MARCELO OZAWA

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTIVIDADE
ÔHMICA DE CINZAS VOLANTES PARA PROJETO DE
PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS**

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

São Paulo
2003

MARCELO OZAWA

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTIVIDADE
ÔHMICA DE CINZAS VOLANTES PARA PROJETO DE
PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS**

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

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Jurandir I. Yanagihara

São Paulo
2003

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 14 de agosto de 2003.

Marcelo Ozawa

Jurandir Itizo Yanagihara

FICHA CATALOGRÁFICA

Ozawa, Marcelo

Determinação experimental da resistividade ôhmica de cinzas volantes para projetos de precipitadores eletrostáticos, São Paulo - SP, 140 p, 2003.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Precipitador Eletrostático 2. Resistividade ôhmica, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica.

Aos meus Pais, Toshio e Maria Teresa, pelo eterno apoio, incansável estímulo e ajuda em todos os sentidos e momentos de minha vida.

A minha esposa *Kumi* pelo apoio e compreensão por esse longo tempo e á nossa querida filha *Sílvia*.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador inicial Prof. Dr. Dong Ho Choi pelo incentivo ao estudo na área de precipitadores;

Ao orientador Prof. Dr. Jurandir Itizo Yanagihara pelas diretrizes seguras e permanente incentivo;

Aos meus amigos da Mitsubishi Heavy Industries Ltd. do Japão, Srs. Nobuo Teramura e Noriaki Maekawa pela cooperação no estudo de precipitadores;

À empresa ADZ Mecânica pelo apoio para execução do dispositivo experimental;

À empresa CGTEE - Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica por ceder material para testes (cinza volante);

Aos funcionários da CBC, Carlos Roberto Peramo e Adriano Baiero, pela ajuda na montagem do dispositivo do experimento e execução dos testes;

A Fernanda Favre pelo auxílio na correção do texto em português;

A todos os amigos, que direta ou indiretamente, colaboraram na elaboração deste trabalho, torcendo para o sucesso de sua conclusão .

RESUMO

O presente trabalho reúne elementos para projeto de precipitadores eletrostáticos, com dados levantados de cinzas volantes provenientes da combustão de gases em caldeiras de carvão mineral.

Os objetivos desta pesquisa são construir um dispositivo padronizado para medição da resistividade ôhmica de materiais, levantar dados de resistividade ôhmica das cinzas volantes de carvão mineral utilizado no Brasil e, com estes dados, listar recomendações sobre cuidados no dimensionamento de precipitadores (cálculo da área de captação), quando este equipamento é posicionado após uma caldeira que queima o carvão mineral nacional.

A metodologia utilizada foi baseada em norma americana ASME, em que o pó (material a ser testado) é colocado sobre eletrodos de descarga e de coleta, uma alta tensão elétrica é aplicada até atingir a tensão de ruptura elétrica e neste instante é medida a resistividade. A construção do experimento e procedimento de execução foram seguidos conforme esta norma. O material de teste foi coletado de precipitadores eletrostáticos existentes na região Sul do Brasil, onde o carvão mineral tem seu uso freqüente.

Os resultados apresentaram baixos valores para resistividade da cinza volante nacional, se comparados com resultados de carvões de outros países. Sua variação em função da temperatura segue a tendência de cinzas volantes de outros países, ou seja, aumento da resistividade ôhmica com o aumento da temperatura. Foram realizados também experimentos com material retirado de precipitadores eletrostáticos acoplados a caldeiras de biomassa, que forneceram valores de resistividade ainda menores do que os do carvão mineral nacional. O material de teste, composição química e processo de coleta foram totalmente caracterizados, disponibilizados e uma análise completa pôde ser realizada, fato inédito no Brasil. Esses resultados permitiram listar recomendações visando o projeto de precipitadores eletrostáticos acoplados a caldeiras que queimam carvão mineral nacional.

ABSTRACT

This report is a collection of elements to be used in the design of Electrostatic Precipitators, with experimental data of fly ashes from combustion gases of Mineral Coal Fired Boilers.

The aims of this research are to construct a standard device to measure the ohmic resistivity of materials, to get data of ohmic resistivity of fly ashes from mineral coals used in Brazil and with this data, to list recommendations about the key points to size electrostatic precipitators (calculation of specific collection area), when this equipment is arranged after one boiler that burns Brazilian mineral coals.

The method used was based on the ASME Standard, in which the fly ash (material to be tested) is put between the discharge and the collecting electrodes, a high electrical tension is applied until the electrical break down tension to be reached; at this moment, the resistivity is measured. The construction of this device and the experimental procedure were conducted according to this standard. The tested materials were collected from existing Electrostatic Precipitator of South of Brazil, where the mineral coal is commonly used.

The results indicated low values of ohmic resistivity of the Brazilian fly ashes, if compared to results of coals from other countries. Its variation with the temperature has the same behavior of fly ashes from other countries, i.e., the ohmic resistivity increases when the temperature increases. It was also executed tests with particulate materials from electrostatic precipitator of biomass boiler whose ohmic resistivity is lower than the Brazilian mineral coal. The tested material, chemical composition, and collecting process were totally described, available and a full analysis can be executed; these data are inédita in Brazil. These results allow to list the recommendations to design Electrostatic Precipitators for Brazil Mineral Coal Fired Boilers.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

	Página
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 - OBJETIVOS	3
Capítulo 3 - REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1 Conceitos teóricos sobre precipitação eletrostática	5
3.2 Conceito de resistividade ôhmica, seu significado e interpretação	24
3.3 As conseqüências da variação da resistividade.....	46
3.4 Técnicas para adequar a resistividade como parâmetro de projeto	49
Capítulo 4 - METODOLOGIA	75
4.1 Métodos normalizados para medição da resistividade	75
4.2 Método utilizado	84
Capítulo 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	88
5.1 Caracterização dos materiais de testes	88
5.2 Caracterização dos testes e procedimentos preliminares	89
5.3 Resultados experimentais	92
5.4 Discussão	93
Capítulo 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS ...	98
6.1 Conclusões	98
6.2 Considerações finais	100
6.3 Sugestões para futuros trabalhos	101

Capítulo 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
---	-----

APÊNDICES

A-1 - Tabelas e figuras com resultados experimentais	107
A-2 - Análise de Incertezas	121
A-3 - Projeto executivo do dispositivo	125
A-4 - Descrição da bancada de testes e fotos	128
A-5 - Composição química do carvão e das cinzas volantes	134
A-6 - Catálogo da Empresa CGTEE (fornecedor da cinza volante)	137

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 3	Página
Figura 3.1 : Vista simplificada dos processos em um Precipitador	5
Figura 3.2 : Princípio de coleta	6
Figura 3.3 : Esquema de processo de coleta e remoção de pó	7
Figura 3.4 : Vista explodida de um precipitador eletrostático.....	8
Figura 3.5 : Placa distribuidora de fluxo	9
Figura 3.6 : Tipos de eletrodos	11
Figura 3.7 : Vista com detalhes de suporta��o dos quadros	11
Figura 3.8 : Detalhes de fixa��o dos eletrodos de emissão	12
Figura 3.9 : Suporte dos quadros	12
Figura 3.10 : Detalhe do acionamento e isolamento do eixo de batimento.....	13
Figura 3.11 : Disposi��o do conjunto dos eletrodos de coleta	13
Figura 3.12 : Fluxo de gás entre as placas	14
Figura 3.13 : Conjunto de acionamento do sistema de batimento das placas ..	14
Figura 3.14 : Compara��o dos regimes de eletrifica��o	17
Figura 3.15 : Gráfico de eficiência segundo o modelo de difusividade finita	20
Figura 3.16 : Modelo de esferas uniformes em estrutura cristalina, mostrando a concentra��o das linhas de corrente	22
Figura 3.17 : Rela��o�es entre o campo médio e a condutividade do gás, derivado da característica elétrica para precipitador tipo cilíndrico, livre de p��, com ar a temperatura de 125 ��C	27
Figura 3.18 : Explana��o dos símbolos para o modelo de P.E.	29
Figura 3.19 : Rela��o�es derivadas entre densidades de corrente e campo médio, para P.E. tipo duto de 228,6 mm com fio de 4 mm de diâmetro,	33
Figura 3.20 : Resistividade x $1 / kT$ (mono logaritmo)	37
Figura 3.21 : Valores experimentais de energia de ativa��o do elétron.....	37
Figura 3.22 : Forma característica da dependência da resistividade da cinza volante sobre a temperatura e a umidade.	41
Figura 3.23 : Medi��o�es de células de resistividade.	43

Figura 3.24	: Curva de resistividade x temperatura: as contribuições dos componentes da resistividade superficial e de volume	45
Figura 3.25	: Curva de resistividade x tempo, no ambiente do fluxo de gás..	47
Figura 3.26	: Curva de resistividade x tempo, no ambiente do fluxo de gás ..	48
Figura 3.27	: Comportamento de um P.E. ponto-plano baseado em considerações teóricas de faiscamento e corona inversa	52
Figura 3.28	: Resultado de condicionamento com amônia.	55
Figura 3.29	: Efeito da partícula de alta resistividade sobre a performance ...	56
Figura 3.30	: Depreciação na velocidade de migração w com aumento da resistividade da cinza volante, baseado em dados de campo	57
Figura 3.31	: Efeitos da umidade e alta temperatura sobre a performance do precipitador (forno de cimento)	57
Figura 3.32	a) w_e x SO_3 solúvel em água	59
	b) w_e x % Fe_2O_3	59
	c) w_e x % enxofre contido no carvão.	59
Figura 3.33	: Resistividade x concentração de óxido de sódio para cinza volante de carvão de baixo teor de enxofre.....	62
Figura 3.34	: Relações entre velocidade de migração w e componentes do carvão	64, 66, 67
Figura 3.35	: Dosagem de SO_3 x eficiência do P.E.....	68, 69
Figura 3.36	: Comparativo entre planta real e planta piloto	70
Figura 3.37	: Influência do carbono na cinza sobre a performance do P.E. para cinza volante de alta resistividade	71
Figura 3.38	: Técnica de melhoria de precipitabilidade para cinza volante de alta resistividade	74

CAPÍTULO 4

Figura 4.1	: Célula de alta voltagem para medição da resistividade de pó ..	76
Figura 4.2	: Dispositivo para medir resistividade.	78
Figura 4.3	: Diagrama esquemático elétrico para o dispositivo.....	78
Figura 4.4	: Dispositivo para medir resistividade.....	80

CAPÍTULO 5

Figura 5.1	: Disposição dos eletrodos e material de teste.....	90
Figura 5.2	: Resistividade x temperatura ($d=0,5$ cm).....	94
Figura 5.3	: Resistividade x temperatura ($d= 1,0$ cm)	94
Figura 5.4	: Resistividade x temperatura ($d= 0,5$ e $d= 1,0$ cm)	95
Figura 5.5 a)	: Comparativo das resistividades de materiais diversos (escala logarítmica)	95
Figura 5.5 b)	: Comparativo das resistividades de materiais diversos (escala normal)	96

APÊNDICE A-1

Figura A-1.1	: Resistividade x temperatura($d=0,5$ cm).....	117
Figura A-1.2	: Resistividade x temperatura ($d= 1,0$ cm)	118
Figura A-1.3	: Resistividade x temperatura ($d= 0,5$ e $d= 1,0$ cm)	119
Figura A-1.4	: Comparativo das resistividades de materiais diversos.....	120

APÊNDICE A-3

Figura A-3.1	: Descrição dos elementos funcionais do dispositivo de teste	126
Figura A-3.2	: Visão espacial do dispositivo de teste	127

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3		Página
Tabela 3.1	: Relações entre resistividade e campo elétrico	30
Tabela 3.2	: Eficiência de coleta de acordo com a voltagem aplicada e potência	72
Tabela 3.3	: Técnicas para melhoria das características para pós de alta resistividade	73

APÊNDICE A-1

Tabela A-1.1	: Planilha com resultados do teste número 1	108
Tabela A-1.2	: Planilha com resultados do teste número 2	109
Tabela A-1.3	: Planilha com resultados do teste número 3	110
Tabela A-1.4	: Planilha com resultados do teste número 4	111
Tabela A-1.5	: Planilha com resultados do teste número 5	112
Tabela A-1.6	: Planilha com resultados do teste número 6	113
Tabela A-1.7	: Planilha com resultados do teste número 7	114
Tabela A-1.8	: Planilha com resultados do teste número 8	115
Tabela A-1.9	: Planilha com resultados do teste número 9	116

APÊNDICE A-2

Tabela A-2.1	: Fonte de erro das variáveis	122
--------------	-------------------------------------	-----

APÊNDICE A-5

Tabela A-5.1	: Análise química da cinza	134
Tabela A-5.2	: Composição do carvão utilizado na caldeira	135
Tabela A-5.3	: Ensaio em carvão	135
Tabela A-5.4	: Análise de metais, óxidos componentes das cinzas	136
Tabela A-5.5	: Ensaio em cinza	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	: American Society of Mechanical Engineers
CBC	: Companhia Brasileira de Caldeiras (Nome de empresa)
CPE	: Concentração de Particulado na Entrada (do precipitador)
CPS	: Concentração de Particulado na Saída (do precipitador)
E.C.	: Eletrodo de Captação
E.E.	: Eletrodo de Emissão
IEEE	: Institute of Electrotechnical and Electrical Engineering
PDF	: Placa Distribuidora de Fluxo
P.E.	: Precipitador Eletrostático

LISTA DE SÍMBOLOS, ADIMENSIONAIS E SUBSCRITOS

Lista de Símbolos

Letras

a	: Raio da partícula esférica	[μm]
a_r	: Aceleração (de batimento)	[m/s^2]
A	: Área total de coleta do precipitador	[m^2]
A	: Área do disco de coleta	[cm^2]
b	: Largura da seção de precipitador	[m]
d	: Distância entre a placa e o fio ou entre eletrodos	[m]
D	: Coeficiente de difusividade turbilhonar	[m^2/s]
E_e	: Intensidade média do campo elétrico para eletrificação	[V/m] ou [kV/mm]
E_p	: Intensidade média do campo elétrico para precipitação	[V/m] ou [kV/mm]
E, E_A, E_g	: Campo elétrico	[V/m] ou [kV/mm]
E	: Energia de ativação do elétron	[ev]
E_s	: Campo elétrico de início do efeito corona	[V/m]
F_{Drag}	: Força de arraste viscosa	[N]
F_{Eletrost}	: Força eletrostática	[N]
g	: Aceleração da gravidade	[$9,81 \text{ m/s}^2$]
h	: Altitude da seção do precipitador eletrostático	[m]
I	: Corrente elétrica	[A]
J_A, j	: Densidade de corrente média	[A/m^2]
L	: Comprimento da seção de precipitador eletrostático	[m]
L_o	: Comprimento da seção de precipitador eletrostático necessário para coletar todas as partículas em regime laminar	[m]
m_a	: Massa de pó	[g]
P_E	: Tensão de coesão elétrica	[N/m^2]
Q	: Carga da partícula	[C]
SCA	: Área de captação específica	[$\text{m}^2/\text{m}^3/\text{s}$]
T	: Temperatura	[$^{\circ}\text{C}$]

TR	: Taxa de redução	[-]
t	: Espessura da camada de pó na placa	[mm ou cm]
U	: Velocidade média de escoamento	[m/s]
UR	: Umidade Relativa	[%]
V_g	: Vazão total de gás	[m ³ /s]
V_s	: Voltagem de início do efeito corona	[V]
V	: Voltagem	[V]
V_g	: Voltagem de precipitação	[V]
w	: Velocidade relativa de migração das partículas	[cm/s]
w_e	: Velocidade de migração efetiva das partículas	[cm/s]

Letras Gregas

ε_o	: constante de permissividade elétrica do ar	[F/m]
κ	: constante dielétrica do ar	[-]
μ	: viscosidade dinâmica do ar	[kg/m.s]
η	: eficiência de precipitação segundo DEUTSCH	[%]
π	: número de Pi (= 3,1416)	[-]
ρ, ρ_A	: resistividade	[ohm.m]
ρ_g	: resistividade do gás	[ohm.m]
ρ_d	: resistividade do pó	[ohm.m]
ε	: eficiência de coleta fracional	[-]
ρ_e	: resistividade crítica	[ohm.m]
ρ_a	: resistividade aparente	[ohm.m]
ξ	: taxa de corona inversa	[-]
$\Delta V, V_d$	: Queda de voltagem da lei de ohm devido a camada de pó	[V]

Adimensionais

$$D_e = \text{Número de DEUTSCH} = \frac{A \cdot w}{V_g} = \frac{w \cdot L}{U \cdot b} = \frac{\text{forças elétricas}}{\text{forças inerciais}}$$

$$S_c = \text{Número de SCHMIDT} = \frac{U \cdot b^2}{D \cdot L} = \frac{\text{forças inerciais}}{\text{difusão turbilhonar}}$$

Subscritos

b	:	“broken “, ruptura .
d	:	“draft “, queda .
g	:	de precipitação.
g	:	gás
s	:	“ start “, início.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Com a crise de energia atual e mundial, é crescente a busca por alternativas fontes de energia elétrica.

No caso do Brasil, o potencial hidráulico está sendo utilizado no seu limite, não permitindo grandes expansões. No sul do Brasil, devido à disponibilidade de combustível sólido - o carvão - existem usinas termoelétricas que, a partir da queima deste carvão, produzem energia elétrica (por exemplo, a CGTEE - Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica, situada na cidade de Candiota, a 400 KM ao sul de Porto Alegre-RS).

O uso de carvão mineral do Brasil em processos industriais para geração de calor tem sido problemático devido ao seu baixo teor calorífico e alto teor de componente inerte (sílica). É uma grande fonte de poluição atmosférica, composta de partículas (poeira) de sílica, com diâmetros de 0,1 a 10 μm , que são particularmente nocivas à saúde humana.

O carvão brasileiro é barato (sua extração é feita a céu aberto, na região Sul), mas possui alto teor de cinzas e, uma vez queimado na fornalha da caldeira, resulta em cinzas que são levadas pelos gases de combustão para a atmosfera. Por isso essas cinzas volantes devem ser coletadas e condicionadas para que não se transformem em poluentes do ar, prejudicial aos seres vivos.

A Companhia Vale do Rio Doce implantou vários precipitadores eletrostáticos com tecnologia japonesa (Nippon Steel e Mitsubishi) para a retenção dos particulados gerados no processo de pelotização (uma das fases do processo de produção de aço carbono, em que o minério de ferro fica em forma de pequenas esferas, "pelotas") para satisfazer os critérios exigentes de controle de poluição impostos hoje em dia. O uso de precipitadores eletrostáticos tende a aumentar no futuro em função das exigências cada vez mais severas quanto à diminuição de particulados nos gases lançados na atmosfera.

Embora as unidades iniciais e, portanto, a tecnologia, estejam sendo adquiridas do exterior, é desejável, a médio e longo prazo, que se assimile e readapte

essa tecnologia, de modo a maximizar sua funcionalidade dentro da realidade brasileira. Para tal fim é necessário construir protótipos de laboratório a serem usados para pesquisa e aplicados aqui no Brasil. É também importante que profissionais sejam treinados não só para a operação, mas para o projeto, adaptação e construção de futuras gerações de precipitadores brasileiros.

Os precipitadores eletrostáticos têm sido aplicados nas indústrias do mundo todo há mais de 50 anos, como um equipamento de alta eficiência de coleta de pó e, diante disso, esforços têm sido feitos para ampliar sua faixa de aplicação em outros processos de diversas áreas.

Em países como Estados Unidos, Japão e grande parte da Europa, os precipitadores eletrostáticos têm sido amplamente utilizados para tratamento de gases após grandes caldeiras que queimam carvão mineral. Pesquisas (SUZUKI E TACHIBANA, 1984 e POTTER, 1984) tem sido realizadas para caracterizar a resistividade ôhmica do carvão de cada região de extração e consumo. Por isso é importante determinar os valores de resistividade ôhmica das cinzas volantes para caracterizar o respectivo processo de coleta quando precipitadores eletrostáticos são instalados, como equipamentos de controle ambiental.

No Brasil, existem poucos estudos na área de precipitadores e pouco se sabe sobre as características ôhmicas das cinzas volantes de carvões minerais nacionais.

O objetivo do presente trabalho é avaliar a resistividade ôhmica das cinzas volantes dos carvões utilizados no Brasil. Com os dados de resistividade ôhmica de um carvão a ser analisado, o pesquisador ou o engenheiro de projetos poderá:

- Dimensionar adequadamente o precipitador, quanto ao seu tamanho ou área de coleta de pó, necessária para uma eficiência requerida de coleta;
- Predizer o comportamento elétrico dos campos de coleta, quando determinado carvão for queimado na caldeira e ainda dimensionar os sistemas de condicionamento de gases e de injeção de agentes químicos que, em contato com os gases ou com particulado, poderão facilitar a coleta das cinzas; e
- Predizer a eficiência de coleta do Precipitador Eletrostático existente e estimar a emissão de particulado após o precipitador eletrostático.

Capítulo 2

OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

1. Elaborar uma revisão da literatura com as principais pesquisas desenvolvidas na área;
2. Projetar, construir e montar um dispositivo experimental de acordo com norma ASME, para medir a resistividade ôhmica de cinzas de carvões minerais do Brasil;
3. Elaborar um banco de dados da resistividade ôhmica das cinzas volantes avaliadas;
4. Elaborar um conjunto de considerações que auxiliem a dimensionar o precipitador eletrostático.

Capítulo 3

REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura relacionada com esta dissertação, compreende, na sua grande maioria, trabalhos publicados entre 1983 e 2001, sendo que alguns trabalhos com data de publicação anterior a este intervalo também foram incluídos em virtude de sua relevância para a compreensão dos fenômenos estudados.

Por se tratar de um assunto pouco pesquisado no Brasil, recorreu-se na sua grande maioria a trabalhos publicados em Conferências Internacionais e livros clássicos, conhecidos internacionalmente, devido aos conceitos básicos envolvidos. Pode-se destacar os trabalhos publicados por pesquisadores dos Estados Unidos e Japão, em um primeiro grupo, seguidos por Inglaterra, Coréia e África do Sul.

Muitos trabalhos foram elaborados a partir de resultados obtidos de equipamentos instalados em plantas industriais. Por fornecerem bons resultados, no aspecto prático de engenharia, são também citados nesta dissertação.

A apresentação dos trabalhos revisados segue a ordem cronológica de sua publicação, a fim de permitir o acompanhamento da evolução dos conhecimentos sobre o assunto em questão. Em virtude da abordagem adotada e do assunto, dividiu-se a revisão bibliográfica nos seguintes tópicos:

3.1 Conceitos teóricos sobre precipitação eletrostática;

3.2 Entendimento do conceito de resistividade ôhmica, seu significado e interpretação;

3.3 As conseqüências da variação da resistividade;

3.4 Técnicas para adequar a resistividade como parâmetro de projeto.

3.1 Conceitos teóricos sobre precipitação eletrostática

O precipitador eletrostático é um dispositivo usado para remover partículas sólidas ou líquidas suspensas em um meio gasoso usando forças eletrostáticas. Além das indústrias, os precipitadores também são usados para limpar o ar em hospitais, áreas residenciais e comerciais e áreas de trabalho. Exibem qualidades superiores a outros tipos de filtros:

- a) baixa potência elétrica necessária para seu funcionamento;
- b) baixa perda de carga no escoamento;
- c) altíssima eficiência (99-99,9%) de filtragem (eficiência é a remoção de particulado do fluxo gasoso que contém o pó) mesmo para partículas menores do que $0,3\mu\text{m}$;
- d) simplicidade de manutenção e baixos custos operacionais.

Precipitadores eletrostáticos são usados na indústria para diminuir a concentração de partículas sólidas lançadas à atmosfera. Centrais termoelétricas de usinas siderúrgicas em geral estão entre os principais usuários desta tecnologia.

Fig. 3.1- Vista simplificada dos processos em um precipitador (CHOI, 1991).

3.1.1 Princípio de funcionamento do Precipitador Eletrostático (P.E.)

Processos elétricos, de transporte e mecânicos ocorrem interdependentemente nos precipitadores eletrostáticos, conforme esquematizado na Fig.3.1. Na região de entrada dos precipitadores, as partículas são carregadas eletricamente por íons gerados nas regiões de descarga elétrica (onde ocorrem campos elétricos de alta intensidade). As partículas assim carregadas são atraídas pelas placas coletoras através de forças elétricas onde se depositam, criando uma camada. A espessura dessa camada tende a aumentar continuamente, diminuindo a eficiência do precipitador. Assim, torna-se necessário sacudir as placas coletoras a intervalos regulares, para se evitar uma deterioração demasiada da eficiência e para a remoção final do particulado assim precipitado.

A Fig. 3.2 esquematiza o princípio de funcionamento de um P.E. - uma alta tensão aplicada nos Eletrodos de Emissão (E.E.) através de um Transformador Retificador gera, inicialmente, um campo elétrico de alta intensidade em torno dos E.E.

A descarga corona resultante ioniza as moléculas dos gases presentes entre os Eletrodos de Captação (E.C.) e os E.E.. As moléculas ionizadas em movimento colidem com as partículas de pó presentes nos gases de combustão, eletrizando-as, em sua grande maioria negativamente. As partículas ionizadas negativamente são atraídas aos Eletrodos de Captação (E.C.) e as carregadas positivamente são atraídas aos E.E., devido às forças elétricas resultantes do campo elétrico gerado pela diferença de potencial aplicada entre os eletrodos.

Fig. 3.2 - Princípio de coleta (CBC, 1978)

Para o P.E. tipo seco, a Fig. 3.3 esquematiza o processo de coleta e remoção de particulado. As partículas contidas nos gases e retidas nos Eletrodos de Captação são removidas através de um Sistema de Batimento mecânico (martelos articulados por meio de braços e escalonados em eixos, em movimento rotativo), acionados externamente à carcaça do P.E., por meio de moto-redutores.

Fig 3.3 - Esquema do processo de coleta e remoção de pó (CBC, 1980).

3.1.2 Partes Integrantes do P.E.

O P.E. é composto das seguintes partes estruturais (ver Fig. 3.4):

a) Estrutura Suporte do P.E.

São os elementos estruturais como as colunas e vigas que suportam o elemento principal, a carcaça. Em geral podem ser feitas de colunas com perfis soldados ou laminados comerciais ou ainda com tubos estruturais com reforços intermediários.

b) Plataformas/Escadas de Acesso

São os elementos externos que permitam o acesso a todos os níveis do equipamento, seja para inspeção ou manutenção e são utilizados na fase de montagem mecânica; Em geral são utilizados perfis laminados ou cantoneiras para suportação das grades, chapa xadrez ou chapa expandida. São posicionados corrimãos feitos de tubos, rodapés na parte inferior e uma barra chata na posição intermediária.

Fig 3.4 - Vista explodida de um Precipitador Eletrostático (CBC, 1989).

c) Carcaça do Precipitador

A Carcaça do precipitador totalmente estanque é dimensionada em conformidade com as condições de projeto. Seu formato é, em geral, como uma grande caixa, em que as arestas formam elementos estruturais de sustentação e as faces, sem função estrutural, são dimensionadas para suportar a pressão interna dos gases.

As cargas atuantes na carcaça (peso próprio, pressão estática do gás, cargas de vento, pó nas tremonhas, equipamentos auxiliares, sobrecargas nas plataformas, escadas), são transmitidas à estrutura suporte através das Vigas do Teto e Colunas Laterais. Em casos especiais, considera-se também o peso devido ao acúmulo de neve no telhado (caso de países como Japão, Estados Unidos e Chile), ação de terremotos (Japão, Chile) e outras características do local onde será instalado o equipamento.

c.1) Bocais de Entrada/Saída e Placas Distribuidoras de Fluxo (P.D.F.)

Nas Paredes Frontal/Traseira da Carcaça do P.E. estão instalados os Bocais de Entrada/Saída dos gases.

Fig. 3.5 - Placa distribuidora de fluxo.

Como mostra a Fig. 3.5, a distribuição uniforme do fluxo de gás na seção transversal interna ao P.E. é garantida por um ou vários estágios de Placas Distribuidoras de Fluxo instaladas no Bocal de Entrada.

c.2) Vigas do Teto e Colunas Laterais

São os componentes estruturais que sustentam e transmitem as cargas dos elementos internos às Estruturas Suportes do P.E. As Vigas do Teto dispostas no topo da Carcaça, transversalmente ao fluxo dos gases, são do tipo vigas-caixão e pressurizadas pelo insuflamento de ar para evitar contaminação interna com gases do processo, além de sustentarem os elementos internos do P.E. (Sistemas de Batimento dos E.E., Eletrodos de Captação, Estruturas e Quadros dos E.E.), comportando em seu interior os Isoladores Suportes, que isolam e sustentam a parte ativa do P.E. da Carcaça aterrada.

As Colunas Laterais sustentam as extremidades das Vigas do Teto e transmitem as cargas às Estruturas Suportes.

c.3) Paredes Laterais de Fechamento da Carcaça

São painéis de Fechamento da Carcaça e não desempenham função estrutural. Constituem-se de chapas reforçadas externamente por perfis e servem para selar a Carcaça e evitar infiltrações de ar externo. Formam com os Bocais de Entrada e Saída, Vigas do Teto, Teto e Tremonhas do P.E. a parte enclausurada, onde são montados os elementos internos do P.E..

c.4) Paredes Frontal e Traseira, Vigas Laterais e Tremonhas

As Vigas do Teto e Colunas Laterais constituem os componentes estruturais do P.E.

As Paredes Frontal e Traseira, juntamente com as Vigas do Teto, Colunas Laterais, suportam os Bocais Entrada e Saída, respectivamente.

As Tremonhas com formato tipo fundo plano, trapezoidal ou piramidal recebem os materiais particulados captados e desalojados dos Eletrodos pelos Sistemas de Batimento dos E.E. e E.C.. A descarga das Tremonhas é feita por válvula rotativa, transportadores de arraste e transportador de corrente.

c.5) Portas de Acesso

As Bocas de Visita estão convenientemente localizadas para permitir fácil acesso para inspeção, limpeza e manutenção do P.E..

As Colunas Laterais estão localizadas entre os perfis que formam as colunas e permitem o acesso ao interior de cada campo elétrico do P.E.. São utilizadas para inspeções internas nos Sistemas de Batimento dos E.E., E.C., Estruturas, Quadros dos E.E., Eletrodos de Captação, Isoladores dos Sistemas de Batimento dos E.E., Placas Distribuidoras de Fluxo, Dutos, Bocais de Entrada e Saída. São posicionadas obrigatoriamente na entrada e na saída de campo elétrico.

As Vigas do Tetos permitem o acesso ao interior do P.E. para limpeza e manutenção dos Isoladores Suportes, Penetração e Resistências de Aquecimento dos Isoladores Suportes. Posicionadas na entrada e na saída de cada campo elétrico.

As Tremonhas permitem acesso ao seu interior para inspeções e manutenção das Chapas Chicanas, que são posicionadas em cada tremonha, de cada campo elétrico.

d) Partes Internas do P.E.

d.1) Conjunto dos Eletrodos de Emissão (E.E.)

O Sistema dos Eletrodos de Emissão constitui-se na parte ativa do sistema, ionizando as partículas pelo efeito corona.

O sistema dos Eletrodos de Emissão (Fig. 3.6 e 3.7) oferece:

- Rigidez - Os Eletrodos de Emissão utilizados são confeccionados a partir da estampagem de fitas de aço carbono, podendo ser com ou sem farpas. Os E.E. são fixados em quadros rígidos tubulares dispostos longitudinalmente ao fluxo do gás, que são suportados transversalmente ao fluxo pelas Estruturas Suportes dos Quadros e os Isoladores Suportes. Cada campo elétrico é composto por duas Estruturas Suportes, suportadas respectivamente, por dois Isoladores Suportes de cerâmica montados no interior das Vigas do Teto adjacentes.

- Alinhamento - A alta performance do P.E. é consequência do perfeito espaçamento entre os Quadros dos E.E. e os E.C. garantida pelas rigidez dimensional dos Quadros e das

Fig. 3.6 - Tipos de eletrodos (CBC, 1979).

Fig. 3.7 - Vista com detalhes de suportes dos quadros dos eletrodos de emissão (parte ativa, negativa) (CBC, 1979).

configurações dos suportes de Quadros e Estruturas (Fig. 3.9).

A Fig. 3.8 mostra como os E.E. são fixados aos Quadros dos Eletrodos por meio de estojos. O tensionamento dos E.E. quando montados nos Quadros, favorece a transmissão da força de impacto dos martelos do Sistema de Batimento, garantindo a limpeza dos E.E. e a performance do P.E.

. Operação do Sistema de Batimento dos Eletrodos de Emissão:

A operação do Sistema de Batimento dos E.E. é semelhante à operação do Sistema de Batimento dos Eletrodos de Captação, diferindo basicamente no menor tamanho dos martelos. Da mesma forma que nos batimentos dos E.C., os martelos são articulados por meio de braços e fixados escalonadamente em passo regular definido, em eixos com movimento rotativo, acionados externamente à carcaça, por meio de moto-redutores.

Os eixos dos martelos do Sistema de Batimento dos E.E. dispostos transversalmente ao fluxo de gás fixados por mancais a secos, presos à Estrutura Suporte dos Quadros dos E.E. são isolados nas passagens pela carcaça do

Fig . 3.8 - Detalhe de fixação dos eletrodos de emissão nos quadros (CBC, 1978).

Braço

Fig. 3.9 - Suporte dos quadros (CBC, 1978).

P.E., com a utilização de Isoladores (de cerâmica) de Batimento. Os martelos são dispostos em forma de uma espiral ao longo do eixo (Fig. 3.10). O Sistema de Batimento dos E.E. opera de forma contínua.

Os Isoladores de Batimento montados em caixas são protegidos da contaminação do pó e condensação superficial de umidade contido nos gases pela passagem de ar aquecido por resistências elétricas.

O fluxo de ar pelos furos das caixas protetoras dos Isoladores (item 6 da Fig. 3.10) é devidamente dimensionado em função da pressão estática interna ao P.E., a fim de garantir fluxo controlado de ar.

d.2) Conjunto de Eletrodos de Captação (E.C.) (Fig. 3.11)

O projeto dos Eletrodos de Captação oferece rigidez dimensional e excelente alinhamento com os Quadros.

A estabilidade dos E.C. é assegurada pelo maior módulo de resistência do Eletrodo de Captação. O Eletrodo de Captação, com largura definida e configuração mostrada na Fig.3.12, caracteriza-se por regiões de recirculação do fluxo e nervuras verticais, garantindo mínima reentrada

Fig. 3.10- Detalhe do sistema de acionamento e isolamento do eixo de batimento dos martelos nos quadros dos eletrodos de descarga (CBC, 1994).

Fig. 3.11 - Disposição do conjunto dos eletrodos de coleta ou captação (CBC, 1978).

de pó coletado ao fluxo de gás e rigidez dimensional, respectivamente.

As nervuras verticais eliminam as deformações dos Eletrodos de Captação durante a operação, que prejudicam o espaçamento com os Quadros dos E.E., diminuindo a máxima indução de campo elétrico e a conseqüente redução da eficiência do Precipitador Eletrostático.

O Sistema de Captação consiste de placas de E.C. justapostas e dispostas verticalmente, em passos regulares, em geral de 300 a 400 mm.

Em sua extremidade superior, os Eletrodos de Captação são fixados por duas peças articuladas e presas em vigas apoiadas longitudinalmente ao fluxo, nas partes inferiores de duas Vigas do Teto adjacentes.

.Operação do Sistema de Batimento dos Eletrodos de Captação:

A operação do Sistema de Batimento dos E.C. (Fig. 3.13) é semelhante à operação do Sistema de Batimento dos Eletrodos de Emissão, diferindo basicamente no maior tamanho dos martelos.

Da mesma forma que nos batimentos dos E.E., os martelos são articulados por meio de braços e fixados escalonadamente, definidos em eixos com movimento

Fluxo do gás entre os Eletrodos de Captação

Fig. 3.12- Fluxo de gás entre as placas (CBC, 1990)

rotativo, acionados por meio de motor-redutores.

Fig. 3.13 - Conjunto de acionamento do sistema de batimento das placas coletoras (CBC, 1978).

Os eixos dos martelos dos Sistemas de Batimento dos E.C. são dispostos transversalmente ao fluxo, fixados por mancais a seco e presos à estrutura das passarelas internas, na região da extremidade inferior dos Eletrodos de Captação.

Os martelos são dispostos em forma de uma espiral ao longo do eixo, de maneira a garantir que atinjam somente de 1 a 3 fileiras de Eletrodos de Captação, a cada intervalo de operação do ciclo intermitente.

Esse método de batimento minimiza a reentrada do pó, captado do fluxo de gás, produzindo distúrbios menores que 1 a 2 % do total da superfície de captação em qualquer momento.

O Sistema de Batimento dos E.C. opera de forma intermitente, com ciclo de batimento ajustável para cada campo elétrico, podendo ser alterado através do sistema de controle chamado de supervisor. Em condições específicas (para limpeza rápida durante inspeções internas), o Sistema de Batimento dos E.C. pode ser operado no modo contínuo.

d.3) Passarelas Internas

Passarelas Internas são dispostas transversalmente ao fluxo do gás no nível inferior de cada campo elétrico e localizadas:

- . à entrada do primeiro campo elétrico;
- . à saída do último campo elétrico;
- . entre os demais campos elétricos.

As Passarelas Internas permitem fácil acesso ao interior do P.E., necessário na inspeção e manutenção dos conjuntos internos.

d.4) Chapas Chicanas

Chapas Chicanas são instaladas transversalmente ao fluxo e denominadas:

- . chicanas do Teto do P.E. à entrada de cada campo elétrico;
- . chicanas laterais verticalmente nas Paredes Laterais entre o E.C. e a carcaça à entrada de cada campo elétrico;
- . chicanas das Tremonhas;
- . chicanas espaçadoras das Barras de Batimento dos E.C. fixadas nas passarelas internas.

As Chapas Chicanas são necessárias para evitar-se fluxo de gases fora das regiões dos campos elétricos. Suas remoções e alterações devem ser evitadas para não comprometer a eficiência do P.E..

e) Conjunto do Transformador Retificador

- Seção de Baixa Tensão

Para conectar e desconectar o equipamento do sistema e para ajustar, controlar, regular, limitar e supervisionar a corrente e tensão.

- Seção de Alta Tensão

Equipamento para transformar a tensão e retificar a corrente.

f) Sistema de Aquecimento dos Isoladores Suportes e de Batimento

O Sistema de Aquecimento dos Isoladores tem como finalidade evitar a condensação de umidade em suas superfícies, que podem provocar fugas de corrente elétrica e sua danificação. Os Isoladores Suportes e de Batimento são aquecidos por meio de resistências elétricas tubulares. Os Isoladores Suportes são fixados em suas bases ao redor de “bacias” refletoras.

Os Sistemas de Aquecimento dos Isoladores devem permanecer energizados durante a operação normal do P.E. e desenergizados somente em paradas de longa duração. Nas paradas de curta duração em que não haja necessidade de acesso ao interior das câmaras dos Isoladores (Vigas do Teto) devem permanecer energizados, a fim de agilizar a partida do P.E.

Deve-se permitir tempo suficiente de pré-aquecimento dos Isoladores Suportes e de Batimento durante a partida do P.E. e, também, nas paradas de curta duração quando permanecerem desenergizados.

3.1.3 Processo de precipitação

Do ponto de vista físico, o processo de precipitação eletrostática compõe-se de três estágios básicos: a) eletrificação das partículas, b) transporte das partículas eletrificadas às placas coletoras e c) remoção da camada de partículas das placas coletoras aos silos. Forças eletrostáticas têm um papel essencial em todos os estágios.

a) Eletrificação de partículas

A eletrificação das partículas é feita mediante o transporte dos íons produzidos na região imediata aos eletrodos de fio fino (onde há uma descarga corona causada pelo intenso campo elétrico resultante da não-homogeneidade geométrica do sistema capacitivo) até a superfície das partículas.

Fig. 3.14 - Comparação dos regimes de eletrificação (CHOI, 1991).

Devem ser reconhecidos dois regimes de eletrificação de partículas: o regime de bombardeamento e o de difusão. O primeiro é o resultado do fluxo de íons rumo à superfície das partículas, seguindo as linhas de campo elétrico. Já o segundo não depende da presença de campo elétrico e é devido ao acúmulo de íons que ocorre junto às partículas, por mecanismos de difusão. A Fig. 3.14 compara as contribuições dos dois regimes na eletrificação de partículas esféricas condutoras, sob condições de descarga típicas. Os dois regimes ocorrem simultaneamente em precipitadores eletrostáticos. Na maioria das aplicações, a eletrificação por bombardeamento prevalece devido à presença dominante de partículas com diâmetro acima de 1 μm .

b) Transporte de partículas eletrificadas

O transporte das partículas carregadas eletricamente acontece sob as influências concorrentes do campo elétrico (distribuído através do volume do canal de escoamento), dos detalhes específicos do escoamento (caracterizado por vórtices de grande escala e turbulência em geral), do processo de auto-difusão (que tende a uniformizar qualquer distribuição de concentração) e de outros fatores secundários, tais como o efeito de carga espacial, o efeito de corona inversa, etc.

Do equilíbrio das forças aplicadas na partícula podemos calcular a velocidade de migração da partícula (velocidade relativa ao escoamento em que a partícula está suspensa), w assumindo regime de escoamento de Stokes.

$$F_{Drag} = 6\pi\mu a w = 4\pi\epsilon_o p a^2 E_e E_p = F_{Electrost.}, \quad \text{onde}$$

$$p = \left[2 \cdot \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa + 2} \right) + 1 \right] \quad [1]$$

Na expressão acima, μ é a viscosidade do ar, a , o raio da partícula, ϵ_o , a permissividade elétrica do ar, κ , a constante dielétrica do ar, e E_e e E_p são os campos elétricos para eletrificação e precipitação, respectivamente. Da igualdade acima resulta:

$$w = \frac{2p\epsilon_o E_e E_p a}{3\mu} \quad [2]$$

Considerando a velocidade de migração w , vazão volumétrica de gás V_g e a área total de captação A , DEUTSCH apud WHITE (1962) chegou à seguinte expressão para estimar a eficiência do precipitador:

$$\eta = 1 - e^{-A \cdot w / V_g} \quad [3]$$

Um outro modo de calcular a eficiência de um precipitador eletrostático, na prática, é medir a concentração de particulados na saída do precipitador (CPS) e na

entrada do precipitador (CPE), calculando a eficiência de coleta de particulado = $[1 - (CPS/CPE)] \times 100 (\%)$.

O resultado acima foi obtido aplicando o princípio da conservação de massa (a massa que entra no precipitador é igual a massa que sai do precipitador, mais a massa que é coletada nas placas coletoras) e várias hipóteses simplificadoras, a saber:

- O nível de turbulência dentro do precipitador é o mesmo dentro da seção, o qual resulta em concentração de partículas, que é uniforme em cada seção transversal (à direção de escoamento) do precipitador, mas que decai ao longo da direção do escoamento;
- A velocidade de migração w , é constante ao longo do comprimento do precipitador, sendo responsável pela fração precipitada;
- Ausência de efeitos não-ideais tais como aglomeração, re-entrada, perdas pelos vãos superior e inferior, etc.

Podemos ver pela Eq. [2] que a segunda hipótese só é possível se os campos elétricos para eletrificação e precipitação, E_e e E_p , respectivamente, forem uniformes em todo o volume do precipitador, o que representa uma grande simplificação. A velocidade de migração é proporcional ao diâmetro da partícula. Portanto, a eficiência do precipitador é uma função do tamanho da partícula. Como consequência desta última observação, chega-se à conclusão de que a eficiência final do precipitador deve ser calculada integrando-se a distribuição de eficiências fracionadas (para cada tamanho de partícula) e levando-se em conta a distribuição inicial de tamanho de partículas.

Muito embora a expressão de DEUTSCH seja geralmente usada para calcular a eficiência real de precipitadores, a hipótese (a) acima é questionável do ponto de vista do escoamento. Pode-se argumentar que essa hipótese é a pior situação possível, i.e., a que gera a menor eficiência. Para provar o ponto, podemos assumir o outro extremo, ou seja, um nível de turbulência “zero” - um escoamento perfeitamente laminar. Nessa situação, a concentração uniforme inicial será completamente precipitada com um precipitador de comprimento finito, L_o , dado por:

$$L_o = \frac{U b}{w} \quad [4]$$

onde,

U = velocidade média do escoamento;

b = largura da seção do P.E.;

w = velocidade de migração.

Uma melhor aproximação da realidade resulta quando introduzimos o conceito de difusividade finita, que reflete de um nível de turbulência finito. Nesta aproximação, os dois casos anteriores, o de escoamento laminar e o de DEUTSCH, são os extremos correspondendo a difusividades zero e infinito, respectivamente. A solução geral do modelo de escoamento convectivo-difusivo pode ser obtido numericamente, resultando na Fig. 3.15, onde a eficiência de precipitação está representada como uma função de dois parâmetros adimensionais, o número de DEUTSCH, De , e o número de SCHMIDT, Sc .

Fig. 3.15 - Gráfico de eficiência segundo o modelo de difusividade finita (WHITE, 1962).

O número de DEUTSCH, De , pode ser interpretado como a razão entre as forças elétricas e inerciais, enquanto o número de SCHMIDT Sc , dá a razão entre as forças inerciais e de difusão turbilhonar. Eles são dados pelas seguintes expressões:

$$De = \frac{A w}{V_g} = \frac{w L}{U b} \quad [5]$$

$$Sc = \frac{U b^2}{D L} \quad [6]$$

Valores empíricos do coeficiente de difusividade turbilhonar foram estimados a partir de medidas de eficiência em um precipitador de laboratório. Os valores obtidos correlacionam-se bem com os níveis de turbulência medidos simultaneamente e aplicados a modelos vigentes de transporte turbilhonar.

Deste modo pode-se argumentar que muitos precipitadores comerciais estão, de fato, limitados por efeitos não ideais. Perdas por re-entrada (re-suspensão de partículas que se soltam da camada já precipitada) durante o batimento das placas coletoras da última seção de precipitação (o mais próximo à saída) parecem ser a fonte mais provável da queda de eficiência de precipitadores (que em todos os outros aspectos funcionariam satisfatoriamente). Por outro lado, isto não significa que deixará de tentar melhorar a qualidade do escoamento (aproximando-o ao regime laminar) para aumentar a performance básica de precipitação (é desejável que o escoamento seja o mais próximo possível do regime laminar).

c) Remoção da camada de partículas precipitadas

O estágio final da precipitação é a remoção da camada depositada nas placas coletoras para coleta nas tremonhas. Na maioria dos precipitadores industriais, batedores mecânicos ou eletro-mecânicos são usados para tal propósito. As camadas de partículas se destacam das placas coletoras, de preferência mantendo sua integridade como camada compactada, e caem sob a força gravitacional dentro das tremonhas coletoras. Na realidade, a camada sofre uma desintegração parcial e uma fração das partículas acaba retornando à suspensão. As partículas re-suspensas no

escoamento são re-depositadas fluxo abaixo, e esse processo de deposição e re-suspensão vai se repetindo até se chegar ao estágio final (último campo elétrico) do precipitador. As partículas re-suspensas neste último estágio acabam escapando do precipitador, o que constitui um mecanismo de perda de eficiência do precipitador. Torna-se evidente que, para o funcionamento adequado do precipitador, é importante diminuir a re-suspensão de partículas resultante da sua remoção mecânica das placas coletoras.

A ruptura da camada inicial de partículas e sua subsequente desintegração é uma função do estado de coesão das partículas na camada e das forças externas nela aplicadas. CHOI (1991), estudou como as forças externas são geradas durante o batimento das placas. Simulações numéricas da vibração de placas planas sujeitas a perturbações mecânicas do tipo gerado em precipitadores tem sido feitas . Medidas de acelerações em diversos pontos de placas planas foram feitos por vários autores na tentativa de caracterizar o funcionamento dos batedores em precipitadores.

Uma outra linha de investigação dedicou-se ao estudo da coesão da camada. A coesividade de partículas na camada é uma função de vários fatores, entre eles a distribuição de tamanho das partículas, a composição química, a resistividade elétrica (volumétrica e superficial), a umidade, a corrente elétrica fluindo através da camada, etc. Além da coesividade, que mede o nível de atração que as partículas sentem entre si dentro da camada, é importante também a adesividade, que mede a atração sentida entre a superfície da placa coletora e as partículas mais próximas a esta.

A análise da eletromecânica da camada de partículas sujeita a fluxo de cargas feita por MOLESHI (1983) mostrou que:

- fluxos de carga superficiais em adição aos volumétricos influenciam as forças de atração entre as partículas na camada e são dependentes da umidade;
- a natureza porosa da camada (constituída por partículas) gera concentrações locais de corrente nos pontos de contato, como mostra a Fig. 3.16, aumentando a coesão da camada através das tensões de MAXWELL;

Fig. 3.16 : Modelo de esferas uniformes em estrutura cristalina, mostrando a concentração das linhas de corrente (MOLESHI, 1983).

- a adesão (força de atração entre a placa coletora e a camada de partículas adjacente a esta) é maior que a coesão (atração entre partículas) por causa do maior módulo de YOUNG (e portanto menor deformação mecânica e maior concentração de corrente) do metal comparado com o da partícula, explicando porque, após o batimento das placas coletoras, observa-se junto a estas, uma camada fina de partículas ainda aderida.

Assim, podemos ver que, embora a precipitação eletrostática seja composta de três estágios bem distintos que podem ser analisados independentemente um do outro, a implementação prática não segue a mesma simplicidade. Daí a necessidade de iteração no projeto, para que todos os requisitos significativos sejam satisfeitos de uma maneira consistente. Só assim haverá controle sobre todas as fontes de perda de eficiência.

3.2 Conceito de resistividade ôhmica da partícula, seu significado e interpretação

Para permitir depósito sobre uma superfície de coleta dos precipitadores, as partículas devem possuir um pequeno grau de condutividade elétrica, de modo a conduzir a corrente iônica da descarga corona para a terra. A condutividade mínima requerida, como mostrado pela teoria e experiência, é em torno de $10^{-10} \text{ (ohm.cm)}^{-1}$.

Do ponto de vista prático, essa condutividade é comparável aos de metais comuns, mas é muito maior que a condutividade de bons isolantes elétricos.

Partículas tendo condutividade menor que o valor crítico de $10^{-10} \text{ (ohm.cm)}^{-1}$ são referidas como partículas de alta resistividade. A operação de precipitadores com partícula de alta resistividade é usualmente acompanhada pelo distúrbio da condição elétrica em forma de excessivo faiscamento (“sparking”) em baixas voltagens ou pela excessiva corrente em baixas voltagens.

Estes efeitos causam perda de eficiência (redução da captação de particulado) do precipitador, ou seja, se a resistividade aumenta, ocorre a perda da performance. Quando a resistividade excede o valor de 10^{11} ohm-cm , torna-se muito difícil atingir uma eficiência razoável com precipitador projetado convencionalmente. Tipos especiais de precipitadores podem ser usados ou, mais comumente, medidas devem ser tomadas para reduzir a resistividade.

Muitas partículas líquidas e certos tipos de partículas sólidas são intrinsecamente condutoras e portanto não causam dificuldade, devido a alta resistividade.

A maioria dos pós e fumos na aplicação em precipitação industrial, embora origemem de fornos, fundições, secadores e calcinadores, são compostos de silicatos, óxidos metálicos e compostos inorgânicos. Muitos destes materiais em estado puro e seco estão entre os melhores isolantes conhecidos e portanto, devem causar problemas em precipitadores (ou seja, dificulta a captação de pó).

Por outro lado, a umidade e as impurezas químicas presentes nos gases e adsorvido pelas partículas fornecem, ao menos, parte da condutividade requerida. Em outros casos, a temperatura do gás pode ser suficientemente alta para assegurar condutividade adequada na partícula, pelo efeito de condução de calor.

Baixa umidade, ausência de certas impurezas químicas específicas e temperatura na faixa de 120 a 230 °C podem causar alta resistividade nas partículas.

Felizmente, estas condições ocorrem em não mais do que em 10% de todas as aplicações em precipitação eletrostática. Embora a porcentagem de casos de alta resistividade não seja tão grande, é essencial que métodos práticos estejam disponíveis para reduzir a resistividade da partícula onde necessário.

Resistividade do gás em precipitadores livres de pó

O precipitador é um dispositivo de alta resistência. Por exemplo, um precipitador em escala reduzida, tipo tubular, com diâmetro de 0,25 m e comprimento de 4 metros, conduzindo uma corrente típica de $2,0 \times 10^{-4}$ A em cada m² de área de coleta, com um voltagem aplicada de 50 kV, tem uma resistência de aproximadamente 80 M ohm.

Como a resistência de um precipitador depende de suas dimensões e tamanho, é melhor considerar os eventos elétricos em termos de resistividade. Neste contexto, o condutor metálico do precipitador tem uma resistividade desprezível e na prática, a resistividade de um precipitador livre de pó (ou seja, limpo), em operação, pode ser identificado como a resistividade sem o gás. Para este fim, esta resistividade é obtida, por definição, da equação:

$$\rho = \frac{E}{j} \quad [7]$$

onde,

ρ = resistividade ôhmica;

E = campo elétrico médio que atravessa a distância entre o fio e a placa;

j = densidade de corrente média por unidade de área da placa de coleta aterrada.

Para o caso do precipitador especificado acima, desprezando a espessura do fio de descarga corona, E é $(5 \times 10^4) / 0,125 = 4 \times 10^5$ V/m e j é $2,0 \times 10^{-4}$ A/m², então

ρ_g , a resistividade do gás no precipitador trabalhando nestas condições é $(4 \times 10^5) / (2 \times 10^{-4}) = 2 \times 10^9 \text{ ohm.m}$ (ou $2 \times 10^{11} \text{ ohm.cm}$).

Deve ser notado que nesta geometria, o campo elétrico indica a resistência máxima que o gás se opõe, antes do faiscamento elétrico (ou seja, antes de ocorrer a descarga elétrica, típico de um arco voltaico). Esta situação elétrica, se mantida, é prejudicial ao processo de precipitação .

A resistividade do gás no precipitador depende das condições elétricas de trabalho. Segundo POTTER (1984), a relação entre a corrente I e a voltagem aplicada V em um precipitador é da forma:

$$I = c \cdot V \cdot (V - V_s) \quad [8]$$

onde V_s é a voltagem de início do efeito corona e c é uma constante.

Note que $I \propto j$, $V \propto E$ e $E = j \times \rho_g$, assim para um dado precipitador

$$\rho_g = \frac{1}{k \cdot (E - E_s)} \quad [9]$$

onde E_s é o campo elétrico de início do efeito corona e k é uma constante. Como E_s é também constante para um dado caso, segue-se que $1/\rho_g$ é inversamente proporcional ao campo aplicado E .

A Fig. 3.17 mostra as relações para um precipitador cilíndrico, livre de pó, contendo ar limpo a 125°C . A escala horizontal inferior é o inverso da resistividade (i.e. condutividade específica) e a escala superior é a resistividade.

Percebe-se que quando o efeito corona inicia, a resistividade do gás cai de 10^{10} ohm.m para 10^9 ohm.m e em um campo elétrico máximo de $5.3 \times 10^5 \text{ V/m}$, atinge-se a resistividade de $7 \times 10^7 \text{ ohm.m}$, que é o máximo valor antes do faiscamento elétrico do sistema. Este tipo de comportamento pode ser tomado como indicador qualitativo para os gases livres de pó em precipitadores eletrostáticos.

Fig. 3.17 - Relações entre o campo elétrico médio e a condutividade do gás, como característica elétrica para P.E. cilíndrico, livre de pó, com ar limpo à temperatura de 125 °C (POTTER, 1984).

Resistividade do P.E. com depósito de pó

É a situação quando um precipitador está coletando material particulado. Primeiro, se o material coletado é muito melhor condutor que o gás que o carrega, então a camada acumulada na placa coletora conduzirá a corrente do P.E. com um campo elétrico desprezível.

O espaço da passagem do gás será um pouco reduzido, devido a espessura da camada na placa causando um aumento correspondente no campo elétrico E à voltagem constante V aplicada. Isto aumentará a densidade de corrente j do precipitador proporcionalmente ($\rho = E / j$), mas o efeito será menor desde que a espessura do

material coletado não reduza o espaço de passagem do gás mais que 5% - em casos práticos.

Assumindo a não re-entrada do material coletado, ao ocorrer o aumento do campo elétrico do precipitador, aumenta a espessura da camada coletada e, gradualmente, aumenta a eficiência do processo de coleta, mas novamente, o efeito será imperceptível na prática, porque a espessura da camada (até 5 mm) é pequena em relação ao espaço entre os eletrodos (de 300 a 400 mm).

Considere-se agora que o material coletado é tão resistivo quanto o gás, i.e., $\rho = 2 \times 10^9$ ohm.m com campo elétrico de 0,4 kV/mm. Como a camada coletada aumenta, a voltagem original aplicada, assumida estável, se distribuirá ao atravessar a camada e o espaço em que o gás passa. A mesma corrente passa direto do gás para camada coletada. As resistividades são as mesmas e então o campo elétrico atravessa o gás e a camada coletada cresce em espessura. Deduz-se, portanto, que o processo de precipitação continua, e a resistividade da camada coletada de 2×10^9 ohm.m com campo de 0,4 kV/mm não impede a precipitação. Portanto, pode-se dizer que a camada coletada tem a mesma resistividade ou menor que a do gás; a precipitação ocorrerá sempre.

Considere-se agora a situação onde a camada coletada tem a resistividade várias vezes maior que do gás e que a voltagem aplicada, uma vez ajustada, é mantida constante. Esta situação é como descrita na Fig. 3.18. A figura mostra a resistividade elétrica do pó ρ_d com campo elétrico E_g , i.e., a voltagem de precipitação V_g . A camada de pó coletada atingiu a espessura t e sua resistividade elétrica é ρ_d , com campo elétrico E_d , correspondente a queda de voltagem V_d que o atravessa. A distância entre a placa e o fio é d e t/d será tomada a um valor máximo de 0,05. A voltagem aplicada V constitui-se:

$$V = V_d + V_g = j \cdot [\rho_d \cdot t + \rho_g(d - t)] \quad [10]$$

Sem a camada de pó, o campo de precipitação é $E = V / d$, e com a camada de pó, o campo de precipitação torna-se $E_g = V_g / (d - t)$; Assim

$$\frac{E}{E_g} = \frac{V}{V_g \left(\frac{d-t}{d} \right)} \quad [11]$$

como,

$$\frac{V}{V_g} = \frac{(1 + \rho_d \cdot t)}{\rho_g \cdot (d - t)} \quad [12]$$

segue-se que,

$$\frac{E}{E_g} = \frac{1 + t}{d \cdot \left(\frac{\rho_d}{\rho_g} - 1 \right)} \quad [13]$$

O campo elétrico médio que atravessa a camada de pó E_d é V_d / t ; assim por substituição apropriada $E_d / E_g = \rho_d / \rho_g$.

Fig. 3.18 – Explicação de símbolos para o modelo de P.E. (POTTER, 1984)

A relação para E / E_g mostra que a diminuição do campo elétrico na coleta de um pó mais resistivo que o gás compensa o aumento da espessura da camada de pó. Com t / d em seu valor prático máximo de 0,05 e colocando o campo elétrico de precipitação livre de pó ao valor máximo de 0,40 kV/mm, a seguinte tabela é gerada das relações acima:

Tab. 3.1 - Relações entre a resistividade e o campo elétrico(POTTER, 1984).

$\rho_d / \rho_g = E_d / E_g$	E / E_g	E_g (kV mm ⁻¹)	E_d (kV mm ⁻¹)
1	1,00	0,400	0,40
3	1,10	0,364	1,09
6	1,25	0,320	1,92

Considerando o caso de cinzas, é aceitável que a maioria das camadas de cinzas volantes coletadas em precipitador com corona inversa está com campo elétrico na faixa de 1 a 2 kV/mm. Referindo-se à Tab. 3.1, o início da corona inversa ocorre aproximadamente quando a camada é entre 3 a 6 vezes a resistividade do gás.

A linha inferior da Tab. 3.1 mostra que a perda do campo elétrico de precipitação pode ser considerável ($E / E_g = 1,25$). A conseqüente perda da eficiência de coleta pode ser deduzida da Eq. [14] (para um cinza volante típica):

$$\ln(1 - \varepsilon) = -0,160 - 0,315 \cdot SCA \cdot E^2 \quad [14]$$

onde,

E = campo de precipitação, kV mm⁻¹;

SCA = área de coleta específica, m²/m³/s;

ε = eficiência de coleta fracional por peso, que excede 0,7.

A redução do campo de precipitação por um fator de 1,25 pode reduzir a eficiência de coleta de 99,4% (com placas de coleta limpas) para 96,7% (correspondendo à espessura da camada coletada imediatamente antes do batimento, para limpar as placas).

O gás em um precipitador é um condutor não ôhmico e como visto anteriormente, sua resistividade cai com o aumento do campo elétrico aplicado.

Assim, o critério que determina o processo de precipitação é que a resistividade da camada do material coletado deve ser maior do que a resistividade do gás que o carrega.

Parâmetros de resistividade úteis

Dois conceitos são importantes: resistividade operacional e resistividade crítica.

A resistividade operacional de uma camada de material coletado em um precipitador é a resistividade daquela camada na condição de operação do precipitador. Esta definição considera que a resistividade do material pode variar com o campo elétrico, temperatura e composição do ambiente gasoso e é identificada com o apropriado modo de condução, i.e. íons gasosos descarregando sobre um lado da camada de pó.

A resistividade crítica é o valor da resistividade operacional em que, em um precipitador em operação, o impedimento resistivo causa uma significativa redução na eficiência de coleta.

Da experiência, usando a Eq. [14] como uma função linear do campo elétrico aplicado, verificou-se que a resistividade crítica é alcançada quando a perda efetiva do campo elétrico aplicado (ou voltagem) é 5%. Neste caso, esta perda causaria uma queda na eficiência de coleta de 99,6% para 99,5% (valor significativo, na prática) .

Considerações práticas a respeito da resistividade crítica

Para mostrar o conceito de resistividade crítica, tomou-se um exemplo onde a voltagem aplicada não é mantida constante, mas é aumentada para compensar a perda de voltagem causada quando a resistividade da camada coletada é maior que aquela do gás.

Este ajuste, que se assemelha àquele usado em um modelo em escala, na prática, conserva o campo elétrico de precipitação acima dos valores daqueles obtidos com placas limpas, pelo menos até a voltagem adicional atingir seu valor limite, correspondente à ruptura elétrica da camada coletada, i.e. o início da descarga corona inverso.

A curva de densidade de corrente e voltagem para este exemplo foi tomada de WHITE (1962), e aplica-se ao precipitador tubular de 9 polegadas (228,6 mm), em que a descarga corona inicia em 25 kV e trabalha a um máximo de 45 kV, correspondendo a uma densidade de corrente de 1 mA/m². A curva dada por WHITE (1962), foi reproduzida na Fig. 3.19 [por conveniência com a Eq. $j = 1,412 \times 10^{-14} E$ (valor de $E = 2,23 \times 10^5 \text{ V.m}^{-1}$ quando $j = 0$), onde j é em A/m² e E o campo correspondente a voltagem aplicada, é em V.m⁻¹]. A resistividade do gás ρ_g , em ohm.m é calculada da fórmula equivalente $1/\rho_g = 1,412 \times 10^{-14} (E = 2,23 \times 10^5 \text{ V.m}^{-1}, \text{ quando } j=0)$ e atinge o limite inferior de $4 \times 10^8 \text{ ohm.m}$ na tensão elétrica máxima de $0,4 \text{ kV mm}^{-1}$.

Referindo à Fig. 3.19 e usando o critério acima para resistividade crítica, segue-se que o campo elétrico máximo antes da perda de performance é $(0,95 \times 4^2)^{0,5} \times 10^5 \text{ V.m}^{-1}$, correspondente a densidade de corrente de $9,19 \times 10^{-4} \text{ A.m}^{-2}$ e à resistividade do gás de $4,2 \times 10^8 \text{ ohm.m}$ (ver a seta superior horizontal sobre a figura).

A resistividade crítica, com a camada da cinza volante infinitesimal, de ruptura do campo é então calculado de $\rho_e = E_b / j = 10^6 / (9,19 \times 10^{-4}) = 1,1 \times 10^9 \text{ ohm.m}$.

Este valor é 2,6 vezes a resistividade do gás correspondente e ilustra como um precipitador é sensível à dificuldade de captação.

O valor de ρ_c é diretamente proporcional à força de ruptura da camada. Então, aquelas camadas de cinzas volantes permanecem na faixa $E_b = 1 \sim 2 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}$. A resistividade crítica da cinza volante ρ_c no caso de WHITE (1962) fica entre os limites de $1,1 \sim 2,2 \times 10^9 \text{ ohm.m}$ ao campo E_b .

Em qualquer resistividade mais alta, quando E_b é atingida, inicia-se o corona inverso e a voltagem de sobre faísca é reduzida abaixo de 45 kV.

Assumindo $E_b = 1 \text{ kV mm}^{-1}$, $V_d = 5 \text{ kV}$ e $V_g = 45 - 5 = 40 \text{ kV}$, $E_g = 40 / (112 - 5) = 0,374 \text{ kV / mm}$; da Fig. 3.19 obtém-se, $j = 7,97 \times 10^{-4} \text{ Am}^{-2}$; $E_b = E_d$, então $\rho_d = E_d / j = 1,25 \times 10^9 \text{ ohm.m}$.

Fig. 3.19 – Relações derivadas entre a densidade de corrente e campo médio para precipitador tubular de 228,6 mm, com fio de 4 mm de diâmetro (POTTER, 1984)

Se E_b é 2 kV mm^{-1} , um recálculo mostra que uma baixa voltagem de sobre faísca é experimentada à $\rho_d = 4,2 \times 10^9 \text{ ohm.m}$. Neste caso $E_g = 0,327 \text{ kV mm}^{-1}$ e para uma cinza volante típica mencionada acima, este reduziria a eficiência original de 99,4% para 97,1% (causando aumento de 5 vezes na emissão de pó, após o precipitador).

A Fig. 3.19 foi marcada para mostrar os dois valores de ρ_d calculados para reduzir a voltagem original de sobre faísca. A sensibilidade do precipitador à resistividade da cinza volante exatamente abaixo do campo de ruptura ($E_b = 2 \times 10^6 \text{ V}$

m^{-1}) pode ser examinada. Essa sensibilidade não tem efeito até a resistividade atingir $2,2 \times 10^9 \text{ ohm.m}$; mas à $4,2 \times 10^9 \text{ ohm.m}$, com uma camada de espessura de 5 mm, a emissão de pó aumenta aproximadamente 5 vezes - sem ter corona inversa.

O argumento anterior demonstra que a resistência que impede a precipitação é explicável em termos de dois mecanismos que podem ser coincidentes em vários casos.

O primeiro é a redução do campo elétrico de precipitação acima da resistividade crítica que é várias vezes correspondente à resistividade do gás. Este mecanismo não é associado com qualquer interferência de carregamento de partícula e atinge seu efeito quando ocorre ruptura do campo elétrico na camada de pó coletada.

Este efeito inicial pode então ser complementado pelo aparecimento de corona inverso, que é o oposto ao corona normal, que avança e, dependendo de sua intensidade, parcialmente descarrega e desacelera partículas quando eles aproximam-se na placa de coleta.

Conclui-se portanto que a identificação do corona inverso em um precipitador é um diagnóstico para prever a dificuldade de coleta de pó.

Considerações práticas a respeito da resistividade operacional

Resistividade operacional é melhor discutido em relação a cinza volante, o particulado que comumente mostra a dificuldade para precipitação. Cinza volante é o principal resíduo inorgânico quando o carvão mineral pulverizado é queimado.

Fisicamente, cinza volante é um pó cinzento constituído de pequenas esferas, próximas, um pouco falhos e com tamanho de $0,1 \mu\text{m}$ a acima de $50 \mu\text{m}$ e de diâmetro médio na faixa de $5 \sim 20 \mu\text{m}$. Quimicamente, ela é não homogênea e composta principalmente de sílica - alumínio silicato de alcali, terra alcalina e metais de transição.

Cinza volante não tem um ponto de fusão, mas pode ser completamente fundida na faixa de 1200°C a 1600°C . Idealmente, não deveria conter qualquer carbono não queimado, mas na prática, níveis de 2% são comuns, ou presos nas partículas ou como discretos fragmentos ricos em carbono.

Com suficiente carbono, a camada de cinza volante conduz sem dificuldade mas, 2 % de carbono residual não é considerado suficiente para este fim.

Em precipitador de baixa temperatura ($100 \sim 250^{\circ}\text{C}$) é aceito que a fase sílica predominante da cinza volante é muito isolante para conduzir a corrente normal, ou seja, a resistividade de volume excede qualquer resistividade crítica.

A composição superficial da cinza volante é importante em baixas temperaturas e a resistividade superficial é a propriedade relevante que determina se a corrente do precipitador flui adequadamente.

Em altas temperaturas ($> 350^{\circ}\text{C}$), a resistividade de volume da cinza volante cai o suficiente para não conduzir a corrente do precipitador e fornecer o esvaziamento da superfície de íons; assim a deposição de camada isolante pode ser evitada, e a dificuldade de coleta de pó não é esperada.

Mecanismo de Condução

Segundo WHITE (1962), a condutividade elétrica de uma camada volumosa de partícula depende da condução por volume e por superfície.

Na condução por superfície, cargas elétricas são carregadas na superfície úmida e filme químico absorvido sobre as partículas. Estes filmes usualmente diferem fisicamente e quimicamente do interior das partículas devido ao fenômeno de adsorção.

Condução por volume, ou de movimento de carga elétrica através do interior das partículas depende, por outro lado, da composição e da temperatura das partículas. A condução por volume também envolve outros fatores, como a compressão da camada de partícula, tamanho da partícula, formato e propriedade superficial.

Estes fatores, no entanto, são insignificantes em casos de partícula de alta condutividade.

Condução por volume ou intrínseco

Investigações tem mostrado que condução em partícula mineral semi-isolante pode ser iônico ou eletrônico.

O exemplo mais comum de condução iônica são em metais como o brometo de prata, que são de pouca importância em precipitação eletrostática. Condução eletrônica

ocorre em muitos materiais, como os óxidos metálicos e silicatos, que são de interesse em gases de processos industriais.

É bem conhecido que a resistência dos dielétricos, como o vidro ou cerâmica, diminui com o aumento da temperatura. A taxa de redução (TR) dessa resistência varia com o material, mas a maioria dos materiais seguem uma lei exponencial da forma

$$TR = A \cdot e^{\frac{E}{k \cdot T}} \quad [15]$$

onde,

TR = taxa de redução;

A = constante;

E = energia de ativação do elétron;

k = constante do Boltzmann;

T = temperatura.

Investigações indicam que a resistividade de muitos pós e fumos industriais como medido em laboratório com ar atmosférico pode ser calculada com razoável aproximação pela Eq. [15], para temperaturas em torno de 120 °C, onde a condução por volume predomina.

Resultados experimentais da resistividade em função de $1/kT$, para vários pós representativos, são mostrados na Fig. 3.20. Nota-se que materiais com alta resistividade ρ tem valores menores de energia de ativação como mostrado na Fig. 3.21. Também pode ser observado que os valores da energia de ativação do elétron E estão na faixa de 0,2 ev à 0,8 ev.

Dos resultados anteriores, deduz-se que a condutividade por volume dos pós e fumos é causada pela temperatura de excitação dos elétrons internos.

A condutividade aumenta rapidamente com a temperatura, de acordo com a Eq. [15]. Medições no campo também confirmam o aumento na condutividade da partícula e a melhoria na performance (entenda-se, melhoria na retenção de particulado) dos precipitadores coletando estes materiais à temperaturas mais altas.

Fig. 3.20 : Resistividade $\times 1/kT$
(mono logaritmo) (WHITE, 1962)

Fig. 3.21 : Valores experimentais de
energia de ativação do elétron (WHITE,
1962)

Condução por superfície

Este efeito usualmente predomina para partícula semi-isolante em temperaturas menores, em torno de 150° a 200°C .

A teoria envolve o fenômeno da adsorção (física e química). Adsorção física é caracterizada pela energia de ligação relativamente baixa, da ordem de mil calorias por mol absorvido.

Adsorção química envolve energia de ligação da ordem de 10.000 calorias por mol. Isto fornece uma base qualitativa para entendimento da ação de condicionadores químicos.

Adsorção de um filme úmido sobre uma superfície quimicamente inerte será devido apenas à força de Van der Waal e portanto será mais fraca. Condução na superfície úmida de um filme é eletrolítica ou iônica, sendo predominante o mecanismo de salto de fóton, para transferir cargas.

Cálculos realizados indicam que em filmes úmidos, apenas umas poucas moléculas, são adequadas para fornecer a condutividade superficial desejada. Medições da quantidade de umidade dos pós concordam com esta conclusão. Por exemplo, a quantidade de umidade encontrada na cinza volante, é tipicamente na faixa 0,1% a 0,3%. A superfície destas cinzas são em torno de $5.000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ a $10.000 \text{ cm}^2/\text{gr}$.

Supõe-se, nestes casos que toda umidade está presente na forma adsorvida.

A condução superficial sobre partículas é definida como vazamento superficial de corrente ocorrendo em isoladores elétricos. Uma aplicação de interesse prático de vazamento superficial é a determinação do ponto de orvalho pela medida da corrente entre o eletrodo adjacente, montado sobre a superfície de vidro.

Tensão de Coesão Elétrica, P_E .

A camada precipitada presa à placa de captação por força elétrica depende da resistividade do pó coletado e da densidade de corrente dos íons.

Segundo MOLESHI (1983) observações e medições da deposição das cinzas e superfície de entrada foram feitas em um modelo de precipitador fio-duto usando cinza volante.

O modelo confirma a importância da tensão de coesão devido a corrente de íons, que flui direto à camada de cinza, produzindo um pacote compacto de camada, aderido fortemente à placa coletora.

Além disso, o resultado foca a atenção sobre o fato de que a distribuição da densidade de corrente na placa de coleta é normalmente não uniforme, que reflete a distribuição não uniforme do lado emissor.

Nas regiões de pouca ou nenhuma corrente de íons, o depósito de cinza encontrado foi 2 vezes mais espesso e com metade da densidade em relação a regiões com corrente, com baixa velocidade do fluxo ($< 1,7 \text{ m/s}$).

Por outro lado, em alta velocidade ($> 3,3 \text{ m/s}$) estas áreas do coletor estavam vazias, que é claramente atribuído à ocorrência de reentrada contínua em regiões onde não existia corrente de íons. É também bem conhecido que, se um precipitador em

operação é eletricamente desenergizado, observa-se um pulso de emissão de cinza que foi retornada ao fluxo gasoso .

A necessidade de acelerações maiores no batimento das placas (acima de 100g, na prática) indica a existência de uma forte tensão coesiva P_E . Assumindo um valor típico de $1 \text{ gm/cm}^3 = 10^3 \text{ kg/m}^3$ para a densidade da camada de cinza precipitada, a massa por unidade de área da camada (normalmente, espessura de 1 cm antes do batimento) será $m_a = 1 \text{ g/cm}^2 = 10 \text{ kg/m}^2$.

Como a força por unidade de área (ou tensão) é igual ao produto da massa por unidade de área e a aceleração (batimento) a_r , i.e., $P_E = m_a \cdot a_r$, com $a_r = 100g$ e $g = 10 \text{ m/s}^2$, calcula-se $P_E = 10^4 \text{ N/m}^2 \sim 100 \text{ g/cm}^2$.

A tensão de coesão é muito maior que a considerada pela força de atração e é associada com a presença de fluxo de corrente, direto à camada de pó.

Na prática, quando a alta voltagem é desligada, na ausência de corrente de íon, a necessidade de aceleração de batimento para limpar o coletor é muito menor que quando ligado.

Adicionalmente, os materiais de baixa resistividade ($\rho_A \leq 10^6 \text{ ohm.cm}$) não precipitam, como fazem os materiais de alta resistividade. Esta é a base do processo de separação mineral eletrostática. Disso, conclui-se que é o campo elétrico na camada

$$E_A = \rho_a \cdot J_A \quad [16]$$

é quem determina a força de adesão, mais do que a densidade de corrente J_A

Resistividade Aparente ρ_A

Em muitos carvões, especialmente os de baixo teor de enxofre, que exibe alta resistividade das cinzas, ocorre o problema de descarga corona inversa. Consideráveis esforços têm sido feitos para caracterizar a resistividade da cinza na camada, sendo que a condução de volume e de superfície contribui para essa resistividade.

A resistividade aparente da camada de pó depende não apenas de sua composição e do ambiente (temperatura e umidade), mas também da distribuição do

tamanho e formato da partícula, grau de compressão, modo de compactação e como ela é preparada (por precipitação ou por deposição).

A resistividade aparente da camada de particulado é normalmente determinada em uma célula de resistividade de pó padrão ou com uma sonda interna para aplicação em precipitadores.

Na prática, a maioria dos estudos de resistividade das cinzas são feitos com cinza da Tremonha, usando uma célula de resistividade padrão em que a temperatura e umidade podem ser controlados para simular as condições do fluxo de gás.

A dependência de ρ_A com relação à temperatura

A Fig. 3.22, reproduzida de OGLESBY e NICHOLS (1978), mostra a forma característica da resistividade das cinzas volantes ρ_A , medido em um campo elétrico aplicado $E_A \sim 1 \text{ kV / cm}$ como uma função da temperatura T , com a umidade como parâmetro. A forma da curva é interpretada em termos de uma combinação de temperatura e umidade.

A resistência superficial depende, sensivelmente, da condição da superfície e, em especial, da quantidade de água absorvida.

Concluiu-se que o mecanismo de condução de área é devido ao movimento do lítio e íons de sulfato de sódio presentes na camada superficial da molécula de água. Consequentemente, a resistividade superficial aumenta com a redução da quantidade de enxofre no carvão.

Em geral, a condução por volume é dominante para condição quente e seca, enquanto a condução superficial é dominante para condição fria e úmida. À baixa temperatura, a resistividade aumenta com o decréscimo da umidade, como mostra a Fig. 3.22.

Fig. 3.22 : Forma característica da dependência da resistividade da cinza volante sobre a temperatura e umidade (OGLESBY E NICHOLS, 1978).

Na Fig. 3.22, para ar úmido, a resistividade aumenta no início, com a temperatura.

Em alta temperatura, todos tendem a uma curva única. Isso mostra que para sílica (composição de cinzas típicas de carvão) - a resistividade de volume diminui com aumento da temperatura além de 300 °C, como é normal para materiais semi-condutores e isolantes.

Tipicamente, o gás de combustão de uma planta termoeletrica que queima carvão mineral tem uma quantidade de vapor de água de ~ 7% em massa (ou ~ 11% em volume) e a temperatura de operação usual para precipitador convencional tipo lado-frio é 150 °C, justamente onde tem-se a resistividade máxima, conhecido como prejudicial a captação de pó.

A dependência ρ_A com o campo elétrico E

A relação entre a resistividade aparente medida ρ_A da camada e o volume intrínseco e resistividade superficial das partículas dependem da corrente que flui para a camada de particulado. Determinou-se que a resistividade aparente da camada é não ôhmica, posto que a resistividade diminui com aumento da corrente (ou campo aplicado).

A Fig. 3.23 mostra a resistividade aparente medida ρ_A , de 5 mm de camada de sílica (diâmetro 450 ~ 500 μm), como função de um campo médio aplicado E_A , para o caso de condição quente e seca em que o ar ambiente é aquecido à 160 °C.

O exemplo é para condição seca e a condução de corrente é na forma de condução por volume. Esta medição foi feita em uma célula padrão de resistividade. A carga do topo do eletrodo foi projetada para comprimir a camada para a tensão de compressão padrão de 10 g/cm².

Fig. 3.23 : Medições de células de resistividade (MOLESHI, 1983).

Este gráfico exibe 3 regiões distintas:

- (i) Para um campo médio de menos de 3×10^4 V/m, a resistividade aparente é aproximadamente constante. Isto é devido ao fato de que a compressão, resultado da tensão elétrica na camada é menor, que aquele devido ao peso do eletrodo.
- (ii) Para 3×10^4 V/m $< E_A < (2 \sim 4) \times 10^5$ V/m a resistividade diminui com o aumento do campo, segundo observado para o caso de condução por volume. Isto é atribuído à auto-compressão da camada.
- (iii) Para valores de campo maiores que $(2 \sim 4) \times 10^5$ V/m, a resistividade diminui mais rapidamente e a dependência $\rho_A(E_A)$ é exponencial. Isto é atribuído à repetidas rupturas por micro faiscamento da camada, que começa em $E_A = 2 \times 10^5$ V/m $\sim 4 \times 10^5$ V/m. Finalmente, a ruptura total da camada ocorre a $E_A \sim 1,4 \times 10^6$ V/m.

Fatores que influenciam a resistividade

Particulados encontrados em precipitadores variam em composição dos óxidos metálicos com estrutura cristalina primária. Seria esperado que o mecanismo da condução de corrente variasse como resultado da composição e estrutura mineral das cinzas.

Igualmente, a composição de gases de vários processos variam consideravelmente, dependendo do tipo de combustível e da natureza específica do processo.

A altas temperaturas, a condução de corrente é primariamente governada pela composição do pó e é independente da natureza dos gases. Nesta região de temperatura, condução é dominada pela condução por volume. Em temperaturas menores, condução é dominada pela condução superficial e é dependente da sua composição, morfologia e da reação gasosa com as partículas.

A resistividade superficial aumenta com a temperatura até um certo valor, depois tende a se estabilizar. A resistividade por volume apresenta um valor alto em baixas temperaturas e reduz seu valor em altas temperaturas.

Como mostra a Fig. 3.24, a resistividade de volume continua a aumentar com o decréscimo da temperatura, enquanto a resistividade superficial aumenta da maneira mostrada, quando a temperatura é aumentada.

A composição dos dois componentes é mostrado na linha pontilhada, isto é, a resistividade aumenta com a temperatura até determinado valor e depois decresce com o aumento da temperatura, seguindo um formato de uma parábola invertida.

Fig. 3.24 : Curva de resistividade x temperatura: as contribuições dos componentes da resistividade superficial e de volume (OGLESBY E NICHOLS, 1978).

3.3 As consequências da variação da resistividade

Formação de corona inversa

Na precipitação de particulado de alta resistividade é geralmente observado que, após um breve período inicial de operação, a eficiência de coleta de pó diminui, a corrente diminui e a voltagem de faiscamento - assumindo corona negativo - reduz.

O aumento da corrente é devido à emissão secundária, também chamada corona inversa, que tem origem no depósito de particulado sobre o eletrodo de captação e assume a forma de um luminoso tufo de descarga, de polaridade oposta àqueles de descarga primária.

O pó dielétrico poroso aparece para servir como um condensador que, carregado por íons primários, descarrega quando a voltagem atinge o valor de ruptura do gás.

Em grande parte dos casos práticos, o campo elétrico de ruptura E é da ordem de 10^6 V/m. A densidade de corrente corona industrial j é geralmente menor que 1 mA/m². Em primeira aproximação, não deve aparecer a corona inversa, até a resistividade do pó exceder a

$$\rho_d = \frac{E}{j} = \frac{10^6}{10^{-3}} = 10^9 \text{ ohm.m} \quad [17]$$

A resistividade do pó é dependente da voltagem aplicada, duração do teste e outros incidentes experimentais.

A pesquisa de SULLIVAN (1984), revelou que o enxofre no carvão afeta a resistividade em um modo não previsível, conforme indica a Fig. 3.25 e indica que o enxofre sozinho não é a causa da baixa resistividade. Embora seja possível que o enxofre junto com outro componente do carvão, possivelmente o ferro, seja o causador. Ao preparar a amostra de cinza volante, estocou para teste à $T = 150^\circ\text{C}$, para evitar alterações em condições ambientes.

Para determinar a resistividade, utilizou uma célula cilíndrica de teste com dois eletrodos em paralelo. Fixou-se a $T = 150^\circ\text{C}$ e umidade de 5% em massa do fluxo

gasoso, com tensão elétrica definida sobre um período de tempo para atingir o equilíbrio.

As condições de operação foram mantidas por 6 horas de teste. A resistividade varia com o tempo, mesmo mantidas as condições de teste, como pode ser observado na Fig. 3.25 e 3.26. Foi testada a repetitividade usando 4 amostras de uma das cinzas volantes examinadas e os resultados foram idênticos, confirmando a repetitividade do procedimento.

Fig. 3.25 : Curva de resistividade x tempo no ambiente do fluxo de gás (SULLIVAN, 1984).

Conclui que, para alguns casos, um aumento na quantidade de enxofre resultou em um aumento da resistividade, causado pelo aumento do diâmetro médio e redução do número de contatos entre aglomerados.

Fig. 3.26 : Curva de resistividade x tempo no ambiente do fluxo de gás (SULLIVAN, 1984).

Como pode ser observado na Fig.3.26, a resistividade tende a aumentar com o decorrer do tempo, com resistividade de valor maior para carvão mineral com teor de enxofre maior.

3.4 Técnicas para adequar a resistividade como parâmetro de projeto

A seguir, serão descritas técnicas para adequar a resistividade como parâmetro de projeto, predizendo o comportamento elétrico, e buscar alternativas para evitar efeitos indesejáveis ao projeto de precipitadores.

A resistividade elétrica da camada de pó coletada influencia os precipitadores sob dois aspectos importantes. Primeiro, em precipitador de estágio único, a corrente corona deve fluir através do pó coletado. Portanto, o pó deve ser capaz de conduzir a corrente corona para o eletrodo de captação.

Se o pó tem uma resistividade elétrica alta, a corrente corona será limitada, assim como a carga da partícula, a taxa de carregamento ou faiscamento (ou seja, o número de descargas elétricas em um certo tempo) e o campo elétrico. O efeito combinado dessas limitações é a redução de performance do precipitador.

A segunda maneira com que a resistividade do pó afeta a performance do precipitador é pela troca da força (ou seja, a força elétrica tentando segurar o pó no eletrodo de coleta e a força de batimento mecânico, que tenta desgrudar a camada de pó do eletrodo de coleta) tendendo a segurar a camada de pó ao eletrodo de captação.

No caso de alta resistividade do pó, a força pode ser tão grande que batimento de alta intensidade é requerido para deslocar o pó da placa de coleta. Essas condições de batimento podem resultar em maior reentrada (i.e., retorno do pó coletado ao fluxo de gases), do pó durante o batimento.

Faiscamento e corona inversa

A alta resistividade elétrica da camada de pó coletada pode resultar em uma das duas condições que limitam a potência elétrica útil de entrada do precipitador.

Para pó com resistividade muito alta, a ruptura elétrica da camada de pó ocorrerá em densidades de corrente muito baixas, resultando em uma condição chamada corona inversa ou ionização reversa.

O faiscamento pode ocorrer com eletrodos limpos, devido à ruptura elétrica dos gases no espaço entre eletrodos .

Ambos faiscamentos, seja em corrente e voltagem baixos ou no caso de corona inversa, são devidos à ruptura elétrica dos gases na camada de pó. Esta ruptura elétrica ocorre da mesma maneira quando próximo ao eletrodo de descarga. Ou seja, o campo elétrico sem a camada de pó é suficiente para acelerar elétrons para velocidades de ionização.

Estes elétrons impactam as moléculas de gás para criar um íon positivo e um elétron adicional. O efeito resultante dessa avalanche gera uma grande quantidade de íons positivos e elétrons livres. Devido à direção do campo elétrico, os íons positivos são dirigidos rumo ao eletrodo de corona negativo e os elétrons são impelidos rumo ao eletrodo de coleta.

A ruptura elétrica da camada de pó pode resultar em faiscamento, sendo propagado ao eletrodo emissor de descarga corona ou em um estado estacionário de ruptura chamado corona inversa, dependendo das condições em que a ruptura ocorre.

A característica elétrica de um precipitador pode ser definida pelas curvas que relaciona tensão e corrente.

Em condições de eletrodo de coleta limpos, a voltagem pode ser aumentada com um correspondente aumento na corrente até o faiscamento do campo elétrico no espaço entre eletrodos. A ruptura elétrica propaga-se da placa de coleta para o eletrodo de descarga.

No caso de corona negativo, a placa de coleta é o potencial aterrado.

O formato da curva tensão-corrente bem como a voltagem de ruptura é determinada pela geometria do eletrodo e espaço entre eletrodos, além da composição e temperatura do fluxo de gases.

Para um precipitador fio-placa ou tubular, as variáveis primárias são o diâmetro do fio e a distância entre fio e a placa. Diâmetros pequenos dos fios resultam em correntes mais altas para uma dada voltagem e faiscamento em voltagem mais baixa.

Ambos, o diâmetro do fio e o espaço entre os eletrodos, alteram o campo elétrico e por isso, determinam as condições para início de faiscamento e propagação. Estudos indicam que o faiscamento origina de flâmulas ou tochas na placa de coleta e propagam-se atravessando o suficiente espaço existente entre eletrodos.

No caso de eletrodos limpos, a condição para o faiscamento ocorre para o valor de maior tensão, usualmente em uma pequena região de alto campo elétrico, próximo ao eletrodo de coleta.

Se o pó está presente na superfície do eletrodo de coleta, a curva tensão-corrente será alterada pela queda de voltagem na camada de pó, que é dada por:

$$V_d \equiv j \cdot \rho \cdot t \quad [18]$$

onde,

j = densidade de corrente;

ρ = resistividade;

t = espessura da camada de pó.

Se a resistividade da camada de pó é baixa, a queda de voltagem que o atravessa será baixa e a curva tensão-corrente será alterada, mesmo que o espaço entre os eletrodos seja diminuído.

A força de ruptura pode variar, dependendo do tamanho e da composição do pó e dos gases, embora para maioria dos particulados industriais, a ruptura elétrica geralmente ocorre na faixa de 10 a 20 kV/cm.

Se a resistividade da camada de pó é muito alta, a tensão cai e o campo elétrico na camada de pó pode ser maior, mesmo à baixa densidade de corrente e a ruptura elétrica pode ocorrer em voltagens menores que aquela requerida para propagar a faísca entre o espaço dos eletrodos.

Se isto ocorre, uma condição de corona inversa se desenvolve e a curva tensão-corrente do precipitador altera-se, da curva característica normal para um efeito puramente resistivo.

A condição de corona inversa pode ser observada no escuro, em um laboratório, e o campo elétrico como um brilho difuso sobre a superfície da camada de pó ou como vários pontos coronas distribuídos sobre a camada. Um aumento contínuo na tensão e corrente resultará em faiscamento.

O significado de corona inversa é que a ruptura libera íons positivos (para um precipitador de corona negativo) e estes íons são empurrados por um campo elétrico

dentro da região entre eletrodos. Se os íons colidem com as partículas carregadas negativamente, eles reduzem a carga da partícula ou tendem a carregá-las com polaridade oposta.

Quando se desenvolve a condição de corona inversa, a característica da curva de tensão e corrente é alterada. Aumento da tensão, além do início do corona inversa, resulta em um aumento rápido e anormal da corrente.

As condições que limitam a operação do precipitador são graficamente ilustradas na Fig. 3.27.

Fig. 3.27 : Comportamento de um P.E. ponto-plano baseado em considerações teóricas de faiscamento e corona inversa (OGLESBY E NICHOLS, 1978).

A curva 1 da Fig. 3.27 é uma curva de tensão e corrente de uma placa limpa, com espaço de 1,12 cm entre eletrodos. A curva 2 é calculada sobre uma base de espessura de camada de pó de 0,20 cm e uma resistividade de 10^8 ohm-cm. A curva 3 é

para uma resistividade de 10^9 ohm-cm e a curva 4 corresponde ao pó com resistividade de 10^{10} ohm-cm.

No caso da curva 2, é aparente que a ruptura na camada de pó ocorreria apenas em densidades de corrente muito altas. Antes que este ponto seja atingido, a voltagem que atravessa o espaço entre eletrodos é suficiente para causar uma faísca.

Isto teoricamente ocorreria quando a tensão vindo da camada de pó para o eletrodo de descarga se iguala à condição de faiscamento da placa limpa. Devido a queda de tensão na camada de pó, o faiscamento ocorreria, teoricamente, na tensão correspondente ao ponto A. Esta condição, portanto, representa um critério para faiscamento em que não existe ruptura elétrica na camada de pó.

No caso de pó com resistividade de 10^9 ohm-cm, a queda de tensão na camada de pó excede o campo de ruptura elétrica para uma camada de pó de 0,2 cm na corrente elétrica, correspondente ao ponto B.

Neste ponto, ruptura elétrica localizada resulta em uma tensão desenvolvida que atravessa o espaço entre eletrodos (superfície da camada de pó para eletrodo de descarga), igual à tensão requerida para propagação da faísca sobre eletrodo de placa limpa.

Quando esta condição é atingida, ocorre faiscamento. Isto constitui o segundo critério para o faiscamento, ou seja, quando a ruptura dos gases ocorre à uma tensão suficiente para gerar faiscamento entre os eletrodos; e a queda de voltagem na camada de pó é igual a tensão de faiscamento da placa limpa.

Ponto C representa a terceira condição, que corresponde à resistividade de pó muito alta. A ruptura ocorre em uma tensão baixa e a queda de tensão na camada de pó é menor que o requerido para a propagação do faiscamento. Nessas condições, a camada de pó permanece eletricamente rompida e a condição de estabilidade é atingida, similar àquela verificada no eletrodo de descarga.

Íons positivos resultantes desse processo de avalanche são liberados dentro da região entre eletrodos e o processo de precipitação é severamente reduzido, embora não ocorra faiscamento.

Todavia, se a tensão é aumentada, a corrente aumenta, de acordo com a curva tensão-corrente até atingir uma voltagem suficiente para causar uma faísca que se propagará.

Neste caso, a presença de corona inversa pode efetivamente reduzir a tensão requerida de sobre faísca e então, o faiscamento pode ocorrer em uma tensão menor do que a condição de placa limpa.

Este constitui o 3º critério para faiscamento, ou seja, é uma condição em que a corona inversa precede a tensão de sobre faísca.

Vários fatores podem modificar as condições de sobre faísca. Se a espessura da camada de pó é aumentada, a tensão que atravessa a camada de pó aumentará proporcionalmente.

A tensão de ruptura para uma camada de pó de 0,4 cm é duas vezes menor que para uma camada de pó de 0,2 cm, de forma que o aumento da espessura pode causar uma troca de corona inversa para uma certa condição de faiscamento, considerando um mesmo pó.

Mudança nas características do pó também podem alterar as condições de sobre faiscamento e corona inversa. A presença de partículas condutivas no pó (como o carbono não queimado) pode alterar a força localizada e causar ruptura em uma tensão mais baixa que o previsto.

Os dados práticos dos precipitadores, em geral, concordam com a previsão teórica, exceto em distribuições de corrente anormais. Não é incomum encontrar densidade de corrente da ordem de $20 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$, associado com um precipitador cujo pó está com resistividade na faixa de $1 \text{ a } 5 \times 10^{11} \text{ ohm-cm}$.

A diferença existe principalmente na densidade de corrente desigual encontrada no precipitador e no tempo de variação da corrente. O tempo e a variação espacial na corrente em um precipitador corresponde à máxima corrente permissível, que é aproximadamente um décimo do que seria previsto pela consideração teórica.

Efeito sobre a performance do P.E.

Os efeitos qualitativos de alta resistividade das partículas sobre a performance do precipitador é bem conhecida há muitos anos. Por outro lado, informações quantitativas não poderiam ser obtidas até métodos confiáveis para medições no campo serem desenvolvidos em 1940. Provavelmente, o primeiro conjunto de dados sobre a relação entre a eficiência do precipitador e a resistividade do pó obtida no campo é a mostrada na Fig. 3.28.

Fig. 3.28 : Resultado de condicionamento com amônia (processo: craqueamento de petróleo) (WHITE, 1962)

Pela Fig. 3.28, pode-se observar que, com condicionamento de gases com injeção de amônia nestes, é possível reduzir a resistividade ôhmica do pó, e assim, melhorar a captação do mesmo quando submetido ao campo elétrico do precipitador. Comparativamente, quando não se faz o condicionamento, a resistividade é mais alta, dificultando a captação de particulado.

Fig. 3.29 : Efeito da partícula de alta resistividade sobre a performance (WHITE, 1962).

Dois conjuntos adicionais de dados quantitativos são de interesse. Resultados de planta piloto em escala de teste em laboratório de pó de cimento são mostrados na Fig. 3.29 (WHITE, 1962).

A queda da velocidade de migração da partícula de 15 cm/s à 10^{10} ohm.cm para apenas 3 cm/s à 10^{11} ohm.cm é evidente.

Dados de performance de 3 tipos de cinzas em precipitadores, em que a velocidade de migração da partícula w é correlacionada com medição direta do campo e a resistividade da partícula, são mostrados na Fig. 3.30. Novamente, a rápida queda de w na região de resistividade crítica é verificada. A depreciação na performance do precipitador para pó com resistividade alta é devida aos distúrbios da condição elétrica e perda da potência corona efetiva.

Os efeitos da quantidade de umidade e temperatura do gás sobre a precipitação de um processo seco de forno de cimento é ilustrado na Fig. 3.31.

Fig. 3.30 : Depreciação da velocidade de migração w com aumento da resistividade da cinza volante, baseado em dados de campo (WHITE, 1962).

Fig. 3.31 : Efeitos da umidade e alta temperatura sobre a performance do precipitador (forno de cimento) (WHITE, 1962).

Os gases são resfriados por meio do ar e nebulização de água.

Na Fig. 3.31, nota-se particularmente o efeito significativo do aumento da temperatura, aumentando a eficiência do precipitador. Por exemplo, à 9% de umidade, aumentando a temperatura de 270°C para 350°C a eficiência do precipitador aumenta de 92% para 99%.

Também de interesse é o grande efeito da umidade na melhoria da performance do precipitador, mesmo à alta temperatura de 350 °C.

Outro trabalho de interesse no condicionamento de gases é o de DALMON (1984), que investigou as relações entre a composição química da cinza, resistividade e performance do precipitador em quatro plantas termoeletricas da Inglaterra e duas na África do Sul, queimando 9 carvões distintos, com o objetivo de melhorar o critério para especificar uma nova planta.

A resistividade medida dentro do duto e os métodos de laboratório mostraram grandes diferenças. Evidências mostraram que a resistividade das cinzas dos eletrodos de coleta foi substancialmente mais alta que aquela coletada nos dutos.

Nas Figs. 3.32 a) e b) verifica-se que não houve correlação entre a resistividade no duto e os constituintes da cinza, mas sim, uma clara tendência do aumento da velocidade efetiva de migração com o aumento em volume de Fe_2O_3 e com solubilidade em água de SO_3 . A Fig. 3.32 c) mostra uma tendência de melhoria na velocidade de migração efetiva, com o aumento do enxofre no carvão.

Teriam consideráveis benefícios no projeto e especificação de novos precipitadores, se essas relações pudessem ser conhecidas para o carvão a ser queimado em determinada planta.

As principais conclusões são:

- a) As medições no duto interno e os métodos de medição em laboratório da resistividade da cinza têm resultado em diferenças acima de 5 vezes;
- b) Com uma cinza de alto carbono existe redução de fator 4 na resistividade entre 11 e 15% de carbono;
- c) Evidências mostraram que a resistividade da cinza sobre o eletrodo de coleta foi substancialmente maior que a resistividade das amostras do duto de entrada;
- d) Nem a medição no duto interno ou método de laboratório da resistividade forneceu um guia confiável para as condições elétricas dentro do precipitador ou para a performance, a ser expresso como velocidade de migração específica;
- e) Com a faixa de enxofre no carvão de 0,75% a 3% coberta na investigação, houve uma tendência de aumento da w_e (velocidade de migração efetiva), com aumento do enxofre.

DALMON (1984) conclui que não conseguiu obter relações confiáveis entre a resistividade da cinza, composição química e performance do precipitador e que a resistividade de amostras no duto de entrada é um pobre indicador da performance do precipitador.

Fig. 3.32 a) w_e x SO_3 solúvel em água (DALMON, 1984).

Fig. 3.32 b) w_e x % Fe_2O_3 em volume (DALMON, 1984).

Fig. 3.32 c) w_e x enxofre contido no carvão (DALMON, 1984).

Método para superar a alta resistividade

Métodos empíricos têm sido testados usando umidade e condicionamento ácido. Ou ainda, usando eletrodos móveis, escovas rotativas, nebulização de água ou película úmida nas placas de eletrodos nas seções de carregamento. No entanto, surgiram problemas para manter a película de água por longos períodos.

Outro estudo que tem sido feito em laboratório é baseado no controle de temperatura dos eletrodos de coleta. Aquecimento ou resfriamento podem ser usados para variar a temperatura do eletrodo fora da faixa crítica intermediária (ver figura 3.22) próxima ao pico da curva de resistividade.

Segundo OGLESBY (1978), são maneiras para superar o problema da alta resistividade em precipitador: a mudança da temperatura do gás ou fornecer adições de agentes químicos à cinza ou aos gases para reduzir a resistividade.

Em temperaturas altas ($315^{\circ}\text{C} \sim 425^{\circ}\text{C}$), a resistividade da cinza volante é normalmente baixa o suficiente e então, as condições elétricas de precipitação não são severamente limitadas pela ruptura elétrica da camada de pó. As principais desvantagens em se operar nessas condições são:

- a) O volume dos gases é aumentado pelo coeficiente de temperatura absoluta (isto é, $\text{vazão (m}^3/\text{h)} = \text{vazão (Nm}^3/\text{h)} \times [(T^{\circ}\text{C} + 273) / 273] \times \text{Pressão relativa do gás}$), o que significa que o volume de gás fica 50% maior;
- b) A viscosidade do gás é aumentada por aproximadamente 25%, o que reduz proporcionalmente a velocidade de migração;
- c) Problemas de isolamento térmica e expansão mecânica tornam-se mais severos.

A escolha entre fazer um precipitador maior ou condicionamento de gases é feita pelos fatores econômico ou confiabilidade.

Outro estudo para alterar a resistividade da cinza volante visa reduzir a temperatura através do aumento da umidade ou pela adsorção, de outros gases presentes, pela superfície da partícula da cinza volante, para fornecer condução elétrica suficiente. Do ponto de vista mecânico, podem surgir limitações devido à possibilidade de corrosão, capacidade do pré-aquecedor ou dificuldade de transporte de cinzas.

Outra opção é através da adição de agentes químicos nos gases. Embora o principal uso de aditivos seja para reduzir a resistividade, alguns efeitos benéficos dos aditivos químicos têm sido observados, mesmo que não ocorra a alteração da resistividade.

A resistividade do pó é governada primordialmente pela sua composição química e à temperatura acima de 204°C, torna-se independente da composição do gás.

Abaixo de 176 ~ 204°C, umidade e outros constituintes dos gases interagem com o pó, aumentando a condutividade. Outra opção para alterar a resistividade do pó é mudar a composição da cinza.

Modificação da composição da cinza

Em regiões de alta temperatura predomina a condução por volume e em baixas temperaturas, a região de condução por superfície predomina. Então, uma opção para modificar a resistividade do pó é uma adição ao combustível para alterar a composição ou propriedade do pó.

Na região de condução por volume é mostrado que as cargas primárias são carregadas pelos íons de sódio e lítio, sendo que assim, a alteração da resistividade pode ser obtida pela adição de sódio ou lítio. Ao aumentar o número de cargas carregadas na cinza, pela adição de material, a estrutura da cinza é alterada para permitir que um grande número de íons de sódio e lítio participem do processo de condução.

Os materiais que servem para alterar a composição das cinzas para reduzir a resistividade por volume devem ser compostos de sódio, como carbonato de sódio ou sulfato de sódio.

A adição de sódio à cinza volante pode ser feita por adição direta ao carvão. Carbonato de sódio é solúvel em água e a adição pode ser feita como pó seco ou como líquido aplicado ao carvão antes ou em seguida ao moinho de carvão.

A Fig. 3.33 mostra os resultados da adição de óxido de sódio ao carvão mineral a ser queimado na caldeira. Os dados mostram a redução de 10^2 na resistividade quando a quantidade de sódio da cinza aumentou de 0,5% a 2%.

Fig. 3.33 : Resistividade x concentração de óxido de sódio para cinza volante de carvão de baixo enxofre (OGLESBY E NICHOLS, 1978).

Condicionamento por alteração da umidade e condicionamento químico (SO_3)

Muitos pesquisadores têm estudado o efeito da alteração da umidade e da adição de agentes químicos nos gases ou nas cinzas volantes. Seguem alguns que merecem destaque.

À temperatura abaixo de 176°C , a umidade presente nos gases é absorvida pela superfície da partícula de pó, o que pode reduzir a resistividade do pó.

Constatou-se que a composição do pó é influenciada pela mudança da umidade. Aparentemente o efeito da umidade varia com a composição e estrutura do pó.

Quando o processo não produz umidade suficiente para a precipitação, pode-se aumentar a umidade com bicos nebulizadores.

SUZUKI e TACHIBANA (1984) testaram a queima de 30 tipos de carvões minerais em uma planta piloto e a precipitabilidade (i.e., o quanto a cinza gerada pela queima desse carvão é facilmente captada dentro de um precipitador) das cinzas geradas por estes carvões foram medidas em um precipitador piloto.

A intenção desse estudo foi preparar a lista de precipitabilidade - por tipo de carvão - e procurar um método de estimativa da precipitabilidade da respectiva cinza volante, a partir de sua composição. Investigou-se o comportamento do enxofre quando o carvão foi queimado.

Os autores informam que a quantidade de enxofre tem uma grande influência sobre a eficiência de coleta da cinza volante em precipitador tipo frio (temperaturas dos gases menores de 250 °C). A investigação revelou que carvão com baixo teor de enxofre tem pouca correlação com a eficiência do precipitador. Ou seja, não influenciam na coleta de particulado.

Como mostra a Fig. 3.34 a), para carvões da Austrália testados, observou-se uma ampla faixa entre o máximo e mínimo da velocidade de migração. A resistividade elétrica da cinza volante é influenciada principalmente pela quantidade de metal alcalino contido na partícula da cinza, que contribui para condutividade de volume e de superfície e pela quantidade de SO_3 junto com a umidade do gás.

Os autores concluem que:

a) O SO_3 gerado é diretamente proporcional à quantidade de enxofre no carvão.

Embora a quantidade de SO_3 gasoso no fluxo de gases à 400°C é afetado pela quantidade de CaO na cinza volante, o SO_3 contribui para a precipitabilidade;

b) A melhoria na taxa de precipitabilidade da cinza volante, quando há injeção de SO_3 , difere grandemente, dependendo do tipo de carvão. Alguns carvões de baixo cálcio mostraram que quase não há melhorias;

c) Para carvões com baixo enxofre há pouca correlação entre a precipitabilidade da cinza volante e a eficiência do precipitador;

d) É difícil definir uma fórmula simples para prever a precipitabilidade de todos tipos de carvão, pois as propriedades variam grandemente. Portanto, uma preparação preliminar com um grupo de carvões de determinada

localização ou classificação por porcentagem de cálcio e/ou outros elementos é necessária caso se queira obter uma expressão empírica.

Fig. a) Coeficiente de velocidade de migração e teste com carvões de vários países

Fig. 3.34 : Relações entre velocidade de migração w e componentes do carvão (SUZUKI e TACHIBANA, 1984).

Onde o coeficiente de migração w corresponde a relação entre a velocidade de migração média obtida através do teste e a velocidade de migração obtida a partir da fórmula de Deutsch (Eq. [3]).

A Fig. 3.34 b) mostra que para carvões com alto teor de cálcio ($\text{CaO} > 8\%$), quando ocorre a redução de enxofre no carvão, o coeficiente de velocidade de migração melhora; E para carvões com baixo teor de cálcio ($\text{CaO} < 2,5\%$), o coeficiente da velocidade de migração diminui com o aumento do teor de enxofre no carvão;

A Fig. 3.34 c) mostra que para carvões com maior teor de cálcio ($\text{CaO} > 8 \%$), com menores teores de enxofre e cinza volante no carvão, existe uma tendência de melhoria no coeficiente de velocidade de migração;

As Figs. 3.34 d) e e) mostram que para carvões com teores de cálcio intermediários ($2,5 < \text{CaO} < 8 \%$), existe uma tendência de melhoria do coeficiente de velocidade de migração com o aumento do teor de alcalinos (Sódio, Potássio);

A Fig. 3.34 f) mostra que independente do teor de cálcio, quando ocorre o aumento do enxofre no carvão, ocorre o aumento do teor de enxofre no gás; Ou seja, o teor de enxofre contido no carvão é diretamente proporcional a quantidade de enxofre contido no fluxo gasoso;

A Fig. 3.34 g) mostra o mesmo comportamento dos dados da Fig. 3.34 f) para o fluxo gasoso a alta temperatura; Ou seja, o carvão com maior teor de enxofre possui maior quantidade de enxofre contido no fluxo gasoso;

A Fig. 3.34 h) mostra que na faixa de SO_x de 0 a 10 ppm contido no fluxo gasoso e em alta temperatura ($T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$) favorece a melhoria no coeficiente de velocidade de migração w ;

A Fig. 3.34 i) mostra a melhoria do coeficiente de velocidade de migração w quando ocorre injeção de SO_3 na cinza volante, para alguns tipos de cinzas volantes estudados e testados;

Fig. b) % de enxofre no carvão

Fig. d) (2Na+K)x enxofre/cinza

Fig. c) % de enxofre e cinza volante no carvão

Fig. e) % de enxofre + cinza + Sódio + Potássio

Fig. 3.34 : Relações entre velocidade de migração w (SUZUKI E TACHIBANA, 1984).

Fig. f) % de enxofre no carvão

Fig. h) SOx (em ppm) no fluxo gasoso à $T = 400^{\circ}\text{C}$ Fig. g) % de enxofre no carvão com gás à $T = 400^{\circ}\text{C}$ Fig. i) Melhoria do valor de w para várias cinzas volantes com injeção de SOx;

Fig. 3.34 : Relações entre velocidade de migração w e componentes do carvão (SUZUKI e TACHIBANA, 1984).

Outro pesquisador também estudou em detalhes a influência do enxofre na performance do precipitador. COE (1984) argumenta que o uso de SO_3 , ajustando as condições da cinza volante de alta resistividade, pode melhorar a precipitação eletrostática, mas depende dos investimentos operacionais.

Fig. 3.35 : Dosagem de SO_3 x eficiência do P.E. (COE, 1984).

As Figs. 3.35 a) e b) mostram que a injeção de enxofre no carvão reduz a resistividade ôhmica do particulado, aumentando a eficiência de coleta de particulado e aumentando, portanto, a velocidade de migração até um certo ponto ótimo entre 20 a 30 ppm de SO_3 . Consequentemente, reduz-se a emissão de particulado (relacionado a opacidade).

Fig. 3.35 : Dosagem de SO_3 x eficiência do P.E. (COE, 1984).

Outro trabalho de destaque fizeram OKAZAKI e NISHIKAWA (1984) e SHIBUYA e MOCHIZUKI (1984), que também estudaram como as características de coleta são afetadas pelo enriquecimento de enxofre na superfície da partícula, que depende da estrutura e tamanho das partículas.

Para dimensionar o precipitador para caldeiras a carvão é necessário avaliar a precipitabilidade da cinza volante a ser tratada.

Em seu experimento, SHIBUYA e MOCHIZUKI (1984) relatam que, em geral, a resistividade elétrica da cinza volante aumenta quanto seu carbono não queimado diminui.

A Fig. 3.36 mostra as características da cinza volante testada no laboratório, ao utilizar a célula de medição em um forno termo hidrostático. O resultado indica que a relação entre a resistividade e a temperatura entre a planta da caldeira e a planta piloto é quase igual.

Fig. 3.36 : Comparativo entre planta real e planta piloto (SHIBUYA e MOCHIZUKI, 1984).

Outro trabalho também importante é o de COTHINGHAM (1998), que pesquisou o efeito de altos níveis de carbono em plantas com cinza volante de alta e baixa resistividade. O carbono tende a ser coletado em grandes quantidades no final do precipitador, em particular no último campo elétrico (última seção de coleta).

É geralmente aceito que o aumento do carbono na cinza volante tende a conduzir ao aumento da emissão de particulado do precipitador. Embora esta tendência seja verdade para cinza volante de baixa resistividade, o mesmo não é aplicado para cinza volante cuja resistividade ôhmica esteja acima de 1.0×10^{11} ohm.cm.

A Fig. 3.37 mostra o resultado que ocorre quando o carbono é combinado com baixa resistividade da cinza volante, existindo uma redução significativa na performance do precipitador, devido a re-entrada do carbono. Se altos níveis de carbono são encontrados nas cinzas volantes de alta resistividade, o carbono surgiria como um efeito

de condicionamento. Baixos níveis de emissão podem ser atingidos, desprezando carbono acima de 10% na cinza.

Influência do carbono na cinza volante sobre a performance do precipitador

Fig. 3.37: Influência do carbono na cinza sobre a performance do P.E. com cinza volante de alta resistividade (COTTINGHAM, 1998).

Outro trabalho relacionado à melhoria de performance foi o de CHAE e SEO (1998), que fizeram um estudo de precipitador usando energização pulsante para coleta de cinza volante de alta resistividade e finas partículas.

Neste estudo, a tecnologia de energização pulsante é desenvolvida como contra medida para pó com alta resistividade. O fornecimento de um pulso elétrico apropriado, de acordo com a característica do pó e projeto do precipitador, pode produzir uma alta performance de coleta.

O sistema de fornecimento de energia pode ser mudada para tensão alternada e tensão pulsante simultaneamente, para aumentar a eficiência de coleta de pó fino e de alta resistividade. A voltagem pulsante chega ao máximo de 3 vezes a voltagem alternada.

A resistividade foi medida através da sonda do fabricante WAHLCO, interna ao duto, atingindo até o máximo a $T = 230^{\circ}\text{C}$, com $\rho = 2,1 \times 10^{13} \text{ ohm.cm}$.

A primeira conclusão é que é possível reduzir o consumo de energia, combinando dois tipos de voltagem, sem perda e até com aumento da eficiência de coleta.

Tab. 3.2 – Eficiência de coleta de acordo com a voltagem aplicada e potência

Voltagem aplicada			Eficiência de coleta (%)	Potência (W)
V_{DC}	V_{pulse}	V_{total}		
10	0	10	58,4	2
14	0	14	60,66	5,6
10	4	14	91,21	2,28
17	0	17	96,71	13,6
14	4	18	97,26	5,88
14	7	21	97,81	6,88
17	4	21	97,7	13,88
17	7	24	97,8	14,88

Pela Tab. 3.2, aumenta-se gradativamente a voltagem de corrente alternada e a voltagem pulsante e assim, a eficiência de coleta aumenta. Mas, percebe-se que com o par de $V_{DC} = 14 \text{ V}$ e $V_{pulse} = 7 \text{ V}$, obteve-se a maior eficiência (97,81 %), mas não necessariamente com a maior potência, demonstrando que é possível obter alta eficiência e redução de potência.

FUJISHIMA e TSUCHIYA (1998), pesquisadores da Mitsubishi do Japão, desenvolveram um precipitador tipo frio para sistema de tratamento de gás para caldeira à carvão mineral, visando aumentar a performance do precipitador.

Consiste em usar o precipitador tipo frio localizado após um trocador de calor, reduzindo a temperatura do gás a 90°C e por consequência, reduzindo a resistividade do pó, para melhorar a eficiência de coleta deste pó, economizando também, ao não inserir

torre de resfriamento ou precipitador tipo úmido. A Fig. 3.38 mostra a intenção dos pesquisadores ao inserir o precipitador em uma região de baixa temperatura e resistividade ôhmica do pó, facilitando a coleta de particulado.

Tab. 3.3 : Técnicas para melhoria das características para pós de alta resistividade

Condição de início do corona inversa	Técnicas para melhorar a coleta de pós de alta resistividade			
	Contra medida		Método	Técnica
<div> </div> <p>E_d : Campo elétrico na camada de pó</p> <p>ρ_d : resistividade do pó</p> <p>I_d : Densidade de corrente na camada</p> <p>E_{db} : Ruptura elétrica no campo</p>	1	Remoção da camada de pó	Remoção total do pó do eletrodo de coleta	P.E. tipo úmido, eletrodo móvel
	2	Decréscimo da resistividade	Aumento da temperatura do gás	P.E. tipo quente
			Redução da temperatura do gás	P.E. tipo frio
			Condicionamento do gás	Injeção de SO ₃ , NH ₃ , água
			Queima com carvão misto	Mistura com bom carvão
3	Controle da corrente na camada de pó	Controle de corrente	Energização intermitente, pulsante	

A Tab. 3.3, mostra as técnicas utilizadas para melhorar a coleta do pó de alta resistividade. A coluna contramedida, indica qual variável é alterada para melhorar o campo elétrico a ser aplicado no interior do precipitador.

Fig. 3.38 : Técnica de melhoria de precipitabilidade para cinza volante de alta resistividade (FUJISHIMA E TSUCHIYA, 1998).

Conclusões da Revisão da Literatura

Caracterizou-se as possíveis variáveis que influenciam a resistividade ôhmica (Umidade, temperatura, enxofre e outros); Verificou-se que a alta resistividade ôhmica causa distúrbios elétricos, redução da eficiência de coleta;

Pesquisou-se as técnicas como contra medidas para melhorar a coleta de cinzas volantes de alta resistividade: melhoria na remoção de pó das placas coletoras; aumento ou redução da temperatura dos gases; condicionamento de gases (injeção de enxofre ou aumento da umidade); alteração das características do carvão; energização pulsante.

Capítulo 4

METODOLOGIA

Existem vários métodos experimentais para determinação da resistividade ôhmica do pó. Neste capítulo serão descritos os três métodos normalizados mais conhecidos. O método 3 foi utilizado para o experimento.

4.1 Métodos normalizados para medição da resistividade

4.1.1 Método 1

A determinação quantitativa da resistividade da partícula usualmente requer uma célula de condutividade espacial de alta voltagem. Um tipo de célula de laboratório é mostrado na Fig. 4.1.

A célula é montada em um forno eletricamente aquecido com temperatura controlada, capaz de atingir temperaturas de 315 a 370°C. Uma camada de pó de vários milímetros de espessura é geralmente usada. A camada pode ser colocada sobre a placa de eletrodo manualmente ou precipitado por meio de corrente corona do ponto de alta tensão.

Uma alta tensão é gerada e ocorre a descarga corona pelo eletrodo de descarga. No momento em que ocorre a ruptura elétrica, a descarga ultrapassa o camada de pó e alcança a placa de coleta. Nesse momento a tensão é medida e a corrente e a resistividade, então pode ser determinada.

4.1.2 Método 2

Em um outro tipo de aparato de laboratório, o pó é depositado pela ação da precipitação elétrica do fluxo de gás e vários tipos de agentes químicos de condicionamento podem ser introduzidos, como mostra esquematicamente a Fig. 4.2.

Agentes condicionadores podem ser introduzidos em solução ou na forma gasosa.

Fig. 4.1 : célula de alta tensão para medição da resistividade do pó (WHITE, 1962).

O equipamento consiste em um sistema fechado de dutos para circulação do gás e pó suspenso, uma câmara de eletrodo equipado com dispositivo com eletrodo de descarga corona, uma placa plana de coleta para precipitação do pó e medição de sua resistividade, um guia de fluxo provido de aquecedor elétrico e um controle de temperatura com banho de água para umidificação do gás circulante que é mostrado.

Nesse dispositivo, o pó é injetado por um orifício. O ventilador de pressão positiva transporta o pó e o ar através do duto (fluxo de gases (ar + pó) no sentido horário). Os gases passam através de uma placa distribuidora de fluxo, que direciona os mesmos a passarem pelas laterais, onde são aquecidos. Esse gás aquecido passa então por uma região onde a umidade é elevada (canal com água em tanque, recirculante). Antes de entrar na região de precipitação eletrostática, mede-se a umidade com temperatura de bulbo úmido e bulbo seco e eventualmente, podem ser injetados agentes químicos (que visam alterar a resistividade ôhmica do pó), através de um orifício, um pouco antes da seção elétrica de coleta do pó. Ao entrar nessa seção elétrica, os gases são submetidos a alta tensão e o pó é coletado nas placas inferiores. A agulha na parte superior da seção elétrica é o eletrodo de descarga. Assim, com a tensão e corrente máxima, antes do faiscamento, determina-se a resistividade ôhmica do pó em um dispositivo que se aproxima da situação real do campo.

O circuito elétrico esquemático usado com estas células (Métodos 1 e 2) é mostrado na Fig. 4.3. O medidor de corrente é sensível a variações de corrente de até 10^{-12} A, permitindo medições de resistividade de até 10^{15} ohm-cm.

Medições no campo de resistividade das partículas em plantas podem ser feitas com um dispositivo compacto e leve do fabricante WAHLCO, similar em princípio àquele usado em laboratório. A célula pode ser protegida contra o impacto direto dos gases que tem alta velocidade.

Fig. 4.2: Dispositivo para medir resistividade (WHITE, 1962).

Fig. 4.3 : Diagrama esquemático elétrico para o dispositivo (WHITE, 1962).

Experimentos mostram que a resistividade depende, até certo ponto, da compressão da camada de pó e da voltagem aplicada. O efeito da compressão, pode introduzir um erro de até 100 % na medida da resistividade. A tensão aplicada é limitada pela faísca de ruptura da camada. A força de ruptura elétrica da camada de pó varia de 100 a 20.000 V/cm, sendo os valores mais altos os mais comuns. Como a corrente através da camada de pó aumenta mais rapidamente que a voltagem aplicada, a resistividade medida será menor que em voltagens mais altas. Portanto, medidas da resistividade geralmente são feitas à tensão próxima à ruptura.

4.1.3 Método 3

A célula básica de condutividade é mostrada na Fig. 4.4 . Consiste em um pequeno prato que contém a amostra da cinza e que também serve como um eletrodo de descarga e um eletrodo superior com um anel de proteção (eletrodo de coleta).

Conforme o método, a célula de condutividade de alta tensão deve ter as mesmas dimensões como mostrado e deve usar eletrodos construídos de aço inox sinterizado, com porosidade de 25 μm .

As condições ambientais controladas requeridas para a medição da resistividade em laboratório podem ser atingidas em um forno elétrico com controle de temperatura e com boa isolamento térmica, a fim manter a temperatura interna uniforme e um meio para controlar a umidade.

Umidade pode ser controlada por qualquer um dos meios convencionais, incluindo circulação de gás pré-condicionado através do forno, injeção de quantidade de vapor controlada, uso de banho de água ou uso de soluções químicas que controlem a pressão de vapor.

Fig. 4.4 : Dispositivo para medir resistividade (MOLESHI, 1983).

O pó é então submetido a uma alta tensão V [V] e no momento imediatamente antes da ruptura, mede-se a corrente elétrica I [A]. Assim, determina-se a resistência ôhmica do pó.

Calcula-se a resistência da camada de pó R [ohm]

$$R = \frac{V}{I} \quad [19]$$

Então, calcula-se a resistividade ρ

$$\rho = R \cdot \frac{A}{t} \quad [20]$$

onde,

A = área do prato onde se aloja o pó;

t = espessura da camada do pó.

Técnicas

Várias técnicas experimentais são usadas para medição da resistividade. Talvez o mais simples é colocar a amostra de pó em uma camada uniforme sobre a placa de coleta e aumentar a tensão em um eletrodo de emissão até atingir a ruptura elétrica; ajustar a temperatura e umidade e então medir a corrente que passa através da camada de pó.

Camadas de pó de alguns milímetros de espessura são usadas e o valor da corrente logo abaixo da ruptura é tomado para o cálculo da resistividade ρ do pó.

$$V = j \cdot \rho \cdot t \quad [21]$$

onde,

V = tensão que atravessa a camada;

j = densidade de corrente;

t = espessura da camada.

Um anel aterrado é usado sobre a placa de coleta para minimizar o efeito de borda.

Uma segunda técnica, mais sofisticada, usa a corrente do ponto corona além daquele do disco de alta tensão. Esta técnica tem a vantagem de aproximar-se mais da ação normal do precipitador. A corrente corona é aumentada lentamente e o início do corona inversa ou a formação de uma tocha de descarga da camada de pó é detectada. O início é marcado pelo salto repentino no indicador de corrente e também por uma visível descarga elétrica formando um orifício na camada de pó. Com esta técnica, a tensão de ruptura pode ser estimada ou determinada, usando o eletrodo em forma de disco. O método do ponto corona é aplicável apenas para pós de resistividade maiores que 10^9 ohm-cm, porque a ruptura não pode ser atingida com baixas resistividades.

Outra técnica freqüentemente usada em aplicações no campo é baseada na supressão da corrente. Ocorre precipitação da camada de pó sobre o eletrodo de descarga se a resistividade é grande o suficiente e causa redução da corrente corona. Com o ajuste de um circuito elétrico equivalente, em que a resistência do pó é trocado por um resistor externo, a expressão para resistividade do pó é prontamente encontrada por:

$$\rho \equiv \frac{A}{t} \cdot \frac{\Delta V}{i} \quad [22]$$

onde,

A = área do disco de coleta;

t = espessura da camada de pó;

ΔV = queda de voltagem da lei de ohm devido a camada de pó;

i = corrente corona.

Medir a resistividade em laboratório ou no local depende de vários fatores. Para altas temperaturas (acima de $180 \sim 230^\circ\text{C}$), ambos dão resultados semelhantes; em baixas temperaturas, os dados de laboratório são freqüentemente mais altos do que no campo (real). Tem sido mostrado que algumas diferenças são devido a troca das condições da amostra com o tempo e exposição a outros ambientes.

No entanto, o uso de dados de resistividade de laboratório pode ser feito com considerável cuidado, desde que as condições da amostra e as circunstâncias que ela tenha sido tomada estejam bem definidas, uma vez que pode influenciar na resistividade aparente do pó.

Técnicas de laboratório

A técnica padrão para medição da resistividade em laboratório é descrita no "American Society of Mechanical Engineers Power Test Code 28" - Determinação das propriedades de material particulado fino.

Este código foi adotado em 1965, como uma prática padrão para a determinação de todas as propriedades de material particulado fino, que envolvem o projeto e avaliação do dispositivo de separação de pó.

Os testes incluem propriedades como distribuição de velocidade de sedimentação final, tamanho da partícula, resistividade elétrica, quantidade de sulfato solúvel em água, densidade do pó e superfície específica da partícula.

O documento define resistividade elétrica aparente como resistência ao fluxo de corrente, expressa em ohm-cm, através de uma amostra do pó contido em um cm³, quando exposto a uma voltagem elétrica de 90% da tensão de ruptura da amostra, aplicada uniformemente, atravessando duas faces opostas ao cubo.

WALTON (1984) pesquisou sobre a resistividade das cinzas volantes da África do Sul. A cinza volante foi coletada do "hopper" e do fluxo gasoso dos precipitadores. Foram feitas medições de resistividade em laboratório, em vários níveis de umidade e temperatura, análise da composição química, determinação da densidade, distribuição do tamanho da partícula e área superficial da partícula. Utilizou o dispositivo padrão da IEEE (Institute of Electrical and Electrotechnical Engineering) para medir a resistividade.

A voltagem foi incrementada de 500 V e a corrente correspondente foi anotada até a voltagem de ruptura ser atingida. Esta ocorrência é indicada pela leitura altamente instável do pico do amperímetro e pela instabilidade em manter a diferença de potencial com a fonte fornecida.

A equação usada foi

$$\rho \equiv \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{t} \quad [23]$$

onde,

ρ = resistividade;

V = voltagem na ruptura;

A = área do eletrodo;

I = corrente na ruptura;

t = a espessura da camada de pó.

A amostra foi obtida das tremonhas de várias seções elétricas . As cinzas foram retiradas do fundo do tremonhas e coletadas com recipientes de vidro, sendo que outras amostras foram de coletas isocinéticas no duto.

4.2 Método utilizado

O método utilizado neste trabalho é o Método 3, conforme o dispositivo da Fig. 4.4.

A camada de pó é colocada sobre a placa de eletrodo manualmente (parte inferior, prato). A temperatura é variada (temperatura do experimento, $T= 50$ e 70 °C) e a umidade resultante será medida na condição disponível em laboratório .

Um circuito elétrico esquemático, como da Fig. 4.3, foi usado com estas células.

A corrente corona é aumentada lentamente (de 500 em 500 V) e o início da descarga corona e formação de uma tocha de descarga da camada de pó é detectada.

Com esta técnica, a tensão de ruptura pode ser estimada ou determinada por medição, usando o eletrodo em forma de disco.

A técnica padrão para condução em laboratório da medição da resistividade é descrita no "American Society of Mechanical Engineers Power Test Code 28" - Determinação das propriedades de material particulado fino.

O Procedimento executado para medição da resistividade em laboratório é composto das seguintes etapas:

a) Obter a amostra de pó apropriada - cinza volante:

O material de teste (cinza volante) foi retirada das cinzas na região próxima ao bocal de entrada do precipitador eletrostático (1º campo elétrico) da Empresa CGTEE - (ver catálogo no APÊNDICE A-6) existente na região Sul do Brasil .

O volume de cinzas retirado foi cerca de 500 cm^3 .

b) Amostra é colocada em um prato da célula de condutividade (detalhes do projeto e fabricação do dispositivo, ver APÊNDICE A-3) por meio de uma espátula. Então, é nivelado até a borda vertical, até o topo do prato. O prato possui profundidade de 5 mm, portanto $t = (\text{espessura do pó}) = 0,5 \text{ cm}$;

c) O disco do eletrodo é vagarosamente abaixado sobre a superfície e simplesmente se apoia sobre a camada de pó, horizontalmente;

d) A célula é montada em uma câmara controlada termicamente e o equilíbrio (manter as condições por 2 horas) de temperatura (que será variada) e umidade são estabelecidos (a umidade é uma variável medida e não controlada);

e) Uma tensão elétrica é aplicada à célula e então gradualmente aumentada (de 500 em 500 V), em uma série de passos até que se atinja o ponto de ruptura elétrica da camada da amostra. Passagem de corrente elétrica entre os eletrodos ocorrerá quando a voltagem que atravessa a célula é atingida ou aumentada. A *TENSÃO* elétrica é a variável obtida;

f) Registra-se a tensão e corrente a cada passo de 500 V. Obtém-se a característica de tensão e corrente do pó;

g) Repete-se o procedimento, tomando nova amostra para quebrar qualquer canal de faiscamento que pode ter se formado na camada de pó. Um total de 3 repetições são feitas;

h) A voltagem média de ruptura é então calculada. É necessário determinar se a temperatura e umidade da amostra estão em equilíbrio estável. Um teste para o equilíbrio é que a medição de tensão e corrente são reproduzíveis dentro de 10%, quando determinadas por duas medições sucessivas, feitas a 30 minutos;

i) A resistividade da amostra é então calculada à 95% da tensão média de ruptura, usando a corrente correspondente ao previamente registrado nos dados característicos de tensão e corrente;

j) Varia-se a temperatura em 3 valores (temperatura do experimento, $T = 50$ e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$) e repete-se o procedimento desde o item 2);

É considerado para o projeto:

- A compressão da camada de pó, com valor padrão de 10 g/cm^2 , obtida a partir do peso padrão do eletrodo de coleta;
- A câmara de proteção do dispositivo foi montada em acrílico, para permitir visualização;
- Medição de umidade foi feita por aparelho que permite leitura direta;
- A temperatura variável foi obtida instalando um potenciômetro no aquecedor elétrico e um termostato dentro da câmara que controla a resistência, em função da temperatura a ser estabelecida;
- A câmara isolada tem dimensões de $300 \times 300 \times 300\text{ mm}$ (altura, largura e comprimento), com bocais para conexão para o fio de alta tensão, fio para medidor de corrente (amperímetro), entrada para termopar, medidor de umidade e temperatura;
- A temperatura a ser controlada, será 3 temperaturas : temperatura do experimento, 50 e 70°C , e a umidade resultante será medida (a umidade será uma variável não controlada, somente medida), sendo que o medidor de temperatura deverá permitir medição com precisão de $\pm 1^{\circ}\text{C}$;
- O amperímetro tem sensibilidade o suficiente para detectar o faiscamento, e o transformador capacidade para no mínimo 6 kV ;
- Outros testes podem ser executados em função da quantidade de pó disponível e tipo de carvão distinto;

Uma vez definida e montada a bancada de testes, e procedendo o preenchimento da Tab. do APÊNDICE A-1, obtêm-se os dados de tensão V e corrente I , no momento do faiscamento ou ruptura elétrica. Toma-se 95 % desse valor e então procede-se os cálculos;

Calcula-se a resistência da camada de pó R [ohm]

$$R \equiv \frac{V}{I} \cdot 0,95 \quad [24]$$

Então, calcula-se a resistividade ρ [ohm.cm]

$$\rho \equiv R \cdot \frac{A}{t} \quad [25]$$

onde,

A = área do eletrodo;

t = espessura.

Capítulo 5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos na bancada de testes, tendo como base o dispositivo construído e os procedimentos definidos no capítulo 4. Em seguida, os resultados são discutidos criticamente.

5.1 Caracterização dos materiais de teste

Os materiais avaliados foram os seguintes : cinza volante da CGTEE, cinza volante da COPESUL, carvão mineral da CGTEE e pó de caldeira de biomassa da Champion;

- Cinza Volante da CGTEE e Carvão:

O material principal de teste - cinza volante - foi retirada das cinzas na região próxima ao bocal de entrada do precipitador eletrostático (1º campo elétrico) da Empresa CGTEE - (ver catálogo no APÊNDICE A-6), existente na região Sul do Brasil.

O material foi retirado pessoalmente pelo autor, às 11:00 hs do dia 15 de novembro de 2002. O precipitador eletrostático tem cerca de 20 anos de operação, do fabricante Mitsubishi Heavy Industries, do Japão. É um precipitador convencional, comercial, destinado à coleta de material particulado, proveniente de gases oriundos da queima em uma caldeira de carvão mineral (características do carvão e da cinza, ver em APÊNDICE A-5). A caldeira produz vapor à alta pressão, destinada à produção de energia elétrica.

A empresa situa-se na cidade de Bagé, a cerca de 400 Km ao Sul de Porto Alegre.

O volume de cinzas retirado foi cerca de 500 cm³.

O material principal de estudo são as cinzas volantes coletadas no precipitador eletrostático existente na empresa CGTEE. O objeto de estudo foi a cinza da CGTEE, cuja caracterização de composição química e outras informações foram disponibilizadas pela empresa e encontram-se no APÊNDICE A-5.

O carvão mineral pulverizado foi recebido através da CGTEE. Informações de composição química encontram-se no APÊNDICE A-5.

Cinza Volante da COPESUL

A cinza volante da COPESUL foi retirada por funcionário da empresa e enviada ao autor, no dia 27 de março de 2002 . A retirada deu-se do precipitador eletrostático (número PE 46 PE 02 B), na região do bocal de entrada do 1º campo elétrico. O Precipitador coleta particulado contido no fluxo de gases proveniente da queima de carvão mineral (Carvão código CV-4700 - procedência da COPEL) de uma caldeira.

A COPESUL é uma empresa que produz energia elétrica, localizada na região sul do Brasil, situada na cidade de Triunfo - Rio Grande do Sul .

Pó de Caldeira de Biomassa da Internacional Paper Ltda. (Ex-CHAMPION)

O material é o pó contido nos gases de combustão da caldeira de Biomassa da Champion (biomassa : casca de madeira de eucalipto), que é coletado no precipitador . A Champion é uma empresa que produz papel e celulose. O material foi enviado pelo cliente e não há disponibilidade de dados de composição química ou de laboratório .

5.2 Caracterização dos testes e procedimentos preliminares

Foram realizados 9 testes, com repetições que variaram entre 3 e 5 repetições, dependendo da importância do teste.

As condições dos testes foram as seguintes (Planilha com resultados dos testes, no APÊNDICE A-1):

TESTE 1 : Material : Cinza da COPESUL, temperatura ambiente, distância de 0,5 cm;

TESTE 2: Material: Cinza da CGTEE, temperatura ambiente, distância de 0,5 cm;

TESTE 3: Material: Cinza da CGTEE, temperatura de 50 °C, distância de 0,5 cm;

TESTE 4: Material: Cinza da CGTEE, temperatura de 70 °C, distância de 0,5 cm;

TESTE 5: Material: cinza da CGTEE, temperatura ambiente, distância de 1,0 cm

TESTE 6: Material: cinza da CGTEE, temperatura de 50 °C, distância de 1,0 cm;

TESTE 7: Material: cinza da CGTEE, temperatura de 70 °C, distância de 1,0 cm;

TESTE 8: Material: carvão da CGTEE, temperatura ambiente, distância de 0,5 cm;

TESTE 9: Material: pó de biomassa da CHAMPION, temperatura ambiente, distância de 0,5 cm;

A temperatura mencionada refere-se à temperatura de equilíbrio da câmara a qual está o dispositivo de teste e a distância refere-se ao espaço existente entre o eletrodo de descarga e o eletrodo de captação ou coleta. A distância de 0,5 cm corresponde ao eletrodo de coleta e de descarga separados somente pela camada de pó. A distância de 1,0 cm corresponde a um espaço de 0,5 cm entre a camada de pó e o eletrodo de coleta.

Fig.5.1 : Disposição dos eletrodos e material de teste

Foram seguidos todos os procedimentos descritos no capítulo 4, e os resultados foram colocados em Tabs. (APÊNDICE A-1) e figuras, conforme mostram a seguir. Para maiores detalhes das especificações da bancada de testes, referir ao APÊNDICE A-4.

Além dos cuidados descritos, convém salientar os procedimentos adotados preliminarmente:

- a) Não foi feito qualquer seleção ou beneficiamento do material. Assim como foi coletada, foi colocada à prova. Opcionalmente, poderia ter sido feito separação por

granulometria (uso de peneira ou coador) ou quebra de pequenas partes empedradas, mas optou-se em alterar o mínimo possível a condição do material;

- b) A cada repetição do teste, nova amostra foi selecionada, nivelada e novo teste foi realizado. Isso se deve ao fato que uma vez atingida a tensão de ruptura, a corrente elétrica atravessa a camada e forma um caminho livre entre os eletrodos de descarga e coleta (ou seja, forma um pequeno orifício na camada de pó). Assim, se o teste fosse repetido com a mesma amostra, seria obtido uma tensão de ruptura bem menor, pois já haveria um canal aberto, facilitando a passagem de corrente elétrica, o que invalidaria o teste pela leitura incorreta;
- c) Nos testes propostos, a dimensão d foi limitada entre 0,5 cm (os eletrodos totalmente em contato com a cinza) e 1,0 cm (um espaço de 0,5 cm entre a camada de pó e o eletrodo de coleta). Isso deve-se ao fato de que a tensão disponível em bancada foi de 6000 V. Quanto maior a distância entre os eletrodos, maior a tensão requerida para atingir a tensão de ruptura ou início de faiscamento. Assim, foi testado até a distância máxima de 1 cm, onde o fenômeno de faiscamento pôde ser atingido, com a tensão máxima do transformador retificador;
- d) Para a obtenção do equilíbrio de temperatura foi deixado um aquecedor elétrico ligado a um termostato regulado à uma temperatura definida ($T=50$ e 70 °C) por 1 hora, como descreve MOLESHI (1983) em seu experimento;
- e) A cada repetição de teste, o eletrodo de captação (peça superior) foi limpo com pano para reduzir o espaço entre os eletrodos, devido à espessura da camada da placa, já que isso causaria um aumento no correspondente campo elétrico E para uma mesma voltagem;

5.3 Resultados Experimentais

Algumas observações podem ser feitas em relação ao procedimento experimental adotado e aos resultados obtidos.

Como pode ser observado na Tabs. A-1.2 a A-1.6 do APÊNDICE A-1, com cinzas das CGTEE, a leitura dos dados de tensão, em ponto próximo à tensão de ruptura, demonstrou confiabilidade. As leituras tiveram valores próximos nas repetições executadas. Isso, mostra a repetitividade do resultado, mesmo com amostra nova

A tensão de ruptura, pode ser observada por 4 meios diferentes: pela instabilidade de controle do fornecimento de tensão; pela instabilidade do ponteiro que marca a corrente elétrica; pela descarga elétrica, visível, quando forma um arco voltaico e pelo ruído típico de uma descarga elétrica. O ruído é o modo mais tardio da percepção do faiscamento elétrico.

Pôde-se observar que o faiscamento termina sempre pela borda do disco, ou seja, o processo de liberação de íons é facilitado, na parte onde existe uma pequena farpa ou descontinuidade abrupta do material, como os eletrodos de descarga típicos que possuem farpas pontiagudas ao longo de seu comprimento.

Como pode ser observado nas Tabs. A-1.2 a A-1.7, do APÊNDICE A-1, para o caso da cinza volante da CGTEE, na tensão de 1425 V (campo elétrico de 2850 V/m), praticamente 40 % da tensão de ruptura inicia o processo de coleta de pó, ou início da descarga corona. O pó é dirigido para o elemento positivo. Como é uma tensão de corrente contínua, o pó adere fortemente à placa de coleta. Como a tensão é limitada (ou seja, o transformador retificador utilizado no experimento tem tensão máxima de 6000 V), o pó mais fino é coletado, enquanto as partículas maiores, de maior peso, permanecem no eletrodo de descarga (prato inferior). Os pós de maior granulometria não são dirigidos ao eletrodo de coleta, pois o peso é maior que a força eletrostática. Assim, percebe-se que há uma forma de separação de pós finos dos mais grossos, no seu estágio inicial.

A parte do pó considerada não queimada (0,10 % a 3,42 % - de fragmentos ricos em carbono, de coloração típica preta - conforme Tab. A-5.5 do APÊNDICE A-5) é captada inicialmente, demonstrando que quanto maior a presença de não queimados

(carbono), mais facilmente o pó será coletado, pois a camada de cinza volante conduz sem dificuldade, ou seja, um efeito indesejável à combustão da caldeira (que é uma combustão incompleta, com rejeitos de não queimados) traz um efeito favorável à coleta de cinzas volantes (essa ocorrência é descrita por POTTER (1984) e SHIBUYA e MOCHIZUKI (1984)).

5.4 Discussão

Os resultados experimentais apresentados nas Figs. 5.2, 5.3 e 5.4 mostram que a resistividade ôhmica aumenta com a temperatura (na faixa de temperatura analisada, de temperatura ambiente à 70 °C). Esses resultados estão de acordo com aqueles obtidos por outros pesquisadores da área (NICHOLS, 1978, FUJISHIMA, 1998 e DALMON, 1984) Ou seja, o comportamento das cinzas volantes nacionais possuem comportamento semelhante das de outros países no que tange à resistividade em função da temperatura. Ocorre o predomínio da condutividade superficial para condição fria (baixa temperatura) e úmida, conforme descrevem os pesquisadores OGLESBY e NICHOLS (1978), fenômeno esse já conhecido para o caso de cinzas volantes em geral. Verificou-se também que as cinzas nacionais não possuem alta resistividade, típico das cinzas volantes. Assim pode-se esperar que não ocorra corona inverso, que só é observado para cinzas de alta resistividade, indesejável ao processo de precipitação eletrostática e no dimensionamento de precipitadores. Os testes realizados indicaram que a cinza volante nacional analisada apresenta de baixa à média resistividade ôhmica.

Condições de teste: temperatura do experimento: 25,6 °C; umidade ambiente: 59,1 %; 3 repetições por teste; espessura de pó t: 0,5 cm; os pontos inseridos são média aritmética dos valores medidos na mesma condição.

Fig. 5.2 - Resistividade x Temperatura (d=0,5 cm)

Condições de teste: temperatura do experimento: 27 °C; umidade ambiente: 62,6%; 3 repetições por teste; espessura de pó t: 1,0 cm; os pontos inseridos são média aritmética dos valores medidos na mesma condição.

Fig. 5.3 - Resistividade x Temperatura (d=1,0 cm)

Fig. 5.4 - Resistividade x Temperatura (d=0,5 e 1,0 cm)

Fig. 5.5 a) Comparativo das resistividades de materiais diversos (escala logarítmica)

Condições de teste: temperatura do experimento: 25 °C; umidade ambiente: 59,1%; 3 repetições por teste; espessura de pó t: 0,5 cm; os pontos inseridos são média aritmética dos valores medidos na mesma condição.

Fig. 5.5 b) Comparativo das resistividades de materiais diversos (escala normal)

Comparando-se os materiais analisados (Fig. 5.5), verificou-se que as cinzas volantes nacionais possuem resistividade maior do que o pó de caldeira de biomassa, o que está de acordo com o observado na indústria. Para o processo de queima em caldeira de biomassa, o precipitador é normalmente menor do que para os precipitadores de caldeira à carvão mineral, para uma mesma vazão de gases. As cinzas volantes da CGTEE possuem resistividade menor que a cinza da COPEL e menor que o próprio carvão que gera as cinzas.

Ao analisar a composição química do carvão da CGTEE (Tab. A-5.1 do APÊNDICE A-5) verificamos que este possui teor de Fe_2O_3 de 6 a 10,60 %. Segundo DALMON (1984), isso favorece a captação de pó, pelo aumento da velocidade efetiva de migração. O teor de enxofre é médio, de 1,52 a 2,18 %, o que também favorece a captação de pó, como descrevem SUZUKI E TACHIBANA (1984). A resistividade superficial aumenta com a redução da quantidade de enxofre no carvão (MOLESHI, 1983). E com relação a quantidade de CaO (0,63 a 0,92 %) o carvão pode ser classificado como baixo calcáreo ($\text{CaO} < 2,5 \%$).

Como comparação (Fig. 5.5), ao analisar os dados dos materiais testados, pode-se observar que a ordem crescente de resistividade é pó de caldeira de biomassa, cinzas da CGTEE e cinzas da COPESUL. Assim, sob esse aspecto, é esperado que os precipitadores destinados à COPESUL devam merecer maior atenção com relação ao carregamento elétrico e efeito do corona inverso. E por outro lado, o pó da caldeira de biomassa, conhecido por ter alto teor de sulfatos (provenientes das cascas de madeira), tem baixa resistividade e portanto, precipitadores menores;

Capítulo 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo estão apresentadas as principais conclusões do trabalho, com base nos objetivos iniciais e algumas considerações visando trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

Em relação a cada objetivo proposto, as conclusões são as seguintes:

OBJETIVO 1.) Elaborar revisão da literatura: foi descrito os principais trabalhos e pesquisas desenvolvidas na área nos últimos 20 anos relativos à resistividade ôhmica;

OBJETIVO 2.) Projetar, construir e montar um dispositivo experimental de acordo com as normas reconhecidas, para medir a resistividade ôhmica das cinzas de respectivos carvões minerais .

O dispositivo para tal fim foi projetado e construído conforme normas, bem como foram feitos os testes conforme metodologia reconhecida e adotada em outros países. Obteve-se material de teste com cinzas volantes nacionais e após os testes foram disponibilizados os resultados com dados da resistividade ôhmica .

OBJETIVO 3.) Elaborar um banco de dados da resistividade ôhmica avaliada .

Foram executados os testes, analisados e discutidos os resultados. As planilhas com dados da resistividade das cinzas volantes da CGTEE foram disponibilizadas. Esses dados são inéditos no Brasil, e servem como auxílio ao dimensionamento dos precipitadores.

As principais conclusões deste item, considerado mais importante do trabalho, foram:

- a) A primeira constatação foi de que as cinzas volantes analisadas não possuem resistividade ôhmica alta, com valores variando de $3,04 \times 10^{-8}$ a $5,35 \times 10^{-8}$ ohm.cm, sendo que à baixa tensão inicia-se o processo de coleta e os valores de resistividade

medidos demonstram que podem-se coletar as cinzas em tensões normais de projeto, sem necessidade, portanto, de agentes condicionadores, redutores de resistividade. Um fator limitante para o projeto de precipitadores é quanto a enorme quantidade de cinzas volantes (em torno de 50 %), geradas quando se queima o carvão mineral brasileiro. Do ponto de vista de resistividade, as cinzas volantes provenientes da queima de carvões nacionais têm características bem favoráveis à sua captação;

- b) Os resultados obtidos em teste vão ao encontro àqueles reportados em literatura e testados por outros pesquisadores da área. O comportamento das cinzas volantes nacionais tem a mesma tendência das de outros países, ou seja, a resistividade ôhmica aumenta com a temperatura (na faixa de temperatura avaliada de $T =$ ambiente a $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ocorre o predomínio da condutividade superficial para condição fria e úmida, conforme já descrito pôr outros pesquisadores. O ponto positivo é que as cinzas nacionais analisadas não possuem alta resistividade ($\rho > 10^{11}\text{ ohm} \cdot \text{cm}$), típica das cinzas volantes de outros países. Assim pode-se esperar que não ocorra corona inverso, devido a alta resistividade ôhmica das cinzas.
- c) Comparativamente, as cinzas volantes da CGTEE possuem resistividade ôhmica maior que os valores para pó de caldeira de biomassa, o que é coerente com a prática na indústria: os precipitadores das caldeiras de biomassa são menores que os precipitadores de caldeiras à carvão mineral, para um mesma vazão de gases.

OBJETIVO 4.) Elaborar um conjunto de considerações que auxiliem a dimensionar o precipitador eletrostático.

- a) No instante do faiscamento, o processo de captação é descaracterizado, formando uma pequena nuvem de cinzas, e o processo de coleta é interrompido. Assim, caracteriza-se e demonstra-se como esse efeito é indesejável no processo de precipitação eletrostática industrial, que corresponde a uma redução, mesmo que momentânea, da eficiência de coleta, emanando pó do precipitador, para a atmosfera.

- b) O pó considerado não queimado (de fragmentos ricos em carbono) é captado inicialmente, indicando que quanto maior a presença de não queimados, mais facilmente o pó será coletado. Um efeito indesejável à combustão na caldeira (que é uma combustão incompleta, com rejeitos de não queimados), produz um efeito favorável à coleta de cinzas volantes.
- c) Resistividade ôhmica menor, significa na prática, velocidade de captação (migração) de particulado maior, significando precipitadores eletrostáticos de menor tamanho e portanto, menor custo. A cinza volante nacional tem resistividade de baixo a média, com provável ausência do indesejável efeito corona inversa e que essa variável, como parâmetro de dimensionamento de precipitadores, não é preocupante. O engenheiro projetista deve, portanto, preocupar-se com outras variáveis, como a velocidade do fluxo de gás, interna na seção do equipamento e como contornar o problema do excesso de cinzas (volume de cinzas) ao queimar o carvão nacional (quase 50 % do carvão queimado transforma-se em cinzas).

6.2 Considerações finais

Como metodologia, forma de estudo e análise, os resultados são bons e animadores devido à baixa resistividade ôhmica, bem como procedimento de teste demonstrou confiabilidade. O material de teste, composição química e processo de coleta foram totalmente caracterizados, disponibilizados e uma análise completa pôde ser realizada.

O dispositivo montado serve para medição da resistividade de qualquer material. A incerteza do amperímetro pode ser melhorada e assim resultados com menos incertezas podem ser obtidos. Mesmo assim, é possível determinar se um material é mais resistivo ou menos que um material base, como pôr exemplo, a cinza da CGTEE. Tomando-a como padrão pode-se determinar se um pó é mais fácil ou mais difícil de captar, tomando os devidos cuidados para o projeto do P.E. a ser dimensionado.

Tentou-se obter os resultados mais confiáveis possíveis, mas cabe ressaltar que devido as limitações orçamentárias, os resultados poderiam ser melhorados se aparelhos

de maior precisão e resolução pudessem ser utilizados. Por exemplo, na detecção da corrente elétrica, a resolução necessária seria da ordem de 10^{-12} A. Instrumentos com essa resolução são extremamente caros e precisariam ser importados no mercado.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, segue alguns tópicos que poderiam trazer importantes subsídios aos projetistas e engenheiros da área:

- a) Caracterização da resistividade ôhmica de cinzas volantes, em relação a velocidade de migração das partículas em um determinado precipitador existente;
- b) Estudo sobre pré coletores de pó a serem posicionados anteriormente aos precipitadores para caldeira de carvão mineral, como forma de captar o excesso de cinzas volantes que são geradas após a queima do carvão mineral na caldeira, e caracterização da resistividade ôhmica das cinzas coletadas nos precipitadores, uma vez instalada o pré coletor;
- c) Estudo de condicionamento de gases com enxofre (SOx) ou umidade, destinado ao caso específico de cinzas volantes nacionais;
- d) Estudo de mistura de carvões minerais com características favoráveis à captação, como enxofre ou elementos alcalinos com o Sódio e Potássio;
- e) Estudo comparativo entre carvões nacionais e de outros países;

Capítulo 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOHM, JAROSLAV. **Electrostatic Precipitators**, Vol. 14, Capítulo 6 – Formação e remoção de camada de pó e capítulo 7 – Comportamento da camada de pó acumulada, Checoslováquia, p. 168-217, 1982.

CBC Indústrias Pesadas S.A. - Catálogo de Equipamentos de Controle Ambiental, 1990, 1999.

CHAE, J.O; SEO K.W. A study of ESP using pulse energization for collecting high resistivity and fine particle, In: 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Korea, p.375-382, 1998.

CHOI, D.H. Experimental Study of Ash Layer Rapping and Re-entrainment from the Collector Plates of a Laboratory-Scale Electrostatic Precipitator, Tese (Doutorado) - Universidade de Stanford, EUA, p.1-22, 1991.

COE, E.L. SO₃ conditioning for high resistivity fly ash, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p.275-282, 1984.

COTTINGHAM, Clive An analysis of the effect of carbon in ash levels on ESP performance, In: 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Korea, p.84-92, 1998.

DALMON, J. Ash chemistry, resistivity and ESP performance, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p.209-309, 1984.

DAVE, J.M. Effect of sodium conditioning on the resistivity of fly ash of selected Indian

coals, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p.328-331, 1984.

DUBARD, J. L. Effects of pulse energization on electrical mechanisms in a fly ash precipitator, In: 2nd INTERNATIONAL ON ESP, Japão, p.920-928, 1984.

FUJISHIMA H.; TSUCHIYA, S. Colder Side ESP of advanced flue gas treatment system for coal fired boiler, In: 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Korea, p.542-549, 1998.

FUJIMURA, H.; EHARA Y. The evaluation of collection efficiency on electrostatic precipitator by visibility index, - In: 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Korea, p.53-58, 1998.

GOMOLL, H.J. SO₃ – Flue Gas Conditioning, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p. 319-327, 1984.

HEINICHEN D.; WALTON, K. Resistivities of South African fly ashes, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p.310-318, 1984.

K.H., JOON; KANG D.K. Influence of dust particles on V-I characteristics in electrostatic precipitator, - In: 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Korea, p.132-138, 1998.

MIZUNO, A.; DAVIS R.H. Combined treatment of SO₂ and high resistivity fly ash using pulse energized electron reactor, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p. 879-887, 1984.

MOLESHI, B. Electromechanics and electrical breakdown of particulate layers, Tese (Doutorado), capítulos 1,2,3,4 e 5, Universidade de Stanford, EUA, p.1-144, 1983.

MOORE, A. D. **Electrostatics and its applications**, Capítulo 9 – Precipitação eletrostática – Precipitação de pó de alta resistividade, Wiley, EUA, p.180-220, 1973.

ODA T.; MASUDA S. TSDC Measurements of fly ashes from pulverized coal combustion, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p.540-547, 1984.

OGLESBY, S. **Electrostatic Precipitation**, Capítulo 7 – Resistividade elétrica e condicionamento, capítulo 14 – Medições da resistividade elétrica, EUA, p.119-156 e p.305-362, 1978.

OKAZAKI, K.; NISHIKAWA, T. Collection characteristics of ash particles focussing on physicochemical processes in pulverized coal combustion system, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p.792-799, 1984.

POTTER, E.C. Dust resistivity - Its significance and interpretation, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p.228-235, 1984.

SELF, S.A.; CHOI D.H. Effect of turbulence on ESP performance, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p. 249-264, 1984.

SHIBUYA, S.; MOCHIZUKI Y. Evaluation of ESP precipitability of coal fly ash using laboratory combustor, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p. 805-811, 1984.

SULLIVAN, K.M. Sulphur to coal – How it influences resistivity, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p.194-199, 1984.

SUZUKI, J.; TACHIBANA, N. Precipitability of fly ash from various coals, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p.194-199, 1984.

TAMORI, I.; KOGURE N. Dust measurement for collection efficiency, In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Japão, p.661-665, 1984.

ZYKOV, A. M.; KOLCHIN K.I. Investigation of pulse energization and agentless conditioning at pilot ESP of 300 MW coal fired boiler, In: 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESP, Korea, p.465-470, 1998.

WHITE, H. **Industrial Electrostatic Precipitation**, Addison-Wesley, EUA, 1962.

APÊNDICES

A-1 - Tabelas e figuras com resultados experimentais

A-2 - Análise de incertezas

A-3 - Projeto executivo do dispositivo

A-4 - Descrição da bancada de testes e fotos

A-5 - Análise química do carvão e das cinzas

A-6 - Catálogo da Empresa CGTEE

APÊNDICE A-2 : Análise de incertezas

Metodologia

Nesta análise são identificadas as fontes de erros associados aos parâmetros de entrada da experiência e à medição da variáveis do processo para que se possa determinar as incertezas associadas.

Variáveis independentes da medição

As variáveis independentes para a experiência são:

T_l = Temperatura na câmara onde ficará posicionado o dispositivo (°C)

UR = Umidade relativa do ar (%)

V = Tensão a ser submetida à amostra de pó (V)

I = Corrente a ser submetida à amostra de pó (A)

Relação :

$$R = \frac{V}{I} \quad = \text{Resistência (ohm)}$$

$$\rho = \frac{R \cdot A}{t} \quad = \text{Resistividade ôhmica (ohm . cm)}$$

A = Área do disco do dispositivo (cm²) (constante)

t = Espessura da camada de pó (cm)

Tab. A-2.1 - Fonte de erro das variáveis

a) Temperatura (fabricante)

Foi utilizado um termo-higrômetro digital portátil

Marca Kitler, modelo THG-388 ($-20\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Incerteza padronizada : $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$

Leitura da escala : $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

b) Umidade (fabricante)

Foi utilizado um termo-higrômetro digital portátil

Marca Kitler, modelo THG-388 (2 a 98% UR)

Incerteza padronizada : $0,5\%$

Leitura da escala : $\pm 1\%$

c) Tensão (fabricante)

Foi utilizado aparelho com teste de volts DC de até 6 kV.

Incerteza padronizada : $\pm 0,25$ a $0,5\%$

d) Corrente (fabricante)

Foi utilizado aparelho para detectar variações de até 10^{-3} A

Incerteza padronizada : $\pm 0,5\%$ (estimado)

e) Área do disco

Leitura dimensional com paquímetro

Incerteza padronizada : $\pm 0,025\text{ mm}^2$ (estimado)

f) Posicionamento - espessura do pó t

Leitura dimensional com paquímetro

Incerteza padronizada : $\pm 0,25\text{ mm}$ (estimado)

Avaliação da incerteza

Método de avaliação

Equação a ser aplicada

$$\rho = \frac{R \cdot A}{t} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{t}$$

A incerteza padronizada de ρ é representada por $u_c(\rho)$

$$u^2_c(\rho) = \left(\frac{\partial \rho}{\partial R} \right)^2 \times u^2(R) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial A} \right)^2 \times u^2(A) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)^2 \times u^2(t)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial R} \equiv \frac{A}{t}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial A} = \frac{R}{t}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{R \times A}{t^2}$$

$$\frac{u^2_c(\rho)}{\rho^2} = \frac{u^2(R)}{R^2} + \frac{u^2(A)}{A^2} + \frac{u^2(t)}{t^2}$$

$$\left(\frac{u_c(\rho)}{\rho} \right)^2 = \left(\frac{u(R)}{R} \right)^2 + \left(\frac{u(A)}{A} \right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t} \right)^2$$

$$\left(\frac{u_c(\rho)}{\rho} \right)^2 = \left(\frac{u(V)}{V} \right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I} \right)^2 + \left(\frac{u(A)}{A} \right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t} \right)^2$$

$$\left(\frac{u_c(\rho)}{\rho} \right)^2 = \left(\frac{0,005}{6000} \right)^2 + \left(\frac{0,005}{1} \right)^2 + \left(\frac{0,025}{456} \right)^2 + \left(\frac{0,25}{5} \right)^2$$

Incerteza padronizada relativa:

$$\left(\frac{uc(\rho)}{\rho} \right) = 0,050547$$

Incerteza expandida relativa (95 %) :

$$\left(\frac{Uc(\rho)}{\rho} \right) = 0,101095 = 10,11\%$$

APÊNDICE A-3 - Projeto executivo do dispositivo

O dispositivo constitui-se das seguintes partes:

- 1) Parte interna mecânica:
 - a) Eletrodo de descarga: Prato inferior onde a cinza é depositada, feito em aço inoxidável ASTM A-304, fabricado por usinagem em torno;
 - b) Eletrodo de coleta: Disco superior, feito de aço inoxidável ASTM A-304, fabricado por processo de usinagem mecânica;
 - c) Parte de cerâmica isolante: trata-se de borracha resistente a alta tensão (até 20 kV), de 3,5 mm de espessura ;
 - d) Carcaça ou câmara: é um fechamento de acrílico de 5 mm de espessura para isolar o meio ambiente e manter a temperatura;

Esquema de montagem da bancada

A seguir são detalhados todas as partes mecânicas bem como seu projeto de fabricação.

Fig. A-3.1 : Descrição dos elementos funcionais do dispositivo de teste

Fig. A-3.2 : Visão espacial do dispositivo de teste

APÊNDICE A-4: Descrição da bancada de testes e fotos

A bancada de testes foi montada na oficina mecânica da CBC Indústrias Pesadas S.A, na cidade de Jundiaí; empresa o qual o autor é funcionário do setor de projetos detalhados.

Foi utilizado para bancada de testes:

- 1) O dispositivo de teste, com eletrodos de emissão ou de descarga (pólo negativo), eletrodo de coleta (pólo positivo);
- 2) Uma câmara feita de acrílico de 5 mm de espessura para isolar e manter o ambiente controlado termicamente e conservação da umidade;
- 3) Um transformador de corrente elétrica alternada de 6000 V (marca Yamatake-Honeywell, modelo ATN 110 A com entrada de 100 / 200 V), retificada para corrente elétrica contínua através de uma ponte com 4 diodos retificadores código TV 18;
- 4) Um medidor de corrente (amperímetro) (Miliamperímetro marca Sumitomo SS 2.5 , Toyo Keiki , DVF -8 (de 0 a 3000 mA);
- 5) Um medidor de tensão elétrica (voltímetro) (Multímetro digital , marca Engro MD 820);
- 6) Um variador de tensão - auto transformador variável (tipo M-2400 entrada de 220 V, saída de 0 a 220 V, 160 W, 50/60 Hz, 0,7 A) para aumentar gradativamente a tensão, com saída de 0 a 220 V;
- 7) Um resistência elétrica com aletas para dissipar calor e aquecer o ambiente em temperaturas de 50 a 70 °C;
- 8) Um termostato (marca Kemaker , de 0 a 320 °C) que liga e desliga a resistência elétrica ao atingir determinada temperatura ($T= 50$ e 70 °C);
- 9) Um medidor de temperatura e umidade (marca Kitler, modelo THG de -20 a + 60 °C e umidade relativa de 2 a 98 %);
- 10) Esponjas para isolamento do ambiente entre a câmara e o meio externo, nos pontos de interface;
- 11) Borrachas para isolamento elétrico de resistência superior a 20 kV;

O esquema de ligação pode ser simplificada mostrada:

A seguir fotos do material de teste, dispositivo e bancada de testes

Carvão mineral
pulverizado da
CGTEE

Cinza volante
da Copesul

CINZA
VOLANTE DA
CGTEE

Pó de caldeira
de biomassa ,
da Champion

Carvão da CGTEE

Cinza da CGTEE

Cinza da Copesul

Pó de caldeira de Biomassa

Dispositivo de medição de resistividade

Resistência elétrica
para aquecimento
do meio ambiente

Medidor de
temperatura e
umidade

Caixa de acrílico para permitir visualização

A Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica – CGTEE foi criada em julho de 1997, a partir da cisão da CEEE. Em novembro de 1998 seu controle acionário foi transferido para o Governo Federal sob a administração da Eletrobrás, que promoveu uma ampla reestruturação na companhia, dando prioridade para o aumento da produção de energia elétrica.

A CGTEE possui três usinas: a Usina Termelétrica Presidente Médici (Candiota); a Usina Termelétrica São Jerônimo; e a Nova Usina Termelétrica de Porto Alegre (Nutepa). Além das usinas, a companhia mantém a Oficina de São Leopoldo como unidade de apoio à manutenção eletromecânica.

O principal combustível para geração de energia elétrica nas usinas da CGTEE é o carvão mineral. Aliás, o Estado do Rio Grande do Sul possui as maiores jazidas de carvão mineral do Brasil. A região do município de Candiota detém 38% das reservas brasileiras de carvão com 12,3 bilhões de toneladas, das quais 3,9 bilhões são mineráveis a céu aberto.

Com a federalização, a CGTEE inaugurou uma nova fase de produção de energia elétrica a carvão no Rio Grande do Sul. Com novos investimentos e um programa especial de manutenção a produção de energia evoluiu de 1,08 mil GWh em 1998 para 1,87 mil GWh em 1999 e 1,97 mil GWh em 2000. O salto foi superior a 82%. O desempenho econômico-financeiro da companhia também vem evoluindo visivelmente: os custos de produção em relação à energia faturada decresceram na ordem de 30%; diminuiu, também, o prejuízo da CGTEE, de R\$ 72,1 milhões em 1998 para R\$ 15,3 milhões em 2000.

A CGTEE vem impulsionando o desenvolvimento social e econômico da região onde está inserida, transformando velhos sonhos em realidade.

A CGTEE
O PARQUE GERADOR
PENSANDO NO FUTURO

O PARQUE GERADOR PENSANDO NO FUTURO

O parque gerador da CGTEE é formado pela Usina Termelétrica Presidente Médici (Candiota II), pela Usina Termelétrica São Jerônimo, também movida a carvão, e pela Nova Usina Termelétrica de Porto Alegre (Nutepa), movida a óleo combustível.

A empresa possui, no total, 490 MW de potência instalada.

A CGTEE ainda possui a Oficina São Leopoldo, unidade de apoio à manutenção, com serviços de fundição, solda, torno e freza de eixos e engrenagens.

A CGTEE, atualmente, vem empreendendo esforços para viabilizar a construção da Usina Candiota III. A sua construção, ao lado de Candiota II, permitirá o uso comum de vários equipamentos e sistemas, reduzindo dessa forma os custos de implantação.

A obra terá grande significado para a região, pois 1.200 empregos serão gerados durante a construção e, na fase de operação, serão 200 empregos diretos. A usina ampliará a capacidade de produção da CGTEE em 350 MW, totalizando quase 800 MW de potência instalada.

Outras alternativas de expansão vêm sendo estudadas. Tanto a Nuteva, como a Usina São Jerônimo devem passar por um programa de modernização das suas instalações, melhorando e ampliando suas capacidades de geração de energia elétrica.

APÊNDICE A-5 - Composição química do carvão e das cinzas volantes

Análise de amostras tomadas de uma quantidade de 1000 t; Carvão recebida da Mina de carvão (CANDIOTA)

Tab. A-5.1 : Análise química da cinza (*Fonte : Manual de operação e manutenção da Mitsubishi, 1981*)

Característica	MAN	STEINMULLER	B e W	CSN	ITERS
SiO ₂ %	63,50	68,30	76,00	70,89	67,05
Al ₂ O ₃ %	19,10	16,60	15,00	21,07	25,17
Fe ₂ O ₃ %	6,90	10,60	6,00	7,43	1,82
CaO %	3,00	Traços	0,50	Traços	0,90
MgO %	Traços	0,25	0,30	Traços	0,80
Na ₂ O %	0,20	0,13	0,10	0,55	1,36
K ₂ O %	1,50	1,44	1,70	0,28	1,18
SO ₃ %	0,50	Traços	-	-	-
P ₂ O ₅ %	-	Traços	-	-	-
TiO ₂ %	-	-	-	-	-
Total	94,70	97,32	100,10	100,22	98,28

As designações de MAN, Steinmuller, B e W, CSN e ITERS são nomes de empresas que executaram a análise química laboratorial.

MAN (Alemanha)– ref. Tdzp 2236fs/ce/as/(29-mai-1967)

Steinmeuller (Alemanha)– ref. VTU 168/631 Frk (20-abr-1967)

B e W (Estados Unidos) – ref. 6730-01 (23-jun-1967)

CSN (Brasil) – ref. Proc. DI / 6925 (14-nov-1967)

ITERS (Brasil) – ref. Cert. 50.607 (20-jul-1967) e 50.738 (01-jul-1967)

Tab. A-5.2 : Composição do carvão utilizado na Caldeira (*Fonte : Manual de operação e manutenção da Mitsubishi, 1981*)

Análise aproximada	Unidade	Carvão Candiota
Poder calorífico	kcal/kg	3.200
Carbono fixo	%	27,6
Material volátil	%	19,0
Cinza	%	52,2
Enxofre	%	1,2
Hidrogênio	%	2,48
Umidade	%	13,5

Tab. A-5.3 : Ensaio em carvão (*Fonte : Relatório de ensaio executado pela CIENTEC, 2001*)

Análise	Amostra de carvão de mina	Carvão ET 17 e 18	Carvão Pulverizado	Carvão ET 18	Carvão pulverizado
Umidade total (%)	14,44	17,11	5,50	14,55	5,34
Cinza (b.s.) (%)	51,97	52,13	53,6	50,20	52,60
Matérias voláteis (b.s.) (%)	21,26	21,65	21,10	22,10	21,50
Carbono fixo (b.s.)(%)	26,77	26,22	25,30	27,70	25,90
Enxofre total (b.s.)(%)	1,52	2,18	1,95	1,76	2,56
Carbono (b.s.) (%)	34,38	33,71	32,79	35,27	32,98
Hidrogênio (b.s.) (%)	2,35	2,29	2,24	2,45	2,29
Nitrogênio(b.s.)(%)	0,72	0,71	0,66	0,61	0,54
PCS (b.s.) , kcal/kg	3260	3175	3085	3315	3145
PCS (b.s.) J/g	13640	13300	12920	13880	13160
PCI (b.s.) kcal/kg	3140	3060	2970	3190	3030
PCI (b.s.) J/g	13140	12820	12440	13360	12680
b.s. : base seca					

Tab. A-5.4 : Análise de metais, óxidos componentes da cinzas (*Fonte : relatório da CIENTE , CGTEE , 2001*)

Componente		Maio/95	Maio/95	Maio/95	Nov/2000- amostra composta
Na ₂ O	%	0,20	0,25	0,36	0,15
K ₂ O	%	2,00	2,13	2,05	1,86
MgO	%	0,75	0,73	0,25	0,80
CaO	%	0,92	0,80	0,63	2,09
Fe ₂ O ₃	%	3,82	6,43	4,90	5,22
Al ₂ O ₃	%	19,82	20,61	20,20	19,60
SiO ₂	%	69,04	67,70	67,90	68,40
TiO ₂	%	0,71	0,72	0,53	0,72
P ₂ O ₅	%			0,06	0,04
MnO	%				0,07
SO ₃	%	Sem dados	Sem dados	Sem dados	

Tab. A-5.5 : Ensaio em cinza (*Fonte : Relatório da CIENTEC, 2001*)

	Cinza leve (14/06/00)	Cinza pesada (14/06/00)	Cinza leve (19/07/00)	Cinza pesada (19/07/00)
Umidade total (%)	---	25,9	---	37,87
Não queimados (b.s.) (%)	---	0,10	---	3,42
Enxofre total (b.s.) (%)	0,06	0,04	0,13	1,22
b.s. : base seca				

APÊNDICE A-1 : Tabelas com resultados experimentais

Dia : ____/____/____ Horário : ____ : ____ hs

Temperatura da câmara: ambiente (será feito teste em $T = 50$ e 70 °C)

Umidade : _____ %

Tabela - Planilha para anotações dos dados de teste

Tensão (V)	Corrente (A)	Resistência (ohms)	Resistividade (ohms x cm)	
V	I	$R = V / I$	$\rho = R \cdot A / t$	Onde A = área do disco (cm ²) e t = espessura da camada de pó (cm)
500	Valor a ser lido	Cálculo	Cálculo	
1.000				
1.500				
...				
...				
6.000				

Tab. A-1.1 - Planilha com resultados do teste número 1

TESTE :	1									
DIA :	9/12/2002									
HORA :	13:00									
MATERIAL	Cinza da Copesul									
NÚMERO DE REPETIÇÕES	3									
TEMPERATURA AMBIENTE	25,6	°C								
UMIDADE AMBIENTE	59,2	%								
TEMPERATURA DO TESTE	25,6	°C								
UMIDADE DO TESTE	59,2	%								
ESPESSURA DA C. d=	0,5	cm								
ÁREA DO ELETRODO =	45,6	cm2								
	PRIMÁRIO	SECUNDARIO								
Descrição	Voltagem	95 % de	Voltagem	Corrente	Distância	Campo elétrico	Resistência	Espessura	Área	Resistividade
Variável	V (fonte)	V	V	I	d	E= V / d	R= V / I	t	A	ρ
Unidade	V (volts)	V (volts)	V (volts)	(mA)	(cm)	(volts/ cm)	(volts / A)	(cm)	(cm2)	R x (A / t)
	(Lido)	(cálculo)								ohm . Cm
	0	0,0	0,0	0	0,50	0,00		0,50	45,6	
	50	47,5	1425,0	0	0,50	2850,00		0,50	45,6	
	70	66,5	1995,0	0	0,50	3990,00		0,50	45,6	
	90	85,5	2565,0	0	0,50	5130,00		0,50	45,6	
	110	104,5	3135,0	1	0,50	6270,00	3,14E+06	0,50	45,6	2,86E+08
	130	123,5	3705,0	1	0,50	7410,00	3,71E+06	0,50	45,6	3,38E+08
	150	142,5	4275,0	1	0,50	8550,00	4,28E+06	0,50	45,6	3,90E+08
1a. Rep	155	147,3	4417,5	1	0,50	8835,00	4,42E+06	0,50	45,6	4,03E+08
2a. Rep	160	152,0	4560,0	1	0,50	9120,00	4,56E+06	0,50	45,6	4,16E+08
3a. Rep	160	152,0	4560,0	1	0,50	9120,00	4,56E+06	0,50	45,6	4,16E+08

Tab. A-1.2 - Planilha com resultados do teste número 2

TESTE :	2									
DIA :	9/12/2002									
HORA :	13:30									
MATERIAL	Cinza da CGTEE									
NÚMERO DE REPETIÇÕES	5									
TEMPERATURA AMBIENTE	25,6	°C								
UMIDADE AMBIENTE	59,1	%								
TEMPERATURA DO TESTE	25,6	°C								
UMIDADE DO TESTE	59,1	%								
ESPESSURA DA C. d=	0,5	cm								
ÁREA DO ELETRODO =	45,6	cm2								
	PRIMÁRIO	SECUNDÁRIO								
Descrição	Voltagem	95 % de	Voltagem	Corrente	Distância	Campo elétrico	Resistência	Espessura	Área	Resistividade
Variável	V (fonte)	V	V	I	d	$E= V / d$	$R= V / I$	t	A	ρ
Unidade	V (volts)	V (volts)	V (volts)	(mA)	(cm)	(volts/ cm)	(volts / A)	(cm)	(cm2)	$R \times (A / t)$
	(Lido)	(cálculo)								ohm . Cm
	0	0	0,0	0	0,5	0,0		0,50	45,6	
	50	47,5	1425,0	0	0,5	2850,0		0,50	45,6	
	70	66,5	1995,0	0	0,5	3990,0		0,50	45,6	
	90	85,5	2565,0	0	0,5	5130,0		0,50	45,6	
	110	104,5	3135,0	1	0,5	6270,0	3,14E+06	0,50	45,6	2,86E+08
1a. Rep	117	111,15	3334,5	1	0,5	6669,0	3,33E+06	0,50	45,6	3,04E+08
2a. Rep	122	115,9	3477,0	1	0,5	6954,0	3,48E+06	0,50	45,6	3,17E+08
3a. Rep	125	118,75	3562,5	1	0,5	7125,0	3,56E+06	0,50	45,6	3,25E+08
4a. Rep	127	120,65	3619,5	1	0,5	7239,0	3,62E+06	0,50	45,6	3,30E+08
5a. Rep	128	121,6	3648,0	1	0,5	7296,0	3,65E+06	0,50	45,6	3,33E+08

Tab. A-1.3 - Planilha com resultados do teste número 3

TESTE :	3
DIA :	9/12/2002
HORA :	15:35
MATERIAL	Cinza da CGTEE
NÚMERO DE REPETIÇÕES	3
TEMPERATURA AMBIENTE	25,6 °C
UMIDADE AMBIENTE	59 %
TEMPERATURA DO TESTE	50 °C
UMIDADE DO TESTE	14,4 %
ESPESSURA DA C. d=	0,5 cm
ÁREA DO ELETRODO =	45,6 cm ²

Descrição	PRIMÁRIO		SECUNDÁRIO		Distância	Campo elétrico	Resistência	Espessura	Área	Resistividade
	Voltagem	95 % de	Voltagem	Corrente						
Variável	V	V	V	I	d	$E = V / d$	$R = V / I$	t	A	ρ
Unidade	V (volts)	V (volts)	V (volts)	(mA)	(cm)	(volts / cm)	(volts / A)	(cm)	(cm ²)	$R \times (A / t)$
	(Lido)	(Cálculo)								ohm . Cm
	0	0,0	0,0	0	0,5	0,0		0,5	45,6	
	50	47,5	1425,0	0	0,5	2850,0		0,5	45,6	
	70	66,5	1995,0	0	0,5	3990,0		0,5	45,6	
	90	85,5	2565,0	0	0,5	5130,0		0,5	45,6	
	110	104,5	3135,0	1	0,5	6270,0	3,14E+06	0,5	45,6	2,86E+08
1a. Rep	140	133,0	3990,0	1	0,5	7980,0	3,99E+06	0,5	45,6	3,64E+08
2a. Rep	152	144,4	4332,0	1	0,5	8664,0	4,33E+06	0,5	45,6	3,95E+08
3a. Rep	180	171,0	5130,0	1	0,5	10260,0	5,13E+06	0,5	45,6	4,68E+08

Tab. A-1.4 - Planilha com resultados do teste número 4

TESTE	4
DIA :	
HORA :	15:00
MATERIAL	Cinza da CGTEE
NÚMERO DE REPETIÇÕES	3
TEMPERATURA AMBIENTE	25,7 °C
UMIDADE AMBIENTE	58,9 %
TEMPERATURA DO TESTE	70 °C
UMIDADE DO TESTE	--- %
ESPESSURA DA C. d=	0,5 cm
ÁREA DO ELETRODO =	45,6 cm ²

	PRIMÁRIO		SECUNDÁRIO							
	O									
Descrição	Voltagem	95 % de	Voltagem	Corrente	Distância	Campo elétrico	Resistência	Espessura	Área	Resistividade
Variável	V	V	V	I	d	$E = V / d$	$R = V / I$	t	A	ρ
Unidade	V (volts)	V (volts)	V (volts)	(mA)	(cm)	(volts / cm)	(volts / A)	(cm)	(cm ²)	$R \times (A / t)$
	(Lido)	(cálculo)								ohm . Cm
	0	0,0	0,0	0	0,5	0,0		0,5	45,6	
	50	47,5	1425,0	0	0,5	2850,0		0,5	45,6	
	70	66,5	1995,0	0	0,5	3990,0		0,5	45,6	
	90	85,5	2565,0	0	0,5	5130,0		0,5	45,6	
	110	104,5	3135,0	1	0,5	6270,0	3,14E+06	0,5	45,6	2,86E+08
1a. Rep	188	178,6	5358,0	1	0,5	10716,0	5,36E+06	0,5	45,6	4,89E+08
2a. Rep	199	189,1	5671,5	1	0,5	11343,0	5,67E+06	0,5	45,6	5,17E+08
3a. Rep	206	195,7	5871,0	1	0,5	11742,0	5,87E+06	0,5	45,6	5,35E+08

Tab. A-1.5 - Planilha com resultados do teste número 5

TESTE :	5
DIA :	9/12/2002
HORA :	16:00
MATERIAL	Cinza da CGTEE
NÚMERO DE REPETIÇÕES	3
TEMPERATURA AMBIENTE	24,9 °C
UMIDADE AMBIENTE	62,6 %
TEMPERATURA DO TESTE	24,9 °C
UMIDADE DO TESTE	62,6 %
ESPESSURA DA C. d=	1 cm
ÁREA DO ELETROD =	45,6 cm ²

Descrição	PRIMÁRIO		SECUNDÁRIO		Distância	Campo elétrico	Resistência	Espessura	Área	Resistividade
	Voltagem	95 % de	Voltagem	Corrente						
Variável	V (fonte)	V	V	I	d	$E = V / d$	$R = V / I$	t	A	ρ
Unidade	V (volts)	V (volts)	V (volts)	(mA)	(cm)	(volts/ cm)	(volts / A)	(cm)	(cm ²)	$R \times (A / t)$
	(Lido)	(cálculo)								ohm . Cm
	0	0	0,0	0	1,0	0,0		1,0	45,6	
Início de	50	47,5	1425,0	0	1,0	1425,0		1,0	45,6	
coleta	70	66,5	1995,0	0	1,0	1995,0		1,0	45,6	
	90	85,5	2565,0	0	1,0	2565,0		1,0	45,6	
	110	104,5	3135,0	1	1,0	3135,0	3,14E+06	1,0	45,6	1,43E+08
	130	123,5	3705,0	1	1,0	3705,0	3,71E+06	1,0	45,6	1,69E+08
	150	142,5	4275,0	1	1,0	4275,0	4,28E+06	1,0	45,6	1,95E+08
1a. Rep	164	155,8	4674,0	1	1,0	4674,0	4,67E+06	1,0	45,6	2,13E+08
2a. Rep	170	161,5	4845,0	1	1,0	4845,0	4,85E+06	1,0	45,6	2,21E+08
3a. Rep	186	176,7	5301,0	1	1,0	5301,0	5,30E+06	1,0	45,6	2,42E+08

Tab. A-1.6 - Planilha com resultados do teste número 6

TESTE :	6
DIA :	
HORA :	13:00
MATERIAL	Cinza da CGTEE
NÚMERO DE REPETIÇÕES	3
TEMPERATURA AMBIENTE	26,5 °C
UMIDADE AMBIENTE	58,9 %
TEMPERATURA DO TESTE	50 °C
UMIDADE DO TESTE	20 %
ESPESSURA DA C. d=	1 cm
ÁREA DO ELETRODO =	45,6 cm ²

	PRIMÁRIO		SECUNDÁRIO							
Descrição	Voltagem	95 % de	Voltagem	Corrente	Distância	Campo elétrico	Resistência	Espessura	Área	Resistividade
Variável	V (fonte)	V	V	I	d	$E = V / d$	$R = V / I$	t	A	ρ
Unidade	V (volts)	V (volts)	V (volts)	(mA)	(cm)	(volts / cm)	(volts / A)	(cm)	(cm ²)	$R \times (A / t)$
	(Lido)	(cálculo)								ohm . Cm
	0	0,0	0,0	0	1,0	0,0		1,0	45,6	
Início de	50	47,5	1425,0	0	1,0	1425,0		1,0	45,6	
coleta	70	66,5	1995,0	0	1,0	1995,0		1,0	45,6	
	90	85,5	2565,0	0	1,0	2565,0		1,0	45,6	
	110	104,5	3135,0	1	1,0	3135,0	3,14E+06	1,0	45,6	1,43E+08
	130	123,5	3705,0	1	1,0	3705,0	3,71E+06	1,0	45,6	1,69E+08
	150	142,5	4275,0	1	1,0	4275,0	4,28E+06	1,0	45,6	1,95E+08
1a. Rep	195	185,3	5557,5	1	1,0	5557,5	5,56E+06	1,0	45,6	2,53E+08
2a. Rep	198	188,1	5643,0	1	1,0	5643,0	5,64E+06	1,0	45,6	2,57E+08
3a. Rep	200	190,0	5700,0	1	1,0	5700,0	5,70E+06	1,0	45,6	2,60E+08

Tab. A-1.7 - Planilha com resultados do teste número 7

TESTE :	7	
DIA :		
HORA :	14:30	
MATERIAL	Cinza da CGTEE	
NÚMERO DE REPETIÇÕES	3	
TEMPERATURA AMBIENTE	26,5	°C
UMIDADE AMBIENTE	58,9	%
TEMPERATURA DO TESTE	70	°C
UMIDADE DO TESTE	---	%
ESPESSURA DA C. d=	1	cm
ÁREA DO ELETROD =	45,6	cm ²

	PRIMÁRIO		SECUNDÁRIO							
Descrição	Voltagem	95 % de	Voltagem	Corrente	Distância	Campo elétrico	Resistência	Espessura	Área	Resistividade
Variável	V (fonte)	V	V	I	d	$E = V / d$	$R = V / I$	t	A	ρ
Unidade	V (volts)	V (volts)	V (volts)	(mA)	(cm)	(volts/ cm)	(volts / A)	(cm)	(cm ²)	$R \times (A / t)$
	(Lido)	(cálculo)								ohm . Cm
	0	0,0	0,0	0	1,0	0,0		1,0	45,6	
Início de	50	47,5	1425,0	0	1,0	1425,0		1,0	45,6	
coleta	70	66,5	1995,0	0	1,0	1995,0		1,0	45,6	
	90	85,5	2565,0	0	1,0	2565,0		1,0	45,6	
	110	104,5	3135,0	1	1,0	3135,0	3,14E+06	1,0	45,6	1,43E+08
	130	123,5	3705,0	1	1,0	3705,0	3,71E+06	1,0	45,6	1,69E+08
	150	142,5	4275,0	1	1,0	4275,0	4,28E+06	1,0	45,6	1,95E+08
1a. Rep	209	198,6	5956,5	1	1,0	5956,5	5,96E+06	1,0	45,6	2,72E+08
2a. Rep	210	199,5	5985,0	1	1,0	5985,0	5,99E+06	1,0	45,6	2,73E+08
3a. Rep	215	204,3	6127,5	1	1,0	6127,5	6,13E+06	1,0	45,6	2,79E+08

Tab. A-1.8 - Planilha com resultados do teste número 8

TESTE :	8	
DIA :	9/12/2002	
HORA :	16:30	
MATERIAL	Carvão da CGTEE	
NÚMERO DE REPETIÇÕES	3	
TEMPERATURA AMBIENTE	25	°C
UMIDADE AMBIENTE	62,1	%
TEMPERATURA DO TESTE	25	°C
UMIDADE DO TESTE	62,1	%
ESPESSURA DA C. d=	0,5	cm
ÁREA DO ELETROD =	45,6	cm ²

	PRIMÁRIO		SECUNDÁRIO							
Descrição	Voltagem	95 % de	Voltagem	Corrente	Distância	Campo elétrico	Resistência	Espessura	Área	Resistividade
Variável	V (fonte)	V	V	I	d	$E = V / d$	$R = V / I$	t	A	ρ
Unidade	V (volts)	V (volts)	V (volts)	(mA)	(cm)	(volts / cm)	(volts / A)	(cm)	(cm ²)	$R \times (A / t)$
	(Lido)	(cálculo)								ohm . Cm
	0	0	0,0	0	0,5	0,0		0,5	45,6	
	50	47,5	1425,0	0	0,5	2850,0		0,5	45,6	
	70	66,5	1995,0	0	0,5	3990,0		0,5	45,6	
	90	85,5	2565,0	0	0,5	5130,0		0,5	45,6	
	110	104,5	3135,0	1	0,5	6270,0	3,14E+06	0,5	45,6	2,86E+08
	130	123,5	3705,0	1	0,5	7410,0	3,71E+06	0,5	45,6	3,38E+08
1a. Rep	150	142,5	4275,0	1	0,5	8550,0	4,28E+06	0,5	45,6	3,90E+08
2a. Rep	170	161,5	4845,0	1	0,5	9690,0	4,85E+06	0,5	45,6	4,42E+08
3a. Rep	170	161,5	4845,0	1	0,5	9690,0	4,85E+06	0,5	45,6	4,42E+08

Tab. A-1.9 - Planilha com resultados do teste número 9

TESTE :	9
DIA :	9/12/2002
HORA :	17:30
MATERIAL	Cinza de biomassa Champion
NÚMERO DE REPETIÇÕES	1
TEMPERATURA AMBIENTE	25,1 °C
UMIDADE AMBIENTE	62,3 %
TEMPERATURA DO TESTE	25,1 °C
UMIDADE DO TESTE	62,1 %
ESPESSURA DA C. d=	0,5 cm
ÁREA DO ELETROD =	45,6 cm ²

	PRIMÁRIO		SECUNDÁRIO							
Descrição	Voltagem	95 % de	Voltagem	Corrente	Distância	Campo elétrico	Resistência	Espessura	Área	Resistividade
Variável	V (fonte)	V	V	I	d	$E = V / d$	$R = V / I$	t	A	ρ
Unidade	V (volts)	V (volts)	V (volts)	(mA)	(cm)	(volts / cm)	(volts / A)	(cm)	(cm ²)	$R \times (A / t)$
	(Lido)	(cálculo)								ohm . Cm
	0	0	0,0	0	0,5	0,0		0,5	45,6	
Início de	22	20,9	627,0	50	0,5	1254,0	12540	0,5	45,6	1,14E+06
coleta	50	47,5	1425,0	125	0,5	2850,0	11400	0,5	45,6	1,04E+06
	70	66,5	1995,0	175	0,5	3990,0	11400	0,5	45,6	1,04E+06
	90	85,5	2565,0	225	0,5	5130,0	11400	0,5	45,6	1,04E+06
	110	104,5	3135,0	275	0,5	6270,0	11400	0,5	45,6	1,04E+06
	130	123,5	3705,0	325	0,5	7410,0	11400	0,5	45,6	1,04E+06
	150	142,5	4275,0	375	0,5	8550,0	11400	0,5	45,6	1,04E+06
	170	161,5	4845,0	425	0,5	9690,0	11400	0,5	45,6	1,04E+06
	190	180,5	5415,0	475	0,5	10830,0	11400	0,5	45,6	1,04E+06
Faísca	200	190	5700,0	500	0,5	11400,0	11400	0,5	45,6	1,04E+06