

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS DE CINZAS EM
CALDEIRAS A CARVÃO PULVERIZADO**

LUÍS FERNANDO CLASEN

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 2007

METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS DE CINZAS EM CALDEIRAS A CARVÃO
PULVERIZADO

LUÍS FERNANDO CLASEN

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROF. EDSON BAZZO, DR.ENG. – ORIENTADOR

PROF. EDUARDO ALBERTO FANCELLO, D.SC. – COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA

PROF. ANTONIO CARLOS R. NOGUEIRA, D.SC.

PRESIDENTE

PROF. CARLOS AUGUSTO S. DE OLIVEIRA, D.SC.

PROF. CELSO P. FERNANDES, DR.ENG.

PROF. EDUARDO G. REIMBRECHT, DR.ENG.

Bondosamente irônica e ironicamente bondosa é a vida.

A Deus.

Aos meus pais.

Aos amores que vêm e aos que vão.

A gente se vê logo mais, Presença.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado na UFSC com apoio financeiro da Capes nas dependências do LabCET e LabTermo.

Agradecimento especial à empresa Tractebel Energia S.A. por permitir o acesso à Usina Termoelétrica Jorge Lacerda em Capivari de Baixo/SC e pelo apoio técnico e financeiro via programa P&D ANEEL concedidos para realização dos trabalhos experimentais.

Por ser um marco em minha vida, tomo a liberdade de estender os agradecimentos a todas as pessoas que a memória permite recordar, sem desmerecer os não aqui recordados, que se fizeram e se fazem importantes na realização deste trabalho e especialmente, na construção dos pensamentos e sentimentos que traçam o caminho que se abre a cada momento.

Ao Professor Edson Bazzo, por seu conhecimento transmitido e orientação, pela confiança depositada no decorrer dos anos de trabalho conjunto, pela paciência e articulação diante de situações propícias à angústia, pelo encaminhamento na minha formação acadêmica e profissional e por seu bom humor e amizade, presente na faculdade ou nos encontros do laboratório, e tudo enquanto elabora um sem fim de tarefas;

Ao Professor Antonio Carlos Ribeiro Nogueira por seu apoio nos inúmeros projetos acadêmicos e embasamento à minha vida profissional, e especialmente pela sua amizade, e ao Doutorando Lourival Jorge Mendes Neto por sua coorientação e auxílio, sua paciência diante da forma divergente como cada um de nós encaminha um projeto, embora ambas dêem certo, e por sua amizade em conversas com risos em meio às divagações;

Ao técnico Nilson Bardini e o engenheiro Luiz Felipe e a todos os operadores da Unidade B da Tractebel Energia S.A. pela constante ajuda e amizade desde o ano de 2003;

Ao técnico Edevaldo do LabTermo por seu trabalho e paciência na construção da sonda, mesmo estando em um período atribulado no laboratório por conta dos experimentos a serem enviados na missão espacial brasileira;

Aos amigos LabCETianos e agregados: Luis (Tocayo), Leonel (*Señor* Leonilo), Rafaela (Rafa), Márcio, Renzo, Luis (Omar), Gisleine (Gi), Kamila, Raquel, Janilson, Alessandro, José (Matelli), Willian (Ibanez), Leandro (Leandrim), Rafael (Catapan), Ricardo, Gabriel e Fernando, que mesmo longe dos olhos, permanecem na memória juntamente com a importância que têm;

Aos *good guys* do *RPG*, Eduardo, Lucas (Berti), Rafael (Elemento), Heitor, Mateus e Marcus, pela amizade ímpar e o desejo que cada um tem de ver o outro de bem com a vida, implícito em cada atitude;

Aos amigos do Centro e PBDE: Ricardo, Cícero (Cicero), Gilson, Raquel, Sandra, Elizandro, Pedro, Dona Nina, Seu Salvador, Rodrigo, Antônio, Caco, Rafael (Paquito), Úrsula, Letícia, Luciana (Lu), Elisa, Eduardo, Laís, Ana (Aninha), Madalena, Heloísa, Débora, Marina, Guisi, Rafaela, Lucas, Hiram e Silvestre e com certeza mais alguns que peço por conta da mente, que igualmente deixaram saudades em Floripa, mas muito me ajudaram a ver um lado mais espiritualizado da vida, e em passos modestos, evoluir;

Para os amigos do novo mundo que descobri: Leandro (Japa), Elizeu, Fabrizio (Bob Lelli), Michel, Lucy, Juliane (Tica), Jefferson (Bansho), Márcio, Hugo, Maurício (Banha), Eduardo (Palhano), Luís (Little), Luís (Turco), Eduardo (Cantieri), Eduardo (Cardoso) e José (Véio Dutra), representando a sensação de bem-vindo à etapa de vida que se desdobra;

Aos amigos sem designação e tempo: Leandro, Fernanda (Fê), Fernanda (Nanda), Marcos (Jesus), Marcus (Estreito), Tales e Henrique que estão lá e em outro momento desaparecem por tempos e quando retornam, estão tão familiares quanto sempre foram e mais aprazíveis com as novas bagagens que trazem, tornando-os seres humanos melhores a cada instante;

À Laana, mais próxima de mim do que percebo, capaz de sublimar as inúmeras lágrimas que me presenteei, com a visão mais ampla da vida do que seja possível conceber neste momento que estamos, e por isto, mais esperta e capaz de auxiliar. Seria bom ao menos lembrar do seu rosto, mas ao enquanto sua presença invisível me supre o suficiente para me sentir único nesse mundo. Peço que leve meus agradecimentos a todos que estão juntos, mas que por vezes desconheço;

Finalmente, à minha família, modesta em quantidade, infinita em amor. Às amadas: Tia Daisy, mãe de todos, com seu jeito contido, porém repleto de sentimentos, enquanto simula comigo uma discussão sobre quem é o menos provido de bom senso; Tia Susi, a tranquilidade nas pequenas e na maioria das grandes coisas da vida, amor com extremo carinho, difícil imaginá-la atuando em algo que não fosse o cuidado com outro ser; Tia Lú, a voz mais alta e o colorido mais vivo, parte menina num corpo de mulher, e talvez por isso, tão cândida e por vezes difícil de lidar, com seu jeito expressivo ao mostrar o quanto adora os seus; Tia Sandra, major firme mas de sorriso e atitudes meigas para com os seus, especialmente ao abrigar aqueles que começam uma nova vida. Meus amados: Vó Laura, onde a explicação para me amar tanto não reside nesse mundo, sofrendo pelas dores daqueles que bem quer e tão adorada

por ser quem é; Vô Aldo, exemplo de serenidade, de integridade, dos passeios do colégio para casa e da infinita capacidade de estar em paz, embora envolto no momento pelo esquecimento que leva um pedacinho dele a cada momento para longe de nós. Meus irmãos que a vida emprestou: Rodolfo, tão diferente de mim, mais ao mesmo tempo fácil de entendermo-nos por conta do amor que nos move; Eduardo, a outra face de irmão, semelhante em gostos e atitudes, mas único na família no seu pensar, alvo de igual sentimento; e João Gustavo, caçula, ainda sem traços a serem descritos, mas desejado por todos mesmo antes de sua chegada. Meus três vínculos egoístas, minhas conexões com meu passado quando apenas nos quatro restarmos. A meu Tio Rubens, com seu bom humor e participação em assuntos que vão de entretenimento a reparos domésticos na família, e meu Tio Zam, Presença, que se foi antes de ver com olhos de carne a minha nova vida, de poder passear pela sua cidade natal enquanto se hospeda em minha casa, deixando saudades e o desejo de que esteja bem;

Meu pai, Emir, ser ímpar na sua forma de agir e amar, que talvez não imagine o quanto é amado, o quanto faz falta sua presença e o quanto ele está em meu mundo. Com todos os *flashes* da nossa vivência até o momento presente, percebo o acaso divino sorrindo por ter-nos feito pai e filho;

E finalmente, minha mãe, Rita, tão amada, personificação máxima da maternidade, presente em mais momentos do que a mente pode recordar, representação intensa de amor, a qual faria a mais extensa das narrativas sobre sentimentos imprimir apenas um sussurro do todo;

A todos vocês, novamente, muito obrigado.

ÍNDICE

Agradecimentos	v
Índice.....	viii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Simbologia.....	xiii
Resumo.....	xv
Abstract	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Termoelétricas no Brasil.....	2
2.2. Deposição de Cinzas em Caldeiras	5
2.3. Teoria dos Fractais	9
2.4. Microscopia Eletrônica e Difratomia de Raios-X.....	13
3. CINZAS E DEPOSIÇÃO.....	15
3.1. Mecanismos de Formação das Cinzas.....	15
3.2. Mecanismos de Deposição de Cinzas.....	16
3.2.1. Impacto Inercial.....	17
3.2.2. Termoforesi	18
3.2.3. Condensação.....	18
3.2.4. Reações Químicas.....	19
3.2.5. Impacto de Vórtices.....	19
3.3. Formação do Depósito de Cinzas.....	20
4. FUNDAMENTOS DA DIMENSÃO FRACTAL	22
4.1. Dimensão	22
4.2. Dimensão Topológica.....	22
4.3. Dimensão de Hausdorff-Besicovitch.....	23
4.4. Dimensão Fractal.....	24
5. PROCEDIMENTO DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA CONSTRUÇÃO DA METODOLOGIA.....	29
5.1. Coleta de Dados	34
5.2. Coleta de Amostras.....	35

5.3.	Preparação para Análise Mineralógica.....	36
5.4.	Preparação para Análise Estrutural	37
5.5.	Análise Mineralógica.....	38
5.6.	Análise Estrutural.....	38
6.	RESULTADOS OU AVALIAÇÕES PARA METODOLOGIA.....	43
6.1.	Resultado da Análise dos Dados Operacionais.....	43
6.2.	Resultado da Análise Mineralógica.....	44
6.3.	Resultados da Análise Estrutural.....	46
6.3.1.	Análise da Porosidade.....	47
6.3.2.	Análise da Distribuição de Poros.....	48
6.3.3.	Análise da Dimensão Fractal.....	49
7.	CONCLUSÃO	51
8.	BIBLIOGRAFIA	52

Lista de Figuras

Figura 1. Relação de capacidade de geração hidroelétrica e termoelétrica no Brasil (ANEEL, 2002).	3
Figura 2. Esquema de uma planta termoelétrica.....	4
Figura 3. Participação de fontes energéticas na geração de eletricidade no Brasil (ANEEL, 2008).	5
Figura 4. Imagem de um tubo de trocador de calor com destaque em um depósito de cinzas ..	6
Figura 5. Pentágono de (a) Dürer e (b) Sierpinsk.....	9
Figura 6. Primeiras três iterações do floco de neve de Koch	10
Figura 7. <i>Brassica oleracea</i> , do grupo <i>Botrytis</i> , uma estrutura natural semelhante ao fractal.	11
Figura 8. Ilustração esquemática das partes do mecanismo de formação das cinzas durante a combustão. Adaptado de Kær (2001) e Seames (2003).....	16
Figura 9. Mecanismos de deposição sobre a superfície de um trocador de calor. Adaptado de Kær (2001).	17
Figura 10. Vista lateral do trocador de calor com representação do ângulo de deposição em relação ao escoamento dos gases de combustão com particulados.	18
Figura 11. Desenvolvimento do depósito de cinzas. Adaptado de Rushdi <i>et al</i> (2004).	20
Figura 12. Conjunto fractal de Mandelbrot (esquerda), um fractal determinístico e uma rede neural (direita), um fractal estatístico.	26
Figura 13. Redimensionamento de escala (a) isotrópico e (b) anisotrópico.	26
Figura 14. As 3 primeiras iterações da curva de Koch.	27
Figura 15. Organização dos procedimentos de aquisição e caracterização.	29
Figura 16. Representação esquemática da sonda.....	30
Figura 17. Representação esquemática do tubo de Pitot simplificado.....	30
Figura 18. Representação esquemática do sistema de medição de vazão mássica.....	32
Figura 19. Sonda inserida no local de coleta.....	33
Figura 20. Localização do ponto de coleta na caldeira da Unidade 6.	34
Figura 21. Algoritmo de coleta de amostras de depósitos de cinzas para caracterização da formação do depósito de cinzas.....	36
Figura 22. Superfície de uma amostra de depósito embutida e lixada.....	37
Figura 23. Exemplo de um difratograma de raios-X.	38
Figura 24. Imagem do depósito de cinzas obtido pelo MEV.	39
Figura 25. Imagem da Figura 24 binarizada no programa Imago®	40
Figura 26. Função covariograma da Figura 25.....	41

Figura 27. Função $\ln(C(u)) \times \ln(\text{dispersão})$	42
Figura 28. Depósito coletado após 1 hora.	44
Figura 29. Difratoograma de raios-X de uma amostra de 1 hora.	45
Figura 30. Características adversas da imagem da Figura 24.	46
Figura 31. Comparativo da porosidade das amostras ao longo do seu desenvolvimento.....	47
Figura 32. Comparativo da distribuição de poros das amostras ao longo do seu desenvolvimento.	48
Figura 33. Dimensão fractal dos depósitos ao longo do seu desenvolvimento.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Temperaturas aferidas na sonda.	43
--	----

SIMBOLOGIA

$B_r(x)$	bola de raio r centrada no ponto x .
$C(u)$	função covariograma do espaço poroso.
D_f	dimensão de massa, dimensão fractal.
E	designação de um objeto.
L	comprimento de uma curva.
M	medida de um comprimento, uma superfície ou um volume.
$M(r)$	massa contida em uma bola de raio r .
N	número de células necessárias para preencher o objeto.
d	dimensão do objeto.
$\dim(E)$	dimensão de Hausdorff-Besicovitch.
$m^\alpha(E)$	α -medição de recobrimento.
r	raio.
u	vetor deslocamento com norma u .
x	coordenada de um ponto, $[m]$.

SÍMBOLOS GREGOS

α	invariante em transformação de escala.
ε	comprimento característico de uma escala, podendo compreender uma linha, um quadrado ou um cubo.
μ	unidade genérica de medida.

ÍNDICES SUBSCRITOS

i	i -ésima esfera de recobrimento.
-----	------------------------------------

SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CFD	(Inglês) Dinâmica dos Fluidos Computacional
IEA	(Inglês) Agência Internacional de Energia

LCM	Laboratório de Caracterização Microestrutural
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PIB	Produto Interno Bruto
PPT	Programa Prioritário de Termelétricidade

RESUMO

Centrais termoelétricas se apresentam no cenário brasileiro com o importante papel de complementar ou garantir disponibilidade de energia elétrica em períodos de estiagem. A geração termoelétrica representa hoje cerca de 20 % da energia elétrica gerada no Brasil e a operação ininterrupta dessas unidades deve ser assegurada pela redução das indisponibilidades, sejam elas programadas ou não. Nas termoelétricas a carvão pulverizado, a formação de depósitos de cinzas é uma das causas principais a provocar paralisações, por predispor os tubos das unidades geradoras de vapor a mecanismos que os fragilizam ou reduzindo o desempenho da unidade. Nesse sentido, diversos trabalhos têm sido realizados para avaliar a real consequência do depósito de cinza, porém pouco ainda se sabe sobre os estágios iniciais da formação do depósito. Neste trabalho uma metodologia para caracterização do processo de formação do depósito de cinzas em seus estágios iniciais é proposta com a expectativa de relacionar subsídios importantes para o desenvolvimento de trabalhos futuros na área, uma vez que esta é uma abordagem diferenciada. A metodologia baseia-se na caracterização mineralógica e estrutural através de técnicas conhecidas no meio acadêmico-científico. A análise mineralógica é feita por difratometria de raios-X no difratômetro do Laboratório de Caracterização Microestrutural (LCM) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, permitindo conhecer, qualitativamente, as fases existentes em cada etapa de formação do depósito. Por sua vez, a análise estrutural é realizada a partir das imagens extraídas da microestrutura do depósito pelo MEV, sendo estas trabalhadas no programa Imago[®] para obtenção da porosidade, distribuição de tamanho de poros e covariograma das amostras. Com o covariograma, é possível obter a dimensão fractal, caracterizando-se assim a amostra em mais um parâmetro. A dimensão fractal é apresentada em diferentes áreas, como uma alternativa para mensurar uma geometria complexa ou comportamentos aleatórios. Os resultados finais indicam uma linha a ser seguida em futuros trabalhos experimentais sobre análise de depósitos de cinzas.

Palavras-chave: Deposição de cinzas, Difratometria de raios-X, Dimensão fractal.

ABSTRACT

Thermal power plants take a important part in the Brazilian scenario of availability of electrical energy in drought periods. The thermal power plant generation represents today about 20 % of the generate electrical energy in Brazil. The uninterrupted operation of theses units should be maintained by non-availability reduction, been them programmed or not. On pulverized coal thermoelectric, the ashes deposit formation is one of main causes for units stops, by fragilizing the tubular beams or even by affecting the performance of steam generator units. So, many works were been realized to evaluate the real consequence of ash deposition, but little is know of initial stages of deposit formation. In this work a methodology to characterization of formation process of ashes deposit in its initial stage is propose with the expectative to obtain important data subsidies to development of future works, been this a differentiated approach. The methodology is based on mineralogical and structural characterization by technicians knowing on academics-scientific circle. The mineralogical analysis is made by X-ray diffraction in diffractometer of Microestrutural Characterization Laboratory (LCM) from UFSC, allowing to know, qualitatively, the existing phases in each deposit formation level. The structural analysis is realized with images of microstructure of deposit extracted by electronic microscope, that are processed in Imago[®] software to obtain the porosity, porous distribution and covariogram. With the covariogram of microstructure, it is possible obtain the fractal dimension, characterizing the sample in another parameter. The fractal dimension has shown in different areas as an alternative to measure a complex geometry or a random behavior. The final results indicate a method to follow on future experimental works about deposition analysis.

Key words: Ashes deposition, X-ray diffraction, Fractal dimension.

1. INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia no Brasil está acoplado a um cenário de crescimento no setor industrial, refletindo em impulso para a economia, porém descortinando problemas associados à insuficiência do sistema energético e à falta de ações no passado que previssem a tendência do consumo. Dentro deste quadro, o governo criou planos de incentivo à geração termoelétrica no período da crise energética, visando diminuir a carga sobre as hidrelétricas.

Crises energéticas ocorreram ao longo dos anos, indicando a necessidade de investimentos na construção de plantas de geração e sistemas de distribuição, como também da plena funcionalidade dos sistemas em operação.

Com este foco aplicado às plantas termoelétricas, evidencia-se que a principal causa de não-funcionalidade está vinculada à formação de depósitos de cinzas nos trocadores de calor existentes no interior da caldeira. Estudos sistemáticos sobre vários aspectos dos depósitos de cinzas são realizados com o intuito de minimizar sua formação ou efeitos

Dentro deste nicho de estudos há o déficit de conhecimento acerca da caracterização das etapas iniciais de formação do depósito de cinzas, indicando a necessidade do desenvolvimento de uma metodologia embasada em técnicas difundidas no meio acadêmico-científico para suprir este déficit.

Sendo definida a necessidade, este trabalho tem o objetivo de desenvolver a metodologia citada, utilizando análises mineralógicas e estruturais que caracterizem amostras coletas do interior da caldeira, formadas sobre uma superfície padrão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, é abordada a revisão bibliográfica sobre termoeletricas no Brasil, deposição de cinzas, fractais e análises por microscopia eletrônica e raios-X, tópicos motrizes deste trabalho.

2.1. TERMOELÉTRICAS NO BRASIL

A energia elétrica foi disponibilizada ao público brasileiro no final do século XIX, apresentando naquele momento, uma capacidade de geração de 25 kW baseada em uma única usina termoeletrica. Após mais de um século, o Brasil apresenta a capacidade de geração energética da ordem de mais de 109.000 MW de potência instalada, com a previsão de aumento da capacidade em 31.670 MW nos próximos anos, entre sistemas em construção e projetos outorgados (ANEEL, 2008). Com a contínua ascensão industrial, o desenvolvimento do setor energético em porte e tecnologia fez-se obrigatório ao longo dos anos, porém com falhas na geração de energia causadas por investimentos tardios e pela inexistência de planejamento em períodos anteriores à década de 80, acarretando em crises esporádicas ao longo dos anos.

Atendendo as necessidades de planejamento, em 2000 o governo lança o Programa Prioritário de Termoeletricidade, ou PPT, como resposta ao baixo índice pluviométrico nos dois anos anteriores e ao aumento do consumo de energia ocorrido após o Plano Real. O objetivo era reduzir a dependência nas condições hidrológicas e a vulnerabilidade do sistema que apresentava 90% do total baseado em hidroeletricidade, por meio do incentivo à construção de termoeletricas, apresentando desta forma um aumento considerável na participação do quadro gerador. Na Figura 1, tomando por base a energia gerada por termoeletricas e hidroeletricas em 1975, verifica-se que a partir de 2000 a energia termoeletrica apresentou um aumento na sua capacidade de geração em comparação à geração hidroeletrica, indicando os efeitos do PPT. Tal medida contribuiu para que a crise energética de 2001 não apresentasse danos mais extensos.

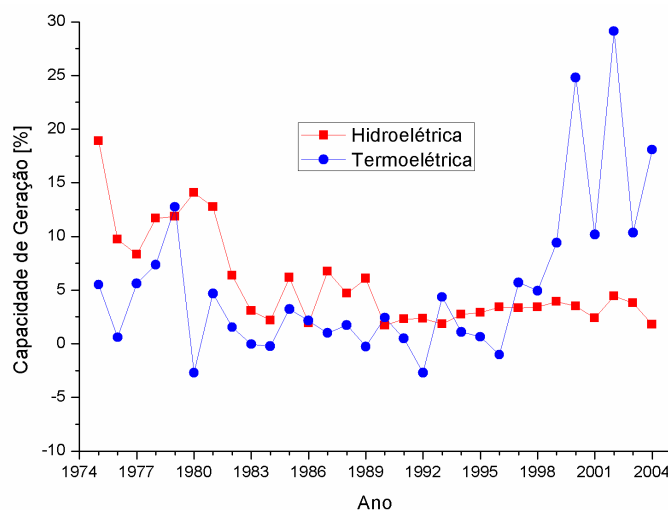


Figura 1. Relação de capacidade de geração hidroelétrica e termoelétrica no Brasil (ANEEL, 2002).

Porém, a partir de 2003, o PPT começou a ser desativado por desinteresse dos agentes de mercado, uma vez que os investidores não encontraram vantagens em construir usinas sem saber o custo do combustível e a existência de clientes para a energia produzida. Apesar das especulações de futuras crises e um crescimento constante do PIB (iPIB, 2006), indicando um aumento do consumo de energia, dados atuais demonstram que o país apresenta saldo positivo na capacidade de geração de energia, embora extremamente dependente de condições climáticas, devido à base em hidroelétricas, fazendo com que as termoelétricas atuem como *back up* do sistema em caso de condições desfavoráveis (Castro e Cavaliere, 2007).

Assim, mesmo com a desmotivação dos investidores, as termoelétricas demonstraram sua consolidação no papel de apoio ao quadro gerador nacional com uma imagem renovada perante a população, uma vez que passaram a atender as metas ambientais estabelecidas pela IEA (ANEEL, 2002).

A necessidade de redução de custos na construção de unidades geradoras diante do esgotamento das fontes de energia hidroelétrica próximas dos grandes centros contribuiu para o crescimento do setor termoelétrico brasileiro, juntamente com a implantação de uma intensa política de redução de custos e de paradas para fins de manutenção. Tal política motivou diretamente os estudos sobre aspectos da queima dos combustíveis e a otimização de componentes das unidades geradoras de vapor, particularizando no estado de Santa Catarina, estudos em usinas termoelétricas a carvão mineral, como a Usina Termoelétrica Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo, responsável por 86% do potencial termoelétrico do estado.

As usinas termoeletricas, em síntese, são unidades que convertem a energia de um combustível em energia elétrica através da queima deste combustível no interior de uma caldeira. O calor aquece a água que passa através dos tubos que constituem o corpo desta caldeira, produzindo vapor que será direcionado a uma turbina integrada ao eixo de um gerador, fazendo com que este entre em rotação, gerando eletricidade. Na Figura 2 pode-se observar o esquema de uma planta termoeletrica com seus principais componentes.

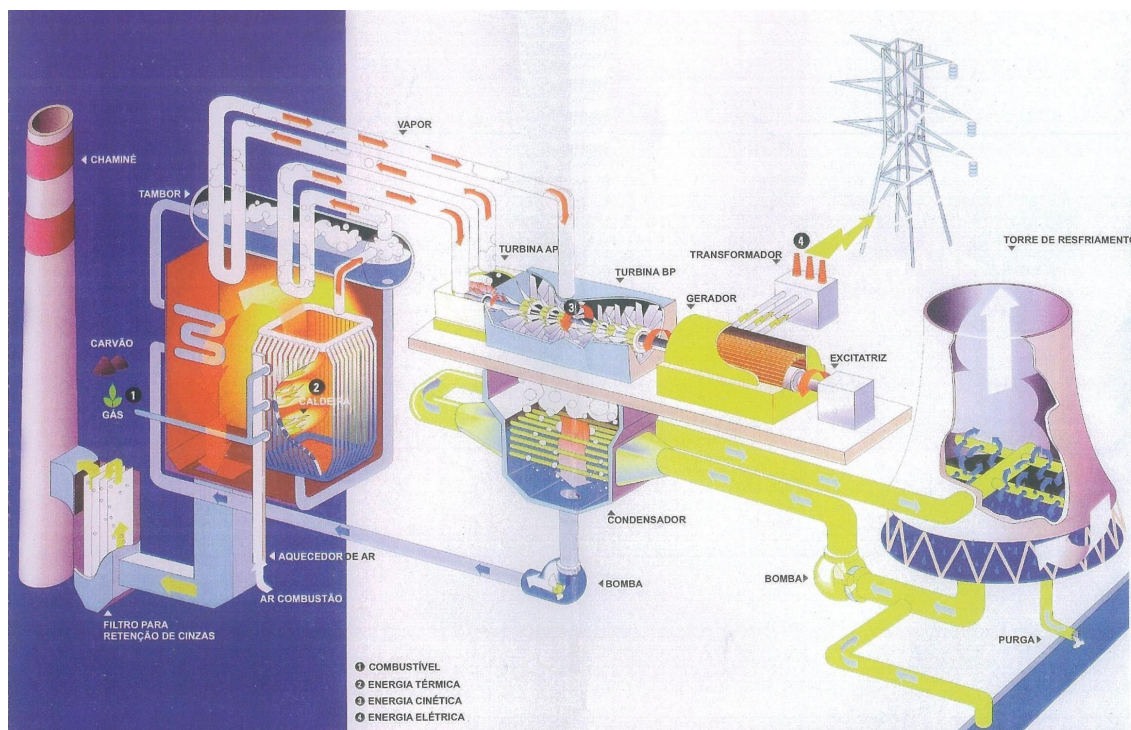


Figura 2. Esquema de uma planta termoeletrica.

O carvão mineral utilizado nas usinas de Capivari de Baixo é uma complexa e variada mistura de componentes orgânicos sólidos fossilizados ao longo de milhões de anos, sendo o combustível fóssil mais abundante do planeta, com reservas estimadas em 1 trilhão de toneladas (ANEEL, 2002). No Brasil, a geração termoeletrica a partir da queima do carvão mineral corresponde a 1,33% da geração nacional, como indicado na Figura 3, traduzindo-se na geração 1.455 MW (ANEEL, 2008).

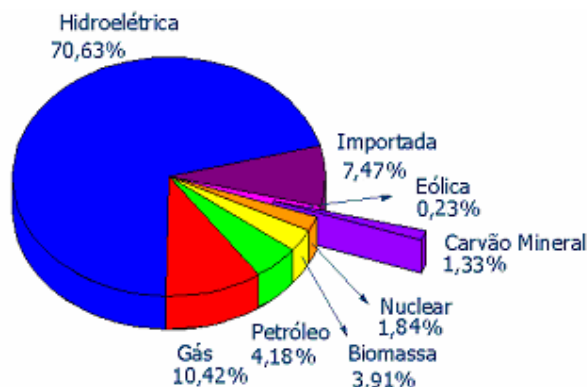


Figura 3. Participação de fontes energéticas na geração de eletricidade no Brasil (ANEEL, 2008).

Analisando a participação do carvão, observa-se que apesar de relativamente pequena sua contribuição ao quadro gerador, este representa um combustível abundante na região Sul, com uma produção anual média de 6 milhões de toneladas voltadas para o setor energético (SIECESC, 2008).

2.2. DEPOSIÇÃO DE CINZAS EM CALDEIRAS

A eficiência das caldeiras termoelétricas está diretamente relacionada com o tipo de carvão mineral utilizado, seja devido ao seu poder calorífico, seja devido à quantidade de impurezas existente nele. O carvão extraído no sul é caracterizado pelo alto teor de cinzas, o qual acelera a formação de depósitos sobre os componentes existentes no interior da fornalha da caldeira termoelétrica. Estes depósitos, como o da Figura 4, de acordo com Konstandopoulos (2000), têm conseqüências indesejáveis em pontos como: a redução da transferência de calor dos gases de combustão para o vapor passante no interior dos tubos devido à natureza isolante dos depósitos, a queda de pressão do vapor, conseqüência da redução da temperatura no interior dos tubos, a interferência aerodinâmica devido ao bloqueio da passagem do escoamento, e o aumento da disposição a efeitos de deterioração devido à retenção de agentes corrosivos e vapores condensáveis. Todos estes efeitos se traduzem na queda da eficiência da planta, aumento dos custos de operação e manutenção e redução na disponibilidade da unidade.

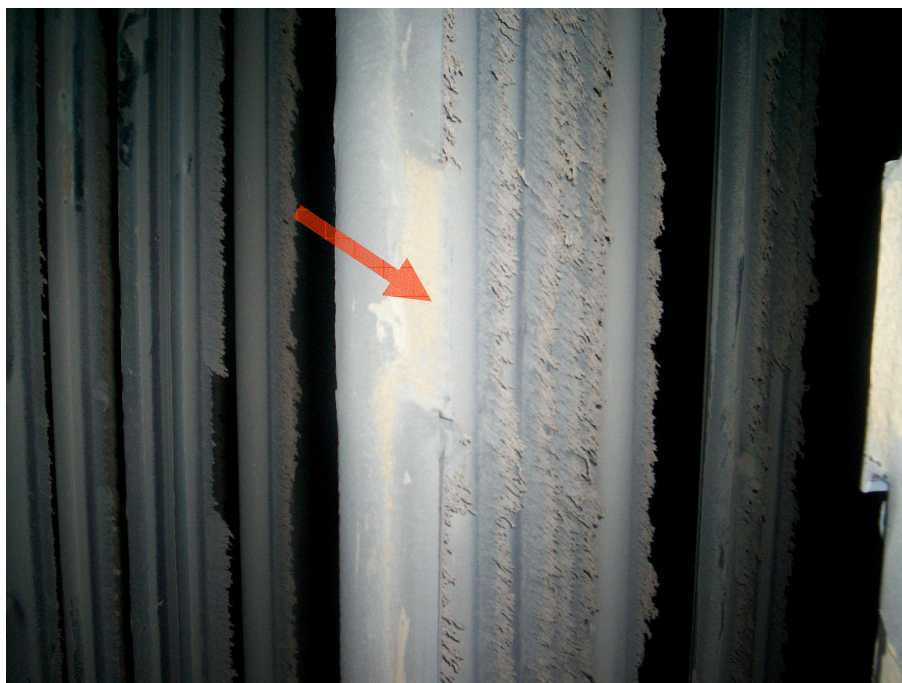


Figura 4. Imagem de um tubo de trocador de calor com destaque em um depósito de cinzas

Tais conseqüências motivam pesquisas neste âmbito, visando o entendimento dos mecanismos de formação e a natureza destes depósitos. Nestas pesquisas, a área de simulação numérica apresentou fortes contribuições.

Huang *et al* (1996) desenvolveram um modelo numérico para descrever o processo de deposição de partículas de cinzas com a composição elementar pré-determinada, considerando efeitos de termoforesi e impactação inercial, prevendo assim a deposição nos tubos do superaquecedor com relativa precisão quando comparado com dados experimentais de temperatura nos depósitos. Por sua vez, Baxter (1998) centrou seu trabalho na construção de algoritmos que avaliam os efeitos da variação da emissividade e porosidade dos depósitos de forma a poder aplicar os resultados em variados tipos de combustíveis sólidos.

Simulações prevendo o tamanho e a composição dos depósitos embasadas em um mecanismo de deposição de partículas e de vapor condensável foram realizadas por Tomczek *et al* (2004), sendo executada posteriormente a validação dos resultados através do monitoramento do crescimento do depósito nos tubos dos trocadores de calor durante nove meses, sugerindo que o superaquecedor é a região que apresenta a maior taxa de deposição dentre os componentes. A verificação dos depósitos nos tubos do superaquecedor indica que são formados por partículas sólidas que se chocam na superfície previamente coberta com uma camada adesiva de metais alcalinos condensados. Observou-se que nos primeiros três meses o depósito apresenta o maior índice de crescimento, atingindo espessuras de até 25

mm, sendo que nos seis meses subseqüentes, apenas um crescimento de poucos milímetros foi verificado, atingindo ao fim de nove meses, a espessura máxima de 30 mm. Na câmara de combustão, os maiores depósitos são encontrados ao redor dos queimadores devido a grande quantidade de partículas colidindo nesta região. Em caldeiras de carvão pulverizado há duas regiões de intensa formação de depósitos, uma região de escória¹ na câmara de combustão e uma região de incrustação² nos supraquecedores.

Sistemas de predição baseados em dados de microscopia eletrônica de varredura de cinzas leves e CFD foram desenvolvidos por Lockwood e Lee (1999) para estudar a propensão de escória do carvão e entender o aspecto fundamental deste mecanismo em sistemas de combustão de carvão pulverizado. O estudo demonstrou que há uma deposição preferencial do ferro em comparação aos silicatos e alumínio durante os estágios iniciais de deposição de cinzas, assim como partículas maiores de cinzas leves tendem a ter maior aderência às paredes da caldeira que as partículas menores.

Gupta *et al* (2005) também desenvolveram uma metodologia para deposição de cinzas auxiliada por simulações computacionais após analisarem os componentes químicos e os tamanhos das partículas de cinzas de carvão betuminoso retiradas de uma caldeira em escala laboratorial, estimando assim a taxa de deposição e a capacidade de retenção das partículas, avaliando a tendência de deposição das cinzas, prevendo assim o comportamento dessa deposição.

Finalizando a linha de predição por recursos CFD, Konstandopoulos e Kostoglou (2000) apresentaram uma análise do crescimento de depósitos a partir de simulações discretas das partículas. Estas análises mostraram o quão dependentes são a taxa de adesão das partículas e a microestrutura do depósito, da velocidade de impacto e ângulo de incidência.

Na linha de trabalhos sobre depósitos que não utilizam CFD, Baxter *et al* (1998) motivados pela constante necessidade de geração de dados que validem estudos na área de simulação computacional, conduziram testes com queima de biomassa em usinas e laboratório. As análises obtidas referenciavam a natureza e a ocorrência de depósitos de cinzas.

Estudos sobre as temperaturas de fusão das cinzas e as transformações das partículas de cinzas para escória foram realizados por Gupta *et al* (1998). Estas análises foram realizadas por meio de microscopia de varredura eletrônica, a qual permitiu identificar as mudanças

¹ Escória é definida como os depósitos fundidos ou sinterizados sobre superfícies de trocadores de calor ou refratários no interior da caldeira, predominando a troca de calor por radiação. A natureza, grau e composição destes depósitos variam ao longo da caldeira em função da temperatura de superfície, temperatura da chama, taxas de absorção, direção do escoamento dos gases e composição do combustível (Bryers, 1996).

² Incrustação é a deposição de cinzas em uma parte onde a troca de calor é convectiva e não radiante, e os gases passantes apresentam em geral temperaturas abaixo do ponto de fusão das cinzas. São de constituição mais frágil que os depósitos formados por escória (Bryers, 1996).

químicas e físicas. De posse dos dados da composição química, porosidade, viscosidade e níveis de retração da amostra, foi construída uma hipótese relacionando a tendência de deposição com a temperatura de fusão das cinzas.

Lógica semelhante está contida nos trabalhos de Konstandopoulos *et al* (1995) ao apresentaram um estudo do crescimento dinâmico de depósitos num cilindro inserido num escoamento de gases de combustão de carvão pulverizado, analisando a microestrutura do depósito através da sua distribuição de porosidade.

Estudos sobre as transformações da matéria mineral durante a combustão do carvão pulverizado com microscopia eletrônica através de amostras coletadas no decorrer da combustão foram conduzidos por Yamashita (2000), gerando ao fim uma metodologia para prever a distribuição do tamanho das cinzas leves e a composição química no decorrer da queima da amostra.

Yan *et al* (2001) através de modelos de formação expõem a existência de alterações no desempenho térmico de um trocador de calor devido à coalescência de minerais como quartzo e K-Al-silicatos, por auxiliarem na deposição das cinzas. Agregando a este trabalho, Wall *et al* (1995), concluíram que a absorvidade radiativa e a condutividade térmica do depósito são dependentes dos processos pelos quais estes são formados. Também neste foco, Konstandopoulos (2000) mostrou que parâmetros como a velocidade de impacto, ângulo de incidência da partícula sobre o depósito e grau de aderência da partícula estão entre os parâmetros mais relevantes numa análise de formação de depósitos de cinzas quando não se é considerada a temperatura.

Em continuidade, Rushdi *et al* (2004), utilizando uma caldeira de escala laboratorial, conduziram experimentos de deposição de cinzas provenientes da queima de carvões e suas misturas, sendo conhecida as características constituintes deles. O estudo indicou diferenças inesperadas para as misturas ao serem avaliadas suas cinzas pela viscosidade e comportamento termodinâmico.

Também em uma caldeira em escala laboratorial, Su *et al* (2003) realizaram estudos experimentais sobre a propensão da formação de incrustação em tubos de trocadores de calor, indicando que a composição do carvão influencia na formação dos depósitos.

Semelhante ao trabalho proposto nesta dissertação, Fontes (2004) utilizou uma sonda refrigerada simultaneamente por ar e água em uma caldeira laboratorial para execução da parte experimental de sua tese, a qual tinha o objetivo de avaliar a taxa de deposição de cinzas. Também, Naruse *et al* (2005) inseriram uma sonda refrigerada à água em uma caldeira onde foram queimados três tipos de carvão com diferentes temperaturas de fusão e

composição de cinzas sob a forma pulverizada em condições de altas temperaturas para estudar o tipo de depósito obtido em cada condição.

2.3. TEORIA DOS FRACTAIS

Fractal é um objeto geométrico não-Euclidiano que pode subdividir-se teoricamente, em infinitas partes similares à imagem original.

O termo fractal, derivado do latim *fractus*, que significa fração ou quebrado, foi cunhado em 1975 por Benoît Mandelbrot, sendo que anteriormente, o termo *curvas monstro* era utilizado para definir estruturas fractais.

Anteriormente a Mandelbrot, estruturas fractais eram estudadas primeiramente pela sua estética, como exposto no trabalho do artista alemão Albrecht Dürer na publicação da sua obra *The Painter's Manual* no século XVI (Jones, 1990), que trata os passos da construção da estrutura fractal conhecida como pentágono de Dürer, semelhante à estrutura do pentágono de Sierpinski, vistos na Figura 5.

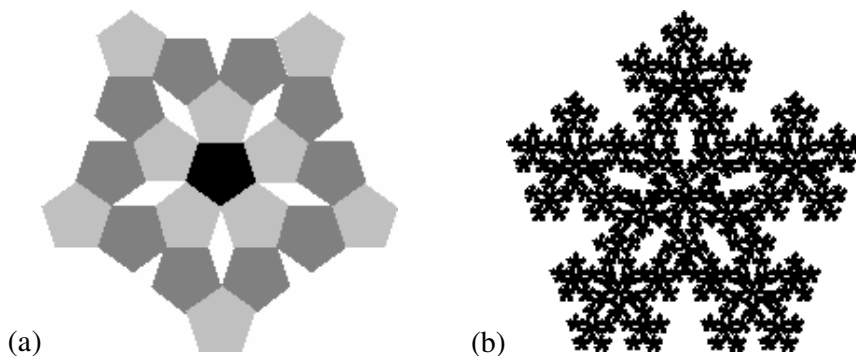


Figura 5. Pentágono de (a) Dürer e (b) Sierpinski.

Definições sobre a natureza dos fractais foram dadas inicialmente pelo filósofo alemão Gottfried Wilhelm von Leibniz ao inserir noções de auto-similaridade e o princípio da continuidade.

A partir do final do século XIX, os estudos matemáticos para reconhecer as bases da estrutura fractal intensificaram-se. Em 1872, o matemático alemão Karl Theodor Wilhelm Weierstrass encontra o exemplo de uma função com uma propriedade não-intuitiva que era contínua em todo domínio, mas não-diferenciável em parte alguma da sua extensão (Deering e West, 1992). Três décadas após, em 1906, o matemático sueco Niels Fabian Helge von Koch, em aprimoramento à definição abstrata e de construção analítica pouco exemplificativa

de Weierstrass (O'Connor e Robertson, 2000), apresenta uma definição com fundamentação geométrica à uma função similar ao final do seu trabalho *Une méthode géométrique élémentaire pour l'étude de certaines questions de la théorie des courbes plane*, a qual é posteriormente denominada de curva de Koch, sendo que, quando aplicado seu princípio a triângulos, forma a geometria conhecida como floco de neve de Koch, exemplificada na Figura 6.

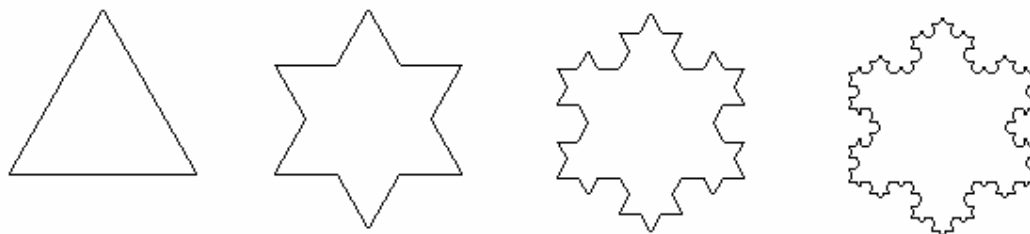


Figura 6. Primeiras três iterações do floco de neve de Koch

A idéia de curvas auto-similares foi usada posteriormente por Paul Pierre Lévy em seu artigo de 1938, *Plane or Space Curves and Surfaces Consisting of Parts Similar to the Whole*, descrevendo pela primeira vez as propriedades de auto-similaridade, bem como expondo uma construção geométrica, representando a curva atualmente conhecida como curva C de Lévy. Outros matemáticos, como Henri Poincaré, Felix Klein, Pierre Fatou e Gaston Julia realizaram estudos sobre o comportamento fractal, culminando com os estudos sobre auto-similaridade de Benoît Mandelbrot apresentados em artigos no decorrer da década de 60, entre eles o *How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension*, baseando o título e a abordagem de seu artigo na pesquisa do matemático inglês Lewis Fry Richardson, que investigou como o comprimento das fronteiras de um país ao serem mensuradas, muda quando a unidade de medida é trocada, concluindo que a redução da escala de medição dos limites provoca o aumento do comprimento total.

Na atualidade, exposições gráficas computacionais demonstram a magnitude da natureza fractal, possibilitando uma análise pormenorizada do comportamento matemático das equações que o regem.

Assim, Mandelbrot e seus predecessores no estudo de estruturas fractais contribuíram para a descrição matemática e análise de tais formas, encontradas inclusive na natureza — exemplo na Figura 7 —, que por sua vez eram laboriosas ou irrealizáveis através da geometria Euclidiana.



Figura 7. *Brassica oleracea*, do grupo *Botrytis*, uma estrutura natural semelhante ao fractal.

A compreensão da natureza fractal e sua expansão para elementos existentes no dia-a-dia impulsionaram a realização de estudos relacionados ao seu crescimento, capacitando a previsão do comportamento de inúmeros sistemas anteriormente incapazes de serem quantificados por outra metodologia que apresentasse um comportamento paralelo à geometria Euclidiana ou que não seguisse padrões exclusivamente estatísticos. A quantificação e conseqüente previsão do crescimento de elementos fractais ou que apresentem algum comportamento fractal são aplicadas em diversas áreas.

Estudos embasados na natureza fractal foram usados por Kampichler (1999) para caracterizar o desenvolvimento da microfauna do solo formada por invertebrados e nematóides. Sendo seu trabalho uns dos primeiros com esta abordagem na sua área, restringiu-se à análise de lâminas de amostras bidimensionais do solo, dando um incentivo para pesquisas subseqüentes ao conseguir quantificar o comportamento dos animais em suas amostras.

A medicina seguiu caminho semelhante ao utilizar o comparativo de fractais no estudo comportamental de elementos da fisiologia humana. Estudos relacionados a tumores de mama (Mavroforakis *et al*, 2006) utilizaram fractais para criar padrões que analisassem a textura de massas observadas em mamografias para identificação da existência ou não de tumores e sua gravidade. Semelhantes estudos foram realizados para diagnóstico do Mal de Alzheimer através da análise fractal aplicada a eletroencefalogramas (Woyshville e Calabrese, 1994), que embora apresentassem um comportamento padrão em pacientes diagnosticados com o mal, ainda se encontram em fase inicial para serem tidos como uma metodologia diagnóstica. Acharya U. *et al* (2005) utilizou a mesma técnica para diagnosticar doenças cardíacas através do tratamento de dados da taxa de variação cardíaca.

Trabalhos mais amadurecidos no uso de fractais, ainda na área biológica, desenvolvido por Pogue e Schnell (2001) caracterizaram o grau de complexidade das fronteiras dos ecossistemas das Grandes Planícies do Sul da América do Norte, relacionando o avanço das áreas agrícolas sobre as regiões silvestres, obtendo indicativos do grau de degradação do ambiente em análise.

O uso do fractal para caracterização de formações geológicas é utilizado de forma mais ampla e intensiva que em áreas biológicas, sendo utilizado para reconstrução de formações rochosas e formações de costas (Hauchard *et al*, 2002).

E, curiosamente, seguindo o caminho inverso aos primórdios de sua concepção, fractais foram utilizados para classificar obras de arte ao invés de serem as bases para sua criação no trabalho de Gerl *et al* (2004), onde a análise objetivou reconhecer os autores de pinturas pela característica fractal da imagem por eles produzida, apresentando resultados satisfatórios na análise. Entretanto, este estudo realizou-se como um teste da capacidade quantitativa e conseqüentemente, qualitativa dos fractais, não havendo a intenção de criar uma metodologia para tal classificação de obras de artes.

Sendo o uso de análise fractal difundido em inúmeras áreas, é natural encontrar trabalhos envolvendo fractais na área de caldeiras e deposição de cinzas. Song *et al* (2004), realizou estudos com fractais objetivando caracterizar a pirólise de três tipos de carvões utilizados em termoelétricas chinesas através do método de cálculo de Xie (Xie e Wang, 1999), conseguindo apenas comparativos qualitativos devido à complexidade matemática deparada.

Helalizadeh *et al*, 2000, investigou os mecanismos de cristalização de sais misturados no efeito de incrustação sobre os trocadores de calor durante a transferência de calor convectiva através da variação sistemática de parâmetros, executando ao fim, a análise fractal oriunda de fotografias de microscopia eletrônica dos depósitos para quantificação das características, referenciando a inexistência de trabalhos que avaliassem os depósitos de misturas de sulfato de cálcio e carbonato de cálcio.

De forma semelhante, Helalizadeh *et al* (2006) menciona que ao focar estudos na análise fractal de depósitos de particulados sobre superfícies de trocadores de calor, confronta-se com a inexistência de informações disponíveis na literatura, associada à complexidade em expressar matematicamente os efeitos físicos relacionados ao mecanismo de deposição como: a quantidade de movimento, a transferência de calor e massa, a cinética química, etc.

Por fim, a principal base para estudos de depósitos por ótica fractal reside nos trabalhos realizados por Mendes *et al* (2005) ao retratar características de depósitos coletados de

trocadores de calor de caldeiras durante a parada destas e na construção de algoritmo para construção de depósitos através de modelos de deposição (Mendes *et al.*, 2006).

2.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA E DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

A microscopia eletrônica e a difratometria de raios-X são duas técnicas utilizadas comumente para microanálises estruturais e elementares de amostras sólidas em diversas áreas do conhecimento.

De acordo com Maliska (—), a microscopia eletrônica de varredura teve início em 1935 com o trabalho de M. Knoll ao descrever a concepção do microscópio eletrônico, sofrendo constantes melhoramentos até ser construído para fins comerciais em 1965 pela Cambridge Scientific Instrument. Seu funcionamento consiste basicamente no bombardeamento da amostra com um feixe de elétrons, resultando na emissão de vários tipos de radiação que serão captadas para formar a imagem, sendo também possível uma análise qualitativa por meio da identificação dos raios-X emitidos pela interação inelástica do feixe eletrônico com a amostra.

Por sua vez, a difratometria de raios-X, também denominada de DRX, é resultado de um dos efeitos dos raios-X, assim como as chapas radiográficas. A teoria de difração dos raios-X em cristais foi formulada por Laue em 1912, que conquistou o prêmio Nobel de Física por seu trabalho (Bleicher e Sasaki, 2000) abrindo caminho para a utilização da difração de raios-X.

A difração de raios-X é tida como o fenômeno de interação entre o feixe de raios-X e os elétrons de átomos de uma amostra, liberando fótons. A difração destes fótons apresenta um ângulo de difração dependente do ângulo de incidência dos raios-X sobre o plano cristalino, assim como variações na sua intensidade devido ao grau de interferência construtiva das ondas de fótons originadas dos planos interplanares.

A difração de raios-X obedece à lei de Bragg e, desde que tratada como um espalhamento coerente, permite caracterizar os compostos químicos de cada amostra através da correlação entre o ângulo de incidência e os picos de intensidade provocados pela difração em planos cristalinos de mesma distância interplanar. Esta correlação é melhor exposta em uma forma gráfica denominada difratograma, podendo assim ser comparada à uma biblioteca de difratogramas característicos de cada composto para definir qual está presente na amostra.

Por suas extensas capacidades, a microscopia eletrônica e a difratometria de raios-X são passíveis de uso em análises de produtos cerâmicos, como resíduos da queima de carvão. Muitos pesquisadores têm por objetivo viabilizar as cinzas de carvão como matéria-prima, fazendo uso extensivo do MEV e DRX, e obtendo como resultado a caracterização de

variados tipos de cinzas. Entre estes pesquisadores, cita-se como àqueles que foram estudados e agregaram informações sobre a forma a ser trabalhada as amostras e os resultados a serem obtidos: Risbud *et al* (1992), Calarge *et al* (1994), Silva *et al* (1999), Jung *et al* (2001), Fernandes *et al* (2001), Fonseca *et al* (1994) e Kniess *et al* (2002).

Em estudos com outra abordagem, mas que também agregaram informações, Huffman *et al* (1990) utilizou o MEV em produtos da combustão de carvão de uma unidade de queima de carvão laboratorial para investigar as reações de Ca, Fe e alcalinos nas amostras, com o intuito de relacionar a composição desses elementos com a formação do depósito. Gupta *et al* (1998) utilizou o MEV para caracterizar amostras de carvões e suas capacidades na formação de depósitos de cinzas em caldeiras termoelétricas. Harb *et al* (1999) faz uso do MEV para caracterizar as propriedades dos depósitos em função do seu posicionamento, também em uma unidade de queima de carvão laboratorial.

Outro trabalho similar e de destacada relevância à esta dissertação é o de Mendes *et al* (2005) que utiliza o MEV e o DRX para caracterizar elementarmente os depósitos de cinzas e o carvão que os geraram.

Por fim, complementando a metodologia aplicada na dissertação, foi estudado o trabalho de Berti *et al* (2007) que analisou depósitos de cinzas formados sobre trocadores de calor através das imagens das amostras dos depósitos no programa Imago[®], validando-as com análises experimentais da porosidade das amostras pelos métodos de picnometria e Princípio de Arquimedes.

3. CINZAS E DEPOSIÇÃO

Neste capítulo serão discutidos os mecanismos de formação das cinzas durante a combustão e os mecanismos de deposição de cinzas sobre a superfície de trocadores de calor, sendo de interesse o entendimento destes mecanismos para auxílio em análises subseqüentes, observando que não são o foco de análise do trabalho.

3.1. MECANISMOS DE FORMAÇÃO DAS CINZAS

Em acordo com Lind (1999), os combustíveis sólidos contêm constituintes inorgânicos que formam as cinzas durante sua combustão. Estes componentes podem se encontrar no combustível como partículas minerais inclusas — partículas existentes nos interstícios moleculares do combustível —, partículas minerais exclusas — partículas dispersas no combustível sem apresentar ligações com a matriz —, sais, e ligações orgânicas com a matriz hidrocarbônica do combustível.

A formação das cinzas está relacionada com uma seqüência complexa de mecanismos desencadeados pela combustão do carvão. Gupta *et al* (1998) e Baxter (2000) indicam que o tipo de material inorgânico e as condições de combustão são os fatores que irão alterar a produção de cinzas, criando vapores, fumos e partículas maiores com diversas composições.

Na Figura 8 está ilustrado o processo de formação das cinzas definida por Kær (2001) e Seames (2003), obtendo-se ao fim uma distribuição bimodal relacionada ao tamanho das cinzas.

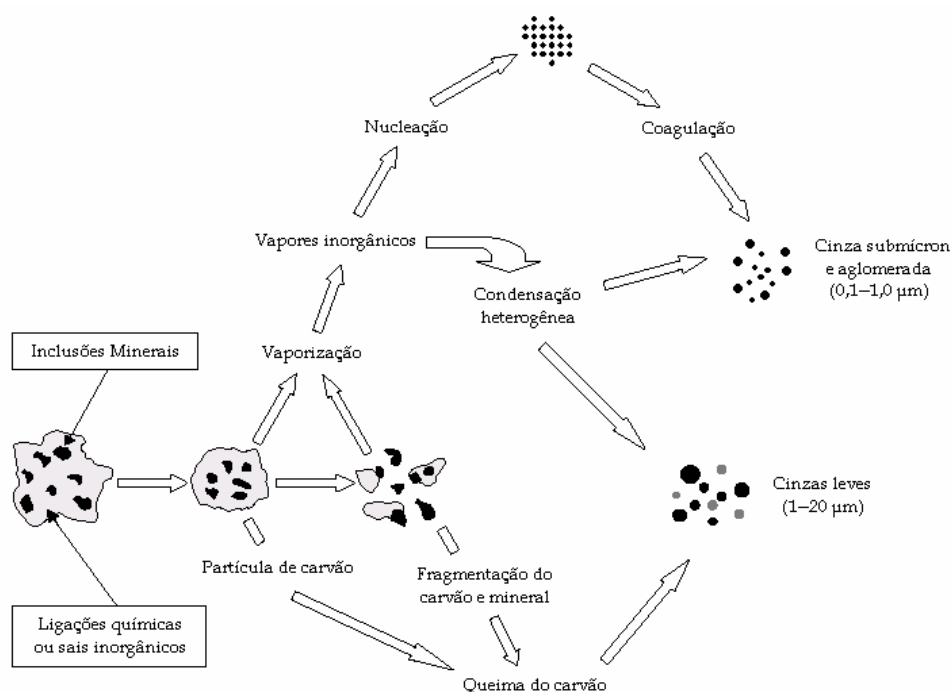


Figura 8. Ilustração esquemática das partes do mecanismo de formação das cinzas durante a combustão. Adaptado de Kær (2001) e Seames (2003).

Esta distribuição bimodal é função de duas classes de mecanismos formadores das cinzas. A primeira engloba a formação de partículas com diâmetros maiores que $1 \mu\text{m}$, geradas pela fragmentação do carvão e a subsequente coalescência destes fragmentos auxiliada pelos vapores. A segunda refere-se à nucleação, condensação e coagulação dos vapores dos sais alcalinos contidos no carvão, gerando partículas submicrométricas (Kær, 2001 *apud* Baxter, 1998).

A segunda etapa é iniciada com as partículas de vapor agregando-se para formar uma nova partícula através de um processo de nucleação. Em seqüência, estas partículas formadas agrupam-se, passando de um estado já líquido para sólido por um mecanismo semelhante à coagulação, e por isto assim definido. Parte deste vapor condensa-se e juntado-se às partículas coaguladas para formar as cinzas submicrométricas.

3.2. MECANISMOS DE DEPOSIÇÃO DE CINZAS

Baxter (2000) define que existem cinco processos que se destacam na formação do depósito: o impacto inercial, a termoforesi, a condensação, as reações heterogêneas, e a impactação por vórtices, sendo esta última adicionada apenas quando tratar-se de um

escoamento com altas concentrações de fumos. Estes mecanismos podem ser visualizados na Figura 9.

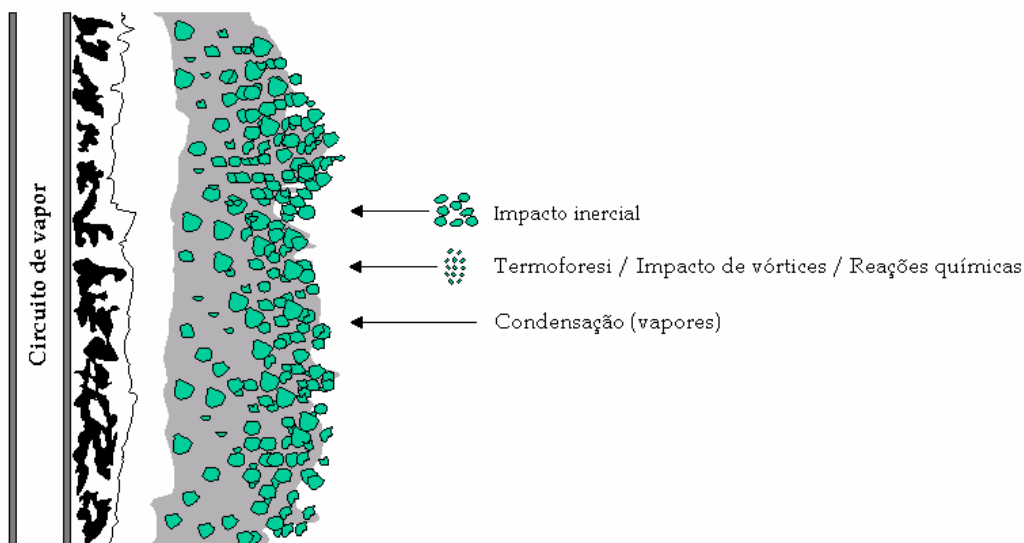


Figura 9. Mecanismos de deposição sobre a superfície de um trocador de calor. Adaptado de Kær (2001).

3.2.1. Impacto Inercial

O impacto inercial é o mais comum dos processos pelo qual a maior parte do depósito de cinza é formada. A eficiência de captura da partícula descreve a propensão destas de se manterem fixas à superfície do trocador de calor após colidirem, sendo que a taxa de impactação inercial depende da geometria, propriedades do escoamento dos gases, tamanho, viscosidade, composição e densidade da partícula. Este processo privilegia as partículas de diâmetros maiores por possuírem maior inércia e área, possibilitando a sua fixação no momento em que as linhas de correntes nas quais estão sendo transportadas passam próximas ao tubo.

Estas partículas apresentam também suas maiores taxas de deposição no centro do cilindro que compõem o trocador de calor, decaindo a taxa na medida em que se amplia o ângulo da área de deposição, visto na **Figura 10**, chegando à zero em ângulos maiores que 50° (Baxter, 2000).

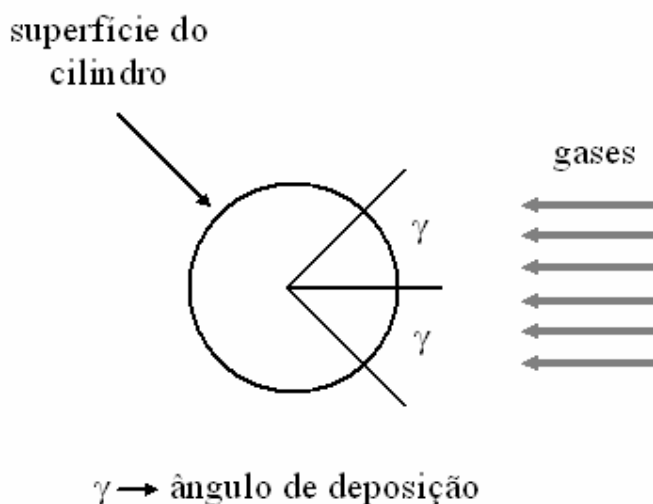


Figura 10. Vista lateral do trocador de calor com representação do ângulo de deposição em relação ao escoamento dos gases de combustão com particulados.

3.2.2. Termoforesi

Baxter (2000) e Kær (2001), definiram a termoforesi como um processo de transporte das partículas existentes nos gases para a superfície do trocador de calor, movido pelo gradiente de temperatura existente entre eles, sendo que em algumas circunstâncias a deposição por termoforesi é responsável pela fração dominante de partículas submicrométricas na superfície de um trocador de calor.

Estes depósitos formados por termoforesi são constituídos de grãos mais finos e distribuídos de forma mais dispersa em volta da superfície de um trocador de calor do que os depósitos formados por impactação inercial. Com o aumento do depósito na superfície do trocador, há uma queda no gradiente de temperatura, reduzindo a taxa de deposição por termoforesi.

3.2.3. Condensação

A condensação é tida por Baxter (2000) e Kær (2001) como o mecanismo pelo qual os vapores são depositados na superfície que está mais fria que os gases circundantes.

O condensado tem a capacidade de aumentar a área de contato entre os depósitos granulares e a superfície do trocador de calor, aumentando a dificuldade de remover o depósito dela, como também podem aumentar a área de contato entre partículas, influenciando na condutividade térmica, difusividade de massa e outras características do depósito. Os depósitos que apresentam este mecanismo de formação são fortemente aderidos

à superfície do trocador e possuem maior eficiência na captura das partículas existentes nos gases circundantes.

A quantidade de condensado em um depósito é em sua maioria depende do modo de ocorrência do material inorgânico no carvão. Carvões de baixa qualidade e outros combustíveis similares têm a propriedade de produzir grandes quantidades de materiais condensáveis. Em carvões de melhor qualidade a condensação pouco contribui na formação e nas propriedades físico-químicas do depósito.

A condensação pode se dar através de três mecanismos:

- i. o vapor transpassa a camada limite térmica e se condensa heterogeneamente na superfície do trocador de calor ou no depósito poroso;
- ii. vapores se nucleiam homogeneamente para formar um fumo e subseqüentemente depositar-se por termoforesi;
- iii. vapores condensam heterogeneamente sobre outras partículas existentes na região delimitada pela camada limite térmica e chegam até a superfície do trocador de calor por termoforesi.

Depósitos de condensados apresentam partículas menores que $0,5 \mu\text{m}$ e apresentam uma deposição mais uniforme na superfície do trocador de calor que os materiais depositados exclusivamente por termoforesi ou impacto inercial.

3.2.4. Reações Químicas

Reações químicas é o mecanismo de deposição que envolve as reações heterogêneas dos gases com materiais do depósito, ou menos comumente, com a própria superfície do trocador de calor e são afetadas principalmente pela temperatura.

Entre as principais reações químicas que afetam a deposição de cinzas, destacam-se a sulfatação, absorção alcalina, oxidação e sinterização.

3.2.5. Impacto de Vórtices

É um processo semelhante ao impacto inercial, porém apenas atuante sobre partículas muito pequenas ou demasiadamente leves, consistindo na deposição destas pela ação de vórtices turbulentos próximos as camadas limites fluidodinâmicas existentes sobre a superfície do trocador de calor.

3.3. FORMAÇÃO DO DEPÓSITO DE CINZAS

Uma vez definido os mecanismos de formação e de deposição de cinzas, se faz lógico expor a seqüência de formação do depósito sobre a superfície do trocador de calor. Na Figura 11 visualiza-se esta seqüência relacionada com a temperatura da superfície do depósito, T_d e as mudanças físico-químicas de cada camada.

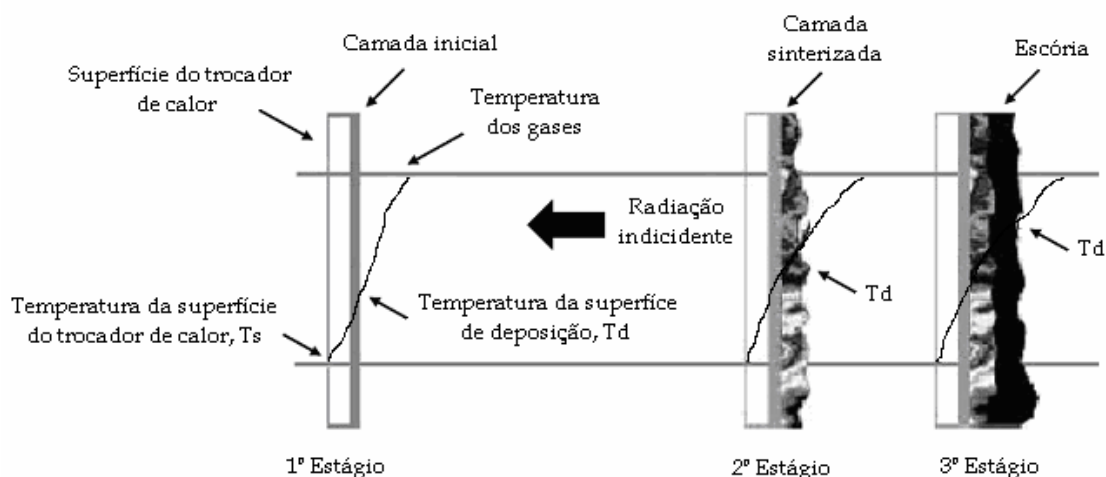


Figura 11. Desenvolvimento do depósito de cinzas. Adaptado de Rushdi *et al* (2004).

Rushdi *et al* (2004) determina que a deposição de cinzas sobre o trocador de calor se inicia com a adesão de partículas em estado seco, semi-derretido ou derretido, dependendo da composição e tamanho das partículas de cinzas, do fluxo de calor no local e da condensação dos constituintes voláteis, assim como irregularidades na superfície podem auxiliar na deposição de pequenas partículas sobre ela.

As partículas dispersas nos gases de combustão apresentam altas temperaturas, e com a aproximação destas partículas da superfície do depósito o gradiente de temperatura cai, sendo que podem vir a derreter ao colidirem com a superfície. Neste caso, para as partículas aderirem à superfície do depósito, elas devem estar em um estado semelhante a uma cola formada por sais alcalinos (Fe e Ca) que se condensam na superfície do trocador de calor. Estas partículas semi-derretidas podem aderir à superfície do trocador de calor pela tensão superficial antes de se resfriarem.

Partículas submicrométricas e produtos da condensação geralmente depositam-se uniformemente sobre a superfície, uma vez que os depósitos maiores de partículas semi-

derretidas e derretidas desenvolvem-se em padrões irregulares dependentes da dinâmica do escoamento e da distribuição das cinzas na trajetória dos gases.

Com o crescimento do depósito, sua superfície se afasta gradativamente da influência do gradiente de temperatura do trocador de calor, passando a sofrer um aumento da temperatura. Este aumento de temperatura afeta a estrutura física da superfície do depósito, a qual muda de uma superfície particulada para uma parcialmente derretida, gerando assim uma superfície adesiva, onde outras partículas poderão aderir. Neste estágio, pode ocorrer a sinterização de parte do depósito, dependendo do estado de derretimento das partículas que chegam. Como o depósito sinterizado continua a crescer, a temperatura da superfície do depósito aumenta, aumentando assim o grau de sinterização. Quando a temperatura do depósito torna-se muito alta, a superfície do depósito começa a derreter e escoar. Por fim, neste estágio, o depósito pode não mais crescer dado o escoamento líquido da superfície.

4. FUNDAMENTOS DA DIMENSÃO FRACTAL

Diferente das duas outras características — porosidade e distribuição de poros — selecionadas para caracterizar a estrutura de um depósito de cinzas, a dimensão fractal é a menos conhecida e a que apresenta maior grau de complexidade na sua conceituação. Assim, são abordadas em seqüência lógica neste capítulo, as definições que levam ao entendimento da dimensão fractal e sua aplicabilidade na caracterização e desenvolvimento de superfícies.

4.1. DIMENSÃO

Dimensão é o parâmetro ou medida requerida para definir as características de um objeto. Na matemática, as dimensões descrevem a posição e as características de qualquer objeto, sendo que as dimensões de um espaço são os números totais de diferentes parâmetros usados para descrever todos os possíveis objetos considerados nos modelos. Generalizações desses conceitos são possíveis e diferentes campos de estudo irão definir seus espaços para suas dimensões relevantes, ou seja, em um modelo de espaços geográficos, a unidade de medida poderá ser quilômetros ou milhas, enquanto modelos econômicos usariam custo ou preço.

Um ponto num plano, como uma cidade em um mapa, ou um ponto no espaço, de forma semelhante à localização de um avião em vôo, são representações básicas de dimensões em um sistema 2D e 3D, respectivamente. Se a grandeza tempo for adicionada, pode-se indicar que há 4 dimensões, dependendo do espaço inicial.

A física teórica por vezes, manipula as dimensões ao adicionar ou mudar suas propriedades para poder descrever conceitos não usuais de modelos espaciais, sendo geralmente utilizada para estudos em mecânica quântica. Estas dimensões físicas, ou as dimensões usuais, são parâmetros necessários para definir quando e onde um evento ocorreu, ocorre, ou ocorrerá.

4.2. DIMENSÃO TOPOLÓGICA

A concepção e percepção do mundo são intuitivamente feitas através da existência de quatro representações: o ponto, a linha, o plano, e o sólido, sendo estas as bases da geometria Euclidiana.

O ponto é um conceito usado na definição de uma localização exata no espaço, não apresentando volume, área ou comprimento. Matematicamente, pela dimensão topológica, qualquer forma tem como seus elementos básicos infinitos pontos.

Por sua vez, a linha pode ser descrita como uma curva infinitamente fina, infinitamente longa e perfeitamente reta e pode ser representada algebricamente num plano cartesiano por funções lineares. Pela geometria Euclidiana, há a noção que a conexão mais curta entre dois pontos é uma reta.

O plano é um objeto fundamentalmente bidimensional, que por definição, contém todas as retas que passem sistematicamente por dois de três pontos em um espaço qualquer.

E o sólido, por fim, é a concepção básica do universo perceptível, definido por três coordenadas ortogonais entre si, repassando a noção de profundidade.

Assim, a dimensão topológica é definida como a noção básica de dimensão, onde um ponto, uma reta, uma superfície e um sólido apresentam as dimensões iguais a 0, 1, 2 e 3, respectivamente. Estas dimensões podem ser obtidas pelo método exposto por Gouyet (1992) que consiste no recobrimento do objeto em análise por células elementares, onde um segmento de reta, um elemento de superfície ou de volume, é tomado como unidade de medida. A medida M , obtida desta forma será:

$$M = N\varepsilon^d = N\mu \quad (4.1)$$

4.3. DIMENSÃO DE HAUSDORFF-BESICOVITCH

A dimensão de Hausdorff-Besicovitch, ou simplesmente, dimensão de Hausdorff, é criada a partir da definição intuitiva de medida, a qual permite compararem-se os tamanhos de conjuntos.

Para demonstrar a dimensão de Hausdorff, Fernandes (1994, *apud* Gouyet, 1992) propõe a medição de um objeto E através do seu recobrimento por células pertencentes ao espaço no qual o objeto está imerso, de unidade de medida $\mu = \varepsilon^{d(E)}$, onde ε é o tamanho do lado da célula e $d(E)$ é a dimensão do objeto E . Toma-se um quadrado de lado L , sendo recoberto por células quadradas de lado ε . Pressupondo-se desconhecida a dimensão do quadrado, se fará ensaios tomando a unidade de medida $\mu = \varepsilon^\alpha$, onde α é o parâmetro desconhecido. Sendo a medida M igual a $N\mu$, e fazendo-se $N = (L/\varepsilon)^2$ tem:

$$M = L^2 \varepsilon^{\alpha-2} \quad (4.2)$$

Supondo-se inicialmente $\alpha = 1$, o valor de $M \rightarrow \infty$ quando $\varepsilon \rightarrow 0$. Para $\alpha = 3$, $M \rightarrow 0$ quando $\varepsilon \rightarrow 0$. E assim, para $\alpha = 2$, obtém-se a superfície do quadrado. Percebe-se que o uso deste método é uma generalização para dimensões não inteiras, e que nesta generalização, o recobrimento do objeto E é feito por esferas V_i onde o diâmetro das esferas ($\text{diam } V_i$) é menor ou igual a ε , indicando que deve ser tomado o limite inferior das unidades $\mu = (\text{diam } V_i)^\alpha$.

A chamada α -medição de recobrimento é definida matematicamente como:

$$m^\alpha(E) = \liminf_{\varepsilon \rightarrow 0} \left\{ \sum (\text{diam } V_i)^\alpha : \cup V_i \supset E, \text{diam } V_i \leq \varepsilon \right\} \quad (4.3)$$

e a dimensão de Hausdorff:

$$\begin{aligned} \dim(E) &= \inf \{ \alpha : m^\alpha(E) = 0 \} \\ &= \sup \{ \alpha : m^\alpha(E) = \infty \} \end{aligned} \quad (4.4)$$

A $\dim(E)$ é o valor de α onde a medida faz um salto de zero ao infinito, como o exemplo do quadrado de lado L .

Expressando em uma forma mais intuitiva a equação (4.4), pode-se expressá-la como um único número $\dim(E)$ tal que:

$$\begin{aligned} \text{se } < \dim(E), & \quad m^\alpha(E) = \infty, \\ \text{se } > \dim(E), & \quad m^\alpha(E) = 0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

4.4. DIMENSÃO FRACTAL

Segundo Falconer (1990), Mandelbrot em seus trabalhos originais definiu matematicamente os fractais como sendo um conjunto com a dimensão de Hausdorff excedendo estritamente a sua dimensão topológica, sendo que esta definição se provou insatisfatória por excluir um número de conjuntos que claramente eram fractais. Porém, está

definição perdura, uma vez que várias outras definições propostas também apresentam limitações.

Para tanto, Falconer (1990) faz a seguinte consideração subjetiva:

Meu sentimento pessoal é que a definição de um fractal deve ser considerada do mesmo jeito que um biólogo considera a definição de vida.

Juntamente a esta consideração, Falconer (1990) soma algumas definições para que um conjunto F qualquer possa ser definido como um fractal:

- i. F tem uma estrutura fina;
- ii. F é extremamente irregular para ser descrito pela linguagem geométrica tradicional;
- iii. Frequentemente F tem alguma forma de auto-similaridade, determinística ou estatística;
- iv. Geralmente a dimensão fractal de F , definida de alguma forma, é maior que sua dimensão topológica;
- v. Na maioria dos casos de interesse, F é definido de uma maneira muito simples, provavelmente recursivamente.

O conceito de fractal pode ter seu entendimento ampliado na medida em que se expõem características que são intrínsecas a ele. A primeira, a auto-similaridade, repassa a noção de que fractais apresentam similaridades em suas formas na medida em que é ampliada a escala de observação. Esta característica é observada com facilidade em fractais construídos por meios determinísticos, ou seja, predefinidos, por apresentarem-se idênticos em diferentes escalas, como por exemplo, o conjunto fractal de Mandelbrot. Nos fractais construídos de forma aleatória, a auto-similaridade se apresenta de forma menos evidente, com medidas numéricas ou estatísticas que são preservadas em diferentes escalas, como pode ser observado na disposição de neurônios. Ambos são exemplificados na Figura 12.

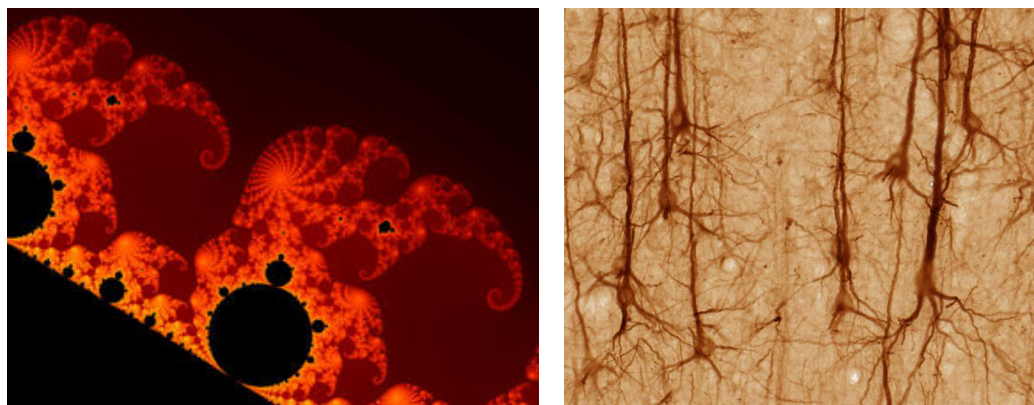


Figura 12. Conjunto fractal de Mandelbrot (esquerda), um fractal determinístico e uma rede neural (direita), um fractal estatístico.

Um segundo conceito é exposto por Barabási e Stanley (1995), embasados nos trabalhos de Mandelbrot: a definição de auto-afinidade. A auto-afinidade apresenta um conceito semelhante à auto-similaridade no pressuposto de observação de similaridades das formas com a mudança de escala, apresentando diferença no instante em que a escala é mudada. Fractais auto-similares sofrem apenas mudanças de escala ditas isotrópicas, ou seja, todas as dimensões se expandem com a mesma magnitude, enquanto fractais que apresentam auto-afinidade necessitam de mudanças de escala anisotrópicas para poderem apresentar similaridade, como indicado na Figura 13.

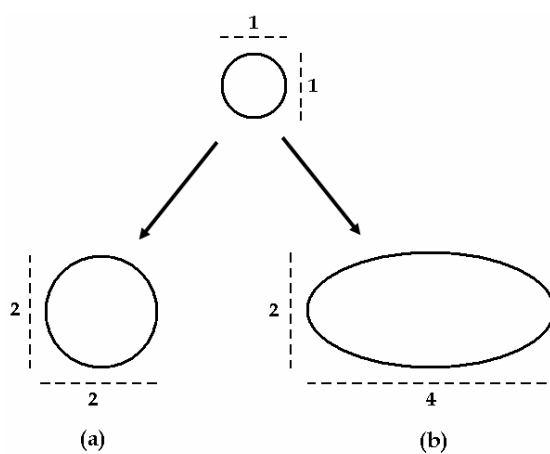


Figura 13. Redimensionamento de escala (a) isotrópico e (b) anisotrópico.

O efeito da transformação de escala permite a quantificação da desordem da superfície através de funções denominadas auto-afins, que por sua vez possibilitam a associação delas com um terceiro conceito.

Este terceiro conceito, chamado de dimensão fractal, expõe a natureza única do fractal juntamente à definição de uma dimensão, constituindo uma característica magna dos fractais e estudos relacionados. A sua definição é tida por Mandelbrot (1991) como o número que quantifica o grau de irregularidade e de fragmentação de um conjunto geométrico ou de um objeto natural que se reduz, no caso de objetos da geometria Euclidiana, às suas dimensões usuais. Falconer (1990), por sua vez, define-a como um indicativo de como os fractais refletem suas propriedades de mudança de escala e auto-similaridade, e Barabási e Stanley (1995), em semelhança a Mandelbrot (1991), a definem como o elemento que caracteriza quantitativamente a auto-similaridade de um sistema. As definições de todos os autores serão consideradas no desenvolver do trabalho, uma vez que não discordam entre si, e sim, complementam-se para a compreensão de um elemento de entendimento pouco intuitivo.

Para a exposição do cálculo básico de uma dimensão fractal, parte-se da evolução da curva de Koch na Figura 14, demonstrada por Gouyet (1992).

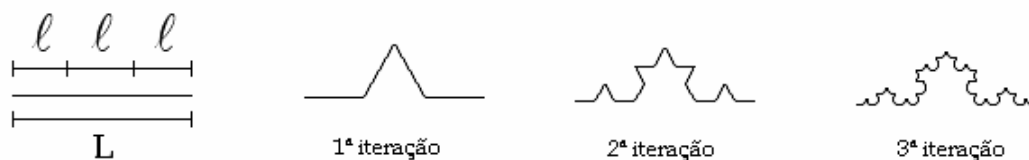


Figura 14. As 3 primeiras iterações da curva de Koch.

Na curva de Koch, a construção é iniciada repartindo-se um comprimento L inicial em três segmentos de tamanho l e seguidamente, substituir o segmento do meio por dois segmentos com tamanho l cada. Sucessivamente cada segmento l é repartido em três e todo processo repete-se infinitamente. A equação (4.6) permite uma percepção em termos matemáticos da primeira à n -iteração.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_1 = L/3 &\rightarrow L_1 = 4\varepsilon_1 \\
 \varepsilon_2 = L/9 &\rightarrow L_2 = 16\varepsilon_2 \\
 &\dots \\
 \varepsilon_n = L/3^n &\rightarrow L_n = 4^n \varepsilon_n
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

Suprimindo n entre as duas igualdades, é obtido:

$$L_n = L^{D_f} (\varepsilon_n)^{1-D_f} \tag{4.7}$$

Para a curva de Koch, obtém-se a dimensão fractal como:

$$D_f = \frac{\ln 4}{\ln 3} \cong 1,2619$$

Vários estudiosos desenvolveram metodologias para cálculo da dimensão fractal, vide a comparação com a dimensão de Hausdorff realizada por alguns autores para a caracterização da dimensão. Outros métodos, como: massa raio, intersecção acumulativa, *box-counting*, *dividers*, também denominado *compass* e Bouligand-Minkowski, são comparados por Backes e Bruno (2005), expondo suas diferenças em quesitos de precisão e adequação aos diferentes objetos em análise.

Porém, neste trabalho será usado o cálculo da dimensão fractal através do covariograma das amostras, embasando-se em Fernandes (1994), tendo-se optado por este método primeiramente por ser um método já utilizado em trabalhos relativos aos depósitos de cinzas das caldeiras termoelétricas da Tractebel Energia S.A. e por ser um método que apresenta resultados confiáveis para estruturas com grandes variações dimensionais como as das amostras coletadas, ou seja, numa mesma amostra existem regiões com poros grandes e regiões com poros diminutos.

5. PROCEDIMENTO DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA CONSTRUÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia consiste em uma seqüência de procedimentos para aquisição dos dados e caracterização de amostras dos depósitos de cinzas da unidade geradora de vapor, de acordo com a organização proposta na Figura 15.

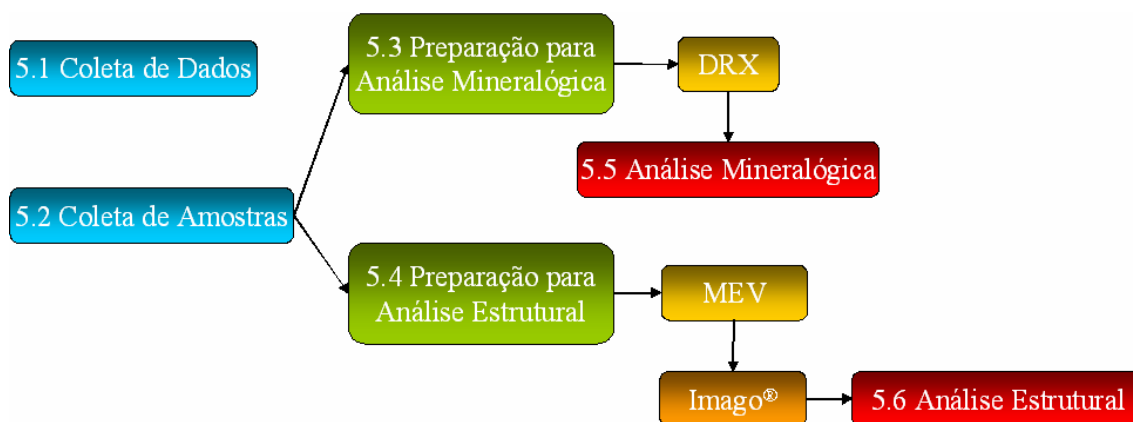


Figura 15. Organização dos procedimentos de aquisição e caracterização.

Uma sonda especialmente projetada e construída com base nos trabalhos de Harb *et al* (1999), Fontes (2004) e Naruse *et al* (2005), no Laboratório de Ciências Térmicas foi utilizada para coletar amostras de depósitos de cinzas, dados de temperatura e velocidade dos gases de combustão e temperatura da base do depósito.

A sonda, conforme ilustrada na Figura 16, consiste de dois tubos concêntricos de aço-inox de 2100 mm, por onde a água é injetada e retirada por uma rede de tubos de alta pressão conectados à sonda, permitindo seu arrefecimento e subsequente retirada da água aquecida. A sonda possui um anel de apoio concêntrico a ela, com 110 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento, responsável pela fixação da sonda no orifício, impedindo que ela oscile com a passagem dos gases ou que adentre totalmente para o interior da câmara da caldeira.

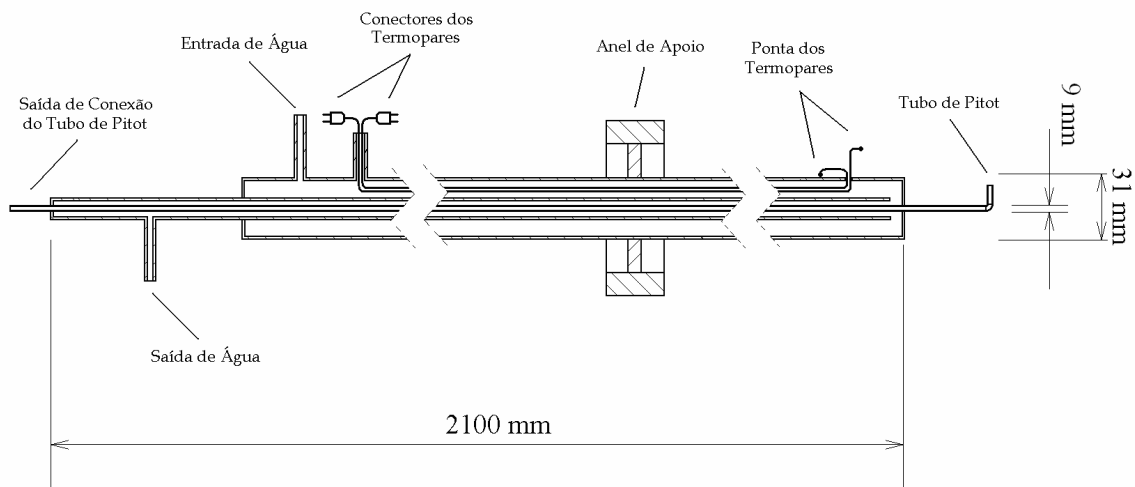


Figura 16. Representação esquemática da sonda.

No espaço entre os dois tubos é disposto um tubo de Pitot simplificado — também denominado de tubo de impacto, sendo a partir deste ponto referenciado apenas com tubo de Pitot — exemplificado na Figura 17.

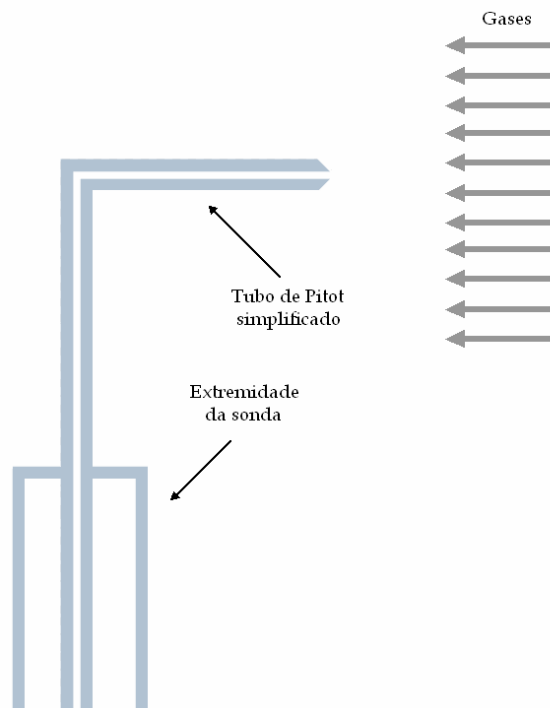


Figura 17. Representação esquemática do tubo de Pitot simplificado.

O tubo de Pitot, construído a partir de um tubo de aço de 9 mm de diâmetro, transpassa toda extensão do corpo da sonda, apresentando suas extremidades alocadas fora do corpo da

sonda. Uma delas fica em contato com o interior da caldeira para captar a pressão de estagnação do escoamento. A outra extremidade é conectada a um tubo de borracha que se conecta a um manômetro de coluna de álcool.

Dois fios de termopar tipo K também são transpassados por entre os dois tubos. As duas extremidades dos termopares são instaladas em locais distintos na extremidade da sonda que é alocada no interior da caldeira. O primeiro é soldado na parede da sonda para captar a temperatura de superfície da sonda, enquanto o segundo estende-se 30 mm além da parede da sonda, ficando sua extremidade exposta aos gases de combustão, captando assim a temperatura destes gases. Na extremidade oposta da sonda, os termopares estão conectados a um leitor digital.

Juntamente com a sonda é utilizado um sistema para aferição de valores aproximados da vazão mássica de cinzas no escoamento, exemplificado na Figura 18. Este sistema utiliza o tubo de Pitot conectado a tubos de borracha pra captação dos gases de combustão. No centro deste sistema está um filtro de 120 mm de comprimento e 40 mm de diâmetro com um elemento filtrante composto de fibras de algodão entrelaçadas, responsável pela captura das partículas de cinzas existentes nos gases de combustão que o atravessam. Para induzir a passagem dos gases pelos tubos com velocidade semelhante a existente no local de captação, uma bomba de vácuo é alocada no final do sistema para gerar um diferencial de pressão. O diferencial de pressão gera velocidades no interior dos tubos maiores do que no ponto de captação, tornando necessária a inserção de um manômetro de coluna de álcool no intermédio das conexões tubulares pra aferir o desequilíbrio entre a pressão no sistema e a do interior da caldeira e o uso de um conjunto de válvulas para regular a capacidade da bomba de vácuo, garantindo que a velocidade de passagem dos gases seja semelhante à velocidade no ponto de captação.

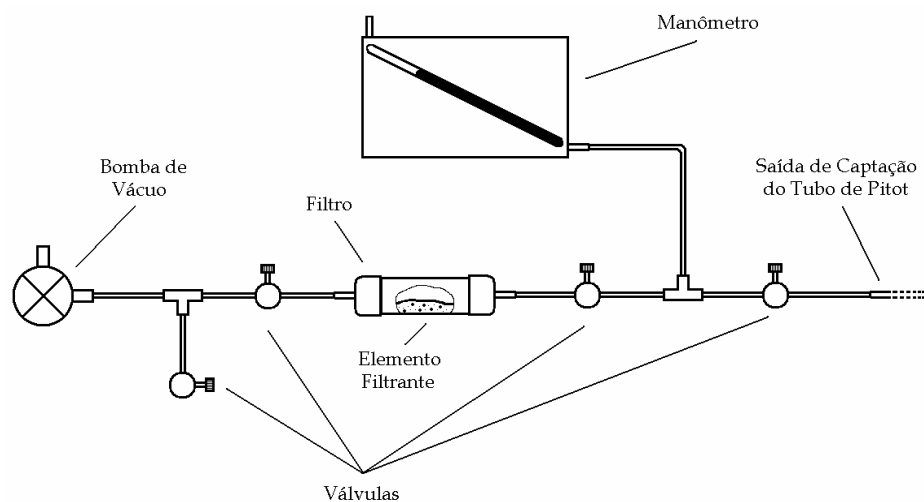


Figura 18. Representação esquemática do sistema de medição de vazão mássica.

A superfície do corpo cilíndrico da sonda, com 31 mm de diâmetro, é utilizada como superfície para formação dos depósitos de cinzas e um cronômetro digital é usado para controlar o tempo de exposição da sonda no interior da caldeira e o tempo de aquisição do sistema de medição de vazão mássica.

A coleta de dados com a sonda é realizada na caldeira termoelétrica a carvão pulverizado da Unidade 6 da Usina Termoelétrica Jorge Lacerda, pertencente à empresa Tractebel Energia S.A., localizada no município de Capivari de Baixo, no estado de Santa Catarina. A sonda é inserida num orifício de 120 mm de diâmetro existente na lateral esquerda da caldeira, considerando-se os queimadores como a região traseira. Na Figura 19 pode-se observar a sonda em operação.



Figura 19. Sonda inserida no local de coleta.

Nesta região predomina a troca de calor convectiva, ficando ela separada da parte inferior da caldeira, a qual predomina a troca de calor radiativa, por um elemento denominado nariz, que também tem o objetivo de uniformizar o escoamento e proteger os tubos da radiação direta das chamas. Na Figura 20 é indicado o ponto de inserção a sonda, próximo ao conjunto de feixes tubulares denominados de superaquecedor final, que elevam a temperatura do vapor proveniente do tambor da caldeira através do calor dos gases de combustão.

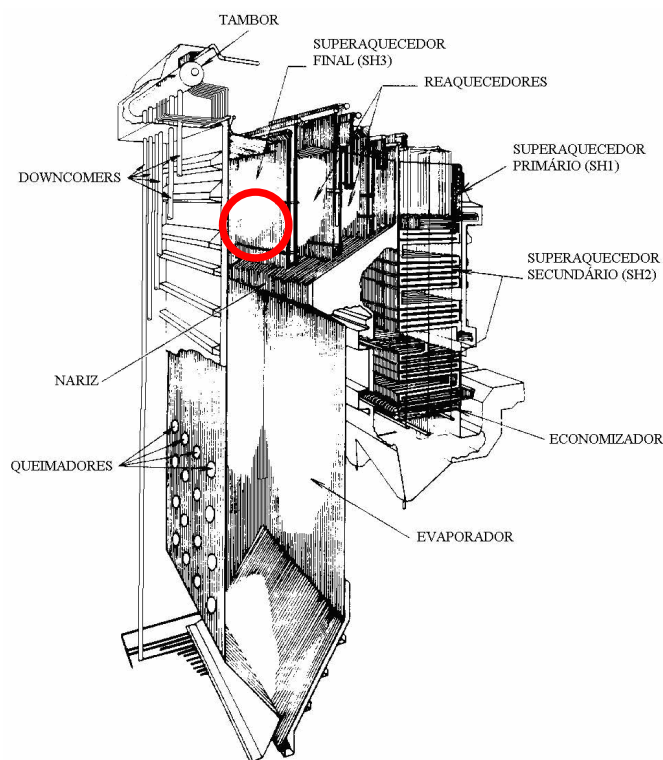


Figura 20. Localização do ponto de coleta na caldeira da Unidade 6.

5.1. COLETA DE DADOS

Os procedimentos de coleta de dados foram realizados no decorrer do mês de maio de 2006 através do sistema de monitoramento operacional da caldeira implantando na sala de comando da unidade B e por aquisição dos dados fornecidos pela sonda.

A sala de comando faz o monitoramento e controle de todos os parâmetros possíveis, como vazão de combustível, vazão de ar, temperaturas e pressões. No entanto, apenas a pressão do interior da caldeira foi adquirido com a finalidade de ser usado como dado de entrada juntamente com a pressão de estagnação captada pela sonda para cálculo da velocidade de passagem dos gases de combustão na região onde a sonda está inserida.

Os dados adquiridos pela sonda referem-se à temperatura dos gases de combustão na região da sonda, à temperatura da superfície de formação do depósito, à pressão de estagnação, já mencionada, e à vazão mássica de cinzas passante pela sonda. Os dados de temperatura da sonda são obtidos durante o período de formação de depósito em intervalos de 30 minutos. A pressão de estagnação e a pressão no interior da caldeira são aquisitadas apenas durante os 5 minutos iniciais para construção de uma média, tendo em vista que o monitoramento destes parâmetros em intervalos de tempo de 1 minuto durante 1 hora em 4

ocasiões distintas indicou grandes oscilações devido ao comportamento turbulento na região, tornando assim a aquisição da pressão durante os 5 primeiros minutos dos testes suficiente para caracterizar a velocidade dos gases durante a formação do depósito.

Por fim, a aquisição da vazão mássica é realizada em intervalos de 24 horas devido à limitação na quantidade de filtros, possibilitando apenas uma caracterização generalizada deste parâmetro em relação à formação do depósito. Esta aquisição é realizada durante 15 minutos, sendo o filtro pesado antes, e após este tempo, indicando a massa de cinzas capturada no filtro. De posse dos valores de massa e tempo é calculado a vazão mássica aproximada da região próxima à sonda.

5.2. COLETA DE AMOSTRAS

Previamente à aquisição das amostras, é realizado um monitoramento das características dimensionais do depósito durante 10 dias afim de determinar os intervalos de tempos que melhor caracterizam o início, crescimento e estagnação da formação do depósito de cinzas. Verifica-se que para as condições existentes na caldeira 6 da unidade B, um período de 4 horas contempla os 3 estágios designados na formação do depósito de cinzas.

Assim são realizadas 4 aquisições para sua caracterização, como exemplificadas no algoritmo da Figura 21, visando obter amostras com semelhantes influências — temperatura dos gases de combustão, temperatura de superfície de deposição, velocidade dos gases, quantidade de cinzas dispersa nos gases, pressão no interior da caldeira e constituintes químicos — na sua formação.

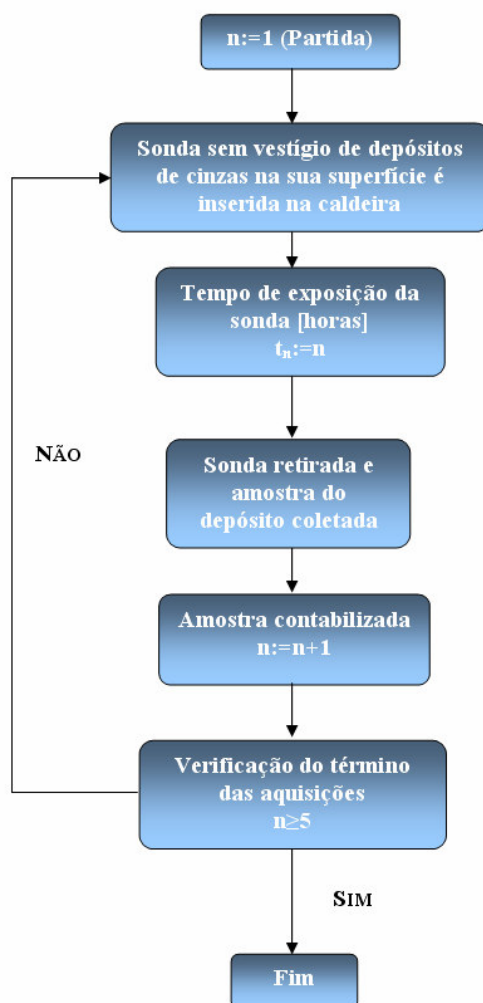


Figura 21. Algoritmo de coleta de amostras de depósitos de cinzas para caracterização da formação do depósito de cinzas.

Para construção da metodologia, consideram-se suficientes até 3 caracterizações de formações de depósitos de cinzas: 3 amostras de 1 hora, 3 amostras de 2 horas, e assim por diante.

5.3. PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE MINERALÓGICA

Para analisar as características mineralógicas das amostras coletadas é necessário 50% das amostras para subsequente moagem e peneiramento em peneiras de 2500 *mesh*, obtendo-se grãos de aproximadamente 2 μm que são levados para análise no DRX.

5.4. PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural é realizada nas amostras restantes, sendo para isto necessária a preparação delas.

Tendo-se optado por analisar a estrutura das amostras por métodos que utilizam a imagem bidimensional do depósito, faz-se necessária a construção de superfícies planas nos depósitos, próprias para captação de imagens através do MEV. Para esta construção as amostras são depositadas em moldes plásticos cilíndricos com 40 mm de diâmetro e 30 mm de altura com fundo removível e cobertas com resina epóxi líquida. Em seqüência são levadas à uma câmara de vácuo onde a descompressão induz a penetração da resina nos poros da amostras, permitindo posteriormente uma análise adequada da superfície delas. Após submeter a amostra à 2 horas de descompressão para garantir o preenchimento completo dos seus poros, esta é levada para uma estufa para cura da resina. Passando-se 24 horas de cura, a resina solidificada com a amostra no seu interior é retirada do molde plástico e tem uma das suas faces lixada com lixas de baixa granulometria, para obter-se ao fim uma superfície plana e sem ranhuras adequada para captação de imagens microscópicas. Na Figura 22 é possível observar uma amostra embutida com a superfície lixada.

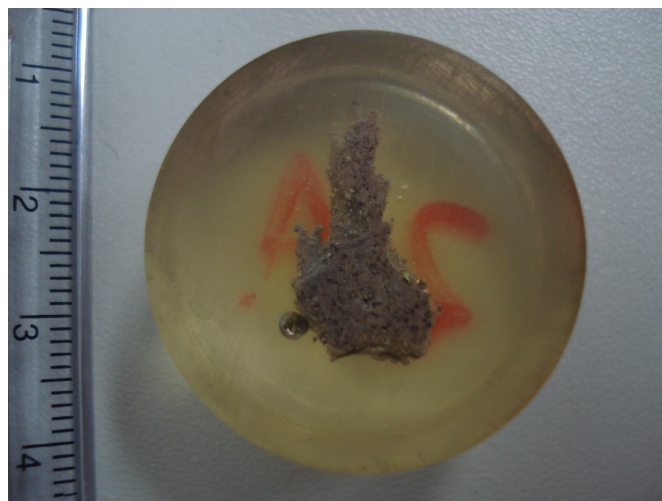


Figura 22. Superfície de uma amostra de depósito embutida e lixada.

5.5. ANÁLISE MINERALÓGICA

A análise mineralógica é executada sobre as amostras moídas em um difratômetro Philips, modelo Xpert, com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,5418 \text{ \AA}$) e filtro de níquel, instalado no Laboratório de Caracterização Microestrutural da Engenharia Mecânica da UFSC.

Cada amostra é analisada separadamente no difratômetro, fornecendo a intensidade e ângulo de incidência traduzidos em um difratograma de raios-X, semelhante ao da Figura 23. Com isto, é possível conhecer os constituintes e as fases da amostra, uma vez que cada elemento e fase apresentam uma característica única de intensidade em função do ângulo de incidência.

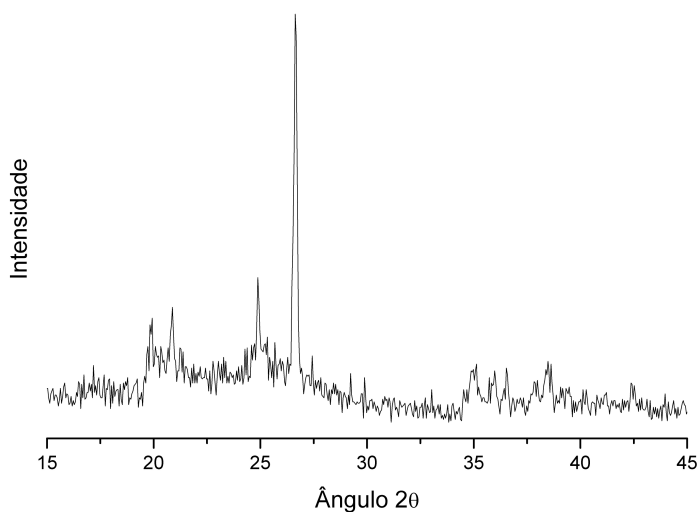


Figura 23. Exemplo de um difratograma de raios-X.

Este método não permite, entretanto, realizar uma análise quantitativa dos constituintes das amostras.

5.6. ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural é realizada através de métodos baseados na análise das imagens bidimensionais digitalizadas dos depósitos, as quais são adquiridas com o uso do MEV, modelo Philips-XL30 instalado no Laboratório de Caracterização Microestrutural da Engenharia Mecânica da UFSC.

As imagens obtidas apresentam um aumento de $100\times$, valor que possibilita retratar a estrutura de depósitos com um diâmetro mínimo de poro de $1,36 \mu\text{m}$, que por sua vez

corresponde à resolução de 1 *pixel* da imagem. Para caracterização das etapas de formação do depósito, são usadas no mínimo 10 imagens de cada uma delas. Na Figura 24 apresenta-se a imagem digitalizada do depósito, sendo ela um arquivo em formato TIF descrito por 256 tons de cinza que assumem valores numéricos codificados, ficando a cor preta representada por 0 e a cor branca por 255, e os demais valores, níveis de cinza.

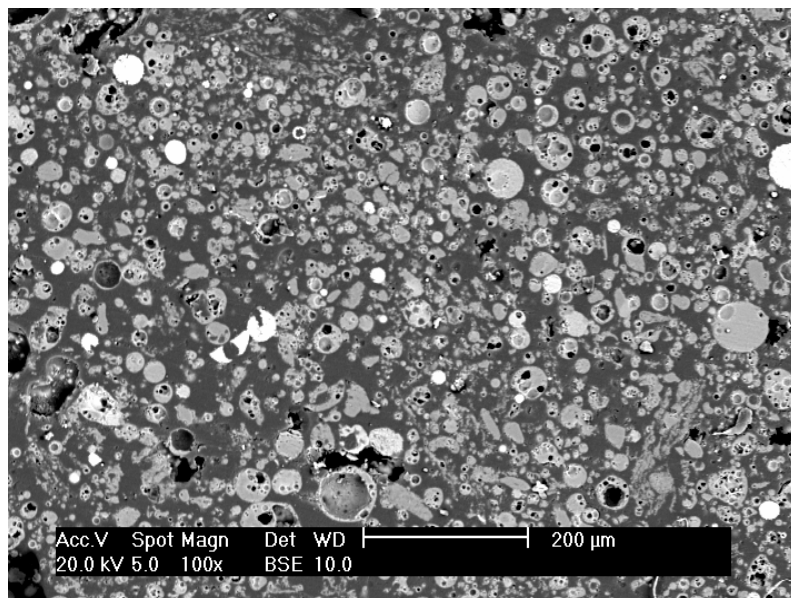


Figura 24. Imagem do depósito de cinzas obtido pelo MEV.

A informação acerca dos tons torná-se importante quando gera-se uma função que define a matriz sólida e o espaço poroso por meio da transformação dos tons de cinza para apenas dois valores — binarização. A partir disto a cor preta é assumida como matriz sólida e a cor branca como poro. Esta função de binarização é aplicada nas imagens das amostras dos depósitos pelo programa Imago[®], possibilitando a visualização das duas fases, como visto na Figura 25.

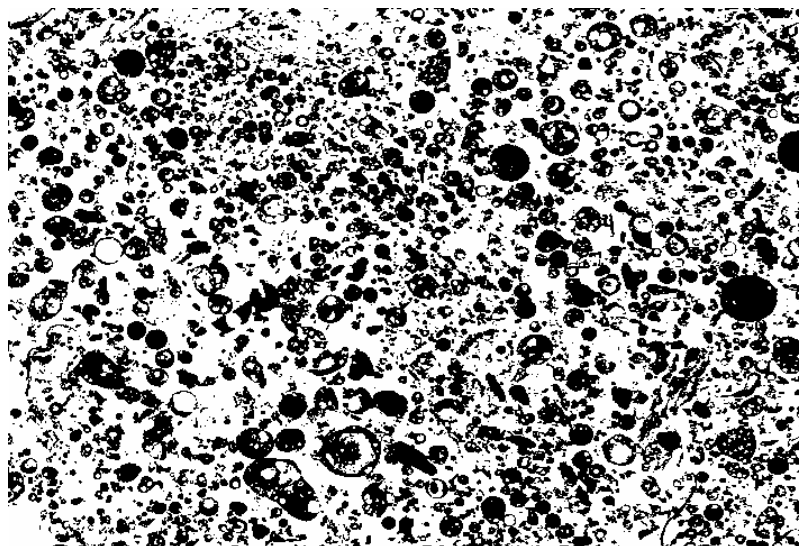


Figura 25. Imagem da Figura 24 binarizada no programa Imago[®].

A partir da imagem binarizada, são aplicados métodos existentes no programa Imago[®], que não cabem ser discorridos aqui, que permitem a obtenção da porosidade, da distribuição de poros e do covariograma, que por sua vez permite a obtenção da dimensão fractal.

Este covariograma indica a probabilidade de que duas células elementares separadas por uma distância predefinida pertençam à mesma fase (Fernandes, 1994). Tal função segue a prerrogativa que os meios representados nas imagens são isotrópicos e homogêneos, sendo para tanto, considerando esta prerrogativa nas amostras analisadas. Na Figura 26 apresenta-se a uma função covariograma da imagem da Figura 25, onde é possível apontar o valor de 75 μm na dispersão, como o valor de deslocamento a partir do qual se tem uma aleatoriedade, falta de correlação no meio, ou transição de um meio homogêneo para heterogêneo na correlação da imagem (Fernandes, 1994 *apud* Katz e Thompson, 1985).

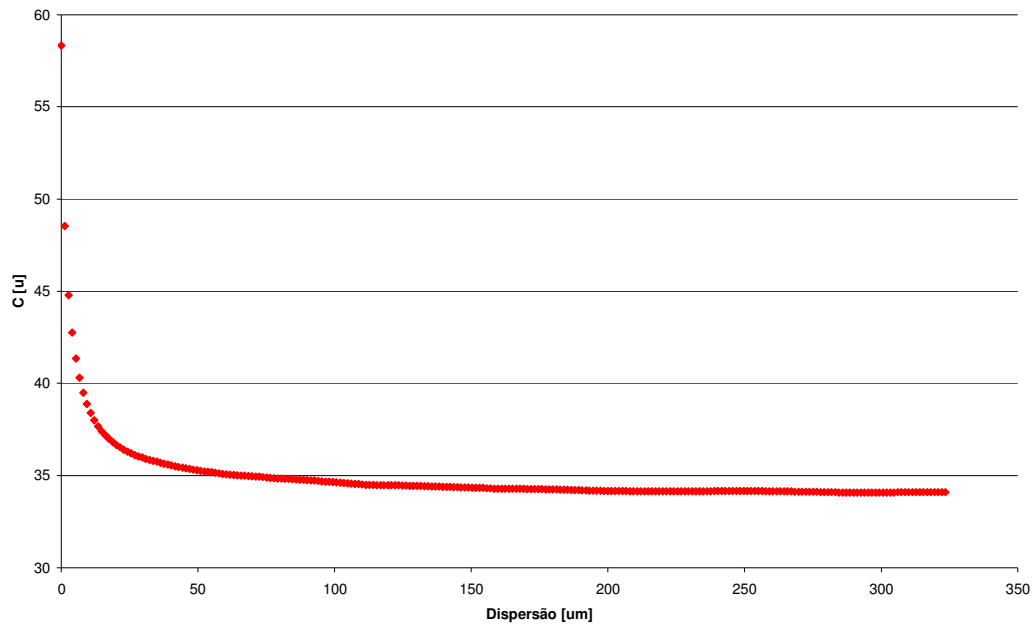


Figura 26. Função covariograma da Figura 25.

Para obter a dimensão fractal Fernandes (1994) parte do pressuposto que um ponto pertencente ao espaço poroso será uma origem arbitrária, onde traçam-se bolas de raios u variáveis, calculando para cada u a freqüência de ocorrências de pontos na borda da bola pertencentes ao espaço poroso. Supondo-se que estas bolas de raio u tenham uma massa M contida no seu interior, tem-se:

$$M(u) = \int_{\text{domínio da bola de raio } u} C(r) d^2r \quad (5.1)$$

Utilizando o seguinte teorema descrito em Gouyet (1992): se existe uma D_f real e uma medida μ finita, positiva tal que para todo $x \in E(B_r(x))$ estando a bola de raio r centrada em x , $\frac{\ln \mu(B_r(x))}{\ln r} \rightarrow D_f$, sendo então $D_f = \dim(E)$, designando-s D_f de dimensão de massa, ou dimensão fractal, como popularizado por Mandelbrot. Com este teorema, obtém-se a relação entre uma massa M de uma bola de raio r com sua dimensão de forma³:

$$M = \mu(B_r(x)) \propto r^D \quad (5.2)$$

³ A notação \propto significa “varia como”: $a \propto b$ significa que a razão a/b tende assintoticamente a uma constante não nula.

Aplicando a equação 5.2 na equação 5.1, tem:

$$M(u) = \int_{\substack{\text{domínio da} \\ \text{bola de raio } u}} C(r) d^2r \propto u^{D_f} \quad (5.3)$$

Podendo-se escrever:

$$C(u) = \frac{d^2M(u)}{du^2} \propto u^{D_f-2} \quad (5.4)$$

obtendo-se assim:

$$C(u) \propto u^{-\alpha} \quad (5.5)$$

onde $\alpha = 2 - D_f$

O valor de α é determinado pela inclinação da parte linear da curva $\ln(C(u)) \times \ln(\text{dispersão})$, mostrada na Figura 27. A faixa linear a ser tomada para cálculo corresponde no seu limite superior a $\ln(75 \mu\text{m})$, neste exemplo.

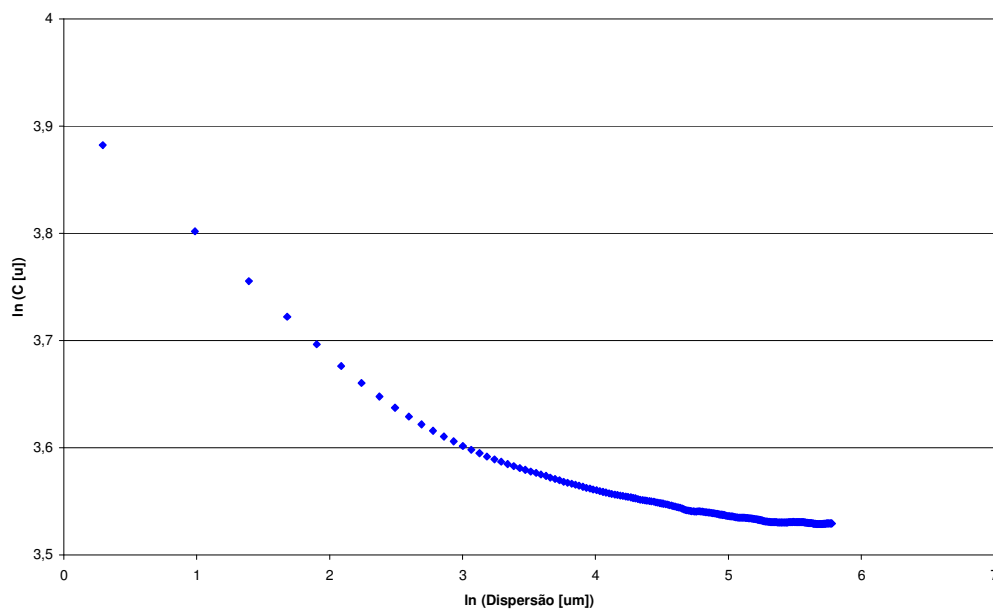


Figura 27. Função $\ln(C(u)) \times \ln(\text{dispersão})$.

6. RESULTADOS OU AVALIAÇÕES PARA METODOLOGIA

6.1. RESULTADO DA ANÁLISE DOS DADOS OPERACIONAIS

Os dados sobre o comportamento das variáveis envolvidas na formação do depósito de cinzas são os primeiros a serem analisados e comparados com a formação do depósito.

Os dados expostos na Tabela 1 expõem as condições a que os depósitos foram submetidos para serem formados. Estes depósitos, contrários às expectativas, formaram-se sobre o corpo do tubo de Pitot e não sobre o corpo da sonda, embora o gradiente de temperatura existente entre a superfície da sonda e os gases de combustão seja teoricamente suficiente para promover a formação através de mecanismos como a termoforesi, a baixa temperatura da superfície da sonda possivelmente impede que as partículas cheguem até ela no estado derretido. Por sua vez, o tubo de Pitot se expande além da região arrefecida da sonda, atingindo assim temperaturas na sua superfície superiores às encontradas na superfície da sonda, propiciando a colisão de partículas em um estado levemente derretido sobre ela.

Tabela 1. Temperaturas aferidas na sonda.

	$T_{\text{mínima}}$ [°C]	$T_{\text{máxima}}$ [°C]
Temperatura dos gases de combustão	640	713
Temperatura da superfície da sonda	73	94

Os depósitos obtidos, como o da Figura 28, apresentam uma estrutura muito porosa e frágil, indicando que o mecanismo de formação preponderante é o de impactação inercial, embora estes depósitos estejam fortemente aderidos à superfície de impacto, indicando a fixação inicial de partículas derretidas e uma sutil atuação do mecanismo de condensação. O esperado para o estudo eram depósitos mais compactos, com maior dureza, originados de um ambiente com temperaturas acima de 1000° C. A relativa baixa temperatura dos gases de combustão, que ocasionam essa fragilidade, deve-se ao afastamento entre o ponto de coleta e o centro da caldeira, que apresenta temperaturas médias acima de 1000° C de acordo com dados obtidos na sala de comando. Os gases afastados da região central perdem energia para as paredes de tubos de água da caldeira, apresentando desta forma temperaturas menores que

os gases na região central, com resultados negativos sobre o potencial de ação de mecanismos de formação de depósitos baseados na temperatura.



Figura 28. Depósito coletado após 1 hora.

Com a identificação do principal mecanismo de deposição, a impactação inercial, a análise da velocidade e da vazão mássica tornam-se importantes, porém, devido ao comportamento extremamente turbulento dos gases, demonstrou-se impraticável a aquisição de ambos os parâmetros através dos procedimentos aplicados. A velocidade apresenta valores alterados por conta da oscilação gerada pela turbulência, e a vazão mássica da mesma forma, por necessitar de uma equalização precisa entre a pressão no sistema de coleta e o interior da caldeira para coletar as cinzas.

Sugere-se que em trabalhos futuros para aferir a vazão mássica seja utilizada uma placa acoplada na extremidade da sonda, para deposição. Porém, a sonda deverá ter uma extensão suficiente para chegar próxima ao centro da caldeira, para que a deposição possa ocorrer de forma mais ostensiva através de outros mecanismos além da impactação inercial.

6.2. RESULTADO DA ANÁLISE MINERALÓGICA

A análise mineralógica foi realizada através do difratograma de cada amostra, construído com os dados fornecidos pela DRX. O comportamento do difratograma de todas as amostras foram iguais ao da Figura 29.

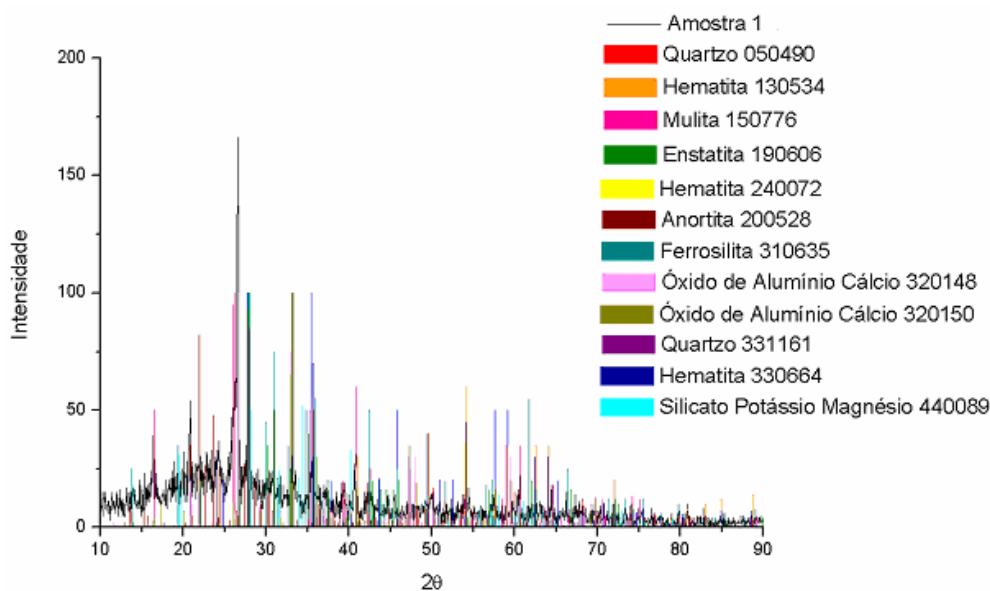


Figura 29. Difratoograma de raios-X de uma amostra de 1 hora.

O intuito desta análise é verificar a existência de compostos característicos a cada etapa de formação e associá-los aos mecanismos de deposição e a capacidade de fixação de cada composto. No entanto, todas as etapas de formação do depósito apresentaram os mesmos constituintes, demonstrando que tais compostos são formados anteriormente à deposição na superfície em regiões mais quentes da caldeira, uma vez que alguns destes compostos — com silício em geral — são formados apenas em ambientes com temperaturas acima das encontradas na região próxima à sonda (Baxter, 2000), contribuindo assim para o raciocínio que indica que a deposição por impacto inercial é o principal mecanismo de deposição de cinzas no caso presente.

Entretanto, não é descartada a hipótese de aglomeração de certos compostos em cada etapa de formação do depósito, visto que alguns compostos apresentam um maior tempo de permanência no estado derretido (Baxter, 2000) ao aproximar-se de uma superfície mais fria, propiciando sua aderência em maior quantidade. Para tanto, fazem-se necessárias análises quantitativas, as quais optou-se por não se realizar por intuir-se que a análise qualitativa demonstraria resultados mais profícuos sobre o depósito, conquanto que houvesse uma maior participação de outros mecanismos de deposição além da deposição por impacto. Alia-se à isto o cronograma que não permitiria uma análise com maior demanda de tempo como a quantitativa. Sugere-se o embasamento em Kniess (2005) para realização de análises quantitativas em trabalhos futuros.

6.3. RESULTADOS DA ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural está dividida em 3 análises — porosidade, distribuição de poros e dimensão fractal — baseadas nas imagens das amostras captadas pelo MEV e trabalhadas no Imago® e que por sua vez, apresentaram algumas particularidades indicadas na imagem da Figura 30.

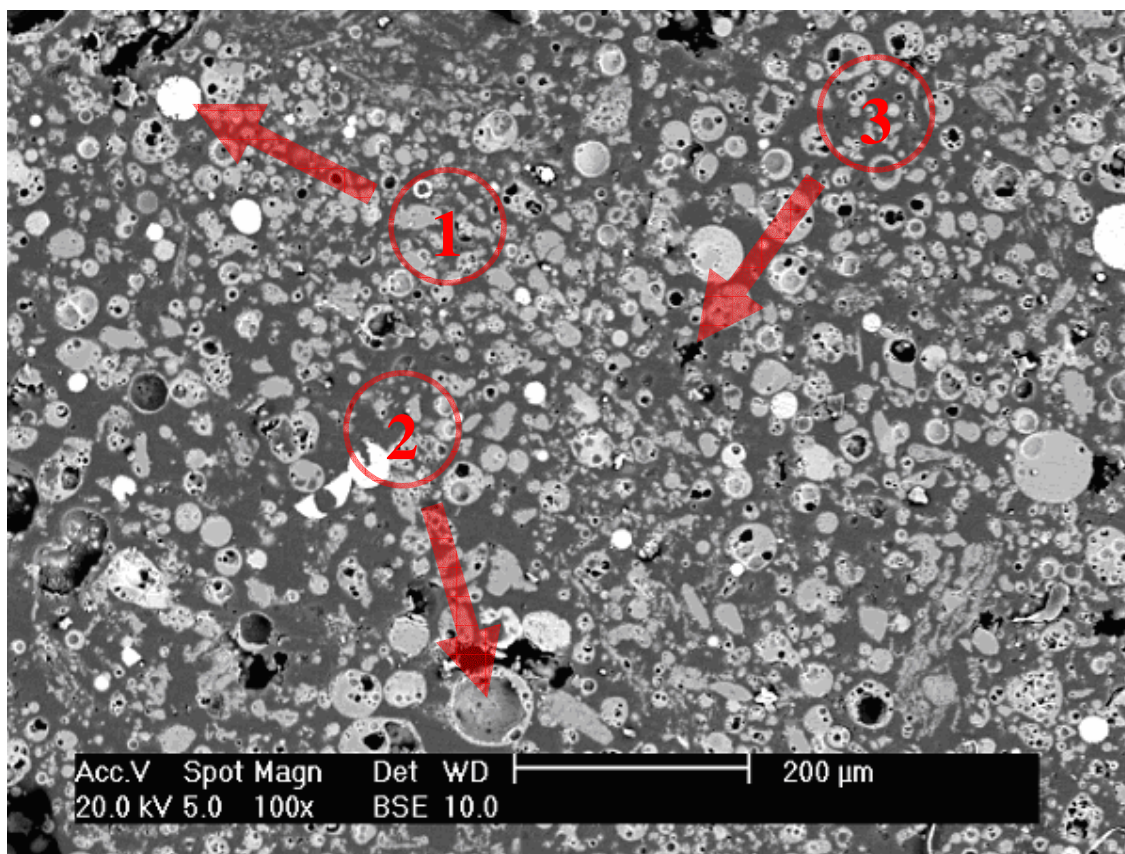


Figura 30. Características adversas da imagem da Figura 24.

Embora os poros e a matriz sólida seja de fácil percepção após a binarização, há elementos que mascaram a real natureza da amostra. No apontamento 1 é indicado um círculo constituído de uma fina camada de resina epóxi que adquiriu a tonalidade branca ao entrar em contato com água durante o processo de lixamento. Na binarização, este poro é tratado como matriz sólida. O apontamento 2 indica um elemento semelhante à uma cratera, possivelmente criado a partir do arrancamento de uma partícula de cinza, uma vez que é descartada a possibilidade de bolha, pois se assim fosse, deveria estar preenchida por resina. Assim, este elemento é caracterizado como um poro ao invés de uma matriz sólida. Por fim o apontamento 3 indica um elemento preto, impossibilitado de ser um poro devido a sua

localização sem restrições à penetração da resina. É possível que este elemento seja uma partícula calcinada, devendo então ser tratado como matriz sólida na binarização, ao contrário do que acontece.

Tais particularidades por serem inerentes à todas as amostras em semelhante grau, apesar do esmero no processamento destas, não prejudicam a caracterização estrutural na forma qualitativa, mas apenas na forma quantitativa. Assim, as análises estruturais estão postadas em forma qualitativa, sem sofrer a interferência das particularidades encontradas nas imagens das amostras.

6.3.1. Análise da Porosidade

A análise da porosidade em termos práticos, indica o quanto da amostra é constituída de poros e por conseguinte, de matriz sólida. No gráfico da Figura 31 é indicada a relação da porosidade entre cada etapa da formação do depósito de cinzas da amostra assim como a evolução do comportamento da porosidade ao longo do tempo de exposição das amostras analisadas.

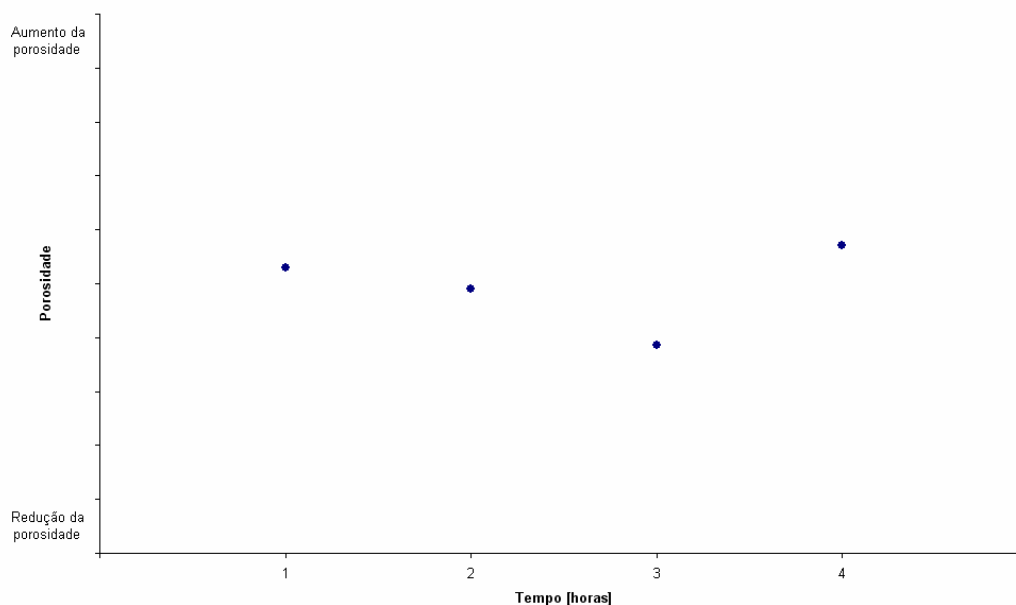


Figura 31. Comparativo da porosidade das amostras ao longo do seu desenvolvimento.

A análise do gráfico associada à teoria discorrida ao longo do trabalho, evidência que um maior tempo de exposição auxilia na redução da porosidade devido ao fato da temperatura dos gases de combustão terem tempo para provocar inícios de sinterização nas partículas de

cinzas, embora os valores de temperatura não sejam suficientes para uma completo processo de sinterização ou até mesmo a fundição dos particulados.

6.3.2. Análise da Distribuição de Poros

A segunda análise estrutural foca o comparativo entre as distribuições dos poros nas amostras, como pode ser visto na Figura 32, e assim como o análise da porosidade, esta é apenas uma avaliação qualitativa.

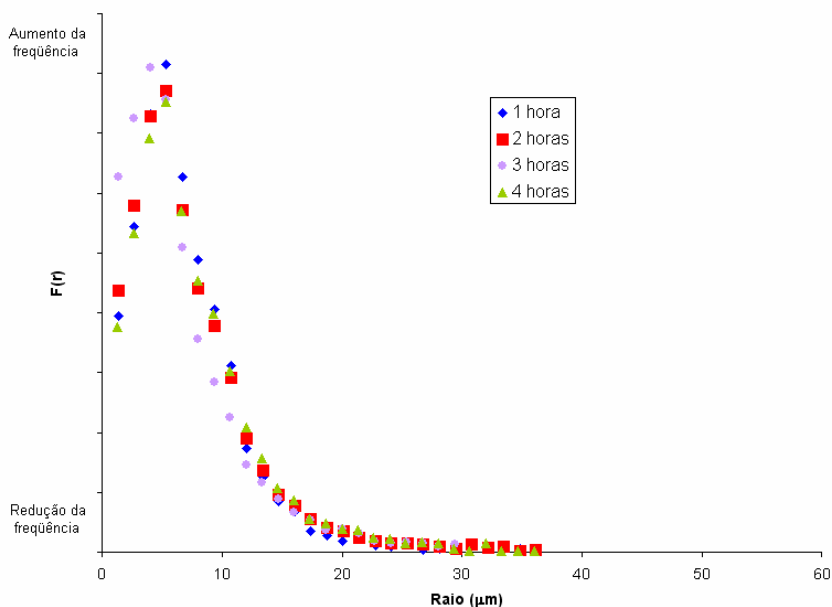


Figura 32. Comparativo da distribuição de poros das amostras ao longo do seu desenvolvimento.

O resultado obtido não permite uma análise adequada acerca do comportamento existente na formação do depósito de cinzas. Em concordância com a porosidade, esperava-se que a cada hora de formação do depósito, estes se apresentassem com um aumento na frequência de poros com menor diâmetro, ou seja, picos de frequência deslocando-se da direita para à esquerda no gráfico com o passar das etapas de formação., indicando uma redução dos poros na amostra diante dos efeitos iniciais de sinterização nas amostras.

A aleatoriedade da distribuição de poros de cada amostra em relação ao comportamento esperado pode residir, além de nas particularidades encontradas, na quantidade de amostras analisadas, necessitando de uma revisão na quantidade necessária para uma análise adequada. Esta aleatoriedade também pode estar associada às condições de formação dos depósitos, as quais apresentam temperaturas relativamente baixas para promover processos completos —

sinterização e fusão — nos depósitos de cinzas, que gerem diferenças consideráveis entre cada etapa.

6.3.3. Análise da Dimensão Fractal

Finalizando a análise estrutural, as dimensões fractais obtidas das amostras de formação dos depósitos de cinzas são expostas na Figura 33

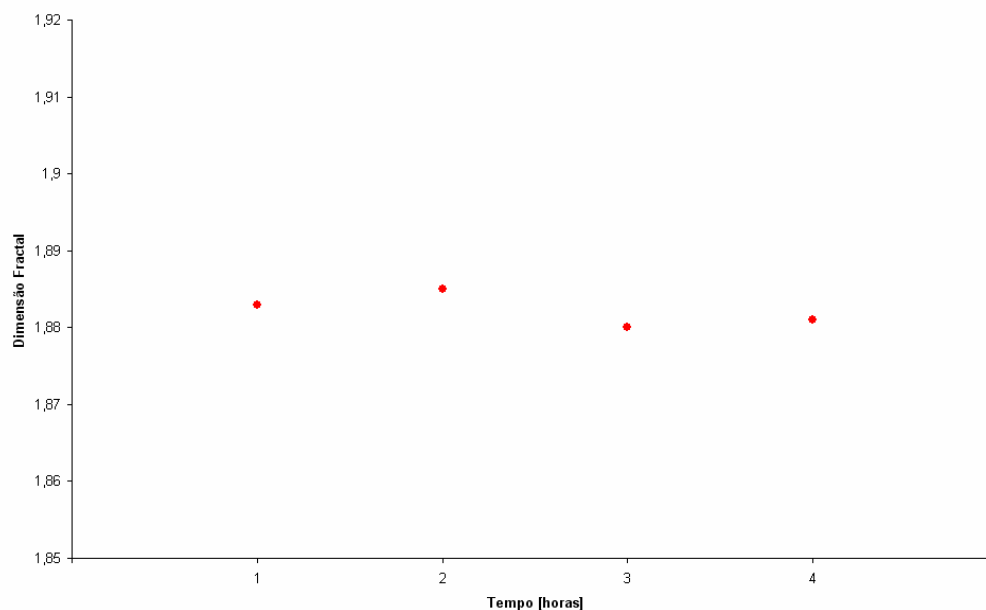


Figura 33. Dimensão fractal dos depósitos ao longo do seu desenvolvimento.

Estes valores de dimensão fractal, assim como a porosidade e a distribuição de poros, apresentam sua forma quantitativa alterada pelas particularidades das imagens, porém optou-se por utilizá-la como indicativo do comportamento da dimensão fractal, uma vez que a forma qualitativa pouco indicaria sobre o comportamento do depósito. Sendo a dimensão fractal traduzida como uma informação global do espaço poroso, a comparação do seu valor com a dimensão fractal de outras amostras semelhantes permitiria saber o quão bem representada está a amostra, mas sua análise qualitativa não tem representatividade, uma vez que sua alteração sem comparação com outro parâmetro é irrelevante.

Assim, estes valores, caso estivessem representando adequadamente a amostra, deveriam ser obtidos sempre que se utilizasse esta metodologia na análise da formação de depósitos de cinzas em caldeiras termoelétricas a carvão pulverizado na região especificada de coleta.

Juntamente à dimensão fractal poderia-se correlacionar os valores de porosidade e distribuição de poros, servindo como um indicativo destas características na formação de depósitos semelhantes a estes, podendo-se correlacionar um depósito de baixa porosidade com um valor de dimensão fractal e assim por diante.

7. CONCLUSÃO

A metodologia proposta para caracterização da formação de depósitos de cinzas é exequível quando requisitada a análise mineralógica e estrutural qualitativamente, excetuando-se a dimensão fractal. A estrutura do depósito ao longo da sua formação, de acordo com as análises de porosidade, tendem com o decorrer do tempo a formar uma estrutura com menor porosidade devido aos efeitos térmicos do ambiente interno da caldeira sobre o depósito. A dimensão fractal torna-se um parâmetro para caracterização da amostra apenas quando as imagens das amostras não apresentam particularidades que afetam sua real representação.

Tornam-se conhecidos os mecanismos de formação preponderantes, as condições que proporcionam esta formação e o procedimento para manuseio e preparação de amostras desta natureza devido às conclusões obtidas em cada análise qualitativa.

Fica nítido diante da verificação da proposta realizada e os resultados obtidos que a metodologia aplicada para análise estrutural da formação de depósitos de cinzas com natureza semelhante às obtidas neste trabalho — extremamente frágil e porosa — seria melhor executada através de métodos que não a análise das imagens, como adsorção de gases e microtomografia de raios-X, porém, veta-se o uso de métodos como picnometria e Princípio de Arquimedes devido a capacidade destrutiva destes sobre o tipo de amostra presente.

Para novos trabalhos, sugere-se:

- uso de uma caldeira em escala laboratorial para formação de cinzas e subsequente captação, onde seja possível controlar os parâmetros de velocidade dos gases, vazão mássica de cinzas e temperaturas dos gases para permitir uma correlação entre todas as variáveis;
- realização de análise mineralógica e estrutural quantitativa;
- construção de algoritmo computacional que faça uso das variáveis para prever a formação de depósitos obtidos experimentalmente.

8. BIBLIOGRAFIA

Acharya U., R., Bhat, P. S., Kannathal, N. Rao, A., Lim, C. M., 2005, *Analysis of cardiac health using fractal dimension and wavelet transformation*. ITBM-RNM, n° 26, 133–139.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil), 2002, *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Brasília, ANEEL.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). *Matriz de Energia Elétrica 2004*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>>. Acesso em: 13 de fev. de 2008.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). *BIG – Banco de Informações de Geração 2008*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 13 de fev. de 2008.

Backes, A. R., Bruno, O. M., 2005, *Estimate Techniques of the Fractal Dimension: A Comparative Study*. INFOCOMP – Journal of Computer Science. Dept. Computer Science, Federal University of Lavras, Brazil, vol. 4, n° 3.

Barabási, A.-L., Stanley, H. E., 1995, *Fractal Concepts in Surface Growth*, New York, NY, USA, Press Syndicate of the University of Cambridge, 366p.

Baxter, L. L., Miles, T. R., Miles, T. R. J., Jenkins, B. M., Milne, T., Dayton, D., Bryers, R. W., Oden, L. L., 1998, *The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences*. Fuel Processing Technology, n° 54, 47–78.

Baxter, L. L., 1998, *Influence of ash deposit chemistry and structure on physical and transport properties*. Fuel Processing Technology, n° 56, 81–88.

Baxter, L. L., 2000, *Final Report: Ash Deposit Formation and Deposit Properties – A Comprehensive Summary of Research Conduct at Sandia's Combustion Research Facility*. Sandia National Laboratories.

Berti, L. F., Mendes, L. J. N., Reimbrecht, E. G., Bazzo, E., 2007, *Morphological and Chemical Characterization of Ash Deposits and Bottom Ash*. 19th International Congress of Mechanical Engineering, Brasília / DF.

Bleicher, L., Sasaki, J. M., 2000, *Introdução à difração de raios-X em cristais*, UFC, Ceará.

Bryers, R. W., 1996, *Fireside Slagging, Fouling, and High-Temperature Corrosion of Heat-Transfer Surface due to Impurities in Steam-Raising Fuels*. Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 22, 29–120.

Calarge, L. M., Silva, N. I. W., Chies, F., Zwonok, O., 1994, *Desenvolvimento de tijolos maciços a partir de cinzas pesadas e cal hidratada. I – Caracterização da cinza pesada. II Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental – Gerenciamento de Resíduos e Certificação Ambiental*. Porto Alegre, Anais, Porto Alegre, PURGS.

Castro, N. J., Cavaliere, R., *As condições de oferta do setor elétrico para 2007*. Boletim bimestral do Grupo de Estudos do Setor Elétrico do IE-UFRJ. Energia em Foco, n° 3, março-abril, 2007.

Deering, W., West, B. J., 1992, *Fractal Physiology*, IEEE Engineering in Medicine and Biology, 40–46.

Falconer, F. J., 1990, *Fractal geometry: mathematical foundations and applications*, Chichester. Editora John Wiley & Sons Ltd., 288p.

Fernandes, C. P., 1994 *Caracterização Morfológica de Espaços Porosos: Reconstituição Multiescala e Simulação de Processos de Invasão de Fluidos Não-molhantes*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Fernandes, M. H. V., Leroy, C., Ferro, M. C., Monteiro, R. C. C., 2001, *Production of glass-ceramics from coal ashes*. Journal of the European Ceramic Society, 21, 195–202.

Fontes, P. M. M., 2004, *Caracterização Experimental e Modelação Numérica de uma Caldeira de Recuperação de Lixívia Negra*. Teses de Doutoramento, IST, Lisboa, Portugal.

Fonseca, M. V. A.; Polivanov, H.; Carvalhaes, G. K., 1994, *Estudo por ATD da concentração ótima de agente nucleante para a cristalização controlada de um vidro desenvolvido a partir de cinzas de carvão*. In: 11º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.

Gerl, P., Schönlieb, C., Wang, K. C., 2004, *The Use of Fractal Dimension in Arts Analysis*, HarFA - Harmonic and Fractal Image Analysis, 70–73.

Gouyet, J.-F., 1992, *Physique et structures fractales*, Ed. Masson, Paris.

Gupta, R. P., Wall, T. F., Kajigaya, I., Miyamae, S., Tsumita, Y., 1998, *Computer-Controlled Scanning Electron Microscopy of Minerals in Coal — Implications for Ash Deposition*. Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 24, 523–543.

Gupta, R., Rushdi, A., Sharma, A., Holcombe, D., 2005, *Mechanistic prediction of ash deposition in a pilot-scale test facility*. Fuel, n° 84, 1246–1258

Harb, J. N., Wang, H., West, J., 1999, *Microanalytical characterization of slagging deposits from a pilot-scale combustor*. Energy & Fuels, Vol. 13, n° 3, 570–578.

Hauchard, E., Laignel, B., Delahaye, D., 2002, *Proposition of a new structural map of the northwestern Paris Basin, based on the fractal analysis of the talweg networks and the new results of regional geology*, C. R. Geoscience 334, 295–302.

Helalizadeh, A., Müller-Steinhagen, H., Jamialahmadi, M., 2000, *Mixed salt crystallisation fouling*, Chemical Engineering Science, n° 39, 29–43.

Helalizadeh, A., Müller-Steinhagen, H., Jamialahmadi, M., 2006, *Application of fractal theory for characterisation of crystalline deposits*. Chemical Engineering Science, n° 61, 2069 – 2078.

Huang, L. Y., Norman, J. S., Pourkashanian, M, Williams, A., 1996, *Prediction of ash depositions on superheater tubes from pulverized coal combustion*. Fuel, vol.75, n° 3, 271-279.

Huffman, G. P., Huggins, F. E., Shad, N., Shad, A., 1990, *Behavior of basic elements during coal combustion*. Prog. Energy Combustion Science, Vol. 91, 12, 243–251.

iPIB. *PIB do Brasil até 2006*. Disponível em: <<http://www.ipib.com.br/>>. Acesso em: 14 de set. de 2006.

Jones, H., 1990, *Dürer, Gaskets and Barnsley's Chaos Game*, Computer Graphics Forum 9, 327–332.

Jung J. S., Park, H. C., Stevens, R., 2001, *Mullite ceramics derived from coal fly ash*. Journal of Materials Science Letters, Vol. 20, n°. 12, 1089-1091.

Kær, S. K., 2001, *Numerical investigation of ash deposition in straw-fired boilers – Using CFD as the framework for slagging and fouling predictions*. Ph.D. thesis, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark.

Kampichler, C., 1999, *Fractal concepts in studies of soil fauna*, Geoderma, n° 88, 283–300.

Kniess, C. T., Borba, C. D. G., Neves, E., Kuhnen, N. C., Riella, H. G., 2002, *Obtaining and Characterizing $Li_2-Al_2O_3-SiO_2$ Glass-Ceramics Using Coal Bottom Ash as Raw Material*. Interceram, vol. 51, n° 2, 140–143.

Kniess, C. T., 2005, *Desenvolvimento e Caracterização de Materiais Cerâmicas com Adição de Cinzas Pesadas de Carvão Mineral*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.

Konstandopoulos, A. G., Kostoglou, M., Rosner, D. E., Gunes D., 1995, *Deposit Growth Dynamics on Cylinders Exposed to the Cross-Flow of Ash-Laden Flue Gases*. Proceedings Fourth Conference of Environment Science & Technology, Ed. T. Lekkas, n° 2, University of the Aegean Press, 122–132.

Konstandopoulos, A. G., 2000, *Deposit growth dynamics: particle sticking and scattering phenomena*. Powder Technology, n° 109, 262–277.

Konstandopoulos, A. G., Kostoglou, M., 2000, *Particulate Deposit Shape Evolution on Cylinders in Cross-Flow at High Stokes Numbers*. Journal of Aerosol Science, Vol. 31, n° 4, 427–436.

Leroy, C. Ferro, M. C., 2001, Monteiro, R. C. C., Fernandes, M. H. V., *Production of glass-ceramics from coal ashes*. Journal of the European Ceramic Society, n°21,195–202.

Lévy, P., 1993, *Plane or Space Curves and Surfaces Consisting of Parts Similar to the Whole*. In Classics on Fractals (Ed. G. A. Edgar) Reading, MA: Addison-Wesley, pp. 181-239.

Lind, T., 1999, *Ash formation in circulating fluidized bed combustion of coal and solid biomass*, Dissertation for the degree of Doctor of Technology, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.

Lockwood, F. C., Lee, F. C. C., 1995, *Modelling ash deposition in pulverized coal-fired applications*. Progress in Energy and Combustion Science, n° 25, 117–132.

Maliska, A. M., *Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise*, Laboratório de Caracterização Microestrutural, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC.

Mandelbrot, B. B., 1967, *How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension*. Science, New Series, Vol. 156, No. 3775, pp. 636-638.

Mandelbrot, B. B., 1991, *Objectos Fractais: forma, acaso e dimensão; seguido de panorama de linguagem fractal*. Lisboa. Editora Gradiva, 296p.

Mavroforakis, M.E., Georgiou, H.V., Dimitropoulos, N., Cavouras, D., Theodoridis, S., 2006, *Mammographic masses characterization based on localized texture and dataset fractal analysis using linear, neural and support vector machine classifiers*, Artificial Intelligence in Medicine 37, 145–162.

Mendes, L. J. N., Bazzo, E., Figueiredo, W., Azevedo, J. L. T., 2005, *Boiler ash deposit characterization of Brazilian pulverized coal using scanning electronic microscopy*. Eighth International Conference on Energy for a Clean Environment, paper Clean Air 14.3, Lisbon.

Mendes, L. J. N., Azevedo, J. L. T., Bazzo, E., 2006, *Large eddy simulation of ash particle deposition around tubes of a boiler superheater*. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT 2006.

Naruse, I., Kamihashira, D., Khairil, Miyauchi, Y., Kato, Y., Yamashita, T., Tominaga, H., 2005, *Fundamental ash deposition characteristics in pulverized coal reaction under high temperature conditions*. Fuel, n° 84, 405–410.

O'Connor, J. J., Robertson, E. F., *Niels Fabian Helge von Koch*, MacTutor History of Mathematics 2000. Disponível em: <<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Koch.html>>. Acesso em: 14 de set. de 2006.

Pogue D. W., Schnell G. D., 2001, *Effects of agriculture on habitat complexity in a prairie-forest ecotone in the Southern Great Plains of North America*, Agriculture, Ecosystems and Environment, n° 87, 287–298.

Reinaldo, R. F., 2004, *Estudo Numérico da Transferência de Calor e Deposição de Cinzas em Caldeiras com Queima de Carvão Pulverizado*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.

Risbud, S., Cumpston, B, Shadman, F., 1992, *Utilization of coal-ash minerals for technological ceramics*. Journal of Materials Science, Vol. 27, n°. 7, 1781–1784.

Rushdi, A., Sharma, A., Gupta, R., 2004, *An experimental study of the effect of coal blending on ash deposition*. Fuel 83, 495–506.

Seames, W. S., 2003, *An initial study of the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion*. Fuel Processing Technology, n° 81, 109–125.

SIESC – Sindicato da Indústria da Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina. *Dados Estatísticos 2007*. Disponível em: <http://www.satc.edu.br/siecesc/conteudo/estatisticas/estatisticas_carvao_2007.pdf>. Acesso em: 23 de fev. de 2008.

Silva, N. I. W., Calarge, L. M., Chies, F., Mallmann, J. E., Zwonok, O., 1999, *Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico*. Cerâmica, Vol. 45, nº 296, São Paulo.

Song, H, Min, L., Jun, X., Lushi, S, Peisheng, L., Sheng, S., Xuexin, S., 2004, *Fractal characteristic of three Chinese coals*, Fuel 83, 1307–1313.

Su, S., Pohl, J. H., Holcombe, D., 2003, *Fouling propensities of blended coals in pulverized coal-fired power station boilers*. Fuel 82, nº 82, 1653–1667.

Tomeczek, J., Palugniok, H., Ochman, J., 2004, *Modelling of deposits formation on heating tubes in pulverized coal boilers*. Fuel, nº 83, 213–221.

Wall, T. F., Bhattacharya, S. P., Baxter, L. L., Richards, G., Harb, J. N., 1995, *The character of ash deposits and the thermal performance of furnaces*. Fuel Processing Technology, nº 44, 143–153.

Woyshville M. J., Calabrese J. R., 1994, *Quantification of occipital EEG changes in Alzheimer's disease utilizing a new metric: the fractal dimension*. Biol Psych, nº 35, 381–387.

Xie, H., Wang, J., 1999, *Direct fractal measurement of fracture surfaces*. International Journal of Solids and Structures, Vol. 36, 3073–3084.

Yamashita. T., Tominaga, H., Orimoto, M., Asahiro, N., 2000, *Modeling of Ash Formation Behavior During Pulverized Coal Combustion*. IFRF Combustion Journal, Article nº 200008.

Yan, L., Gupta, R. P., Wall, T. F., 2001, *The implication of mineral coalescence behavior on ash formation and ash deposition during pulverized coal combustion*. Fuel, nº 80, 1333–1340.