

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA**

**SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO NOS FORNOS DA ACIARIA  
ELÉTRICA DA GERDAU RIOGRANDENSE**

**Clovis Dutra Acosta**

**Porto Alegre, 2003**

**Clovis Dutra Acosta**

**SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO NOS FORNOS DA ACIARIA  
ELÉTRICA DA GERDAU RIOGRANDENSE**

**Orientador: Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela**

**Trabalho de Conclusão do Curso  
de Mestrado Profissionalizante em  
Engenharia como requisito parcial  
à obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Ambiental-Tecnologias  
Limpas da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul.**

**Porto Alegre, 2003**

**Este Trabalho de Conclusão foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de mestre em ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo coordenador do Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.**

---

**Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela**

Orientador  
Escola de Engenharia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

**Prof<sup>ª</sup>. Helena Beatriz Bettella Cybis**

Coordenadora  
Mestrado Profissionalizante em Engenharia  
Escola de Engenharia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA

**Dr. Luis Augusto Colebergue Kluszo**  
GERDAU AÇOS FINOS PIRATINI

**Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes**  
UNISINOS / RS

**Prof. Dr. Nestor Cezar Heck**  
PPGEM/UFRGS

**Prof. Dra. Andrea Moura Bernardes**  
PPGEM/UFRGS

## **AGRADECIMENTOS**

A todos que colaboraram na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao Grupo Gerdau, reconhecido referencial de capacitação, pela oportunidade de proporcionar os meios para este significativo aperfeiçoamento tecnológico e humano.

À minha família, pela compreensão e amparo para permitir a elaboração desta dissertação.

Aos colaboradores da Gerdau, que participaram do desenvolvimento e da implantação do sistema de despoeiramento e aos colegas que dedicaram seu conhecimento para o aperfeiçoamento deste estudo.

Aos colegas, professores do Mestrado Profissional e à banca de qualificação, que muito contribuíram neste trabalho.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b><u>LISTA DE FIGURAS</u></b> .....                             | <b>6</b>  |
| <b><u>LISTA DE TABELAS</u></b> .....                             | <b>8</b>  |
| <b><u>RESUMO</u></b> .....                                       | <b>10</b> |
| <b><u>ABSTRACT</u></b> .....                                     | <b>11</b> |
| <b><u>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</u></b> .....             | <b>12</b> |
| <b><u>INTRODUÇÃO</u></b> .....                                   | <b>14</b> |
| <b><u>1 PARTE TEÓRICA</u></b> .....                              | <b>16</b> |
| 1.1 <u>DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO</u> .....                 | 16        |
| 1.2 <u>REVISÃO DE LITERATURA</u> .....                           | 20        |
| 1.2.1 <u>Tecnologias para sistemas de despoeiramento</u> .....   | 20        |
| 1.2.2 <u>Lavadores tipo venturi</u> .....                        | 20        |
| 1.2.3 <u>Precipitadores eletrostáticos</u> .....                 | 25        |
| 1.2.4 <u>Filtros de mangas</u> .....                             | 27        |
| 1.2.5 <u>Sistema de ventiladores</u> .....                       | 39        |
| 1.2.6 <u>Sistema de recolhimento do pó de Aciaria</u> .....      | 39        |
| 1.2.7 <u>Emissões primárias</u> .....                            | 39        |
| 1.2.8 <u>Emissões Secundárias</u> .....                          | 41        |
| 1.2.9 <u>Pó coletado na casa de filtros</u> .....                | 45        |
| 1.3 <u>LEGISLAÇÃO</u> .....                                      | 47        |
| <b><u>2 PARTE EXPERIMENTAL</u></b> .....                         | <b>52</b> |
| 2.1 <u>VISITAS TÉCNICAS REALIZADAS</u> .....                     | 52        |
| 2.1.1 <u>Empresa Siderúrgica Canadense</u> .....                 | 53        |
| 2.1.2 <u>Empresa Consultora Canadense</u> .....                  | 54        |
| 2.1.3 <u>Empresa Siderúrgica Francesa 1</u> .....                | 55        |
| 2.1.4 <u>Empresa Siderúrgica Francesa 2</u> .....                | 57        |
| 2.1.5 <u>Empresa fornecedora Francesa 3</u> .....                | 59        |
| 2.1.6 <u>Empresa Siderúrgica Alemã 1</u> .....                   | 60        |
| 2.1.7 <u>Empresa Siderúrgica Japonesa 1</u> .....                | 62        |
| 2.1.8 <u>Empresa Siderúrgica Japonesa 2</u> .....                | 64        |
| 2.1.9 <u>Empresa Siderúrgica Japonesa 3</u> .....                | 67        |
| 2.1.10 <u>Empresa Siderúrgica Japonesa 4</u> .....               | 69        |
| 2.1.11 <u>Empresa Fornecedora dos Estados Unidos 1</u> .....     | 70        |
| 2.1.12 <u>Empresa Siderúrgica Chilena 1</u> .....                | 70        |
| 2.2 <u>MODELAMENTO HIDRÁULICO</u> .....                          | 72        |
| 2.2.1 <u>Conclusões do modelamento</u> .....                     | 93        |
| 2.3 <u>ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PRELIMINARES DO PROJETO</u> ..... | 94        |
| 2.4 <u>PROJETO BÁSICO DO SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO</u> .....     | 101       |
| 2.4.1 <u>Projeto do sistema primário</u> .....                   | 109       |
| 2.4.2 <u>Projeto do sistema secundário</u> .....                 | 114       |
| 2.4.3 <u>Projeto do sistema de tratamento das emissões</u> ..... | 118       |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 2.4.4    | Descrição funcional básica .....                                 | 121        |
| 2.4.5    | Custos para implantação do investimento .....                    | 137        |
| <b>3</b> | <b><u>NOVO DESPOEIRAMENTO - RESULTADOS E DISCUSSÃO</u></b> ..... | <b>138</b> |
| 3.1      | VISITAS REALIZADAS .....   | 138        |
| 3.1.1    | Empresa Siderúrgica Francesa 2.....                              | 139        |
| 3.1.2    | Empresa Siderúrgica Alemã 1 .....                                | 139        |
| 3.1.3    | Empresa Siderúrgica Japonesa 1 .....                             | 139        |
| 3.1.4    | Empresa Siderúrgica Japonesa 2 .....                             | 140        |
| 3.1.5    | Empresa Siderúrgica Japonesa 3 .....                             | 140        |
| 3.1.6    | Empresa Siderúrgica Japonesa 4 .....                             | 140        |
| 3.1.7    | Empresa Siderúrgica Chilena 1 .....                              | 141        |
| 3.2      | ESTUDOS DE DISPERSÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS.....              | 141        |
| 3.2.1    | Estudo de dispersão anterior a implantação do projeto .....      | 143        |
| 3.2.2    | Estudo de dispersão posterior a implantação do projeto .....     | 155        |
| 3.2.3    | Conclusões dos estudos de dispersão .....                        | 169        |
| 3.3      | AVALIAÇÕES DO SISTEMA IMPLANTADO.....                            | 169        |
| 3.3.1    | Primeira campanha de medição .....                               | 171        |
| 3.3.2    | Segunda campanha de medição .....                                | 171        |
| 3.3.3    | Conclusões das campanhas de medição de material particulado..... | 172        |
| 3.4      | DISCUSSÃO SOBRE O CUSTO DO INVESTIMENTO .....                    | 172        |
| 3.5      | MODIFICAÇÕES REALIZADAS NO NOVO SISTEMA .....                    | 173        |
| <b>4</b> | <b><u>CONCLUSÕES</u></b> .....                                   | <b>176</b> |
| <b>5</b> | <b><u>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u></b> .....             | <b>178</b> |
| <b>6</b> | <b><u>REFERÊNCIAS</u></b> .....                                  | <b>179</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <u>Figura 1 - Fluxograma do Processo Industrial (GERDAU)</u> .....   | 19 |
| <u>Figura 3 - Precipitador Eletrostático Cottrell (MACINTYRE, 1990)</u> .....  | 26 |
| <u>Figura 4 - Limpezas das mangas no sistema de jato pulsante (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997)</u> .....   | 31 |
| <u>Figura 5 - Pressão do pulso de ar ao longo da manga (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997)</u> .....  | 32 |
| <u>Figura 6 - Métodos de limpeza das mangas (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997)</u> .....   | 32 |
| <u>Figura 7 - Sistemas de limpeza das mangas para filtros tipo jato pulsante e ar reverso (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997)</u> .....   | 33 |
| <u>Figura 8 - Curva típica da pluma de carregamento para uma usina com produção de 800.000 toneladas de aço/ano (MANTEN e BRAND, 1994)</u> .....   | 43 |
| <u>Figura 9 - Silo para recolher o pó, com vista da casa de filtros</u> .....  | 56 |
| <u>Figura 10 - Trocador de calor com ar forçado por ventiladores para resfriar os gases primários</u> .....  | 58 |
| <u>Figura 11 - Interior da casa de filtros</u> .....   | 59 |
| <u>Figura 12 - Casa de filtros, dutos das emissões primárias e secundárias</u> .....   | 61 |
| <u>Figura 13 - Câmaras de combustão recebendo os gases primários</u> .....   | 64 |
| <u>Figura 14 - Filtro com pressão positiva para os sistemas primário e secundário</u> .....  | 66 |
| <u>Figura 15 - Filtros cilíndricos para as emissões primárias do quarto-furo</u> .....   | 67 |
| <u>Figura 16 - Casa de filtros e câmara de resfriamento das emissões primárias</u> .....   | 68 |
| <u>Figura 17 - Casa de filtros e sistema de pelotização de pó</u> .....  | 71 |
| <u>Figura 18 - Vista do modelo hidráulico da Aciaria da Gerdau Riograndense, em acrílico, no Laboratório da Hatch Associates - Canadá</u> .....  | 73 |
| <u>Figura 19 - Detalhe do modelo em acrílico, mostrando a posição invertida do prédio da Aciaria, para simular com fluídos líquidos, o comportamento dos gases do EAF</u> .....  | 73 |
| <u>Figura 20 - Seção transversal da coifa, apresentando as opções 1 e 2</u> .....  | 78 |
| <u>Figura 21 - Perfil de vazão da pluma de carregamento para duas operações de carregamento</u> .....  | 79 |
| <u>Figura 22 - Perfil de vazão típica da pluma de carregamento, utilizado como base para o desenvolvimento do modelo da pluma de carregamento</u> .....  | 80 |
| <u>Figura 23 - Volume de armazenamento requerido como função da vazão da exaustão da coifa e do período de emissão da pluma de carregamento</u> .....  | 81 |
| <u>Figura 25 - Modelamento hidráulico, opção 1, vista de norte, volume da coifa 953 m<sup>3</sup>, vazão de exaustão 222.800 m<sup>3</sup>/h, resultado da eficiência de 89,7% de captura de particulados, com único ponto de exaustão na coifa</u> .....    | 86 |
| <u>Figura 26 - Modelamento hidráulico, opção 1, vista de oeste, volume da coifa 953 m<sup>3</sup>, vazão de exaustão 222.800 m<sup>3</sup>/h, resultado da eficiência de 89,7% de captura de particulados, com único ponto de exaustão na coifa</u> .....    | 87 |
| <u>Figura 27 - Modelamento hidráulico, opção 3, vista de norte, volume da coifa 1.975 m<sup>3</sup>, vazão de exaustão 301.500 m<sup>3</sup>/h, resultado da eficiência de 100% de captura de particulados, com quatro pontos de exaustão na coifa</u> ..... | 88 |

|   |     |
|---|-----|
| <u>Figura 28 - Modelamento hidráulico, opção 3, vista de oeste, volume da coifa 1.975 m<sup>3</sup>, vazão de exaustão 301.500 m<sup>3</sup>/h, resultado da eficiência de 100% de captura de particulados, com quatro pontos de exaustão na coifa.....</u> | 89  |
| <u>Figura 29 - Eficiências de captura para a opção 3, em função da vazão da coifa.....</u>  | 91  |
| <u>Figura 30 - Eficiências de captura para as opções 1, 2 e 3 (1 e 4 tomadas), em função da vazão da coifa.....</u>   | 91  |
| <u>Figura 31 - Vista superior do sistema de despoeiramento, mostrando a coifa sobre o forno elétrico, os dutos secundário e primário e uma vista parcial do sistema de água industrial.....</u>   | 104 |
| <u>Figura 32 - Vista do duto secundário (diâmetro 3 metros), casa de filtros, silo de pó e prédio do comando elétrico.....</u>  | 104 |
| <u>Figura 33 - Vista dos ventiladores principais e de ar reverso.....</u>   | 105 |
| <u>Figura 34 - Vista da casa de filtros, silo e estação de carregamento com seu sistema de exaustão próprio.....</u>  | 105 |
| <u>Figura 35 - Vista da câmara mistura.....</u>   | 106 |
| <u>Figura 36 - Câmara de combustão pré-montada.....</u>   | 106 |
| <u>Figura 37 - Interior da câmara de combustão, mostrando a soleira de concreto, as laterais e a abóboda com os tubos resfriados à água.....</u>  | 107 |
| <u>Figura 38 - Curva fixa refrigerada, montada na entrada da câmara de combustão do sistema primário.....</u>   | 107 |
| <u>Figura 39 - Forno elétrico em operação de fusão com o novo sistema de despoeiramento.....</u>  | 108 |
| <u>Figura 40 - Sistema de recirculação de água industrial utilizada no resfriamento dos dutos do sistema de despoeiramento. Vista das torres de resfriamento.....</u>   | 108 |
| <u>Figura 41 - Tela de supervisão geral.....</u>  | 124 |
| <u>Figura 42 - Tela de supervisão de dutos.....</u>   | 125 |
| <u>Figura 43 - Tela de supervisão dos ventiladores.....</u>   | 126 |
| <u>Figura 44 - Tela de supervisão da casa de filtros.....</u>   | 127 |
| <u>Figura 45 - Tela de transporte e descarga de pó.....</u>   | 128 |
| <u>Figura 46 - Tela de supervisão dos controladores de temperaturas da água de resfriamento dos dutos.....</u>  | 129 |
| <u>Figura 47 - Desenho U-575-P-110 – Fluxograma geral processo.....</u>   | 132 |
| <u>Figura 48 - Desenho U-575-A-131 - Conjunto geral da área da casa de filtros.....</u>   | 133 |
| <u>Figura 49 - Desenho U-575-A-130 - Arranjo geral do sistema de despoeiramento.....</u>  | 134 |
| <u>Figura 50 - Desenho U-575.17-M-01 - Conjunto geral do sistema de transporte e armazenamento do pó.....</u>   | 135 |
| <u>Figura 51 - Desenho U-575.10-M-04 - Seção transversal do sistema de despoeiramento junto ao FEA2.....</u>  | 136 |
| <u>Figura 52 - Forno elétrico em operação de fusão.....</u>   | 141 |
| <u>Figura 53 - Rosa dos ventos de Porto Alegre - período 1916/1988.....</u>   | 145 |
| <u>Figura 54 - Rosa dos ventos da região de Triunfo - período 1993/1995, 12h.....</u>   | 145 |
| <u>Figura 55 - Rosa dos ventos da região de Triunfo - período 1993/1995, 18h.....</u>   | 146 |
| <u>Figura 56 - Rosa dos ventos da região de Triunfo - período 1993/1995, 24h.....</u>   | 146 |
| <u>Figura 57 - Gráfico teórico de isoconcentração das emissões atmosféricas de material particulado para condição crítica de dispersão prevista para o novo despoeiramento.....</u>   | 154 |
| <u>Figura 59 - Isopleta com resultados do estudo de dispersão após a implantação do novo sistema de despoeiramento.....</u>   | 168 |



## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| <u>Tabela 1 - Recomendações básicas para dimensionamento de um sistema de despoeiramento (BRAND, 1996)</u> .....  | 29  |
| <u>Tabela 2 - Comparativo entre os sistemas de filtragem (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997; BRAND, 1996)</u> .....  | 35  |
| <u>Tabela 3 - Resumo com as principais características de alguns materiais filtrantes disponíveis no mercado (BHA GROUP INC. 1997)</u> .....                                    | 38  |
| <u>Tabela 4 - Composição típica do pó de Aciaria (%) (MATSUOKA et al.,1991)</u> .....   | 45  |
| <u>Tabela 5 - Distribuição granulométrica do pó de Aciaria (% Peso) (MATSUOKA et al. 1991)</u> .....  | 45  |
| <u>Tabela 6 - Coeficiente de geração de pó de Aciaria (% de pó gerado/ produção de aço)-(IBS-Instituto Brasileiro de Siderurgia, 1996)</u> .....                                | 46  |
| <u>Tabela 7 - Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (CONAMA 03/90)</u> .....   | 48  |
| <u>Tabela 8 - Sumário das escalas utilizadas no modelamento hidráulico</u> .....  | 77  |
| <u>Tabela 9 - Resumo das vazões empregadas no modelo hidráulico</u> .....   | 82  |
| <u>Tabela 10 - Resumo das vazões do modelo</u> .....  | 84  |
| <u>Tabela 11 - Comparativo entre as opções de desenhos de coifas</u> .....  | 92  |
| <u>Tabela 12 - Distribuição granulométrica do pó de Aciaria (Laudo nº 492/96 - Laboratório Green Lab, Porto Alegre, 1996)</u> .....   | 95  |
| <u>Tabela 13 - Determinação da Composição do pó de Aciaria (Laudo nº 419/96 - Laboratório Green Lab, Porto Alegre, 1996)</u> .....  | 96  |
| <u>Tabela 14 - Dados básicos considerados no Sistema Primário</u> .....   | 102 |
| <u>Tabela 15 - Dados básicos do Sistema Secundário, considerando a elevação ao nível da coifa</u> .....   | 103 |
| <u>Tabela 16 - Resumo dos consumidores de água industrial do sistema de despoeiramento</u> .....  | 111 |
| <u>Tabela 17 - Requerimentos para o carregamento e vazamento, baseado nas análises das gravações de vídeo</u> .....   | 116 |
| <u>Tabela 18 - Sumário do conceito adotado para o controle dos dampers (% de abertura do damper)</u> .....  | 130 |
| <u>Tabela 19 - Peso dos principais componentes do sistema</u> .....   | 137 |
| <u>Tabela 20 - Estações climatológicas da área em estudo</u> .....  | 144 |
| <u>Tabela 21 - Valores de Partículas Totais em Suspensão obtidos nos amostradores instalados nos municípios de Montenegro e Nova Santa Rita</u> .....                           | 150 |
| <u>Tabela 22 - Valores de PTS (Partículas Totais em Suspensão) medidos em um ponto interno da unidade industrial da Refinaria Alberto Pasqualini – Esteio - RS (1997)</u> ..... | 151 |
| <u>Tabela 23 - Coordenadas dos pontos discretos (UTM - metros)</u> .....  | 162 |
| <u>Tabela 24 - Exemplo de arquivo meteorológico utilizado na modelagem (BREEZE – TRINITY CONSULTANTS INCORPORATED)</u> .....  | 163 |
| <u>Tabela 25 - Distribuição de ventos - direção e velocidade - por frequência - Estação 83971 - Ano: 1999</u> .....   | 164 |
| <u>Tabela 26 - Resultados das concentrações de material particulado ao nível do solo para período de 24 horas e média anual obtidos nos pontos discretos</u> .....              | 166 |

|  |     |
|--|-----|
| <u>Tabela 27 - Resultados das máximas concentrações de material particulado para período de 24 horas e médias anuais, juntamente com as respectivas coordenadas UTM.</u> ..... | 167 |
| <u>Tabela 28 - Resumo dos resultados de material particulado dos estudos de dispersão.</u> .....   | 169 |
| <u>Tabela 29 - Dados referentes aos procedimentos de coleta das amostras.</u> .....  | 170 |
| <u>Tabela 30 - Resultados da primeira campanha de medição de material particulado</u> .....  | 171 |
| <u>Tabela 31 - Resultados da segunda campanha de medição de material particulado.</u> .....  | 171 |
| <u>Tabela 32 - Comparativo de custos de implantação para Sistemas de Despoeiramento com filtro de mangas tipo ar reverso positivo.</u> .....                                   | 173 |

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento realizado para a implantação do novo sistema de despoeiramento dos Fornos Elétricos a Arco da Aciaria da Gerdau Riograndense. O desenvolvimento do novo sistema iniciou com a necessidade de substituir o antigo sistema de captação, pois este não estava obtendo o desempenho esperado. Os principais resultados obtidos com a implantação deste projeto foram o atendimento das especificações do projeto, comprovado pelos resultados obtidos nas medições de material particulado (MP), uma vez que as concentrações de material particulado medido estão abaixo do limite de emissão estabelecido pelo órgão de controle ambiental, e os resultados do estudo de dispersão, realizados para avaliar a qualidade do ar, utilizando modelagem matemática, atenderam aos limites legais de emissão estabelecidos pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. O estudo de dispersão foi elaborado após a implantação do sistema de despoeiramento, considerando os dados de entrada obtidos nas medições realizadas na saída dos gases da nova casa de filtros. As causas para o sucesso do projeto estão associadas a sólidos conhecimentos das tecnologias disponíveis da equipe responsável pela implantação do investimento, a visitas realizadas em outras empresas siderúrgicas, ao modelamento hidráulico que estabeleceu o dimensionamento correto do sistema e as experiências adquiridas na operação do antigo sistema de despoeiramento, pois orientaram as decisões tomadas no decorrer do projeto. A garantia da continuidade do desempenho do sistema implantado está assegurada por sua inclusão no programa de gestão ambiental da empresa.

## **ABSTRACT**

This study presents the development of the Gerdau Riograndense's melt shop's Dedusting System. The performance of the existing system did not attend the company purpose, and therefore it was decided at that time to replace it for a new system. The results achieved with the new installation fulfilled the project specifications, through the particular matter measurements, that were bellow of the limit established by the environmental agency. Also, for particular matter limits, on air quality evaluation, established by federal environmental legislation, as a result of the dispersion study, using mathematical modelling. The causes for the success of the project were associated with the Gerdau team's know-how of the best available technologies, technical visits to other steel plants, hydraulic modelling, which resulted in a correct dimensioning for the system and experiences acquired with the old system, used to guide the new project. The performance continuity is assured by the inclusion of the dedusting system in the Gerdau Environmental Management System.

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A - ampére  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
Ar - número de Archimedes  
CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental  
Cf - classificação do tipo climático subtropical úmido, segundo Köppen  
CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente  
Cp - calor específico  
CTC - *Control of Composition & Temperature*  
CV - cavalo vapor  
EIA - Estudo de impacto ambiental  
FEA - forno elétrico a arco  
FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental  
F<sub>s</sub> - escala do fluxo ascensional  
g - aceleração da gravidade  
g - grama  
HCl - ácido clorídrico  
HI-VOL – amostrador de grandes volumes (*high volume*)  
IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia  
ISC LT - *Industrial Source Complex Long Term*  
ISC ST - *Industrial Source Complex Short Term*  
L - comprimento  
l/dm<sup>2</sup> - litros por decímetro quadrado  
l/min – litro por minuto  
l/h - litro por hora  
m<sup>3</sup>/h - metro cúbico por hora  
m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/min - velocidade de filtragem (relação entre a vazão e a área de filtragem)  
mg/l - miligrama por litro  
mg/Nm<sup>3</sup> - miligrama por normal metro cúbico  
MGA - média geométrica anual  
mmCA - milímetros de coluna de água  
MMUS\$ - milhões de dólares americanos

MP - material particulado  
M<sub>s</sub> - escala de momento  
MW - megawatt  
NBR - Norma Brasileira  
Nm<sup>3</sup>/h - normal metro cúbico por hora  
P - taxa do poluente capturado  
P1 - taxa total de poluente emitido pela fonte  
pH - potencial de hidrogênio  
PPGEM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
PTS - partículas totais em suspensão  
Q<sub>b</sub> - taxa de vazão da pluma durante o carregamento  
Q<sub>OF</sub> - vazão da coifa  
*Re* - número de Reynolds  
Rima - Relatório de Impacto ambiental  
t - tonelada  
T<sub>o</sub> - temperatura ambiente  
U - velocidade  
UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
ULBRA - Universidade Luterana do Brasil  
USEPA - *United States Environmental Protection Agency*  
UTM – Universal Transversa de Mercator  
VIM - *Vacuum Induction Melting*  
γ<sub>m</sub> - densidade específica  
ρ - densidade do fluido local  
ρ<sub>o</sub> - densidade do fluido do ambiente  
η - eficiência  
μ - viscosidade do fluido  
μg/m<sup>3</sup> - micrograma por metro cúbico

## INTRODUÇÃO

Durante a produção do aço em Fornos Elétricos, nas etapas de carregamento, vazamento e fusão da matéria-prima, ocorre a geração de emissões gasosas. Para evitar a dispersão dessas emissões com material particulado para a atmosfera, são instalados sistemas de controle, que captam e filtram estes fumos com particulados.

A Gerdau Riograndense, empresa siderúrgica que possibilitou a elaboração deste estudo, em concordância com sua política ambiental, que busca a melhoria contínua dos seus processos dentro dos conceitos do desenvolvimento sustentado, identificou a oportunidade de aperfeiçoamento do sistema de despoeiramento existente, uma vez que o mesmo não estava obtendo o desempenho esperado.

A partir dessa diretriz, foram iniciados os trabalhos para implantação do novo sistema de despoeiramento na Aciaria. O novo sistema de despoeiramento, que filtra com alta eficiência as partículas sólidas dos gases gerados no processo de produção do aço, foi instalado em 2000 e colocou a Gerdau Riograndense entre os melhores referenciais internacionais em proteção do ar.

Desse modo, empregando os conhecimentos adquiridos, foi elaborado o presente trabalho, que objetiva apresentar o desenvolvimento do novo sistema de despoeiramento da

Aciaria da Gerdau Riograndense e disponibilizar esta experiência para projetos de melhorias ambientais.

A primeira etapa, necessária para o sucesso deste desenvolvimento, foi conhecer as melhores tecnologias disponíveis. Esta demandou uma intensa pesquisa na bibliografia internacional e a realização de visitas em outras empresas siderúrgicas que haviam implementado novos sistemas de despoeiramento ou mesmo tivessem executado melhorias nas instalações existentes. Nesse sentido, também foram realizadas visitas a fabricantes de sistemas de filtragem.

Posteriormente, identificaram-se os fornecedores com reconhecida experiência e domínio tecnológico sobre captação de emissões geradas em Fornos Elétricos, para desenvolver o sistema, em conjunto com a equipe da Gerdau.

O desenvolvimento do projeto estruturou-se na execução do modelamento hidráulico, que utilizou um protótipo construído em acrílico para simular, em laboratório, o comportamento das emissões geradas. O objetivo deste modelamento foi determinar a capacidade de exaustão requerida para o sistema de captação da coifa (secundário), e assim obter a máxima eficiência na captura das emissões durante o carregamento do Forno Elétrico.

Anterior à implantação do sistema, foi realizado o estudo de dispersão das emissões estimadas para a nova instalação, visando avaliar o impacto da mesma na qualidade do ar.

Após a execução dos projetos básico e executivo, fabricação e montagem, foram realizadas as medições para avaliar o desempenho do novo sistema, através do monitoramento das emissões na saída da casa de filtros e do novo estudo matemático de dispersão, que empregou os dados de entrada obtidos nas medições realizadas.



# 1 PARTE TEÓRICA

## 1.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO

As principais características do processo produtivo, associadas às emissões atmosféricas dos Fornos Elétricos à Arco (FEA) da Aciaria, estão descritos a seguir. A Figura 1, apresenta o fluxograma do processo industrial empregado pela Gerdau Riograndense.

A sucata ferrosa é a principal matéria-prima utilizada na produção de aço. É recebida principalmente por via rodoviária, remetida por fornecedores cadastrados pela empresa, pesada e armazenada no Pátio de Sucata. Este pátio situa-se ao lado da Aciaria, permitindo a estocagem da sucata.

A descarga é realizada por eletroímãs instalados nas pontes rolantes e guindastes. Quando acionados, atraem o material ferroso pelo fenômeno do magnetismo, promovendo a descarga do caminhão. Dependendo do tipo de sucata, esta pode ser também descarregada por garra instalada na extremidade do guindaste.

O Pátio de Sucata está dividido em diversos setores de disposição de sucata, conforme a classificação química e física da mesma.

Após descarregada e classificada, a sucata passa por um processo denominado industrialização, que consiste da elaboração de pacotes de sucata, corte com oxicorte das peças maiores, corte em tesouras e seleção, obtendo-se um material mais compacto. Esta compactação facilita o enchimento dos cestões com material mais denso, indo para o forno com as vantagens do melhor aproveitamento da capacidade deste e menor consumo de energia com o aumento da velocidade de fusão. A industrialização da sucata é realizada por prensas-tesoura e por equipamentos de oxicorte.

No Pátio de Sucata ocorre a preparação da carga metálica da Aciaria, cuja composição é elaborada em função da programação da produção. Conforme a qualidade do aço que se deseja produzir, os cestões são carregados com o tipo adequado e quantidade necessária de sucata, devidamente pesada. A carga dos cestões é realizada pelas pontes-rolantes, equipadas com eletroímãs.

A Aciaria é o local onde é realizada a fusão da matéria-prima empregada, transformando-a em aço. Basicamente, pode-se resumir o processo da seguinte forma:

- a) forno é carregado com sucata, onde é feita a fusão;
- b) a carga fundida é vazada em painéis, que é então conduzida ao forno-painel onde é realizado o controle dos elementos constituintes do aço;
- c) aço líquido, com as características desejadas, vai para a solidificação nas máquinas de lingotamento contínuo.

A Gerdau Riograndense conta com dois Fornos Elétricos a Arco (FEA) para produzir aço em tarugos de seção transversal quadrada.

Os fornos elétricos apresentam as seguintes vantagens:

- a) não há gases provenientes da combustão para prejudicar a atmosfera do forno;
- b) há maior rendimento metálico pela conseqüente redução de perdas por oxidação;
- c) pode ter revestimento básico ou ácido, conforme conveniência do processo;
- d) pode ser operado com ou sem escória, para simples fusão ou fusão e refino;
- e) há melhor controle de temperatura sem a perturbação da atmosfera (oxidante ou redutora).
- f) nos fornos elétricos a arco, o calor é gerado pelo arco elétrico mantido entre os três eletrodos e a carga, e, em pequena escala, pela resistência da carga à passagem da corrente elétrica.

Durante a operação do forno elétrico ocorre a geração de emissões atmosféricas, com a predominância de fumos, material particulado e gases. Essas emissões são encaminhadas ao sistema de tratamento para segregação das partículas sólidas. O material particulado, captado na casa de filtros do sistema de tratamento, origina o subproduto chamado pó de Aciaria.

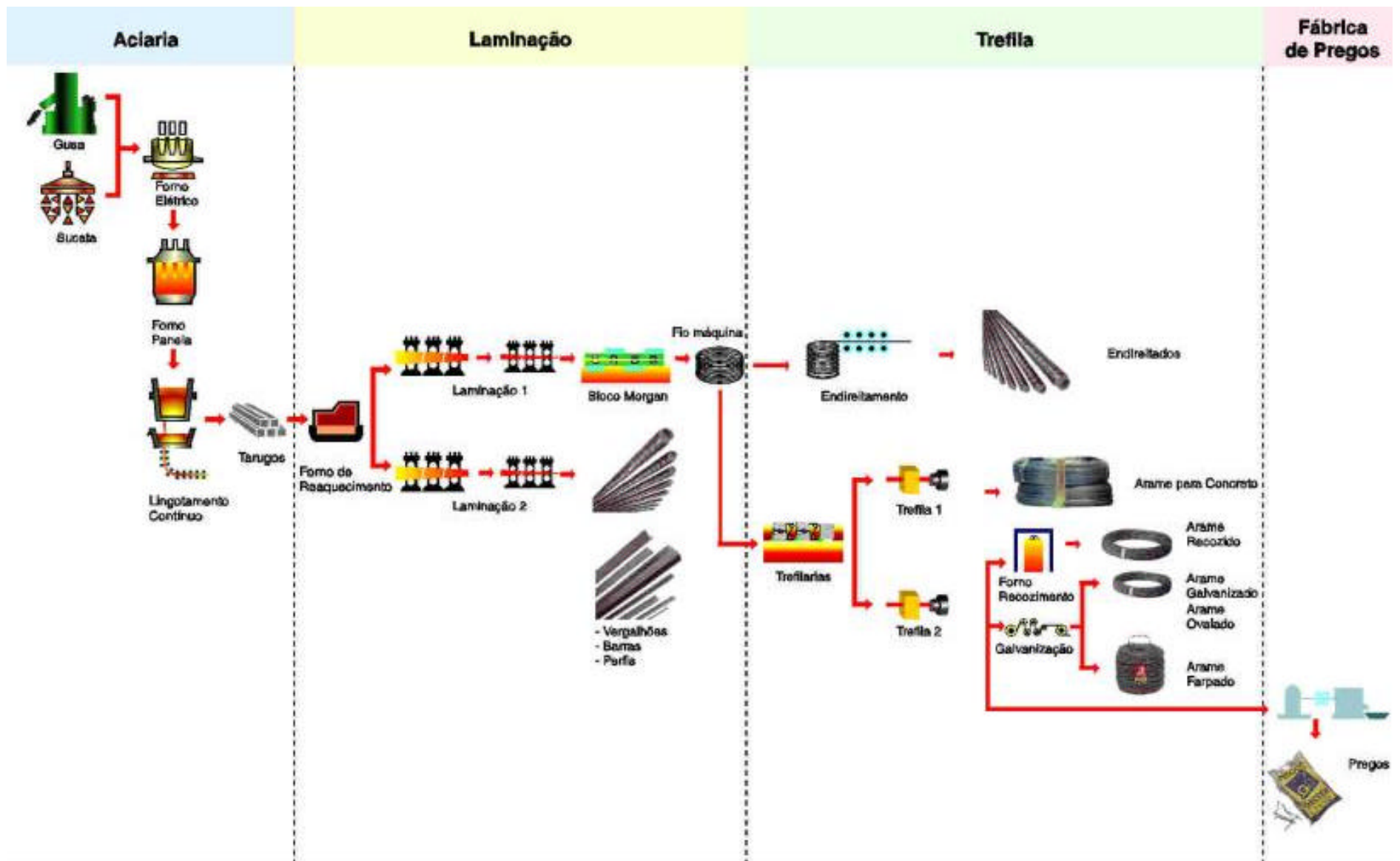


Figura 1 - Fluxograma do Processo Industrial (GERDAU)

## 1.2 REVISÃO DE LITERATURA

### 1.2.1 Tecnologias para sistemas de despoejamento

A seguir será mostrada uma revisão da literatura que aborda estudos e experiências sobre os diversos sistemas de despoejamento implantados no mundo, bem como as melhorias obtidas no decorrer do tempo, típicas da gestão focada na melhoria contínua.

Segundo Macintyre (1990), os equipamentos mais utilizados no controle de poluição de Fornos Elétricos a Arco (FEA) são os filtros de manga de fibras sintéticas de fluxo reverso. Também utilizam-se mangas de fibras de poliéster e acrílico, e para temperaturas elevadas, mangas de fibra de vidro. Algumas empresas siderúrgicas implantaram equipamentos tipo lavadores venturi e precipitadores eletrostáticos para abatimento de materiais particulados.

Uma das chaves para o sucesso das soluções adotadas, visando resolver os problemas de controle das emissões atmosféricas, envolve o conhecimento de onde aplicar cada tecnologia (MACINTYRE, 1990).

A seguir, são descritos os principais sistemas de tratamento empregados para o controle de emissões de FEA.

### 1.2.2 Lavadores tipo venturi

Poucas tecnologias foram tão estudadas e maturadas como os lavadores. Existem vários tipos de lavadores em operação ao redor do mundo. Os lavadores de gases removem as partículas

do gás pela captura das mesmas nas gotas e separando estas gotas do fluxo gasoso. Os lavadores capturam as partículas através de três mecanismos: impacto direto das partículas contra as gotas descendentes, interceptação da partícula pela gota descendente, proximidade e difusão da partícula, através da proximidade da gota, até que a partícula fique tão próxima que possa ser capturada (KENNETH; HESKETH, 1992).

O objetivo é causar na partícula do poluente o alojamento dentro da gota e então remover a gota maior do meio gasoso. Em cada caso, o objetivo do projeto é criar uma densa dispersão de finas gotículas. Em geral, quanto menor forem as gotículas, menor serão as partículas capturadas. Quanto maior a densidade das gotículas, maior será a probabilidade de captura (KENNETH; HESKETH, 1992).

Dentre os diversos tipos de lavadores, o mais utilizado é o lavador tipo venturi. O venturi foi inventado em 1886 pelo Eng. Americano, Clemens Herschel, com o propósito de aumentar a velocidade do fluido causando uma diminuição na pressão. A Figura 2 apresenta os principais componentes desse tipo de lavador (KENNETH; HESKETH, 1992).

A zona de entrada é chamada de seção de convergência, a central, onde os gases estão a maiores velocidades, é chamada de garganta, e, a seção de expansão, localizada após a garganta, é denominada zona de recuperação de pressão dinâmica. No venturi, a pressão estática dos gases é transformada em pressão dinâmica quando os gases passam pela garganta. A força motriz que impulsiona a massa gasosa é realizada normalmente por ventiladores. A injeção de líquido no lavador é efetuada de diferentes formas. Alguns projetos injetam na garganta, outros, na entrada dos gases, no sentido contrário. O sistema conhecido como lavador acionado por bomba, utiliza elevadas velocidades no spray líquido para induzir a entrada do gás e arrastar o mesmo para a unidade de lavagem. Esse spray pode estar na mesma direção do fluxo gasoso, ou no sentido oposto ou em ângulo. Alguns sistemas utilizam atomizar com ar o jato spray. Considerando que

as bombas são mais eficientes que os ventiladores, esta analogia é estabelecida para afirmar que os lavadores acionados por bombas são mais eficientes do que os lavadores acionados por ventiladores. (KENNETH; HESKETH, 1992).

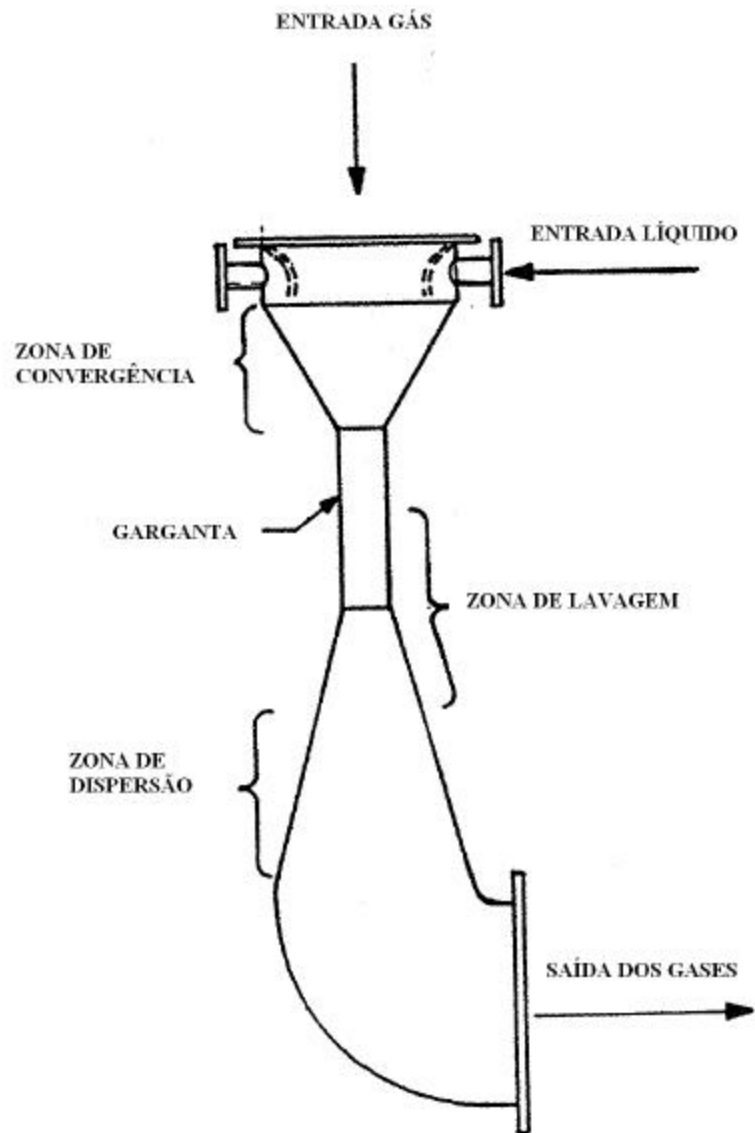


Figura 2 - Componentes principais de um lavador venturi (KENNETH; HESKETH, 1992).

A seguir estão descritos os principais componentes da instalação de um sistema de controle, tipo lavador venturi, aplicado na captação de emissões primárias de FEA (GERDAU GUAÍRA, 1983).

a) Saturador

O gás ao entrar no saturador ou pré-resfriador é lavado por um forte jato de água, nebulizado por bicos, instalados no interior da câmara. Os bicos são projetados e direcionados dentro da câmara com o objetivo de pré-resfriar o gás e lavar as paredes do saturador. A seção inicial do saturador é construída com paredes duplas refrigeradas com água industrial ou de contato indireto. Na parte inferior do saturador, em forma de cone, são recolhidas as gotas maiores que, em função do tamanho e peso, não são arrastadas pelo fluxo de gás. Esta mistura de água e pó (lama) é conduzida ao poço de lama.

b) Venturi

No difusor do venturi, caracterizado pelo pequeno diâmetro do bocal, o gás é acelerado, atingindo grande velocidade. O gás ao passar pelo disco do difusor, juntamente com a água injetada pelos bicos pulverizadores, que neste momento está subdividida, a ponto de formar uma fina névoa, entram em contato íntimo, resultando na lavagem ou captação final das partículas restantes de pó.



### c) Ciclone

O gás, ao sair do difusor do venturi, é conduzido através da seção intermediária ao ciclone. No ciclone por efeito da centrifugação, a água contida no gás é separada. A água recuperada retorna ao poço de lama.

### d) Ventilador

O gás ao sair do ciclone é conduzido por uma tubulação, chamada de duto de sucção do ventilador. O ventilador é dotado de um sistema de injeção de água, para lavar suas partes internas, a fim de evitar depósitos de pó sobre o rotor, o que pode ocasionar problemas de desbalanceamento e vibrações. A água com pó, resultante desta lavagem, retorna ao poço de lama.

### e) Chaminé

O gás ao sair do ventilador é lançado na atmosfera por intermédio da chaminé.

### f) Circuito de água de contato direto

É o sistema em que a água entra em contato com o gás carregado de partículas. Possui duas funções básicas: resfriar e lavar o gás. A água de contato direto é injetada por bicos pulverizadores localizados no saturador e no venturi. Após resfriar e lavar o gás, a água resultante, chamada de água com lama, é recolhida nos seguintes pontos: saturador, venturi, ciclone, ventilador e separador. A água com lama recolhida nestes pontos é conduzida por tubos e por ação da gravidade ao poço de lama. No poço de lama estão instaladas as bombas verticais que

deslocam a água para os decantadores. Após a decantação das partículas sólidas, as bombas de água limpa retornam a água aos consumidores citados anteriormente, caracterizando assim, um circuito fechado.

### 1.2.3 Precipitadores eletrostáticos

Este é um sistema pouco utilizado para abatimento de materiais particulados em usinas siderúrgicas com forno elétrico a arco (MACINTYRE, 1990).

A precipitação eletrostática é um processo físico, segundo o qual uma partícula contida num fluxo gasoso é carregada eletricamente e, sob a influência de um campo elétrico, é separada da corrente gasosa. O sistema que realiza esta ação consiste em uma superfície coletora carregada positivamente (ligada à terra) colocada próximo de um eletrodo emissor, com carga negativa. Devido à elevada tensão, a imensa quantidade de elétrons que saem do fio, bombardeiam as moléculas de gás próximas ao mesmo. A potência desse bombardeio forma íons gasosos positivos e negativos, cuja presença se evidencia por um círculo luminoso azul visível, chamado efeito corona. Os íons se deslocam para os eletrodos de carga oposta aos do fio, devido ao intenso campo elétrico formado. Os íons positivos voltam para o fio negativo e recuperam seus elétrons perdidos; os íons gasosos negativos se dirigem para o eletrodo ligado à terra (positivo em valor relativo), o que faz com que a passagem do gás fique inundada de íons gasosos negativos. Estabelece-se assim uma corrente de íons gasosos negativos entre os fios e as placas. À medida que as partículas de poeira conduzidas pelo gás atravessam as passagens, elas se chocam com os íons gasosos negativos e assim se carregam negativamente. Como os íons gasosos são imensamente mais numerosos e muitíssimos menores que as partículas, por menores que elas sejam, haverá suficientes cargas elétricas para solucionar quase todos os problemas de

purificação de ar com poeiras. As partículas de poeiras carregadas negativamente se dirigem rapidamente às placas de potência igual a da terra, e ali se prendem, retidas por imensas forças eletrostáticas (MACINTYRE,1990).

A Figura 3 apresenta os principais componentes do precipitador eletrostático tipo Cottrell, segundo Macintyre (1990).

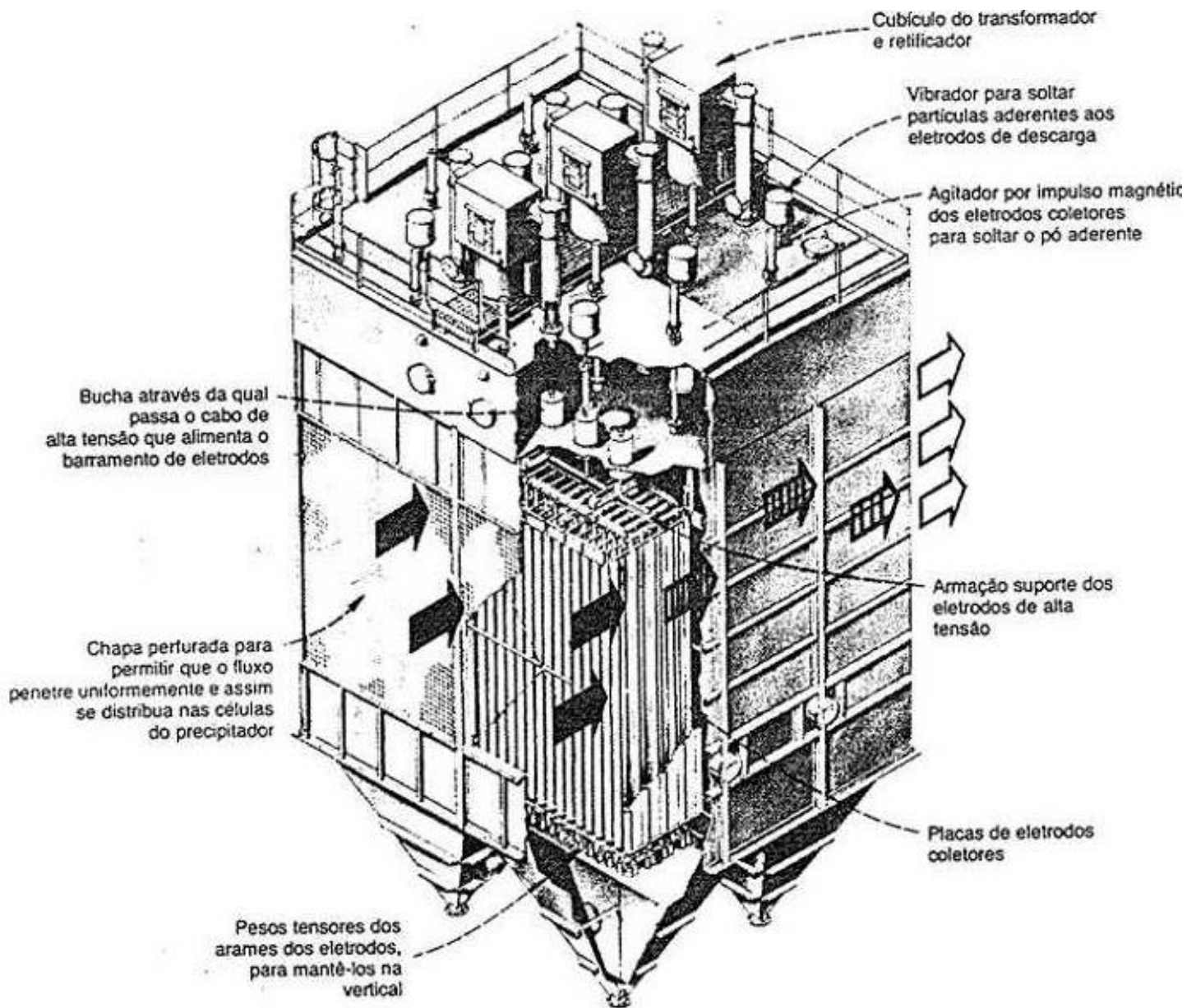


Figura 3 - Precipitador Eletrostático Cottrell (MACINTYRE, 1990)

As partículas de poeira formam sobre os eletrodos uma camada que vai aumentando de espessura e, conseqüentemente, oferecendo maior resistência à passagem da carga para o eletrodo terra. Esta resistência chama-se “resistividade da poeira”. Os filtros eletrostáticos funcionam bem para poeiras cuja resistividade seja da ordem de  $10^7$  a  $10^{11}$  ohms.centímetro. Quando se forma uma camada de poeira de 1 a 6 mm, as partículas de poeira mais próximas dos eletrodos já perderam grande parte da sua carga sobre a placa ligada à terra, então, a atração eletrostática se torna fraca. As partículas de poeira que mais recentemente vão chegando e se depositando conservam melhor sua carga, uma vez que estão eletricamente isoladas da placa pela camada protetora de poeira, o que permite que a totalidade da camada fique aderente ao eletrodo. Com uma pancada seca, consegue-se provocar o descolamento da camada de poeira, de tal modo que os fragmentos sejam relativamente grandes, com dimensões bem superiores à poeira que penetrou no equipamento. Sob a ação de seu peso ou de dispositivos eletromagnéticos, vibradores ou batidas nos coletores, os fragmentos caem numa tremonha, onde se acumulam e periodicamente são removidos (MACINTYRE, 1990).

#### 1.2.4 Filtros de mangas

Os filtros de mangas são meios porosos capazes de deter e coletar partículas e névoas contidas no ar que os atravessa. Os filtros de manga têm a forma de um saco alongado e tubular. O ar carregado com material particulado penetra pela parte interna, quando a boca do saco fica embaixo, saindo o ar filtrado pelo lado externo do tecido e deixando as poeiras no lado interno. Quando se emprega uma armação interna de arames, chamada gaiola, para manter a manga com a forma cilíndrica ou tubular, o ar penetra pelo tecido de fora para dentro e sai filtrado pela parte central pela boca colocada na parte superior. Os compartimentos onde são instalados os filtros de

mangas são conhecidos pela designação de “bag house”, “casa de mangas” ou ainda “casa de filtros” (MACINTYRE, 1990)

Brand (1996) apresenta as variáveis que devem ser analisadas durante a definição de um projeto. Os principais pontos a serem avaliados são a performance, equipamento e tecnologia. A primeira recomendação é não olhar exclusivamente o preço, e sim, iniciar por uma avaliação técnica, identificando os elementos que definem a performance do projeto, tais como, vazão do sistema de captação primária e secundária (coifa), capacidade de armazenamento da coifa, emissões do forno-panela, temperaturas do ambiente e da coifa para diluição, potência do ventilador, área de filtragem, sistema de limpeza dos filtros, capacidade do sistema de recolhimento de pó captado, capacidade do silo de armazenamento de pó e capacidade do pelotizador. A Tabela 1 apresenta um resumo com as taxas recomendadas por Brand (1996).

As taxas de filtragens da casa de filtros informadas na Tabela 1 referem-se a condições de operação em que um dos compartimentos do filtro está fora de operação para limpeza ou manutenção.

Os valores informados na Tabela 1 foram extraídos da experiência de instalações de despoeiramento realizadas pelo especialista Peter Brand. Essas informações são úteis para a fase inicial de estimativa dimensional do sistema.

Em casa de filtro de grande porte, acima da faixa de 350.000 a 500.000 m<sup>3</sup>/h, filtros positivos de ar reverso são mais econômicos em custos e manutenção do que filtros do tipo jato pulsante (BRAND, 1994).

*Tabela 1 - Recomendações básicas para dimensionamento de um sistema de despoeiramento (BRAND, 1996)*

| <b>DESCRIÇÃO</b>   | <b>VALORES RECOMENDADOS</b>   |
|--|---|
| Vazão do sistema primário no final do duto refrigerado, durante a fusão.                         | 1.100 – 1.700 m <sup>3</sup> /h por tonelada de aço produzida/hora  |
| Temperatura dos gases na saída do duto refrigerado, durante a fusão.                             | 650 – 760 °C  |
| Vazão de captação do forno-panela após o gap de diluição.  | 350 – 500 m <sup>3</sup> /h por tonelada de aço produzida/hora      |
| Temperatura dos gases captados no forno-panela, após o gap de diluição.                          | 650 – 760 °C  |
| Taxa de filtragem na casa de filtros com limpeza das mangas com ar reverso.                      | 0,60 a 0,76 m <sup>3</sup> /min de gás por m <sup>2</sup> de mangas |
| Taxa de filtragem na casa de filtros com limpeza das mangas com shaker.                          | 0,45 a 0,68 m <sup>3</sup> /min de gás por m <sup>2</sup> de mangas |
| Taxa de filtragem na casa de filtros com limpeza das mangas com pulse jet.                       | 1,21 a 1,37 m <sup>3</sup> /min de gás por m <sup>2</sup> de mangas |
| Taxa de limpeza da casa de filtros durante a aplicação do ar reverso no compartimento de mangas. | 0,53 a 0,60 m <sup>3</sup> /min de gás por m <sup>2</sup> de mangas |

Os fatores que influenciam na operação e manutenção são as condições de acessos, segurança, sistema de limpeza, facilidade de inspeção e instrumentação para medir a performance e identificar problemas. É recomendável que as tubulações, cabos elétricos, etc., fiquem protegidos de intempéries e não interfiram com os acessos de manutenção, mantendo adequados espaçamentos nas passarelas de acessos aos compartimentos para inspeção e manutenção. Outro benefício desejável é a instalação de medidores de pressão por compartimento, com medições de perda de carga a montante e a jusante das mangas, possibilitando a informação de vazão para cada compartimento e do total da casa de filtros (BRAND,1996).

Uma interessante construção de casa de filtros, porém pouco conhecida, é a do tipo pressão positiva com ar reverso, com entrada dos gases pela parte superior. Possui construção

cilíndrica, com diâmetro de 3,4 m e comprimento cilíndrico de 13 m, com uma relação entre o comprimento e o diâmetro de 45:1. Para a maioria das casas de filtros positivos com ar reverso, esta relação é 33:1. As vantagens desse tipo de filtro são devido a dois fatores. Primeiro, a direção da sedimentação do pó de Aciaria e do fluxo dos gases é a mesma. Isto permite que o pó solto ou desalojado durante a operação não torne a entrar na parte inferior da manga. Segundo, quando as mangas tornam a inflar após a limpeza com ar reverso, o pó em suspensão na manga é purgado para a tremonha inferior, enquanto que em sistemas com entradas inferiores, o pó em suspensão é soprado e captado no fechamento superior do tecido da manga (BRAND, 1996).

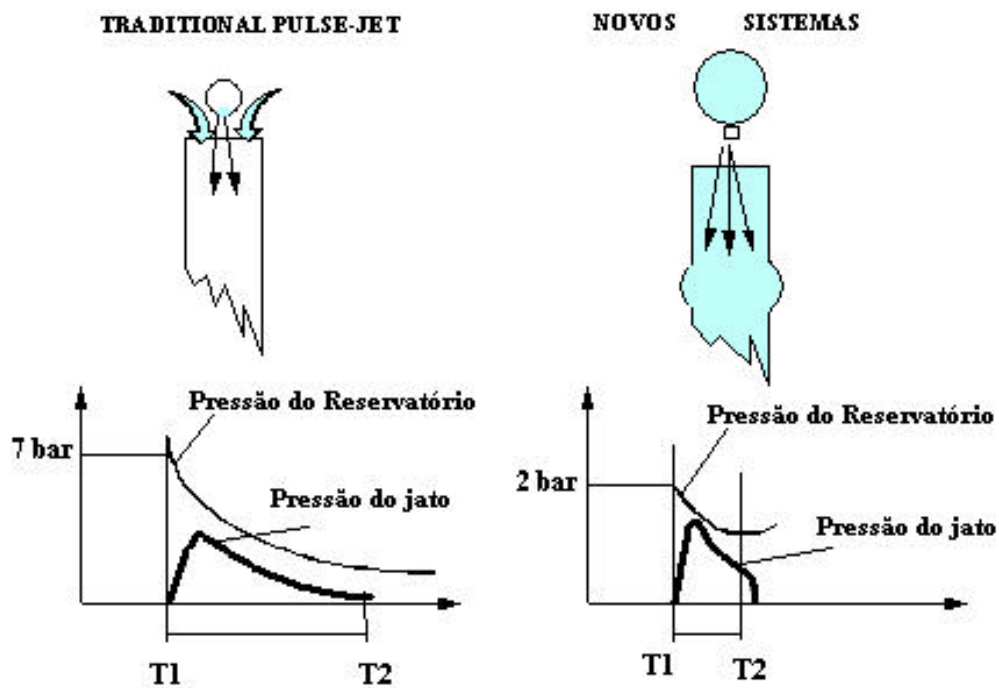
Holmlund e Gaiotto (1997) apresentam informações comparativas entre os diferentes tipos de filtragem. Informam que duas tendências têm sido evidenciadas nas últimas décadas, em função do aumento de restrições legais. Uma tecnologia é a tradicional casa de mangas com pressão positiva e baixa taxa de filtragem e a outra é a tecnologia de jato pulsante, utilizando jatos de ar comprimido para limpeza, caracterizado por altas taxas de filtragem.

Segundo os este autores, o uso de filtros mangas na indústria siderúrgica é muito freqüente, considerando-se com muito critério as propriedades dos gases (vazão, temperatura, concentração do pó e composição do gás) e o tempo. Comparado com outros tipos de coletores ou filtros, quando corretamente dimensionados, os filtros de mangas permitem variações operacionais na fonte geradora sem comprometer significativamente a qualidade do ar filtrado. São apresentados a seguir alguns comparativos entre os dois sistemas de controle de emissões.

#### a) Filtros de mangas tipo jato pulsante

O início da aplicação deste tipo de filtro de altas taxas deu-se com sucesso na década de 70, com o desenvolvimento de novos sistemas de válvulas de limpeza, refinado sistema de

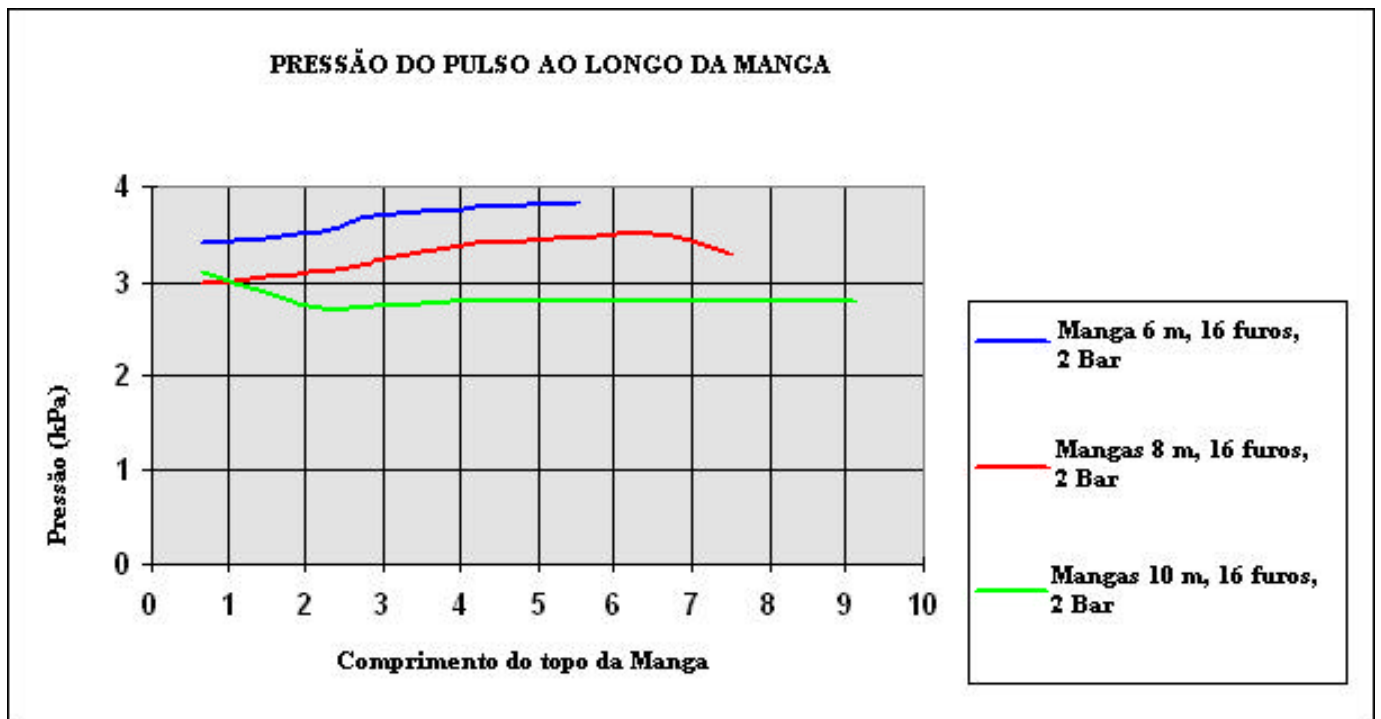
distribuição do jato pulsante e o princípio de distribuição do gás nas mangas. A crescente demanda por menores custos e consumos de energia direcionaram estudos, na década de 80, para novos desenhos de filtros que apresentavam melhor eficiência. Este tipo de sistema possui alta velocidade de filtragem, intenso e vigoroso sistema de limpeza e, normalmente, opera sob depressão (pressão negativa). Para filtros tipo jato pulsante de alta tecnologia, o comprimento adequado para as mangas fica em torno de 8 metros (HOLMLUND e GAIOTTO,1997). As Figuras 4, 5 e 6 apresentam características associadas aos novos sistemas de jato pulsante.



Nota: 1 Bar = 1,019 kg/cm<sup>2</sup>

Figura 4 - Limpezas das mangas no sistema de jato pulsante (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997)





Nota: 1 kPa = 0,0102 kg/cm<sup>2</sup>

Figura 5 - Pressão do pulso de ar ao longo da manga (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997)

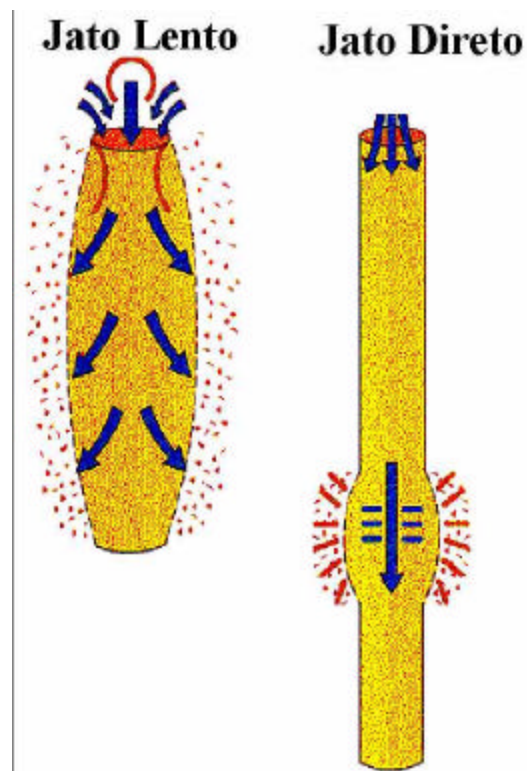


Figura 6 - Métodos de limpeza das mangas (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997)

## b) Filtros de ar reverso

Filtros de ar reverso ou de baixas taxas de filtragem, são considerados sistemas convencionais de filtragem. Sofreram nos últimos anos um aperfeiçoamento para atender as novas demandas, obtendo-se baixos custos de manutenção e confiabilidade. Possuem baixas velocidades de filtragem e um suave sistema de limpeza das mangas. Normalmente operam sob pressão positiva ou algumas vezes sob depressão (pressão negativa) (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997).

A Figura 7 mostra, de forma esquemática, a diferença de arranjo entre os sistemas de limpeza por jato pulsante e ar reverso, considerando conceitos típicos de filtros.

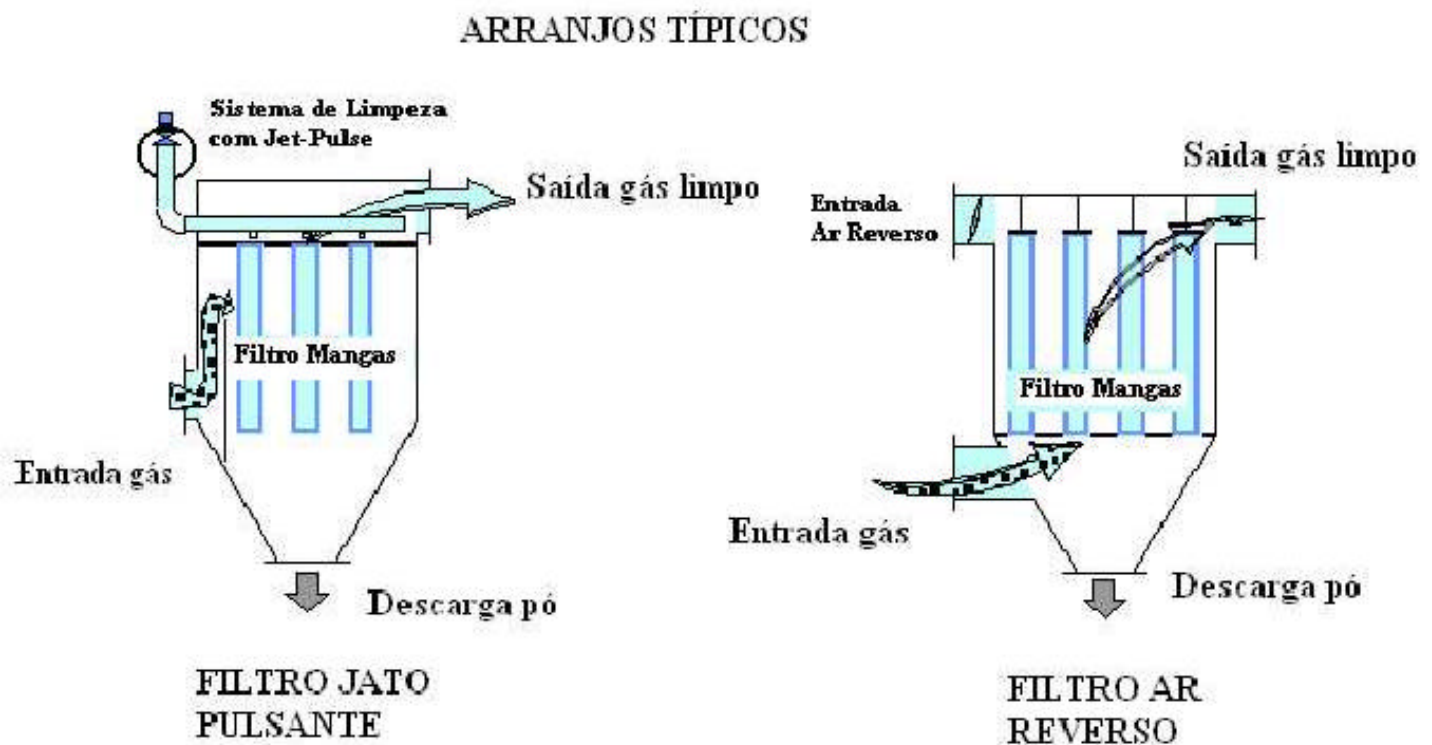


Figura 7 - Sistemas de limpeza das mangas para filtros tipo jato pulsante e ar reverso (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997).

Os filtros positivos, que trabalham sob pressão, com o ventilador colocado antes da instalação de filtragem, demandam maiores cuidados na especificação dos ventiladores, uma vez que os gases sujos entram em contato com os componentes girantes do ventilador (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997).

c) Comparativo entre os diferentes tipos de mangas

A Tabela 2 apresenta o resumo de algumas características dos sistemas de filtragem com jato pulsante e ar reverso, a partir das informações de Holmlund e Gaiotto (1997) e Brand (1994).

Da Tabela 2 cabe destacar o item que trata das infiltrações na casa de filtros. Os efeitos da corrosão e dilatação, decorrentes da intempérie, composição do gás e das constantes variações de temperaturas que está sujeita a estrutura metálica, podem ocasionar aberturas indesejáveis. Nas instalações que operam em depressão, a ocorrência dessas aberturas possibilita que o ar externo ocupe o volume destinado ao gás captado no forno elétrico, causando diminuição da performance do sistema. Este efeito, normalmente, é identificado após alguns anos de operação.

Tabela 2 - Comparativo entre os sistemas de filtragem (HOLMLUND e GAIOTTO, 1997; BRAND, 1996).

| <b>JATO PULSANTE – NEGATIVO</b>  | <b>AR REVERSO – POSITIVO</b>  |
|--|---|
| Maior taxa de filtragem ~ 1,2 m/min.   | Menor taxa de filtragem ~ 0,8 m/min.  |
| Menor vida útil ~ 2 anos.  | Maior vida útil ~ 4 anos.   |
| Investimento inicial maior para sistemas a partir de 340.000/500.000 m <sup>3</sup> /h.  | Investimento menor para sistemas a partir de 340.000/500.000 m <sup>3</sup> /h.   |
| Infiltrações no filtro e no sistema de transporte de pó reduzem a eficiência de captação.  | Infiltrações no filtro e no sistema de transporte de pó não alteram eficiência de captação.   |
| Maior consumo de energia ocasionado pela operação com pressões maiores 80-150 mmCA.  | Menor consumo de energia no filtro ocasionado pela operação com pressões menores 60 - 90 mmCA.  |
| Ventilador após o filtro não ajuda a abater partículas incandescentes.   | Ventilador antes do filtro ajuda a abater partículas incandescentes.  |
| Ventilador não está preparado para receber uma alta concentração de pó nas situações de manga furada.  | Ventilador preparado para operar com alta concentração de pó.   |
| Material das mangas de maior peso (500-650 g/m <sup>2</sup> ) para operar com maiores taxas e garantir a mesma eficiência de filtragem. Normalmente utiliza feltro agulhado. | Material das mangas de menor peso (400-450 g/m <sup>2</sup> ) para operar com menores taxas. Pode utilizar feltro agulhado, que possui maior permeabilidade, para a mesma capacidade de retenção ou tecido (não adequado para pós abrasivos). |
| Limite para a altura de manga em 6 metros, garante o percurso adequado do jato pulsante e a extração superior da mesma.  | Limite para altura de manga de aproximadamente 10 metros. Melhor aproveitamento da altura da instalação.  |
| Consumo de energia para o ar comprimido ligeiramente superior ao ventilador de ar reverso. (Jato pulsante = 1,13 x Ar reverso).  | Consumo de energia para o ventilador de ar reverso ligeiramente inferior ao compressor que gera o jato pulsante.  |
| Permite entrada de água pelas aberturas indesejadas (corrosão), ocasionando a hidrólise nas mangas.  | Pressão positiva dificulta a entrada de água no filtro.   |
| Requer a instalação da chaminé na saída dos gases  | Os gases saem pelo telhado do filtro, em aberturas de ventilação, chamadas de lanternim.  |

| <b>JATO PULSANTE – NEGATIVO</b>  | <b>AR REVERSO – POSITIVO</b>  |
|--|---|
| Operação de limpeza da manga com maior vigor e intensidade.  | Operação de limpeza da manga mais suave. Equipamento trabalha mais aliviado.  |
| Normalmente utilizado com filtros em pressões negativas.   | Pode ser aplicado em filtros que operam em pressões negativas e positivas.  |
| Em caso de falha do agente de limpeza (compressor), o filtro pára de operar.   | Em caso de falha do agente de limpeza (ventilador de ar reverso), o filtro pode operar utilizando a depressão a montante dos ventiladores principais. |
| Grande quantidade de válvulas solenóides para admissão do jato pulsante e dampers de grande porte para isolar os compartimentos. | Dampers de grande porte que atuam lentamente para isolar compartimentos e admitir ar reverso.   |
| Amplamente aplicado na Europa.   | Amplamente aplicado nos EUA e Japão.  |
| Requer menores áreas para implantação.   | Requer maiores áreas para implantação. Ar reverso=1,5 a 2 x Jato pulsante.  |
| Menor investimento inicial com o transporte de pó, devido ao menor comprimento de tremonhas.                                     | Maior investimento inicial com o sistema de transporte de pó, devido ao maior comprimento de tremonhas.   |
| Maior conforto ao operador durante as manutenções, pois pode substituir mangas por fora do filtro, na parte superior.            | Menor conforto para o operador nas ocasiões de manutenção, deverá entrar no filtro ara substituir mangas.   |
| O tempo de troca de mangas é menor.  | O tempo de troca de mangas é maior. Ar reverso=3 x Jato pulsante.   |
| As mangas furadas são detectadas com maior facilidade no espelho do compartimento superior ou na chaminé.                        | As mangas furadas são detectadas na observação das mangas vizinhas ou com detectores de pó.   |
| Ventilador trabalha no lado limpo.   | Ventilador requer uma construção especial para operar no lado sujo.   |
| Consumo de energia ligeiramente inferior devido ao bom desempenho do rotor do ventilador (rendimento 70-80%).                    | Consumo de energia ligeiramente superior pelo menor rendimento do ventilador, devido ao tipo de pás retas do rotor (65- 80%).                         |
| A manga danificada pode ser tamponada e isolada.   | A manga danificada pode ser embrulhada na região do furo.   |
| A seqüência de limpeza pode ser por diferencial de pressão ou com controlador de tempo.  | A seqüência de limpeza, normalmente, é com controlador de tempo.  |

Nas instalações de despoejamento para fornos elétricos, os filtros de mangas são preferencialmente do tipo de compartimento, para regime de funcionamento contínuo. Os sistemas que não isolam o compartimento durante a limpeza não garantem que as partículas finas precipitem no compartimento de sedimentação de pó, uma vez que encontram os gases contaminados no fluxo contrário. A filtragem por mangas requer o resfriamento dos gases para proteger os tecidos. Os gases devem chegar ao filtro a uma temperatura máxima de 130 °C no caso de mangas de poliéster, podendo chegar a 280 °C no caso de mangas de fibra de vidro. Holmlund e Gaiotto (1997) concluem que os dois sistemas de filtragem, aqui abordados, apresentaram uma sensível atualização tecnológica, principalmente pela evolução dos sistemas de controles eletrônicos.

Segundo o Boletim Técnico N° 1, da Renner Produtos Têxteis, 1999, que trata sobre o uso de elementos filtrantes na retenção de pós aplicados à indústria de ferro e aço, a utilização de feltros agulhados de poliéster, com acabamentos anti-adesivos, reduzem a fricção. Podem ser utilizadas mangas com pesos de 450 g/m<sup>2</sup>, permeabilidade de 275 l/dm<sup>2</sup>. Normalmente, operam com uma depressão de 20 mmCA, com relação de vazão de ar por área de pano de 1,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/min. A temperatura de operação situa-se na faixa de 130 a 150 °C. A perda de carga na casa de filtros é de aproximadamente 140 mmCA. A concentração de material particulado no gás filtrado é de 20 mg/m<sup>3</sup>, e a vida útil das mangas é de aproximadamente de 4 anos. Segundo este fabricante, está comprovado que, pelo emprego de feltros agulhados especiais, a relação ar/pano pode ser aumentada de 1 para 1,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/min, reduzindo significativamente a área total de filtragem.

A Tabela 3, elaborada pela empresa BHA GROUP INC. (1997), apresenta um resumo com as principais características de alguns materiais filtrantes disponíveis no mercado. Apesar da existência de diversos materiais, freqüentemente, em sistemas de despoejamento, utiliza-se o

polyester. Sua escolha está associada ao menor custo e ao atendimento dos requisitos necessários para o correto funcionamento do sistema. Para a temperatura e a umidade, devem ser tomadas medidas no projeto que limitem a elevação dessas variáveis físicas na entrada da casa de filtros.

Sistemas que apresentam problemas de queimas de mangas, ocasionadas por temperaturas excessivas, podem adotar a solução de substituir o material da manga por materiais como o Nomex, Ryton e P-84, que permitem uma operação em maiores temperaturas, desde que mantenham as mesmas propriedades de filtração.

*Tabela 3 - Resumo com as principais características de alguns materiais filtrantes disponíveis no mercado (BHA GROUP INC. 1997).*

| <b>CARACTERÍSTICAS</b>                  | <b>Polipropileno</b> | <b>Poliéster</b> | <b>Acrílico</b> | <b>Fibra de Vidro</b> | <b>Nomex</b> | <b>Ryton</b> | <b>P-84</b>  | <b>Teflon</b> |
|---|----------------------|------------------|-----------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Máxima temperatura de operação contínua | 77 °C                | 135 °C           | 130 °C          | 260 °C                | 204 °C       | 190°C        | 260 °C       | 260 °C        |
| Resistência a abrasão                   | Muito Boa            | Muito Boa        | Boa             | Regular               | Muito Boa    | Boa          | Regular      | Boa           |
| Energia de absorção                     | Boa                  | Muito Boa        | Boa             | Regular               | Boa          | Boa          | Boa          | Boa           |
| Propriedades de filtração               | Boa                  | Muito Boa        | Boa             | Regular               | Muito Boa    | Muito Boa    | Muito Boa    | Regular       |
| Resistência a umidade térmica           | Muito Boa            | Fraca            | Muito Boa       | Muito Boa             | Boa          | Boa          | Boa          | Muito Boa     |
| Resistência a alcalinidade              | Muito Boa            | Regular          | Regular         | Regular               | Boa          | Muito Boa    | Regular      | Muito Boa     |
| Resistência a ácidos minerais           | Muito Boa            | Regular          | Boa             | Fraca                 | Regular      | Muito Boa    | Boa          | Muito Boa     |
| Oxigênio (+15%)                         | Muito Boa            | Muito Boa        | Muito Boa       | Muito Boa             | Muito Boa    | Fraca        | Muito Boa    | Muito Boa     |
| Custo Relativo                          | \$                   | \$               | \$\$            | \$\$\$                | \$\$\$\$     | \$\$\$\$\$\$ | \$\$\$\$\$\$ | \$\$\$\$\$\$  |

### 1.2.5 Sistema de ventiladores

Outro elemento para avaliar a performance é o sistema de ventiladores. O custo dos ventiladores normalmente corresponde a 5% do custo total do investimento. Para garantir uma adequada capacidade, os ventiladores devem ser selecionados com uma margem de segurança de 10% acima da vazão calculada, e 21% acima da pressão e potência projetadas, para assim atender as capacidades nominais, em condições de operação a temperatura ambiente (BRAND, 1994).

### 1.2.6 Sistema de recolhimento do pó de Aciaria

A capacidade do silo deverá ser suficiente para armazenar as emissões geradas em pelo menos três dias de operação da Aciaria. É recomendável que a área de descarga do pó seja fechada e com sistema de captação localizado por ponto de descarga, para conter as emissões atmosféricas geradas na operação de carregamento de caminhões, trens ou navios. O silo pode ser montado em células de carga para precisar os pesos dos carregamentos. No caso de instalar pelletizadores, é recomendável uma capacidade mínima para processamento de 7 dias de produção de pó de Aciaria em 5 dias, com 100% de capacidade de reserva (BRAND, 1994)

### 1.2.7 Emissões primárias

As emissões primárias são as geradas na fase de fusão da matéria-prima no forno elétrico. A captação das emissões primárias do FEA é realizada através do quarto furo. Na abóbada do forno existem quatro aberturas, três delas permitem a passagem dos eletrodos, responsáveis pela



transmissão da energia elétrica necessária para fundir a matéria-prima, a quarta, chamada quarto-furo, é a que permite a saída dos gases.

Após saírem do quarto furo, os gases ingressam na câmara de sedimentação. A câmara de sedimentação ou combustão do sistema primário deve ser dimensionada para garantir uma velocidade menor que 10 m/s para prevenir que pequenos sólidos presentes na escória sejam carregados para a casa de filtros. A câmara de combustão deverá ter uma capacidade de armazenamento suficiente para garantir pelo menos uma limpeza semanal, ou a cada duas semanas (BRAND, 1994).

O resfriamento das emissões primárias ou diretas do FEA pode ser realizado empregando-se diferentes tecnologias. Uma forma é o resfriamento por diluição, que compreende a mistura de ar resfriado com os gases quentes das emissões primárias ou diretas do FEA. Nesse caso, são aumentados os volumes de gases a serem tratados na casa de filtros. Entretanto, se o ar resfriado for disponível, em função do mesmo ser o resultado de outros pontos de captação, não será considerado uma ampliação da casa de filtros devido à diluição, pois o mesmo já exerce uma função de captura de emissões. Esse é o caso dos sistemas que utilizam a captura de emissões fugitivas, geradas na fusão, para diluir os gases quentes das emissões diretas do FEA. Outra forma, é o resfriamento com sprays ou sistemas evaporativos, que empregam ar comprimido e água, introduzidos por bicos injetores. São utilizados para realizar o corte dos picos de temperatura das emissões primárias ou diretas do FEA. A quantidade a ser injetada no sistema deve ser cuidadosamente avaliada para evitar os problemas de condensação na casa de filtros. Uma terceira forma é o resfriamento com trocadores de calor, onde ventiladores forçam o ar externo a passar por fora dos dutos com gases quentes, provenientes das emissões primárias do FEA. Estes são resfriados e reduzem o seu volume, conseqüentemente, diminuindo os gases a serem tratados na casa de filtros. Trocadores de calor tipo “Trombone”, também chamados tipo

“Tubo U”, não empregam ventiladores para forçar a passagem do ar do ambiente externo, porém requerem uma localização que permita o fluxo de correntes de ventos no seu entorno (BRAND, 1994).

O resfriamento com sprays é eficientemente empregado para cortar os picos de temperatura no duto primário. O ar atomizado é capaz de produzir tamanhos específicos de gotas, resultando em eficiente resfriamento evaporativo, com o mínimo emprego de água. A adequada seleção dos bicos sprays é importante para evitar o entupimento e assegurar a apropriada distribuição de água sem encharcar as paredes dos dutos. Usualmente, as quantidades consumidas de água de sprays variam de 1,6 a 4,8 l/min (0,096 a 0,28 m<sup>3</sup>/h) para cada Nm<sup>3</sup>/h de gás. A quantidade de ar comprimido necessário para atomizar os sprays está em torno de 83 a 250 Nm<sup>3</sup>/h para 1,0 l/min de água de spray (MANTEN e BRAND, 1994).

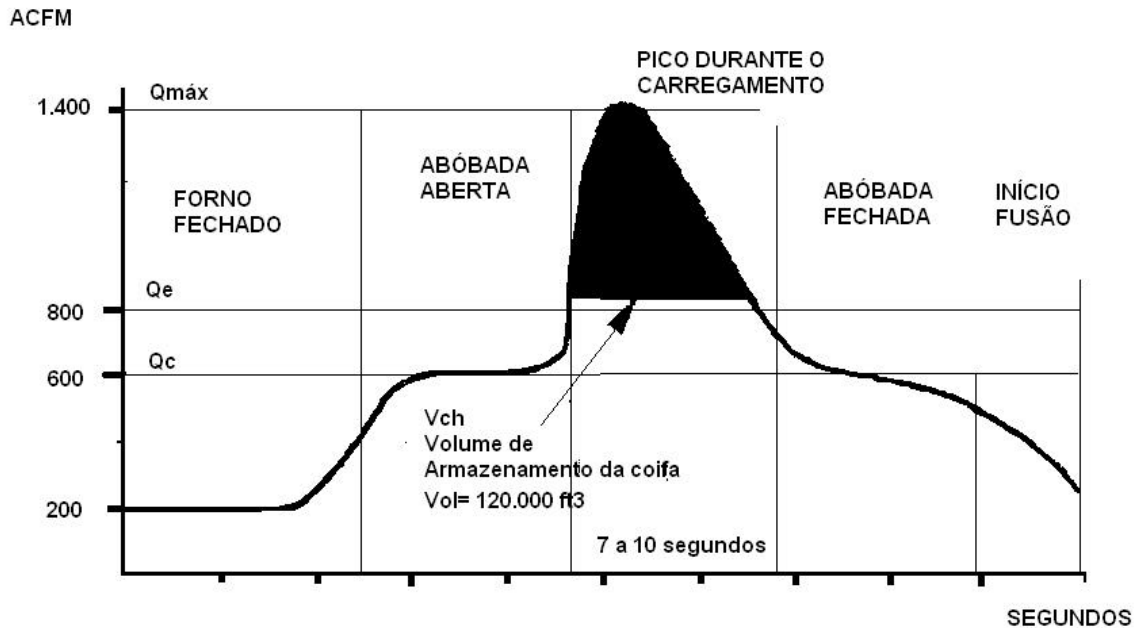
#### 1.2.8 Emissões Secundárias

As emissões secundárias são geradas nas operações de carregamento e vazamento do FEA e no forno-panela. Normalmente captadas pelas coifas instaladas sobre as fontes geradoras.

Ao avaliar o sistema proposto para a coifa captar as emissões secundárias do Forno Elétrico a Arco (FEA) durante a fase de carregamento, deve-se observar a correta taxa de exaustão, capacidade de armazenamento e design. Durante o carregamento, a vazão dos gases gerados no FEA, freqüentemente ultrapassa em 2 a 3 vezes a capacidade instalada de exaustão do sistema. A capacidade de armazenamento volumétrico da coifa deve ser suficiente para conter o excedente de gases e assim evitar o vazamento dos mesmos para atmosfera (MANTEN e BRAND, 1994)

A Figura 8 apresenta o perfil típico de vazão da face da coifa em função do tempo, durante o carregamento. Quando a abóbada do forno é aberta para o carregamento da sucata e demais componentes da carga fria, uma pluma de gases de volume com certa constância, é gerada em função das condições de elevadas temperaturas no interior do FEA. A taxa de exaustão da coifa deverá ser, pelo menos, 1,2 vezes a vazão da pluma do ambiente para a efetiva captura dessas emissões. A pluma do ambiente pode ser calculado de acordo com o descrito no método do Manual Técnico da USEPA - *Hood System Capture of Process Fugitive Particulate Emissions* (KASHDAN *et al.*, 1985).

Quando o cestão com a carga fria é carregado no FEA, o volume dos gases emitidos cresce rapidamente em poucos segundos, freqüentemente acompanhado de uma grande bola de fogo. Essa pluma direciona-se em fileira, por um período de aproximadamente 7 a 10 segundos, na traseira do volume da pluma do ambiente, formada durante a abertura da abóbada. A linha horizontal  $Q_e$  da Figura 8 representa a taxa de exaustão da coifa, e a área sombreada sobre esta linha representa a capacidade de volume mínimo de armazenamento que a coifa deverá ter. Este volume físico é o mínimo requerido para capturar a pluma de gases e particulados emitidos durante o carregamento. Se o volume da coifa é menor que o mínimo requerido, deverá ocorrer vazamento da pluma para o ambiente externo. Quando os gases da coifa são empregados para diluir a temperatura das emissões primárias do FEA, para proteger as mangas do filtro das condições de sobre-temperatura, é importante adotar no projeto as máximas temperaturas do verão encontradas no prédio da Aciaria (MANTEN e BRAND, 1994).



Notas:  $1 \text{ ft}^3 = 0.0283 \text{ m}^3$   
 $1 \text{ ACFM} = 1.699 \text{ m}^3/\text{h}$

Figura 8 - Curva típica da pluma de carregamento para uma usina com produção de 800.000 toneladas de aço/ano (MANTEN e BRAND, 1994)

#### a) Captação localizada

Outra alternativa tecnológica é a captação localizada através do controle das emissões secundárias durante o vazamento do aço líquido na panela, exaurindo as emissões da panela, particularmente no caso de sistemas de vazamento tipo EBT - *Eccentric Bottom Tapping*. Algumas plantas utilizam coifas localizadas para captar as emissões do vazamento. Entretanto, devido à distância entre a panela de vazamento e a coifa, interferências do FEA, da ponte rolante e correntes cruzadas com a pluma, esse método de captura não é efetivo. O benefício da captação localizada, pela proximidade da coifa das fontes de emissão, é a necessidade de menores volumes de captação. A captação localizada minimiza as emissões para o interior do prédio. No controle das emissões atmosféricas, os fatores normalmente otimizados são a taxa de vazão e a área de filtração. Uma vez instalados sistemas com pouca ou no limite de capacidade, serão necessários

grandes esforços para não perder a batalha contra o aumento de produção, os deficientes planos de manutenções, as deteriorações dos equipamentos e as novas exigências ambientais (MANTEN e BRAND, 1994).

#### b) Modelamento Hidráulico

Segundo Bender *et al.* (1983), muitos FEAs possuem sistemas de controle das emissões secundárias com coifas no telhado da Aciaria. Durante o deslocamento da pluma do FEA até a face da coifa, ocorre uma grande diluição com o ar ambiente da Aciaria. As grandes vazões requeridas nos sistemas de captação das emissões secundárias, geradas principalmente durante o carregamento, vazamento e em menor intensidade durante a fusão, empregam vazões com valores de 500.000 a 1.500.000 m<sup>3</sup>/h e dependem de fatores tais como a dimensão do FEA, geometria e ventilação do prédio da Aciaria.

Bender *et al.* (1983) informam que a performance desses sistemas são normalmente baixas, em particular, quando ocorrem correntes de ar que desviam a direção da pluma, quando a mesma está em deslocamento para a coifa do telhado. Os esforços para melhorar a captura da pluma, tradicionalmente ocasionam aumentos de capacidade de sucção da coifa. Os custos para realizar estas adequações estão na ordem de 8,9 US\$/m<sup>3</sup>/h, ocasionando gastos significativos para melhorar a captura pela coifa destas emissões. O desenvolvimento do modelamento hidráulico em sistemas de captação resultou num eficiente meio para otimizar as soluções de captação das emissões secundárias. Os autores afirmam que é possível a obtenção de melhorias equivalentes, investindo somente 10% das tradicionais soluções de ampliação da vazão de captação.

### 1.2.9 Pó coletado na casa de filtros

O produto obtido no processo de filtragem das emissões de FEA é um subproduto chamado pó de Aciaria. O pó apresenta uma distribuição granulométrica bastante fina.

Segundo Matsuoka *et al.* (1991), o objetivo dos desenvolvimentos realizados pela Sumitomo Technology é reduzir os custos para recuperar os constituintes na sua forma metálica, isto é, zinco e chumbo, em lingotes e ferro fundido, que podem ser reciclados em fornos siderúrgicos, economizando calor sensível, materiais ferrosos e carbono. A composição típica do pó e a sua distribuição granulométrica estão apresentadas nas Tabelas 4 e 5. Nessas tabelas, a maior concentração é dos elementos ferro e zinco. A maior concentração de massa encontra-se distribuída na granulometria abaixo de 1 microm (0,001 mm).

Tabela 4 - Composição típica do pó de Aciaria (%) (MATSUOKA *et al.*, 1991)

| <b>Fe Total</b> | <b>FeO</b> | <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>ZnO</b> | <b>PbO</b> | <b>CaO</b> | <b>SiO<sub>2</sub></b> | <b>MgO</b> | <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> |
|-----------------|------------|------------------------------------|------------|------------|------------|------------------------|------------|------------------------------------|
| 30,2            | 2,8        | 40,0                               | 24,2       | 4,1        | 5,1        | 4,8                    | 1,3        | 2,4                                |

| <b>MnO</b> | <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> | <b>Na+K</b> | <b>Cu+Ni</b> | <b>C</b> | <b>S</b> | <b>Cl<sup>-</sup></b> | <b>Perda ao fogo</b> |
|------------|-----------------------------------|-------------|--------------|----------|----------|-----------------------|----------------------|
| 2,8        | 0,5                               | 0,4         | 0,9          | 1,7      | 0,6      | 3,3                   | 5,3                  |

Tabela 5 - Distribuição granulométrica do pó de Aciaria (% Peso) (MATSUOKA *et al.*, 1991)

| <b>mm</b> | <b>30</b> | <b>15</b> | <b>8</b> | <b>4</b> | <b>2</b> | <b>1</b> | <b>&lt; 1</b> |
|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|---------------|
| <b>%</b>  | 2,5       | 2,7       | 1,9      | 4,6      | 10,5     | 22,6     | 45,4          |

O relatório sobre tecnologias para o tratamento e/ou reciclagem de pós de aciarias, desenvolvido pelo IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, Natrontec e Hatch Associates (1996), apresentou inventário sobre a quantidade de pó gerado nas empresas siderúrgicas em relação a quantidade de aço produzido, em empresas que produzem aço carbono baixa liga e inoxidável. Os valores variam de 1,4% na Itália a 1,8% no Japão, conforme demonstrado na Tabela 6.

*Tabela 6 - Coeficiente de geração de pó de Aciaria (% de pó gerado / produção de aço)-(IBS- Instituto Brasileiro de Siderurgia, 1996)*

| Canadá | EUA | México | Argentina | Alemanha | Itália | Japão | Média |
|--------|-----|--------|-----------|----------|--------|-------|-------|
| 1,5    | 1,7 | 1,6    | 1,6       | 1,6      | 1,4    | 1,8   | 1,7   |

As tecnologias em uso corrente e em desenvolvimento para o pó de Aciaria foram compiladas pela *Steel Manufacturer's Association - K061 - Processing Options Subcommittee, 2003*, Associação dos Produtores de Aço dos Estados Unidos. A relação foi dividida em 18 tecnologias correntes e 10 em desenvolvimento. Dentre as tecnologias correntes, cabe destacar:

- a) Processo Two Stage Waelz Kiln - empresa Horsehead, EUA, faz a recuperação da parte metálica em altas temperaturas, produzindo óxidos de zinco, chumbo e ferro.
- b) Processo Inmetco - EUA, utiliza forno rotativo e forno com arco submerso de fusão para recuperação da parte metálica do zinco, níquel, ferro e cromo.
- c) Processo Single Stage Waelz Kiln - empresa Zinc Nacional, México, realiza a recuperação da parte metálica em altas temperaturas, produzindo óxidos de zinco, sulfato de zinco, cádmio metálico, sulfato de chumbo e escória de ferro.

Das tecnologias em desenvolvimento, destacam-se:

- a) Processo Primus - desenvolvido pela empresa *Paul Wurth*, de Luxemburgo, emprega forno vertical, rotativo, alimentado com carvão, finos de minério de ferro e pó de Aciaria, produz ferro esponja e óxidos de zinco. A unidade iniciou sua operação em 2003.
- b) Processo Carbofer - Inglaterra, processo de reciclagem do pó de Aciaria, onde este é adicionado à carepa oleosa, lamas de estação de tratamento de efluentes, carvão e cal. A mistura é peneirada e o material curado é injetado no FEA, na forma de pó seco.

### 1.3 Legislação

A legislação ambiental brasileira é muito ampla e constitui-se de leis, decretos, portarias, normas, resoluções em níveis federal, estadual e municipal. A sua atualização permanente exige dos responsáveis pelos empreendimentos atenção constante, pois quase que diariamente ocorre alguma alteração neste conjunto.

A legislação aplicável a este estudo é variada e tem origem nos níveis federal, estadual e municipal. Este estudo apresenta aquelas consideradas como principais, relacionadas às emissões atmosféricas, focada nas concentrações de material particulado (MP), tanto nas emissões como na qualidade do ar.

Uma das principais legislações que trata sobre as emissões atmosféricas é a Resolução CONAMA N.º 003/90, de 28 de junho de 1990, que estabelece os padrões de qualidade do ar e as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.



Esta Resolução estabelece os conceitos de padrões primários e secundários de qualidade do ar. Segundo o CONAMA 003/90, os padrões primários de qualidade do ar são as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população e os padrões secundários de qualidade do ar são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Para o padrão primário, ficou estabelecido o limite para a concentração média geométrica anual (MGA) de 80 (oitenta) microgramas de material particulado por metro cúbico de ar e a concentração média de 24 (vinte e quatro) horas de 240 (duzentos e quarenta) microgramas por metro cúbico de ar não deve ser excedida mais de 1 (uma) vez por ano.

Para o padrão secundário, ficou estabelecido o limite para a concentração média geométrica anual de 60 (sessenta) microgramas por metro cúbico de ar e a concentração média de 24 (vinte e quatro) horas de 150 (cento e cinquenta) microgramas por metro cúbico de ar, que não deve ser excedido mais de 1 (uma) vez por ano.

A Tabela 7 apresenta os valores estabelecidos pelo CONAMA 003/90 para Partículas Totais em Suspensão (PTS).

*Tabela 7 - Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (CONAMA 03/90)*

| <b>Poluente</b>                      | <b>Período de amostragem</b> | <b>Padrão primário (mg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Padrão secundário (mg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Técnica analítica</b>      |
|--------------------------------------|------------------------------|---|---|-------------------------------|
| Partículas Totais em Suspensão (PTS) | 24 h                         | 240                                       | 150   | Amostrador de grandes volumes |
|                                      | MGA                          | 80  | 60  |                               |

A Lei 11.520, de 3 de agosto de 2000, instituiu o Código Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul. No capítulo III, que trata da utilização e conservação do ar,

informa que a atmosfera é um bem ambiental indispensável à vida e às atividades humanas, sendo sua conservação uma obrigação de todos, sob a gerência do Estado, em nome da sociedade.

No artigo 146, define que a gestão dos Recursos Atmosféricos será realizada por Regiões de Controle da Qualidade do Ar e por Áreas Especiais, com a adoção de ações gerenciais específicas e diferenciadas, se necessário, de modo a buscar o equilíbrio entre as atividades vinculadas ao desenvolvimento sócio-econômico e a manutenção da integridade da atmosfera. No parágrafo único, diz que a manutenção da integridade da atmosfera depende da verificação simultânea de diversos condicionantes, tais como dos padrões de qualidade do ar e dos padrões de emissão aplicados às fontes poluidoras, de indicadores de precipitação de poluentes e do equilíbrio biofísico das espécies e dos materiais com os níveis de poluentes na atmosfera, dentre outros.

No artigo 149, ficaram estabelecidas as Classes de Uso pretendidas para o território do Rio Grande do Sul, visando a implementar uma política de prevenção de deterioração significativa da qualidade do ar, onde:

*I - Área Classe I: são assim classificadas todas as áreas de preservação, lazer e turismo, tais como Unidades de Conservação, estâncias hidrominerais e hidrotermais - nacionais, estaduais e municipais, onde deverá ser mantida a qualidade do ar em nível o mais próximo possível do verificado sem a intervenção antropogênica;*

*II - Área Classe II: são assim classificadas todas as áreas não classificadas como I ou III;*

*III - Área Classe III: são assim classificadas todas as áreas que abrigam Distritos Industriais criados por legislação própria.*

O artigo 151 informa que é vedado a toda e qualquer empresa emitir poluentes atmosféricos ou combinações destes em concentrações e em duração tais que sejam prejudiciais

ou afetar adversamente o bem-estar humano, a vida animal, a vegetação ou os bens materiais, em áreas classe I ou II.

Pelo artigo 152, toda empresa localizada em áreas classe II, mesmo em conformidade com a legislação ambiental, que estiver interferindo no bem-estar da população, pela geração de poluentes atmosféricos, adotará todas as medidas de controle de poluição necessárias para evitar tal malefício, não podendo ampliar sua capacidade produtiva ou sua esfera de ação sem a adoção desta medida de controle.

No presente trabalho, foram consideradas para orientar as avaliações visuais dos sistemas de despoeiramento nas visitas técnicas realizadas a Norma da CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, L9.061 (1979), que trata da determinação de grau de enegrecimento de fumaça emitida por fontes estacionárias, utilizando a escala Ringelmann reduzida.

Essa Norma estabelece uma escala que permite comparar a tonalidade da emissão com o padrão colorimétrico. A escala pode variar de 1 a 5, que corresponde, respectivamente, a densidades de fumaça que variam de 20% a 100%. Para atender essa Norma, o grau de enegrecimento de fumaça emitida por fontes estacionárias não poderá exceder o padrão número 1, correspondente a 20%. Cabe salientar que esta Norma está orientada para processos que utilizam combustíveis fósseis como fontes de emissão, portanto, não aplicada para emissões de FEA. Foi adotada neste estudo apenas para referenciar as avaliações visuais de desempenho.

A saber, existem outras legislações que tratam das emissões atmosféricas e qualidade do ar:

- a) Portaria do Ministério do Interior n.º 231/76, estabeleceu os Padrões de Qualidade do Ar, revogada pela Resolução CONAMA, de 28 de junho de 1990 .

- b) Resolução 005/89 do CONAMA, instituiu o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR.
- c) Resolução 008/90 do CONAMA estabeleceu, em nível nacional, limites máximos de emissão de poluentes do ar (padrões de emissão) para processos de combustão externa em novas fontes fixas de poluição com potências nominais totais de até 70 MW (setenta megawatts) e superiores.

## **2 PARTE EXPERIMENTAL**

A metodologia adotada na parte experimental deste trabalho consistiu em descrever as principais atividades, desenvolvidas ao longo dos últimos anos, para a implantação do novo sistema de despoeiramento da Aciaria da Gerdau Riograndense.

A parte experimental deste trabalho está dividida em etapas, assim denominadas:

- a ) Visitas técnicas;
- b ) Modelamento hidráulico;
- c ) Especificações técnicas preliminares do projeto;
- d ) Projeto básico do sistema de despoeiramento.

### **2.1 VISITAS TÉCNICAS REALIZADAS**

Este capítulo apresenta uma descrição das visitas realizadas em diversas empresas siderúrgicas, atividade básica para estruturar uma adequada especificação para o projeto de despoeiramento. Nessas visitas, foram observadas, entre outras, as questões de operação, manutenção, custos e performance.

As empresas visitadas são referenciais mundiais e apresentaram de forma esclarecedora suas instalações, uma vez que a busca de melhores desempenhos em sistemas de controle ambiental é um objetivo comum nas empresas que tem o desenvolvimento sustentável como estratégia de crescimento.

### 2.1.1 Empresa Siderúrgica Canadense

Em 04 de março de 1997, foi realizada a visita à usina siderúrgica localizada no Canadá, que possui um FEA com capacidade de 40 toneladas/corrida. O sistema de despoejamento tem capacidade para 400.000 m<sup>3</sup>/h.

Foi realizada uma reunião com a empresa de consultoria local, especializada em sistemas de despoejamento, onde foram discutidas as alternativas para melhorar o desempenho da atual instalação de despoejamento dessa empresa. Um dos principais problemas relatados nessa instalação é o elevado custo de manutenção, ocasionado por freqüentes queimas de mangas na casa de filtros provocadas por fagulhas, que não são abatidas no caminho até a entrada do filtro, uma vez que a casa de filtros está muito próximo do Forno Elétrico a Arco (FEA). As melhorias previstas para minimizar esse problema foram:

- a) aumentar o comprimento dos dutos primários e secundários;
- b) colocar defletores na câmara de mistura e alterar o ângulo da tomada dos dutos na coifa;
- c) construir uma câmara de combustão, com tempo de permanência mínimo de 1,5 segundos e velocidade de 7,6 m/s;
- d) instalar ventiladores com maior capacidade de pressão e booster (ventilador posicionado em série no duto para elevar a pressão) para o sistema primário.

Foi avaliada a alternativa de utilizar uma câmara de combustão com sprays. Foram relatadas experiências negativas em função da condensação dos vapores de água nas paredes internas do filtro.

Esta empresa canadense implantou uma série de melhorias no seu sistema de despoeiramento, obtendo bons resultados no desempenho da captação. Dentre as melhorias implantadas, destaca-se a câmara evaporativa com sprays d'água para rebaixar a temperatura dos gases com a injeção de água.

### 2.1.2 Empresa Consultora Canadense

Em 05 de março de 1997, foi realizada uma reunião na empresa de consultoria Hatch, responsável pela elaboração do projeto básico do sistema de despoeiramento da Aciaria da Gerdau Riograndense.

Nessa ocasião, foram discutidos alguns ajustes que deveriam ser considerados no projeto do sistema de despoeiramento. As principais considerações dessa reunião foram:

- a) na câmara de combustão: prever sistema de remoção automática do pó depositado.  
Caso seja definido posteriormente pelo sistema de câmara vertical, programar a limpeza automática a cada corrida e colocar placas de sacrifício para concentrar em um único ponto a manutenção;
- b) a velocidade do gás na câmara de combustão deverá ser de 8 a 9 m/s para garantir a correta deposição das partículas maiores. O tempo de residência dos gases no interior da câmara de combustão deverá variar de 1 a 2 segundos;
- c) a taxa de água de resfriamento média deverá ser de  $8\text{m}^3/\text{h}$  de água para cada  $\text{m}^2$  de painel resfriado;

- d) a variação de temperatura da água entre a entrada e saída nos painéis da câmara deve variar de 8 a 17°C;
- e) avaliar o ganho de energia ocasionado pelo emprego do trocador de calor, uma vez que os gases ao serem resfriados no trocador, reduzem o seu volume;
- f) para o filtro, ficou definido que será adotado filtro positivo, e o sistema de limpeza das mangas será por ar reverso;
- g) para a coifa, ficou definido que a estrutura para suportar a mesma deverá ser independente do prédio da Aciaria, objetivando não aumentar o atual nível de cargas na estrutura existente. Esta definição removeu as limitações anteriores para o desenho da coifa, permitindo ampliar sua capacidade volumétrica. As duas coifas, propostas inicialmente, foram baseadas no melhor uso da estrutura existente do prédio;
- h) foi definido que deverá ser realizado o terceiro modelamento para a coifa.

### 2.1.3 Empresa Siderúrgica Francesa 1

Visita realizada em usina siderúrgica francesa, no dia 25 de junho de 1990, empresa que produz aços especiais, com produção anual de 1.000.000 toneladas, com dois fornos elétricos de 80 toneladas cada. Utiliza o processo de degaseificação com vácuo. O tap-to-tap do forno é de 2,5 horas.

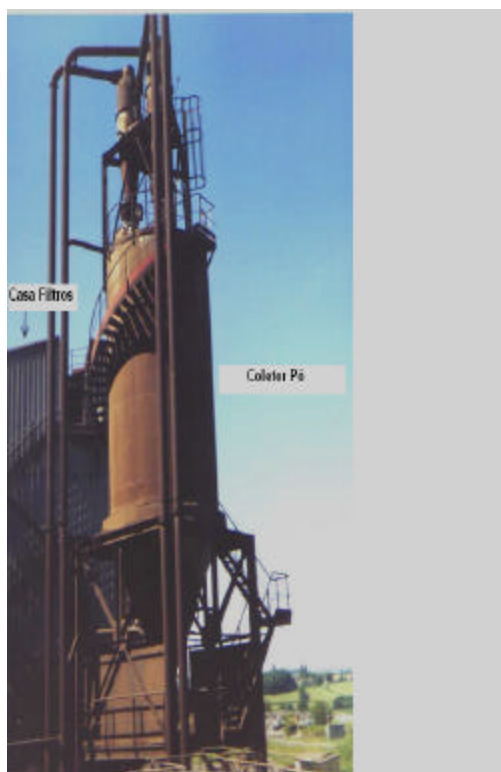
O sistema de despoeiramento é do tipo combinado, através da interligação do sistema primário com o secundário. Os dutos do quarto furo são revestidos internamente com material refratário e construídos com aço do tipo CORTEN, que não requer pintura para proteção externa. Os ventiladores estão montados no lado sujo, pressurizando o filtro. A capacidade do filtro é de



300.000 m<sup>3</sup>/h, área filtrante de 15.000 m<sup>2</sup>, material das mangas é fibra de vidro, diâmetro é de 300 mm e a limpeza das mangas é com ar reverso. O consumo de mangas anual é de aproximadamente 50 unidades. A quantidade gerada de pó no sistema é de 12 kg/tonelada de aço bruto produzido. O padrão de emissão para material particulado é de 10 mg/Nm<sup>3</sup> e de 1mg/m<sup>3</sup> para a qualidade do ar externo.

Foi informado que ocorreu uma explosão no trecho do duto seco, devido ao acúmulo de monóxido de carbono.

O ângulo da tremonha, parte inferior da casa de filtros que recolhe o pó sedimentado, foi alterado, pois estava havendo deposição de pós nas paredes. O ângulo adotado para evitar o depósito de pó foi 60°. O silo de recolhimento de pó é cilíndrico, com sistema de transporte do pó pneumático, conforme Figura 9, a qual mostra o silo coletor de pó, com zona de descarga aberta, possibilitando a saída de pó para o ambiente externo.



*Figura 9 - Silo para recolher o pó, com vista da casa de filtros.*

#### 2.1.4 Empresa Siderúrgica Francesa 2

Visita realizada em 26 de junho de 1990, na empresa francesa que produz aços tipo baixo carbono, com produção anual de 400.000 toneladas e possui um FEA de 80 toneladas.

O sistema de despoejamento é do tipo “Dog House”, que consiste no enclausuramento do forno elétrico. Para melhorar a eficiência de exaustão, estavam implantando uma coifa no lanternim do prédio, sobre o FEA.

Os dutos refrigerados, junto a curva móvel, têm seção retangular. Na parte interna, os gases entram em contato com a chapa, e a água que resfria os gases, flui através de uma meia seção tubular, soldada à chapa interna. Os gases, após a curva móvel, são conduzidos para um pré-separador, de seção redonda, onde é feita a limpeza diária para retirada do pó grosseiro, utilizando para isso, um veículo do tipo “Bob Cat”. Na câmara, é injetado ar exterior por um ventilador de baixa pressão e vazão aproximada a 20% do total, para garantir a combustão completa do monóxido de carbono.

Após o pré-separador, os gases do quarto furo são resfriados no trocador de calor com ar forçado, conforme apresentado na Figura 10. O diâmetro dos tubos do trocador é 150 mm, e este tem um único passe.

Os gases captados no “Dog House” e os do quarto furo são misturados após o trocador de calor e admitidos na sucção dos dois ventiladores. A temperatura média obtida após o duto refrigerado é de 500°C.

O filtro possui mangas de fibra de vidro, diâmetro 300 mm. O sistema de limpeza das mangas é com ar reverso. No interior do filtro, são boas as condições de acesso e circulação, bem

como a visualização das condições das mangas, mesmo com o filtro em operação, conforme pode-se observar na Figura 11. Os dampers da casa de filtros são do tipo borboleta.

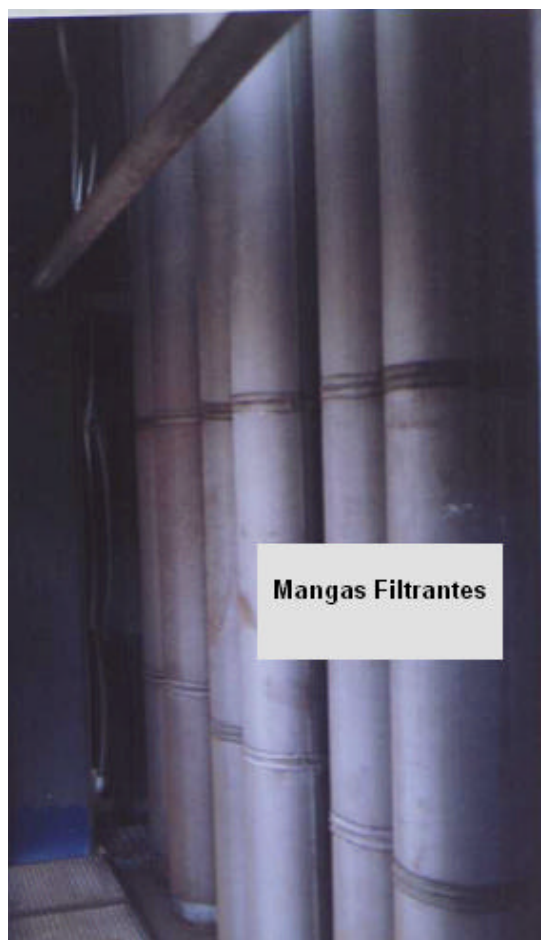
O pó é transportado por um sistema pneumático para o silo. No carregamento do caminhão, ocorre uma grande dispersão de pó para o ambiente externo.

A manutenção preventiva nos ventiladores é realizada todo o semestre, e no trocador de calor é semanal.

A empresa desativou o antigo sistema de despoeiramento que possuía filtro negativo, tipo jato pulsante, pois frequentemente ocorriam perfurações nas mangas.



*Figura 10 - Trocador de calor com ar forçado por ventiladores para resfriar os gases primários.*



*Figura 11 – Interior da casa de filtros.*

### 2.1.5 Empresa fornecedora Francesa 3

A visita foi realizada em 27 de junho de 1990 à empresa fornecedora de equipamentos, com reconhecido domínio tecnológico em ventilação. O objetivo da visita foi conhecer as alternativas tecnológicas para o sistema de filtragem, uma vez que essa empresa projeta e fabrica equipamentos. Durante a visita, foram apresentados os laboratórios de pesquisa com os desenvolvimentos em andamento e os resultados consolidados, obtidos após estudos experimentais.

### 2.1.6 Empresa Siderúrgica Alemã 1

A visita foi realizada em 28 de junho de 1990, em empresa siderúrgica, que possui excelentes desempenhos de produção e de gestão ambiental, considerada uma das mais produtivas aciarias do mundo. Produz aço para a indústria de construção, possui 1.180 empregados, que produzem 890.000 t/ano. A Aciaria possui dois FEA com capacidade de 70 toneladas cada.

O despoeiramento é realizado pelo quarto furo (emissões primária) e coifa (emissões secundárias). No forno-panela utilizou o sistema “side-draft” ou coifa lateral de abóbada. A capacidade do sistema é de 1.300.000 Nm<sup>3</sup>/h.

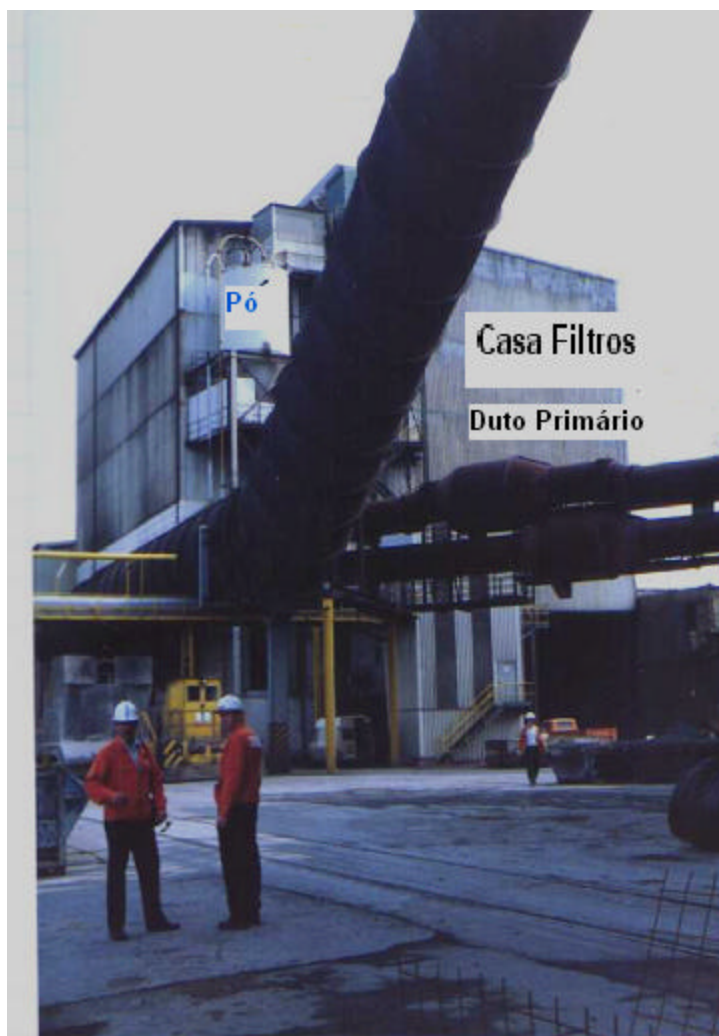
Os gases do quarto furo passam por um pré-aquecedor de sucata. A temperatura atingida na sucata é de 40 a 450°C, e o tempo médio de permanência nessa temperatura é de 50 minutos. Quando não está utilizando o pré-aquecedor de sucata, os gases são conduzidos para um duto com sprays de água para resfriar os mesmos. A temperatura do gás é rebaixada de 1.300 °C para 230°C. A máxima vazão de água dos sprays é de 20 m<sup>3</sup>/h e o maior tamanho de partícula admissível é de 160 micra.

Utilizam um condicionador para eliminar os odores da emissão, flui melhor com o pó e reter substâncias do óleo. O condicionador fica adicionando continuamente silicato de cálcio no gás quente.

No final do duto primário (quarto furo), existe um ciclone, conforme mostrado na Figura 12, que separa partículas incandescentes ou fagulhas que, se estivessem presentes, causariam a queima de mangas.

A carga de material particulado do gás, ao entrar no filtro, é de 1 a 2 g/m<sup>3</sup>. A concentração de material particulado dos gases, após a casa de mangas ou filtro, oscila em torno de 4 mg/m<sup>3</sup>. A área total de filtragem é de 28.800 m<sup>2</sup>. O sistema de limpeza das mangas é com ar reverso.

O pó coletado é pelletizado, armazenado e transportado por via fluvial para uma empresa que recupera o zinco. O pó coletado possui a seguinte composição: óxidos de zinco (30%), de ferro (27%), de manganês (6,6%), de cálcio (5%), de chumbo (4%), de magnésio ( 2,6%), água (10%) e outros (14,8%).



*Figura 12 - Casa de filtros, dutos das emissões primárias e secundárias.*

### 2.1.7 Empresa Siderúrgica Japonesa 1

A visita foi realizada em 2 de julho de 1990, a uma das usinas siderúrgicas de um grande grupo siderúrgico japonês. A empresa produz aço carbono SAE 1010 a 1045, iniciou as operações da Aciaria em outubro de 1971, e do Laminador, em outubro de 1972. A capacidade de produção é de 480.000 t/ano de aço. Possui um FEA com capacidade para 70 t/corrida, 3 lanças de oxigênio e uma de carbono, pré-aquecedor de sucata, que processa 50% da sucata consumida. Apresentam um consumo de oxigênio médio de 35 m<sup>3</sup>/t de aço, com vazões de oxigênio de 50 m<sup>3</sup>/min durante a fusão e 70 m<sup>3</sup>/h durante o refino.

A tecnologia do despoeiramento foi desenvolvida pela própria empresa, baseada nas experiências anteriores das outras usinas do grupo. O despoeiramento possui sistemas de filtragem independente, isto é, um sistema atende as emissões primárias do quarto furo, e o outro, as emissões secundárias da coifa. As vantagens apontadas para manter separados os sistemas é que a operação, com pressões diferentes nos ventiladores, proporciona menor consumo de energia elétrica, além de obter maior modulação das vazões nas diferentes fases de operação do FEA (fusão, refino, carregamento e vazamento).

Difere das demais instalações visitadas o fechamento do gap (folga para entrada de ar externo) do duto móvel, após a tomada do quarto furo, pois o mesmo é reduzido, admitindo uma quantidade mínima de ar de diluição para as reações de oxidação do monóxido de carbono. As demais aberturas do FEA, portas de escória e adição de carbono e oxigênio e gap da abóbada, também possuem um elevado nível de fechamento.

O sistema primário tem duas câmaras de combustão em série, conforme mostrado na Figura 13, com capacidade de exaustão de 132.000 Nm<sup>3</sup>/h, ventiladores de 1.150 kW, 1.150 mmCA, filtro com uma área de 5.920 m<sup>2</sup> e velocidade de filtragem 0,64 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> de manga.

Utilizam 1.200 m<sup>3</sup>/h de água de contato indireto para resfriar os equipamentos do sistema primário de exaustão.

O sistema de tratamento das emissões primárias mantém o filtro operando sob pressão negativa, com forma construtiva cilíndrica. A opção de colocar o ventilador no lado limpo objetivou proteger o mesmo dos depósitos de materiais particulados, proveniente das emissões primárias. O trecho de dutos do sistema primário possui 375 metros, sendo 140 metros refrigerados, que implicam em uma elevada perda de carga total (1.150 mmCA).

Os gases captados no lanternim do prédio (emissões secundárias), são conduzidos ao respectivo filtro, que opera com pressão positiva, com o ventilador no lado sujo. Essa opção se deve ao fato de que as emissões secundárias da coifa possuem uma menor concentração de material particulado e temperatura. A capacidade de exaustão do sistema secundário é de 406.000 m<sup>3</sup>/h, possui ventiladores de 700 kW e pressão estática de 400 mmCA. A área de filtração do filtro secundário é de 7.347 m<sup>2</sup>. A velocidade de filtração do sistema secundário é de 1,1 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> de manga. A limpeza das mangas do filtro é do tipo ar reverso, com ventilador de ar reverso com vazão de 12.000 Nm<sup>3</sup>/h, potência de 75 kW e pressão estática de 470 mmCA.

A área total de filtração dos dois sistemas é de 13.267 m<sup>2</sup>, capacidade de vazão total 538.000 Nm<sup>3</sup>/h. A vazão do sistema secundário é aproximadamente três vezes maior que a do sistema primário. A velocidade de filtração do secundário é maior, pois os gases estão mais limpos, permitindo maiores vazões em áreas de mangas equivalentes.





*Figura 13 - Câmaras de combustão recebendo os gases primários.*

#### 2.1.8 Empresa Siderúrgica Japonesa 2

Visita realizada em 4 de julho de 1990, na segunda usina siderúrgica do mesmo grupo japonês citado no item anterior. A empresa produz aço carbono (SAE 1010 a 1045), iniciou as operações da usina em dezembro de 1973. A capacidade de produção é de 480.000 t/ano de aço. Possui um FEA com capacidade para 80 t/corrida, pré-aquecedor de sucata, que processa 100% da sucata consumida. Apresentam um consumo de oxigênio médio de 40 m<sup>3</sup>/t de aço, com vazão de oxigênio de 42 m<sup>3</sup>/min durante a fusão e o refino.

A instalação de despoeiramento desta empresa é similar a descrita no item anterior. Difere na quantidade de câmaras de combustão, pois possui 4 câmaras em série, em vez de duas. Também difere na condução dos gases após o processo de filtragem, uma vez que os gases do sistema primário, após a filtragem, são interligados por um duto ao sistema secundário, sofrendo assim nova operação de filtragem, conforme mostrado na Figura 15.

Em função da proximidade de comunidades vizinhas, possuem um analisador de velocidade e direção dos ventos para informar a programação do processo de pré-aquecimento da sucata, e assim reduzir as reclamações.

Utilizaram durante 10 anos o processo de resfriamento de gases do quarto furo com sprays de água, porém, desativaram-no devido a difícil operação, ocasionada pelas contínuas obstruções, dos bicos aspersores por partículas.

Os ventiladores do filtro do sistema primário possuem variador de frequência e controlador de vibração.

O sistema primário tem uma capacidade de exaustão de 93.500 Nm<sup>3</sup>/h, ventiladores de 720 kW, 950 mmCA, filtro com uma área de 8.452 m<sup>2</sup> e velocidade de filtragem 0,34m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> de manga.

Utilizam 1.200 m<sup>3</sup>/h de água de contato indireto para resfriar os equipamentos do sistema primário de exaustão.

O sistema de tratamento das emissões primárias tem o filtro operando sob pressão negativa, com forma construtiva cilíndrica, conforme demonstra a Figura 14. O trecho de dutos do sistema primário é de 480 metros, sendo 79 metros refrigerados, semelhante à instalação anterior, ocasionando uma elevada perda de carga total (1.150 mmCA).

Os gases captados no lanternim do prédio (emissões secundárias) são conduzidos ao respectivo filtro, que opera com pressão positiva, com o ventilador no lado sujo. Essa opção se deveu ao fato de que as emissões secundárias da coifa possuem uma menor concentração de material particulado e temperatura. A capacidade de exaustão do sistema secundário é de 456.000 m<sup>3</sup>/h, ventiladores de 900 kW e pressão estática de 400 mmCA. A área de filtragem do filtro secundário é de 7.800 m<sup>2</sup>. A limpeza das mangas do filtro é do tipo ar reverso, com ventilador de ar reverso com vazão de 9.700 Nm<sup>3</sup>/h, potência 45 kW, e pressão estática de 470 mmCA. A

velocidade de filtragem do sistema secundário é de  $1,15 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$  de manga. A área total de filtragem dos dois sistemas é de  $16.252 \text{ m}^2$ , capacidade de vazão total  $549.500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . A vazão do sistema secundário é aproximadamente cinco vezes maior que a do sistema primário. A velocidade de filtragem do secundário é maior, pois os gases estão mais limpos, permitindo maiores vazões em áreas de mangas equivalentes.

A área próxima aos filtros apresentava uma elevada concentração de pó acumulado junto ao piso.



*Figura 14 - Filtro com pressão positiva para os sistemas primário e secundário.*



*Figura 15 - Filtros cilíndricos para as emissões primárias do quarto-furo.*

### 2.1.9 Empresa Siderúrgica Japonesa 3

Visita realizada em 5 de julho de 1990, em uma usina siderúrgica que produz aço inoxidável, de outro grande grupo japonês. A empresa iniciou as operações da usina em 1960. A capacidade de produção é de 360.000 t/ano de aço. Possui dois FEA's com capacidades de 60 e 40 toneladas/corrida, no refino utiliza o sistema VIM (*Vacuum Induction Melting*) e CTC (*Control of Composition & Temperature*).

O sistema de despoeiramento foi instalado há 20 anos. Empregam pré-aquecedores de sucata, utilizando os gases quentes do sistema primário.

A captação junto ao FEA é realizada pelo tradicional quarto furo e por coifas, tipo *side draft*, localizadas junto à bica de vazamento, que captam as emissões geradas durante o vazamento, semelhante a coifa de lanternim, porém muito próxima da fonte de geração.

A capacidade do sistema primário é de 216.000 Nm<sup>3</sup>/h. O calor dos gases é removido através de trocadores de calor cilíndricos, verticais, diâmetro aproximado de 3 metros, com dupla chapa refrigerada à água, conforme mostrado na Figura 16.

O ventilador está localizado antes do filtro, no lado sujo, com rotor revestido de cerâmica e carcaça de aço convencional, operando há quatro anos sem a necessidade de trocar o rotor. A limpeza do filtro é com ar reverso. Decidiram utilizar filtro positivo por considerar sua simples manutenção. Em contrapartida, realizaram uma criteriosa especificação e elevado investimento no ventilador, para garantir a operação do mesmo no lado sujo. O material adotado para as mangas foi o polyester, instalado há 2,5 anos.

O pó coletado é encaminhado para pelletizadores. A área apresentava uma elevada concentração de pó acumulado junto ao piso.



*Figura 16 - Casa de filtros e câmara de resfriamento das emissões primárias*

#### 2.1.10 Empresa Siderúrgica Japonesa 4

Visita realizada em 5 de julho de 1990, em uma usina siderúrgica que produz aço carbono convencional (70%) e aço especial (30%), pertencente ao mesmo grupo japonês do item anterior. Possui dois FEA's com capacidades de 50 e 100 toneladas/corrida, além de um forno-panela. A duração da corrida (tap-to-tap) para os aços especiais é de 120 minutos e para os aços convencionais é de 90 minutos. Utilizam injeção de oxigênio na vazão nominal de 4.500 Nm<sup>3</sup>/h e pré-aquecedores de sucata.

A captação dos FEA's é realizada pelo quarto furo. O comprimento dos dutos refrigerados é de 40 metros. A limpeza nos dutos é semestral. Em 20 anos, trocaram duas vezes os dutos refrigerados. Empregam uma câmara de combustão, onde os gases estão, em média, a 700°C. A limpeza da câmara de combustão é semanal.

O filtro opera com pressão positiva. A temperatura máxima admissível nas mangas é de 250°C. O material das mangas é de fibra-de-vidro e a velocidade de filtração nas mesmas é de 0,74 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> de manga. A limpeza do filtro é com ar reverso. Anualmente realizam a manutenção das mangas, normalmente danificadas por fagulhas, identificadas pelas perfurações na superfície. O ventilador tem capacidade de 94.000 Nm<sup>3</sup>/h e possui rotação fixa. O material do rotor é de alto teor de manganês e substituído a cada dois anos. O pó coletado é encaminhado para pelletizadores.

Durante a visita, foram avaliadas as alternativas de filtração para novos projetos. A principal consideração foi o comparativo entre a proposta de sistemas independentes para o FEA e coifa, e outra, com sistema combinado. Segundo a empresa japonesa, a principal vantagem do sistema independente é o menor consumo de energia elétrica. Foi citado um exemplo de uma instalação que consumiria 1.800 HP em um sistema independente e, caso adotasse o sistema

combinado, consumiria 2.600 HP. O sistema independente apresenta a desvantagem de requerer maior investimento inicial, ficando atenuado se a empresa possuir sistema de tratamento para as emissões primárias. Também foram avaliadas as alternativas do sistema de filtragem, positivo versus negativo. Pela avaliação da empresa japonesa, o filtro positivo tem a vantagem de operar com menores custos de instalação. O filtro negativo tem as vantagens de utilizar menores potências nos ventiladores e possuir menores custos de manutenção.

#### 2.1.11 Empresa Fornecedora dos Estados Unidos 1

Visita realizada em 9 de julho de 1990, em empresa fornecedora de sistemas de ventilação industrial, que apresentou proposta de fornecimento para o sistema de despoeiramento.

A empresa fabrica equipamentos anti-poluição, tais como precipitadores eletrostáticos, sistemas úmidos de tratamento, filtros secos e incineradores. Foram discutidas algumas questões tecnológicas de filtragem com os profissionais especialistas. Comentado que a manga de fibra-de-vidro apresenta bom desempenho também em sistemas tipo jato pulsante, além de apresentar um melhor processo de fixação e remoção de partículas se comparado com as mangas de polyester. Após várias pesquisas, concluíram que na limpeza com ar reverso, o dispositivo para tensionamento das mangas tipo contra-peso, apresentou melhor eficiência e durabilidade se comparado com os sistemas que utilizam molas.

#### 2.1.12 Empresa Siderúrgica Chilena 1

Visita realizada nos dias 13 e 14 de abril de 1999. Possui um Forno Elétrico a Arco (FEA) com capacidade de 60 toneladas. O sistema de despoeiramento é do tipo *Dog House*, onde o FEA

fica enclausurado para captar as emissões primárias fugitivas, que saem do duto do quarto furo. A capacidade do sistema de despoeiramento é de 800.000 m<sup>3</sup>/h. Possui dois ventiladores principais com capacidade de 1.333 HP, filtro tipo jato pulsante, conforme mostra Figura 17, sob pressão negativa, com 20 compartimentos de 450 m<sup>2</sup> de mangas cada e peso de 150 toneladas. A taxa de filtragem é de 1,48 m/min/m<sup>2</sup> de mangas. O sistema de água para resfriar os dutos opera com vazões de 900 a 1.000 m<sup>3</sup>/h. O comprimento de dutos refrigerados é de 36 metros, correspondente a um peso total de dutos de 98 toneladas. A vazão média durante a operação de fusão é de 600.000 m<sup>3</sup>/h. Destes, 450.000 m<sup>3</sup>/h são provenientes do *Dog House* e aproximadamente 100.000 m<sup>3</sup>/h do quarto furo. Durante os carregamentos, a vazão é de 800.000 m<sup>3</sup>/h. O volume da coifa, sobre o *Dog House* é de 3.000 m<sup>3</sup>, ocupando uma área de 400m<sup>2</sup>.



*Figura 17 - Casa de filtros e sistema de pelletização de pó.*



## 2.2 MODELAMENTO HIDRÁULICO

O modelamento hidráulico é uma importante ferramenta na definição do projeto, pois permite determinar a capacidade de exaustão requerida no sistema de captação da coifa (secundário), para obter a captura efetiva das emissões geradas durante o carregamento do FEA. Também possibilita estabelecer o desenho ideal da coifa e a correta dimensão dos ventiladores, fundamentais na formação dos custos operacionais do sistema.

Neste projeto, foram desenvolvidos três modelos hidráulicos, onde o prédio, as pontes rolantes e os fornos foram executados em uma escala menor, em acrílico. A empresa canadense Hatch Associates LTD. foi contratada para realizar o modelamento hidráulico da coifa do sistema de despoeiramento da Gerdau Riograndense.

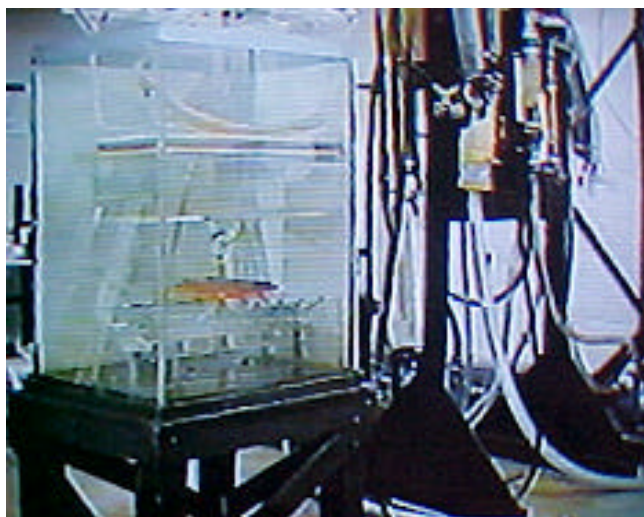
O primeiro passo para desenvolver o modelamento foi a gravação com câmaras de vídeo do perfil da pluma e a abertura da abóbada do FEA. As imagens nortearam a calibração do modelamento, além de identificarem as velocidades e tempos de ascensão. As eficiências de captação foram avaliadas para cada perfil de coifa, nos vários níveis de vazão de exaustão.

Posteriormente, foram encaminhadas à empresa contratada as informações sobre a configuração geométrica das instalações da Aciaria, tais como prédio, pontes rolantes, fornos, plataformas etc. De posse desses dados, a Hatch fabricou em seus laboratórios o modelo da Aciaria em acrílico. A empresa Hatch utilizou os seguintes equipamentos para a circulação e controle do fluxo dos fluídos empregados no modelamento:

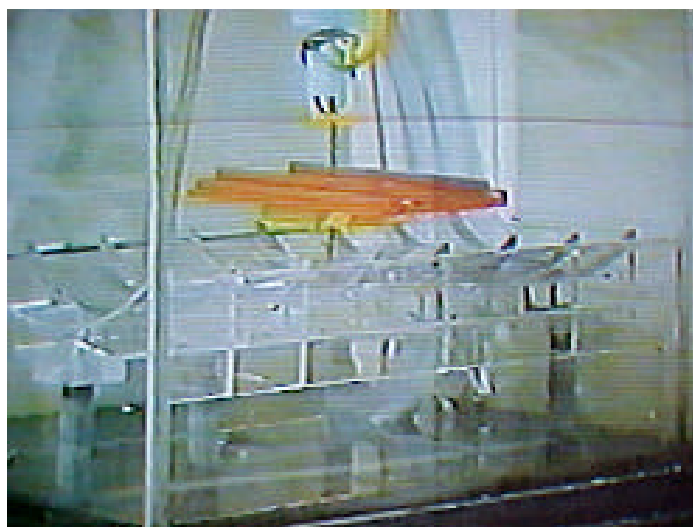
- a) medidor de vazão de 0,65 a 6,50 m<sup>3</sup>/h (650 a 6.500 l/h);
- b) medidor de vazão de 0,16 a 1,60 m<sup>3</sup>/h (160 a 1.600 l/h);
- c) medidor de vazão de 0,00010 a 0,00125 m<sup>3</sup>/h (0,10 a 1,25 l/h);
- d) hidrômetro para medir soluções alcalinas com densidade de 1,0 a 2,0.

O processo de modelagem hidráulica seguiu as recomendações das referências Testa (1986), Bender (1979) e Hemeon (1963).

A Figura 18 mostra o modelo desenvolvido no Laboratório da Hatch, com o protótipo em acrílico do prédio da Aciaria. Os principais acessórios da instalação foram: bombas de recirculação, mangueiras e medidores de vazão.



*Figura 18 - Vista do modelo hidráulico da Aciaria da Gerdau Riograndense, em acrílico, no Laboratório da Hatch Associates - Canadá.*



*Figura 19 - Detalhe do modelo em acrílico, mostrando a posição invertida do prédio da Aciaria, para simular com fluídos líquidos, o comportamento dos gases do EAF.*

Na Figura 19, pode-se observar o detalhe da configuração invertida do prédio da Aciaria, devido ao comportamento dos fluídos líquidos ocorrerem no sentido oposto ao dos gases. A simulação do comportamento dos gases, foi replicado com o fluxo de líquidos com diferentes cores e densidades, simulando as diferentes correntes de temperaturas dos gases.

Os modelos podem reproduzir os processos de forma muito satisfatória, permitindo avaliar a eficiência de captura na coifa com muita acuracidade. O método é baseado em medir o total de luz transmitida através da amostra do total de poluente capturado durante o processo, conforme a equação:  $\eta = P1 / P$  , onde:

$\eta$ : eficiência

P1: taxa do poluente capturado

P: taxa total de poluente emitido pela fonte

A água concentrada com sal proporciona as forças de orientação para o modelo invertido, correspondendo à pluma com gases quentes nos testes de laboratório.

Este procedimento é melhor entendido através de um exemplo. No modelo, durante 5 minutos, serão capturados pelas tomadas da coifa 15 litros ( $0,015 \text{ m}^3$ ) de água. Considera-se com uma eficiência de 100% de captura, quando ocorre a recuperação da totalidade do sal concentrado no volume de  $0,015 \text{ m}^3$  de água. Terá 50% de eficiência, se recuperar a metade do sal concentrado injetado na mistura. Conseqüentemente, outras concentrações podem ser obtidas através da injeção de quantidades conhecidas de sais no volume de água. A partir dessas informações, pode-se elaborar curvas de calibração para o medidor de luminosidade, consolidando assim, as relações entre a concentração existente na amostra de  $0,015 \text{ m}^3$  de água e a luminosidade medida.

A semelhança dinâmica entre o modelo e a escala real, no caso o prédio da Aciaria, depende da acuracidade e da quantidade dos dados obtidos. A semelhança dinâmica existe quando o modelo e a escala real tem a mesma taxa de escala para o comprimento, tempo e força. Escalas dos parâmetros de comprimento entre o modelo e escala real são diretas. Entretanto, para obter a mesma escala de tempo e força é necessário adotar algumas considerações de mecânica dos fluidos.

Para conseguir as mesmas taxas de escala de tempo e força entre o modelo e a escala real, os parâmetros dimensionais associados com a vazão do fluido são identificados e mantidos constantes entre o modelo e a escala real.

Para identificar os parâmetros dimensionais associados com a pluma durante o carregamento, as equações básicas de conservação de massa e momento são adimensionais ao longo das condições de contorno. Assumindo escoamento incompressível, com viscosidade constante, são identificados, a seguir, os dois grupos dimensionais:

$$\text{Número de Reynolds:} \quad Re = \frac{\rho U L}{\mu} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{Número de Archimedes:} \quad Ar = \frac{g(\rho_o - \rho)L}{\rho U^2} \quad (\text{Equação 2})$$

onde:  $\rho$  é a densidade do fluido local,

$\rho_o$  é a densidade do fluido do ambiente,

$U$  é a velocidade,

$L$  é o comprimento,

$\mu$  é a viscosidade do fluido

$g$  é a aceleração da gravidade.

O número de Reynolds “Re” descreve a taxa da inércia para forças de viscosidade e um “Re” crítico estabelece a diferença entre os regimes turbulento e laminar. O número de Archimedes “Ar” descreve as taxas das forças ascensionais para as forças de inércia, sendo o mais importante parâmetro dimensional para caracterizar a pluma.

Enquanto as análises dimensionais fornecem dados sobre o problema do escoamento dos fluidos, também demonstram a dificuldade de obter a exata semelhança dinâmica entre o modelo e escala real, isto é “U” no número de “Re” e “U<sup>2</sup>” no número de “Ar”. Entretanto, para fluxos turbulentos, onde os efeitos das seções de contorno são desprezíveis, os efeitos da viscosidade do fluido podem ser considerados também desprezíveis. Para os fluxos de velocidades e geometria do prédio da Aciaria, a vazão será turbulenta e a seção de contorno será desprezível. Conseqüentemente, é possível aliviar a condição da constante “Re” entre o modelo e a escala real com desprezíveis efeitos sobre os resultados.

Desse modo, ao determinar o adequado modelo de escala, o número de “Ar” é mantido constante entre o modelo e a escala real. Isso irá assegurar que o balanço de forças no modelo é o mesmo daquele da Aciaria. A escala de comprimento é escolhida para garantir um fluxo turbulento no modelo e para manter o tamanho do modelo em proporções práticas. A escala de tempo é escolhida para proporcionar uma visualização comparativa entre o modelo e a escala real. Para atender esses critérios, foi escolhida a água como meio para teste, e uma solução salina foi empregada para simular o efeito da pluma, com o modelo invertido.

A Tabela 8 apresenta um sumário das escalas do modelo. O subscrito “f” refere-se a escala real e o subscrito “m” refere-se ao modelo.

Tabela 8 - Sumário das escalas utilizadas no modelamento hidráulico.

| Parâmetro  | Escalas               |
|--|-----------------------|
| Comprimento, $L_s = L_f/L_m$                       | 64                    |
| Área, $A_s = L_s^2$                                | 4.096                 |
| Volume, $V_s = L_s^3$                              | 262                   |
| Tempo, $t_s = t_f/t_m$                             | 1                     |
| Velocidade, $U_s = L_s/t_s$                        | 64                    |
| Taxa de Vazão, $Q_s = V_s L_s^2$                   | 262                   |
| Densidade, $\rho_s = \rho_{ar}/\rho_{\text{água}}$ | $3,11 \times 10^{-4}$ |
| Momento, $M_s = \rho_s Q_s U_s$                    | 20                    |
| Fluxo Ascensional, $F_s = L_s^4/t_s^3$             | $16,7 \times 10^6$    |

Foi selecionada a escala de 1:64 para a montagem do tanque hidráulico na dimensão do comprimento e, conseqüentemente, os demais parâmetros considerados na Tabela 8.

A escala do fluxo ascensional “Fs” (também definido como Ff/Fm) é empregada para determinar a taxa de vazão da pluma durante o carregamento. O fluxo ascensional está relacionado com o fluxo de calor da pluma durante o carregamento, e para as plumas geradas

durante o carregamento em aciarias é definido como:

$$F_p = \frac{gq''}{rC_p T_o} \quad (\text{Equação 3})$$

onde:  $C_p$  é o calor específico

$T_o$  é a temperatura ambiente.

O calor específico “ $q''$ ” é definido como:

$$q'' = Q_b rC_p (T - T_o) \quad (\text{Equação 4})$$

onde:  $Q_b$  é a taxa de vazão da pluma durante o carregamento

T é a temperatura do fluido local.

Para um gás ideal, semelhante ao ar, o fluxo ascensional é independente da altura acima da fonte de calor. Conseqüentemente, o fluxo ascensional é um parâmetro útil para caracterizar a pluma do carregamento de FEAs.

Foram desenvolvidos três modelos hidráulicos em acrílico para consolidar a forma recomendada para o projeto.

O primeiro estudo de modelamento, desenvolvido pela Hatch Associates LTD., considerou alternativas que demandariam pequenas alterações no perfil do telhado existente. Inicialmente foram consideradas duas opções de arranjo de coifa, que estão ilustrados na Figura 20.

- a) Opção 1 - coifa definida pelo fechamento interno do telhado existente. É uma opção mais econômica e aproveita a estrutura existente do prédio. A capacidade volumétrica desta opção é de  $953 \text{ m}^3$ .
- b) Opção 2 - coifa caracterizada pelo fechamento da parte externa do prédio existente. É a opção menos econômica, se comparada com a opção 1, apresenta maior capacidade de armazenamento (12% maior), com capacidade volumétrica de  $1.073 \text{ m}^3$ .

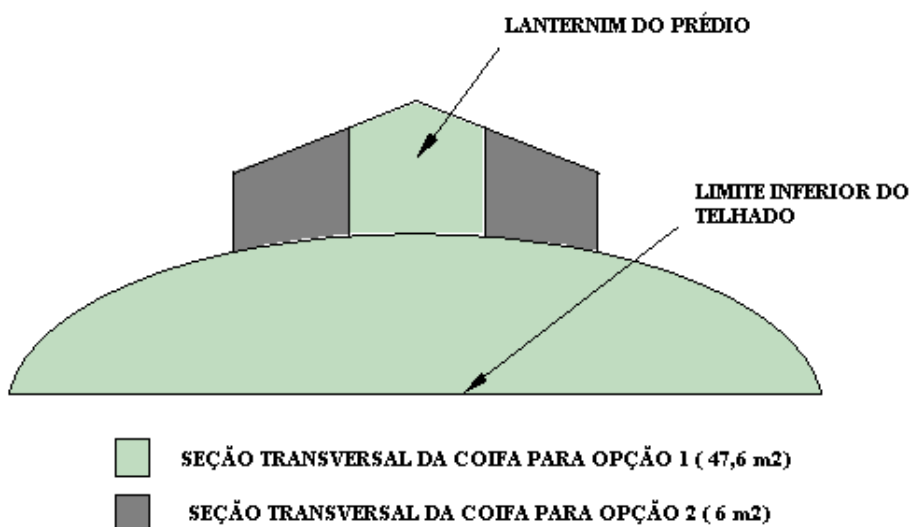


Figura 20 - Seção transversal da coifa, apresentando as opções 1 e 2.

Ambas as opções de coifas consideram o aproveitamento da largura existente do prédio (16,25 m). No comprimento, foram adotados 4 vãos de pilares do prédio (19,6 metros).

Os resultados apontaram uma pequena diferença de eficiência a favor da opção 2, com maior área ( $47,6 \text{ m}^2 + 6 \text{ m}^2$ ) e uma vazão inicial de  $310.000 \text{ m}^3/\text{h}$ , para a fase do carregamento.

As imagens da fita de vídeo, gravadas com as operações de carregamentos múltiplos, possibilitaram que as técnicas de estabelecimento das escalas fossem empregadas para identificar as vazões dos gases durante a abertura da abóbada do forno e o carregamento com sucata. Os perfis de vazão da pluma gerada em duas operações de carregamento de sucata estão apresentadas na Figura 21.

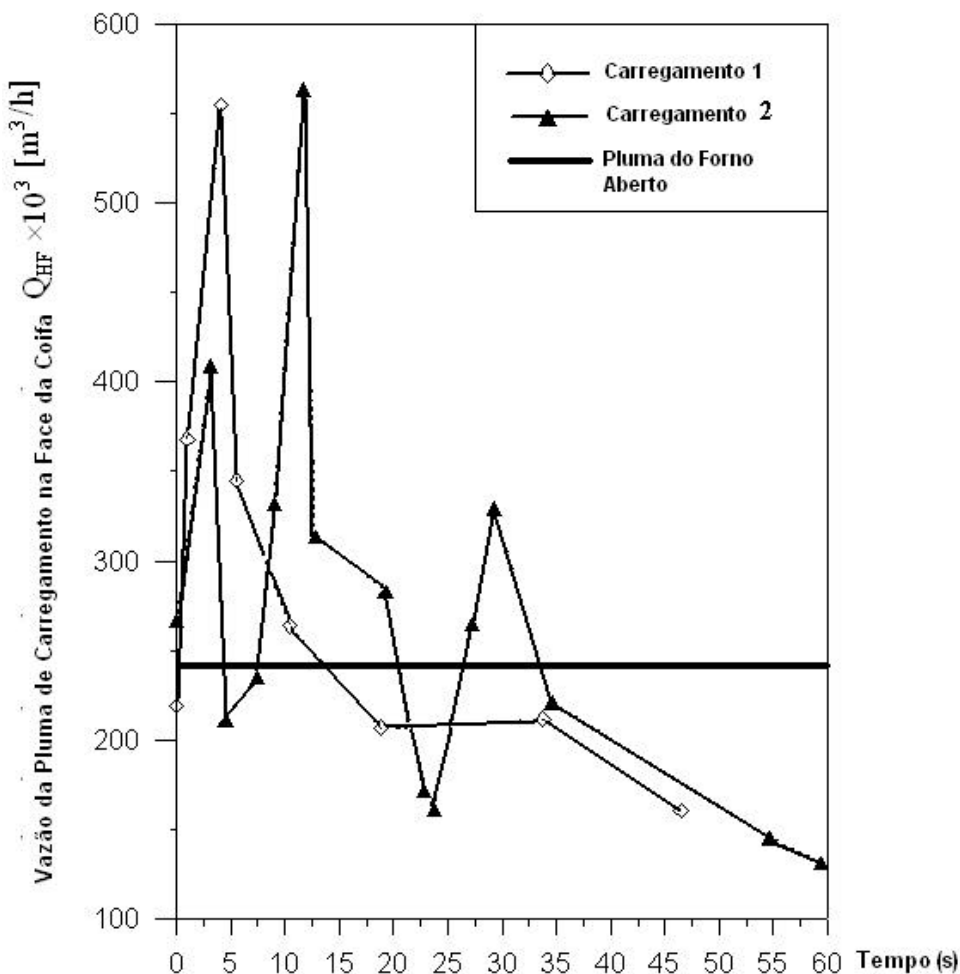


Figura 21 - Perfil de vazão da pluma de carregamento para duas operações de carregamento.



As vazões foram avaliadas ao nível da face da coifa, junto aos tirantes da estrutura do prédio. A vazão média da pluma “Qof” durante a abertura da abóbada foi 243.000 m<sup>3</sup>/h. O ponto inicial para o cálculo da vazão da pluma de carregamento parte da operação de carregamento da sucata no FEA (tempo=0 s).

Baseado nas avaliações gravadas no vídeo durante os levantamentos de campo, foi estabelecido o perfil de um carregamento típico, demonstrado na Figura 22. O perfil típico de carregamento é utilizado para determinar as vazões da pluma de carregamento do modelo. Se a vazão de exaustão da coifa é igual a vazão da pluma durante a abertura da abóbada do forno, então as quantidades de fumos que deverão ser armazenados na coifa é a área da curva da pluma de carregamento acima da linha do forno aberto.

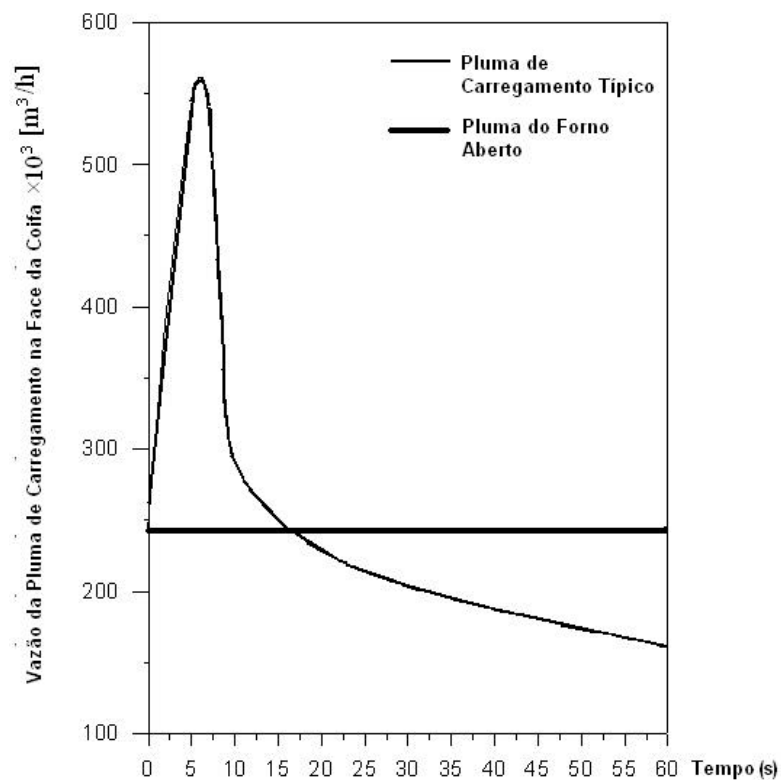


Figura 22 - Perfil de vazão típica da pluma de carregamento, utilizado como base para o desenvolvimento do modelo da pluma de carregamento.

Baseado nas considerações citadas anteriormente, o menor volume requerido para a coifa é de  $576 \text{ m}^3$ , necessário para armazenar os fumos ocasionados pela pluma de carregamento, como demonstrado na Figura 23. Observar que o termo “pico excedente” adotado na Figura 23 não tem o mesmo significado que “pico”. Nesse caso, o termo “pico excedente” está se referindo ao período de tempo no qual a vazão da pluma de carregamento está excedendo a vazão do forno aberto. A duração do “pico excedente” é consideravelmente maior do que a duração do “pico”.

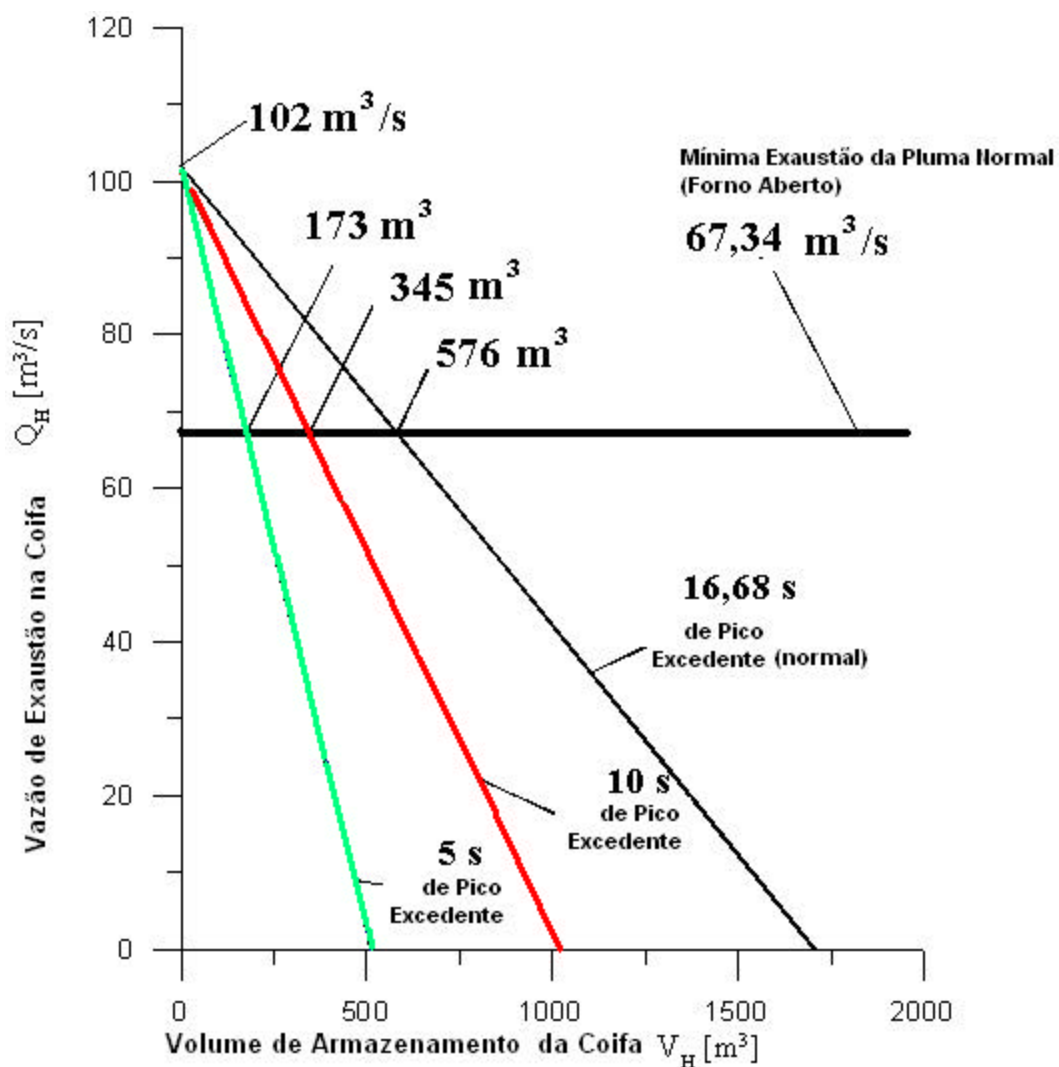


Figura 23 - Volume de armazenamento requerido como função da vazão da exaustão da coifa e do período de emissão da pluma de carregamento.

A Tabela 9 apresenta as densidades específicas dos fluidos adotados para cada etapa de vazão do modelo.

*Tabela 9 - Resumo das vazões empregadas no modelo hidráulico.*

| <b>Vazão</b>  | <b>Densidade específica (g<sub>m</sub>)</b> | <b>Taxa de vazão do fluido (l/h)</b> |
|---|---|--------------------------------------|
| Pluma durante abertura do FEA                           | 1,078                                       | 20,35                                |
| Pluma do carregamento                                   | 1,078                                       | (26 cc/2 s)*                         |
| Vazão da coifa (Q <sub>OF</sub> )                       | 1,0   | 924,6                                |
| Vazão da coifa (1.21×Q <sub>OF</sub> )                  | 1,0   | 1118,8                               |
| Reposição da água de suprimento (Q <sub>OF</sub> )      | 1,0   | 924,6                                |
| Reposição da água de suprimento (1.21×Q <sub>OF</sub> ) | 1,0   | 1118,8                               |

Notas:

\* Introduzido com o uso de seringa

1 l/h = 0,001 m<sup>3</sup>/h

Em 5 de março de 1997, foi realizada uma visita nos Laboratórios da Hatch Associates para acompanhar os testes da modelagem hidráulica. O resultado da visita apontou para a necessidade da realização de um novo modelamento, visto que as performances obtidas nas opções 1 e 2 não foram satisfatórias.

As duas tomadas dos dutos na coifa mostraram que a exaustão dos gases no interior desta não estava uniforme, requerendo, no novo modelo, uma quantidade maior de tomadas. Devido a dimensão da coifa (19,6 metros), foram instalados quatro pontos em vez de dois. No novo modelo, decidiu-se instalar válvulas para obter uma regulação independente por tomada, buscando o equilíbrio de eficiência entre elas.

Foi recomendado o fechamento lateral do prédio, para evitar o ingresso de ar falso e o desvio da pluma no caminho do forno até a coifa. Para o modelamento, adotou-se a premissa de

considerar o fechamento de seis vãos de pilares juntos às aberturas de ventilação, localizadas nas duas paredes laterais do prédio.

Em 18 de setembro de 1997, a Hatch Associates encaminhou o relatório do terceiro modelamento hidráulico com as modificações propostas na reunião do dia 5 de março de 1997.

Para aperfeiçoar o desenho de coifa, foi desenvolvido um terceiro conceito com duas opções de tomadas de sucção.

A Figura 24 apresenta o desenho do terceiro conceito de coifa. O volume da terceira opção foi de  $1.975 \text{ m}^3$ , que corresponde a quase duas vezes o volume das opções 1 e 2, desenvolvidas anteriormente.

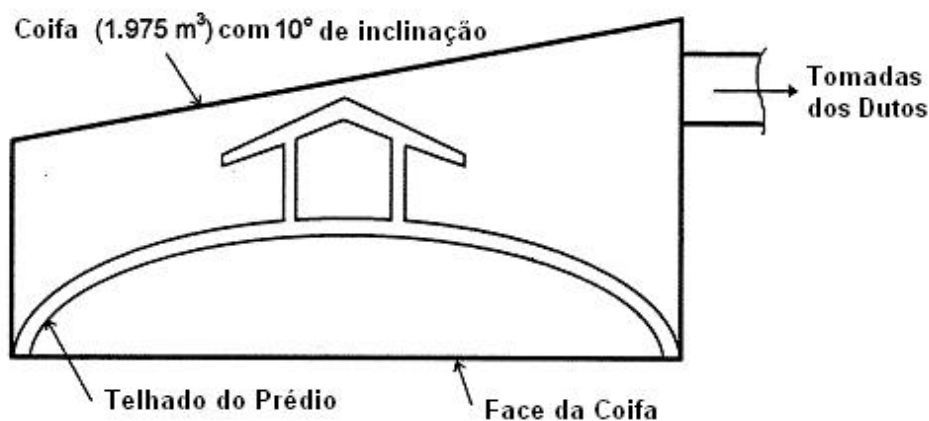


Figura 24 - Seção transversal da coifa na opção

Na opção 3 a face inferior da coifa apresenta comprimento de 19,6 m, o que corresponde a 4 vãos de pilares, largura de 16,25 m e área de  $318,5 \text{ m}^2$ . Essas dimensões foram as mesmas adotadas nas opções 1 e 2.

As duas alternativas de tomadas na coifa na opção 3 foram:

- a) um único ponto de exaustão de um dos lados da coifa;

b) quatro pontos de exaustão, equidistantes, em um dos lados da coifa.

Para drenagem da água da chuva no teto da coifa adotou-se uma inclinação mínima de 10°. Esta inclinação também é necessária para direcionar os fumos para as tomadas de exaustão. A metodologia adotada no modelamento da terceira opção é a mesma das opções anteriores 1 e 2, executando-se apenas algumas alterações no perfil da coifa. Semelhante às opções anteriores, a Tabela 10 apresenta as densidades específicas dos fluidos adotados para cada etapa de vazão do modelo, na opção 3.

*Tabela 10 - Resumo das vazões do modelo*

| <b>Vazão</b>                                       | <b>Gravidade Específica (g<sub>m</sub>)</b> | <b>Taxa de Vazão Fluido (l/h)</b> |
|--|---|-----------------------------------|
| Pluma durante abertura do FEA                      | 1,078                                       | 20,35                             |
| Pluma do Carregamento                              | 1,078                                       | (26 cc/2 s)*                      |
| Vazão da Coifa (Q <sub>OF</sub> )                  | 1,000                                       | 850-1.200                         |
| Reposição da água de suprimento (Q <sub>OF</sub> ) | 1,000                                       | 850-1.200                         |

Notas:

\* Introduzido com o uso de seringa

1 l/h = 0,001 m<sup>3</sup>/h

No modelamento da opção 3, foi adotada uma ponte rolante com capacidade de 40 toneladas em vez da anterior de 30 toneladas. A ponte rolante tem a finalidade de realizar o carregamento da sucata no EAF.

O estudo de modelamento hidráulico, opção 3, demonstrou que não há diferença na eficiência de captura entre as duas alternativas de tomadas de exaustão, para a vazão de 300.000 Nm<sup>3</sup>/h. Entretanto, quando a vazão de exaustão diminui, a opção com quatro tomadas propiciou melhores resultados do que a de um único ponto de tomada de exaustão.

A terceira opção de coifa mostrou melhor eficiência se comparada com as opções 1 e 2.

Diferente dos modelos anteriores, a opção 3 foi capaz de armazenar no interior da coifa as emissões do carregamento e reduzir os efeitos ocasionados pelos ventos laterais ao longo do prédio da Aciaria e dos movimentos da ponte rolante.

Foi recomendado o desenho da coifa baseado no modelamento da opção 3, com quatro tomadas de exaustão. Essa opção apresentou a melhor performance entre as desenvolvidas. Combinado com a vazão de 300.000 m<sup>3</sup>/h, essa opção obteve 100% de captura dos gases do carregamento e o maior efetividade no esvaziamento da coifa, conforme pode ser observado nas Figuras 27 e 28.

O modelamento hidráulico realizado foi gravado em uma fita de vídeo. As Figuras 25 e 26 mostram uma seqüência de fotos geradas a partir das imagens de vídeo, considerando a coifa da opção 1, vista nas direções norte e oeste da Aciaria, com o volume da coifa 953 m<sup>3</sup>, com único ponto de exaustão e vazão de exaustão 222.800 m<sup>3</sup>/h. Nestas condições, foi obtida uma eficiência de 89,7% de captura de material particulado, considerada muito baixa, uma vez que a eficiência esperada é de 100%.

As Figuras 27 e 28, mostram a seqüência de fotos, considerando a opção de coifa 3, com um volume de 1.975 m<sup>3</sup>, com quatro pontos de exaustão na coifa e vazão de exaustão 301.500 m<sup>3</sup>/h. Neste caso, obteve-se a melhor eficiência, equivalente a 100% de captura de particulados, portanto, atendendo o esperado.

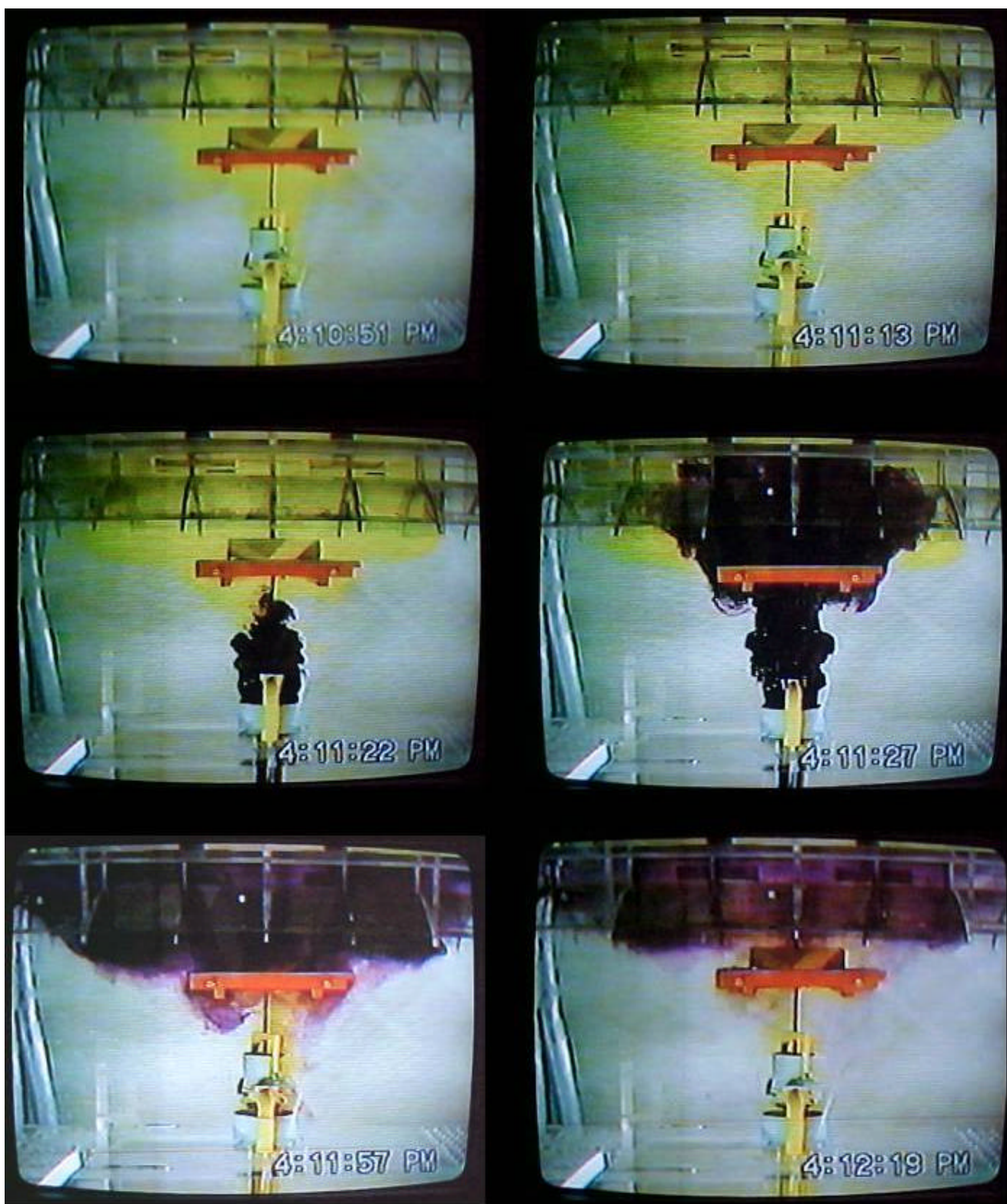


Figura 25 - Modelamento hidráulico, opção 1, vista de norte, volume da coifa  $953 \text{ m}^3$ , vazão de exaustão  $222.800 \text{ m}^3/\text{h}$ , resultado da eficiência de 89,7% de captura de particulados, com único ponto de exaustão na coifa.



Figura 26 - Modelamento hidráulico, opção 1, vista de oeste, volume da coifa  $953 \text{ m}^3$ , vazão de exaustão  $222.800 \text{ m}^3/\text{h}$ , resultado da eficiência de 89,7% de captura de particulados, com único ponto de exaustão na coifa.





Figura 27 - Modelamento hidráulico, opção 3, vista de norte, volume da coifa  $1.975 \text{ m}^3$ , vazão de exaustão  $301.500 \text{ m}^3/\text{h}$ , resultado da eficiência de 100% de captura de particulados, com quatro pontos de exaustão na coifa.



Figura 28 - Modelamento hidráulico, opção 3, vista de oeste, volume da coifa  $1.975 \text{ m}^3$ , vazão de exaustão  $301.500 \text{ m}^3/\text{h}$ , resultado da eficiência de 100% de captura de particulados, com quatro pontos de exaustão na coifa.

A eficiência de captura do desenho de coifa da opção 3, com as duas alternativas de tomadas de exaustão foi avaliada para várias taxas de vazão. Os resultados estão apresentados na Figura 29. Os resultados apontam que a performance da alternativa com quatro tomadas de exaustão é melhor do que com uma única tomada, especialmente para vazões menores do que  $300.000 \text{ m}^3/\text{h}$ . As razões podem ser atribuídas a maior uniformidade na remoção dos fumos ao longo do comprimento da coifa. As quatro tomadas também conferem maior uniformidade para a velocidade de face em toda extensão na coifa, além de orientar para uma relativa elevação na velocidade de face junto às extremidades da coifa, se comparada com a alternativa com uma única tomada, que possui maiores velocidades na parte central da área da coifa, e menores nas extremidades.

Para a vazão de  $223.000 \text{ m}^3/\text{h}$ , a eficiência de captura para a alternativa de única tomada é 3,5% menor que a de quatro tomadas. A medida que as vazões aumentam, esta diferença diminui, ficando insignificante para vazões acima de  $301.000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Portanto, os testes confirmam a vantagem da alternativa com quatro tomadas de exaustão.

Para obter uma eficiência de 99%, com o modelo da opção 3, com uma ou quatro tomadas, são necessárias vazões de  $285.000$  e  $255.000 \text{ m}^3/\text{h}$ , respectivamente. As correspondentes velocidades de face na coifa são de 15 e 13 m/min, respectivamente. O modelo mostrou, apesar da baixa velocidade de face, a efetividade de captura dos gases.

Diferente das opções anteriores 1 e 2, a opção 3, nas duas alternativas de tomadas, capturou e armazenou dentro da coifa praticamente todas as emissões geradas durante o carregamento do FEA.

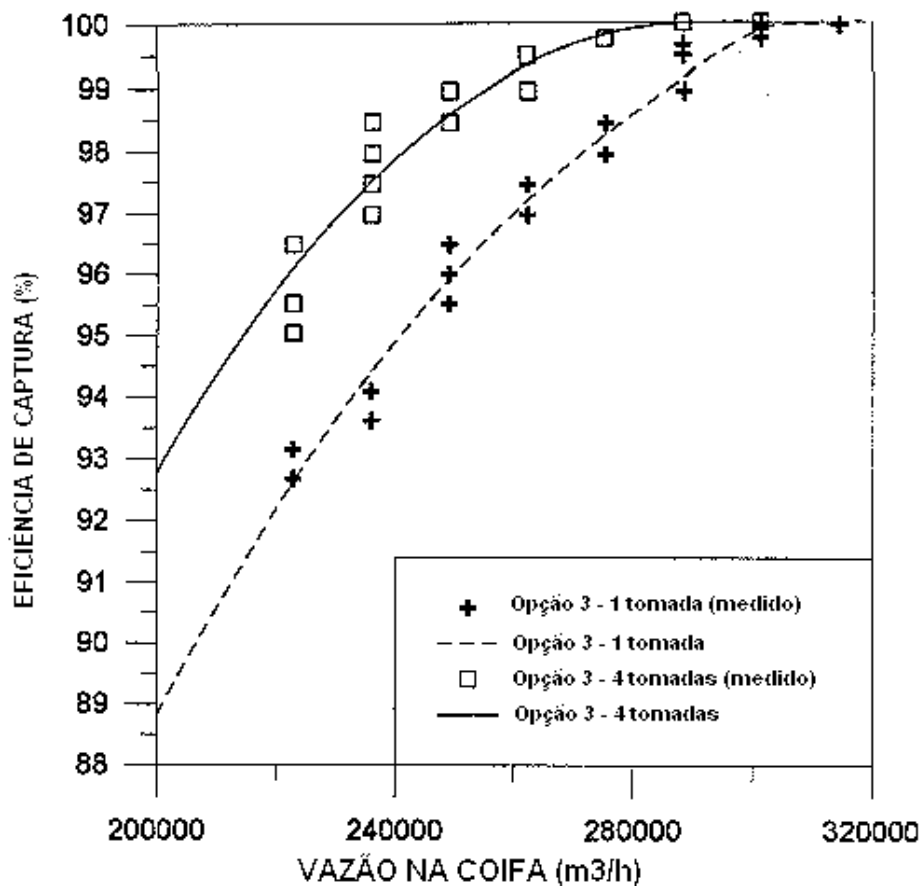


Figura 29 - Eficiências de captura para a opção 3, em função da vazão da coifa.

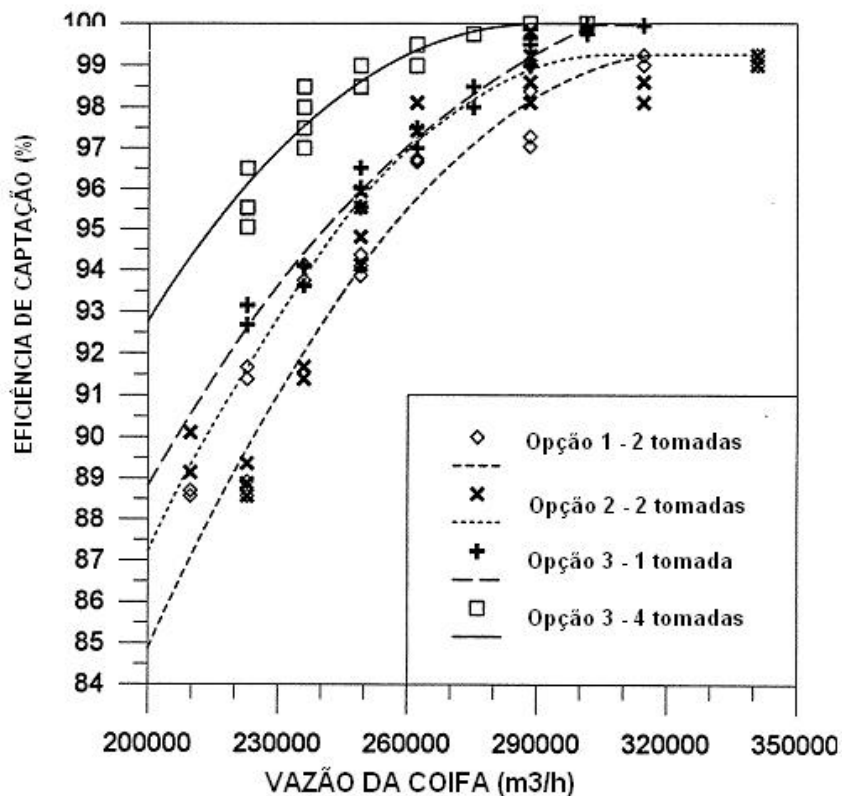


Figura 30 - Eficiências de captura para as opções 1, 2 e 3 (1 e 4 tomadas), em função da vazão da coifa.

Os resultados obtidos com as opções 1 e 2 também foram plotados na Figura 30. Conforme esperado, a opção 3 apresentou uma melhor performance devido o seu maior volume de armazenamento. Os resultados mostram que o modelo 3, com uma única tomada de exaustão, não é quantitativamente melhor que a opção 2. Entretanto, observações durante os testes confirmaram que a quantidade de fumos que permanecem fora da coifa foi significativamente menor na opção 3, para todas as taxas de vazões. Isso tem grande importância quando consideram-se coifas com baixas velocidades de face e a incidência de ventos laterais ao longo do prédio que deslocam os fumos da coifa. Adicionalmente, não foi obtida uma eficiência de 100% de captura dos fumos para os modelos das opções 1 e 2.

A Tabela 11 apresenta as vazões requeridas para obtenção uma eficiência de 99%. Também apresenta a diferença percentual se comparado com uma vazão fixa de 300.000 m<sup>3</sup>/h. O modelo da opção 3, com quatro tomadas de exaustão apresentou ganhos de 15% no requisito de vazão, considerando a vazão para 99% de eficiência.

*Tabela 11 - Comparativo entre as opções de desenhos de coifas.*

| <b>Tipo de Coifa</b>                    | <b>Vazão requerida para obter eficiência de 99% (m<sup>3</sup>/h)</b> | <b>Diferença % para 300.000 m<sup>3</sup>/h</b> |
|---|---|---|
| Modelo Opção 1                          | 306.000   | 2,0   |
| Modelo Opção 2                          | 293.000   | -2,3  |
| Modelo Opção 3 ( única tomada)          | 285.000   | -5,0  |
| Modelo Opção 3 ( 4 tomadas de exaustão) | 255.000   | -15,0   |

### 2.2.1 Conclusões do modelamento

Todos os resultados apontam que o modelo da opção 3, com quatro tomadas de exaustão, apresentou a melhor performance. Há aproximadamente 10% de diferença na taxa de vazão requerida para obter a efetividade de captura das emissões geradas durante o carregamento do FEA, para a opção 3, nas duas alternativas de tomadas de exaustão. Considerando que o modelo com 4 tomadas apresenta maiores custos de implantação do que o modelo com uma única tomada, e que ambos são capazes de obter uma eficiência de captura de 100% na vazão correspondente, parece que a melhor alternativa seria utilizar o modelo com uma única tomada de exaustão.

Há, entretanto, outras considerações. Baseado na operação do FEA, estima-se que, após 74 segundos do carregamento, o sistema irá retornar a captar as emissões primárias do quarto furo, conseqüentemente, reduzindo a vazão necessária para a coifa para aproximadamente 150.000 m<sup>3</sup>/h. De acordo com as observações realizadas durante os testes, existe uma quantidade considerável de fumos no interior da coifa após ter transcorrido os 74 segundos do carregamento. Nessas circunstâncias, os fumos remanescentes serão mais efetivamente exauridos da coifa pelas quatro tomadas com baixas taxas de vazões. Além disso, com 4 tomadas de exaustão, a coifa será esvaziada mais rapidamente do que em uma única tomada, porque os fumos das extremidades da coifa, não são facilmente conduzidos para um único ponto, situado no centro da coifa.

Por esta razão, foi escolhida a opção 3, com quatro tomadas de exaustão, e que as mesmas sejam localizadas na parte elevada da coifa, para realizar eficientemente a captura dos fumos, diretamente para as aberturas das tomadas de exaustão.

### 2.3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PRELIMINARES DO PROJETO

Após a realização do modelamento hidráulico, as vazões máximas do sistema foram definidas. A partir desse marco, iniciou-se o detalhamento para estabelecer as demais condições do sistema.

Na fase das especificações técnicas, ocorre a definição da tecnologia a ser adotada no projeto. O nível de responsabilidade desta etapa é elevado, requerendo uma ampla avaliação das alternativas disponíveis, além de requerer uma capacidade de projetar melhorias, algumas ainda não existentes.

Outro aspecto significativo é o conhecimento das opções de empresas fornecedoras, uma vez que existem muitos fabricantes que atuam em sistema de controle atmosférico, porém poucos possuem domínio tecnológico em tratamento de emissões geradas em fornos elétricos siderúrgicos.

O propósito das especificações é balizar e orientar as propostas técnicas dos fornecedores convidados a participar do processo de suprimento do sistema de despoejamento. As especificações também buscam garantir que o escopo de fornecimento fique uniforme entre as empresas concorrentes. O fornecedor vencedor é o responsável pela garantia de funcionamento do sistema, e deverá estar com suas especificações ajustadas com as especificações informadas.

A seguir estão apresentadas as premissas informadas aos fornecedores consultados.

#### a) Casa de filtros

Casa de filtros com mangas tipo positivo, limpeza de mangas com ar reverso, modelo compartimentado, para filtragem das emissões primárias e secundárias dos dois fornos elétricos e respectivos fornos-panela da Aciaria. A distribuição granulométrica do pó a ser coletado, foi

obtida pela análise contratada do Laboratório Green Lab, de Porto Alegre, Laudo nº 492/96 (1996). Os valores, mostrados na Tabela 12 resultaram da pesagem da amostra de pó coletado no antigo sistema de despoejamento. O pó coletado foi encaminhado ao Laboratório e submetido à análise granulométrica.

*Tabela 12 - Distribuição granulométrica do pó de Aciaria (Laudo nº 492/96 - Laboratório Green Lab, Porto Alegre, 1996).*

| <b>Distribuição granulométrica (mm)</b> | <b>Concentração (%)</b> |
|---|-------------------------|
| De 0,42 a 0,84                          | 18,70                   |
| De 0,21 a 0,42                          | 7,20                    |
| De 0,10 a 0,21                          | 25,70                   |
| De 0,06 a 0,10                          | 40,99                   |
| Menor que 0,06                          | 7,39                    |

Na análise de composição, este mesmo laboratório utilizou o espectrofotômetro de absorção atômica para realizar as análises dos elementos químicos. O material foi submetido à digestão ácida em sistema fechado para abertura da amostra. A umidade foi avaliada pelo método gravimétrico. O resultado da análise de composição do pó de Aciaria, conforme Laudos nº 419/96, está na Tabela 13.



*Tabela 13 - Determinação da Composição do pó de Aciaria (Laudo nº 419/96 - Laboratório Green Lab, Porto Alegre, 1996).*

| <b>Parâmetro</b>    | <b>Concentração</b> |
|---------------------|---------------------|
| Cálcio (mg/kg)      | 18.463              |
| Silício (mg/kg)     | 213                 |
| Magnésio (mg/kg)    | 10.861              |
| Ferro (mg/kg)       | 199.447             |
| Alumínio (mg/kg)    | 987                 |
| Manganês (mg/g)     | 898                 |
| Cromo total (mg/kg) | 543                 |
| Bário (mg/kg)       | 673                 |
| Zinco (mg/kg)       | 60.229              |
| Cobre (mg/kg)       | 908                 |
| Chumbo (mg/kg)      | 3.927               |
| Umidade ( % )       | 1                   |
| pH                  | 6,6                 |

As demais premissas informadas aos fornecedores consultados foram:

- a) volume de pó a ser coletado = 18 a 20 kg/t x 1200 t aço dia = 21.600 a 24.000 kg de pó dia;
- b) peso específico do pó coletado = 0,9 t/m<sup>3</sup> na caçamba e 1,8 t/m<sup>3</sup>, quando compactado;
- c) concentração de particulado máximo admissível na saída do filtro = 30 mg/Nm<sup>3</sup>;
- d) altitude local = 10 m acima do nível do mar;
- e) condição com os dois fornos em carregamento: 600.000 m<sup>3</sup>/h a 50 °C (507.120 Nm<sup>3</sup>/h);

- f) condição com os dois fornos em fusão:  $380.000 \text{ m}^3/\text{h}$  a  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $257.420 \text{ Nm}^3/\text{h}$ );
- g) condição com um forno em fusão e outro em carregamento:  $486.518 \text{ m}^3/\text{h}$  a  $77 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $379.484 \text{ Nm}^3/\text{h}$ );
- h) temperatura máxima de operação contínua dos gases =  $135 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- i) temperatura máxima de picos =  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- j) pressão total no filtro durante a operação de fusão = 100 a 120 mmCA;
- k) pressão total no filtro durante a operação de carregamento = 180 a 200 mmCA;
- l) pressão máxima do ventilador principal = 400 mmCA;
- m) pressão durante a limpeza com ar reverso = 300 mmCA;
- n) arranjo das câmaras em paralelo;
- o) fechamento superior por telhas trapezoidais;
- p) saída do gás filtrado por lanternim montado sobre o filtro;
- q) material das mangas: poliéster, 320 a  $350 \text{ g/m}^2$ ;
- r) a manga deverá ter um tratamento com silicone no lado da filtração (interno);
- s) fixação inferior da manga com abraçadeiras;
- t) suspensão superior da manga com sistema que garanta o tensionamento constante.  
Tipo haste rígida de furo regulável com tensionamento de mola cônica;
- u) distância mínima entre o topo da manga tensionada e a viga de sustentação da mola = 1.000 mm;
- v) comprimento aproximado das mangas = 10.000 mm;
- w) diâmetro aproximado das mangas = 300 mm;
- x) velocidade de filtragem na fusão = menor que  $0,85$  a  $0,87 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$  de manga, considerando uma câmara em limpeza;

- y) velocidade de filtragem com picos durante o carregamento = menor que 1  $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^2$  de manga;
- z) velocidade de limpeza com ar reverso = 1,1  $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^2$  de manga;
- aa) dampers (válvulas que realizam o controle da abertura em dutos) de entrada dos compartimentos e de reversão com acionamento pneumático, permitindo isolar um compartimento para limpeza ou para trocar as mangas, sem interromper a operação de filtragem;
- bb) sistema pneumático para atuação dos dampers completo, compreendendo válvulas solenóides com acionamento manual, válvulas reguladoras de vazão, conexões, filtros, reguladores, lubrificadores e tubulações;
- cc) tremonhas com inclinação mínima de 60 graus nas arestas;
- dd) roscas helicoidais e válvulas rotativas atuadas por moto-redutores independentes, posicionados no fundo da tremonha, para remoção do pó, garantindo o isolamento do filtro ao sistema de transporte de pó;
- ee) sistema de transporte de pó tipo arrastador de corrente, capacidade total de 4 t/h, com dois módulos de 2 t/h cada, localizados abaixo das tremonhas, prevendo interligação no sistema de elevação para o silo de armazenagem;
- ff) manômetros tipo aneróide com escala até 0,38 mca, para cada compartimento;
- gg) fornecer projeto de aterramento do filtro;
- hh) fornecer a ferramenta pneumática para tensionamento das mangas;
- ii) incluir no fornecimento elétrico as interligações elétricas do painel até os pontos consumidores;
- jj) iluminação de passarelas para manutenção e da área térrea junto ao sistema de coleta de pó;

- kk ) prever teste com pó fosforescente para detecção de vazamentos;
- ll ) utilizar *pre-coat* para partida do sistema;
- mm ) instalar tomadas para amostragem no lanternim;
- nn ) instalar plataformas internas superiores com grade, para acesso pelo topo das mangas e para sua suportaçãõ;
- oo ) fornecer plataformas externas para acessar as portas de inspeção, escadas e corrimão, com piso industrial gradeado;
- pp ) fornecer plataformas para acesso às tomadas de amostragem;
- qq ) portas de inspeção para as câmaras com dimensão mínima de 1.800 x 800 mm;
- rr ) conjunto de ventilador-motor para reversão do ar, com motor trifásico 380 V - 60 Hz – TFVE - IPW 55, com sensores de temperatura e de vibração, base única, conexões flexíveis de aspiração e descarga e rede de dutos para interligação.

#### b) Ventiladores principais

Dois (2) ventiladores centrífugos para sistema de despoeiramento dos dois fornos de fusão elétricos da Aciaria, instalados antes da casa de mangas (lado sujo).

- a ) distribuição granulométrica, composição, volume, peso específico e concentração do pó coletado: idem ao especificado para a casa de filtros;
- b ) altitude local = 10 m acima do nível do mar;
- c ) condição do ventilador com o forno em carregamento: 300.000 m<sup>3</sup>/h a 50 °C (253.560 Nm<sup>3</sup>/h), perda de carga a montante do ventilador = 95 mmCA e perda de carga a jusante do ventilador = 200 mmCA;

- d) condição do ventilador com o forno em fusão: 190.000 m<sup>3</sup>/h a 130 °C (128.710 Nm<sup>3</sup>/h), perda de carga a montante do ventilador = 193 mmCA e perda de carga a jusante do ventilador = 200 mmCA;
- e) condição de emergência para um único ventilador atender um forno carregando e o outro em fusão: 371.018 m<sup>3</sup>/h a 77 °C (289.200 Nm<sup>3</sup>/h), perda de carga a montante do ventilador = 193 mmCA e perda de carga a jusante do ventilador = 200 mmCA;
- f) condição de emergência para um único ventilador atender os dois fornos em fusão: 380.000 m<sup>3</sup>/h a 130 °C (257.420 Nm<sup>3</sup>/h), perda de carga a montante do ventilador = 193 mmCA e perda de carga a jusante do ventilador = 200 mmCA;
- g) temperatura máxima de operação contínua = 135 °C e temperatura máxima de picos = 150 °C;
- h) motor com classe construtiva: *Heavy Duty*; proteção IPW-55, 60 Hz, 380 V. Dimensionar motor para partida a frio (30 °C). Rotação máxima admissível = 950 rpm;
- i) carcaça tri-partida para facilitar a remoção do rotor. Material da carcaça A36-AR-360, com revestimento parcial. Material do eixo AISI 4140. Flanges de sucção e descarga. Porta de inspeção para freqüente abertura. Dreno para escoamento com cap;
- j) colarinho flexível com proteção interna de material amianto siliconado, na sucção e descarga;
- k) dupla aspiração com duas caixas de entrada. Material: A-36 - AR360;
- l) mancais de caixas bipartidas, com rolamentos autocompensadores de rolos, projetados para uma vida útil superior a 60.000 horas;
- m) montagem dos apoios dos mancais independentes sobre a base de concreto;

- n) material do rotor A 514 - A50 com superfície endurecida com carbeto de cromo.  
Material do cubo do rotor AISI 4140 - A 514;
- o) o acoplamento deverá ser direto por intermédio de luva elástica e com proteção;
- p) sensor de vibração com transdutor para cada um dos mancais, com cabo de ligação e caixas de passagem;
- q) sensores de temperatura tipo PT-100 para cada mancal, com haste de inox;
- r) base metálica para montagem do motor, com isoamortecedores para o conjunto motor-ventilador e chumbadores para fixação;
- s) damper tipo veneziana na sucção com atuador elétrico. Atuador elétrico para o damper de saída, tipo veneziana (60 Hz, 4 a 20 mA);
- t) informar as curvas respectivas do ventilador considerando as diferentes condições de vazão, pressão, temperatura, rotação, potência consumida, nível de ruído a 1,5 metros e rendimento.

## 2.4 PROJETO BÁSICO DO SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO

A definição conceitual do projeto foi gerada após a execução das etapas: visitas técnicas, modelamento hidráulico e contatos com as empresas fornecedoras. As alternativas apresentadas pelas empresas contratadas, considerando as especificações do item 2.3, foram avaliadas e validadas pela equipe da Gerdau.

Os fornecedores contratados para a implantação do novo sistema de despoeiramento foram as empresas Stantec Consulting Ltd, de Mississauga, Ontário, Canadá, e Confab S.A. de São Paulo. Essas empresas consolidaram os projetos básico e executivo do sistema. A Confab

também executou a fabricação, fornecimento, instalação e posta-em-marcha dos componentes do sistema de despoeiramento.

O projeto básico e o modelamento hidráulico, desenvolvidos pela empresa Hatch Associates, foram utilizados para orientar as propostas dos fornecedores. O projeto foi executado considerando a possibilidade de atender futuras ampliações de produção da Aciaria.

Para desenvolver o projeto básico, a Stantec empregou seu software de modelamento matemático, chamado DECSIM. Os resultados do perfil de carga térmica e composição química dos gases foram utilizados para estabelecer o projeto básico do sistema primário. A Tabela 14 mostra os dados básicos considerados no projeto do sistema primário.

*Tabela 14 - Dados básicos considerados no Sistema Primário*

| <b>Carga Térmica (MW)</b> | <b>Vazão do quarto furo (Nm<sup>3</sup>/h)</b> | <b>Mínima vazão requerida de ar de combustão (Nm<sup>3</sup>/h)</b> | <b>Vazão do sistema primário (Nm<sup>3</sup>/h)</b> | <b>Temperatura (°C)</b> |
|---------------------------|--|---|---|-------------------------|
| 25,5                      | 10.000   | 26.000  | 36.000  | 1.820                   |

O projeto básico do sistema secundário foi estabelecido considerando a gravação de vídeo das práticas existentes, durante as fases de carregamento e vazamento, gravados em abril de 1999. Os resultados dessas análises estão resumidas na Tabela 15.

O novo sistema de despoeiramento incorporou as seguintes melhorias:

- a) maior painel refrigerado na abóbada do FEA para a tomada do quarto furo;
- b) maior curva fixa sobre a abóbada ;
- c) dutos refrigerados;
- d) câmara de combustão;

- e) coifa no telhado do prédio;
- f) dutos refrigerados com água;
- g) coifa lateral para os fornos-panels;
- h) ventiladores *booster* para os fornos-panels;
- i) dutos refrigerados e secos para os fornos-panels;
- j) dutos de interligação entre os sistemas primário e secundário até a casa de filtros;
- k) câmara de mistura ;
- l) casa de filtros de pressão positiva com ar reverso;
- m) ventiladores principais;
- n) silo para armazenamento do pó de Aciaria;
- o) estação de carregamento do pó de Aciaria em caminhões;
- p) sistema de recirculação de água industrial.

*Tabela 15 - Dados básicos do Sistema Secundário, considerando a elevação ao nível da coifa.*

| <b>Sistema</b>                    | <b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b> | <b>Temperatura (°C)</b> |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Vazão com FEA aberto              | 300.000                        | 60                      |
| Vazão da pluma no carregamento *  | 2.000.000                      | 120                     |
| Vazão da pluma posterior          | 350.000                        | 60                      |
| Vazão durante vazamento           | 250.000                        | 60                      |
| Vazão no forno-panela após os gap | 30.000                         | 200                     |

Nota : \* A pluma gerada no primeiro carregamento é de curta duração, aproximadamente 3 segundos, e pode ser armazenada temporariamente na coifa.

As figuras 31 a 42 apresentam as fotos do projeto de despoeiramento implantado.

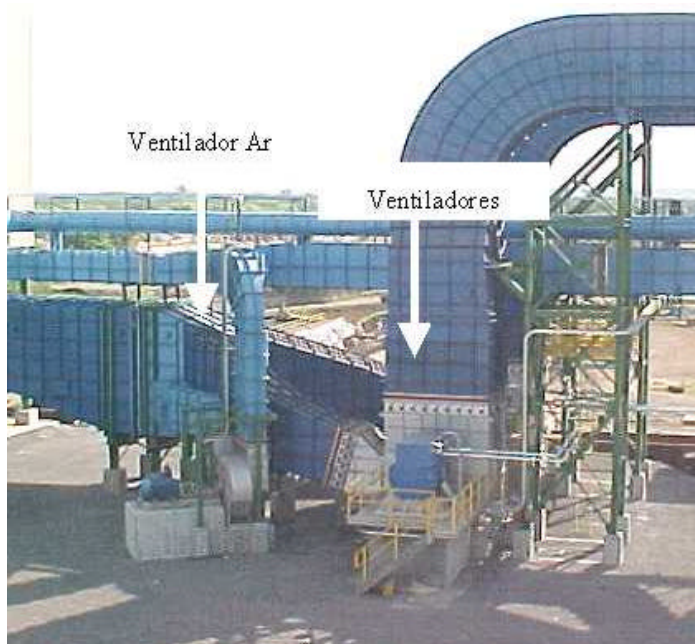




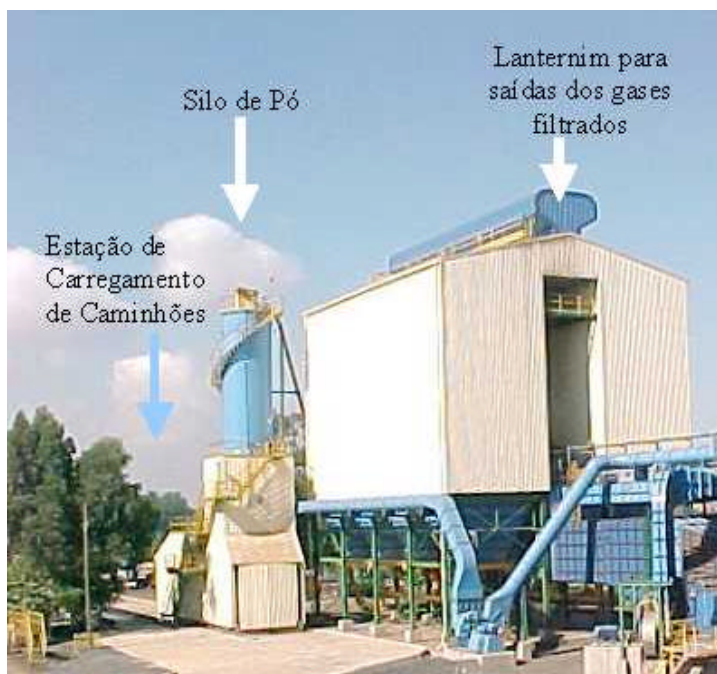
*Figura 31 - Vista superior do sistema de despoejamento, mostrando a coifa sobre o forno elétrico, os dutos secundário e primário e uma vista parcial do sistema de água industrial.*



*Figura 32 - Vista do duto secundário (diâmetro 3 metros), casa de filtros, silo de pó e prédio do comando elétrico.*



*Figura 33 - Vista dos ventiladores principais e de ar reverso*



*Figura 34 - Vista da casa de filtros, silo e estação de carregamento com seu sistema de exaustão próprio.*



*Figura 35 - Vista da câmara mistura.*



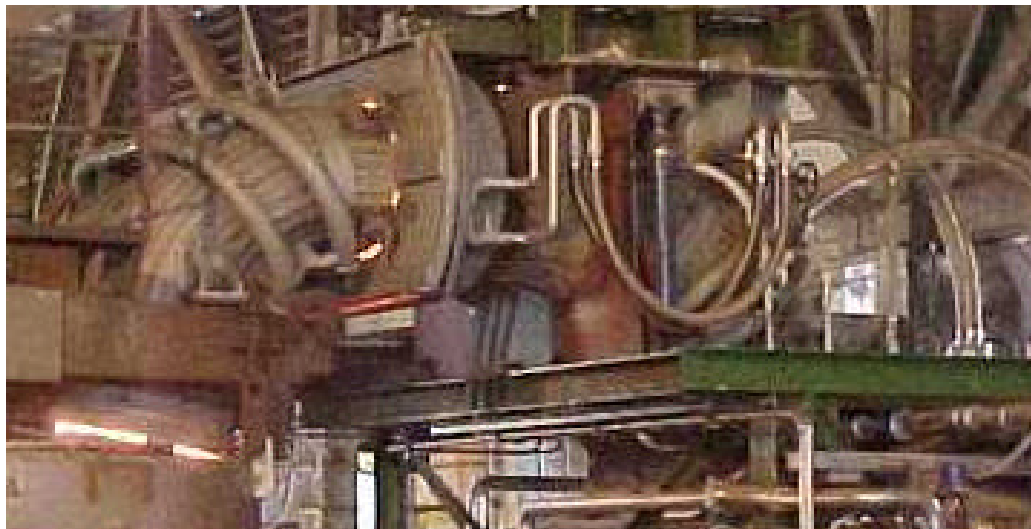
*Figura 36 - Câmara de combustão pré-montada.*



*Figura 37 - Interior da câmara de combustão, mostrando a soleira de concreto, as laterais e a abóboda com os tubos resfriados à água.*



*Figura 38 - Curva fixa refrigerada, montada na entrada da câmara de combustão do sistema primário.*



*Figura 39 - Forno elétrico em operação de fusão com o novo sistema de despoejamento.*



*Figura 40 - Sistema de recirculação de água industrial utilizada no resfriamento dos dutos do sistema de despoejamento. Vista das torres de resfriamento.*

#### 2.4.1 Projeto do Sistema Primário

As emissões primárias referem-se às emissões geradas durante as fases de fusão do FEA. As secundárias ocorrem durante o carregamento e vazamento do FEA e também na operação do forno-panela.

O projeto de captação das emissões primárias está baseado em fornecer ao sistema uma capacidade para acomodar a carga térmica e o volume de emissões gasosas geradas no FEA. Os principais fatores que influenciam no projeto são as práticas de fusão, a geometria do FEA, principalmente das aberturas, e o método de exaustão das emissões geradas.

O projeto executivo foi desenvolvido considerando a possibilidade de atender futuras ampliações de capacidade e melhorias planejadas para os FEAs existentes.

##### a) Equipamentos

Os equipamentos que compõem o sistema de controle das emissões primárias incluem os dutos refrigerados e a câmara de combustão.

A captação das emissões primárias do FEA é realizada através do quarto furo da abóbada do FEA. Sobre este furo ou abertura é instalada a curva fixa resfriada a água, conforme mostra a Figura 39. Por meio de dutos resfriados, os gases são encaminhados à câmara de combustão e, posteriormente, por meio de dutos resfriados e secos, ao duto combinado, onde encontrarão os gases da coifa (secundário).

Nos dutos refrigerados, junto ao FEA, composto pela curva fixa ou *elbow*, mostrada na Figura 38, e pela curva móvel, as velocidades dos gases não devem exceder 50 m/s. Esses dutos foram projetados para uma área transversal de 0,8 m<sup>2</sup>. O tipo construtivo do duto curvo sobre a

abóbada é tubo-tubo, ou seja, a água de resfriamento flui pelo interior dos tubos, soldados justapostos e formando uma serpentina, com posterior recobrimento com massa refratária, do lado que entra em contato com os gases quentes. A forma construtiva destas peças é bastante reforçada, uma vez que estão sujeitas a severas cargas térmicas e abrasões das partículas sólidas arrastadas na massa gasosa. O diferencial de temperatura máxima da água nestes dutos é de 30<sup>0</sup>C.

A segunda curva refrigerada, chamada curva móvel, recebe os gases diretamente da curva fixa sobre a abóbada. Existe uma folga ou “gap” entre as curvas fixa e móvel, para permitir a entrada de ar externo na corrente gasosa do FEA. Essa folga é projetada para que o fluxo de ar de combustão requerido garanta a completa combustão do monóxido de carbono e hidrogênio. A folga ou “gap” é construída de forma a permitir o ajuste durante o processo de posta-em-marcha.

A câmara de combustão, conforme mostram as Figura 36 e 37, é projetada para reduzir a velocidade do fluxo de gás para uma média de 10 m/s, conseqüentemente, causando a sedimentação e remoção de partículas maiores, que se depositam no piso da câmara e posteriormente são recolhidas. A câmara de combustão é do tipo tubo-tubo nas laterais e na abóbada. O piso é construído em concreto armado, com recobrimento de refratário. É resfriada com água industrial ou de contato indireto, com diferencial máximo de temperatura, na água, de 20<sup>0</sup>C. A câmara é projetada para um tempo médio de residência dos gases de 1 s, recomendado para obter-se uma combustão completa de qualquer monóxido de carbono e hidrogênio remanescente. A escória ou pó, arrastados pelo fluxo gasoso, serão recolhidos no piso da câmara de combustão, através de uma pequena pá carregadeira, tipo *Bob Cat*, que ingressa no interior da mesma, através de uma grande porta lateral, aberta em períodos de paradas programadas do FEA.

A partir da câmara de combustão, os gases continuam o resfriamento por 58 metros de segmentos de tubos refrigerados, conforme mostrado no canto superior esquerdo da Figura 31. Estes dutos são do tipo dupla chapa, que consiste de uma chapa interna que está em contato com

o fluxo de gás quente, e uma externa que está em contato com o ar ambiente externo. Entre as suas chapas, circula água industrial através de um labirinto, tipo serpentina, construído em chapas verticais que interligam as faces interna e externa do duto. O diferencial máximo de temperatura da água industrial nesses dutos é de 20 °C. A máxima temperatura projetada no final do duto refrigerado é de 430 °C, com uma velocidade de 25 m/s.

A modulação da vazão do sistema primário é garantida por um damper (válvula que regula o fluxo dos gases nos dutos) do tipo borboleta, localizado no final do duto refrigerado. Esse damper tem o mesmo diâmetro do duto refrigerado, isto é, 1.200 mm.

A tabela 16 apresenta o resumo dos requisitos dos equipamentos resfriados a água para o sistema de controle das emissões primárias, com as respectivas características dimensionais.

*Tabela 16 - Resumo dos consumidores de água industrial do sistema de despoeiramento*

| <b>Seção do duto resfriado a água</b> | <b>Diâmetro equivalente (m)</b> | <b>Comprimento (m)</b> | <b>Área para remoção de calor (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Vazão de água requerida (m<sup>3</sup>/h)</b> |
|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------|---|--|
| Curva fixa abóbada                    | 1 *                             | 3                      | 9,5   | 68   |
| Curva móvel                           | 1,2 *                           | 3                      | 11,5  | 67   |
| Câmara de combustão                   | 3**                             | 7                      | 71,0  | 185  |
| Duto resfriado a água                 | 1,2                             | 58                     | 219,0   | 380  |
| <b>Total</b>                          |                                 |                        | <b>311</b>  | <b>700</b>                                       |

\* Duto resfriado com forma oval. Os valores mostrados acima são diâmetros equivalentes.

\*\* Painéis resfriados planos. Os valores mostrados acima são diâmetros equivalentes.



## b) Utilidades

A água industrial é recirculada em sistema fechado, não entrando em contato com contaminantes, daí ser também chamada água de contato indireto. Sua principal função é o resfriamento de equipamentos. A central de água industrial que atende os consumidores do sistema de despoejamento está mostrada na Figura 40. O circuito de água industrial é composto por piscinas de água quente e fria, bombas centrífugas e torres de resfriamento.

A vazão de recirculação de água industrial, prevista para resfriar a carga térmica do sistema primário é de  $700 \text{ m}^3/\text{h}$ . A capacidade das torres de resfriamento requerida para atender os dois FEAs é de  $1.400 \text{ m}^3/\text{h}$ . Para remover a carga térmica total dos gases, sob condições de pico, o diferencial de temperatura máximo da água industrial é de  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ , para toda a extensão de dutos resfriados. Vários circuitos são interligados em série para obter essa condição de remoção de calor. O acréscimo de perda de carga causado pela série de circuitos foi considerado no detalhamento do projeto do sistema de águas.

A água sai dos equipamentos, após resfriá-los, com uma temperatura que varia de  $40$  a  $55^\circ\text{C}$ , sendo encaminhada sob pressão por tubulações fechadas para as torres de resfriamento, onde a temperatura é reduzida para aproximadamente  $30^\circ\text{C}$ . Das torres de resfriamento, por transbordo natural, a água é transferida para uma piscina de água fria que serve de reservatório para as operações de partida do sistema, garantindo a disponibilidade de água suficiente para as bombas realizarem o preenchimento com água de toda a tubulação. A piscina de água fria também tem a função de acumular o volume de água da tubulação de retorno durante operações de paradas. Foi adotado um volume para a piscina de água fria de  $10$  a  $20\%$  da vazão de

recirculação. As bombas centrífugas transferem esta água fria para os equipamentos a serem refrigerados, completando o ciclo.

### c) Emissões do forno-panela

O projeto para controle das emissões primárias tem como base prover um sistema com capacidade suficiente para acomodar a vazão de gases e a carga térmica gerada nos fornos-panela. O sistema de captação do forno-panela é tipo coifa resfriada fechada, posicionada sobre a abóbada, com furos de passagem para os eletrodos e sucção lateral. O controle é executado de forma a trabalhar com pressão ligeiramente positiva sob a abóbada e ligeiramente negativa sobre a abóbada (dentro da coifa).

Este método resulta em menor vazão requerida para o sistema, mas com maior carga térmica, necessitando maior proteção por partes resfriadas. Por outro lado, proporciona menor oxidação do banho e praticamente nenhum escape pelas aberturas, sem comprometer o consumo de eletrodos.

As emissões do forno-panela são controladas por um duto exclusivo, conectado ao duto do sistema secundário. Para captar as emissões do forno-panela, foi instalado um captor lateral, resfriado a água, montado na abóbada do forno-panela, dutos secos, ventilador booster, com modulação na entrada e damper para isolação. Cada ventilador booster está dimensionado para uma pressão estática de 200 mmCA. O diâmetro do duto seco é 650 mm.

O projeto para captar as emissões do forno-panela foi desenvolvido a partir das gravações de vídeo. A vazão da pluma e as dimensões foram analisadas em diferentes elevações, finalizando em um valor em torno de 30.000 m<sup>3</sup>/h a 200 °C.

#### 2.4.2 Projeto do sistema secundário

O sistema de controle das emissões secundárias é definido como os equipamentos requeridos para controlar as emissões atmosféricas geradas no forno-panela e nas operações de carregamento e vazamento do FEA, além de auxiliar na captura das emissões fugitivas geradas na operação de fusão. Entretanto, o meio eficaz para controlar as emissões geradas na fusão é pelo sistema de controle primário.

As emissões do carregamento da sucata e do vazamento do aço líquido são captadas pela coifa montada acima do FEA e exauridas por três pontos de tomadas. As plumas ascendentes no carregamento do FEA, apresentam três fases. A primeira fase ocorre quando a abóbada do FEA é aberta. Nesse momento, a pluma é o resultado do fluxo de ar induzido pelo aço líquido que está no interior do FEA (emissões da abertura do FEA). A segunda fase ocorre quando o cestão com sucata ferrosa abre e carrega o FEA. O fluxo de ar é o resultado do ar deslocado pela sucata durante a queda no FEA, caracterizando a bola de fogo da pluma de carregamento do FEA. A última fase (pluma posterior) ocorre quando o cestão afasta-se do FEA. Nessa ocasião, as emissões são causadas por ondas ascendentes induzidas pelo calor do FEA.

Para controlar as emissões do carregamento, as tomadas da coifa devem ter no mínimo capacidade de exaustão para acomodar a porção contínua da pluma (abertura da abóbada do FEA e emissões da pluma posterior). Não é prático fornecer a exaustão suficiente para equilibrar com os picos de vazão da pluma gerada no carregamento porque esses volumes de exaustão requeridos são extremamente elevados. Devido a curta duração dos picos, os mesmos podem ser armazenados no volume da coifa, enquanto o sistema pode gradualmente realizar a exaustão dos fumos.

Adicional aos requisitos de capacidade de exaustão, o projeto do sistema secundário inclui as dimensões físicas requeridas para a coifa como função apropriada para capturar as emissões do carregamento. A coifa deve atender as seguintes premissas:

- a ) cobrir fisicamente a extensão das plumas geradas durante o carregamento;
- b ) possuir volume suficiente para conter a pluma do carregamento até que o sistema possa evacuar os fumos contidos na mesma;
- c ) ter uma velocidade de face mínima de 0,5 m/s;
- d ) apresentar paredes verticais suficientemente profundas para garantir a entrada total da pluma ascendente na coifa.

As emissões do vazamento são causadas pelo movimento do ar resultante do fluxo de aço líquido entrando na panela. Diferente do carregamento de sucata, as plumas são produzidas a uma taxa de vazão constante com uma duração de aproximadamente 1 a 1,5 minutos. Para controlar as emissões do vazamento, a vazão de exaustão deve igualar-se ao fluxo da pluma de vazamento. O volume da coifa não é utilizado para controlar essas emissões devido a longa duração dessa pluma. Entretanto, a geometria da coifa deve ser tal que envolva totalmente a pluma.

O projeto básico para a captura das emissões de carregamento e vazamento foi desenvolvido considerando as análises das gravações de vídeo. As vazões das plumas e as dimensões foram analisadas para as operações de carregamento e vazamento. O resumo com as condições de operação do FEA, vazões e temperaturas respectivas, está apresentado na Tabela 17.

*Tabela 17 - Requerimentos para o carregamento e vazamento, baseado nas análises das gravações de vídeo*

| <b>Condição do FEA</b>                    | <b>Vazão da Coifa (m<sup>3</sup>/h)</b> | <b>Temperatura Estimada (°C)</b> |
|---|---|----------------------------------|
| Vazão com FEA aberto                      | 300.000                                 | 60                               |
| Vazão da pluma no primeiro carregamento * | 2.000.000                               | 120                              |
| Vazão da pluma posterior                  | 350.000                                 | 60                               |
| Vazão durante vazamento                   | 250.000                                 | 60                               |

\* A pluma gerada no primeiro carregamento é de curta duração, aproximadamente 3 segundos, e pode ser armazenada temporariamente na coifa.

Nessas condições, a pluma posterior, que gera uma ampla e continua pluma, define a capacidade de exaustão da coifa no projeto básico para 350.000 m<sup>3</sup>/h a 60 °C.

A vazão das emissões de carregamento define a capacidade volumétrica requerida para a coifa. A máxima vazão de emissão, correspondente a 2.000.000 m<sup>3</sup>/h, foi identificada com uma duração de 3 segundos. Isso orienta para uma capacidade volumétrica de coifa mínima de 1.400 m<sup>3</sup>/h, resultado da equação:

$$\text{Volume Coifa} = ( 2.000.000 \text{ m}^3/\text{h} ) / 3.600 - ( 350.000 \text{ m}^3/\text{h} \times 3\text{s} ) / 3.600 = 1.374 \text{ m}^3$$

Para acomodar fisicamente o amplo espectro da pluma gerada durante o carregamento, a área de face da coifa adotada pela Stantec foi 320 m<sup>2</sup> e volume de 1.600 m<sup>3</sup>. Isso indica que a velocidade de face de 0,5 m/s não pode ser alcançada para a vazão de 350.000 m<sup>3</sup>/h na coifa. A velocidade de face calculada para a vazão de 350.000 m<sup>3</sup>/h é 0,3 m/s e, conseqüentemente, os fumos na coifa serão sensíveis às correntes de ar transversais. Para reduzir esta desvantagem, todas as aberturas do prédio, tais como o lanternim do telhado, dentro da extensão de 15 metros, em ambos os lados da coifa, devem ser fechadas para minimizar a ação das correntes de ar

transversais no prédio e prevenir curto circuito com ar ambiente que entra pelas aberturas no sistema secundário.

A coifa foi construída com telha metálica instalada ao longo do prédio e sustentada por uma estrutura de apoio independente do prédio existente. Foram instaladas três tomadas na coifa para buscar assegurar que o fluxo seja distribuído em toda a extensão de sua face. As tomadas de exaustão da coifa convergem para um duto que percorre longitudinalmente o prédio, conforme mostra a Figura 31, recebendo posteriormente a interligação com as emissões do sistema primário. O damper para controlar o fluxo das emissões secundárias está localizado a montante da interligação do sistema primário. O damper possui sistema de modulação, para toda a faixa de movimento requerido, sendo realizados por venezianas com giro circular. Foi prevista uma posição mínima de parada do damper para assegurar que não ocorram excessivas pressões estáticas nos sistemas de controle e também garanta uma velocidade mínima dos gases, responsável pelo transporte das emissões captadas. Essa posição mínima é ajustada durante a operação de posta-em-marcha do sistema. O diâmetro dos dutos da coifa, por forno, é de 1,9 metros. Após a interligação das emissões primárias do FEA e do forno-panela no sistema de controle secundário, o diâmetro passa para 2,1 metros. O controle de vazão principal está localizado na extremidade do sistema de controle do FEA3, antes da conexão com o sistema de controle do FEA2. Esse damper tem o diâmetro de 2,1 metros e possui modulação com venezianas com giro circular. Após a interligação dos sistemas de controle do FEA2 e FEA3, o diâmetro é de 3 metros.

O ar de diluição introduzido pelas coifas é utilizado para resfriar os gases quentes, provenientes do sistema primário, antes que os mesmos cheguem na casa de filtros.

A câmara de mistura, apresentada na Figura 35, está localizada no final do duto combinado dos FEAs 2 e 3, e a montante dos ventiladores principais. O principal propósito da

câmara de mistura é proporcionar uma perfeita mistura dos gases das diversas fontes emissoras (FEAs, fornos-panela e coifas) de maneira a se obter uma massa homogênea, tanto no que se refere a temperaturas quanto a concentração de pó. Uma mistura insuficiente na corrente gasosa poderá ocasionar a operação dos ventiladores principais em diferentes temperaturas. Isso resulta em efeitos na performance dos ventiladores e na capacidade de todo o sistema de controle.

O damper de emergência, que admite ar de diluição no sistema, está localizado no topo da câmara de mistura. Está projetado para abrir somente se a temperatura na casa de filtros exceder 135°C. Essa é a temperatura limite para operação do polyester, material utilizado na manga da casa de filtros.

#### 2.4.3 Projeto do sistema de tratamento das emissões

Os gases saem da câmara de mistura com uma temperatura máxima de 130°C e são conduzidos por um duto seco para a casa de filtros através dos ventiladores principais, conforme apresentado na Figura 33.

Foi implantada uma nova casa de filtros, que opera com pressão positiva. A limpeza das mangas é realizada pela inversão da direção do gás, chamado sistema com ar reverso. Os trocadores de calor, filtros e ventiladores existentes do antigo sistema não foram aproveitados no novo projeto.

A casa de filtros, mostrada na Figura 34, possui 8 compartimentos ou módulos. Cada compartimento possui 204 mangas, construídas com material polyester, sem costura, *Seamless Tube RT 02*, da McFil - Tecnologia de Filtragem, gramatura 325 g/m<sup>2</sup>, diâmetro de 292 mm, comprimento de 10.200 mm, contendo 1.632 mangas e área de filtragem 15.270 m<sup>2</sup>. Foram instalados na casa de filtros: plataformas, escadas e outros acessos, necessários à manutenção,

limpeza, inspeções visuais, operação, testes de vazão e monitoramento ambiental do sistema. A casa de filtros foi projetada para garantir no gás filtrado uma concentração de Partículas Totais em Suspensão – PTS inferior a 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Está prevista uma perda de carga de 150mmCA na casa de filtros durante a fase de fusão e 220 mmCA durante o carregamento.

Para evitar que partículas finas penetrem na estrutura do tecido da manga nova, causando a obstrução desta e conseqüente aumento no diferencial de pressão, foi aplicado durante a posta-em-marcha, o *precoating Prekote* da Midwesco Filter, caracterizado como pó inerte, constituído de partículas multifacetadas, com várias formas e tamanhos, que formam uma camada tridimensional e porosa. Foram aplicados aproximadamente 3.000 kg.

Foi previsto no projeto atender a futura expansão do sistema de tratamento dos gases através da inclusão de espaços vagos para adicionar futuros ventiladores e compartimentos na casa de filtros.

O sistema possui uma vazão nominal total de 800.000 m<sup>3</sup>/h a 68 °C, que corresponde a capacidade da casa de filtros e a operação crítica de carregamento em ambos os FEAs. Foi adotada uma vazão maior que a calculada previamente, de modo a ampliar o fator de segurança no sistema. Para a condição de operação com ambos FEAs em fusão, foi adotada a vazão de 560.000 m<sup>3</sup>/h a 123 °C e 685.000 m<sup>3</sup>/h a 91 °C para a condição de operação com um FEA em fusão e o outro em carregamento. As relações de vazão do sistema estão apresentadas na Figura 47.

Os dois ventiladores principais, que alimentam a casa de filtros, operam com 550 mmCA para o modo de fusão nos dois fornos, 680 mmCA para um forno em carregamento e outro em fusão e 710 mmCA para ambos em carregamento. Cada ventilador é acionado por um motor elétrico de 900 kW (1.200 HP) de potência, rotação máxima de 900 rpm e com uma vazão de 400.000 m<sup>3</sup>/h.



Foram previstas tomadas para a ligação de um terceiro ventilador para futuros aumentos de capacidade do sistema. Os ventiladores centrífugos deslocam os gases até o sistema de filtração, descarregando no plenum do filtro de mangas, que finalmente descarregará os gases filtrados para a atmosfera, através de um lanternim contínuo situado no topo do filtro. Os ventiladores estão instalados antes da casa de filtros, portanto recebendo os gases com elevadas concentrações de particulados.

As capacidades citadas acima excluem as vazões dos ventiladores de ar reverso, porém incluem as vazões dos fornos-panela.

Durante a fase de fusão dos fornos elétricos, ocorre o isolamento de um dos compartimentos para realizar a limpeza. O ciclo de limpeza é suspenso durante as fases de carregamento dos FEAs para disponibilizar o máximo de área filtrante nesse curto período de tempo. A limpeza das mangas é feita pela inversão do fluxo de ar na manga, obtida pela ação de um ventilador específico para esta função, denominado de ventilador de ar reverso, insuflando ar atmosférico.

O ventilador de ar reverso possui uma vazão de  $72.500 \text{ m}^3/\text{h}$  com motor de 187 kW (250 HP).

Cada câmara, após um período determinado e em conjunto com uma informação de pressão, será isolada e devidamente limpa pelo ventilador de ar reverso. Após a limpeza das mangas, a câmara é reintegrada ao sistema. Este procedimento se repete sucessivamente de câmara em câmara até completar o ciclo.

O pó recolhido nas tremonhas, localizadas na parte inferior da casa de filtros, é transportado por meio de parafusos helicoidais e correias transportadoras para um silo de armazenamento com capacidade de  $100 \text{ m}^3$ , conforme mostrado na Figura 34. Para evitar o depósito de pós nas paredes do silo, foram instalados aeradores de silo, pequenas peças cônicas,

com dispositivo tipo retenção, que liberam o ingresso de ar comprimido ao interior, provocando a movimentação do pó depositado junto às paredes.

Nas visitas realizadas, observou-se que as condições ambientais na área de carregamento de caminhões apresentavam excessiva concentração de pó. Diante dessa observação, foi desenvolvido no projeto um sistema sob o silo de pó, constituído de uma estação fechada de carregamento de caminhões, alimentado por rosca transportadora e válvulas de descarga, com captação dedicada para captar o pó desprendido durante o carregamento dos caminhões.

#### 2.4.4 Descrição funcional básica

A filosofia de controle está fundamentada em não permitir o ingresso de gases na casa de filtros com temperaturas maiores que 100 °C. Para isso, primeiramente os picos de temperaturas dos gases são reduzidos pela ação dos componentes resfriados a água, que baixam as temperaturas para aproximadamente 430 °C. Em segundo lugar, ocorre a diluição com ar do sistema secundário, durante a combinação das vazões de ambos sistemas, primário e secundário, que podem atingir a temperatura de 130 °C, máxima admissível para ingressar na casa de filtros.

O projeto implantado é do tipo sistema combinado, captando as emissões primárias e secundárias dos fornos elétricos e dos fornos-panela simultaneamente. O controle operacional dos FEAs são independentes. O damper de controle de vazão localizado no duto principal do FEA3, chamado damper de equalização, possibilita que os dois sistemas de controle operem de forma independente.

O damper de modulação das emissões primárias é empregado para controlar a vazão de tal forma que o fluxo de exaustão, durante a fase de fusão do FEA, obtenha a captura das correntes de emissões gasosas que saem pela abóbada. Isso é completado com um controle de retro-

alimentação (*feedback*) baseado na temperatura do sistema primário. As posições dos dampers são ajustadas em relação às temperaturas, formando assim, a receita de operação. Essa receita é consolidada durante a fase de posta-em-marcha, onde uma tabela com o percentual de abertura do damper e as correspondentes temperaturas fixa o modo de operação.

A medição de temperatura ou pressão diretamente na abóbada do FEA apresenta dificuldades devido a reações químicas, elevadas concentrações de particulados e eventuais projeções de partículas. Para viabilizar esta medição, os medidores são dispostos em um ponto na seção do duto fixo resfriado, anterior à câmara de combustão.

A verificação periódica da performance de exaustão é executada através da medição de pressão, realizada na curva a montante da câmara de combustão. A informação do valor de pressão neste ponto normalmente varia de -25 a -60 mmCA. O valor da depressão registrada correlaciona-se diretamente com a capacidade de exaustão para cada FEA, permitindo, assim, ajuste de vazões entre os dois fornos elétricos.

O damper primário fica totalmente fechado durante a fase de carregamento. Permanece parcialmente fechado durante a fase de vazamento, para providenciar alguma exaustão para a abóbada do FEA, enquanto dedica a maior parte do fluxo para a coifa.

Para controlar o ar de diluição, responsável pelo resfriamento dos gases quentes no sistema primário, a temperatura da mistura das emissões primárias e secundárias dos FEAs e do forno-panela é medida no final de cada sistema. Essa temperatura serve como sinal de controle para o damper da coifa, sendo ajustada para 100 °C.

Para garantir uma adequada velocidade de transporte do material particulado, é ajustada a vazão mínima do ar de diluição, que também proporciona maior garantia de que a temperatura da mistura dos gases ficará abaixo de 100 °C.

A vazão de exaustão do forno-panela é controlada pelo damper na entrada do ventilador *booster*, segundo a posição da panela e pelo modo de operação do forno-panela. Quando a panela está fora da estação, o damper fica totalmente fechado, caso contrário, o damper abre para a posição previamente ajustada.

Cada ventilador *booster* do forno-panela está equipado com damper de saída para atuar em situações de manutenção.

O damper de equalização tipo veneziana, localizado próximo do final do sistema combinado do FEA 3, é empregado para balancear a disponibilidade de exaustão para que ambos os sistemas operem independentemente.

O damper de emergência protege a casa de filtros contra a incursão de temperaturas elevadas. Esse damper somente irá abrir rapidamente quando a temperatura exceder 120 °C.

O sequenciamento e o tempo de atuação dos dampers, durante a transição entre as fases de fusão, carregamento e vazamento, é de extrema importância para o desempenho do sistema, uma vez que garante a efetividade de captura das emissões nas mudanças de modos de operação.

Cada ventilador principal está equipado com damper modulador na entrada para maximizar o consumo de energia elétrica do motor elétrico. O damper de saída do ventilador é operado manualmente, sendo acionado em situações de manutenção.

Para os propósitos de ajuste de vazão e testes nos equipamento durante a posta-em-marcha, são instalados termopares em diversas posições dos dutos. Medidores de vazão também são instalados nas principais seções de dutos resfriados para garantir a correta distribuição de água nos circuitos.

As Figuras 41 a 46, mostram as principais telas do sistema de supervisão eletrônica nos painéis de controle. Apresentam de forma esquemática os fluxos e os equipamentos do sistema de despoeiramento com as respectivas instrumentações.

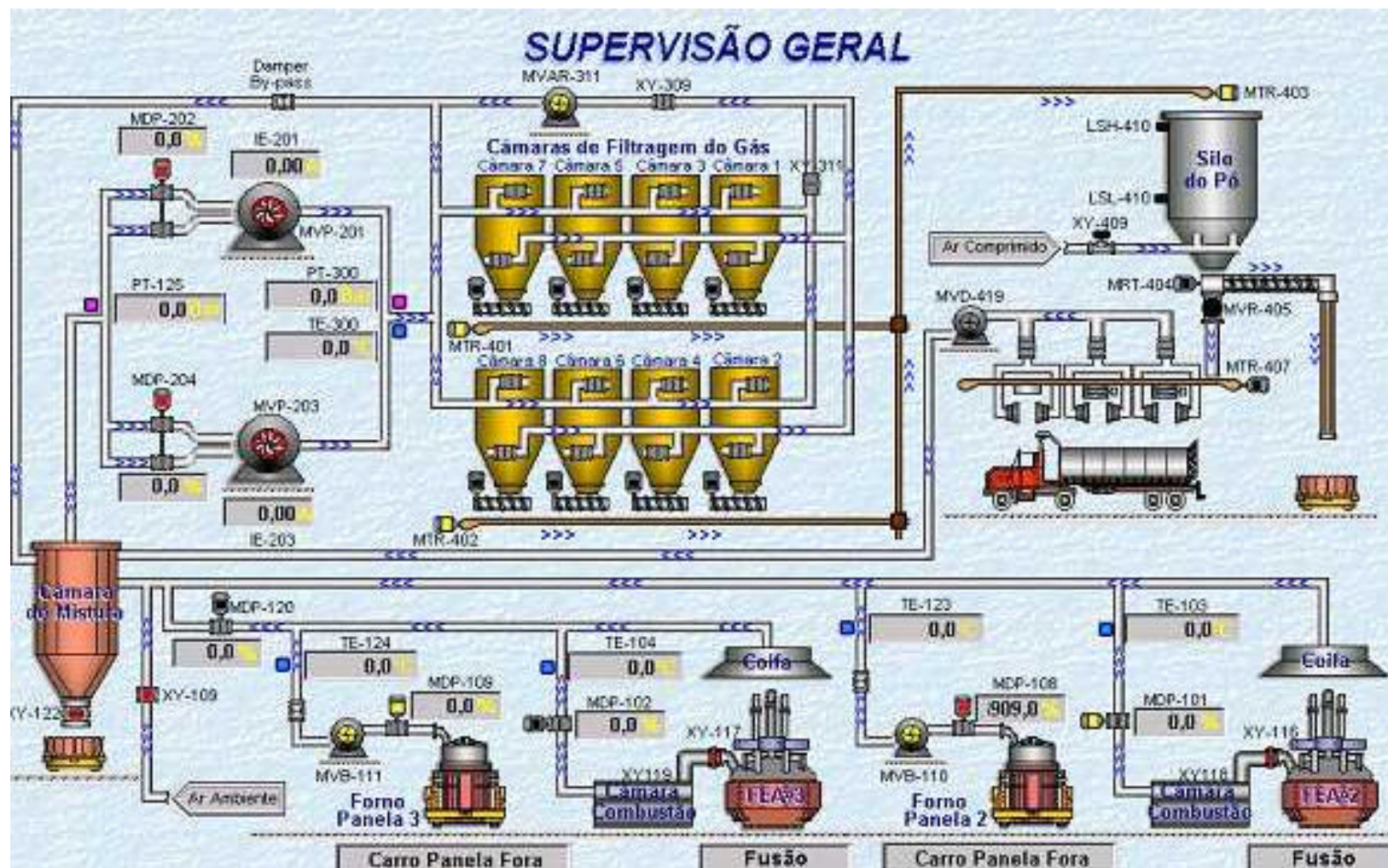


Figura 41 - Tela de supervisão geral.

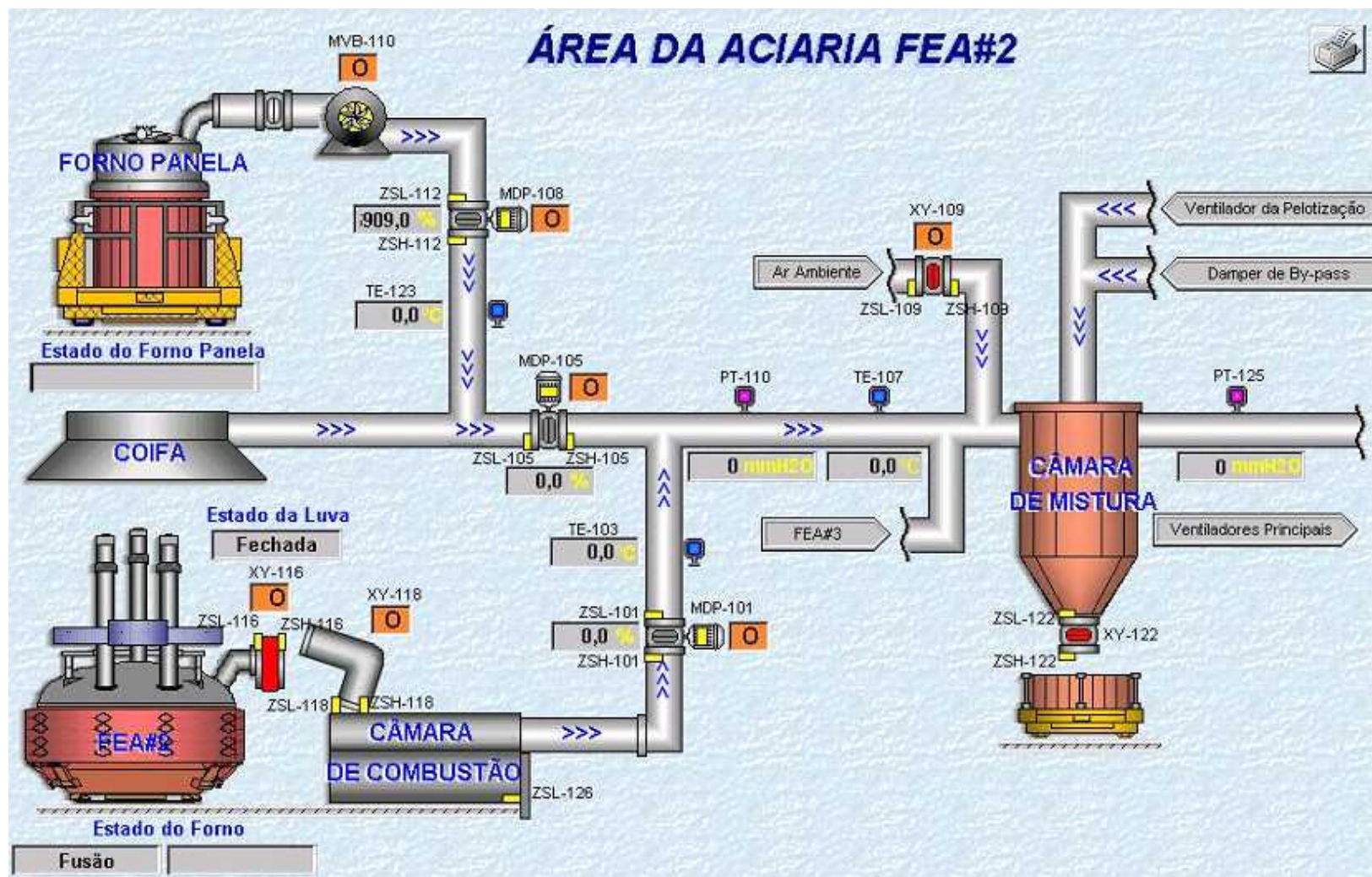


Figura 42 - Tela de supervisão de dutos.

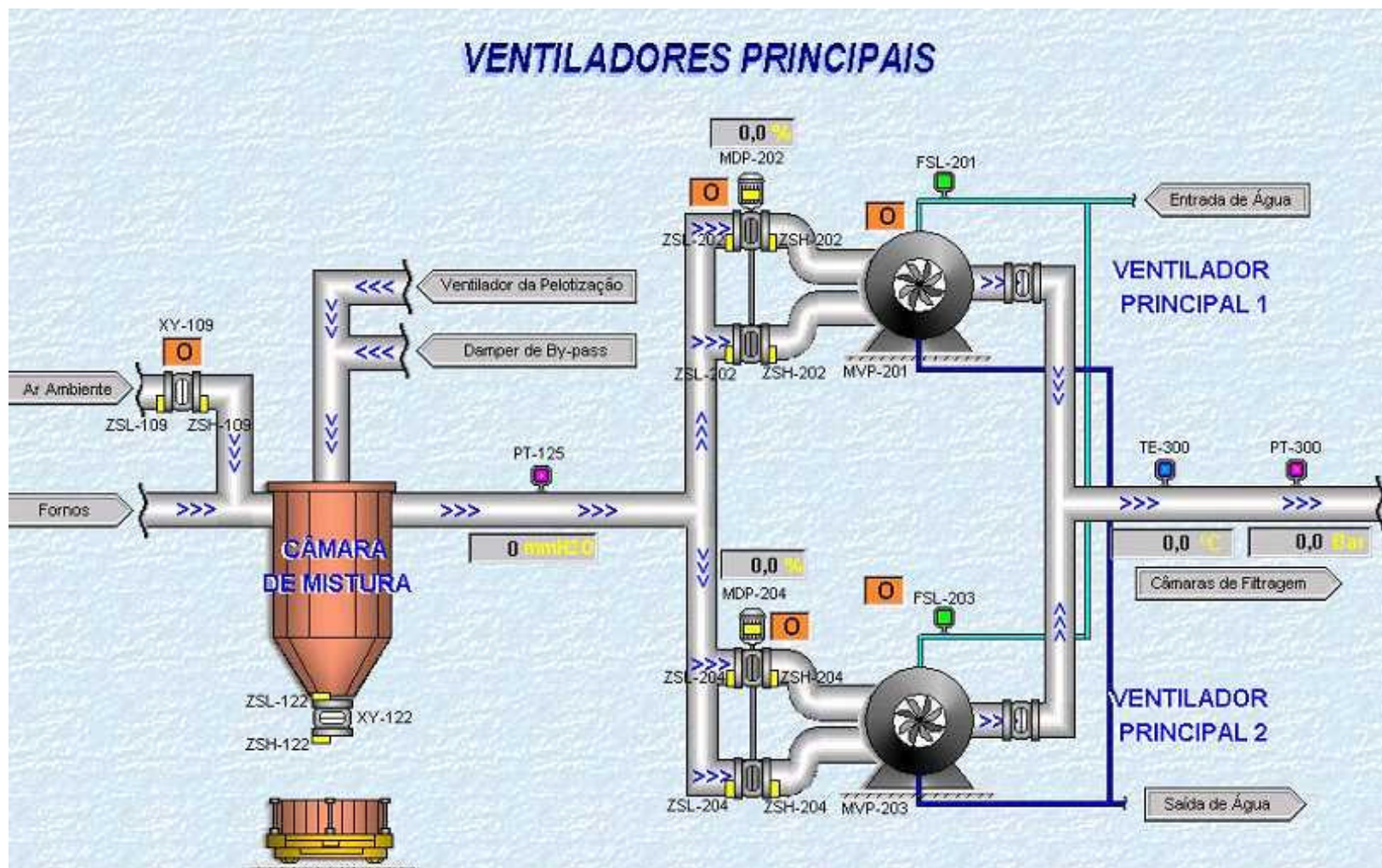


Figura 43 - Tela de supervisão dos ventiladores.

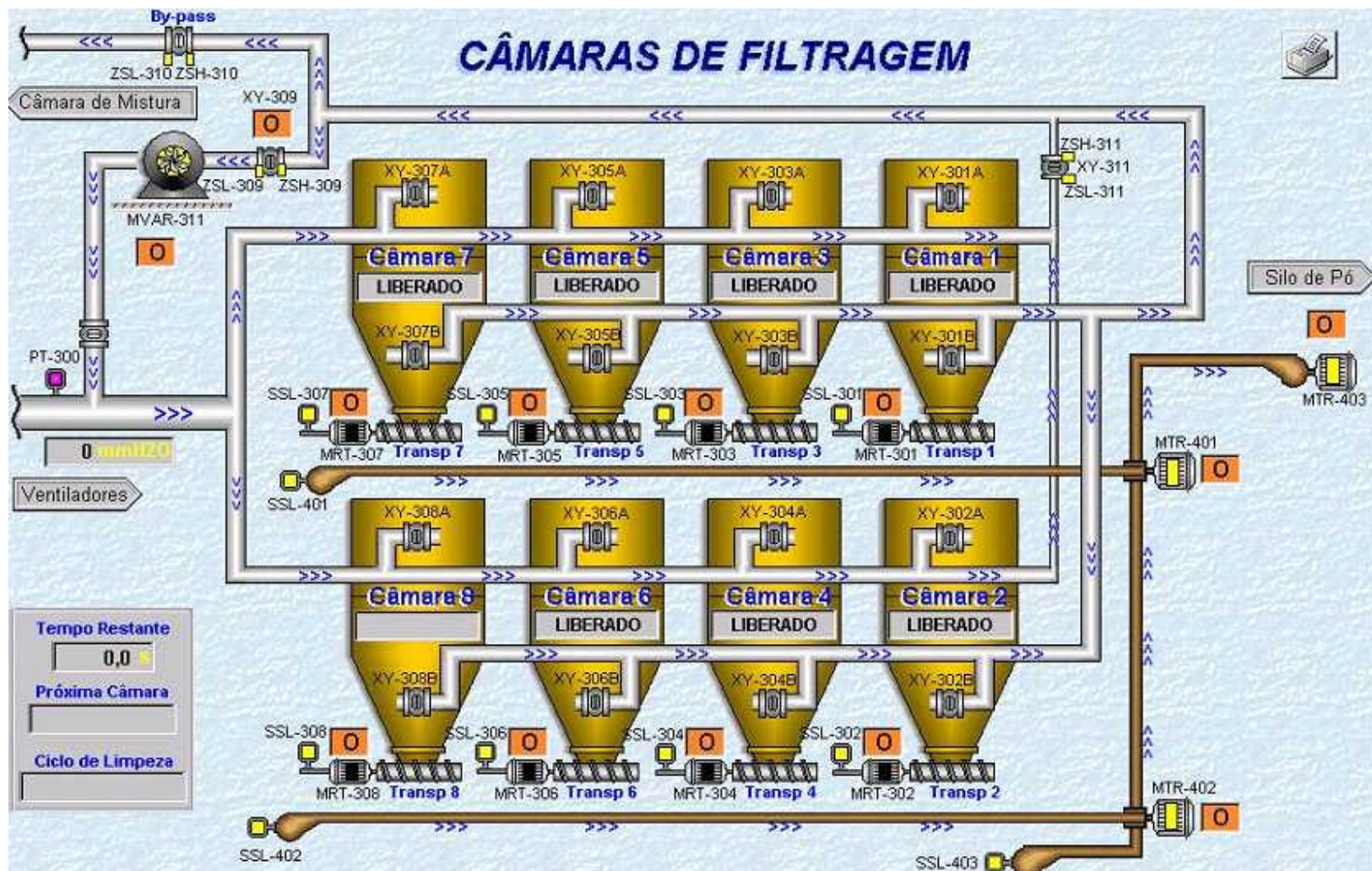


Figura 44 - Tela de supervisão da casa de filtros.



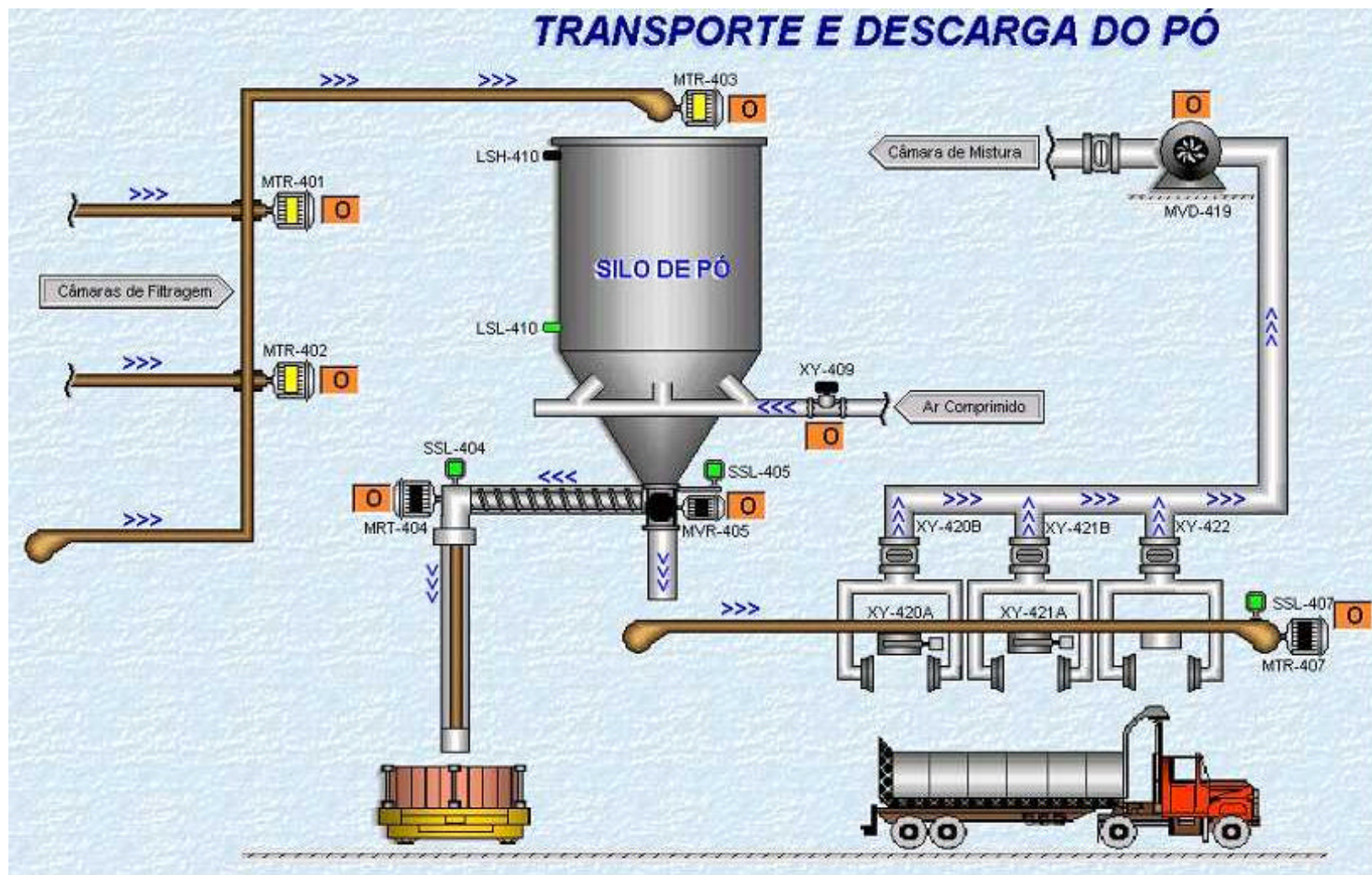


Figura 45 - Tela de transporte e descarga de pó.

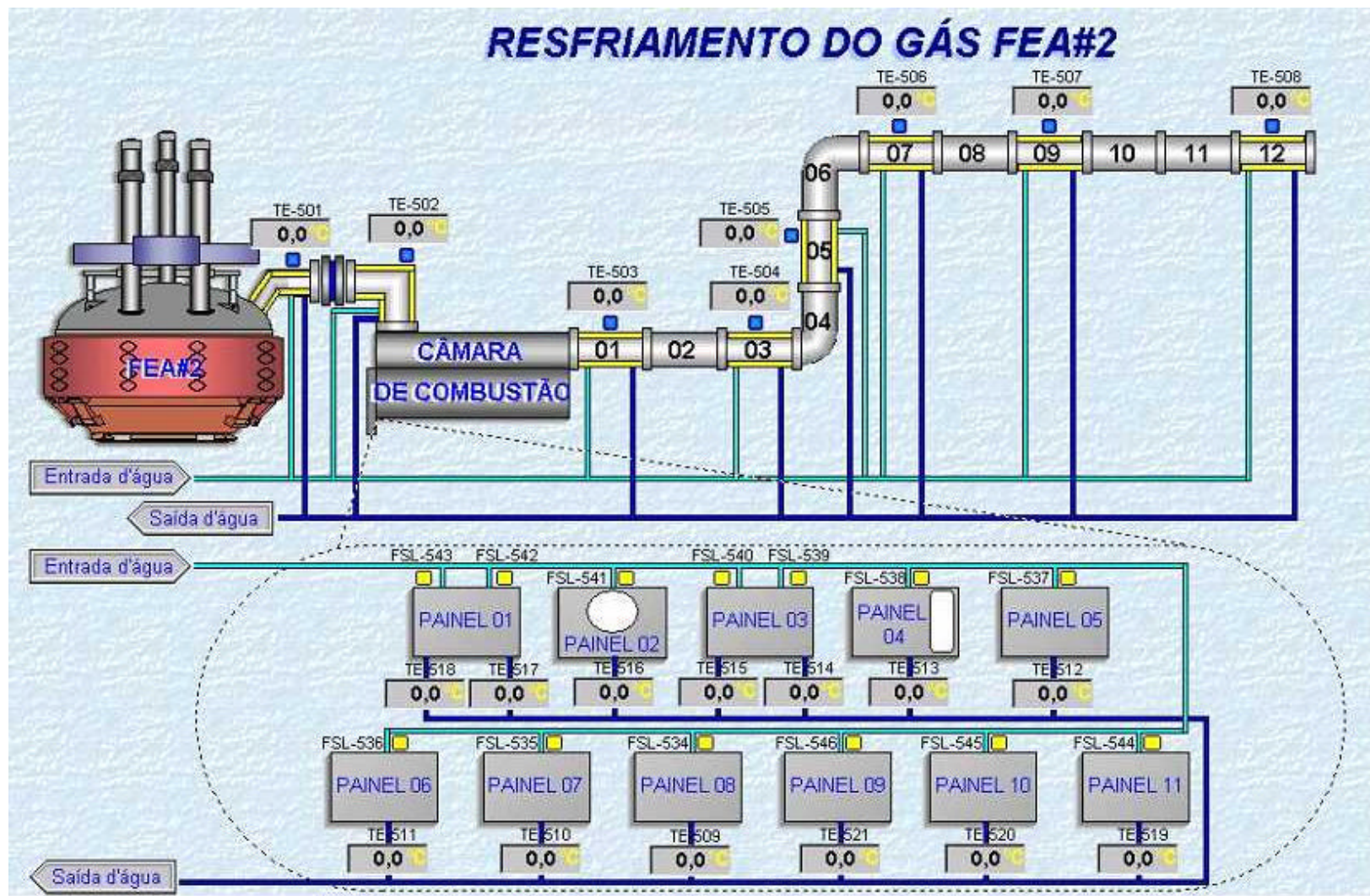


Figura 46 - Tela de supervisão dos controladores de temperaturas da água de resfriamento dos dutos.

A Tabela 18 apresenta resumidamente o conceito adotado para atuação dos dampers de controle. Os valores informados são orientativos, uma vez que o sistema supervisor eletrônico de controle permite uma precisão ajustada ao processo produtivo.

*Tabela 18 - Sumário do conceito adotado para o controle dos dampers (% de abertura do damper)*

| Condição de Operação do EAF                           |  | Damper do Sistema Primário               | Damper da Coifa                          | Damper Principal de controle FEA3                          | Damper do Forno-panela | Damper Ar de Diluição Câmara de Mistura |
|---|--|--|--|--|------------------------|---|
| <b>Fusão</b>  |  | Modulado pelo Transmissor de Temperatura | Modulado pelo Transmissor de Temperatura | Modulado pela equalização dos Transmissores de Temperatura | 90%                    | 0%                                      |
| <b>Carregamento</b>                                   |  | 0%                                       | 100%                                     | Modulado pela equalização dos Transmissores de Temperatura | 50%                    | 0%                                      |
| <b>Vazamento</b>                                      |  | 0%                                       | 100%                                     | Modulado pela equalização dos Transmissores de Temperatura | 50%                    | 0%                                      |
| <b>Alta temperatura na entrada da casa de filtros</b> | <b>T&gt;120°C</b>                          | Modulado pelo Transmissor Temperatura    | 100%                                     | 0%   | 50%                    | 0%                                      |
|   | <b>T&gt;120°C</b><br><b>Tempo &gt;30 s</b> | Modulado pelo Transmissor Temperatura    | 100%                                     | 100%   | 90%                    | 100%                                    |
| <b>Parada do FEA</b>                                  | <b>T&gt;120°C</b><br><b>Tempo&gt;30 s</b>  | Modulado pelo Transmissor Temperatura    | 100%                                     | 100%   | 90%                    | 100%                                    |

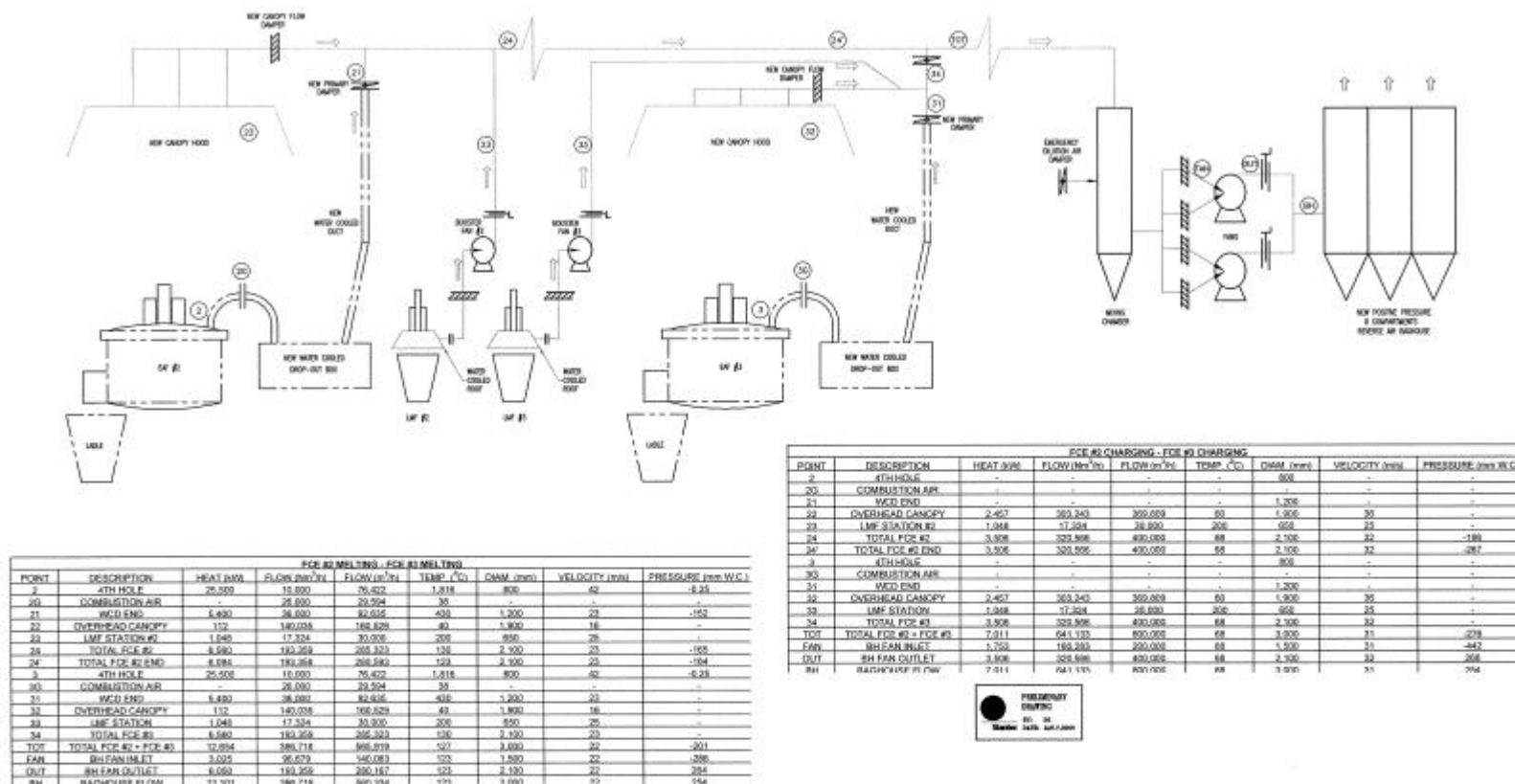
O desenho U-575-P-110, da Figura 47, apresenta o fluxograma de processo do novo sistema de despoejamento. Neste desenho, todos os componentes do sistema, as vazões e temperaturas previstas, são demonstradas para os diferentes pontos do sistema.

O desenho U-575-A-131, da Figura 48, apresenta o conjunto geral da área da casa de filtros, o sistema de ventiladores, a câmara de mistura e o prédio para estocagem e carregamento de pó.

O desenho U-575-A-130, da Figura 49, mostra o arranjo geral do sistema de despoeiramento, com os dutos partindo da geração das emissões, junto aos EAFs, até o sistema de tratamento.

O desenho U-575.17-M-01, da Figura 50, apresenta o conjunto geral do sistema de transporte e armazenamento do pó, com silo, prédio para carregamento dos caminhões e dutos para captação das emissões geradas no abastecimento.

O desenho U-575.10-M-04, Figura 51, mostra a seção transversal do sistema de despoeiramento junto ao FEA 2. Essa figura ilustra a montagem da curva fixa sobre a abóbada, a curva móvel ou *elbow* e a câmara de combustão.



NOTES:  
 1. USE COMPARTMENT OFF-USE ALL THE TIME FOR CLEANING OR MAINTENANCE  
 2. RH FAN MUST HAVE TRIPPER INSTALLED IN DUCTWORK BEFORE MELTING - BEING USED ONLY  
 3. ADD DE OR PA INLET AND USE DE PA INLET PRESSURE FOR COMBUSTION WHEN SCOLDING

**FCE #2 CHARGING - FCE #3 CHARGING**

| POINT | DESCRIPTION           | HEAT (kW) | FLOW (m³/min) | FLOW (m³/h) | TEMP. (°C) | DIAM. (mm) | VELOCITY (m/s) | PRESSURE (mm W.C.) |
|-------|-----------------------|-----------|---------------|-------------|------------|------------|----------------|--------------------|
| 2     | 4TH HOLE              | -         | -             | -           | -          | 800        | -              | -                  |
| 20    | COMBUSTION AIR        | -         | -             | -           | -          | -          | -              | -                  |
| 21    | WCD END               | -         | -             | -           | -          | 1.200      | -              | -                  |
| 22    | OVERHEAD CANOPY       | 2.467     | 303.243       | 309.800     | 60         | 1.500      | 30             | -                  |
| 23    | LMF STATION #2        | 1.048     | 17.324        | 30.000      | 200        | 600        | 25             | -                  |
| 24    | TOTAL FCE #2          | 3.506     | 320.566       | 490.800     | 68         | 2.100      | 22             | -189               |
| 24    | TOTAL FCE #2 END      | 3.506     | 320.566       | 490.800     | 68         | 2.100      | 22             | -207               |
| 3     | 4TH HOLE              | 25.500    | 15.000        | 75.422      | 1.818      | 800        | 42             | -0.28              |
| 30    | COMBUSTION AIR        | -         | 28.000        | 29.504      | 30         | -          | -              | -                  |
| 31    | WCD END               | 8.490     | 36.000        | 92.016      | 430        | 1.200      | 23             | -                  |
| 32    | OVERHEAD CANOPY       | 132       | 180.000       | 168.828     | 40         | 1.500      | 16             | -                  |
| 33    | LMF STATION           | 1.048     | 17.324        | 30.000      | 200        | 600        | 28             | -                  |
| 34    | TOTAL FCE #3          | 8.680     | 193.358       | 205.323     | 130        | 2.100      | 23             | -                  |
| TOT   | TOTAL FCE #2 + FCE #3 | 10.089    | 613.928       | 894.800     | 67         | 3.000      | 22             | -274               |
| FAN   | RH FAN INLET          | 2.521     | 126.481       | 171.490     | 67         | 1.500      | 22             | -411               |
| OUT   | RH FAN OUTLET         | 5.042     | 256.963       | 342.980     | 67         | 2.100      | 22             | 280                |
| RH    | RAFTERS INLET FLOW    | 10.089    | 613.928       | 894.800     | 67         | 3.000      | 22             | 254                |

Figura 47 - Desenho U-575-P-110 – Fluxograma geral processo.

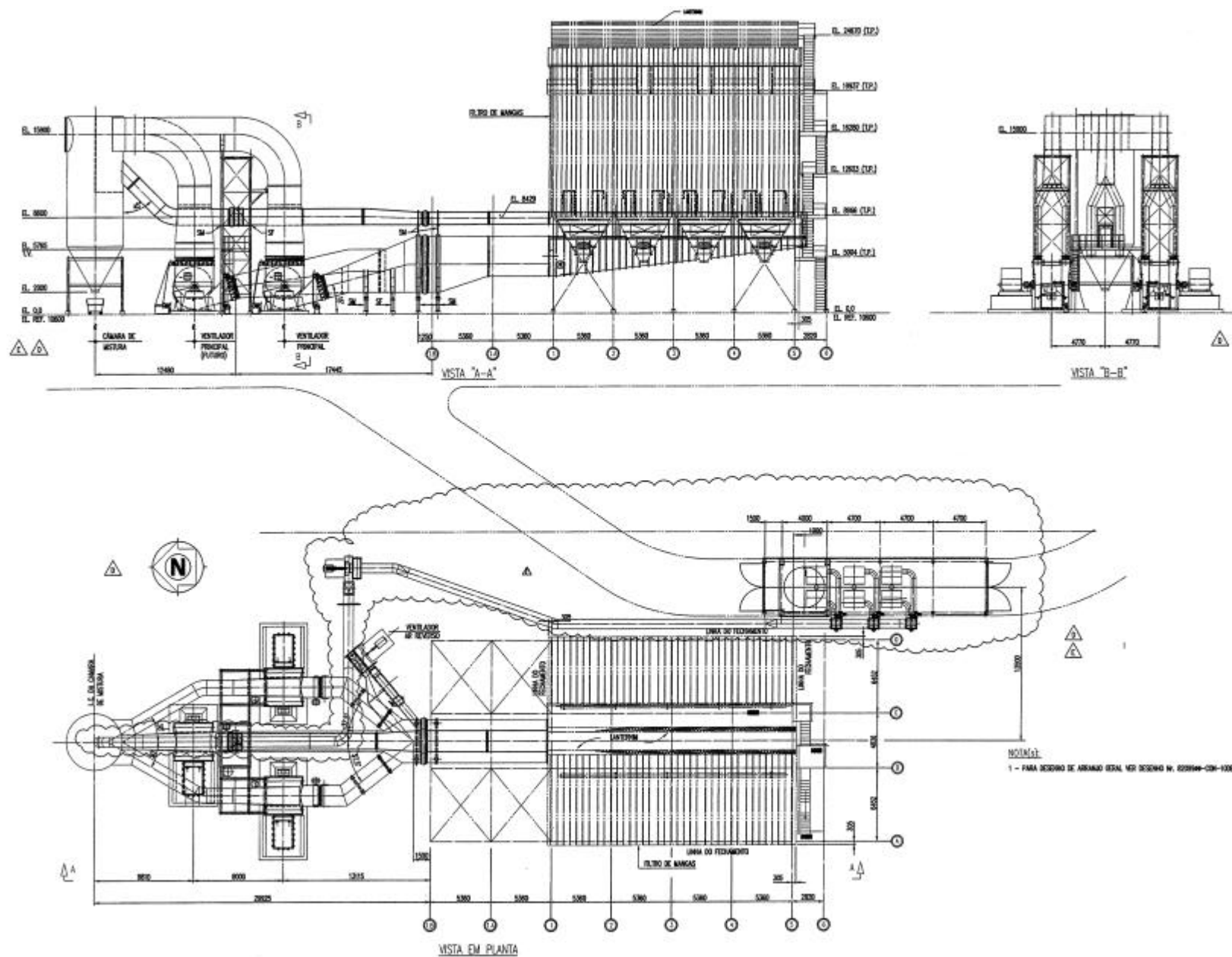


Figura 48 - Desenho U-575-A-131 - Conjunto geral da área da casa de filtros.

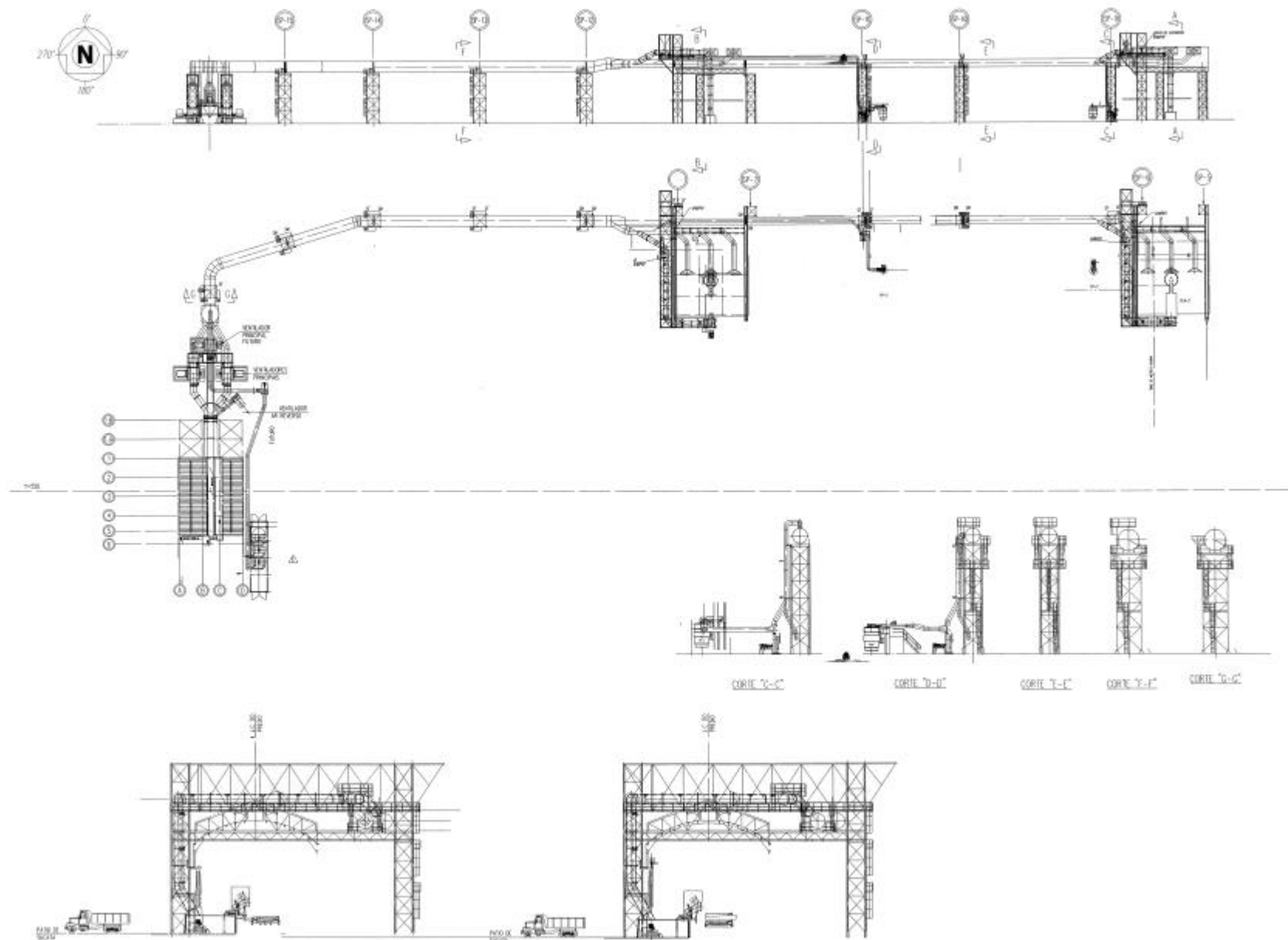


Figura 49 - Desenho U-575-A-130 - Arranjo geral do sistema de despoejamento.

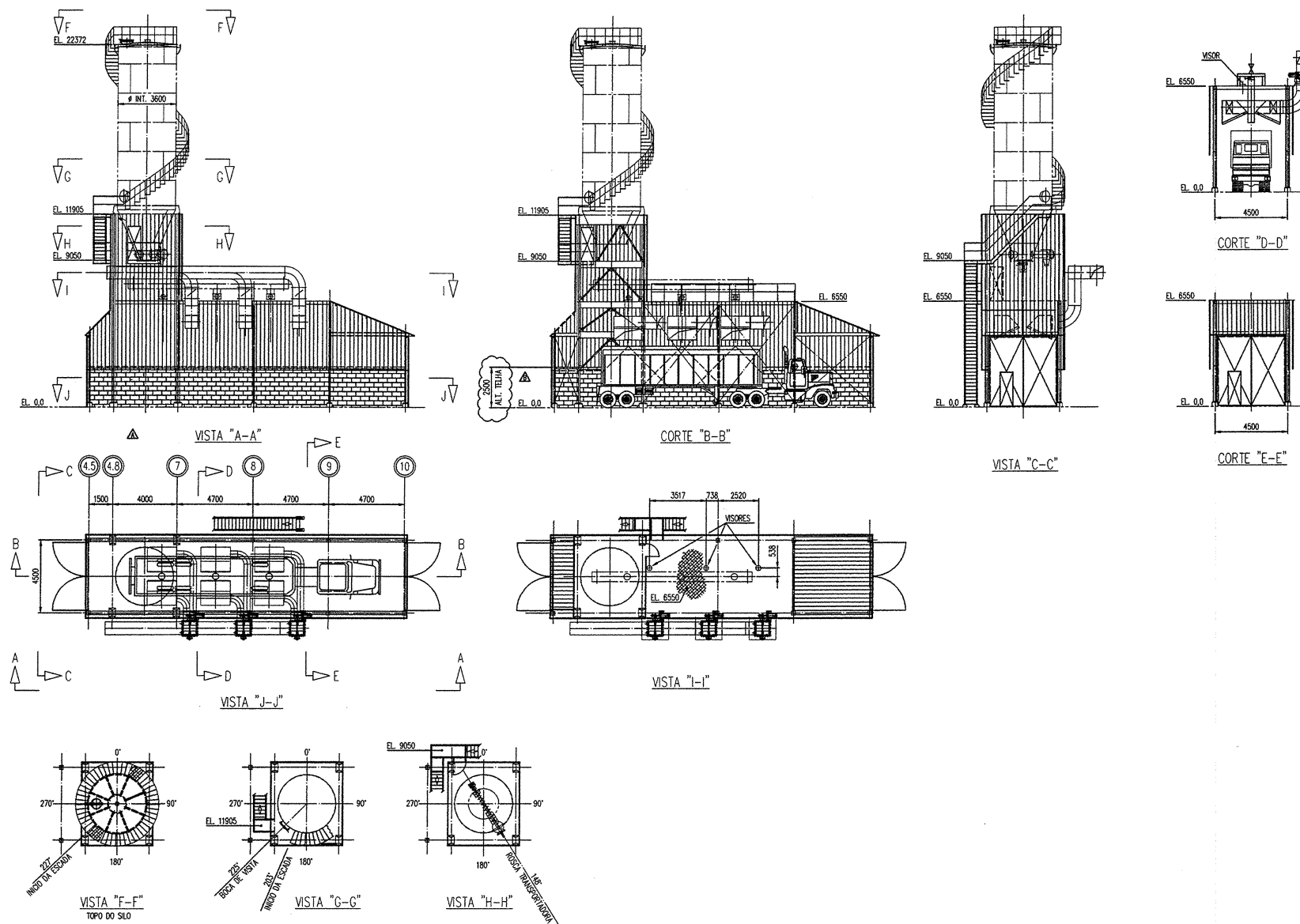


Figura 50 - Desenho U-575.17-M-01 - Conjunto geral do sistema de transporte e armazenamento do pó.



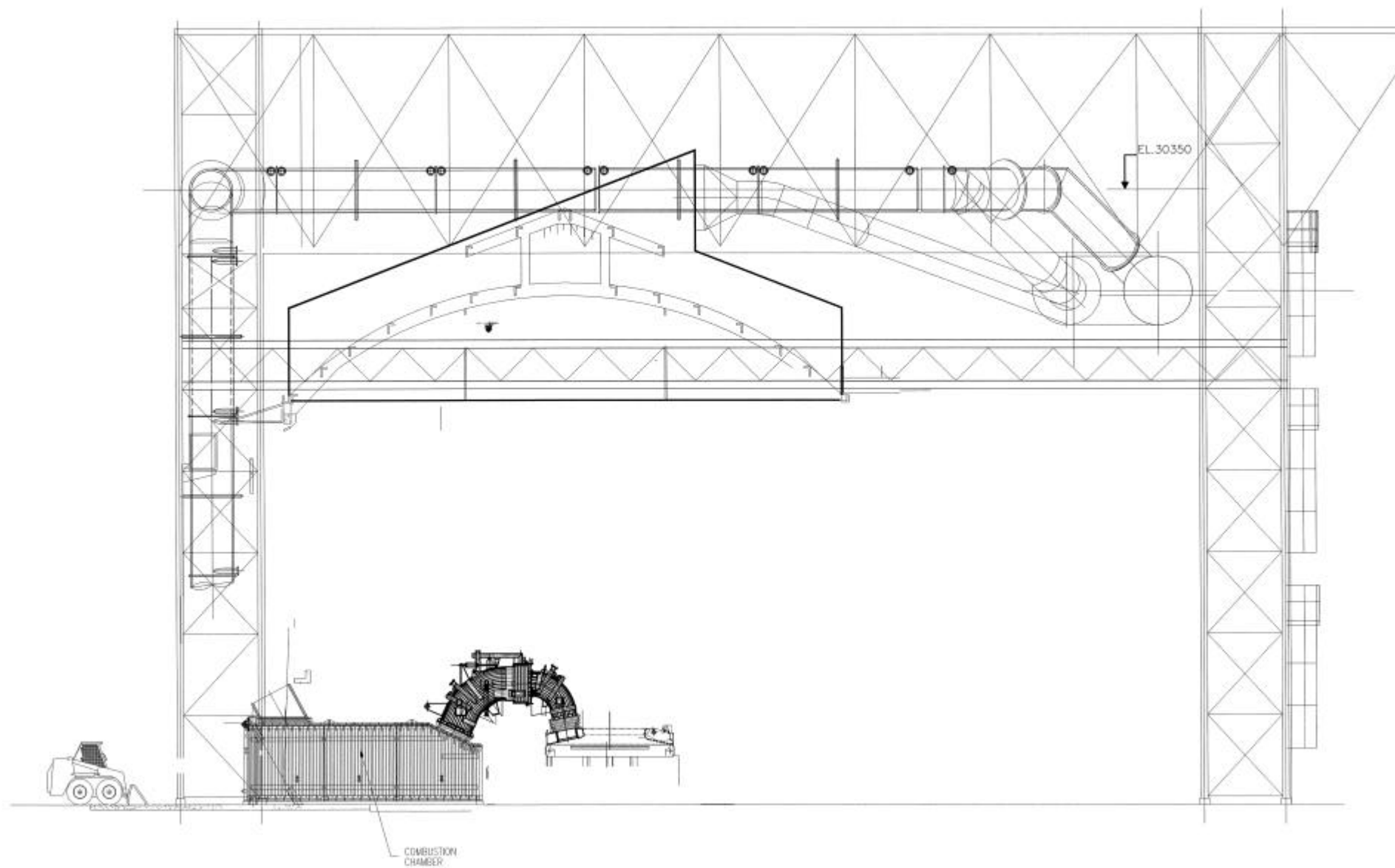


Figura 51 - Desenho U-575.10-M-04 - Seção transversal do sistema de despoejamento junto ao FEA2.

#### 2.4.5 Custos para implantação do investimento

O controle orçamentário foi uma importante ferramenta no gerenciamento da implantação do projeto. O investimento total do novo sistema de despoejamento foi de US\$ 7,4 milhões, onde 55% corresponderam a equipamentos e os demais 45% ficaram divididos em instalações, montagem, gerenciamento, projetos e softwares.

A informação do peso foi uma importante ferramenta na definição do processo montagem. A distribuição do peso dos principais componentes do sistema está apresentada na Tabela 19.

*Tabela 19 - Peso dos principais componentes do sistema*

| <b>Componente</b>               | <b>Peso (toneladas)</b> |
|---------------------------------|-------------------------|
| Cotovelo fixo / móvel           | 12                      |
| Câmara de combustão             | 25                      |
| Dutos refrigerados              | 75                      |
| Dutos secos / câmara de mistura | 273                     |
| Coifa + estrutura suporte       | 84                      |
| Tubulações de água              | 36                      |
| Coifa / dutos forno-panela      | 10                      |
| Ventiladores + motores          | 38                      |
| Casa de mangas                  | 320                     |
| Sistema de pó                   | 93                      |
| Estruturas complementares       | 224                     |
| <b>Total</b>                    | <b>1.190</b>            |

### **3 NOVO DESPOEIRAMENTO - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 VISITAS REALIZADAS**

A seguir são apresentados os comentários e observações do autor, identificados durante as visitas realizadas em outras siderúrgicas, e as definições acordadas com as empresas contratadas para elaborar o projeto.

As vistas técnicas realizadas possibilitaram o conhecimento das práticas disponíveis e adotadas em algumas empresas siderúrgicas localizadas em países desenvolvidos.

As dificuldades ou pontos críticos identificados nas visitas serviram para orientar e concentrar esforços na busca de soluções otimizadas para o novo projeto. O aprendizado obtido nesta fase, foi transferido para o projeto. Destaca-se como exemplo o sistema desenvolvido no novo projeto para o carregamento de pó, que objetivou resolver a dificuldade de confinamento do pó coletado nos filtros, ponto crítico identificado em muitas instalações visitadas.

As observações descritas a seguir, confirmaram que a maioria das instalações visitadas apresentavam dificuldade para assegurar a captação total das emissões geradas na fase de carregamento da carga fria.

Para melhor orientar as avaliações visuais das performances dos sistemas de despoeiramento nas visitas técnicas realizadas, foram adotados os critérios da Norma da CETESB-Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, L9.061 (1979), que trata da determinação de grau de enegrecimento de fumaça emitida por fontes estacionárias, utilizando a escala Ringelmann reduzida. Essa Norma estabelece uma escala que permite comparar a

tonalidade da emissão com o padrão colorimétrico. A escala pode variar de 1 a 5, que corresponde, respectivamente, a densidades de fumaça que variam de 20% a 100%.

### 3.1.1 Empresa Siderúrgica Francesa 2

A eficiência de captação do forno durante a visita estava boa, com densidade de enegrecimento abaixo de 20%, segundo a escala Ringelmann reduzida, no lanternim do prédio e no ambiente interno da Aciaria. Porém, aumentava a densidade durante as operações de carregamento do forno elétrico.

### 3.1.2 Empresa Siderúrgica Alemã 1

Apesar das instalações de despoeiramento serem de grandes dimensões, a captação primária apresentava deficiência, identificada pela elevada densidade de enegrecimento, acima de 20% no interior do prédio, mesmo durante a operação de fusão.

### 3.1.3 Empresa Siderúrgica Japonesa 1

O sistema na ocasião da visita operava muito bem, com densidade de enegrecimento abaixo de 20%. Não foi observada nenhuma emissão para o lado externo da Aciaria. O prédio da Aciaria possui um elevado nível de fechamento, dificultando o ingresso de ventos que poderiam deslocar a pluma ascendente durante o carregamento.

### 3.1.4 Empresa Siderúrgica Japonesa 2

Durante a fusão foi observada uma elevada concentração de material particulado no ambiente interno da Aciaria. Pela verificação visual, a densidade de enegrecimento estava entre 40 e 60%.

### 3.1.5 Empresa Siderúrgica Japonesa 3

Durante a fusão a captação dos gases no quarto furo operava com baixos níveis de enegrecimento no interior da Aciaria. Entretanto, não ocorria a captação durante a fase de carregamento, elevando sensivelmente o grau de enegrecimento observado do lado externo do prédio da Aciaria.

### 3.1.6 Empresa Siderúrgica Japonesa 4

Observado que o gap (abertura no duto) após a primeira curva fixa da abóbada antes da curva móvel, responsável pela entrada de ar de diluição no sistema, estava muito aberto, maior que 200 mm.

As circunstâncias locais estabeleceram que os fornos operassem no horário das 21 horas às 9 horas. Durante o dia, operava apenas o forno-panela. A captação apresentava baixa eficiência, observada pelo alto nível de enegrecimento no interior da Aciaria, conforme mostra a Figura 52.



*Figura 52 - Forno elétrico em operação de fusão.*

### 3.1.7 Empresa Siderúrgica Chilena 1

Observado baixo nível de ruído no interior do prédio e uma boa eficiência de captação das emissões atmosféricas, constatada pelo baixo nível de enegrecimento no interior da Aciaria.

## 3.2 ESTUDOS DE DISPERSÃO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

A avaliação das dispersões gasosas objetivou prever a contribuição do material particulado (MP) das emissões da casa de filtros na qualidade do ar. Neste trabalho, são apresentados resultados dos dois estudos de dispersão realizados através de modelagem matemática. O primeiro foi elaborado antes da implantação do sistema de despoeiramento e o segundo, após a sua implantação.

A empresa ERM - Environmental Resources Management (2002) informou que a utilização de modelos matemáticos como ferramenta para os estudos de dispersão

atmosférica, para avaliação do impacto das emissões sobre a qualidade do ar, depende de diversos fatores, destacando-se:

- a ) a disponibilidade de dados meteorológicos e topográficos locais;
- b ) a qualidade e quantidade de dados básicos disponíveis, tais como os dados de emissões, meteorológicos, qualidade do ar, etc;
- c ) o detalhamento do sistema a ser avaliado;
- d ) a capacitação técnica das pessoas que se utilizam desses modelos como instrumento auxiliar de decisão;
- e ) a limitação dos recursos disponíveis para configuração e o uso dos modelos.

Em geral, os modelos de dispersão são aplicados com melhores resultados em áreas com topografia e meteorologia relativamente simples, uma vez que essas variáveis podem tornar a simulação extremamente difícil. Os modelos empregados nos casos mais complexos são comumente desenvolvidos para um local ou processo específico e não devem ser utilizados de forma generalizada.

O modelo ISC Industrial Source Complex, referendado pela USEPA e desenvolvido pela “*Bowman Environmental Engineering*” é um modelo estacionário “*Steady-State*” e fundamenta-se na distribuição gaussiana. É indicado para o uso quando a região onde se localizam as fontes emissoras possui topografia simples ou complexa.

Este modelo tem sido amplamente aplicado em estudos de projetos de chaminés, de redes de monitoramento, de estudos de impacto ambiental e de avaliação da qualidade do ar, entre outros. O ISC possui duas versões:

- a ) ISC ST (*Short Term*) - calcula a concentração das emissões para períodos de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 24 horas. Se aplicado com uma seqüência anual de dados meteorológicos horários, calcula a concentração anual;

- b) ISC LT (*Long Term*) - utiliza dados estatísticos do regime dos ventos para calcular a concentração sazonal ou anual das emissões.

### 3.2.1 Estudo de dispersão anterior a implantação do projeto

A correta caracterização das condições da qualidade do ar na área de influência é um importante pré-requisito para o estudo de dispersão. As variações das correntes de ventos influenciam a dispersão da pluma ascendente do sistema de despeiramento.

A caracterização da qualidade do ar na zona de influência deste trabalho, bem como a caracterização climática foi extraída do EIA-RIMA da Gerdau Riograndense (1998).

Os principais processos atmosféricos que determinam o potencial de dispersão atmosférica dependem de um conjunto de parâmetros meteorológicos que atuam no sentido de transportar, dispersar e concentrar os níveis de poluição numa determinada região.

Sistemas de larga escala, como os anticiclones, baixas pressões e sistemas frontais que se propagam sobre escalas menores, representam o início do efeito das condições atmosféricas sobre a dispersão das emissões. Cada sistema destes atua em maior ou menor escala sobre os continentes, dependendo da época do ano, sendo este deslocamento sazonal responsável pela maior concentração ou dispersão dos níveis de poluição sobre regiões industrializadas.

A Grande Porto Alegre possui clima bastante peculiar no que se refere à dispersão turbulenta do ar quando se compara com outras metrópoles industrializadas do País. Trata-se de região quase plana, cujas condições meteorológicas são dominadas pela persistente passagem de sistemas frontais, formando o que se chama de condição de baroclinia em relação à dinâmica de circulação do clima local. Em Sapucaia do Sul, o tipo climático é clima mesotérmico (temperatura média do mês mais frio abaixo de 18°C), subtropical úmido sem estação seca e verão quente, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 22°. A precipitação é uniformemente distribuída durante o ano e os totais são superiores a 1400 mm.



a) Dados meteorológicos

Dentre as estações meteorológicas existentes, selecionou-se as que se encontram mais próximas do distrito industrial, de acordo com a Tabela 20.

*Tabela 20 - Estações climatológicas da área em estudo.*

| <b>Estação</b> | <b>Órgão</b> | <b>Coordenadas</b>      | <b>Período</b> |
|----------------|--------------|-------------------------|----------------|
| Porto Alegre   | INMET        | 30°03' S; 51°10' W; 47m | 1916 a 1988    |
| Triunfo        | INMET        | 29°52' S; 51°23' W; 40m | 1979 a 1988    |

O vento de superfície representa o ar em movimento na baixa atmosfera, cuja importância está ligada diretamente ao transporte e dispersão das emissões. A maneira mais objetiva de se visualizar a atuação do vento ao longo dos diversos setores é através do gráfico chamado Rosa dos Ventos.

Elaborou-se uma Rosa dos Ventos com os dados da estação meteorológica de Porto Alegre e outra da região de Triunfo. Os dados de Porto Alegre representam um histórico de 62 anos, enquanto os de Triunfo, 3 anos. Apesar dos dados referentes à estação de Triunfo pertencerem a uma série não muito longa, a mesma permitiu analisar o vento pela manhã, à tarde e à noite, onde se verificou que em qualquer período do dia ocorre uma predominância da direção Sudeste, com mais de 23% do tempo. Em Porto Alegre, essa predominância atinge 36%, significando que apesar do vento soprar nas demais direções em baixas porcentagens, preferencialmente, passa boa parte do tempo soprando do setor sudeste para noroeste, isto é, de Porto Alegre para a região de Sapucaia do Sul. As Rosas dos Ventos estão representadas nas Figuras 53 a 56. Na estação meteorológica de Porto Alegre, os valores registrados de velocidade média do vento variam entre 1,4 e 2,9 m/s, com uma velocidade média anual de

2,2 m/s. Em Triunfo, esses valores são de 2,2 a 2,8 m/s, com uma velocidade média anual de 2,5 m/s.

Rosa dos ventos de Porto Alegre 1916-1988

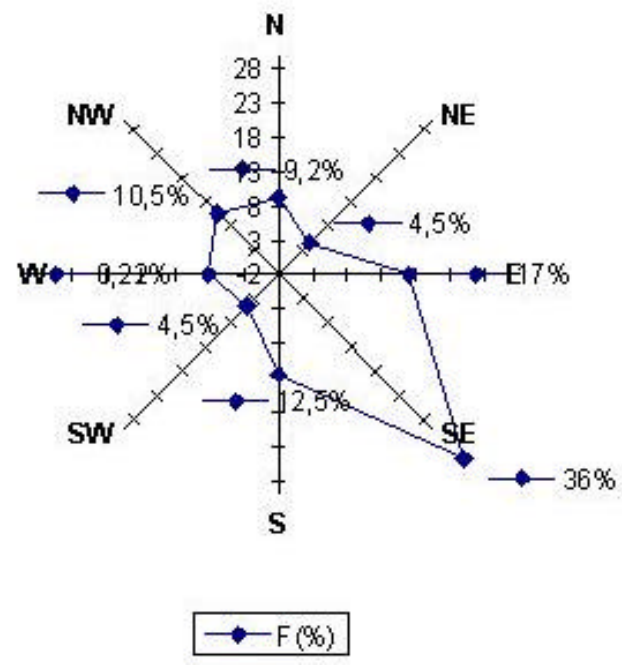


Figura 53 - Rosa dos ventos de Porto Alegre - período 1916/1988.

Rosa do vento, 93-95, Est. Triunfo

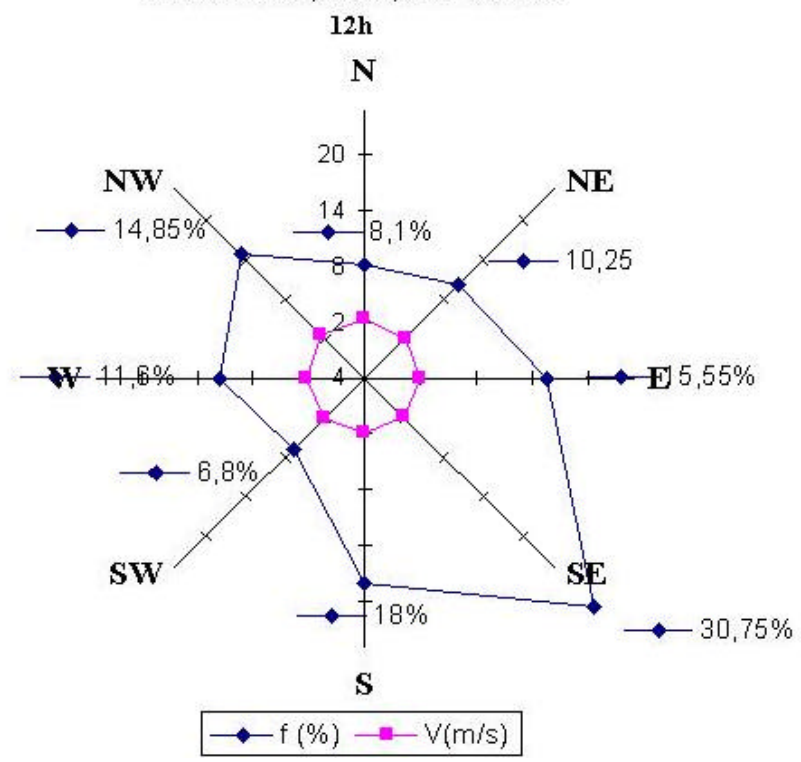


Figura 54 - Rosa dos ventos da região de Triunfo - período 1993/1995, 12h.

**Rosa dos ventos/93-95, Est. Triunfo,**

**18 h.**

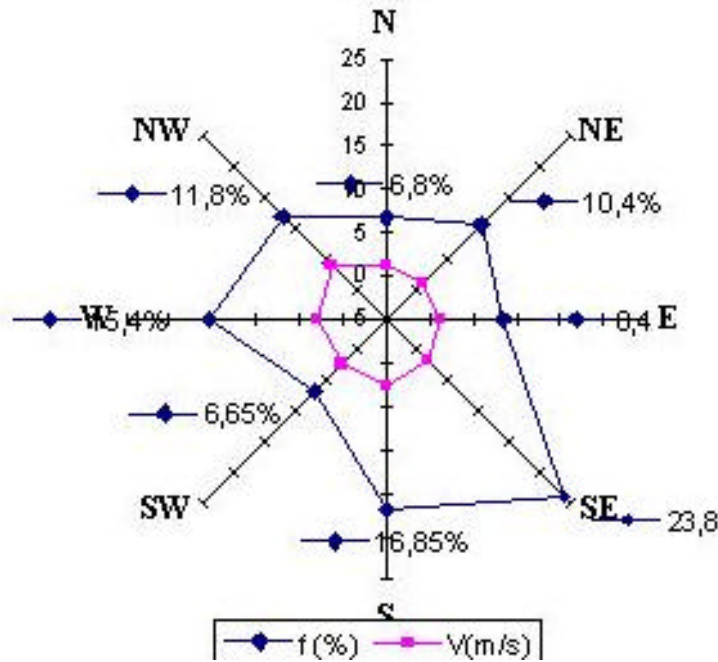


Figura 55 - Rosa dos ventos da região de Triunfo - período 1993/1995, 18h.

**Rosa dos ventos, 93-95, Est. TriunfoR,**

**24h**

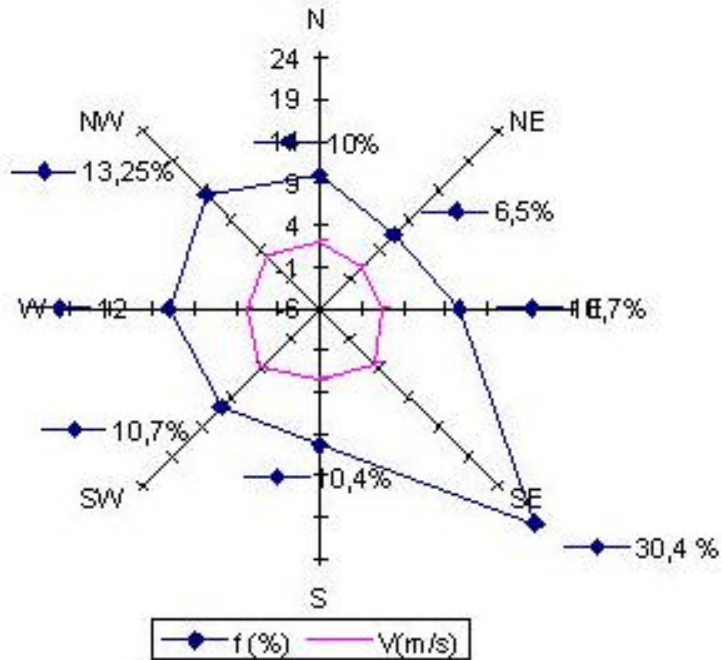


Figura 56 - Rosa dos ventos da região de Triunfo - período 1993/1995, 24h.

Fisicamente, esse cenário não tem como mudar devido ao efeito de brisa gerado pelo lago Guaíba, rios Jacuí e dos Sinos, associado ao fluxo de sudeste vindo do litoral e da Lagoa dos Patos.

Portanto, em boa parte do tempo, as emissões seguirão a trajetória no sentido noroeste em relação à Gerdau Riograndense, ou seja, de Porto Alegre para a região de Sapucaia do Sul, com frequência muito baixa no sentido oposto. Apenas nos meses de junho e julho foi registrada na estação meteorológica de Triunfo a ocorrência de ventos predominantes de direção norte.

As condições meteorológicas de superfície e do perfil vertical da atmosfera combinados com a situação geográfica local são fatores que definem a capacidade de dispersão e transporte de poluentes na baixa atmosfera.

Foram considerados os seguintes elementos para a definição dos dias que apresentavam uma situação meteorológica crítica para a poluição atmosférica:

- velocidade do vento;
- pressão atmosférica;
- condição de estabilidade;
- altura da base da camada de inversão térmica;
- nebulosidade.

A velocidade do vento influencia a dispersão e o transporte dos poluentes na atmosfera. Quando a velocidade do vento é inferior a 2 m/s (calmaria), acentuam-se as condições favoráveis à concentração de poluentes, tornando-se menos críticas à medida que a velocidade do vento aumenta.

A pressão atmosférica, quando analisada em seus valores de superfície, indica a presença de ciclones ou anticiclones. Os anticiclones, centros de alta pressão, são situações de

movimentos subsidentes. Ao contrário, os ciclones, ou centros de baixa pressão, são células onde o movimento do ar é ascendente.

Em meteorologia, as palavras estabilidade e instabilidade são usadas para indicar situações de equilíbrio. A atmosfera dita instável é favorável à dispersão, pois significa que o ar está em movimento ascendente, permitindo a dispersão dos poluentes no sentido vertical. A atmosfera estável, ao contrário, não favorece o transporte e a dispersão da poluição, pois nesta situação a turbulência do ar é mínima. Quando neutra, a atmosfera encontra-se em equilíbrio estático e o movimento do ar é inferior à condição instável, mas superior à estável.

No caso de ocorrências de inversão térmica, ou seja, uma camada de ar em que a temperatura cresce com a altitude, não existirá nenhum movimento vertical e os poluentes ficarão concentrados na atmosfera local, dispersando-se no sentido horizontal. Quando a altura da base da camada de inversão for inferior a 300 metros, o ar tenderá a ficar estagnado sobre a atmosfera urbana, impedindo a passagem dos poluentes para um nível superior. Os efeitos negativos tendem a se acentuar quanto mais baixa for a base da camada de inversão.

A nebulosidade, caracterizando a existência de movimentos convectivos na atmosfera, favorece a circulação da poluição entre a superfície e a base das nuvens, ao contrário do céu claro e sem nebulosidade, condição atmosférica típica de dias estáveis.

É importante salientar que tais situações consideram apenas os parâmetros meteorológicos combinados entre si, sugerindo que tais dias representam condições que podem apresentar-se como desfavoráveis, neutras, favoráveis ou críticas quando forem adicionados poluentes em grande quantidade na atmosfera.

Nos dias considerados críticos, os momentos de maior estabilidade concentram-se nas primeiras horas do dia, até às 7 horas e no final do dia, após às 17 horas.

A questão da qualidade do ar tem preocupado os órgãos responsáveis pela saúde da população. No caso do Estado do Rio Grande do Sul, essa preocupação torna-se ainda maior nos períodos de inverno, quando combinam-se baixas temperaturas e alta umidade do ar.

A Resolução CONAMA 003/90, de 28 de junho de 1990, inclusa na seção de legislação deste trabalho, estabeleceu os padrões de qualidade do ar como sendo as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Conforme EIA-RIMA da Gerdau Riograndense (1998), a região onde está situada a empresa é uma das mais concentradas do Estado. A Região Metropolitana de Porto Alegre ocupa uma área de 6.830 km<sup>2</sup> (2,4% do Estado do Rio Grande do Sul) e possui uma população superior a 3 milhões de habitantes, ou seja, da ordem de 33% da população estadual, sendo ainda responsável por 55% do produto interno bruto industrial gaúcho. Assim, a concentração populacional e industrial é bastante significativa.

#### b) Referenciais Locais

No entorno da Gerdau Riograndense, há empresas de grande porte, como refinaria de petróleo, fábricas de cimento, de artefatos de vidro e cristal, de óleo vegetal, do ramo metalúrgico, de tinta, de adubos e fertilizantes, curtumes, usina de asfalto, entre outras. Agrega-se a este conjunto industrial uma das mais importantes estradas federais, a BR-116, vizinha à empresa por onde circulam diariamente mais de 100.000 veículos, vindo ou indo a Porto Alegre.

Para estimar a qualidade do ar na região, o parâmetro Partículas Totais em Suspensão, em função da tipologia industrial, adquire um grau de prioridade em relação aos demais. Os dados apresentados a seguir foram obtidos de uma pesquisa em desenvolvimento por um

grupo de pesquisadores do Núcleo de Energia e Ambiente da ULBRA - Universidade Luterana do Brasil, (200\_), informado durante comunicação verbal com o Eng. Eduardo Mc Mannis Torres, que atua nesse grupo de pesquisa e avaliou a qualidade do ar na zona rural, no que se refere ao parâmetro Partículas Totais em Suspensão. Neste trabalho, foram instalados três amostradores HI-VOL, dois na Escola Agrícola situada em Nova Santa Rita e um na Estação Experimental da ULBRA, no município de Montenegro. A coerência entre os valores obtidos, apresentados na Tabela 21, indica que eles podem ser considerados como valor de fundo na região.

*Tabela 21 - Valores de Partículas Totais em Suspensão obtidos nos amostradores instalados nos municípios de Montenegro e Nova Santa Rita.*

| <b>HI-VOL</b> | <b>Localização</b> | <b>Média geométrica (mg/m<sup>3</sup>)</b> |
|---------------|--------------------|--|
| 01            | Nova Santa Rita    | 41,90                                      |
| 02            | Nova Santa Rita    | 41,18                                      |
| 03            | Montenegro         | 40,30                                      |

A metodologia usada na coleta do material particulado total em suspensão está estabelecida no Manual de Operação do HI-VOL - Elaborado pela Energética - Indústria e Comércio Ltda. e que contempla a versão de 01/07/88 do método USEPA, "Reference Method for the Determination of Suspended Particulate Matter in the Atmosphere", contido no Federal Register 40 CFR 50, Appendix B e na Norma ABNT - NBR 9547 - Material Particulado em Suspensão no Ar Ambiente, Determinação da Concentração Total pelo Método de Amostrador de Grande Volume.

Com relação a este parâmetro, PTS - Partículas Totais em Suspensão, para melhor caracterização da área próxima à Gerdau Riograndense, considerou-se o Estudo de Impacto Ambiental da Ampliação da Refinaria Alberto Pasqualini - REFAP, localizada no Município de Esteio. Segundo este documento, os valores medidos em um ponto interno de sua unidade industrial estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores de PTS (Partículas Totais em Suspensão) medidos em um ponto interno da unidade industrial da Refinaria Alberto Pasqualini – Esteio - RS (1997)

| PTS   | Média Geométrica Anual<br>(mg/m <sup>3</sup> ) |        | Máximo Valor Diário<br>(mg/m <sup>3</sup> ) |        |
|-------|--|--------|---|--------|
|       | Medido   | Padrão | Medido                                      | Padrão |
| REFAP | 61   | 80     | 293   | 240    |

Nota : Período de medição: 01/01/97 a 31/12/97

#### c) Localização

A Gerdau Riograndense está localizada no município de Sapucaia do Sul, na Região Metropolitana de Porto Alegre, com topografia considerada plana, não existindo obstáculos que possam bloquear o processo de transporte pelo vento da pluma emitida pela casa de filtros.

#### d) Estudo de Dispersão

Para simular o impacto das emissões atmosféricas na região, anterior a implantação do novo sistema de despoejamento, utilizou-se o modelo matemático de simulação da qualidade do ar, o *Industrial Source Complex Term - versão 3 model* (1995). Originalmente, o modelo foi desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency - USEPA*, que, após vários testes de campo, o credenciou para aplicação em estudos de dispersão atmosférica para determinar o impacto das concentrações de poluentes no ambiente a partir das emissões de fontes industriais.

O modelo é composto de software para calcular a concentração de poluentes variando com tempo. Foram utilizados os modelos ISCST3 e o ISCLT3. Para o ISCST3, utilizou-se arquivo de dados meteorológicos horários para estimar a concentração de poluentes de acordo



com a condição de tempo, estabelecida nos padrões de qualidade do ar vigente. O modelo aceita dados de entrada de mais 500 fontes simultaneamente, gerando mais de 1500 receptores na superfície. Os receptores são distribuídos em uma grade cartesiana, cujas quadrículas aceitam qualquer tamanho de área.

As premissas básicas do modelo são: as condições meteorológicas estacionárias durante a evolução do cálculo; possuir uma rotina que extrapola o cálculo da velocidade do vento na altura do mastro até a boca da chaminé; ter a flexibilidade de considerar o cálculo da concentração de poluentes, tanto para terreno plano, como de topografia complexa; considerar no cálculo da concentração áreas urbanas e rurais, a partir de dados meteorológicos de altitude, e calcular a altura da camada de mistura. Enfim, o modelo é versátil, dotado de diversas opções que, numa simulação, apresenta resultados os mais próximos possíveis da realidade física.

Em seguida, montou-se a grade do sistema tomando como origem a casa de filtros. Trata-se de uma grade de 10 km x 10 km, a qual cobre uma área de 100 km<sup>2</sup>. Dentro dessa grade, o modelo interpola e gera cerca de 1099 receptores para melhor visualização dos resultados do cálculo da dispersão. A grade foi dimensionada dentro de uma área que incorporasse o maior número possível de receptores discretos em relação à fonte de emissão, e que permitisse o traçado das isoconcentrações para identificar os pontos de concentração máxima.

A simulação foi realizada com velocidades até 0,5 m/s para se ter uma ordem de grandeza da concentração máxima sobre os receptores. A temperatura média do ar adotada foi de 19,3 °C, durante as 24 horas do dia, média de Porto Alegre.

Na simulação para o cálculo da concentração de material particulado, considerou-se a condição meteorológica mais desfavorável, de tal modo que reproduzisse as concentrações mais elevadas possíveis, que só em casos extremos poderão ocorrer. Para tanto, as emissões

de material particulado (MP) foram assumidas como contínuas, para efetuar a simulação sobre os receptores no nível do solo. Do resultado da simulação, extraiu-se as concentrações mais elevadas, que são comparadas com os respectivos padrões.

A partir dos dados de emissão estimados para o novo sistema de despoeiramento, desenvolveram-se os cálculos através da simulação da concentração de poeira em suspensão.

O resultado da concentração máxima do material particulado (MP), para a condição crítica de dispersão atmosférica, foi  $11,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sendo 21,2 vezes menor que o padrão médio de 24 horas estabelecido pelo CONAMA.

O gráfico de isoconcentração de material particulado (MP) previsto para o novo sistema de despoeiramento, elaborado pelo programa de modelamento matemático de dispersão, é apresentado na Figura 57. Através da Figura 57, verificou-se que o tamanho da área crítica de influência da pluma de concentrações máximas é de aproximadamente  $4 \text{ km}^2$ , portanto no entorno da empresa.

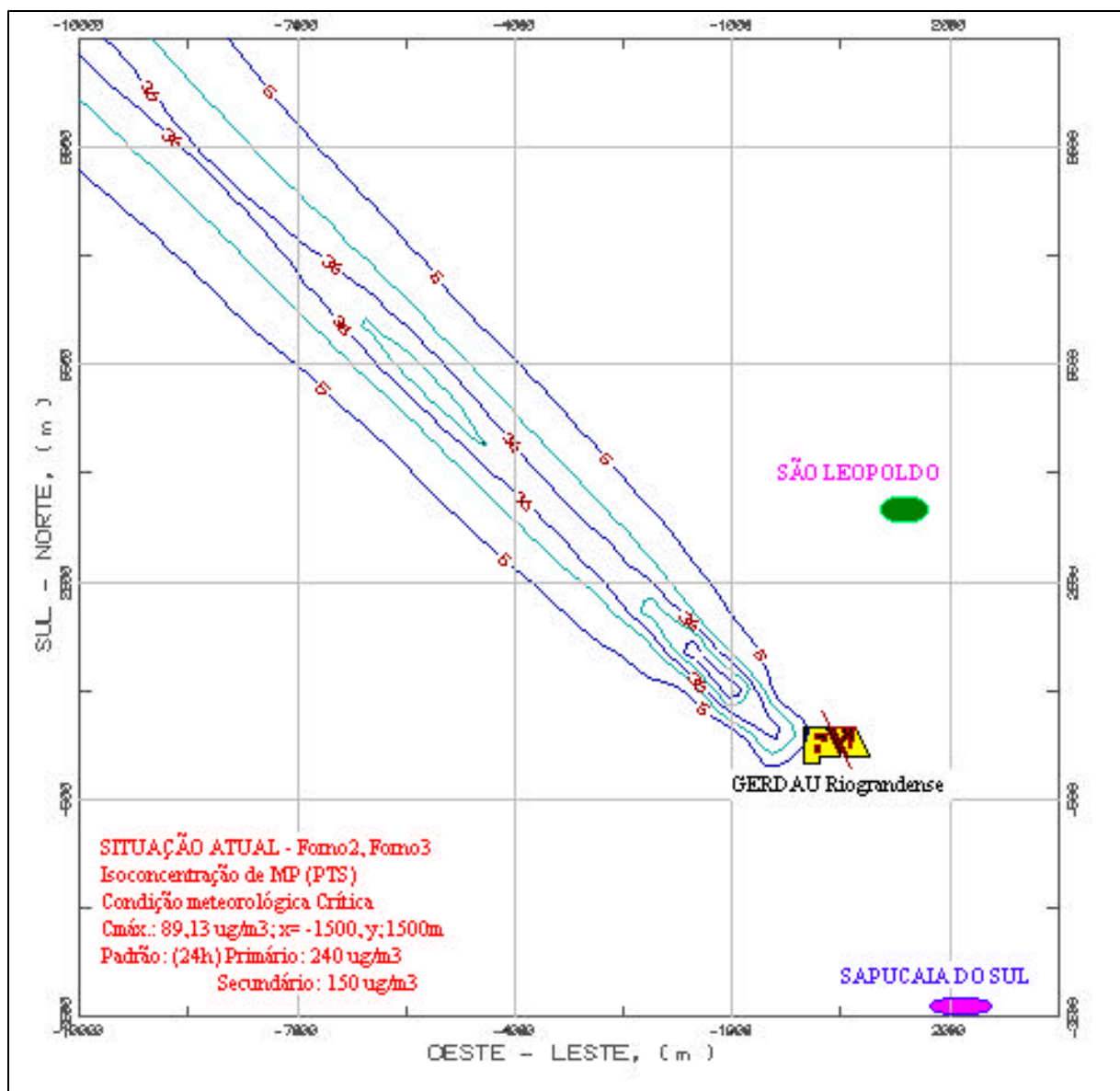


Figura 57 - Gráfico teórico de isoconcentração das emissões atmosféricas de material particulado para condição crítica de dispersão prevista para o novo despoejamento.

Os resultados sobre o cálculo das concentrações, através do modelo de dispersão ISCST3, representaram aproximações de como deverá ocorrer a distribuição das emissões na atmosfera local na área da empresa. Nesse sentido, obteve-se as indicações mais precisas possíveis de ordem de grandeza das concentrações no nível do solo. Portanto, os resultados são conservadores, onde assumiu-se a condição meteorológica mais crítica que representasse

a condição desfavorável à dispersão, o que na prática não ocorre permanentemente durante todo o ano, conforme caracterização climática da região.

Como resultado, verificou-se que os valores das concentrações das emissões previstas para o novo sistema de despoeiramento são bastante baixos, decrescendo rapidamente com a distância ao longo do eixo central da pluma, sendo que as maiores concentrações atingem seus pontos máximos a distâncias aproximadas entre 1,8 a 2,4 km da casa de filtros.

Assim, apesar das concentrações serem baixas, considerou-se a distância máxima de 14 km para os eixos Sul-Norte e Oeste-Leste como a provável área de influência. A essa distância, de acordo com o modelo, a concentração de qualquer um dos poluentes é desprezível, independente da direção e velocidade do vento.

Cabe ressaltar que os cenários de emissão de poluentes e de meteorologia, utilizados na simulação, são tão desfavoráveis, que a probabilidade de ocorrência de uma conjugação simultânea de fatores negativos, todos ao mesmo tempo, na prática, é quase impossível de acontecer.

Nesta nova condição, o modelamento matemático de dispersão atmosférica de material particulado apresentou como resultado uma concentração máxima de 11,28  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  para 24 horas, em uma área localizada a 2.360 m a noroeste da fonte, nas condições críticas de dispersão atmosférica.

### 3.2.2 Estudo de dispersão posterior a implantação do projeto

Após a implantação do novo sistema de despoeiramento, foi realizado novo estudo de dispersão para avaliar a distribuição de material particulado das emissões atmosféricas da Aciaria. Os dados de entrada para este estudo de dispersão foram obtidos através das medições realizadas na saída da nova casa de filtros, portanto, refletindo maior acuracidade se

comparado com o primeiro estudo, pois no primeiro foram adotados dados de entrada estimados.

Para realizar o segundo estudo de dispersão, foi contratada a empresa ERM-Environmental Resources Management.

A partir dos dados preliminares, disponíveis no momento da realização do estudo, e utilizando-se um modelo baseado na função da distribuição normal ou Gaussiana para liberação contínua e dispersão destas emissões na atmosfera, foram estimadas as máximas concentrações ao nível do solo para o material particulado na Aciaria, em diferentes pontos da área de influência da empresa. Além disso, foram estimadas as concentrações ao nível do solo para este parâmetro em locais denominados de receptores discretos.

#### a) Descrição do Modelo

Para a elaboração deste estudo foi utilizado um modelo de dispersão que pode ser aplicado em fontes pontuais elevadas, fontes áreas e fontes volumes, com a concepção Gaussiana de pluma. A distribuição das emissões é considerada Gaussiana nas direções vertical e lateral para cada seção transversal, perpendicular ao eixo da pluma e a jusante da fonte, em relação à direção do vento considerada. A altura efetiva de emissão é calculada pela formulação de Briggs e os parâmetros de dispersão são de Pasquill-Gifford.

O software utilizado permite calcular as concentrações em pontos de coordenadas espaciais (x; y; z), previamente especificadas pelo usuário, resultante da contribuição aditiva de várias fontes, para as mais diversas condições meteorológicas de dispersão.

Para as emissões da Aciaria, considerou-se a casa de filtros como fonte pontual elevada, com altura em relação ao nível do solo igual a 24,70 m.

## b) Limitações

Os modelos utilizados são conservadores no que tange ao cálculo de concentrações médias. Os valores adotados para os parâmetros de dispersão baseiam-se em experimentos realizados em terreno aproximadamente plano e com baixa rugosidade superficial. Valores maiores de rugosidade superficial implicam em maior turbulência mecânica e, portanto, em menores concentrações ambientais do que as estimadas.

A topografia da área de influência foi analisada e o terreno foi considerado como aproximadamente plano nos dados de entrada do modelo.

Nos modelos utilizados, não são introduzidas correções referentes aos processos de transformação das emissões por reações químicas e processos físicos na atmosfera (chuvas, adsorção, absorção, etc). Também não são introduzidas correções relativas aos processos de absorção na vegetação e no solo.

## c) Vantagens e desvantagens dos modelos

As vantagens e desvantagens do uso de um modelo de dispersão qualquer depende diretamente dos objetivos do trabalho a ser realizado e da qualidade dos dados disponíveis e necessários para a utilização correta do modelo. No presente estudo, podem ser mencionadas as seguintes vantagens do uso dos modelos de dispersão Gaussiana.

- possibilidade ampla de comparação dos resultados obtidos com outros estudos similares;
- confiabilidade dos resultados teóricos obtidos, especialmente na caracterização das situações críticas de dispersão (máximas concentrações no ambiente);
- possibilidade de comparação entre os resultados obtidos e os padrões de qualidade do ar ou níveis de referência para diferentes intervalos de tempo;

- disponibilidade de software para microcomputadores de fácil e rápida utilização, idênticos aos utilizados pela USEPA;
- disponibilidade de dados de entrada de boa qualidade, representativos do local e condições do estudo.

Entretanto, as desvantagens do uso dos modelos de dispersão Gaussiana são:

- as concentrações são assumidas constantes ao longo do tempo, ou seja, as condições de transporte da pluma são consideradas constantes para cada conjunto de dados de entrada;
- a variabilidade espacial dos parâmetros meteorológicos não é totalmente incorporada diretamente nos modelos;
- a aplicação dos modelos torna-se difícil para condições de ventos muito fracos e direção não definida;
- os modelos não podem ser usados para emissões reativas ou secundárias, quando se pretende fazer superposição das contribuições de fontes individuais em um receptor qualquer.

#### d) Modelo ISCST

No estudo, foi utilizada a versão do ISCST3 para determinar as concentrações ao nível do solo de material particulado emitido pela casa de filtros, em uma rede de 729 receptores automáticos estabelecida para o programa, abrangendo uma área equivalente a um quadrado de 20 (vinte) quilômetros de lado, além de 11 receptores discretos. Os dados necessários para o modelo ISC são:

e) Meteorológicos:

Os indicadores climáticos e parâmetros meteorológicos possuem um efeito importante no transporte e dispersão de poluentes atmosféricos, sendo por isso mais utilizados no estudo do potencial de poluição do ar para aplicação nos trabalhos de simulação da qualidade do ar através da modelagem matemática. Os dados necessários são o sumário da estabilidade atmosférica, a temperatura ambiente, a altura da camada de mistura e a direção e velocidade dos ventos.

Os dados relativos ao regime dos ventos correspondem às frequências de ocorrência de velocidade em 16 direções radiais e por 06 categorias de estabilidade para a área e o período de tempo em questão. Esses dados definem o transporte e o grau de dispersão das emissões. A altura da camada de mistura determina a altura através da qual as emissões podem ser misturadas antes de ser totalmente direcionadas para baixo. A temperatura é utilizada para computar a elevação da pluma e na conversão opcional das concentrações para as condições padrões de pressão e temperatura.

f) Topográficos:

O estudo da topografia da região é fundamental para avaliação do efeito do relevo sobre a ventilação do sítio e efeitos de continentalidade, como influência de brisas marítimas e terrestres e a conseqüente determinação do regime de ventos locais.

g) Fontes emissoras:

Os dados das fontes precisam incluir algumas informações básicas, tais como: identificação, características físicas da fonte e do efluente, coordenadas horizontais da fonte e taxa de emissão de cada parâmetro de emissão.



#### h) Parâmetros de controle:

Muitas opções de controles estão disponíveis para selecionar as técnicas analíticas e os dados de saída do programa. Essas opções e controles especificam as concentrações "in situ" ou nas condições padrões, as unidades da concentração, as repetições das fontes para corridas sucessivas, a identificação do equipamento, o ambiente urbano/rural, o tempo de concentração média e os tipos dos mapas de contribuição da fonte.

A partir dos dados fornecidos, elabora-se um sistema de coordenadas geográficas e calcula-se, para cada fonte e cada parâmetro de emissão, todas as concentrações atingidas nos receptores indicados nas condições estabelecidas. Os dados fornecidos e os resultados obtidos nas simulações são apresentados sob a forma de tabelas.

Para ilustrar o trabalho elaborado, utilizou-se o SURFER, construindo-se figuras com as isolinhas ou curvas de isoconcentrações para as principais emissões estudadas a partir dos resultados calculados pelo ISCST, as quais denominam-se "isopletas".

#### i) Caracterização da fonte emissora

O estudo contemplou como principal emissão atmosférica os materiais particulados, pois é o parâmetro de emissão predominante. A partir de dados de projeto e de medições realizada nos dias 27 e 28 de fevereiro de 2002, foram utilizadas as seguintes premissas básicas:

- as informações sobre as emissões de material particulado referem-se à coleta cujo resultado de taxa de emissão desse parâmetro apresenta o maior resultado;
- temperatura dos gases emitidos no lanternim: 75,1 °C (348,25 K);
- altura da fonte de emissão: 24,70 metros;

- diâmetro equivalente: 9,36 metros, obtido pela equivalência entre a área total de saída de gases do lanternim da casa de filtros, que possui 21,5 metros de comprimento em cada um dos dois lados por 1,6 metros de altura, e a área de uma chaminé de seção circular;
- velocidade de saída dos gases de 2,88 m/s, que corresponde à condição de velocidade medida durante o monitoramento;
- taxa de emissão máxima de material particulado nas condições medidas durante o monitoramento realizado no lanternim da casa de filtros, nos dias 27 e 28 de fevereiro de 2002, é igual a 0,596 g/s.

#### j) Dados sobre os Receptores

A área de dispersão atmosférica ou área de influência foi definida considerando-se a localização dos receptores eleitos que estão localizados numa área que corresponde a um quadrado de 20 quilômetros de lado, em cujo centro está a casa de filtros. Para determinação das concentrações ao nível do solo, foi definida malha (grid) de 729 receptores automáticos, estabelecidos para o programa, além de 11 (onze) receptores discretos. As coordenadas UTM dos receptores discretos estão apresentadas na Tabela 23.

*Tabela 23 - Coordenadas dos pontos discretos (UTM - metros)*

| <b>Ponto Discreto</b> | <b>Coordenadas (UTM - metros)</b> |
|-----------------------|-----------------------------------|
| 1                     | 481897 ; 6702292                  |
| 2                     | 481900 ; 6702233                  |
| 3                     | 481948 ; 6702148                  |
| 4                     | 482144 ; 6701987                  |
| 5                     | 485896 ; 6708373                  |
| 6                     | 482894 ; 6701187                  |
| 7                     | 482165 ; 6701676                  |
| 8                     | 486401 ; 6706379                  |
| 9                     | 488667 ; 6705010                  |
| 10                    | 488884 ; 6704791                  |
| 11                    | 488783 ; 6704399                  |

k) Arquivo Meteorológico Horário

O desenvolvimento do estudo de dispersão atmosférica de poluentes requer uma análise minuciosa de um conjunto de parâmetros meteorológicos que atuam simultaneamente no sentido de transportar, dispersar e concentrar, ao nível do solo, as emissões atmosféricas em uma determinada região.

A Tabela 24 apresenta como exemplo, as variáveis para o dia 01 de janeiro de 1999, usadas para a simulação.

Tabela 24 - Exemplo de arquivo meteorológico utilizado na modelagem (BREEZE – TRINITY CONSULTANTS INCORPORATED).

| Ano | Mês | Dia Hora | Direção radianos | Velocidade (m/s) | Temp. (K) | Classe Estabilização | Altura Camada Urbana (m) | Altura Camada Rural (m) |
|-----|-----|----------|------------------|------------------|-----------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 99  | 1   | 1 / 1    | 51               | 6,950            | 297,0     | 4                    | 2286                     | 3019                    |
| 99  | 1   | 1 / 2    | 18               | 9,850            | 295,9     | 4                    | 3403                     | 4459                    |
| 99  | 1   | 1 / 3    | 4                | 4,120            | 295,9     | 4                    | 1334                     | 1778                    |
| 99  | 1   | 1 / 4    | 343              | 2,575            | 295,4     | 5                    | 186                      | 550                     |
| 99  | 1   | 1 / 5    | 353              | 3,090            | 295,4     | 5                    | 307                      | 543                     |
| 99  | 1   | 1 / 6    | 2                | 2,060            | 295,4     | 5                    | 80                       | 543                     |
| 99  | 1   | 1 / 7    | 65               | 2,575            | 295,4     | 4                    | 773                      | 1119                    |
| 99  | 1   | 1 / 8    | 33               | 2,060            | 295,4     | 4                    | 820                      | 1010                    |
| 99  | 1   | 1 / 9    | 27               | 4,635            | 295,4     | 3                    | 1690                     | 2165                    |
| 99  | 1   | 1/10     | 51               | 2,060            | 298,1     | 2                    | 1018                     | 1180                    |
| 99  | 1   | 1 /11    | 24               | 2,060            | 300,4     | 2                    | 1109                     | 1250                    |
| 99  | 1   | 1 /12    | 16               | 4,120            | 300,4     | 3                    | 1761                     | 1994                    |
| 99  | 1   | 1/13     | 273              | 2,060            | 300,9     | 3                    | 1359                     | 1453                    |
| 99  | 1   | 1/14     | 9                | 1,545            | 300,4     | 3                    | 1506                     | 1567                    |
| 99  | 1   | 1/15     | 2                | 1,545            | 300,4     | 2                    | 1431                     | 1405                    |
| 99  | 1   | 1/16     | 4                | 1,030            | 300,4     | 2                    | 1454                     | 1362                    |
| 99  | 1   | 1/17     | 121              | 2,575            | 299,3     | 2                    | 1819                     | 1865                    |
| 99  | 1   | 1/18     | 77               | 2,060            | 299,3     | 3                    | 1750                     | 1724                    |
| 99  | 1   | 1/19     | 264              | 3,090            | 293,1     | 3                    | 1918                     | 1491                    |
| 99  | 1   | 1/20     | 277              | 3,605            | 299,3     | 4                    | 1889                     | 2017                    |
| 99  | 1   | 1/21     | 317              | 5,665            | 297,0     | 4                    | 1902                     | 2528                    |
| 99  | 1   | 1/22     | 302              | 4,120            | 295,9     | 5                    | 487                      | 748                     |
| 99  | 1   | 1/23     | 300              | 5,665            | 295,4     | 4                    | 1897                     | 2528                    |
| 99  | 1   | 1/24     | 300              | 3,605            | 294,3     | 5                    | 378                      | 591                     |

Para a simulação, utilizou-se arquivo meteorológico de formato “.asc”, elaborado a partir de dados meteorológicos coletados da estação automática 83971 (Aeroporto Internacional de Porto Alegre), correspondente ao período de 1999, adquirido da BREEZE –

TRINITY CONSULTANTS INCORPORATED, nos quais estão inseridas direções e velocidades do vento, temperatura, classe de estabilidade e altura de mistura urbano/rural para cada uma das 24 horas de cada dia de cada um dos cinco anos, totalizando 8.760 linhas correspondentes ao número de horas do período. A classe de estabilização é adimensional, varia do grau 1, extremamente instável, até a máxima estabilidade, que equivale ao grau 6.

A Tabela 25 mostra a distribuição dos registros por frequência das velocidades e direções dos ventos. Estes dados foram utilizados na construção da Rosa dos Ventos da Figura 58 e no modelamento matemático.

*Tabela 25 - Distribuição de ventos - direção e velocidade - por frequência - Estação 83971 - Ano: 1999.*

| Direção de Ventos | Distribuição por frequência |           |           |           |            |        |       |
|-------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|--------|-------|
|                   | Velocidade (m/s)            |           |           |           |            |        | Total |
|                   | 0,51-2,06                   | 2,06-3,60 | 3,60-5,66 | 5,66-8,75 | 8,75-10,80 | >10,80 |       |
| N                 | 39                          | 43        | 21        | 1         | 0          | 0      | 104   |
| NNE               | 49                          | 33        | 11        | 6         | 1          | 0      | 100   |
| NE                | 84                          | 25        | 11        | 2         | 0          | 0      | 122   |
| ENE               | 172                         | 63        | 17        | 5         | 0          | 0      | 257   |
| E                 | 305                         | 209       | 138       | 48        | 8          | 2      | 710   |
| ESE               | 251                         | 501       | 527       | 317       | 46         | 12     | 1654  |
| SE                | 155                         | 334       | 561       | 301       | 42         | 6      | 1399  |
| SSE               | 75                          | 174       | 165       | 40        | 6          | 0      | 460   |
| S                 | 89                          | 150       | 156       | 23        | 3          | 0      | 421   |
| SSW               | 74                          | 113       | 126       | 41        | 5          | 1      | 360   |
| SW                | 41                          | 92        | 106       | 23        | 4          | 1      | 267   |
| WSW               | 67                          | 69        | 61        | 11        | 0          | 0      | 208   |
| W                 | 84                          | 104       | 90        | 39        | 4          | 2      | 323   |
| WNW               | 150                         | 199       | 162       | 85        | 36         | 16     | 648   |
| NW                | 142                         | 151       | 137       | 72        | 22         | 18     | 542   |
| NNW               | 94                          | 59        | 38        | 13        | 2          | 0      | 206   |
|                   | 1871                        | 2319      | 2327      | 1027      | 179        | 58     |       |

Notas: Frequência de calmaria: 979 (11,18%)  
Velocidade média de ventos: 3,53 m/s

A Figura 58 mostra que o vento predominante na região sopra do setor Sudeste para o Noroeste, com velocidade média de 3,53 m/s. Nesse período, a frequência de calmaria foi de 11,18%.

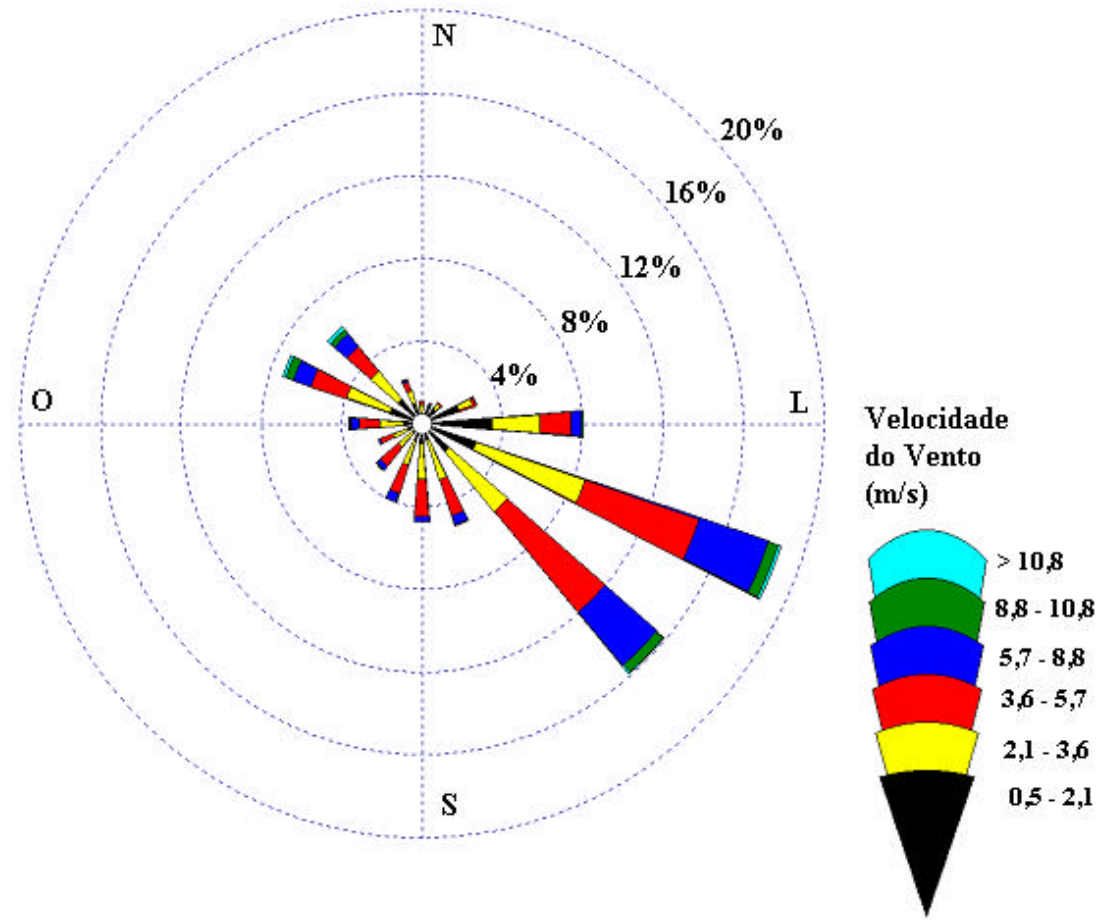


Figura 58 - Rosa dos ventos – Estação Meteorológica do Aeroporto de Porto Alegre 1999.

A Tabela 26 apresenta os resultados de concentração de material particulado ao nível do solo para períodos de exposição de 24 (vinte e quatro) horas e média geométrica anual, obtidos nos receptores discretos avaliados.

*Tabela 26 - Resultados das concentrações de material particulado ao nível do solo para período de 24 horas e média anual obtidos nos pontos discretos.*

| <b>Pontos Discretos</b> | <b>Período de 24 Horas<br/>(mg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Média Anual<br/>(mg/m<sup>3</sup>)</b> |
|-------------------------|---|---|
| 1                       | 0,4859  | 0,06829                                   |
| 2                       | 0,5671  | 0,07289                                   |
| 3                       | 0,7099  | 0,07636                                   |
| 4                       | 0,8128  | 0,07140                                   |
| 5                       | 0,1252  | 0,00565                                   |
| 6                       | 0,0029  | 0,00006                                   |
| 7                       | 0,5096  | 0,03308                                   |
| 8                       | 0,1232  | 0,00568                                   |
| 9                       | 0,1021  | 0,00349                                   |
| 10                      | 0,1147  | 0,00363                                   |
| 11                      | 0,0682  | 0,00372                                   |

A Tabela 27 apresenta os dois maiores valores de concentração de material particulado ao nível do solo, para períodos de exposição de 24 (vinte e quatro) horas e média geométrica anual, considerando a taxa de emissão medida em 27 e 28 de Fevereiro de 2002, no lanternim da casa de filtros. As coordenadas onde essas concentrações ocorrem estão expressas em medidas UTM.

*Tabela 27 - Resultados das máximas concentrações de material particulado para período de 24 horas e médias anuais, juntamente com as respectivas coordenadas UTM.*

|                              | <b>Período de 24 Horas<br/>(mg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Período Média Anual<br/>(mg/m<sup>3</sup>)</b> |
|------------------------------|---|---|
| 1 <sup>a</sup> Máxima        | 0,9155<br>(482000; 6702000)                       | 0,0771<br>(482000; 6702000)                       |
| 2 <sup>a</sup> Máxima        | 0,8128<br>(482144; 6701987)                       | 0,0763<br>(481948; 6702148)                       |
| Padrões de Qualidade do Ar * | 240   | 80  |

(\*) Resolução CONAMA N° 003 de 1990 – Padrões de qualidade do ar.

Os resultados das máximas concentrações de material particulado (0,9155 e 0,0771  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para os períodos de exposição de 24 horas e média anual, obtidos através do estudo de dispersão, representam 0,38% e 0,096% dos padrões de Qualidade do Ar estabelecidos pelo CONAMA, que correspondem respectivamente a 240 e 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Para que se possa visualizar a distribuição das concentrações de material particulado provenientes das emissões atmosféricas no nível do solo, obtidas através da modelagem matemática para período de exposição anual, utilizou-se um programa gráfico para plotar a isopleta de concentração para o período de exposição médio anual, que está apresentada na Figura 59.





Figura 59 - Isopleta com resultados do estudo de dispersão após a implantação do novo sistema de despeiramento.

### 3.2.3 Conclusões dos estudos de dispersão

O maior valor para a concentração de materiais particulados no segundo estudo de dispersão, considerando dados efetivos de medições, para um período de 24 horas, foi 0,81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , enquanto na modelagem anterior, baseada em dados estimativos, foi 11,28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . A Tabela 28 apresenta o resumo com os resultados dos dois estudos de dispersão, anterior e posterior à implantação do sistema despoejamento. A conclusão comparativa dos estudos de dispersão mostra que os resultados do segundo estudo apresentou valores menores que do primeiro.

*Tabela 28 - Resumo dos resultados de material particulado dos estudos de dispersão*

| <b>Estudos de Dispersão</b>                   | <b>Resultado do Estudo para 24 horas (<math>\text{mg}/\text{m}^3</math>)</b> | <b>Padrão CONAMA para 24 horas (<math>\text{mg}/\text{m}^3</math>)</b> |
|---|--|--|
| Anterior a implantação do novo despoejamento  | 11,28  | 240  |
| Posterior a implantação do novo despoejamento | 0,81   | 240  |

Pelos valores obtidos em ambos estudos de dispersão conclui-se que as concentrações calculadas estão abaixo do limite estabelecido pelo CONAMA 03/90.

### 3.3 AVALIAÇÕES DO SISTEMA IMPLANTADO

O novo sistema de despoejamento iniciou a operação em novembro de 2000. Após a implantação do investimento, realizaram-se avaliações para comprovar a performance do projeto. Foram feitas duas campanhas de medições das concentrações de material particulado nas emissões da casa de filtros, uma em março de 2001 e outra em fevereiro de 2002.

As coletas e análises realizadas objetivaram determinar a concentração de material particulado (MP) nos efluentes gasosos oriundos do sistema de controle de poluentes atmosféricos da casa de filtros. Em cada campanha foram coletadas 4 (quatro) amostras para determinação de material particulado (MP). Essas amostras foram identificadas e encaminhadas para análise em laboratórios habilitados. A metodologia empregada nas coletas e análises das amostras nas campanhas realizadas está descrita nos Métodos 1, 2, 5 e 0010 da USEPA.

- a ) method 1: Sample and Velocity Traverses for Stationary;
- b ) method 2: Determination of Stack Gas Velocity and Volumetric Flow Rate (Type S Pitot);
- c ) method 5: Determination of Particulate Emissions from Stationary Sources;
- d ) method 0010: Modified Method 5 Sampling Train.

A Tabela 29 apresenta os dados referentes a coleta das amostras para análises de material particulado (MP).

*Tabela 29 - Dados referentes a coleta das amostras.*

|  |                          |
|--|--------------------------|
| Comprimento interno do duto retangular | 2 m                      |
| Largura interno do duto retangular     | 21,5 m                   |
| Número de eixos (secções)              | 4 eixos (secções)        |
| Número de pontos por eixo              | 5 pontos                 |
| Número total de pontos                 | 20 pontos (matriz 4 x 5) |
| Tempo de coleta por ponto              | 3 min                    |
| Tempo total de coleta                  | 60 min                   |

### 3.3.1 Primeira campanha de medição

Em março de 2001, foram realizadas as medições para avaliar o desempenho do novo sistema de despoeiramento. A medição realizada em março de 2001 iniciou às 9h 35 min e terminou às 15h e 43 min. Nessa medição foi avaliada a concentração dos materiais particulados presentes nas emissões da casa de filtros. Os resultados desta campanha de medição estão na Tabela 30.

*Tabela 30 - Resultados da primeira campanha de medição de material particulado*

|   | <b>1ª Coleta</b> | <b>2ª Coleta</b> | <b>3ª Coleta</b> | <b>Média</b> |
|---|------------------|------------------|------------------|--------------|
| <b>Material particulado (mg/Nm<sup>3</sup>)</b> | 7,4              | 3,9              | 8,9              | 6,8          |

### 3.3.2 Segunda campanha de medição

A segunda medição, realizada após a implantação do novo sistema de despoeiramento, foi realizada nos dias 27 e 28 de fevereiro de 2002.

Foram coletadas 4 (quatro) amostras para determinação de material particulado. Nessa segunda campanha de medição, foi determinada a concentração dos materiais particulados presentes nas emissões da casa de filtros. Os resultados desta campanha de medição estão mostrados na Tabela 31.

*Tabela 31 - Resultados da segunda campanha de medição de material particulado*

|   | <b>1ª Coleta</b> | <b>2ª Coleta</b> | <b>3ª Coleta</b> | <b>4ª Coleta</b> |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>Material particulado (mg/Nm<sup>3</sup>)</b> | 3,9              | 2,6              | 3,2              | 2,0              |
| <b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>                  | 713.837          | 708.586          | 690.993          | 703.475          |

### 3.3.3 Conclusões das campanhas de medição de material particulado

Os resultados das medições comprovaram a boa performance do sistema implantado. As concentrações de material particulados medidas estão abaixo do limite de emissão de 50 mg/Nm<sup>3</sup>, estabelecida pelo órgão de controle ambiental (FEPAM), na Licença de Operação da empresa, sob o número 0944/2002-DL, que informa no item 8.1: “O padrão de emissão a ser obedecido para material particulado é de 50 mg/Nm<sup>3</sup>, a 0°C e 760 mmHg (cinquenta miligramas de material particulado por metro cúbico de ar seco).”

### 3.4 DISCUSSÃO SOBRE O CUSTO DO INVESTIMENTO

O sistema de despoeiramento é um dos mais significativos investimentos para controle ambiental de empresas siderúrgicas. A Tabela 32 apresenta um comparativo do custo de implantação do sistema de despoeiramento da Riograndense com outras usinas que adotaram soluções técnicas semelhantes. Esse comparativo é útil para orientar as estimativas iniciais durante a fase de estudos, contudo deve-se considerar que existem particularidades para cada projeto, que refletem em diferenças econômicas significativas. Pelo observado na Tabela 32, o custo de implantação do sistema da Riograndense está compatível com a média dos referencias, adotando-se o critério que considera o valor investido, peso da instalação e vazão do sistema.

Tabela 32 - Comparativo de custos de implantação para Sistemas de Despoeiramento com filtro de mangas tipo ar reverso positivo.

|   | <b>Empresa 1</b> | <b>Empresa 2</b> | <b>Empresa 3</b> | <b>Empresa 4</b> | <b>Empresa 5</b> | <b>Riograndense</b> |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| Vazão Total (m <sup>3</sup> /h)               | 1.470.000        | 510.000          | 340.000          | 800.000          | 800.000          | 800.000             |
| Peso Total (toneladas)                        | 2.300            | 1.000            | 500              | *                | *                | 1.190               |
| Investimento (MMUS\$)                         | 13,4             | 7,4              | 3,8              | 6,7              | 6,3              | 7,3                 |
| Custo / m <sup>3</sup> (US\$/m <sup>3</sup> ) | 9,1              | 14,5             | 11,3             | 8,4              | 7,9 **           | 9,2                 |
| Custo / kg (US\$/kg)                          | 5,8              | 7,4              | 7,7              | *                | *                | 6,3                 |

\* - Dado não disponível.

\*\* - Com aproveitamento de alguns equipamentos de outra usina.

### 3.5 MODIFICAÇÕES REALIZADAS NO NOVO SISTEMA

A busca da melhoria contínua motivou modificações no sistema, sempre orientadas para ampliar a performance do sistema de despoeiramento. As principais alterações realizadas foram:

#### a) Ventiladores

Para evitar o depósito de partículas nas pás do ventilador, foi necessário instalar um sistema de limpeza com ar comprimido diretamente nas pás do rotor. O jato de ar comprimido é acionado por um temporizador.

#### b) Dutos refrigerados

Para evitar deformações nas paredes dos dutos refrigerados, foram incluídos cuidados operacionais para abertura das válvulas de água de resfriamento. Após as paradas do sistema,

foi adotado o procedimento de reiniciar operação com as válvulas na posição fechada e abrir gradualmente.

#### c) Damper

Na operação do sistema, são importantes os cuidados de ajustes corretos dos tempos nas operações de abertura e fechamento de dampers. Objetivando melhorar a performance do sistema, foi necessário substituir alguns atuadores de dampers para atingir velocidades ótimas de abertura e fechamento. Os novos atuadores possuem maiores velocidades de atuação. O momento crítico é durante as transições das operações de carregamento e fusão dos FEAs, onde ocorre a alteração de posição dos dampers do quarto-furo e da coifa. Durante a posta-em-marcha foram estabelecidas as receitas ótimas para as posições dos dampers. A repetição dessas posições é garantida pelo software de supervisão.

#### d) Câmara de combustão

A câmara de combustão apresentou um desgaste superficial excessivo, ocasionando vazamentos de água industrial para o interior da mesma. A câmara de combustão projetada inicialmente foi substituída por uma nova que possui uma forma construtiva diferente. A nova câmara possui as paredes laterais e abóbada construída de placas planas internas e externas, interligadas por chapas, formando um labirinto para circulação da água de resfriamento. Essa forma construtiva apresenta maior facilidade para manutenção, maior resistência à abrasão, devido ao regime menos turbulento dos gases junto à superfície, e, conseqüentemente maior vida útil.

#### e) Filtro

A casa de filtros apresenta um excelente desempenho, mesmo em condições rigorosas de operação, comprovado pelas medições realizadas. Para garantir esse desempenho, foram introduzidas as seguintes melhorias operacionais:

- Programada a realização de manutenção preventiva nas hastes dos cilindros pneumáticos que atuam os dampers da casa de filtros, pois, caso deposite pó na haste, devido o prolongado tempo em que fica sem atuar o ar reverso, pode ocorrer o travamento do movimento do cilindro pneumático.
- Realizada a substituição das mangas danificadas que apresentavam marcas de furos, dobras ou que romperam devido à acomodação incorreta durante a montagem.



## 4 CONCLUSÕES

O novo sistema de despoejamento atendeu as especificações do projeto. As medições de material particulado realizadas na saída da casa de mangas, após o tratamento, comprovaram o atendimento do padrão de emissão. Estas medições confirmaram que a escolha do sistema foi adequada. Para interpretação dos resultados, estes foram comparados com os limites estabelecidos pelos órgãos de controle ambiental.

Também foram avaliadas as emissões atmosféricas da casa de filtros na qualidade do ar, externa à empresa, através da utilização de estudos de dispersão. Neste trabalho foram apresentados resultados dos dois estudos de dispersão, através de modelagem matemática. O primeiro foi elaborado antes da implantação do sistema de despoejamento e o segundo foi elaborado após a implantação do sistema de despoejamento. Os dados de entrada para o segundo estudo de dispersão foram obtidos através das medições realizadas na saída da nova casa de filtros. Os valores obtidos em ambos os estudos de dispersão atendem ao limite estabelecido pelo CONAMA para as concentrações de na qualidade do ar.

O sucesso do projeto esteve relacionado com o intenso trabalho de conhecimento das tecnologias implantadas nas indústrias siderúrgicas que operam em condições semelhantes. O conhecimento foi obtido principalmente através das visitas técnicas realizadas. Também contribuíram para o êxito do projeto a execução prévia do modelo hidráulico, que assegurou o

correto dimensionamento do sistema e a criteriosa especificação dos componentes, tais como casa de filtros, ventiladores e dutos.

As experiências adquiridas na operação do antigo sistema de despoeiramento orientaram as decisões tomadas no decorrer do projeto. A experiência anterior, com os antigos filtros, tipo jato pulsante, pressão negativa, mostrou que pode ser significativa a parcela de infiltrações ocasionadas por pequenas aberturas na estrutura da casa de mangas, ocasionando redução na eficiência de exaustão.

Na fase das especificações técnicas ocorreu a definição da tecnologia a ser adotada no projeto. O nível de responsabilidade desta etapa é elevado, requerendo uma ampla avaliação das alternativas disponíveis, além de requerer uma capacidade de projetar melhorias, algumas ainda inexistentes. Uma das principais decisões adotadas na fase conceitual do projeto básico foi a escolha do sistema de filtragem. A opção pela utilização de filtro com pressão positiva, utilizando ar reverso para limpeza, confirmou ser uma solução robusta e adequada para as severas condições de operação dos fornos elétricos, pois os mesmos operam com significativas variações de temperatura, pressão e concentração de sólidos no fluxo gasoso.

Para atingir o rendimento obtido, foram necessários introduzir alguns ajustes e correções, tais como o aumento da velocidade de atuação dos dampers, que operam na transição entre as fases de fusão, carregamento e a substituição câmara de combustão que estava apresentando um desgaste prematuro.

A garantia da continuidade desempenho do sistema implantado está assegurada pelo programa de gestão ambiental da empresa. O despoeiramento foi incorporado no sistema de controle, através de um detalhado padrão operacional, com rotinas de auditorias e tratamento de não-conformidades identificadas. O sistema também é controlado por indicadores mensais que avaliam o seu desempenho.

## **5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O resultado do sistema de despoeiramento é a segregação ou seqüestro do pó que acompanha do fluxo gasoso. Apesar de existirem tecnologias de beneficiamento e reciclagem do pó, torna-se necessário desenvolver novos processos economicamente sustentáveis para este subproduto.

Também podem ser desenvolvidos estudos para aumentar as atuais performances obtidas no sistema de despoeiramento, tais como o desenvolvimento de tecnologias para reduzir as emissões atmosféricas geradas na operação dos fornos elétricos.

## 6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 9547*: Material particulado em suspensão no ar ambiente, determinação da concentração total pelo método de amostrador de grande volume. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. *NBR 14724*: Informações e documentação; Trabalhos acadêmicos; Apresentação. Rio de Janeiro, ago. 2002.

BENDER, M. Fume hoods, open canopy type: Their ability to capture pollutants in various environments. *American Industrial Hygiene Association Journal*, s.l., v. 40, n. 2, p. 118-128, Feb. 1979.

\_\_\_\_\_; GOODFELLOW, H. D. Design considerations for fume hoods for process plants. *American Industrial Hygiene Association Journal*, s.l., v. 41, n. 7, p. 473-484, Feb. 1979.

\_\_\_\_\_; CESTA, Tony; MINNICK, K. L. *Fluid dynamic modelling of arc furnace; charging and tapping emissions*. s.l., 1983.

BHA Group Inc. *Innovative filtration technology*. Filter Bags & Cages, 1997. [catálogo técnico]

BRAND, Peter G. A. *Technical evaluation of vendor proposals for emission control systems*. Toronto, 1996.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. *Resolução n. 003/90, de 28 de junho de 1990*. Dispõe sobre a qualidade do ar, definições e padrões.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE – CONAMA. *Resolução n. 005/89, de 15 de junho de 1989*. Institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR, e dá outras providências.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. *Resolução n. 008/90, de 6 de dezembro de 1990*. Estabelece, em nível nacional, limites máximos de emissão de poluentes do ar (padrões de emissão) para processos de combustão externa em fontes novas fixas de poluição com potências nominais totais até 70 MW (setenta megawatts) e superiores.

BRASIL. Ministério do Interior. *Portaria n. 231, de 1976*. Estabelece os padrões de qualidade do ar.

CEPEMAR - Estudo de Impacto Ambiental da Ampliação da Refinaria Alberto Pasqualini – REFAP. Canoas, 1998.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. *Lei n. 9.061, de 1979*. Trata da determinação de grau de enegrecimento de fumaça emitida por fontes estacionárias. São Paulo.

\_\_\_\_\_. *Relatório Anual de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo*. São Paulo, 1996.

ENVIRONMENTAL RESOURCES MANAGEMENT – ERM. *Relatório de Acompanhamento - Diagnóstico Ambiental da Gerdau Riograndense*. Sapucaia do Sul, maio 2002.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL – FEPAM. *Licença de Operação da Gerdau Riograndense*. Número 0944/2002-DL, emitida em 2002.

GERDAU RIOGRANDENSE: ABG Engenharia (EIA-RIMA). *Estudo de Impacto Ambiental - Relatório de Impacto Ambiental*. Sapucaia do Sul, dezembro 1998.

GERDAU GUAÍRA, SEG. *Manual do Sistema de Lavador de Gases*. Paraná, 1983.

HATCH ASSOCIATES LMT. *Fluid dynamic model study; Canopy hood optimization*, February 17, 1997. Toronto.

HEMEON, W. C. L. *Plant and process ventilation*, s.l. Industrial Press, 1963.

HOLMLUND, Stern; GAIOTTO, Sergio A. Fabric filtration for present and future environmental demands in the steelmaking industry. In; SEMINÁRIO DE ENERGIA, 1997, Belo Horizonte, *Anais ...*: Belo Horizonte, ABM, 1997.

INMET. *Elementos do clima*. Porto Alegre, 1916-1986.

INMET. *Dados de ar superior e mapas sinóticos de Porto Alegre*. Brasília, 1996.

\_\_\_\_\_. *Dados de rádios onda do Aeroporto de Porto Alegre*. Brasília, 1998.

\_\_\_\_\_. (COPEL). *Estação Meteorológica de Triunfo – 83954 (1979 –1994)*. Triunfo, RS.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. *Identificação e seleção de tecnologias para tratamento e/ou reciclagem de pós de aciarias elétricas*. Rio de Janeiro, NATRONTEC e Hatch Associates, fev. 1996.

IPAGRO. *Elementos do clima*. Guaíba, 1967-1987.

KASHDAN, E. R. *et al. Technical Manual: Hood system capture of process fugitive particulate emissions*. US Environmental Protection Agency. Research Triangle Park (EPA/600/7-86/016), 1985, section 5.

LABORATÓRIO GREEN LAB. ANÁLISES QUÍMICAS E TOXICOLÓGICAS. *Laudos n. 419/96 e 492/96*. Porto Alegre, 1996.

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

MANTEN, R. W.; BRAND, Peter G. A. *Practical Primer on Design of Emission Control System*. Annual Convention, Association of Iron and Steel Engineers, Cleveland, OH, 1994.

MATSUOKA, Toshio; KOROZU, Shin-Ichi; KOYABU, Yukio. New technology for treating electric arc furnace dust. *Iron and Steel Engineer*, Niihama, Japão, Niihama Technical Research Laboratories, Sumitomo Heavy Industries, LTD, fev. 1991.

PETROBRÁS. *Estudo de Impacto Ambiental da Ampliação da Refinaria Alberto Pasqualini*. Canoas, [19\_\_].

RENNER PRODUTOS TÊXTEIS. O uso de elementos filtrantes na retenção de pós. *Boletim técnico*, Porto Alegre, n. 1, 1999.

\_\_\_\_\_. Qual a relação ar/pano mais indicada? Como determiná-la? *Boletim técnico*, Porto Alegre, n. 2, 1999.

RIO GRANDE DO SUL. Código Estadual. *Lei n. 11.520, de 4 de agosto de 2000*. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul. Secretaria do Meio Ambiente.

SCHIFFTER, Kenneth; HESKETH, Howard. *Wet Scrubbers*; Air Pollution Engineering Manual, Air & Waste Management Association, s.l.,1992.

STEEL Manufacturer's Association. *Current Recycling Options for K061*. EUA, Processing Options Subcommittee, s.l., Jan. 2003.

TESTA, Tony. Fluid dynamic modelling for ventilation design of industrial buildings. *Course Manual*, HATCH Project number 90508, s.l.,1986.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. *Models, Office of air quality planning and standards: Research Triangle Park, EPA-454/B-95-003a*. EUA, 1995

\_\_\_\_\_. *Reference method for the determination of suspended particulate matter in the atmosphere*. Federal Register 40 CFR 50. EUA.Appendix B, July 1<sup>st</sup>, 1988.

\_\_\_\_\_. *Method 1: Sample and Velocity Traverses for Stationary*. EUA.

\_\_\_\_\_. *Method 2: Determination of stack gas velocity and volumetric flow rate (Type S Pitot)*. EUA.

\_\_\_\_\_. *Method 5: Determination of particulate emissions from stationary sources*. EUA.

\_\_\_\_\_. *Method 10: Modifield Method 5 Sampling Train*. EUA.

MC MANNIS, Eduardo Torres, UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL – ULBRA, Núcleo de Energia e Ambiente, Avaliação da qualidade do ar na zona rural, no que se refere ao parâmetro Partículas Totais em Suspensão, comunicação pessoal em novembro, Sapucaia do Sul, 2003.

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS. *Modelo para Monografia de Conclusão de Curso*. São Leopoldo, Centro de Ciências da Comunicação, 2001.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Escola de Engenharia. *Modelo para Dissertação de Mestrado Profissional*. Porto Alegre, Escola de Engenharia, 2003.

SCHIFFTER, Kenneth; HESKETH, Howard. *Wet Scrubbers- Air Pollution Engineering Manual - Air & Waste Management Association*. EUA, 1992