (MACINTYRE, 1997).

Os materiais tradicionalmente usados na fabricação dos filtros de pano são o algodão e a lã, mas estes materiais só podem ser usados até temperaturas de 82°C e 90°C, respectivamente, e para ar seco (MACINTYRE, 1997).

Para temperaturas mais elevadas e poluentes agressivos a esses materiais, é necessário recorrer aos tecidos com fios de certos materiais, como o

náilon, nomex, dacron, orlon, poliéster, polipropileno, fios metálicos e fibra de vidro, dependendo da escolha, da temperatura, e do caráter ácido ou alcalino da mistura do ar com as partículas ou névoas.

Os filtros de tecido, por exemplo, são de elevada eficiência para fumos e poeiras acima de 0,1 micra, e são usados na captação de poeira de moagem, mistura e pesagem de grãos de cereais, moagem de pedra, argila e minerais, trituração de cimento, limpeza por abrasão, pesagem e peneiramento de produtos químicos em grãos, trabalhos em madeira, cortumes, fertilizantes e papel (MACINTYRE, 1997). Quando a concentração de partículas é muito elevada, usa-se, antes do filtro um separador do tipo inercial para retenção das partículas maiores.

Os filtros com feltro de poliéster duram cerca de três vezes mais do que os de algodão, e por isso são os mais usados. O rendimento dos filtros de tecido, em geral, supera 93%, chegando a 99,9%, em alguns casos (MACINTYRE, 1997).

Muitos tecidos utilizados na filtração de gases são confeccionados completamente ou parcialmente por fibras trançadas. Existem também os tecidos não trançados, ou feltros, os quais são feitos diretamente a partir da ligação de fibras sem a preparação do fio requerida no entrelaçamento.

A maior parte dos tecidos são trançados ou parcialmente trançados. Os filtros manga no qual o gás flui de dentro das mangas para fora usam quase que exclusivamente tecidos trançados (MYCOCK, 1995). Exemplos destes tipos de filtros seriam os filtros manga com limpeza por sopro de ar reverso ou por vibração mecânica. Os filtros de tecido trançados oferecem baixa resistência ao fluxo de ar e seu acabamento flexível apresenta boa característica de liberação.

Os tecidos não trançados ou feltros são mais apropriados para filtros manga com sistema de limpeza por jato pulsante que oferece elevada energia para

limpeza e alto fluxo operacional de gás. Filtros não trançados trabalham bem com pó mais pesado como areia seca, pedra calcária, e grãos. Em geral, os tecidos não trançados possuem vida útil mais longa das mangas, porém eles oferecem maior resistência ao fluxo de ar que os de tecido trançados.

O modo no qual o tecido é confeccionado é uma das características que determinam a deposição e a liberação do pó. Embora não se tenha um conhecimento detalhado sobre isto, sabe-se que apenas uma superfície lisa libera o pó com maior facilidade que uma superfície felpuda, porque o pó pode aglomerar-se em fibras soltas, que durante a limpeza, pode soltar-se das fibras e voltar à corrente de gás, tornando a limpeza pouco eficiente.

Para melhorar a eficiência de limpeza dos filtros manga são realizados alguns tratamentos no acabamento de tecido, já que o destacamento da torta de pó é melhor em tecidos com superfície tratada, tornando o processo de limpeza mais ativo. Isto confirma que o tecido com a superfície tratada, possui uma maior quantidade de partículas removidas através da limpeza.

Os tecidos geralmente são tratados para melhorar a estabilidade mecânica. Podem ser tratados com silicone para facilitar a liberação da torta. Tecidos naturais (lã e algodão) normalmente são pré-lavados para evitar o encolhimento das mangas durante a operação. Tecidos naturais e sintéticos normalmente são submetidos a tratamentos térmicos, físicos e químicos.

Três fatores podem encurtar o período de vida útil operacional de uma manga. Esses fatores estão relacionados com as condições do fluxo de gás, durabilidade do tecido, abrasão e ao ataque químico. A principal delas é o limite superior de temperatura que o tecido resiste ou a durabilidade térmica. Deve-se consultar o fornecedor do material para garantir que a operação seja feita na faixa

de tolerância do tecido. O gás pode também ser resfriado antes de ser filtrado, porém deve-se garantir que não haja muita umidade e que os ácidos não condensem nas mangas.

Outro problema freqüentemente encontrado na operação de filtros de mangas é a abrasão. A abrasão pode ser resultante da fricção das mangas umas contra as outras e da solitação de forças feita no processo de limpeza.

O método de concretização da limpeza das mangas também é muito importante. O material tem que ter resistência mecânica suficiente para suportar as vibrações ou o impacto do gás de limpeza. Os principais métodos de limpeza da torta de filtração serão descritos no decorrer do texto.

2.6. *Elementos Filtrantes de Não-Tecido*

Uma das grandes diferenças entre tecido e não-tecido está na configuração do material. De acordo com a definição que consta na norma brasileira NBR TB392 da ABNT, tecido é uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de trama (transversal) e outro conjunto de fios de urdume (longitudinal), formando ângulo de 90° ou próximo a isso. Já o não-tecido, é conceituado pela norma NBR 13370 como uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu, manta de fibras ou filamentos. A distribuição das fibras normalmente é feita segundo a necessidade de aplicação, mas pode ser também de maneira aleatória ou ao acaso. Como o processo de separação e filtração é feito por superfície, a eficiência da filtração é substancialmente influenciada pelo tamanho dos poros do meio filtrante, que por sua vez dependem da distribuição das fibras (DIAS, 2007).

Os não-tecidos são descartáveis e surgiram da necessidade de reciclagem de resíduos e fibras. São agulhados, ou seja, fabricados com fibras aglomeradas à base de poliéster. Neste caso, sua constituição se dá pela compactação de fibras numa distribuição randômica, viabilizada pelos processos de agulhamento. Sua construção é feita de forma aleatória onde as fibras são entrelaçadas através da penetração alternada de muitas agulhas. Este processo garante uma forma tridimensional, que faz com que o poro presente de um lado do material não fique na mesma posição do outro lado, criando uma espécie de labirinto. Por essa razão, o não-tecido agulhado faz dois tipos de filtração, a filtração por superfície e a por profundidade (DIAS, 2007).

A elevada capacidade de retenção de particulados e vida útil é o que garante o uso dos não-tecidos para a área de filtração. Sua configuração permite trabalhar com perdas de carga menores nos sistemas. E apresenta menor preço se comparados a materiais de tecidos com a mesma gramatura (DIAS, 2007).

2.7. Métodos de remoção de tortas de filtração de gases

Quando os gases sujos passam através do filtro de tecido, as partículas que são removidas do gás são coletadas nas fibras por mecanismos de coleta. Então a torta de filtração é formada com o particulado coletado, e a queda de pressão através do tecido aumenta. Quando a torta atinge uma espessura ótima para remoção, estabelecida pela queda de pressão máxima, esta precisa ser destacada do filtro por métodos de limpeza.

Desta forma uma das questões mais importantes a considerar em qualquer filtro de manga é a limpeza. Uma limpeza inadequada provoca o acréscimo

da queda de pressão residual. Por outro lado, uma limpeza muito vigorosa pode danificar o filtro, reduzindo o período de vida útil do mesmo.

Para realização da limpeza dos filtros de tecido existem três grandes métodos de limpeza: vibração mecânica (*shaker*), fluxo de ar reverso (*reverse flux*) e pulso de ar reverso (*pulse jet*), ilustrados na Figura: 2.2. A seguir é apresentada uma suscita explicação sobre esses métodos de destacamento da torta de filtração.

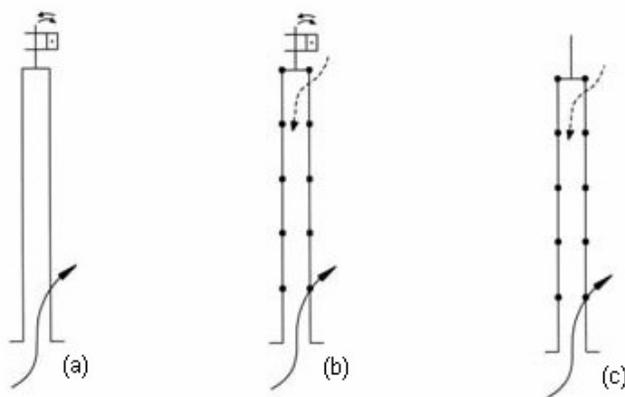


Figura 2.2: Esquema de limpeza das mangas por vibração mecânica (a), pulso de ar reverso (b) e, fluxo de ar reverso (c).

2.7.1. Vibração Mecânica

A técnica de limpeza por vibração mecânica apresenta uma montagem relativamente simples e um baixo custo de implantação e manutenção, sendo apropriada para sistemas de pequeno e médio porte. Este sistema de limpeza remove o pó coletado da superfície do tecido vibrando mecanicamente a manga por meio de um motor, e a aceleração no tecido é função da amplitude e da frequência da vibração (AGUIAR, 1995). A energia repassada ao tecido então, pode ser suficiente para romper as ligações adesivas entre o meio filtrante e a torta ou ligações coesivas dentro da estrutura de tecido. É provavelmente a mais antiga

forma de limpeza e é atualmente empregada sob uma grande faixa de capacidades de mangas. Nesta técnica, o fluxo de gás sujo através das mangas, é interrompido durante o processo de limpeza.

A Figura 2.3, ilustra um filtro em seu processo de filtração (a), e sendo limpo pelo método de vibração mecânica (b).

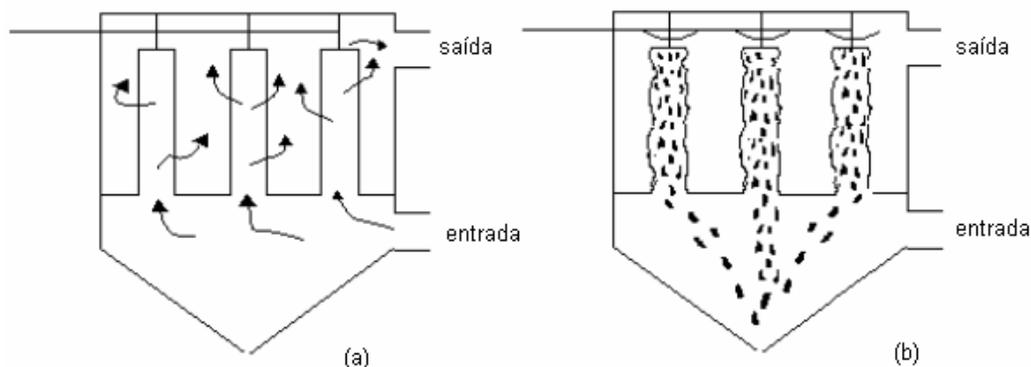


Figura 2.3: Limpeza por vibração mecânica. Filtração (a), e limpeza (b). (MARTINS, 2001).

2.7.2. Fluxo de Ar Reverso

Neste tipo de processo de limpeza, o ar limpo é soprado através das mangas, no sentido oposto ao sentido normal, para desalojar a camada de particulado formado sob a superfície de tecido. Este método possui uma montagem bastante simples na qual a inversão do fluxo gasoso geralmente se dá por uma combinação de válvulas. O ciclo de limpeza termina quando uma quantidade significativa de pó é extraída, resultando na redução da perda de carga. Normalmente, estipula-se um tempo de limpeza, este deve ser suficiente para remover a máxima quantidade de pó do tecido (TOGNETTI, 2007). Deste modo esta técnica exige a interrupção da filtração durante a limpeza.

Como a limpeza é atingida por velocidades do gás relativamente baixas, o tecido não é exposto a um movimento violento, e, por conseguinte, aumenta o tempo de vida útil das mangas, sendo esta uma das grandes vantagens desta técnica de limpeza. A Figura 2.4 ilustra esquematicamente esta técnica de limpeza.

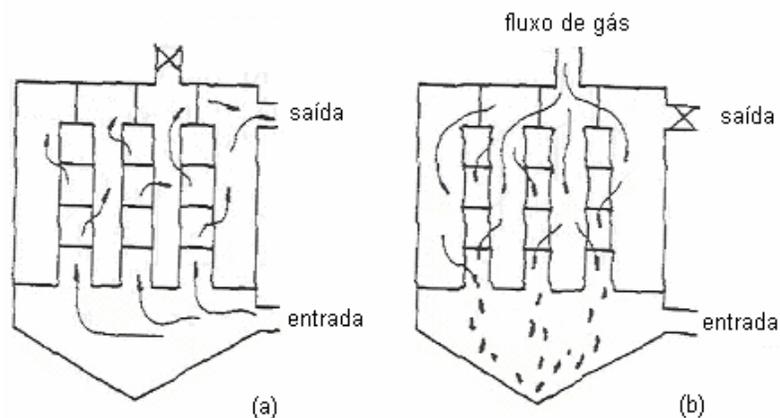


Figura 2.4: Limpeza por fluxo de ar reverso. Filtração (a), e limpeza (b). (MARTINS, 2001).

2.7.3. Pulso de Ar Reverso

Nesse tipo de limpeza, a torta é periodicamente removida por um pulso de ar comprimido através do tecido, causando uma repentina expansão das mangas, fazendo com que o pó caia para fora do meio filtrante. Nesse método, a duração da limpeza é menor do que a dos métodos por fluxo de ar reverso e por vibração mecânica. Geralmente, não é necessário interromper o processo de filtração porque o fluxo acontece em fração de segundos. Esta técnica de limpeza das mangas é bastante efetiva, porém, o vigor da técnica pode danificar o tecido, limitando o tempo de vida das mangas e também tende a aumentar a migração do pó através do tecido, diminuindo assim a eficiência de coleta do pó. A Figura 2.5 ilustra esquematicamente esse mecanismo de limpeza das mangas.

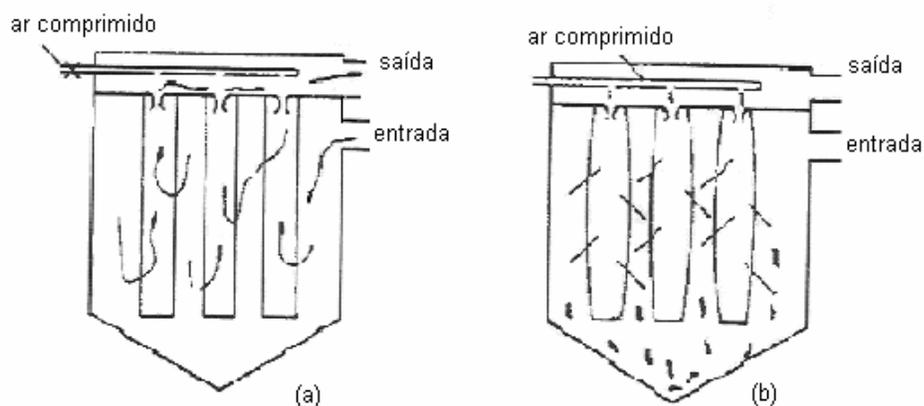


Figura 2.5: Limpeza por pulso de ar reverso. Filtração (a), e limpeza (b). (MARTINS, 2001).

2.8. Perda de Carga no Filtro

A perda de carga no filtro resultante da queda de pressão tende a aumentar em proporção a quantidade de partículas coletadas. A perda de carga durante o ciclo de filtração é tão importante, quanto a eficiência, e às vezes, até mesmo mais importante, uma vez que determina a frequência de limpeza do filtro e conseqüentemente afeta o tempo de vida do tecido. Além disso, a máxima perda de carga, antes da limpeza, pode ser empregada para determinar a potência requerida. Normalmente, a perda de carga é um fator limitante que determina quando a limpeza deve começar ou quando o meio filtrante deve ser trocado. Desta maneira os ciclos de limpeza ou troca são solicitados, através do controle da perda de carga, ou seja, quando um máximo valor de perda de carga é alcançado. Os valores de perda de carga operacionais são geralmente na faixa de 50 a 250 mm c.a (SEVILLE, 1997). Altos valores de queda de pressão podem até mesmo inviabilizar o processo de filtração.

A perda de carga é uma importante variável de projeto, descreve a resistência que enfrenta o fluxo de gás ao passar pelo filtro. A queda de pressão

total de um sistema ΔP é determinada pela medida da diferença de pressão total em dois pontos do filtro, usualmente, entrada e saída. É normalmente expressa em unidade de Pascal ou milímetros de coluna de água.

Existem diferentes equações para descrever a queda de pressão durante a operação de filtração. Uma delas é uma aproximação cumulativa, onde se divide a queda de pressão total no filtro em duas partes: a queda de pressão no meio filtrante, ΔP_0 , e a queda de pressão devido à torta de filtração formada, ΔP_C . Desta maneira, tem-se a equação (SEVILLE, 1997):

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_C \quad (2.2)$$

A lei de Darcy pode ser usada para descrever a queda de pressão através de um meio poroso e da torta de filtração, quando a filtração é conduzida a baixos valores do número de Reynolds.

A razão entre a queda de pressão e a velocidade específica do gás é denominada de arraste.

O arraste ao invés da queda de pressão, é a medida de resistência aerodinâmica do filtro preferida por modeladores, pois o seu uso preserva o conceito da propriedade da camada do meio, independente da velocidade de escoamento.

2.9. Velocidade de Filtração

A velocidade do gás na interfase do tecido é denominada de velocidade de filtração, podendo ser expressa, por exemplo, em m/min ou por cm/s. É um parâmetro fundamental de projeto para filtros de tecido.

A velocidade de filtração determina a área efetiva do tecido necessária para limpar um fluxo volumétrico requerido. Em conjunto com o método de limpeza, determina as dimensões do filtro. Conseqüentemente, tem uma influência significativa no custo inicial do equipamento e no custo da potência e manutenção, a velocidade de filtração utilizada em qualquer operação de filtração depende das características do pó, da distribuição do tamanho das partículas, da concentração de entrada do pó, da temperatura do gás, do método de limpeza do gás e do tipo de tecido. Para a maioria das aplicações, a faixa utilizada é de 0,8 a 10 cm/s (SEVILLE, 1997).

2.10. Eficiência de Coleta de um Filtro

A corrente de gás passando através de um filtro carrega as partículas em direção aos corpos coletores, que no caso dos filtros de tecido são as fibras. Para que ocorra a filtração, como foi visto anteriormente, é necessário que haja contato físico entre as partículas e o coletor. Além disso, é necessário que a partícula fique retida no coletor. Durante o escoamento o gás contendo as partículas é forçado a passar através do coletor, que faz a retenção do particulado, e essa retenção se dá por meio de diferentes tipos de mecanismos de coleta.

Em qualquer caso, a importância destes mecanismos de coleta varia com o tamanho e a velocidade das partículas, com a superfície de coleta e com a presença de forças eletrostáticas, gravitacional ou de atração.

Os mecanismos de coleta básicos são: impactação inercial, interceptação e difusão. As forças eletrostáticas, térmicas e gravitacionais modificam a eficiência de coleta do filtro em circunstâncias especiais. Sob circunstâncias

normais, as forças térmicas são desprezíveis na filtração, porque para ser efetiva, diferenças de temperatura muito grandes entre as partículas e os corpos coletores são indispensáveis. Na prática, devido às pequenas dimensões da fibra coletora, estas têm uma baixa capacidade calorífica e rapidamente alcançam as temperaturas da corrente de gás. Devido à curta duração do processo, a diferença de temperatura é desprezível e as forças térmicas geralmente não são consideradas.

A seguir são descritos alguns dos mecanismos mecânicos de coleta.

2.10.1. Mecanismo Difusional

Este mecanismo funciona bem para partículas menores e, de fato, quanto menor o tamanho das partículas melhor esse mecanismo trabalha, devido à difusão ou ao movimento Browniano. Neste caso, as partículas são tão pequenas ou tem tão pouca massa que podem ser influenciadas por um bombardeamento de moléculas de gás ao redor da partícula (AGUIAR, 1995). A partícula bombardeada pelas moléculas de gás tem seu caminho afetado até finalmente colidir na fibra a ser coletada, como ilustrado na Figura 2.6.

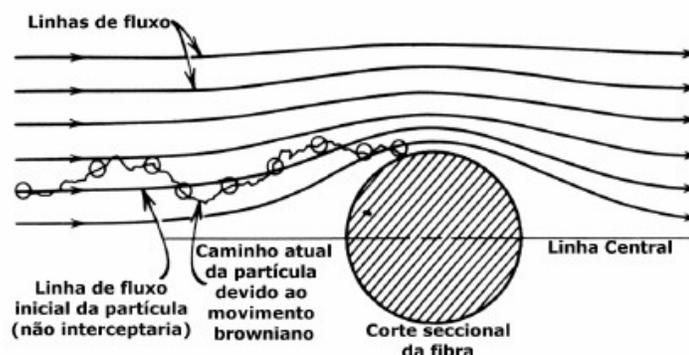


Figura 2.6: Coleta de partícula por difusão (AGUIAR, 1995).

2.10.2. Mecanismo Inercial

Neste tipo de mecanismo é assumido que a partícula tem massa e, por conseguinte, inércia. Então a corrente de gás não pode passar através da fibra e passa ao redor da fibra. Se a partícula não tem massa, ou se for muito leve, ela pode seguir a linha da corrente de gás e contornar a fibra escapando da captura (AGUIAR, 1995). Porém, devido ao fato da partícula ter massa, ela desliza da linha de corrente de fluido, chocando-se contra a fibra, e é coletada. Este mecanismo de coleta é efetivo para partículas de aproximadamente $10 \mu m$ ou maiores.

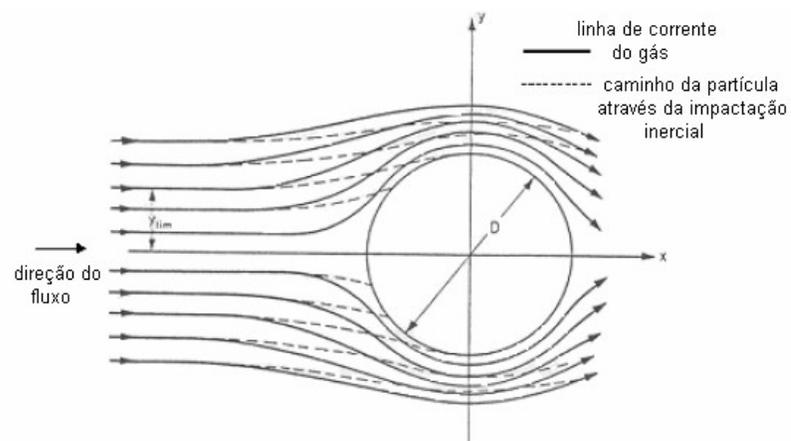


Figura 2.7: Coleta de partícula pelo mecanismo inercial (TOGNETTI, 2007).

2.10.3. Interceptação Direta

A coleta por interceptação direta acontece porque as partículas têm tamanho finito. Se uma partícula de tamanho finito passa perto de um obstáculo como resultado de difusão, inércia ou por causa do movimento do fluido somente, o contato pode ocorrer se a trajetória do centro da partícula passar a uma distância de um raio de partícula da superfície, como ilustrado na Figura 2.8.

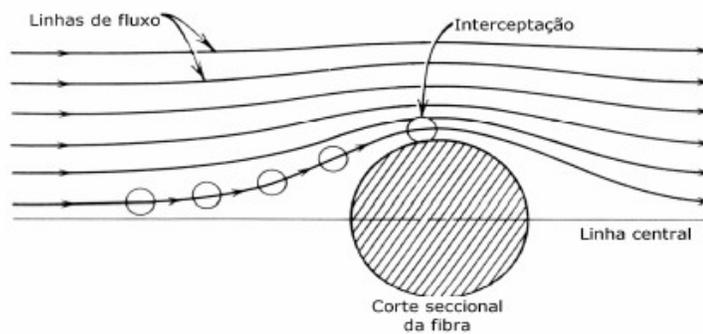


Figura 2.8: Coleta da partícula por interceptação direta (AGUIAR, 1995).

2.10.4. Mecanismo Gravitacional

O mecanismo gravitacional é o resultado da gravidade sobre a partícula, o que causa um desvio na sua trajetória normal. É o mecanismo dominante para baixas velocidades do gás e grandes partículas. A eficiência depende da direção do fluxo, ou seja, a eficiência é maior quando o fluxo ocorre de cima para baixo do que de baixo para cima. Este mecanismo de coleta está ilustrado na Figura 2.9.

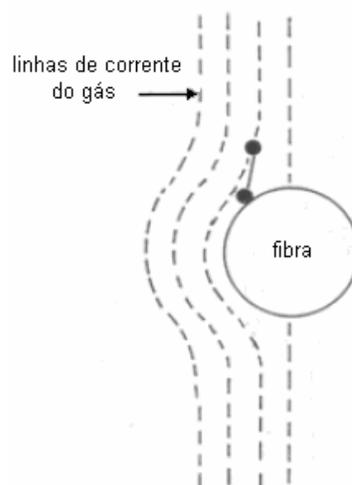


Figura 2.9: Coleta de partícula pelo mecanismo gravitacional (AGUIAR, 1995).

Uma consideração a ser feita acerca dos mecanismos de coleta descritos anteriormente é que eles não levam em conta o efeito das partículas já coletadas no comportamento do filtro. A validade das expressões, então se restringe somente aos estágios iniciais da filtração, ou seja, quando o filtro ainda está limpo. Na maioria dos casos práticos, o comportamento do filtro varia bastante com o acúmulo de material coletado no filtro, resultando num comportamento dependente do tempo, denominado de filtração não estacionária, como já foi mencionado anteriormente.

A eficiência da filtração, em qualquer filtro, depende do mecanismo de coleta. Os filtros de tecido de utilidade industrial têm tido constantemente uma eficiência de 99,9 % (TIENI, 2005).

2.11. Comportamentos Típicos das Curvas de Filtração

Durante a filtração gasosa, a curva de filtração, representada pela perda de carga no filtro em função do tempo, pode apresentar três comportamentos distintos: côncava para baixo, côncava para cima e linear. A curvatura com concavidade para baixo é a mais comum (TIENI, 2005). O comportamento linear é também possível, representando uma deposição na superfície estritamente uniforme em série com o tecido, ou seja, representa a não penetração do pó no tecido.

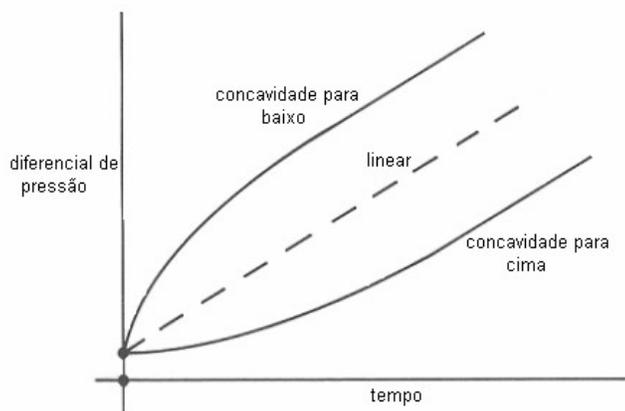


Figura 2.10: Curvas de queda de pressão durante a filtração (TIENI, 2005).

Uma curva que também pode representar o sistema operante é a relação entre a queda de pressão e a massa específica do pó coletado no meio (esta é proporcional ao volume do gás filtrado, em um carregamento constante). A curva toma a forma diferente para cada tipo de tecido. Para tecidos traçados existe inicialmente um rápido aumento na queda de pressão, devido ao entupimento dos poros (TIENI, 2005). Já para os feltros, a filtração inicial profunda é seguida por filtração na superfície, com característica linear.

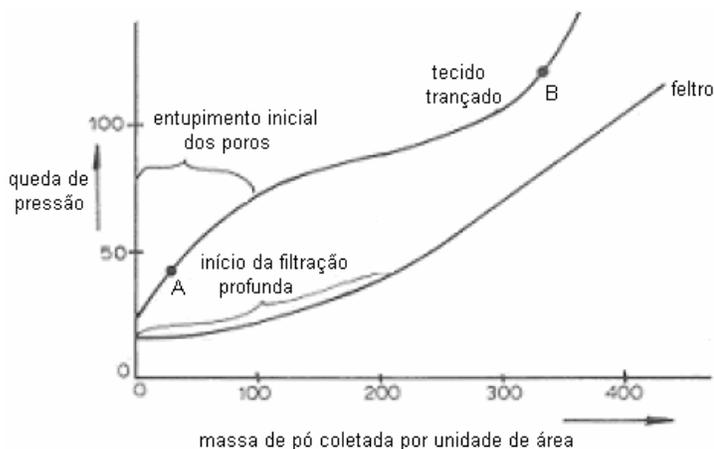


Figura 2.11: Exemplos de curvas características para filtro de ar (TIENI, 2005).

2.12. Ciclos de Filtração

Como foi citado anteriormente, a curva de filtração pode assumir três comportamentos distintos. No entanto, esses comportamentos são assumidos somente para o primeiro ciclo de filtração. Após a regeneração do filtro, o comportamento da curva pode mudar substancialmente, dependendo do comportamento da limpeza, ou seja, se o filtro foi limpo totalmente ou não. Normalmente, a limpeza ocorre por um fenômeno conhecido como *patch cleaning*, ou limpeza por blocos, que tem como característica a regeneração incompleta do filtro. Isto ocorre porque a tensão aplicada para remoção se concentra em falhas ou na heterogeneidade da torta, gerando rachaduras no meio filtrante que se propagam. Embora a limpeza total do filtro seja ideal para muitas aplicações de filtração, a forte ação da limpeza requerida pode ser prejudicial para o meio filtrante, causando danos a sua estrutura (TIENI, 2005).

Durante a filtração, devido à regeneração incompleta do filtro, a curva de filtração muda de comportamento após a primeira regeneração, como mostra a Figura 2.12. Essa figura mostra o comportamento da perda de carga em função do tempo de filtração, onde não ocorreu a limpeza total do filtro, ou seja, permanecem pedaços de torta na superfície do filtro.

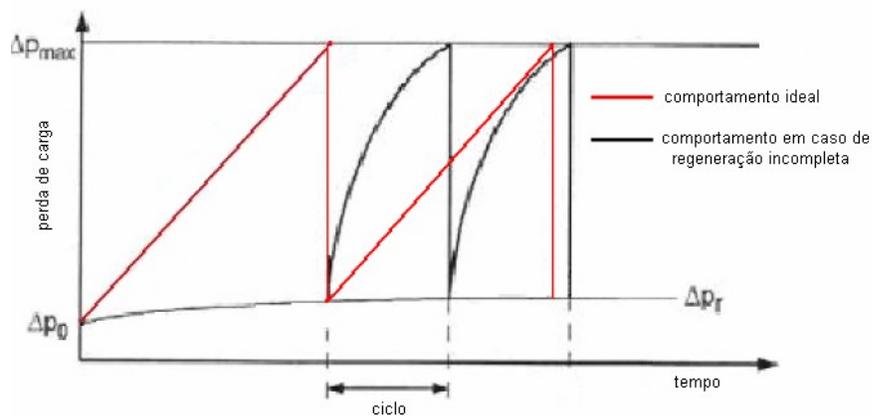


Figura 2.12: Comportamento do funcionamento de um filtro em caso de regeneração incompleta (*patch cleaning*), com fluxo e concentração de pó constante (TIENI, 2005).

Observando a figura anterior, ainda se pode verificar que no primeiro ciclo tem-se uma curva com comportamento ideal, com um aumento de perda de carga linear com o tempo. Porém, após a primeira regeneração, a curva muda consideravelmente a sua concavidade. Nesse caso, o percurso da perda de carga durante o ciclo de filtração se torna convexo em relação ao percurso da perda de carga em caso de funcionamento ideal.

No caso de fluxo constante, a velocidade de filtração é maior nas áreas regeneradas do filtro, e devido a esse aumento na velocidade local de filtração, a aglutinação de pó forma-se principalmente nas áreas regeneradas do filtro. Resumindo a limpeza por blocos resulta na distribuição desigual da espessura da torta de filtração e na velocidade não uniforme durante a filtração, ou seja, a torta de pó cresce principalmente nas áreas regeneradas do meio filtrante no início do ciclo de filtração. Já nas áreas onde não ocorreu a remoção da torta de pó, esta cresce significativamente ao final dos ciclos de filtração (TIENI, 2005).

2.13. Filtro Bolsa

2.13.1. Considerações Gerais

O sistema de filtração por bolsa passou a ser definitivamente conhecido nos meados dos anos 80, e atualmente esse sistema de filtragem abrange uma ampla área de aplicação, isso porque apresenta um funcionamento simples e atuação eficaz no processo de separação dos particulados do ar (DIAS, 2008).

O princípio de funcionamento do sistema de filtração por bolsa é considerado um dos mais simples entre as tecnologias existentes, é um sistema que utiliza um elemento filtrante em forma geométrica de bolsa, como está ilustrado na Figura 2.13.



Figura 2.13: Detalhe da forma geométrica de bolsa do elemento filtrante.

O princípio baseia-se na passagem do fluxo de ar por dentro do elemento filtrante, ficando as partículas sólidas retidas dentro da bolsa, o que diminui a possibilidade de contaminação dos gases durante a substituição dos filtros.

O sistema de filtração do tipo bolsa é constituído de três partes: a casa dos filtros, o cesto (suporte dos meios filtrantes) e a bolsa filtrante. O fluxo de ar a

ser filtrado é introduzido na parte superior da bolsa filtrante suportada pelo cesto. Isto assegura a distribuição do fluido pela superfície da bolsa, resultando em um fluxo distribuído por todo o meio filtrante sem efeito negativo de turbulência. O ar flui de dentro para fora da bolsa filtrante e os contaminantes retidos permanecem na parte interna da bolsa evitando uma possível contaminação durante a troca do elemento filtrante.

Como outros tipos de elementos filtrantes para aplicações similares, as bolsas devem trabalhar alojadas dentro de equipamentos metálicos chamados de casas de filtração, responsáveis por manter o fluido a ser filtrado dentro de um circuito de bombeamento geralmente pressurizado, obrigando-o a passar pelo elemento filtrante. A casa de filtração deve garantir a ausência do *by-pass* de produto pelo elemento, a fim de garantir que a filtração seja eficiente e garanta a vedação entre sua parte interna e externa, evitando assim os vazamentos.

Esta é uma vantagem em relação a algumas outras tecnologias onde a filtração ocorre de fora para dentro. No caso da bolsa como os sólidos ficam retidos dentro dela sua remoção implica na remoção dos próprios sólidos, evitando que a parte interna da casa de filtração seja contaminada com o produto ainda sem filtrar ou mesmo com os sólidos removidos. Com esses detalhes o tempo de parada para manutenção diminui e elimina-se a necessidade de uso de produtos para a limpeza da casa, resultando em economia para o processo.

Como características do uso deste sistema de filtração, podem-se citar:

- Elevada área de contato, o que garante alta capacidade de acumulação e de retenção de sólidos;
- Inexistência de métodos de limpeza dos meios filtrantes, uma vez que esses são descartáveis;

- Facilidade na troca de elementos filtrantes, que resulta em redução do tempo utilizado para a limpeza da casa de filtragem;
- Reduzida perda de carga do filtro;
- Custo com o descarte dos elementos filtrantes (incineração ou envio para aterros sanitários).

Devido ao aprimoramento e avanço tecnológico alcançado na área de filtração de gases e no desenvolvimento dos meios filtrantes do tipo bolsa, pôde-se conseguir eficiência de filtração de 99,98% para partículas de até dois micra de diâmetro, em vazões relativamente altas se comparadas a outras tecnologias (DIAS, 2008).

O sistema de filtração por bolsas tem uma ampla área de aplicação, sendo utilizado nas indústrias de bebidas e alimentos, indústrias de tintas, indústrias químicas e petroquímicas, metalúrgicas e muitas outras (DIAS, 2008).

2.13.2. Classificação

Basicamente, a classificação do filtro bolsa está baseada na eficiência dos meios filtrantes, sendo assim temos dois tipos de bolsas, aquelas que apresentam eficiência nominal e as de eficiência absoluta.

Os elementos filtrantes fabricadas a partir de feltros agulhados ou telas de monofilamento (que podem ser costurados ou termosoldados) são de eficiência nominal. As bolsas costuradas possuem uma eficiência de filtração menor do que aquelas termosoldadas, isso devido aos furos deixados pela agulha de costura que são pontos de fuga das partículas que se pretende reter na bolsa, já as

termosoldadas não têm em sua região de solda furos. As bolsas de eficiência absoluta são sempre termosoldadas e possuem elevada rigidez estrutural do meio filtrante, condição necessária para a garantia da eficiência exigida para esses tipos de elementos filtrantes (DIAS, 2008).

Podemos afirmar que as bolsas mais utilizadas nas aplicações em geral ainda são as de eficiência nominal, isso porque conseguem atender a maioria das aplicações industriais, sendo assim existe uma forte tendência para a utilização das bolsas nominais termosoldadas. As bolsas de eficiência absoluta têm aplicação em situações mais críticas em termos da qualidade do produto filtrado.

A construção dos filtros de eficiência absoluta tem como matéria-prima, principalmente, os feltros agulhados em poliéster ou polipropileno. Também costumam ser utilizados como meio filtrante absoluto as telas de nylon e polipropileno monofilamento e em poliéster multifilamento.

Para a fabricação dos filtros bolsa são aplicadas as máquinas de costura, e os equipamentos de solda usados para o fechamento lateral e de fundo. Uma das formas utilizadas para a costurada é o *interlock*, uma costura resistente à ruptura. Outra é a *overlock*, que melhora a resistência da bolsa e define o acabamento da região costurada. O aro também pode ser colocado por costura ou solda.

A termosolda é um processo atual, utilizando-se para a soldagem o processo de ar quente para a fusão das partes a serem soldadas e o processo de ultra-som para a soldagem do aro plástico ao corpo da bolsa. É importante observar que produtos estranhos ao material do meio filtrante não devem ser utilizados na construção das bolsas. Não deve ter nenhum tipo de adesivo, cola, ou aditivo, entre outros, que possam entrar em contato com o produto a ser filtrado.

2.14. Norma de Classificação dos Meios Filtrantes

Tabela 2.3: Recomendações para aplicações de filtros de ar, segundo a NBR 6401 da ABNT.

Classe de filtro	Eficiência (%)	Eficiência para a separação das seguintes partículas	Aplicações principais
G0	30-59	Alta eficiência para separação de insetos, eficiência satisfatória para pólen de plantas e poeira grossa de origem industrial. Quase ineficiente contra poeira atmosférica.	Condicionadores tipo janela.
G1	60-74	Eficiência satisfatória contra pólen de plantas e poeira grossa de origem industrial. Alguma eficiência contra poeira atmosférica.	Condicionadores tipo compacto (self contained).
G2	75-84	Boa eficiência contra pólen de plantas e poeira grossa de origem industrial. Eficiência satisfatória contra poeira grossa (> 5 micra) de poeira atmosférica.	Condicionadores de tipo <i>fan-coil</i> e de centrais.
G3	85 e acima	Boa eficiência contra poeira grossa (> 5 micra) de poeira atmosférica.	Condicionadores dos sistemas centrais, pré-filtragem para filtros finos F2 e F3.
F1	40-69	Eficiência satisfatória contra a fração fina (1-5micra) da poeira atmosférica. Pouca eficiência contra fumaças de óleos e tabaco.	Condicionadores de sistemas centrais para exigências altas, pré-filtragem para filtros finos F3.
F2	70-89	Boa eficiência contra a fração fina (1-5micra) da poeira atmosférica. Alguma eficiência contra fumaças de óleos e tabaco.	Condicionadores de sistemas centrais para exigências altas, pré-filtragem para filtros finos absolutos.
F3	90 e acima	Alta eficiência contra a fração fina (1-5micra) da poeira atmosférica, eficiência satisfatória contra fumaças de óleos e tabaco. Razoavelmente eficiente contra bactérias e fungos microscópicos.	Pré-filtro para filtros absolutos. Precisa pré-filtragem por sua vez.
A1	85-97,5	Boa eficiência contra a fração ultrafina (< 1 micron), da poeira atmosférica, fumaças de óleo e tabaco, bactérias e fungos microscópicos.	Salas com controle de teor de poeira. Precisa de pré-filtragem.
A2	98-99,96	Alta eficiência contra a fração ultrafina (< 1 micron), da poeira atmosférica, fumaças de óleo e tabaco, bactérias e fungos microscópicos.	Salas com controle de teor de poeira, zonas assépticas de hospitais (exigências altas). Precisa de pré-filtragem.
A3	99,97 e acima	Excelente eficiência contra a fração ultrafina (< 1 micron), da poeira atmosférica, fumaças de óleo e tabaco, bactérias e fungos microscópicos e vírus.	Salas limpas das classes 100, 10.000 e 100.000, salas e cabines estéreis para operações cirúrgicas e ortopédicas (exigências particularmente altas). Todas instalações que requerem teste de estanqueidade (lead test). Precisa de pré-filtragem.

Fonte: Norma 6401 da ABNT, 1980.

Observações:

As recomendações baseiam-se nas especificações da ASHRAE, e também nas classificações de outras organizações, tais como: para filtros grossos e finos na diretriz SWKI 68-3 da Associação Suíça de Engenheiros de Aquecimento e Condicionamento de ar (SWKI). Para filtros absolutos: no projeto de norma DIN 24 184 de julho de 1972 da Associação de Engenheiros Alemães (VDI).

Os filtros são divididos em três classes: grossos com prefixo G, finos prefixo F e absoluto prefixo A. Para filtros grossos, classes G0-G3: teste gravimétrico conforme AFI I do American Filter Institute ou ASHRAE 52-68. Para filtros finos, classes F1-F3: teste calorimétrico conforme *AFI Dust Spot* do American Filter Institute ou ASHRAE 52-68. Para filtros absolutos, classes A1-A3: teste fotométrico *DOP Test* conforme U.S. Military Standard MS 282.

Classificação das câmaras limpas conforme U.S. Federal Standard 209b de 24 de abril de 1973.

2.15. Instalação de Ar Comprimido

Uma instalação de ar comprimido é constituída do local de compressores e da linha de ar comprimido. No local dos compressores encontram-se os seguintes equipamentos: reservatório de ar comprimido, resfriador intermediário (*intercooler*), resfriador posterior (*aftercooler*), separador de umidade condensada, purgador, silenciador, filtros para evitar que o particulado do ar entre nos compressores e desumificadores para secagem total do ar no o caso de certas aplicações industriais especiais (MACINTYRE, 1997).

2.16. Admissão de Ar no Compressor

Nos compressores de pequeno porte, a tomada de ar ocorre no próprio local onde estão instalados os compressores, por meio de uma abertura com diâmetro suficiente para a entrada de ar no equipamento (MACINTYRE, 1997).

Nos compressores de tamanho médio e grande, como os abordados nesse projeto, é usado um tubo de aspiração independente para cada compressor, possibilitando à aspiração de ar externo a casa dos compressores.

Tanto nos compressores de pequeno porte quanto nos compressores de médio e grande porte é indispensável que o ar aspirado pelo compressor seja filtrado, a fim de impedir que partículas de pó abrasivas tenham acesso à câmara de compressão do equipamento. Nos compressores de pequeno porte, o filtro pode localizar-se diretamente no compressor, e nos compressores médios e grandes que exigem instalação do tubo de aspiração de ar, o filtro pode localizar-se do lado externo ou interno ao local dos compressores.

O ar deve ser admitido na temperatura mais baixa possível e, por isso a admissão de ar deve ser realizada em local com sombra e boa ventilação natural, geralmente a instalação da casa de filtros é feita elevada do nível do terreno para evitar uma maior aspiração de particulados presentes no ar.

Na linha de aspiração de ar, deve ser colocado um filtro que retenha a poeira, impedindo seu acesso ao compressor. Tal filtro deve ser colocado o mais próximo possível do compressor e em posição que permita fácil inspeção, manutenção e limpeza.

2.17. Sistema de Filtragem para os Compressores

Os sistemas de filtragem são usados para remover as partículas presentes no fluxo de ar fornecido aos compressores. O efeito nocivo do ar carregado de particulados pode ser reduzido com a seleção adequada dos elementos responsáveis pela filtração do ar que será aspirado pelos compressores. A Figura 2.14, ilustra as consequências de como a escolha inadequada do sistema de filtragem pode danificar os componentes internos do compressor.



Figura 2.14: Pás do compressor danificadas devido a choques com particulados do ar. Fotografia aumentada mostrando detalhe de corrosão nas pás do rotor.

Poeiras abrasivas atacam as peças rotativas dos compressores resultando em erosão do material e aceleração da falha por fadiga dos seus componentes. Incrustações nas pás do compressor devido os particulados de poeira atmosférica podem provocar alterações significativas no perfil de funcionamento do mesmo, o que ocasiona perdas substanciais na sua eficiência. Além disso, os particulados presentes no fluxo de ar podem também atingir os resfriadores, gerando incrustações que reduzem a remoção de calor e afetam o funcionamento correto do sistema de compressão (MACINTYRE, 1997).

A corrosão causada pela interação de umidade atmosférica, anidridos, ácido, sais e outras substâncias corrosivas, podem conduzir a danos especialmente nos primeiros estágios de compressão.

A Tabela 2.4 ressalta quais os principais danos causados que podem ser causados pela aplicação de um sistema de filtragem de ar inadequado, e também apresenta as diferentes dimensões das partículas que podem causar esses danos nos compressores.

Tabela 2.4: Danos causados por uso de um sistema de filtragem inadequado.

Categoria de Danos:	Faixa de Granulometria (μm)
Erosão	Acima de 5.0
Incrustações e conseqüente desequilíbrio	Aprox. 0.1 - 5
Incrustações nos resfriadores	Aprox. 0.1 - 5
Corrosão	Aprox. 0.1 - 5
Corrosão devido a alta temperatura	Aprox. 0.1 - 5
Entupimento dos resfriadores de ar	Acima de 0.1

Mesmo submetidos a severas condições de serviço em atmosfera úmida e ambiente poluído, os filtros não devem permitir que os compressores tenham sua estabilidade de funcionamento comprometida, e seus componentes danificados pela corrosão devido à penetração dos particulados do ar ambiente. Os filtros devem, portanto, assegurar o correto funcionamento do sistema, mesmo após um longo período de serviço as características do sistema de filtração não devem deteriorar-se.

Os filtros também não devem permitir a concentração elevada de particulado nas fibras dos elementos filtrantes, uma vez que isso dificulta a passagem do fluxo resultando em queda da pressão do ar que chega aos compressores, fato que pode ocasionar vibração dos elementos internos dos compressores e conseqüente desbalanceamento dos seus rotores.

Requisitos para o sistema de filtração:

- Eficiência na filtragem de particulados potencialmente nocivos ao funcionamento dos compressores.
- Pequenos valores de queda de pressão para um determinado fluxo de ar, o que resulta em redução das perdas devido ao consumo de energia. Por exemplo, uma queda de pressão de 5 mm c.a. no elemento filtrante poderá resultar em um aumento de até 0,1% no valor de potência consumida pelo compressor.
- Elevado tempo de vida útil com valor confiável para evitar intervenções desnecessárias.

Como pôde ser observada é indispensável a utilização de um sistema de filtragem na entrada de ar dos compressores para impedir que partículas de pó abrasivas tenham acesso à câmara de compressão do equipamento. O efeito nocivo do ar carregado de particulados pode ser reduzido com a seleção adequada dos elementos responsáveis pela filtração do ar que será aspirado.

O capítulo de Materiais e Métodos, possui uma descrição dos materiais em estudo e do princípio de funcionamento dos sistemas de filtragem (atual e proposto), e também relata os principais problemas apresentados devido a atuação ineficaz dos filtros e o método escolhido para resolver esses problemas .

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo, encontram-se descritos os principais componentes do sistema de filtragem e dados levantados em campo utilizados para a execução deste estudo. Essa descrição envolve a caracterização dos compressores, dos meios filtrantes e dos sistemas de filtração (atual e proposto). Nele são apresentados também os principais problemas registrados, bem como os procedimentos adotados para escolha das alternativas para resolvê-los e análise dos métodos de filtração.

3.1. *Modo de Investigação*

Para facilitar o entendimento da escolha do tipo de meio filtrante, adotaram-se as terminologias e classificações utilizadas pela norma brasileira NBR 6401 da ABNT. Para a descrição dos componentes da planta analisada e, para a obtenção dos dados de funcionamento dos componentes: compressor e filtro, utilizou-se relatórios da empresa e manual do equipamento.

A pesquisa foi basicamente realizada a partir de:

- Consultas em fontes documentais sobre as normas aplicadas a sistema de filtração e meios filtrantes e fontes bibliográficas sobre métodos de filtração de ar;
- Consulta na ArcelorMittal Tubarão de histórico do funcionamento do sistema de filtragem de ar dos compressores da unidade de fracionamento de ar, e manual dos compressores.

3.2. Aspectos Gerais do Equipamento Atual

3.2.1. Localização do Equipamento

O equipamento de filtração, relacionado neste estudo, está localizado na Unidade de Fracionamento de Ar da ArcelorMittal Tubarão. A função deste equipamento é filtrar os particulados do ar evitando que atinjam os compressores e danifiquem seus componentes internos.

3.2.2. Desenho esquemático do sistema

A Figura 3.1, apresenta um desenho esquemático do filtro, estágios de compressão do ar e resfriadores intermediários que compõem o objeto de estudo desse trabalho:

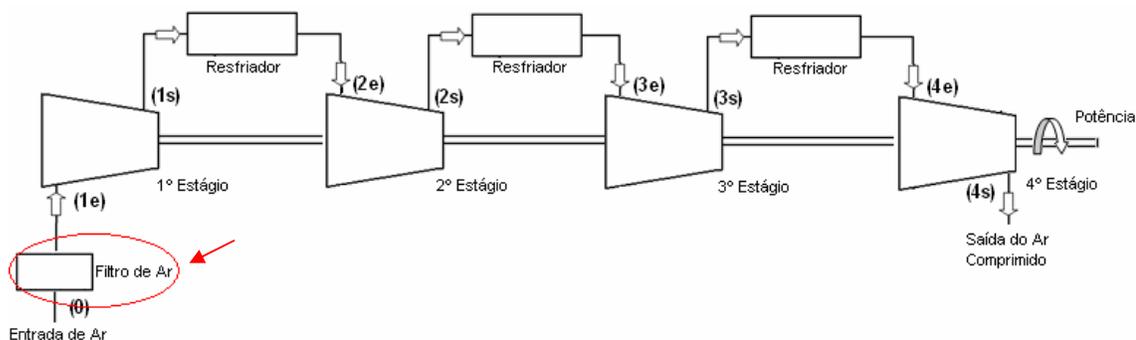


Figura 3.1: Desenho esquemático do filtro e dos estágios de compressão.

3.2.3. Torre de Capitação de Ar

A torre de capitação de ar tem a função de selecionar e direcionar o ar atmosférico aspirado pelo compressor para câmara de filtros onde é forçado a passar pelos filtros manga. A tabela 3.1 possui informações quantitativas sobre a torre principal de sucção de ar atmosférico:

Tabela 3.1: Parâmetros importantes da torre de capitação de ar.

Parâmetros:	Medidas:
Vazão de Ar	120.000 m^3/h
Altura da Torre	10 m
Diâmetro do Topo	3 m
Diâmetro da Base	5 m

Fonte: arquivo ArcelorMittal Tubarão.

3.2.4. Sistema de Filtragem

O sistema de filtragem atual presente na Unidade de Fracionamento está localizado na entrada de ar dos compressores, e a função principal desse equipamento é reter os particulados do ar atmosférico evitando que estes penetrem no equipamento e ocasionem danos aos componentes internos da planta de fracionamento (turbina e válvulas), e aos componentes internos dos compressores.

Os filtros de tecido utilizados são do tipo manga com limpeza do meio filtrante com o uso de fluxo de ar reverso, (sistema descrito com detalhes no capítulo de embasamento teórico no item 2.7, subitem 2.7.2). Com capacidade para uma vazão de até 120.000 m^3/h e um total de noventa mangas para filtragem do ar.

Os meios filtrantes possuem capacidade de filtração de 98% dos particulados maiores que 5 micron, e queda de pressão devido o diferencial de vazão do fluxo de ar ao passar pelas mangas com valor máximo de 120 mm c.a.. A parada dos compressores para a troca das mangas é feita a cada dois anos, e a parada para a limpeza e identificação de furos nos meios filtrantes acontece duas vezes ao ano.

3.2.5. Parâmetros de Funcionamento

A Tabela 3.2 apresenta as principais informações sobre o funcionamento dos filtros atuais (manga):

Tabela 3.2 Parâmetros de funcionamento dos filtros atuais.

Parâmetros:	Medidas:
Perda de carga inicial, filtros limpos:	80 mm c.a.
Perda de carga final, filtros sujos:	120 mm c.a.
Eficiência do sistema de filtragem:	98% para os particulados do ar atmosférico maiores que 5 micron.
Vazão de filtragem:	$1 \text{ m}^3/\text{min}$ em 1 m^2 de tecido filtrante.
Pressão diferencial nas mangas:	80 a 120 mm c.a.
Quantidade de mangas:	90 unidades.

Fonte: arquivo ArcelorMittal Tubarão.

3.2.6. Compressores

Os compressores de ar mencionados nesse estudo são equipamentos de grande capacidade de vazão, aproximadamente $114.000 \text{ m}^3/h$, em média. Trata-

se de um compressor centrífugo do modelo DH 112, da *Kawasaki Stell Corporation*, possuindo quatro estágios de compressão e três resfriadores intermediários.

Os compressores têm a função de manter constante a vazão na linha do ar que será fracionado e encaminhado as demais unidades da siderúrgica, onde finalmente será utilizado. A Tabela 3.3 apresenta as principais características operacionais do compressor.

Tabela 3.3: Características e considerações operacionais do compressor.

Características do Compressor:	Dados:
Modelo:	DH – 112
Número de estágios:	4
Número de resfriadores intermediários:	3

Condições Operacionais:	Dados
Temperatura de aspiração do 1° estágio:	32°C
Temperatura de saída do 4° estágio:	95°C
Pressão de sucção do 1° estágio:	300 mm c.a.
Umidade relativa:	90%
Pressão de descarga:	52000 mm c.a.
Vazão máxima de ar:	150.000 m^3/h
Vazão mínima de ar:	114.000 m^3/h

Fonte: arquivo ArcelorMittal Tubarão.

3.2.7. Principais Problemas

O sistema de filtração está em operação desde o início de funcionamento da Unidade de Fracionamento de Ar, em 1983. Após estes anos, podem ser observadas características de fim de vida útil de chaparia das casas de filtro e sistema de limpeza, que resultam em alto custo de manutenção, necessidade de parada dos compressores para intervir na troca das mangas e identificação de

furos no meio filtrante, e demais problemas devido à filtragem inadequada do ar, tais como:

- Perda de carga elevada, aumentando o consumo de energia elétrica dos compressores;
- Desgaste dos componentes internos da planta de fracionamento (turbina e válvulas);
- Aceleração do desgaste dos componentes internos do compressor;
- Desbalanceamento dos rotores do compressor.

3.3. Soluções Propostas

De acordo com a situação descrita no item 3.2.7, será apresentada a viabilidade técnica e financeira de alternativas para a solução do problema, considerando basicamente: a reforma do sistema atual ou a substituição por outro sistema de tecnologia mais moderna. Assim serão considerados:

- Alternativa 1: Reforma do sistema de filtragem atual;
- Alternativa 2: Substituição do sistema atual por sistema de filtragem de tecnologia mais moderna (filtros tipo bolsa).

3.3.1. Alternativa 1: Reforma do Sistema de Filtragem

A seguir, apresenta-se a descrição do escopo técnico da reforma do sistema de filtragem em funcionamento na planta de fracionamento de ar:

- Substituição da chaparia da casa de filtro: fundo, teto e lateral;
- Substituição do sistema de limpeza de manga;
- Substituição das tubulações de entrada e saída de ar;
- Substituição de todas as mangas;
- Manutenção dos sopradores de ar;
- Revestimento contra corrosão na chaparia interna;
- Substituição das abraçadeiras de fixação das mangas;
- Substituição dos coletores de pó;
- Construção de proteção contra intempéries do tempo.

3.3.2. Alternativa 2: Substituição do Sistema de Filtragem

O escopo técnico da substituição resume-se a troca de todo o sistema de filtragem por um de tecnologia mais moderna e adequada (tipo bolsa). O novo sistema de filtragem deverá apresentar as características de funcionamento do equipamento atual e as melhorias requeridas ao sistema.

3.4. Aspectos Gerais do Sistema de Filtragem Proposto

O sistema de filtragem proposto para substituir o atual será do tipo bolsa confeccionada em material não-tecido descartável, os aspectos de filtragem desse sistema encontram-se descritos mais detalhadamente no capítulo de embasamento teórico e referências bibliográficas, item 2.13.

Este sistema de bolsas possui fácil manutenção devido à inexistência de um sistema de limpeza para os meios filtrantes, uma vez que as bolsas são descartáveis com troca a cada seis meses. Além disso, o novo sistema permitirá a troca dos meios filtrantes sem a necessidade de parada dos compressores, para tanto possuirá dois estágios de filtração. Os dois estágios permitirão também eficiente filtragem dos particulados do ar diminuindo a possibilidade de desgaste dos componentes internos da planta de fracionamento de ar e dos compressores. Os meios filtrantes, terão uma eficiência total acima de 98% para particulados de maiores que 5 micra e máxima perda de carga inicial com os filtros totalmente limpos de 12 mm c.a..

3.4.1. Parâmetros de Funcionamento

Informações sobre o funcionamento dos filtros propostos, do tipo bolsa, estão relacionadas na Tabela 3.4:

Tabela 3.4: Parâmetros de funcionamento dos filtros propostos, filtro bolsa.

Parâmetros:	Medidas:
Perda de carga inicial, filtros limpos:	12 mm c.a.
Perda de carga final, filtros sujos:	76 mm c.a.
Eficiência do sistema de filtragem:	> que 98% para os particulados do ar atmosférico maiores que 5 μm .
Vazão de filtragem:	1 m^3 /min em 1 m^2 de tecido filtrante.
Pressão diferencial nas bolsas:	12 a 76 mm c.a.
Quantidade de bolsas, 2º estágio de filtração:	36 unidades.
Quantidade de bolsas, 1º estágio de filtração:	36 unidades.
Acumulação de pó em cada unidade de filtro bolsa:	Até 8 kg.

A Tabela 3.5, apresenta a classificação e eficiência esperada de cada estágio de filtração de acordo com a norma NBR 6401 da ABNT. Também possui os valores de perda de carga observados para cada estágio, considerando a vazão de funcionamento atual de $120.000 \text{ m}^3/h$.

Tabela 3.5: Classificação dos estágios de compressão, eficiência e perda de carga.

Estágio de Filtração	Classificação NBR 6401	Eficiência (%)	Perda de Carga
Primeiro estágio de filtração	F3	> 90	3 mm c.a.
Segundo estágio de filtração	G3	90 - 95	9 mm c.a.
Total:			12 mm c.a.
Perda de carga final, após seis meses de funcionamento:			
Primeiro estágio de filtração	F3	> 90	30 mm c.a.
Segundo estágio de filtração	G3	90 - 95	46 mm c.a.
Total:			46 mm c.a.

Importante relatar que a eficiência equivalente para todo o sistema é maior que 98% para particulados do ar maiores que $5 \mu\text{m}$.

3.4.2. Caixa de Filtragem

É na caixa de filtração que está o meio filtrante responsável pela captura do pó contido no fluxo gasoso admitido pelo compressor. Essa caixa deve ser metálica construída em aço carbono com paredes laterais em chapa de aço e constando de suportes internos para os quadros de filtros bolsas, fabricados em chapa de aço inox 304.

A Caixa de Filtragem será dimensionada para atender uma vazão de $120.000 \text{ m}^3/h$, possuindo um corredor de acesso para substituição dos elementos filtrantes com os compressores em operação, e um sistema de segurança para alívio

de pressão para ser usado quando filtro ficar totalmente saturados de partículas do fluxo.

3.4.3. Filtro Primeiro Estágio de Filtração

O filtro para o primeiro estágio de filtração, também denominado de pré-filtro possuirá molduras fabricadas em aço inox AISI 304 com a finalidade de aumentar a vida útil da estrutura, e diminuir o período entre trocas das molduras devido corrosão. Constará também de molas de fixação, borrachas de vedação para fixação dos elementos filtrantes, e um total de 36 filtros bolsa confeccionada em manta de fibra sintética de estrutura progressiva, o que garante maior acumulação de pó e aumento de vida útil dos elementos.

Os filtros são trocados pelo lado da saída com o sistema em funcionamento por um corredor que separa os dois estágios de filtragem. Os elementos filtrantes do primeiro estágio de filtração serão da classe G3 segundo NBR 6401 da ABNT, o que garante uma eficiência de filtragem acima de 85% para particulados de poeira atmosférica maiores que 5 micra. Maiores detalhes sobre classificação de meios filtrantes e norma NBR 6401 da ABNT encontram-se na Tabela 2.3 do capítulo de embasamento teórico, item 2.14.

3.4.4. Filtro Segundo Estágio de Filtração

O filtro final de bolsas é também denominado de filtro fino, consta de um conjunto formado por molduras fabricados em aço inox AISI 304, com um total de 36 elementos filtrantes confeccionadas em manta de fibra sintética termosoldadas

com borrachas de vedação e molas para a fixação dos elementos filtrantes. Os filtros desse estágio são trocados pelo lado de entrada do ar pelo corredor de acesso. Os elementos filtrantes serão da classe F3 de acordo com a norma NBR 6401 da ABNT com eficiência de filtração acima de 95% para particulados do ar entre 1 e 5 micra, que corresponde a fração fina da poeira atmosférica, possuindo também eficiência satisfatória contra fumaças de óleos e tabaco. Mais informações sobre classificação de meios filtrantes e norma NBR 6401 da ABNT apresentam-se descritas na tabela 2.3 do capítulo de embasamento teórico, item 2.14.

O capítulo de Resultados e Discussão constará dos resultados, interpretações, e discussões resultantes das análises técnica e financeira feita para as alternativas 1 e 2, e apresentadas no item 3.4 para a melhora do sistema de filtração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo inicialmente serão discutidos os resultados obtidos das análises dos gráficos de perda de carga e consumo de corrente elétrica do motor. Também serão apresentados os resultados obtidos com a análise técnica e financeira realizada comparando as duas alternativas, (descritas no capítulo de materiais e métodos). Essas análises têm por objeto ratificar a escolha da alternativa mais aplicável ao sistema.

4.1. Gráficos

Os gráficos desse subitem mostram quantitativamente os valores medidos de perda de carga nos filtros manga e consumo de corrente elétrica do motor de acionamento do compressor, que estão em funcionamento na unidade de fracionamento de ar, as medições foram feitas no período de novembro de 2006 a setembro de 2008. Esses gráficos também apresentam informações sobre o valor normal, o valor de alerta e o valor crítico de funcionamento do filtro e compressor.

4.1.1. Curva de Tendência - Diferencial de Pressão

Esse item se refere à análise da influência do diferencial de pressão na determinação da vida útil dos filtros, sendo assim quando este parâmetro assume um valor muito elevado é uma indicação de que os meios filtrantes estão obstruídos, e que a limpeza ou substituição das mangas precisa ser efetuada. Quando um

índice de diferencial de pressão próximo ao valor de funcionamento normal é atingido tem-se, portanto, um indicativo para a troca dos elementos filtrantes, se o filtro continuar trabalhando com elevado índice de perda de carga, a frequência de paradas para manutenção das mangas será maior, o que têm como consequência, elevado perda de produção.

Analisando a Figura 4.1, pode ser verificado que os meios filtrantes estão funcionando com elevados valores de perda de carga, assumindo picos de diferencial de pressão acima do valor normal. Esse comportamento da curva deve-se ao fenômeno de limpeza dos filtros manga que deixa uma fina camada residual de pó aderida aos meios filtrantes, essa camada atuará na filtragem do fluxo aumentando o valor da perda de carga.

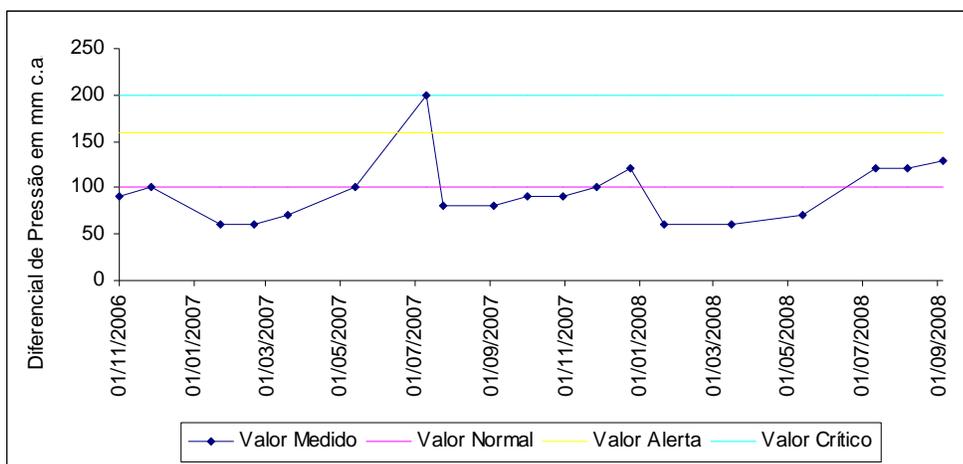


Figura 4.1: Gráfico dos valores medidos para o diferencial de pressão do sistema de filtragem atual (manga) em mm c.a..

Observações: Os picos nos gráficos de pressão indicam alto valor de perda de carga e necessidade de limpeza dos meios filtrantes.

Tabela 4.1: Valor normal, crítico e de alerta do diferencial de pressão do sistema de filtragem atual (manga).

Valor Normal (mm c.a.)	Valor Alerta (mm c.a.)	Valor Crítico (mm c.a.)
100	160	200

4.1.2. Curva de tendência - Corrente Elétrica

A Figura 4.2, representa a curva de tendência da corrente elétrica consumida pelo motor, no período de novembro de 2006 a setembro de 2008, e correlaciona os valores medidos neste período com o valor normal, de alerta e crítico de funcionamento do compressor.

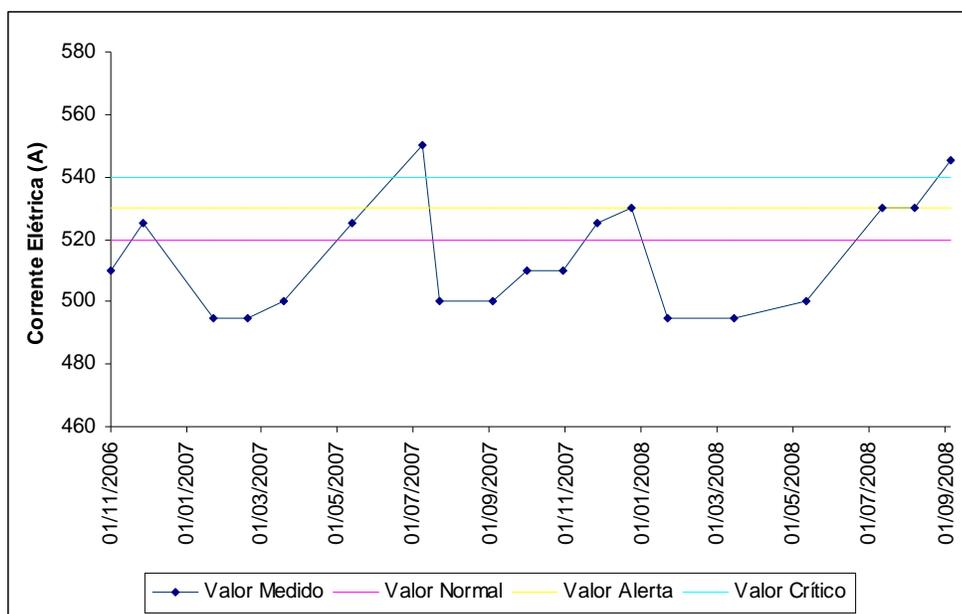


Figura 4.2: Gráfico dos valores medidos para a corrente elétrica (em ampère) consumida pelo compressor, atendido pelo sistema atual de filtragem (manga).

Observação: os picos de consumo de corrente acontecem quando os filtros de ar estão sujos (obstruídos).

Tabela 4.2: Valor normal, crítico e de alerta da corrente elétrica (em ampère) consumida pelo compressor, atendido pelo sistema atual de filtragem (manga).

Valor Normal (A)	Valor Alerta (A)	Valor Crítico (A)
520	530	540

Analisando o gráfico da Figura 4.2, pode-se notar que os valores medidos de corrente, em certos períodos, assumem elevados índices que ultrapassam o valor normal de funcionamento, chegando a ser maior que o valor crítico, isso revela que o compressor está consumindo maior corrente elétrica para funcionar, e, conseqüentemente o custo de funcionamento do sistema também aumenta. Esta situação descrita com a análise do gráfico de corrente confirma quantitativamente a necessidade de um estudo para a adição de melhoria ao sistema de filtragem.

4.1.3. Revisão documental

Os documentos usados para formular os gráficos de perda de carga e de consumo de corrente elétrica do sistema atual de filtração do tipo manga são dados coletados em campo pela leitura da instrumentação do sistema de filtragem dos compressores, documentadas em arquivos da ArcelorMittal Tubarão.

4.2. Curva de Confiabilidade

Como descrito no capítulo de embasamento teórico (item 2.9), a perda de carga no filtro resultante da queda de pressão é um dos parâmetros determinantes para a escolha do sistema de filtragem, uma vez que determina a frequência de limpeza, e conseqüentemente afeta o tempo de vida do filtro. Assim, quando se deseja menores custos com manutenção dos elementos filtrantes deve-

se optar por filtros que apresentem baixos valores de perda de carga. Além disso, o alto valor de perda de carga também representa maior consumo de corrente elétrica do compressor, e conseqüentemente maiores gastos para o funcionamento do mesmo.

Sendo assim, conhecendo a importância da perda de carga para a determinação do sistema de filtragem a ser escolhido, este será o parâmetro usado para a construção da curva de confiabilidade.

A Figura 4.3 apresenta a curva de confiabilidade com os valores medidos de perda de carga do sistema atual de filtragem e o valor normal de funcionamento dos filtros manga. A linha que aparece em vermelho no gráfico representa o valor máximo (filtros sujos) e mínimo (filtros limpos) de perda de carga obtido com o uso do sistema de filtragem proposto, que aplica a tecnologia de filtragem com meios filtrantes tipo bolsa.

Fazendo a análise do gráfico, nota-se claramente que o sistema proposto representa uma melhoria a ser aplicada, uma vez que os valores de perda de carga são bem menores que aqueles obtidos quando considerado o funcionamento normal dos filtros atuais. Pôde-se constatar com isso, que mesmo com a reforma dos filtros manga não é possível alcançar valores de perda de carga tão baixos quanto aqueles obtidos com a utilização do sistema de filtragem tipo bolsa. Esta constatação poderá representar um dos fatores determinantes para a escolha da alternativa (troca ou reforma do sistema de filtragem).

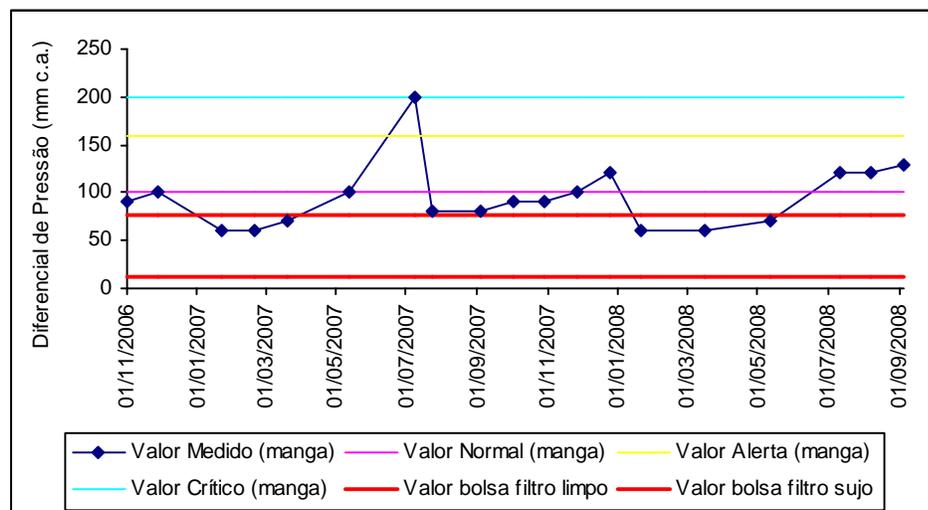


Figura 4.3: Gráfico comparativo da perda de carga do sistema atual de filtragem e do sistema proposto (filtro bolsa).

4.3. Análises

4.4. Análise Técnica

Tabela 4.3: Tabela comparativa das análises técnicas das alternativas.

Item	Alternativa 1	Alternativa 2	Comentários
Mantenabilidade do sistema	↓	↑	Alternativa A, necessita de parada da planta por um período de 08h para inspeção e troca das mangas.
Consumo de energia elétrica	↓	↑	Estima-se uma economia de 496 MWh/ano.
Eficiência na filtragem	=	=	Ambos os sistemas possuem elevada eficiência de filtragem.
Prolongamento de vida útil dos componentes internos da planta	↓	↑	Diminuição do desgaste por erosão nos internos da planta.
Segurança operacional (acúmulo de pó carvão)	↓	↑	O novo sistema (bolsas) retém os contaminantes dentro do elemento filtrante.

4.5. Análise Financeira

4.5.1. Alternativa 1 – Reforma

A Tabela 4.4 apresenta os principais custos de reforma do sistema atual:

Tabela 4.4: Tabela de análise financeira dos custos de reforma do sistema de filtragem atual.

Item	Descrição	Valor (R\$)
1	Substituição da chaparia da casa de filtro: fundo, teto e lateral.	107.800,00
2	Substituição do sistema de limpeza de manga	50.000,00
3	Substituição das tubulações de entrada e saída de ar	30.000,00
4	Substituição de todas as mangas	4.230,00
5	Manutenção dos sopradores de ar	20.000,00
6	Revestimento interno e externo contra corrosão na chaparia interna	80.000,00
7	Substituição das abraçadeiras de fixação das mangas	2.000,00
8	Substituição dos coletores de pó	20.000,00
9	Construção de proteção contra intempéries do tempo	15.000,00
10	Mão-de-obra	200.000,00
Total		529.030,00

A Tabela 4.5 apresenta o custo de manutenção anual para o sistema atual de filtragem:

Tabela 4.5: Tabela de análise financeira dos custos de manutenção anual para o sistema de filtragem atual do tipo manga.

Item	Descrição	Valor (R\$)
1	Parada da produção de O2 e N2 para inspeção e trocas de mangas (considerando preço de compra dos produtos acima no período de 8h, 2 vezes ao ano)	241.800,00
2	Substituição de todas as mangas e abraçadeiras	24.460,00
3	Revestimento interno e externo contra corrosão da chaparia	20.000,00
4	Manutenção dos sopradores de ar	10.000,00
Total		296.260,00

4.5.2. Alternativa 2 – Troca

A Tabela 4.2 possui o custo previsto de investimento no novo sistema de filtragem:

Tabela 4.6: Tabela de análise financeira do investimento no novo sistema de filtração.

Item	Descrição	Valor (R\$)
1	Sistema completo de filtragem de ar tipo bolsa	300.000,00

Tabela 4.7 apresenta o custo estimado de manutenção anual para o novo sistema de filtragem:

Tabela 4.7: Tabela de análise financeira dos custos de manutenção anual do novo sistema de filtragem.

Item	Descrição	Valor (R\$)
1	Parada da produção de O ₂ e N ₂ para inspeção e trocas de mangas (considerando preço de compra dos produtos acima no período de 8h, 2 vezes ao ano)	-
2	Substituição dos elementos filtrantes (bolsas)	60.000,00
3	Revestimento interno e externo contra corrosão da chaparia	20.000,00
4	Manutenção dos sopradores de ar	-
Total		80.000,00

4.5.3. Comparação da Análise Financeira

O método do valor presente líquido pode ser usado quando se têm diversas alternativas econômicas e há a necessidade de compará-las a fim de obter a mais conveniente, sendo escolhida aquela que apresenta o maior valor presente líquido a uma determinada taxa mínima de atratividade. Com o intuito de comparar

as alternativas de projeto (1 ou 2), este método foi aplicado, e os valores obtidos estão dispostos na Tabela 4.8.

Fórmulas e informações para o cálculo do valor presente líquido em (HIRSCHFELD, 2000).

Tabela 4.8: Tabela comparativa das análises financeiras.

Alternativa 1	Valor (R\$)	Alternativa 2	Valor (R\$)
Reforma do sistema atual	529.030,00	Instalação de novo sistema	300.000,00
Custos de manutenção anual	296.260,00	Custos de manutenção anual	80.000,00
Valor presente líquido (20 anos)	-3.051.258,40	Valor presente líquido (20 anos)	-981.085,10

A Tabela 4.8 apresenta a comparação das alternativas, 1 e 2, para melhor análise de viabilidade financeira, e também o valor presente líquido das alternativas, considerando tempo de vida útil dos sistemas de filtragem (20 anos) e taxa mínima de atratividade de 10% ao ano. Analisando a tabela, conclui-se que a alternativa 2, de troca do sistema de filtragem é a alternativa mais viável financeiramente, já que possui o maior valor presente líquido e menores valores de investimento e manutenção anual.

4.6. Discussão dos Resultados

Dispondo dos valores obtidos com a análise financeira e técnica (feita com a aplicação da curva de confiabilidade), não é difícil perceber que ambas foram favoráveis a alternativa de substituição do sistema de filtragem por um sistema de tecnologia mais nova, filtro bolsa. Sendo, portanto, a alternativa mais rentável para o

sistema. A escolha desta representa uma economia anual com manutenção dos meios filtrantes, e componentes internas da unidade de fracionamento de ar de aproximadamente R\$ 200.000,00. Além disso, a troca é tecnicamente viável, uma vez que o sistema de filtragem proposto possui características de eficiência de filtragem semelhantes ao atual e valor de perda de carga inferior ao obtido com o uso dos filtros manga.

4.7. Justificativas para a escolha

O sistema atual de filtragem da unidade de fracionamento de ar da ArcelorMittal Tubarão, apresenta um princípio de funcionamento ineficiente para a aplicação na qual esta sendo usado. Isso devido à própria característica desta aplicação que exige reduzidos valores de perda de carga, o que não é obtido quando utilizamos os filtros tipo manga. Os valores elevados de perda de carga alcançados com o uso deste sistema de filtragem são explicados devido às próprias características funcionais do filtro manga.

Os filtros manga utilizados possuem um sistema de limpeza baseado no uso de um fluxo de ar soprado em sentido inverso ao de filtragem, essa limpeza deixa uma fina camada de material particulado, o que provoca uma perda de carga residual após a etapa de limpeza, e o filtro não retoma as propriedades iniciais.

A fim de obter-se uma solução para o problema de perda de carga, sem perder muito em eficiência foi proposto o sistema de filtração por bolsas, com meios filtrantes descartáveis que não apresentam a camada de pó residual e, portanto possuem baixo valor de perda de carga. Outra vantagem do sistema é a manutenção simples com a possibilidade da troca dos elementos filtrantes com o

sistema em funcionamento, o que evita as paradas do compressor, fato que em um sistema de produção contínua, como o presente nesse estudo, resulta em menor perda financeira devido à necessidade de paradas do processo produtivo para a manutenção do equipamento.

O capítulo seguinte apresentará as principais conclusões obtidas após a análise e a interpretação dos resultados realizada.

5. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo e descritos no capítulo de Resultados e Discussão permitem apresentar as seguintes conclusões:

- A alternativa que melhor atente aos problemas apresentados pelo sistema de filtragem atual é aquela que descreve a troca de todo o sistema de filtragem por um de tecnologia mais moderna e adequada com uso do filtro bolsa;
- A alternativa de reforma do sistema atual mantendo o sistema de filtragem (filtros manga) mostrou-se financeiramente mais caro, e tecnicamente apresentou-se menos vantajosa.

A seguir apresentam-se as principais vantagens obtidas com o uso do sistema de filtragem proposto (filtro bolsa):

- O filtro bolsa possui significativa área filtrante o que garante a elevada eficiência registrada (maior que 98%, para particulados de ar atmosférico maiores que 5 micron);
- O filtro manga também possui elevada eficiência, porém os altos valores de perda de carga apresentados mostram que este sistema de filtragem deve ser preferencialmente aplicado em situações em que o

diferencial de pressão não é um fator relevante, como no caso de filtração de ar para controle da poluição ambiental;

- O sistema de filtração proposto apresenta pequenos valores de perda de carga durante a filtração, e menor frequência de substituição dos elementos filtrantes;
- Este sistema ainda possui a possibilidade de troca dos meios filtrantes com o compressor em funcionamento, evitando paradas na produção para a substituição das bolsas;
- Além das vantagens técnicas descritas acima, os filtros propostos são financeiramente mais viáveis, pois possuem menores custos anuais de manutenção e menor custo de compra do sistema.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Como prosseguimento dos estudos realizados neste trabalho, com base nos resultados apresentados, ainda há um aspecto interessante que merecia ser investigado, que seria fazer uma análise mais detalhada de outros tipos de sistema de filtragem, não descrito neste estudo, tais como:

- Filtro manga com limpeza por pulso de ar reverso (*pulse Jet*), a vantagem deste tipo de sistema de filtragem é a possibilidade de limpeza do meio filtrante com o equipamento em funcionamento, porém ele possui a desvantagem de gerar muitos furos na manga o que resulta em menor tempo de vida útil do sistema, e;
- Precipitadores eletrostáticos possuem elevada eficiência e baixa perda de carga, porém o custo de investimento, operação e manutenção podem inviabilizar sua aplicação.

E, fazer a verificação se estes apresentariam as características técnicas e financeiras que viabilizariam sua aplicação na filtragem de ar para compressor.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, Mônica Lopes. **Filtração de gases em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada**. Tese de doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6401**: Instalações de Centrais de Ar Condicionado. Rio de Janeiro, 1980.

CAVACENO, V. **Industrial Air Pollution Engineering**. McGraw-Hill, USA, 1980.

DIAS, Tiago. Conceito Simples com Ótimos Resultados. **Revista Meio Filtrante**, São Paulo, ano 5, 2008.

DIAS, Tiago. Tecidos que Filtram. **Revista Meio Filtrante**, São Paulo, ano 4, 2007.

DONOVAN, R.P.; **Fabric Filtration for Combustion Sources**. New York, Marcel Dekker Inc., 1985.

HIRSCHFELD, Henrique. **Engenharia Econômica e Análise de Custos**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Equipamentos industriais e de processo**. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

MARTINS, Jaqueline Costa. **Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

MORAN J. M.; SHAPIRO H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

MYCOCK, J.C.; MCKENNA, J.D.; THEODORE, L. **Handbook of Air Pollution Control Engineering and Technology**. 1995.

RODRIGUES, Marcus Vinícios. **Determinação da Carga Eletrostática em Aerossóis e seu Efeito na Filtração dos Gases**. Tese de doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SEVILLE, J.P.K.; **Gas Cleaning in Demanding Applications**. Blackie Academia e Professional. School of Chemical Engineering; The University of Birmingham, UK, first edition, 1997.

TIENI, Érica Flávia. **Estudo do Fenômeno de Limpeza por Blocos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

TOGNETII, Érica Rodrigues. **Influência das Condições Operacionais na Formação e Remoção de Tortas de Filtração de Gases**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

APÊNDICES

8. APÊNDICES

8.1. Apêndice A: Cálculo da Potência Consumida pelo Compressor.

Correlação Perda de Carga e Consumo de Energia

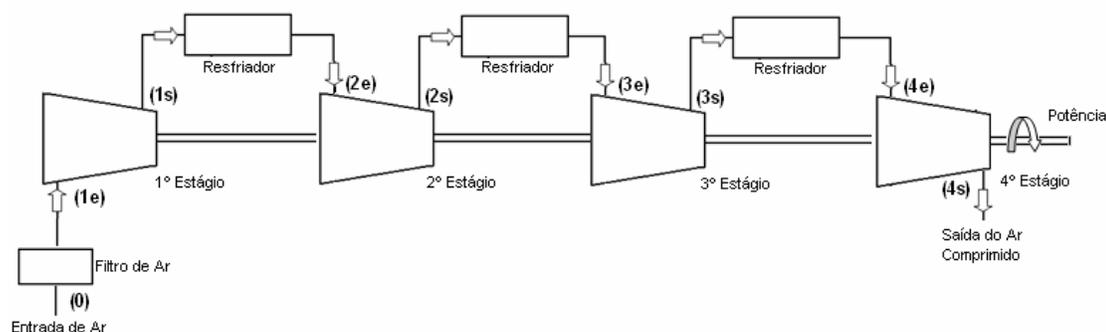


Figura 8.1: Desenho esquemático da instalação dos estágios do compressor e filtro de manga.

Para evidenciar o efeito que a variação da perda de carga nos meios filtrantes ocasiona no consumo energético do compressor, utilizou-se um modelo matemático baseado na equação de balanço de energia. Com a aplicação desse modelo, foram obtidos valores que permitiram a elaboração de um gráfico (Figura 8.1), o qual demonstra visualmente esse efeito gerado devido à variação do diferencial de pressão nos filtros.

Cálculo da Potência do Compressor em Função da Perda de Carga no Filtro:

$$P_0 = P_{atm} \quad (8.1)$$

onde: P_0 é a pressão na entrada do filtro.

$$P_{1e} = P_0 - \Delta P \quad (8.2)$$

onde: P_{1e} é a pressão na entrada do primeiro estágio do compressor.

ΔP é a perda de carga no filtro.

$$R_p = \frac{P_{1s}}{P_{1e}} \quad (8.3)$$

onde: R_p é a razão de pressão na entrada e saída do estágio da compressão;

P_{1e} é a pressão na entrada do primeiro estágio do compressor;

P_{1s} é a pressão na saída do primeiro estágio do compressor.

Aplicando as equações de balanço de energia em cada estágio do compressor obtém-se:

$$T_{1s} = T_{1e} \left[1 + \left(\frac{R_p^{\frac{K-1}{K}} - 1}{\eta_c} \right) \right] \quad (8.4)$$

onde: T_{1e} é a temperatura na entrada do primeiro estágio de compressão;

T_{1s} é a temperatura na saída do primeiro estágio de compressão;

R_p é a razão de pressão na entrada e saída do estágio da compressão;

K é a razão de calores específicos (Tabela 8.1);

η_c é o rendimento do compressor.

$$K = \frac{c_p}{c_v} \quad (8.5)$$

onde: c_p é o calor específico do ar atmosférico medido a pressão constante;

c_v é o calor específico do ar atmosférico medido a volume constante.

As propriedades medidas do ar atmosférico foram obtidas com o uso do método de iteração dos pontos fornecidos pela Tabela 8.1.

Tabela 8.1: Calores Específicos de Gases Ideais para Alguns Gases Usuais (adaptado).

	C_p	C_v	K
Temperatura (K)	Ar		
250	1,003	0,716	1,401
300	1,005	0,718	1,400
350	1,008	0,721	1,398
400	1,013	0,726	1,395
450	1,020	0,733	1,391
500	1,029	0,742	1,387
550	1,040	0,753	1,381
600	1,051	0,764	1,376
650	1,063	0,776	1,370
700	1,075	0,788	1,364
750	1,087	0,800	1,359
800	1,099	0,812	1,354

Fonte: Adaptado de Moran J. M.; Shapiro H. N. *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002, que foi baseado em K. Wark, *Thermodynamics*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1983, que foi baseado no *Tables of Properties of Gases*, NBS Circular 564, 1955.

Cálculo da potência despendida por cada estágio de compressão:

$$W_c = \frac{\dot{w}_c}{\dot{m}_{ar}} = c_p \times (T_{1s} - T_{1e}) \quad (8.6)$$

onde: \dot{w}_c é a potência requerida por cada estágio do compressor;

w_c é o trabalho de cada estágio do compressor;

\dot{m}_{ar} é a vazão mássica do ar atmosférico com a temperatura e pressão de entrada do compressor;

c_p é o calor específico médio do ar atmosférico medido a pressão constante;

T_{1e} é a temperatura na entrada do primeiro estágio de compressão;

T_{1s} é a temperatura na saída do primeiro estágio de compressão.

Utilizando a equação 8.6, calculou-se o valor da potência requerida pelo compressor em função da variação da perda de carga do filtro na entrada do equipamento, utilizando valores de temperatura e pressão reais de funcionamento dos compressores, e, variando o valor da perda de carga nos filtros, considerando a temperatura de entrada de cada estágio constante.

Com estes valores, foi elaborado o gráfico da Figura 8.2, que representa o efeito da diminuição da perda de carga no consumo da potência do compressor.

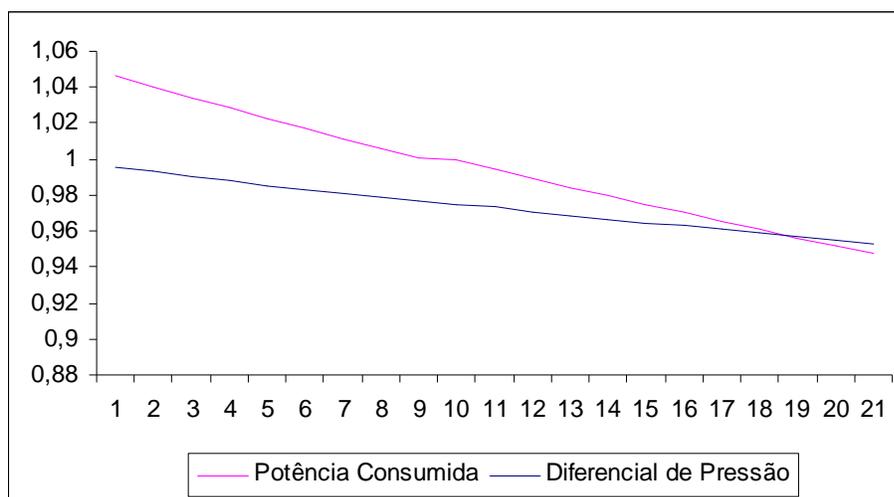


Figura 8.2: Comportamento da curva de potência com a variação do diferencial de pressão no filtro.

Analisando a Figura 8.2, pode-se verificar que a diminuição da perda de carga nos filtros resulta em uma diminuição também na potência consumida, confirmando o que já havia sido verificado.

8.2. Apêndice B: Dados Experimentais

A Tabela 8.2, apresenta os valores medidos de diferencial de pressão em mm c.a., e o valor normal, alerta e crítico de funcionamento dos filtros manga usados para a elaboração da Figura 4.1 e 4.3, do capítulo de resultados e discussão.

Tabela 8.2: Valores medidos, valor normal, de alerta e crítico do diferencial de pressão nos filtros atuais manga em mm c.a. .

Tempo	Valor Medido (mm c.a.)	Valor Normal (mm c.a.)	Valor Alerta (mm c.a.)	Valor Crítico (mm c.a.)
01/11/2006	90	100	160	200
27/11/2006	100	100	160	200
22/01/2007	60	100	160	200
19/02/2007	60	100	160	200
19/03/2007	70	100	160	200
13/05/2007	100	100	160	200
09/07/2007	200	100	160	200
23/07/2007	80	100	160	200
03/09/2007	80	100	160	200
01/10/2007	90	100	160	200
29/10/2007	90	100	160	200
26/11/2007	100	100	160	200
24/12/2007	120	100	160	200
21/01/2008	60	100	160	200
15/03/2008	60	100	160	200
12/05/2008	70	100	160	200
11/07/2008	120	100	160	200
07/08/2008	120	100	160	200
04/09/2008	130	100	160	200

A Tabela 8.3, apresenta os valores medidos de corrente elétrica em *ampére*, e o valor normal, alerta e crítico de funcionamento dos filtros manga usados para a elaboração da Figura 4.2, do capítulo de resultados e discussão.

Tabela 8.3: Valores medidos, valor normal, de alerta e crítico de corrente elétrica consumida pelo compressor em ampére (A).

Tempo	Valor Medido (Ampére)	Valor Normal (Ampére)	Valor Alerta (Ampére)	Valor Crítico (Ampére)
01/11/2006	510	520	530	540
27/11/2006	525	520	530	540
22/01/2007	495	520	530	540
19/02/2007	495	520	530	540
19/03/2007	500	520	530	540
13/05/2007	525	520	530	540
09/07/2007	550	520	530	540
23/07/2007	500	520	530	540
03/09/2007	500	520	530	540
01/10/2007	510	520	530	540
29/10/2007	510	520	530	540
26/11/2007	525	520	530	540
24/12/2007	530	520	530	540
21/01/2008	495	520	530	540
15/03/2008	495	520	530	540
12/05/2008	500	520	530	540
11/07/2008	530	520	530	540
07/08/2008	530	520	530	540
04/09/2008	545	520	530	540

A Tabela 8.4, apresenta os valores medidos de diferencial de pressão em mm c.a., e o valor normal, alerta e crítico de funcionamento dos filtros manga. E, os valores de perda de carga máximos obtidos com o uso dos filtros bolsa (limpo e sujo) usados para a elaboração da curva de confiabilidade, Figura 4.3, do capítulo de resultados e discussão.

Tabela 8.4: Valores medidos, valor normal, de alerta e crítico do diferencial de pressão nos filtros manga e valores de diferencial de pressão obtidos nos filtros bolsa em mm c.a. .

Tempo	Valor Medido (mm c.a.)	Valor Normal (mm c.a.)	Valor Alerta (mm c.a.)	Valor Crítico (mm c.a.)	Valor bolsa filtro limpo (mm c.a.)	Valor bolsa filtro sujo (mm c.a.)
01/11/2006	90	100	160	200	12	76
27/11/2006	100	100	160	200	12	76
22/01/2007	60	100	160	200	12	76
19/02/2007	60	100	160	200	12	76
19/03/2007	70	100	160	200	12	76
13/05/2007	100	100	160	200	12	76
09/07/2007	200	100	160	200	12	76
23/07/2007	80	100	160	200	12	76
03/09/2007	80	100	160	200	12	76
01/10/2007	90	100	160	200	12	76
29/10/2007	90	100	160	200	12	76
26/11/2007	100	100	160	200	12	76
24/12/2007	120	100	160	200	12	76
21/01/2008	60	100	160	200	12	76
15/03/2008	60	100	160	200	12	76
12/05/2008	70	100	160	200	12	76
11/07/2008	120	100	160	200	12	76
07/08/2008	120	100	160	200	12	76
04/09/2008	130	100	160	200	12	76

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.