

CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS DE CINZAS DE CALDEIRA COM QUEIMA DE CARVÃO PULVERIZADO

Rafaela Frota Reinaldo

Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici, Fortaleza – CE
rafaela.ufc@gmail.com

Eduardo Gonçalves Reimbrecht

Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina
Trindade, Florianópolis – SC
eduardo@labcet.ufsc.br

Edson Bazzo

Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina
Trindade, Florianópolis – SC
ebazzo@emc.ufsc.br

João Luis Toste de Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica – Instituto Superior Técnico
Campus da Alameda, Lisboa – PT
toste@navier.ist.utl.pt

Resumo. *Um dos principais problemas associados ao uso do carvão mineral para a geração termelétrica é a formação de depósitos de cinzas nas superfícies de transferência de calor. Estes depósitos aumentam a resistência térmica diminuindo assim a eficiência de caldeiras. Neste trabalho é apresentada a caracterização de depósitos de cinzas de uma caldeira existente, através de análise química, microscópica e de imagens. A partir desta caracterização a condutividade térmica do depósito é determinada utilizando diferentes modelos disponíveis na literatura.*

Palavras chave: depósitos de cinzas, análise de imagens geração termelétrica, condutividade térmica

1. Introdução

Apesar dos problemas operacionais e ambientais ocasionados pelo o uso do carvão mineral na geração termelétrica, as previsões mostram que este combustível continuará suprimindo a demanda crescente de energia. Dentre os combustíveis fósseis, o carvão possui a maior reserva, aproximadamente 5 vezes superior às reservas de gás natural ou de petróleo.

Uma das grandes desvantagens do uso do carvão mineral para a geração termelétrica é a geração de cinzas decorrente da presença de compostos inorgânicos no combustível. A cinza leve, formada durante a combustão, é arrastada pelos gases quentes em direção à chaminé. Durante este trajeto, a cinza se deposita nas superfícies de transferência de calor da caldeira formando assim depósitos que se acumulam ao longo do tempo. Estes depósitos possuem baixa condutividade térmica diminuindo a transferência de calor na caldeira, e por conseguinte a sua eficiência. Em casos de deposição acentuada a eficiência térmica da unidade geradora pode ser reduzida em 10% e a redução de eficiência de geração de potência pode atingir 20% .

Os depósitos de cinzas são classificados em escória (slag) e sujamento ou incrustação (fouling), correspondendo respectivamente a terem sofrido ou não mudança de fase. Os depósitos de escória se formam na seção radiativa da fornalha e estão expostos diretamente a radiação proveniente da chama. Usualmente possuem um nível elevado de componentes na fase líquida. Os depósitos de sujamento, ou incrustação, se formam na seção convectiva das unidades geradoras, preferencialmente nos feixes tubulares dos superaquecedores e reaquecedores, e, ao contrário dos depósitos de escória, possuem baixos níveis de fase líquida.

No caso específico das unidades geradoras 5 e 6 do complexo Jorge Lacerda (localizado em Capivari de Baixo – SC), a deposição de cinzas nos feixes dos superaquecedores e reaquecedores é um problema constante na operação das caldeiras. A

Figura 1 (a) apresenta uma fotografia dos tubos do superaquecedor final, onde pode ser observado uma deposição intensa de cinzas. Situações críticas, de formação de grandes depósitos entre os feixes de tubos, também foram observadas, conforme apresentado na

Figura 1 (b). A remoção destes depósitos só é possível de ser realizada manualmente, sendo então necessária a parada da unidade.

A determinação da condutividade térmica dos depósitos de cinzas permite avaliar a sua influência na transferência de calor em caldeiras, sendo necessário caracterizar estes depósitos.



Figura 1 – Depósito de cinzas nos tubos do superaquecedor final.

2. Metodologia

Os depósitos de cinzas nos superaquecedores foram caracterizados através de microscopia eletrônica de varredura, absorção atômica e análise de imagens. A porosidade do depósito de cinzas também foi determinada pelo método de Arquimedes. Uma amostra do depósito analisado é apresentada na Figura 2.



Figura 2 – Depósito de cinzas.

Na Tabela 1 é apresentada a composição do depósito de cinzas obtido através de análise química. A cinza é composta principalmente de óxido de ferro (Fe_2O_3), sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3).

Tabela 1 – Análise química do depósito de cinzas

Componente	(%)
Sílica (SiO_2)	28,02
Alumina (Al_2O_3)	16,63
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	45,99
Óxido de potássio (K_2O)	0,23
Óxido de cálcio (CaO)	2,82
Óxido de magnésio (MgO)	0,41
Óxido de sódio (Na_2O)	0,77
Perda ao fogo	3,17

O somatório dos valores da Tabela 1 não é 100% devido às incertezas de medição e aos componentes não analisados.

2.1. Microscopia

De forma a caracterizar as amostras, foram adquiridas imagens via microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram embutidas a frio com resina epóxi, polidas e cobertas com ouro antes de serem analisadas no microscópio eletrônico de varredura. Foram obtidas imagens com ampliações de 25, 150 e 300 vezes.

2.2. Análise de imagens

Para a quantificação das diferentes regiões presentes nos depósitos de cinzas, bem como para a determinação da sua porosidade e distribuição de partículas foi utilizado o método de análise de imagens. Foi utilizado o programa computacional Imago®, desenvolvido pelo Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais (LMPT – UFSC). O processamento das imagens tem como etapa fundamental a segmentação binária, que consiste na transformação de uma imagem colorida ou em tons de cinza em uma imagem em preto e branco. Uma maior descrição do método de análise de imagens pode ser encontrada em Reimbrecht (2004), e em Fernandes (1994).

2.3. Arquimedes

A porosidade aparente da amostra de depósito de cinzas foi calculada através do “Princípio de Arquimedes”. Para tal propósito, foi utilizada uma balança Marte modelo A1600, com resolução de 0,01g. Neste método são medidos o peso da amostra seca, o peso da amostra suspensa no líquido e o peso da amostra saturada (impregnada) com o líquido, denominados P_{sec} , P_{sus} e P_{sat} respectivamente. O líquido utilizado foi água. A porosidade aparente é dada pela equação (1):

$$\text{Porosidade} = \frac{P_{sat} - P_{sec}}{P_{sat} - P_{sus}} \times 100\% \quad (1)$$

3. Modelos matemáticos

Os parâmetros que influenciam a taxa de transferência de calor são a absorvidade das paredes, a condutividade térmica efetiva e a espessura do depósito de cinzas.

A condutividade térmica dos depósitos de cinzas depende das seguintes características:

- condutividade térmica da fase sólida, k_s ;
- condutividade térmica da fase gasosa, k_g ;
- porosidade;
- distribuição de tamanho dos poros ou das partículas;
- conexão entre as partículas.

As condutividades térmicas das fases sólida e gasosa dependem da composição química e da temperatura. A porosidade dos depósitos depende das condições de sinterização e tempo e varia entre 0,1 para os depósitos de escória fundida (slag) e 0,95 para os depósitos de particulados.

A abordagem mais simples para estimar a condutividade de um meio poroso consiste na aproximação da estrutura porosa em camadas paralelas de sólido e de gás, conforme apresentado na Figura 3. As condutividades térmicas efetivas para camadas alinhadas nas direções normal e paralela ao fluxo de calor são dadas pelas equações (2) e (3), respectivamente:

$$k_e/k_g = e + (1-e)k_s/k_g \quad (2)$$

$$k_e/k_g = \left[e + (1-e)/(k_s/k_g) \right]^{-1} \quad (3)$$

sendo e a porosidade, k_e a condutividade térmica efetiva, k_g a condutividade da fase gasosa e k_s a condutividade do sólido.

As equações (2) e (3) representam os limites inferior e superior da condutividade térmica do depósito para uma dada porosidade.

No trabalho de Rayleigh (1892, *apud* Gupta *et al.* 1999) uma equação exata para a condutividade térmica efetiva para um arranjo cúbico de esferas idênticas, Figura 4 (com limite de porosidade superior a $\pi/6$), inseridas em uma fase contínua, é dada por:



Figura 3 – Estrutura porosa em camadas.

$$\frac{k_e}{k_c} = \left[\frac{(2+r)/(1-r) - 2p}{(2+r)/(1-r) + p} \right] \quad (4)$$

sendo k_d e k_c as condutividades das fases discreta e contínua, respectivamente, r a razão entre as condutividades (k_d/k_c) e p a fração volumétrica da fase discreta. Esta equação pode ser utilizada para slags considerando as bolhas de gases como a fase discreta e a fase sólida contínua. Para o caso de depósitos de particulados é feita uma consideração oposta.

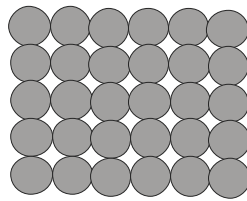


Figura 4 – Arranjo de cúbico de esferas, modelo de Rayleigh.

No trabalho de Russell (1835, *apud* Gupta *et al.* 1999) é determinada a condutividade térmica de um arranjo de cubos conforme a Figura 5.

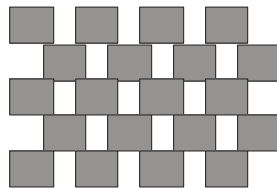


Figura 5 – Arranjo de cubos, modelo de Russell.

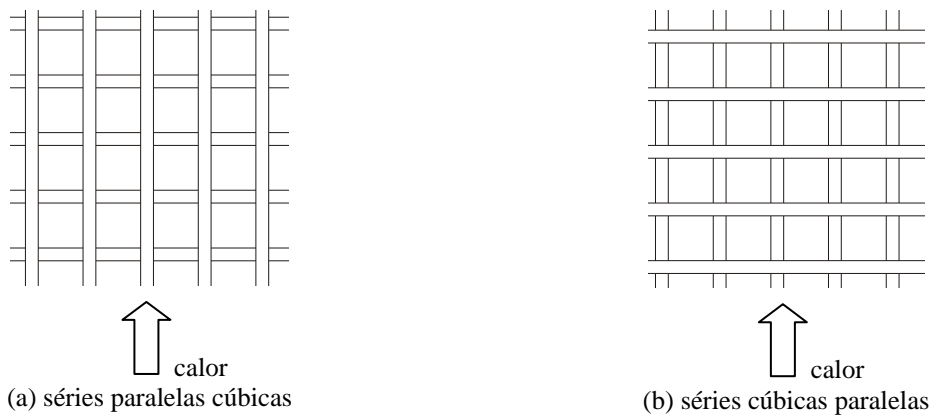


Figura 6 – Estrutura de células cúbicas, modelo de Leach.

A vantagem desse modelo, com relação ao modelo de Rayleigh é que não há limite para o valor da porosidade da estrutura, sendo a condutividade efetiva dada por:

$$\frac{k_e}{k_c} = \frac{r \cdot p^{2/3} + (1 - p^{2/3})}{r \cdot (p^{2/3} - p) + (1 - p^{2/3} + p)} \quad (5)$$

Para a determinação da condutividade térmica de materiais esponjosos Leach (1993) considerou um empilhamento de células cúbicas de duas formas conforme apresentado na Figura 6. No modo de séries paralelas cúbicas (CSP) é considerado que as camadas de gás e do material composto o empilhamento é normal à direção de transferência de calor, no modo de séries cúbicas paralelas (CPS) considera um empilhamento paralelo à direção de transferência de calor:

$$\frac{k_e}{k_s} = r \cdot \frac{2 - r + (r - 1) \cdot p^{1/3}}{1 - (p - 1)^{1/3}} \quad (6)$$

O modelo de séries cúbicas paralelas considera as camadas de material composto (gás+sólido) empilhadas na direção normal à transferência de calor, Figura 6 (b). Este modelo é semelhante ao proposto por Russell. No modelo de séries paralelas cúbicas, o arranjo do material composto é paralelo à direção de transferência de calor, e a sua condutividade efetiva é calculada através das equação (7):

$$\frac{k_e}{k_c} = \frac{2r - 1 + (1 - r) \left[(1 - p) + p^{1/3} \right]}{r + (1 - r)p^{1/3}} \quad (7)$$

4. Resultados

4.1. Caracterização das amostras

Na Figura 7 é apresentada uma microscopia do depósito de cinzas recolhida no superaquecedor com um aumento de 25 vezes, onde são observadas três regiões distintas, que serão denominadas clara, cinza e escura, além dos pontos pretos correspondentes a resina epóxi. A informação qualitativa da composição é obtida por meio do método *backscattered electron* (BSE), onde o brilho de um ponto em particular está associado a sua composição elementar. A região mais clara possui a um alto percentual de ferro, enquanto que as regiões cinza e escura possuem elevados percentuais de silício e alumínio, conforme apresentado na Figura 8.

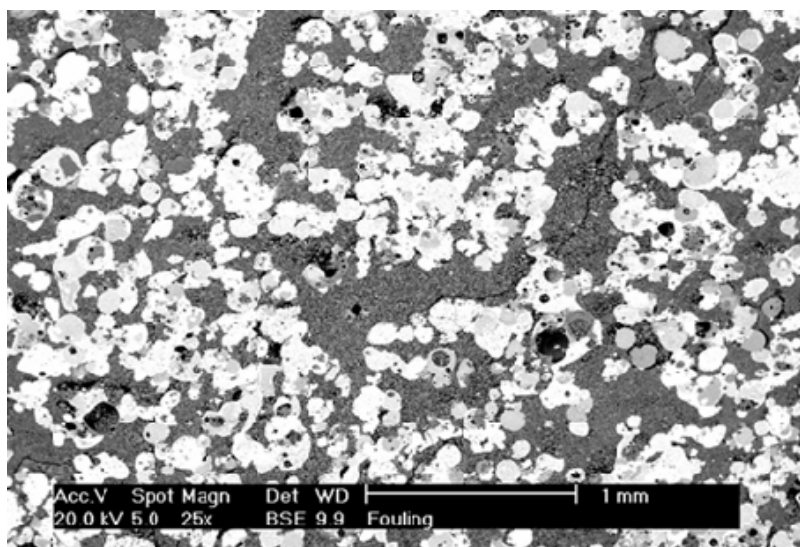


Figura 7 – Imagem obtida via microscopia eletrônica do depósito de cinzas com aumento de 25x.

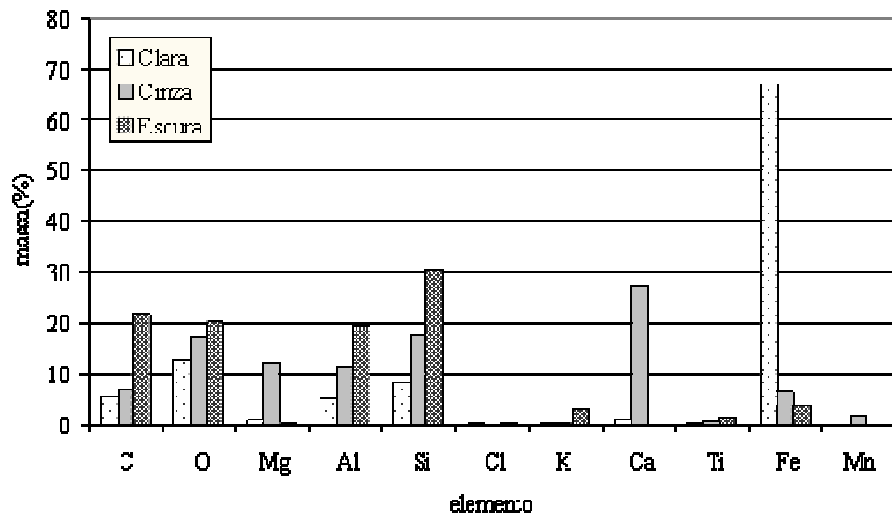


Figura 8 – Composição química elementar do depósito de cinzas.

Na Figura 9 apresenta uma microscopia com um aumento de 150 vezes, onde é possível observar que a região clara, rica em ferro, apresenta um elevado grau de sinterização.

Na Figura 10 é apresentada uma microscopia com um aumento de 300 vezes, onde é possível observar a região denominada escura, rica em silício e alumínio com maiores detalhes. Esta região é composta por esferas com um menor grau de sinterização quando comparada à região clara.

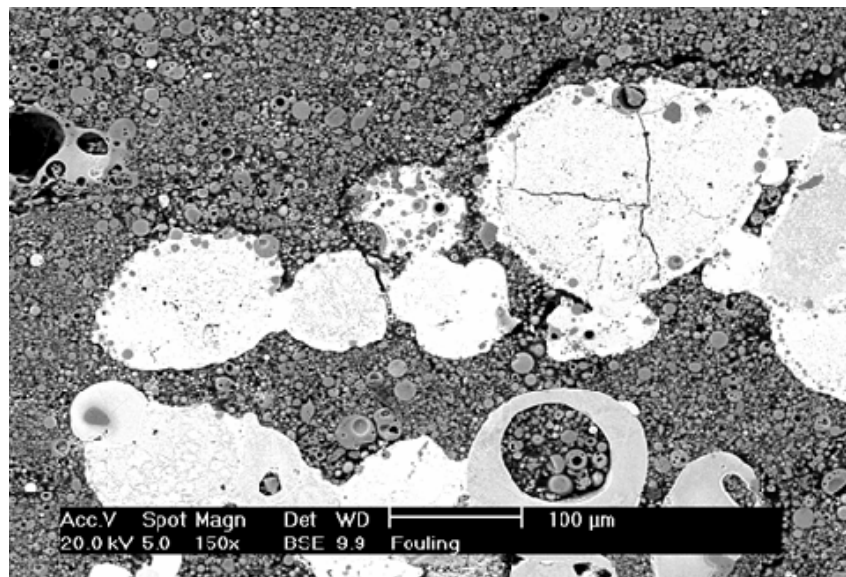


Figura 9 – Imagem obtida via microscopia eletrônica do depósito de cinzas com aumento de 150 x.

A Figura 11 apresenta a imagem binarizada da microscopia eletrônica do depósito de cinzas com aumento de 25 x, correspondente a Figura 7. Na Figura 11 (a), a região branca corresponde às regiões denominadas clara (rica em ferro) e cinza (rica em alumínio, silício e cálcio) na imagem original, sendo desta forma a região preta correspondente às regiões denominadas escura (rica em alumínio e silício), bem como aos poros presentes no depósito. O percentual da área da região branca corresponde a 49,5% da área total, correspondendo assim ao somatório das regiões denominadas clara e cinza. Na Figura 11 (b), a região branca corresponde à região denominada clara (rica em ferro) da imagem original, e o seu percentual corresponde a 36% da área total. Desta forma, a região cinza corresponde a 14% da área total.

A Figura 12 apresenta a imagem binarizada da microscopia eletrônica do depósito de cinzas com aumento de 300 x, correspondente a Figura 10. A região branca corresponde às partículas de cinza depositadas e, por conseguinte, a região negra corresponde aos poros do depósito. A área branca representa 55,5%, portanto os poros representam 44,5% da área total da imagem.

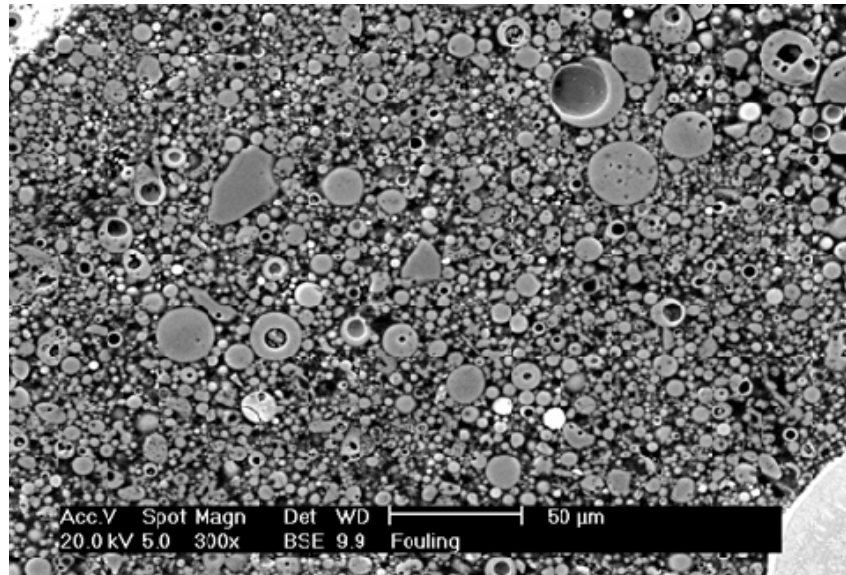
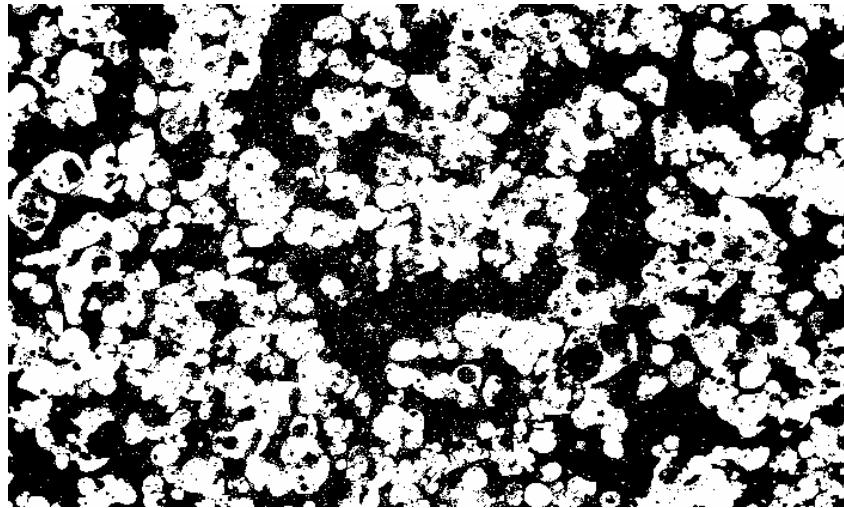
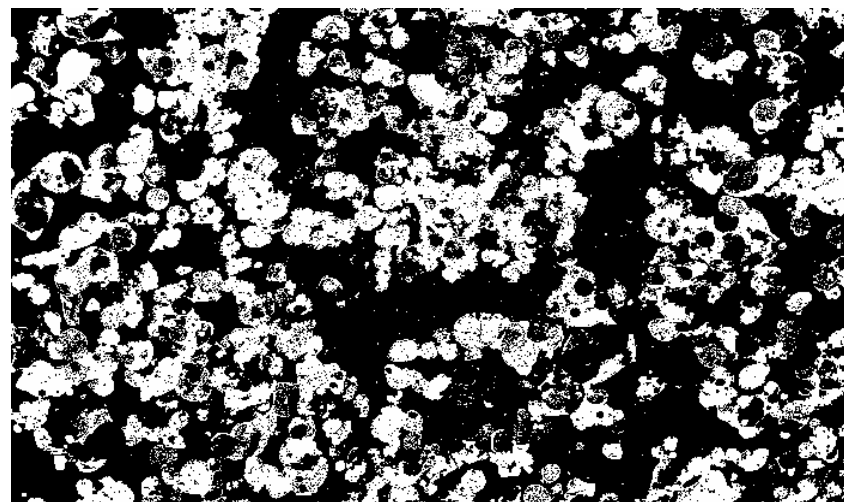


Figura 10– Imagem obtida via microscopia eletrônica do depósito de cinzas com aumento de 300 x.



(a)



(b)

Figura 11 – Imagem binarizada da microscopia eletrônica do depósito de cinzas com aumento de 25 x.

Sabendo então que a porosidade da região denominada escura é de 44,5%, e que esta região representa 50,5%, a porosidade da amostra do depósito de cinzas, determinada pela multiplicação destes dois valores, é igual a 22,5%.

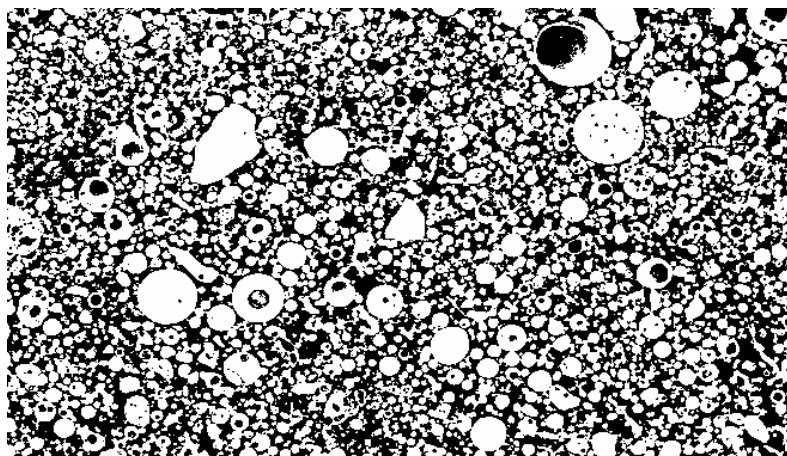


Figura 12 – Imagem binarizada da microscopia eletrônica do depósito de cinzas com aumento de 300 x.

Foram analisadas duas amostras de depósitos e os valores medidos de P_{sec} , P_{sus} e P_{sat} , e as porosidades calculadas através do método de Arquimedes são apresentados na Tabela 2

Tabela 2 – Porosidade dos depósitos de cinzas

Amostra	P_{sec} (g)	P_{sus} (g)	P_{sat} (g)	Porosidade (%)
1	42.494	26.9004	47.1034	22.8
2	18.2584	12.0688	19.8922	20.9

4.2. Condutividade térmica

A Figura 13 apresenta o gráfico com os valores das condutividades calculados através dos modelos apresentados anteriormente. Conforme comentado no início desta seção os valores das condutividades efetivas para os arranjos em série e em paralelo representam os limites inferior e superior, respectivamente. Conforme o aumento da sinterização do material, ocorre a formação de uma fase sólida contínua, aumentando assim a condutividade do material, conforme pode ser observado na Figura 13.

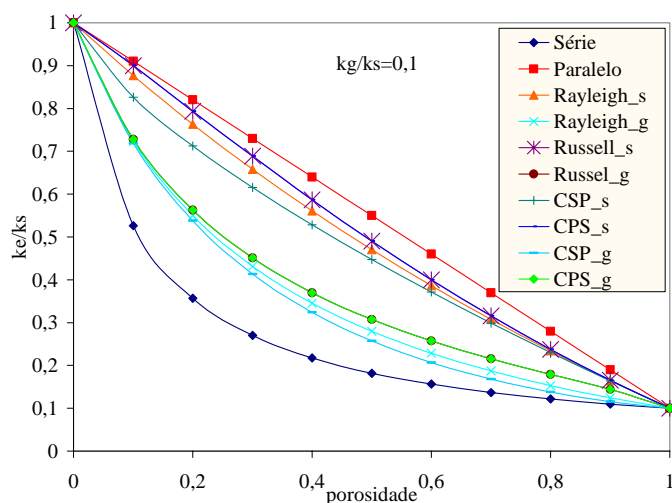


Figura 13 – Coeficiente de transferência de calor efetivo.

Para uma temperatura de 1000K, as condutividades da sílica, alumina e do óxido de ferro são 2,87;7,85 e 5,69 W/(m·K), respectivamente. Para o ar atmosférico a sua condutividade térmica a 1000K é de 0,0667 W/(m·K). Para a região correspondente à Figura 10, com porosidade de 44,5% são calculados os valores para a condutividade efetiva baseado nos modelos apresentados previamente. É assumida apenas a presença de sílica e alumina. A condutividade da fase sólida é calculada pela média ponderada com fração mássica de cada um dos componentes. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 14. Observa-se uma grande diferença nos resultados do mesmo modelo, para fase sólida contínua e para fase gasosa contínua. Entre os modelos, para a mesma fase contínua observa-se uma concordância dos resultados. Para fase gasosa contínua, o valor previsto para a condutividade efetiva é de aproximadamente 0,3 W/(m·K), enquanto que para a fase sólida contínua esse valor é de 2 W/(m·K). Os valores mínimo e máximo previstos são de 0,16 e 2,5 W/(m·K), respectivamente.

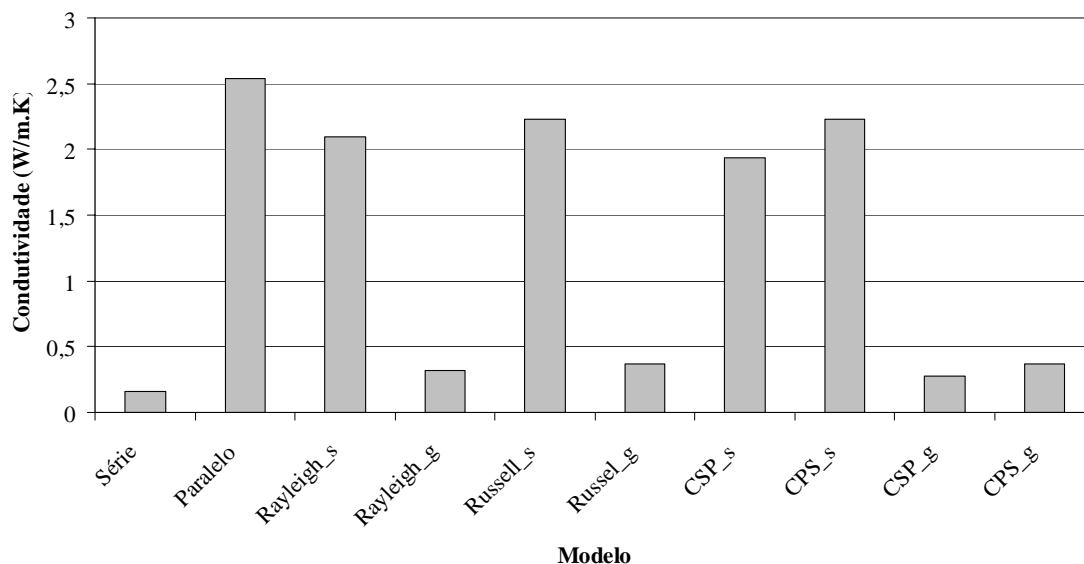


Figura 14 – Condutividade térmica efetiva, porosidade = 44,5%.

5. Conclusões

A partir da caracterização do depósito de cinzas, com a determinação da sua porosidade e composição química foi possível determinar a sua condutividade térmica utilizando diversos modelos disponíveis na literatura. Os valores da condutividade previstos dependem principalmente da consideração de qual fase é contínua, a sólida ou a gasosa, com uma variação de mais de 400%. A variação do valor de condutividade previsto pelos modelos, assumindo a mesma fase contínua, é de apenas 25%.

6. Referências

- Fernandes, C.P., “ Caracterização Morfológica de Espaços Porosos: Reconstituição Multiescala e Processo de Simulação de Invasão de Fluidos Não-molhantes”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- Gupta., R.P., Wall, T.F., Kajigaya, I., Miyamae,S. e Tsumita, Y., “Computer Controlled Scanning Electron Microscopy of Minerals in Coal – Implications for the Ash Deposition”, Prog. Energy Combustion Science, Vol. 24, pp.523 – 543, 1998.
- Leach, A. G., “The thermal conductivity of foams. I. Models for heat conduction”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 26, pp. 733 – 739, 1993.
- Reimbrecht, E. G., “Fabricação, Caracterização Geométrica e Determinação de Propriedades Hidráulicas de Elementos Porosos para Uso em Bombas Capilares”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pela bolsa de estudos de R.F. Reinaldo.

ASH DEPOSIT CHARACTERIZATION OF PULVERIZED COAL-FIRED UTILITY BOILER

Rafaela Frota Reinaldo
Mechanical Engineering Department – Federal University of Ceara
Campus do Pici, Fortaleza – CE
rafaela.ufc@gmail.com

Eduardo Gonçalves Reimbrecht
Mechanical Engineering Department – Federal University of Santa Catarina
Trindade, Florianopolis – SC
eduardo@labcet.ufsc.br

Edson Bazzo
Mechanical Engineering Department – Federal University of Santa Catarina
Trindade, Florianopolis – SC
ebazzo@emc.ufsc.br

João Luis Toste de Azevedo
Mechanical Engineering Department – Technical Superior Institute
Campus da Alameda, Lisboa – PT
toste@navier.ist.utl.pt

Abstract

One of the main problems associated with the use of pulverized coal in thermoelectric generation is the ash deposit formation into the heat transfer surfaces. These ash deposits increase the thermal resistances decreasing the boiler efficiency. In this work the characterization of ash deposit in boilers are presented taking care of chemical, microscope and image analysis. Form this analysis the thermal conductivity of ash deposit is determined using different models available in literature.

Keywords: Ash Deposit, Image analysis, thermoelectric generation, thermal conductivity