

Caracterização de cinzas sulfatadas de carvão visando utilização na indústria de cimento - reconstrução mineralógica do carvão de Candiota (Brasil)

Eduardo Rodrigo Ramos de Santana¹, Carlos Hoffmann Sampaio¹, Elba Calessio Teixeira², Pierre-Antoine Andréani³, Jean-Charles Benezet³, Pierre Adamiec³, Ali-Benhassaine³ & Rosvita Schütz⁴

Resumo O Brasil passou por um período de crise energética em 2000. Contudo, este país apresenta vastas reservas de carvão que poderiam ser mais exploradas. Depois da crise o consumo de carvão teve algum incremento, mais estudos deveriam ser feitos a fim de minimizar as emissões de SO_x e o aproveitamento das cinzas. As propriedades das cinzas dependem das características dos minerais que as originaram e da temperatura de combustão. A maioria dos sistemas empregados para queima é de combustão em leito pulverizado (1200-1600°C) ou fluidizado (850°C - mais comum fora do Brasil). Este artigo apresenta um estudo preliminar das características físicas do carvão, como tamanho e superfície, submetida a diferentes temperaturas com a finalidade de compreender seu comportamento nestas condições. A reconstrução mineralógica do carvão também foi desenvolvida.

Palavras-chave: cinzas de carvão, carvão, SO₂.

Abstract *Sulfated coal ashes characterization aiming its utilization in cement industry - mineralogical reconstruction of Candiota coal (Brazil).* Brazil has experienced a small period of power crisis in 2000. However this country has large resources of coal that could be more explored. Afterwards, coal consumption got some improvement, but studies about its properties should be made to minimize SO_x emissions and to develop ashes utilization. The ashes properties are different according to the mineral characteristics and the combustion temperature. Most ordinary coal combustion systems are the pulverized (1200-1600°C) or fluidized (850°C) ones. This paper presents a preliminary study of coal physical characteristics, like particle size and surface, under different temperatures to understand its behavior. Mineralogical reconstruction of coal was also developed.

Keywords: coal ash, coal, SO₂.

INTRODUÇÃO

Histórico do carvão no Brasil Fontes renováveis, como biomassa, energias solar e eólica tendem a ocupar maior participação na matriz energética mundial, mas o carvão deverá continuar sendo, por muitas décadas, o principal insumo para a geração de energia elétrica, especialmente nos países em desenvolvimento (EIA 2006). Cerca de 80% do consumo energético mundial ainda provém de combustíveis fósseis como o carvão, petróleo e gás natural. Acredita-se que a dependência deste tipo de combustível deve se estender por muitos anos ainda (Chevalier 2001, Huffman & Wender 2001, Tissot 2001). Dados sobre a produção, o consumo e o tempo de uso das reservas de carvão também indicavam sua longevidade, conforme a tabela 1 (Atlas-Carvão 2005).

Apesar disto, o carvão tem sido relegado a um segundo plano no Brasil. Até 2000, ano da maior crise

energética já vivida no Brasil, a produção de energia atingia 72.208 MW e era predominantemente hídrica (97%). Atualmente, observa-se uma tendência: o Brasil e o mundo caminham para diversificação das fontes de energia. Ou seja, é importante aproveitar, em cada região, os potenciais hídricos, carboníferos, eólicos, solares etc. O carvão é um dos recursos energéticos brasileiros que não pode ser desprezado. Suas reservas, por si só, seriam suficientes para suprir a demanda energética brasileira por algumas décadas.

RESERVAS DE CARVÃO Cerca de 90% dos depósitos de carvão do Brasil se concentram no Rio Grande do Sul (Ramgrab 2000). De acordo com o Departamento Nacional e Produção Mineral (DNPM 2006) as reservas totais de carvão correspondem a um montante aproximado de 24 bilhões de toneladas. Sendo reservas inferidas, indicadas e medidas de 27%, 45% e 28% respectivamente.

1 - UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale, Centro de Tecnologia, Laboratório de Processamento Mineral, Porto Alegre (RS), Brasil. E-mail: errasantana@gmail.com, sampaio@ufrgs.br

2 - FEPAM - Fundação de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler, Porto Alegre (RS), Brasil. E-mail: gerpro.pesquisa@fepam.rs.gov.br

3 - EMA - Centre des Matériaux de Grande Diffusion, Ecole des Mines d'Ales, Alès, França. E-mail: pierre-antoine.andreani@ema.fr, jean-charles.benezet@ema.fr, pierre.adamiec@neuf.fr, ali.benhassaine@ema.fr

4 - UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Depto. Geologia Ambiental - Campus do Vale, Porto Alegre (RS), Brasil. E-mail: vitaschutz@yahoo.com.br

Tabela 1 - Reserva e produção mundial de carvão.

	Reservas (R)		Produção (P)		Consumo (C)		R/P*
	10 ⁶ Ton	Participação no Total (%)	10 ⁶ Ton	Participação no Total (%)	10 ⁶ TEP	Participação no Total (%)	Anos
América do Norte	257.783	26,2	1.072	22,2	592	24,7	240,4
América do Sul e Central	21.752	2,2	54	1,1	17,8	0,7	404,3
Europa e antiga URSS	355.370	36,1	1.161	24,0	506,1	21,1	306,1
África e Oriente Médio	57.077	5,8	231	24,0	99,0	4,1	373,4
Ásia (Pacífico)	292.471	29,7	2.315	47,9	1.184	49,4	126,4
Total	984.453	100,0	4.833	100,0	2.398	100,0	203,7
Brasil	11.929	1,2	5,80	0,1	12,00	0,5	> 500

*Tempo que as reservas durariam, sem novas descobertas e com nível de produção de 2002.

A distribuição destas reservas e as características dos carvões Brasileiros são apresentadas nas tabelas 2 e 3, respectivamente. As reservas de economicidade comprovada não superam 1 bilhão de toneladas.

Candiota é a maior jazida de carvão fóssil do país com cerca de 40% dos recursos totais conhecidos. Sua área compreende 2000 km² e 23 camadas, os recursos totais atingem 12,3 bilhões de toneladas.

SITUAÇÃO ATUAL Características do carvão brasileiro como o alto teor de cinzas, baixo poder calorífico e potencial de impacto ambiental sempre entravaram seu uso. De certa forma, este retardo trouxe como benefício a possibilidade de sua utilização contando com novas tecnologias de combustão mais limpas, de maior rendimento térmico e, mais recentemente, com a possibilidade de uso de métodos de sequestro de CO₂, um dos gases do efeito estufa (Caldwell *et al.* 2007, Figueroa 2008). O aumento da eficiência de rendimento energético também contribui para redução das emissões de CO₂. Ademais, pesquisas com intuito de captura do dióxido de carbono avançam consideravelmente.

O desenvolvimento da combustão limpa do carvão no Brasil também apresenta o histórico de algumas pesquisas realizadas. Sendo os calcários da região sul do Brasil abundantes e, em sua maioria metamórficos e dolomíticos, se mostraram agentes de dessulfuração eficazes (Ferret 1990, Carvalho 1993, Santana 1993). Portanto, há um futuro promissor para este combustível que ainda deverá ser empregado por um bom tempo, até as outras formas de obtenção de energia mais limpas se tornem também mais viáveis economicamente e tecnicamente.

O Estado do Rio Grande do Sul passou por algumas crises de energia, em abril de 1998 e nos meses de janeiro e fevereiro de 1999, quando houve 31 cortes. Em decorrência disto, o governo estadual investiu R\$ 200 milhões elevando a disponibilidade de energia em 20,58%. Ou seja, de 3400 MW para 4100 MW no início de 2001. Hoje, a contribuição do carvão na matriz energética do Rio Grande do Sul ainda é modesta

Tabela 2 - Reservas de carvão no Brasil.

Estado	Medida	Indicada	Inferida	Total	%
Maranhão	1,1	1,7	-	2,8	-
Paraná	4,6	-	-	4,6	-
São Paulo	3,0	1,8	1,4	6,2	-
Santa Catarina	1424,8	601,5	217,2	2243,5	9,4
Rio Grande do Sul	5280,8	10100,3	6317,1	21698,2	90,6
Total	6714,3	10705,3	6535,7	23955,3	100

Fonte: DNPM (2006).

Tabela 3 - Características de carvões brasileiros.

	PCS (kcal/kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Paraná	4850	30	44	7,0
Santa Catarina	2750	21-26	58-62	4,3-4,7
Rio Grande do Sul				
Candiota	3200	23	52	1,6
Outros RS	3000-4500	23-30	40-55	0,5-2,5

Legenda: PCS - Poder Calorífico Superior. Fonte: DNPM (2006).

(13%), mas houve um incremento em relação ao ano de 2000 (7,2%). Atualmente há 7 centrais termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil, totalizando 1415 MW de potência instalada (Tab. 4).

Também são previstas novas instalações e ampliações que virão a incrementar a oferta de energia (Tab. 5).

Cinzas geradas e suas aplicações no meio cimenteiro
As cinzas têm grande aplicação na indústria cimenteira, diferentes da argila, não precisam ser secas e moídas,

Tabela 4 - Termoelétricas em operação em 2009 no Brasil.

Usina	Potência (MW)	Proprietário	Município
Charqueadas	72	Tractebel Energia S/A	Charqueadas - RS
Figueira	20	COPEL	Figueira - PR
Jorge Lacerda	857	Tractebel Energia S/A	Capivari de Baixo - SC
Presidente Médici	446	CGTEE	Candiota - RS
São Jerônimo	20	CGTEE	São Jerônimo - RS

Tabela 5 - Termoelétricas em fase de construção, de viabilização e/ou licenciamento.

Em fase de construção			
Usina	Potência (MW)	Proprietário	Município
Candiota III	350	CGTEE	Candiota - RS
Em fase de viabilização e/ou licenciamento			
Figueira (ampliação)	125	Figueira +COPEL	Figueira - PR
Seival	500	COPELMI	Candiota - RS
CTSul	650	Grupo Chinês	Cachoeira do Sul - RS
Sul-Catarinense	440	USITESC	Santa Catarina

Fonte: ANEEL (2007).

são fáceis de transportar, amostrar e dosar.

Assim, os cimentos chamados pozolânicos são misturas de cimentos Portland e material pozolânico natural ou artificial. Pozolanas são materiais contendo sílica e alumina em formas reativas capazes de se combinar com cal em presença de água para gerar compostos com propriedades "cimentosas".

Outro aspecto importante é que o emprego de subprodutos como matéria-prima, ao invés de resíduos, tem caráter ecológico. A utilização de cinzas, ou de outras pozolanas artificiais, permite resolver o problema de sua disposição final e são várias as aplicações estudadas para as cinzas como a produção de materiais de construção, de eletrólitos para agricultura, de reagentes para sorção de poluentes etc. Ao mesmo tempo, há uma redução do consumo de recursos naturais, de energia de fabricação de cimentos e de emissões de CO₂ (Huffman & Wender 2001, John & Zordan 2001, Klemes & Stehlík 2007, Taku *et al.* 2007). As cinzas tradicionais obtidas a partir do cimento são chamadas de sílico-aluminosas. Quando calcário é empregado para prevenir

a emissão de óxidos de enxofre à atmosfera, obtêm-se cinzas sulfatadas cuja aplicação direta é dificultada pela presença de enxofre e ocorrência de fissuras em materiais de construção devido à natureza dos compostos hidratados formados. É possível acrescentar ao processo de combustão um agente pozolânico para permitir, ao mesmo tempo, a captura do enxofre pelo calcário e agregar características que permitam o emprego destas cinzas de caráter distinto das sílico-aluminosas e das sulfatadas. Assim, o volume de cinzas geradas seria maior, mas cabe avaliar seu valor agregado decorrente de novas propriedades. Oportunamente, os demais experimentos complementares nos quais foram empregados outros minerais em conjunção com o carvão, para controle de poluição e para desenvolvimento de aplicações das cinzas, serão discutidos. Contudo, neste artigo se pretende discutir essencialmente as propriedades do carvão e de cinzas sílico-aluminosas. Assim, serão abordadas as metodologias para reconstrução da mineralogia do carvão, a caracterização de suas cinzas individuais, a variação de sua granulometria e superfície, com a elevação da temperatura.

MATERIAIS E MÉTODOS O carvão utilizado provém da mina de Candiota, maior jazida da região sul do Brasil. Este carvão é empregado na Usina Presidente Médici sendo que sua combustão é realizada em leito pulverizado (> 1400°C). Amostras de cinzas desta termelétrica também foram analisadas. A calcinação das amostras de carvão foi realizada em forno tipo mufla, sendo o aquecimento programado, da temperatura ambiente até a almejada (450, 850 ou 1050°C), a uma taxa de 10°C/min. O forno permaneceu no patamar pretendido durante 8 h e depois a temperatura decresceu a uma taxa de 10°C/min. Abaixo de 100°C, a amostra restou em um dessecador até atingir a temperatura ambiente.

A composição química do carvão e das cinzas foi determinada através da fluorescência de raios X, o aparelho empregado é da marca Philips, modelo PW 1400. O enxofre foi determinado pelo método dos ajustes dos dados (ou da adição padrão).

A análise cristalográfica mineralógica do carvão e das cinzas foi efetuada com um aparelho Philips PW 1729 com uma varredura de 3 a 63 graus (2θ). As análises microscópicas foram realizadas com um microscópio ótico Orthoplan dotado de luz polarizada. Também foi empregado um microscópio eletrônico de varredura Jeol JSM-35 CF.

A densidade dos materiais estudados foi medida com um picnômetro Micromeritics-Multivolume 1305.

Para análise granulométrica do carvão e das cinzas, foi empregado um granulômetro a laser, marca Coulter, modelo LS230. A faixa de medição usual deste equipamento oscila entre 0,3 μm e 2 mm. Estas análises foram realizadas em via úmida, sendo etanol o líquido portador. Utilizou-se ultrassom para desagregar as amostras antes e durante a análise granulométrica. Os tempos de ultrassom e de análise foram de 180 e 30 s respectivamente. Este conjunto de parâmetros foi

adotado depois de vários testes e se mostrou satisfatório para dispersão das amostras. O software peaksolve foi utilizado para deconvolução da curva granulométrica. Também foi analisada a variação das superfícies BET, Blaine e específica, com a elevação da temperatura. A superfície BET foi medida com um aparelho Coulter SA 3100 e o gás empregado foi o nitrogênio. A superfície Blaine é bastante utilizada no meio cimenteiro e a superfície específica é determinada pelo granulômetro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise química e mineralógica A composição química, bem como a umidade e o teste de perda ao fogo do carvão são apresentados na tabela 6.

A análise cristalográfica revelou os minerais presentes no carvão conforme representados na figura 1.

Estes dados confirmam as análises apresentadas em outros trabalhos: predominância de quartzo, presença de caulinita, pirita e outros.

MICROSCOPIA ÓTICA E ELETRÔNICA

A microscopia, ótica (MOP) e eletrônica (MEV-EDX), foi utilizada para representar algumas das fases minerais identificadas pela difração (Fig. 1). Algumas destas fases mineralógicas foram identificadas nas figuras 2 a 5.

RECONSTRUÇÃO MINERALÓGICA DO CARVÃO

O cruzamento dos resultados anteriores de fluorescência e difração de raios X, corroborados pela microscopia ótica e eletrônica, permitiu determinar com mais precisão a constituição mineralógica do carvão. Assim, foi possível reconstruir o carvão graças à combinação destas metodologias e da estequiometria. A figura 6 mostra os resultados obtidos na reconstrução do carvão.

Análise granulométrica

AMOSTRA ORIGINAL A análise granulométrica do carvão é apresentada na figura 7. A deconvolução mostrou a existência de 5 subpopulações granulométricas cuja proporção também é apresentada nesta figura.

Mais dados são apresentados na tabela 7 apresentada mais adiante.

Tabela 6 - Umidade, perda ao fogo e composição química do carvão.

Constituinte	%	Constituinte	%	Constituinte	%	Constituinte	%
SiO ₂	30,95	MgO	0,40	Na ₂ O	0,38	P ₂ O ₅	0,03
Al ₂ O ₃	9,43	MnO	0,04	K ₂ O	0,97	Cr ₂ O ₃	0,01
Fe ₂ O ₃	2,97	CaO	0,43	TiO ₂	0,40		
Total = 46,01%							
S pirítico*	1,15	Umidade	1	Perda ao Fogo			54

* Obtido pelo método dos ajustes dosados.

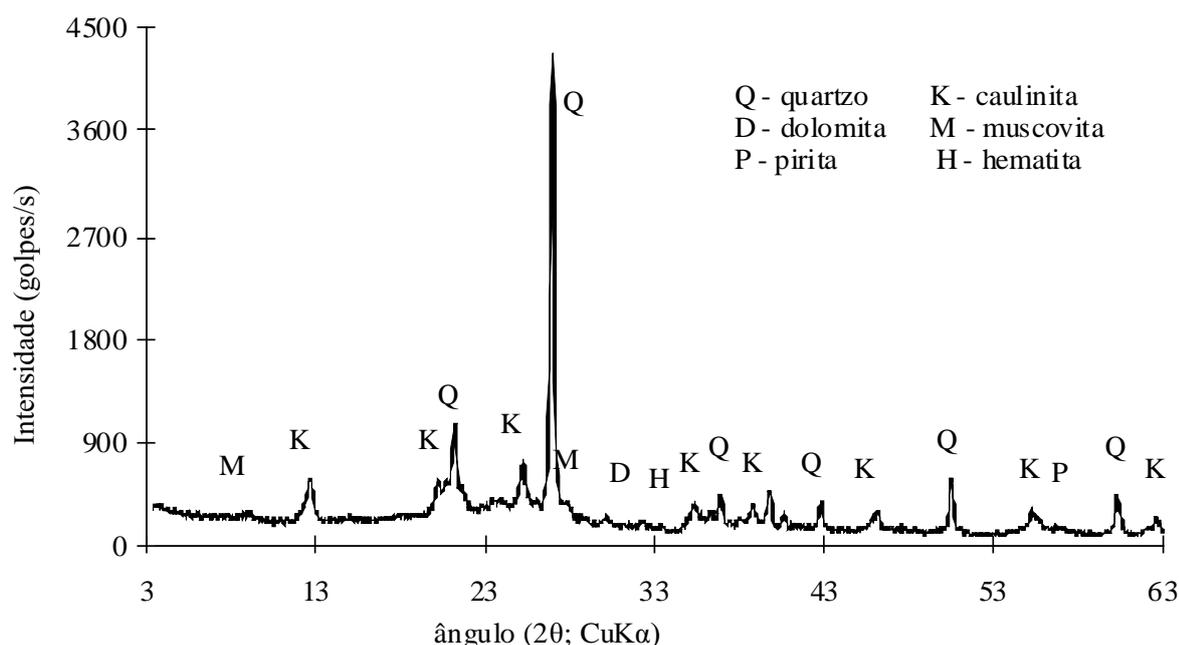


Figura 1 - Análise mineralógica do carvão (difração de raios X).

Tabela 7 - Dados complementares da análise granulométrica do carvão em função da temperatura (em μm).

Amostra	Não calcinado	Calcinado - Temperatura de Calcinação			
		450°C	850°C	1050°C	1600°C
Média (μm)	176,2	77,45	84,07	109,4	66,83
Mediana (μm)	94,67	32,94	38,31	51,45	37,65
D10 (μm)	6,101	3,892	3,578	6,316	4,18
D50 (μm)	94,67	32,94	38,31	51,45	37,65
D90 (μm)	470,4	204,3	224,2	285,6	163,7

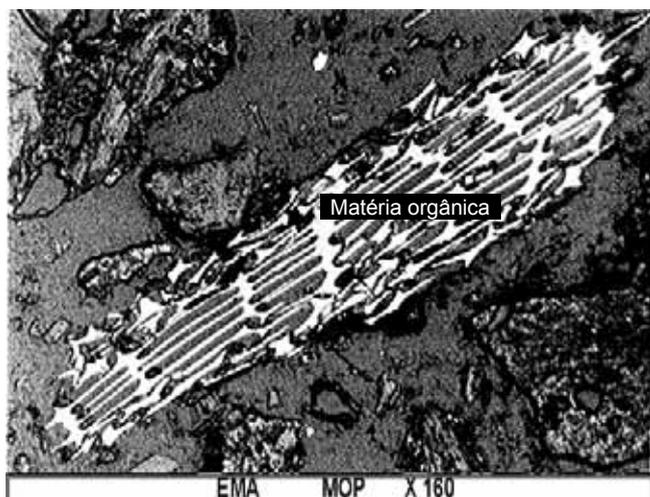


Figura 2 - Matéria orgânica contendo carbono.

AMOSTRA CALCINADA A análise granulométrica do carvão em função da temperatura revela que o produto calcinado ou semicalcinado apresenta uma granulometria inferior em relação à amostra original. Todavia, com a elevação da temperatura concorrem, pelo menos, dois fenômenos opostos: a decrepitação e a sinterização.

A redução das partículas devido à liberação de gases (CO_2 , H_2O etc.) provoca o aumento da pressão interna, isto é, a decrepitação. Como consequência, ocorre a fragmentação dos grãos e enriquecimento das populações mais finas.

Em contrapartida, a elevação da temperatura também pode provocar o amolecimento e aglomeração de algumas partículas devido a condições físico-químicas locais. Isto é a sinterização a qual contribui para o incremento das frações de grossos.

A figura 8 ilustra os fenômenos mencionados anteriormente, os quais são ratificados na tabela 7.

Observa-se que o diâmetro médio dos produtos calcinados é sempre inferior ao do carvão. Nota-se também que o diâmetro médio se eleva com a temperatura na faixa de 450 a 1050°C. Provavelmente, neste intervalo de temperatura a sinterização prevalece sobre

a decrepitação. Contudo, as análises das cinzas da termelétrica calcinadas entre 1200 e 1600°C revelam um diâmetro médio menor. Neste caso, é possível que a decrepitação tenha sido predominante. Mas, é possível que outros fenômenos de fragmentação como o atrito, por exemplo, tenham também acentuado o efeito de redução de granulometria do material da termelétrica. Os fenômenos da decrepitação e da sinterização são observados em todos os materiais com menor ou maior intensidade. Por esta razão, houve uma dispersão através de ultrassom antes da análise granulométrica.

ANÁLISE DA SUPERFÍCIE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA Foram realizadas 3 medidas diferentes de superfície em função da temperatura: específica etano-granulométrica, sob ultrassom com intensidade 4 (SEEG US4), Blaine e BET, conforme ilustra a figura 9. Ou seja, estas medidas serviram, principalmente, como indicativas de comportamento.

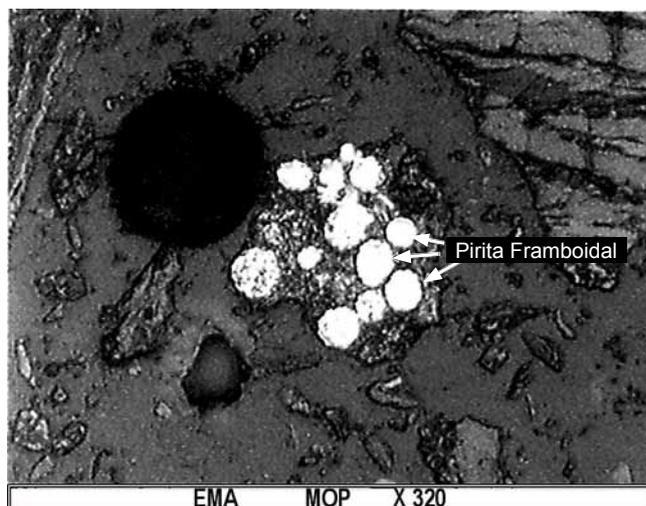


Figura 3 - Pirita Framboidal.

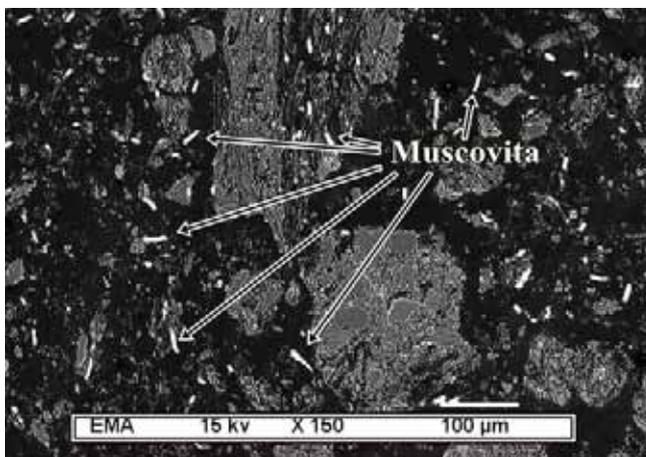


Figura 4 - Muscovita identificada nos traços claros da foto.

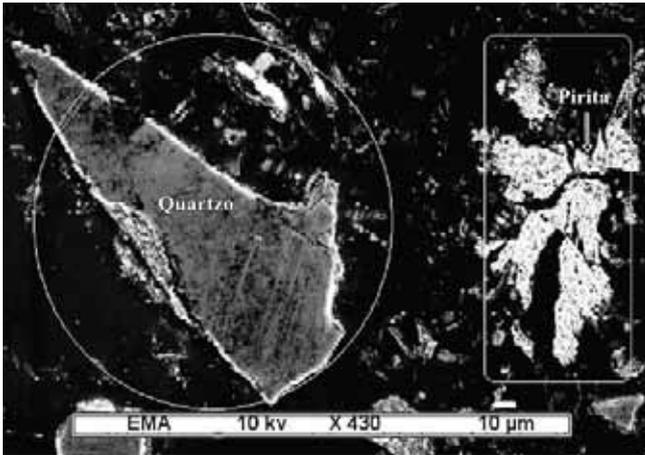


Figura 5 - Quartzo e Pirita oxidada (análise de cinzas).

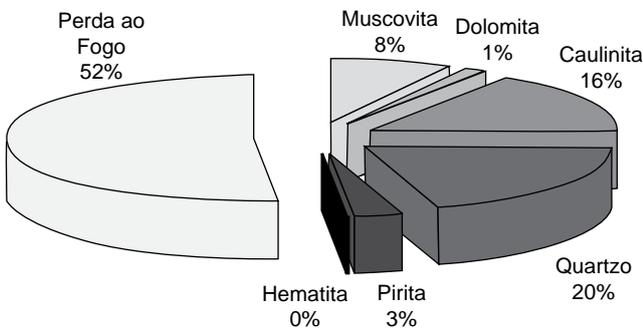


Figura 6 - Constituição mineralógica do carvão obtida por reconstrução.

Observou-se que o carvão não apresentou variação significativa de SEEG até 850°C, apenas a 1050°C houve um decréscimo mais acentuado. Entretanto, as cinzas da termelétrica, calcinadas a maior temperatura (1200-1600°C), apresentaram uma SEEG maior. Este comportamento é condizente com análise granulométrica do carvão calcinado em laboratório. Provavelmente, no caso das cinzas da termelétrica, outros fenômenos de fragmentação contribuíram para redução granulométrica e aumento da SEEG. Warpechowski *et al.* (1999) realizaram um trabalho de caracterização das cinzas sílico-aluminosas da usina termelétrica de Candiota para aproveitamento cerâmico e também obtiveram maiores valores de superfície (2500-3500 cm²/g).

A superfície Blaine apresentou certo desenvolvimento a 450°C e, a partir de então, houve um decréscimo contínuo com a elevação da temperatura.

Observou-se que a superfície BET sofre uma redução contínua durante todo intervalo de temperatura (25-1500°C). Esta diminuição da SEEG e BET é um reflexo do aumento da sinterização, ou seja, da aglomeração com o decorrer do tratamento térmico. Andrade (1985) também estudou as cinzas da mesma termelétrica obtendo uma superfície BET de 4185 cm²/g. Isto foi similar à medida obtida com a amostra provinda da termelétrica (4380 cm²/g). Contudo, esta medida de superfície foi bem maior para todos os tipos de cinzas calcinadas em mufla a 850°C.

As cinzas sílico-aluminosas apresentaram uma superfície BET de 39570 cm²/g. Entretanto, resultados preliminares indicam que as cinzas sulfatadas apresentam superfície BET bem mais expressiva (127 a 152 mil

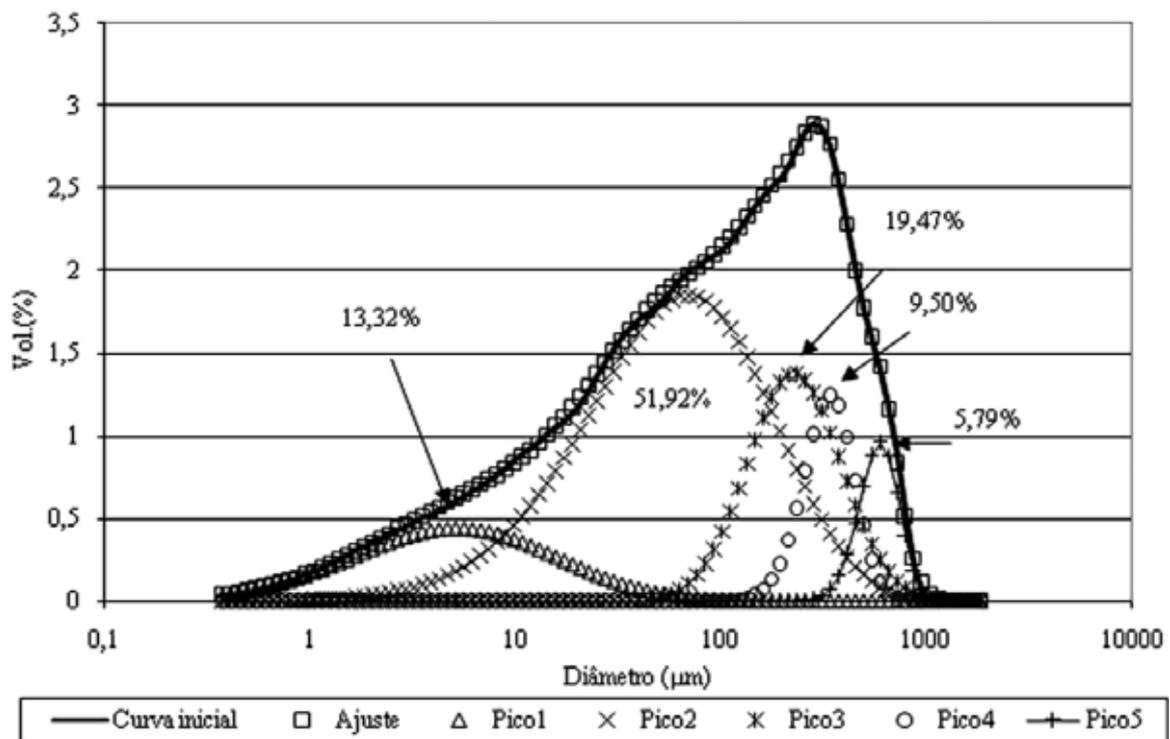


Figura 7 - Distribuição granulométrica do carvão e subpopulações constituintes.

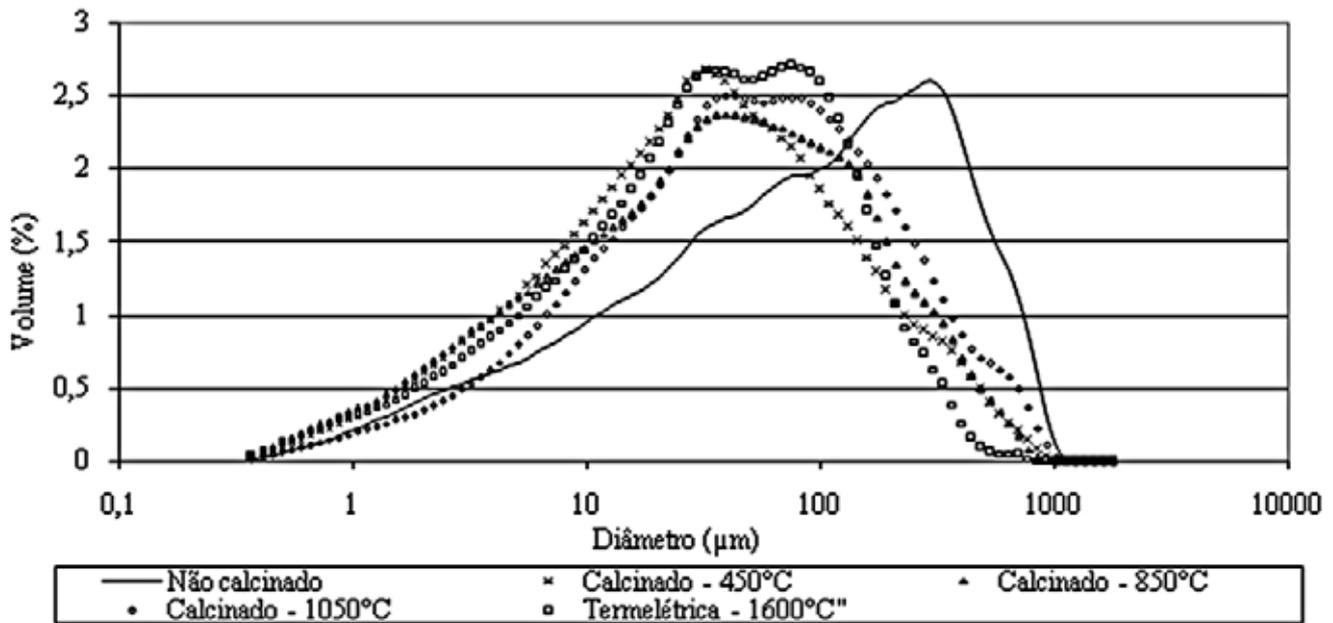


Figura 8 - Distribuição granulométrica do carvão bruto e calcinado a diferentes temperaturas.

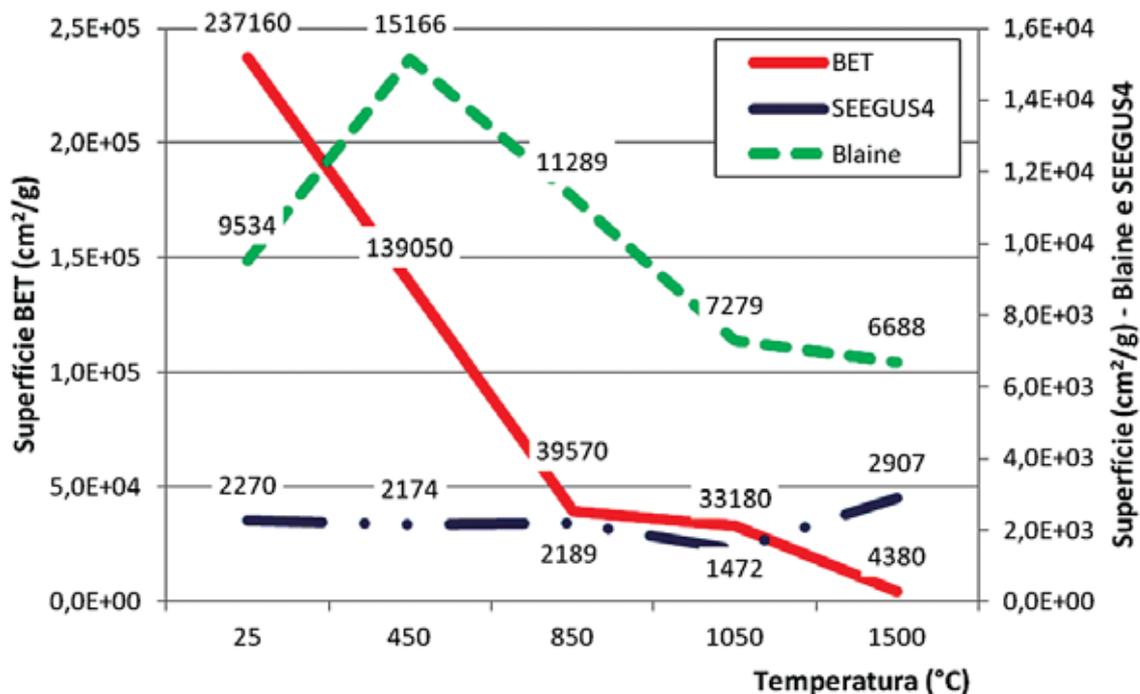


Figura 9 - Variação da superfície em função da temperatura.

cm²/g). Sendo esta uma característica promissora, merece aprofundamento, já que pode contribuir para o maior aproveitamento de cinzas na construção civil. As diferenças entre os resultados e os tipos de superfície mensurados decorrem das diferentes capacidades de acesso destas técnicas à área interna e externa das partículas. Além disso, a validade destas metodologias é restrita a faixas granulométricas distintas. Ou seja, estas medidas foram mais indicativas de comportamento.

CONCLUSÕES A análise granulométrica indicou que a amostra de carvão analisada é multimodal, isto é, existe mais de uma população granulométrica que faz parte de sua constituição. Além disso, com a elevação da temperatura observa-se a ocorrência de 2 fenômenos concorrentes: a sinterização e a decrepitação. O primeiro consiste na aglomeração decorrente do tratamento térmico e, portanto, contribui para o aumento da granulometria. O segundo decorre da liberação de gases

(H₂O, CO₂ etc.) do interior das partículas. Isto promove a ruptura de algumas partículas com consequente redução granulométrica. Em geral, as cinzas calcinadas de carvão nas diversas temperaturas apresentam diâmetro inferior ao carvão original. Entre 450 e 1050°C o diâmetro médio se eleva com o aumento da temperatura, indicando que a sinterização passa a predominar sobre a decrepitação com a elevação da temperatura. Entretanto, as cinzas da termelétrica, obtidas entre 1200 e 1600°C apresentaram diâmetro médio menor. Isto leva a crer que a decrepitação e/ou outros mecanismos de fragmentação, como o atrito, que também contribui para este fenômeno, passam a ser mais significativos. Observou-se, também, que com a elevação da temperatura as curvas das cinzas obtidas no forno apresentam aspecto similar à amostra proveniente da termelétrica. Até 850°C as medidas de superfície, específica (SEEG US4) e Blaine, sofreram pouca oscilação. A 1050°C foram observadas superfícies Blaine e SEEG menores. A amostra da termelétrica (1200-1600°C) também apresentou menor

superfície Blaine, mas uma SEEG maior. Para a superfície BET se constatou um decréscimo contínuo com a elevação da temperatura. As diferenças de magnitude são decorrentes das diferentes capacidades de acesso poroso de cada medida. Contudo, com poucas exceções, uma redução de superfície ocorre com a elevação da temperatura. Resultados preliminares indicam que cinzas sulfatadas podem desenvolver uma superfície mais expressiva. Portanto, visto o incremento de demanda energética, do consumo de carvão e, por conseguinte, das cinzas geradas, este é um tema que necessita maior aprofundamento a fim de promover a utilização deste material, contribuindo para sustentabilidade ambiental através da economia de recursos naturais.

Agradecimentos Agradecimentos a CAPES pelo suporte financeiro. A CRM pela doação do carvão para realização dos ensaios. A École des Mines d'Alès que cedeu a infraestrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Andrade, A. 1985. *Caracterização das cinzas volantes do carvão de Candiota*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 152 p.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. 2007. *Citação de referências e documentos eletrônicos*. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acessado em: 09/02/2007.
- Atlas-Carvão. *Citação de referências e documentos eletrônicos*. 2005. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao(2).pdf). Acessado em 15/12/2005.
- Caldwell I.M. et al. 2007. An integrated assessment model of carbon sequestration benefits: A case study of Liping county, China. *Journal of Environmental Management*, **85**(3):757-773.
- Carvalho M.L. 1993. *Dessulfuração dos gases da combustão do carvão via adição de calcário*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 119 p.
- Chevalier J.M. 2001. Énergie, consommer moins & mieux. *Science and Vie*, **214**:6-43.
- DNPM – Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. 2006. *Anuário Mineral Brasileiro*. Disponível em: http://www.DNPM.gov.br/assets/galeriaDocumento/AMB2006/I_2006.pdf. Acessado em 11/09/2007.
- EIA - Energy Information Administration. 2006. *Citação de referências e documentos eletrônicos*. Disponível em: <http://useconomy.about.com/od/governmentagencies/p/DOE.EIA>. Acessado em 02/06/2006.
- Ferret L.S.1990. *Dessulfuração de gás de carvão, captura de H₂S via calcário em gaseificador leito fluidizado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 163 p.
- Figuroa J.D. et al. 2008. Advances in CO₂ capture technology. *Journal of Greenhouse Gas Control*, **2**:9-20.
- Ramgrab G.E. et al. 2000. Principais recursos minerais do Rio Grande do Sul. In: Holz, M. e De Ros, L.F. (eds.) *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, CIGO/UFRGS, p. 407-440.
- Huffman G.P. & Wender I. 2001. Fuel science in the year 2000: an introduction. *Fuel Processing Technology*, **71**(1-3):1-6.
- John V.M. & Zordan S.E. 2001. Research & development methodology for recycling residues as building materials - a proposal. *Waste Management*, **21**:213-219.
- Klemeš J. & Stehlík P. 2007. Heat integration, energy management, CO₂ capture and heat transfer enhancement. *Applied Thermal Engineering*, **27**(16):2627-2632.
- Santana E.R.R. 1993. Dióxido de enxofre: impacto ambiental e dessulfuração -caso aplicado aos gases da combustão do carvão recreio em leito fluidizado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 119 p.
- Taku Ide S., Jessen K., Orr Jr. F.M. Storage of CO₂ in saline aquifers: Effects of gravity, viscous, and capillary forces on amount and timing of trapping. *Original Research Article International Journal of Greenhouse Gas Control*, **1**(4):481-491.
- Tissot B. 2001. Quel avenir pour les combustibles fossiles? Lês avances scientifiques et technologiques permettront-elles la poursuite d'un développement soutenable avec lês énergies cabonnées? What a future for fôssil fuels? Will scientific and technological progresses warrant growth of use in carbon-based fuel? *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA*, **333**(12):787-796.
- Warpechowski et al. 1999. Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. *Cerâmica*, **45**(296):184-187. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69131999000600004>.

Manuscrito ID 15394

Submetido em 24 de junho de 2010

Aceito em 09 de dezembro de 2010