

# OBTENÇÃO DE CERMETS POR METALURGIA DO PÓ CONVENCIONAL A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DAS CINZAS DA QUEIMA DE CARVÃO MINERAL<sup>1</sup>

André Carvalho Tavares<sup>2</sup>

Vinícius Martins<sup>3</sup>

Diego Pacheco Wermuth<sup>2</sup>

Paulo Mariot<sup>4</sup>

Ruth Agustini<sup>5</sup>

Lírio Schaeffer<sup>6</sup>

## Resumo

A queima do carvão mineral resulta em dois tipos de cinzas uma de maior granulometria e outra de menor granulometria, sua composição apresenta uma predominância de óxidos de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$ . Esses materiais são empregados para a fabricação de componentes que exijam resistência à abrasão e alta dureza, juntamente com um componente de matriz metálica de menor dureza, obtendo-se a combinação de características como resistência a deformação compressiva e alta resistência ao desgaste combinada a baixa densidade aparente. Amostras contendo percentuais de 20% Al e 80% de cinza leve (de granulométrica menor) proveniente da queima do carvão mineral foram compactadas utilizando-se valores crescentes de pressão uniaxial e posteriormente sinterizadas em duas faixas de temperatura, em 1.200°C e 1.300°C. Resultados das microestruturas mostraram que não é possível a obtenção cermets a partir da cinza da moagem de carvão contendo somente 20% de Al, com esse percentual não foi possível a aplicação em materiais sinterizados de baixa densidade para usinagem, mas deve-se continuar estudando esta possibilidade. Avaliou-se contração linear, volumétrica, densidade do sinterizado e microdureza.

**Palavras-chave:** Cermets; Cinza de carvão; Alumínio.

## OBTENTION OF CERMETS BY CONVENTIONAL POWDER METALLURGY FROM MINERAL COAL BURNING ASHES

### Abstract

The ash from burning coal predominantly present in its composition oxides  $Al_2O_3$  and  $SiO_2$ . These components are used as raw material in manufacturing of high hardness abrasive components, along with a binder component of lower hardness, yielding the combination of characteristics such as resistance to compressive deformation and high wear resistance combined with low bulk density. Samples containing Al percentage 20% and 80% fly ash from burning coal were compacted using increasing values of uniaxial pressing and subsequently sintered at temperatures ranging between 600°C and 1,300°C. Results showed that the microstructures is not possible to obtain cermets from the grinding of coal ash containing only 20% of Al, with this potential is not possible for application in low-density sintered material for machining, but there should be further study. We evaluated linear shrinkage, volumetric density of the sintered and microhardness.

**Key words:** Cermets; Combustion coal ash; Aluminum.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Tecnólogo em Fabricação Mecânica, Mestrando do Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; andre\_c\_t@hotmail.com.

<sup>3</sup> Tecnólogo em Fabricação Mecânica, Mestrando do Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; andre\_c\_t@hotmail.com.

<sup>4</sup> Tecnólogo em Fabricação Mecânica. Professor. IFSul, Campus Sapucaia do Sul; Doutorando. UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; viniushiper@yahoo.com.br.

<sup>5</sup> Engenharia de Materiais. Doutorando do Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; paulomariot@gmail.com

<sup>6</sup> Aluna de graduação em Engenharia de Energias. UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; rutha\_rs@hotmail.com.

<sup>7</sup> Engenheiro Mecânico. Prof. Dr.-Ing., Coordenador do LdTM, PPGEM, Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; schaefer@ufrgs.br.

## 1 INTRODUÇÃO

As termoelétricas são grandes fontes de energias e em alguns países estão se tornando a única ou a maior fonte energética como pode ser visto na Figura 1. Usinas termoelétricas podem trabalhar com carvão mineral, gás natural e óleos combustíveis, demonstrado na Figura 1, este tipo de usina é também a principal fonte de geração de energia elétrica no mundo.<sup>(1,2)</sup>



Figura 1. Fontes energéticas Globais.<sup>(3)</sup>

O carvão é o combustível fóssil que possui as maiores reservas mundiais espalhadas em mais de 70 países, representando cerca de 40% da matriz elétrica mundial, o mapa mundial na Figura 2 nos traz uma perspectiva de como esta dividida essa matriz elétrica mundial.<sup>(1,3)</sup>

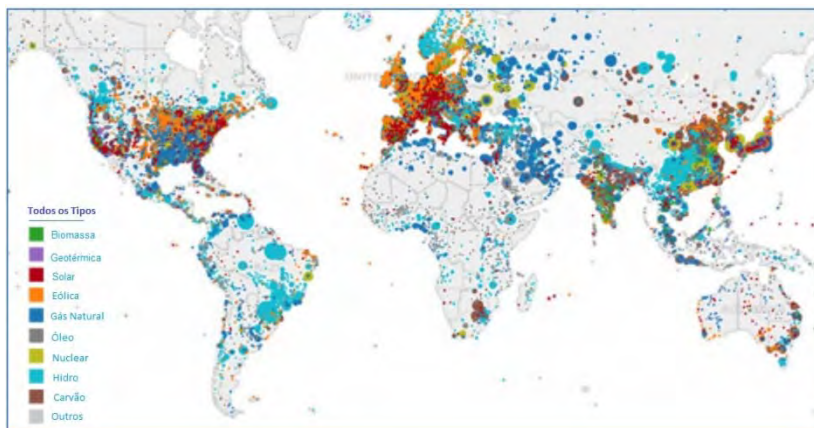


Figura 2. Mapa da Matriz Energética Mundial.<sup>(2)</sup>

O carvão mineral – ou simplesmente carvão – este é um combustível fóssil sólido gerado a partir da matéria orgânica de vegetais depositados em bacias sedimentares. Fundamental para a economia mundial. O carvão é maciçamente empregado em escala planetária na geração de energia elétrica.<sup>(1,4)</sup>

As fontes energéticas térmicas são extraordinária fonte de energia, o emprego do carvão mineral como matéria de queima produzem uma grande quantidade de resíduos sólidos (cinzas), estes podendo ser classificados em dois tipos de cinzas: cinza leve e cinza pesada.<sup>(5)</sup> Somente o Brasil é responsável por gerar cerca de 3 milhões de toneladas de cinzas anuais, sendo que 80% de resíduos são cinza leve (também chamada de “mosca”, e 20% de cinza pesada.<sup>(6)</sup>

A busca por emprego destes resíduos vem sendo estudado em diversos locais do mundo, atualmente a única finalidade que este produto vem sendo empregado comercialmente de maneira viável é como substituinte do clínquer em cimento (produção de clínquer, utilizado para a fabricação do cimento *Portland*), de pavimentação,<sup>(7)</sup> estudos para achar uma finalidade comercial no emprego desse material cerâmico junto com materiais metálicos vem sendo buscado. Atualmente outra finalidade já vem sendo realizada, testes estão sendo feitos para a aplicação de filtros cerâmicos, pois esses resíduos proporcionam componentes com baixa densidade e relativamente alta resistência, características essas que preenchem as necessidades destes componentes, pois são utilizados na separação de metais pesados de lamas e mananciais tendo como outro benefício a possibilidade de emprego em altas temperaturas.<sup>(8)</sup>

Trabalhos anteriores,<sup>(7-9)</sup> nos mostram que compósitos metal-cerâmico (*Cermets*) conferem uma adição as propriedades mecânicas da cerâmica pura. Da mesma forma que Schicker et al.,<sup>(10)</sup> quando compara materiais cerâmicos monofásicos com *cermets* constata-se que estes compósitos proporcionam características físicas elevadas, principalmente resistência a fratura e tenacidade. As cinzas provenientes da combustão do carvão mineral apresentam as características anteriormente citadas, tornando um dos motivos que este material vem sendo estudado e pesquisado por ser possível se gerar materiais de alto desempenho aplicáveis a engenharia e provenientes de matéria prima de baixo custo. O uso destes óxidos representa ainda um benefício ao meio ambiente pela redução de resíduos que serão liberados no meio ambiente.

Segundo Song et al.,<sup>(11)</sup> cinzas em seu estado natural tem forma morfológica predominantemente esférica, tendo tamanho granulométrico entre 10 e 150  $\mu\text{m}$  com uma densidade aparente baixa (de 0,5 a 2  $\text{g/cm}^3$ ). A composição química apresenta basicamente  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , apresentando também certa quantidade de carbono.<sup>(8,11,12)</sup> Com base nessas propriedades, pode-se estudar a possibilidade de utilização dessas cinzas para a preparação de produtos sinterizados.

Este trabalho apresenta uma avaliação da microestrutura e propriedades físicas de corpos de prova obtidos a partir da mistura, compactação e sinterização da cinza leve proveniente da queima de carvão mineral com 20% Alumínio e 2% de parafina utilizada com lubrificante na compactação. Foi possível se obter corpos de prova sinterizados de maneira que possuíssem as características mecânicas desejadas em duas faixas de temperaturas, visto que anteriormente já fora analisado a sinterização em outras faixas e se constatou que não era possível se obter sinterizados destes *Cermets* a temperaturas mais baixas com esta faixa de fração metálica.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram avaliadas amostras de cinzas leve, provenientes do processo de combustão de carvão mineral da Usina Termelétrica Tractebel Energia S.A. Foi avaliado a composição elementar da cinza leve por um espectrômetro de fluorescência de raios-X, modelo Axios Advanced Panalytical, via análise por perda ao fogo efetuada a 1050°C por 1 hora, essa técnica não conseguiu detectar a perda de material orgânico (carbono) presente na amostra.

Para análise da morfologia do material cerâmico (cinza) e a fração metálica (Al) os pós foram levados a microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Jeol JMS 6060, para se poder se certificar que as informações passadas pelos fornecedores

dos pós estavam de acordo quanto ao tamanho de partículas e poder identificar os formatos predominantes das partículas.

Com o intuito de obter a proporcionalidade exata de 80% de cinza e 20% de pó de alumínio puro, foi utilizada uma balança de precisão para medir os percentuais da mistura. Os pós foram misturados em um misturador tipo "Y" por um período de trinta minutos e 22 rpm. Adicionou-se 2% de parafina à massa total da mistura, com a finalidade de se obter uma maior resistência a verde dos corpos de prova compactados, essa mistura foi suavemente aquecida até a fusão da parafina e homogeneizada.

A mistura então foi pesada e fracionada em dez partes iguais, que posteriormente foram compactadas em uma matriz uniaxial cilíndrica de diâmetro igual a 13,5 mm, utilizando-se pressões de compactação aplicada variando entre 100 e 1000 MPa. As amostras foram compactadas e suas massas foram medidas para calcular as densidades a verde, possibilitando construir a curva de compressibilidade dos corpos de prova para decisão da pressão de compactação.

A sinterização foi alcançada aplicando-se diferentes patamares térmicos. Iniciou-se com a temperatura de 600°C que é o princípio da fase líquida do alumínio, onde não possui interação entre as partículas. Utilizou-se a temperatura de 650°C, que é próxima a temperatura de fusão do alumínio e também não houve interação das partículas. Seguiu-se o aumento de 50°C na temperatura de sinterização, utilizando 700°C e 750°C na tentativa de difusão das partículas e sinterização do pó de cinza com fase líquida do alumínio.

Após a sinterização de 750°C sem resultado esperado passou-se a utilizar a temperatura de 1.000°C, com acréscimo de 100°C em diante sinterizando com 1.100°C, 1.200°C e 1.300°C e uma taxa de aquecimento de 10°C/min. até o patamar térmico, mantido durante sessenta minutos, conforme curva mostrada na Figura 3 com as temperaturas medidas no forno. A atmosfera de sinterização continha 25% Hidrogênio e 75% Nitrogênio e se manteve até o resfriamento total (até temperatura ambiente) das peças no forno.

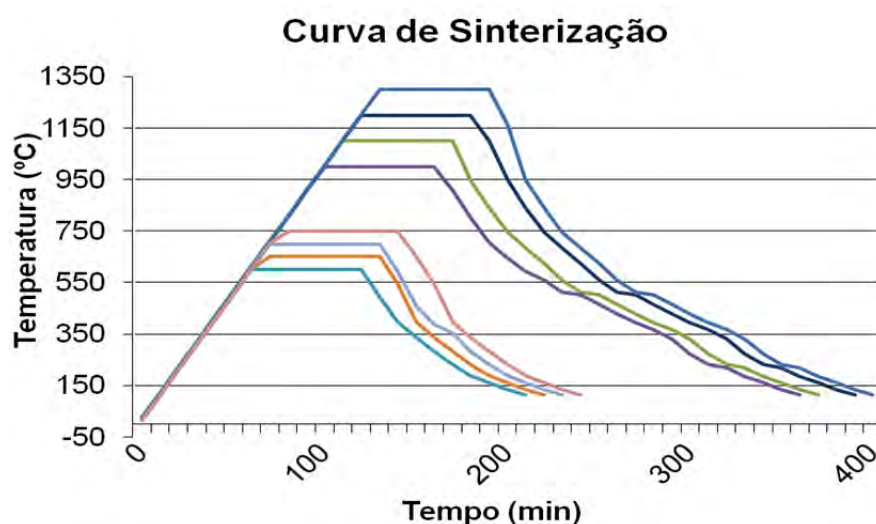


Figura 3. Patamares de temperatura de sinterização.

A microestrutura e morfologia dos corpos de prova sinterizados foram analisadas utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Jeol JMS 6060, com as amostras previamente polidas e sem a utilização de ataque químico, as



amostras foram analisadas em diversos aumentos, para melhorar avaliar o resultado da sinterização.

As amostras apresentaram microestrutura composta principalmente por uma matriz cerâmica tendo como base o  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Foram avaliadas a contração volumétrica, linear na altura e a densidade do sinterizado.

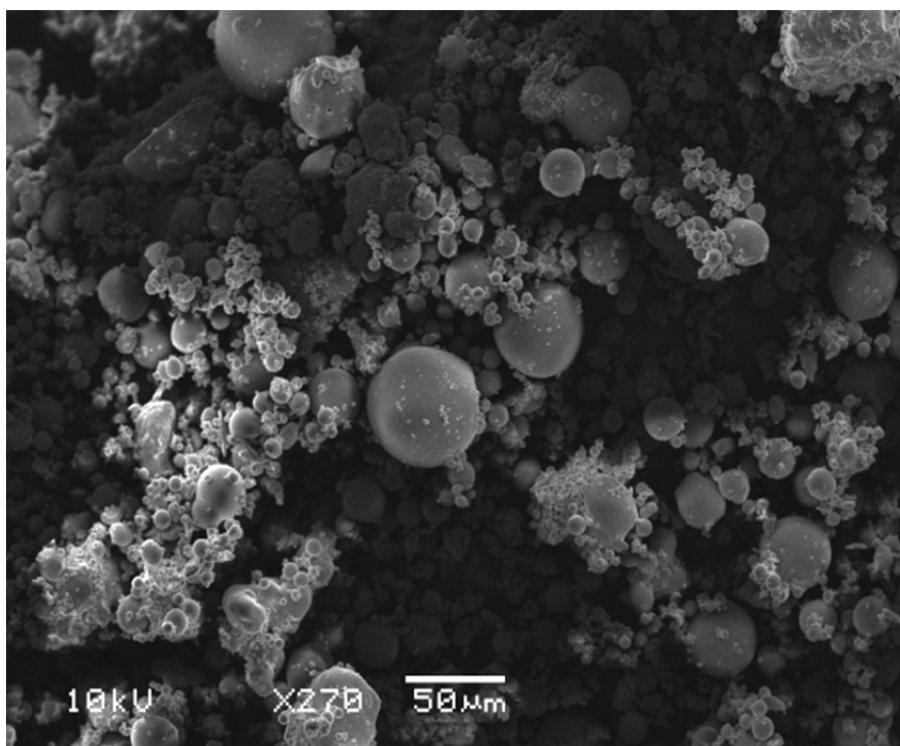
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os constituintes básicos determinados foram: sílica, alumina e óxido de ferro. Esses correspondem ao maior percentual dos componentes da cinza, cuja composição é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Análise por perda ao fogo em espectrômetro por fluorescência de raios-X

Óxido	Teor (% em massa)
$\text{SiO}_2$	62,5
$\text{Al}_2\text{O}_3$	23,8
$\text{K}_2\text{O}$	2,72
$\text{CaO}$	1,37
$\text{TiO}_2$	1,23
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,27
$\text{CaCO}_3$	2,87
Outros	1,11

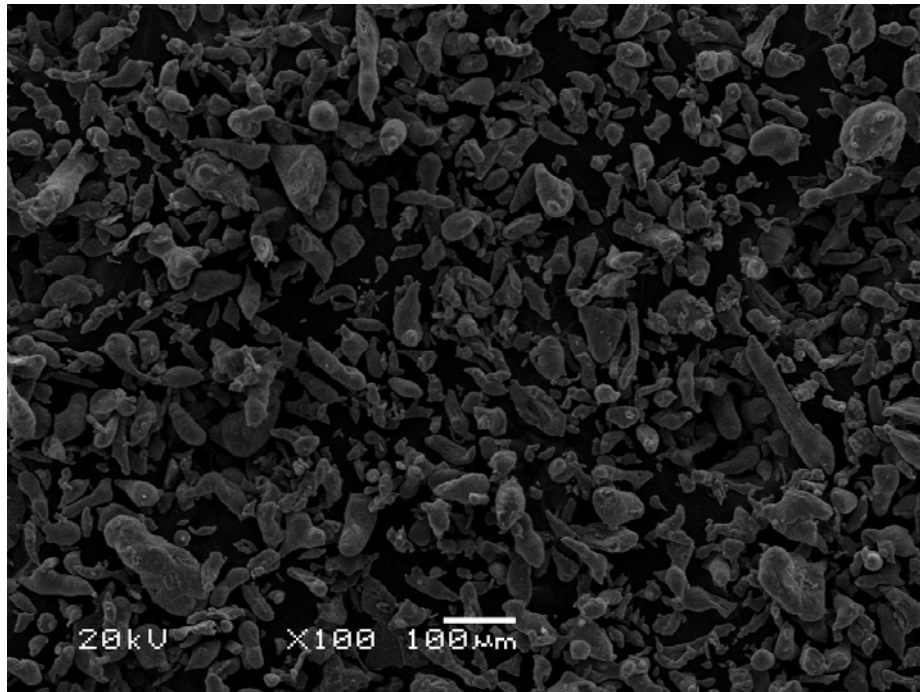
A Figura 4 mostra a morfologia das partículas de óxidos utilizados para a mistura e compactação cuja composição é mostrada na Tabela 1.



**Figura 4.** Micrografia da amostra de cinza leve.

As partículas de óxidos apresentam morfologia predominantemente esférica e de tamanho irregular, devido à composição da cinza, formada por óxidos de diferentes

composições. A heterogeneidade granulométrica e de composição é o principal fator que controla as propriedades de densidade do sinterizado e a contração volumétrica. A Figura 5 mostra a morfologia das partículas de alumínio utilizada para a mistura e compactação. O alumínio utilizado apresenta uma morfologia com formas irregulares com tamanho entre 50 e 100 $\mu$ m.



**Figura 5.** Micrografia da amostra do alumínio.

Os materiais foram misturados e após a mistura estar homogênea foi se medido a densidade aparente da liga, em pressão atmosférica em seu resultado se encontrou o valor de 0,857 g/cm<sup>3</sup>. Para se determinar a pressão de compactação adequada foi traçada uma curva de compressibilidade para isso a mistura foi compactada em pressões variando de 100 a 1.000 MPa e os resultados para essas estão expressados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Dados para a curva de compressibilidade

Pressão (MPa)	Altura (mm)	Massa (g)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
100	12,40	3,01	1774,87	1,70
200	11,70	3,01	1674,67	1,80
300	11,20	2,98	1603,11	1,86
400	10,80	2,95	1545,85	1,91
500	10,90	3,03	1560,17	1,94
600	10,75	3,02	1538,70	1,96
700	10,75	3,02	1538,70	1,96
800	10,45	3,02	1495,76	2,01
900	10,40	3,02	1488,60	2,03
1000	8,35	2,42	1195,17	2,02

Com os dados obtidos foi traçada a curva compressibilidade como mostra a Figura 6 até a pressão de 1.000 MPa.

### Curva de compressibilidade

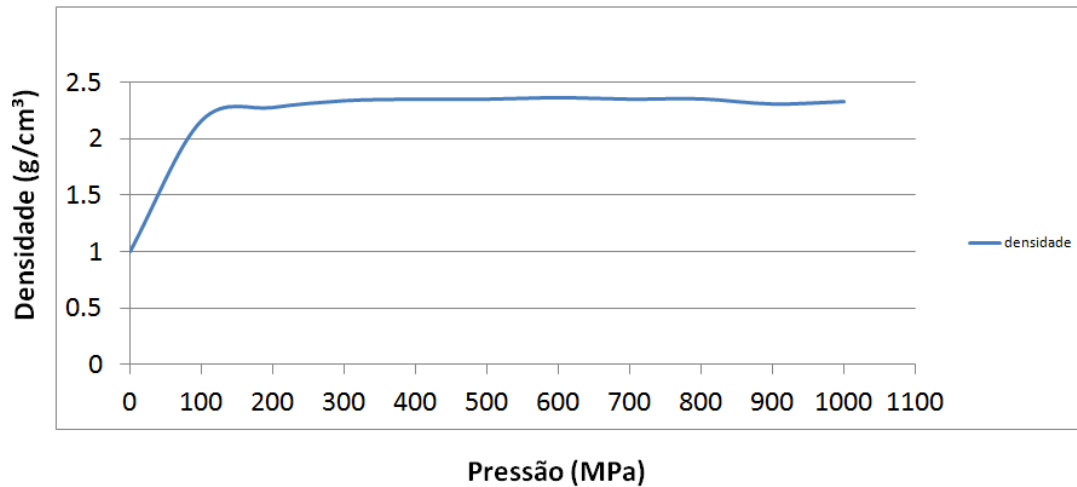


Figura 6. Curva de compressibilidade das amostras Al -20% cinza

As amostras foram sinterizadas em múltiplos patamares de temperatura, inicialmente se acreditava que aconteceria a fase líquida do alumínio e envolveria a cinza, por esse motivo se iniciou a uma temperatura próxima a temperatura de sinterização por fase líquida do alumínio. A primeira temperatura utilizado foi a de 600°C com uma rampa de aquecimento de 10°C/min e mantido a essa temperatura por 60 min, o resultado desta sinterização foi a dissolução de qualquer resistência mecânica e formação de uma massa de pó, este material foi avaliado no microscópio eletrônico como mostra a Figura 7.

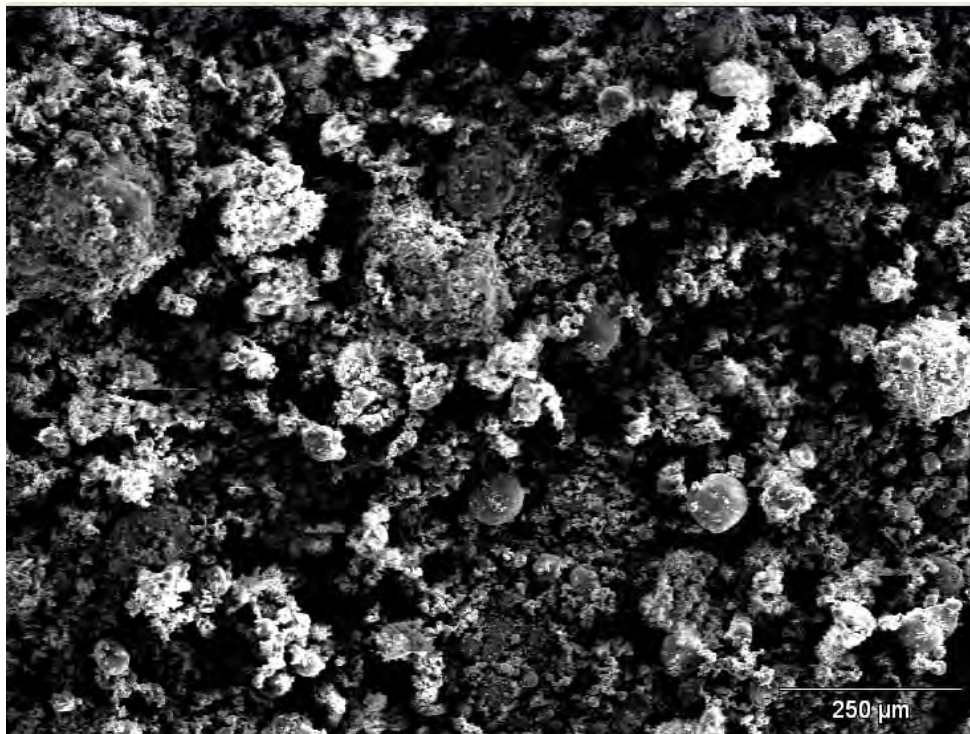


Figura 7. Micrografia do composto sinterizado a 600°C.

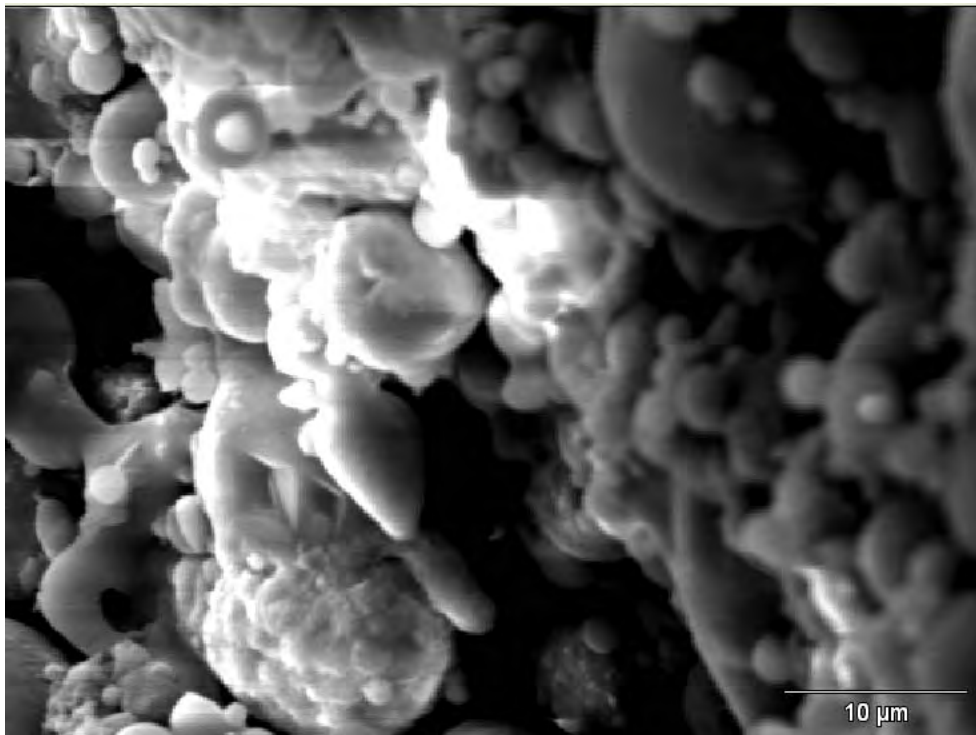


Nota-se que não houve nenhuma sinterização das partículas, nem formação de pescoço da sinterização por fase sólida. As amostras foram sinterizadas nas temperaturas de 650°C, 700°C e 750°C buscando a fase líquida do alumínio, porém os resultados mostraram que os 10% alumínio junto com a cinza não sinterizavam em 750°C, que é 90°C a mais que a temperatura de fusão do alumínio. Após a última sinterização realizada suspeitou-se da ligação do alumínio com o oxigênio presente nos óxidos da cinza, formando  $Al_2O_3$ . O composto foi sinterizado na temperatura de 1.000°C, porém sem resistência mecânica como pode ser visto na Figura 8.



**Figura 8.** Amostras sinterizadas a 1.000°C.

O início da interação entre as partículas é evidenciado na Figura 9, onde a micrografia da amostra sinterizada a 1.000°C apresenta a ligação entre partículas.



**Figura 9.** Micrografia do composto sinterizado a 1.000°C.

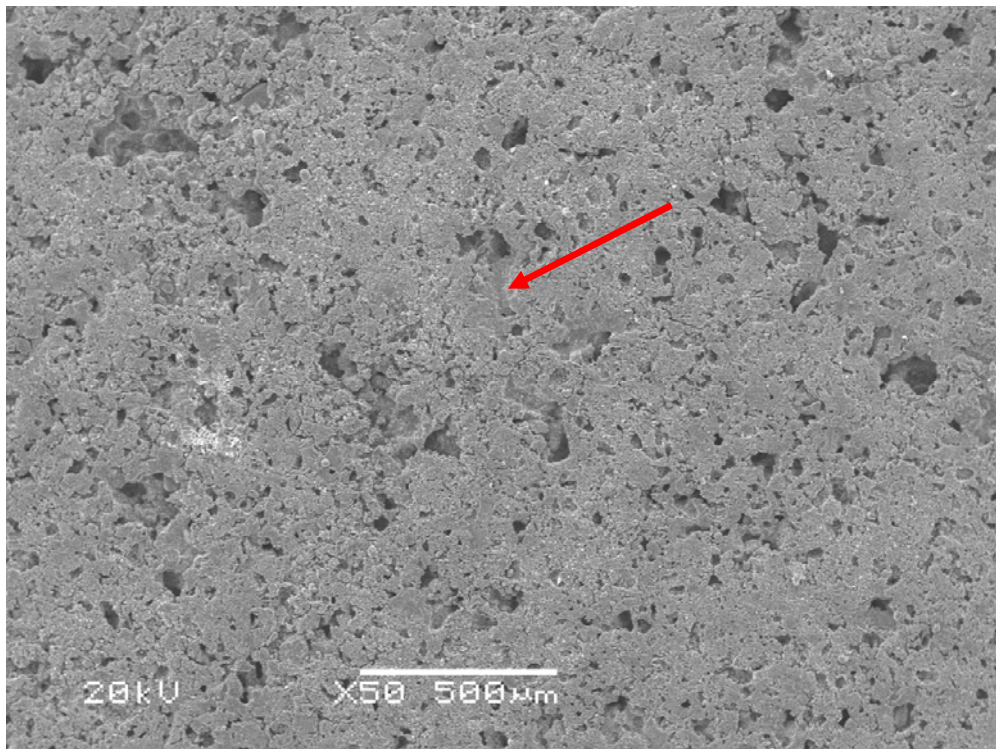


As temperaturas de 1.200°C e 1.300°C ocorreu a sinterização do material obtendo bons resultados, pois houve a difusão entre as partículas e os corpos de prova foram sinterizado como pode ser visto na Figura 10 . Essas características também são controladas pelas diferentes temperaturas de formação de fase líquida dos óxidos presentes, estando em concordância com resultados obtidos por diferentes autores.<sup>(8,12)</sup>



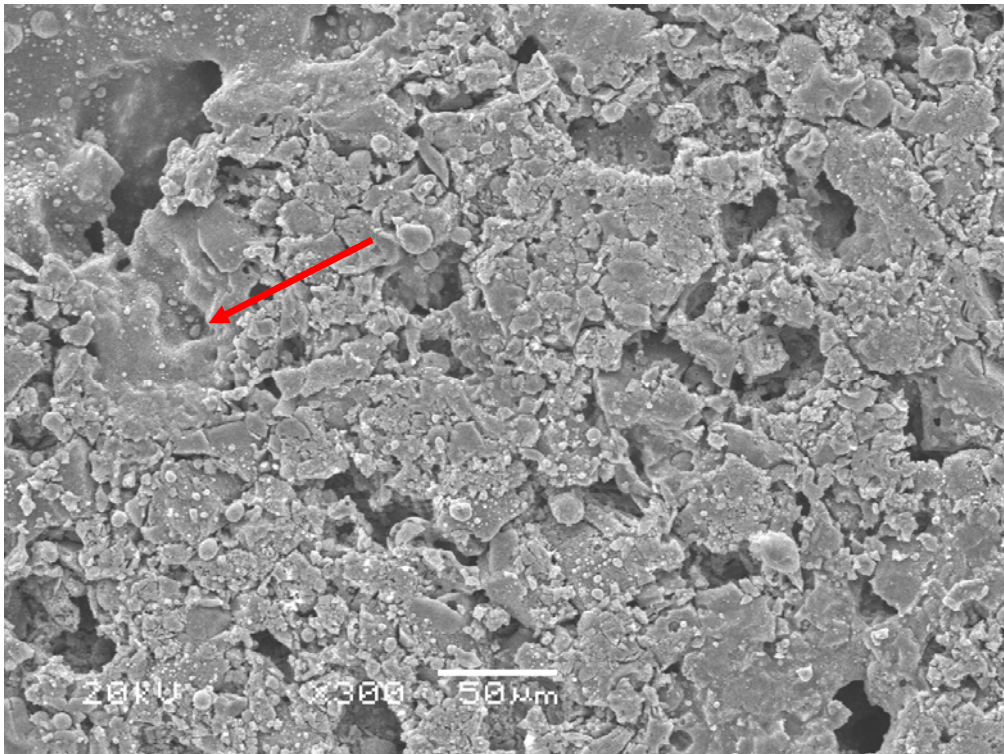
**Figura 10.** Amostras sinterizadas a 1.200°C.

Apesar da peça mostrar alguma resistência mecânica á 1.200°C, observa-se na micrografia que em sua estrutura existe pouca interação entre partículas conforme pode ser visto na Figura 11.



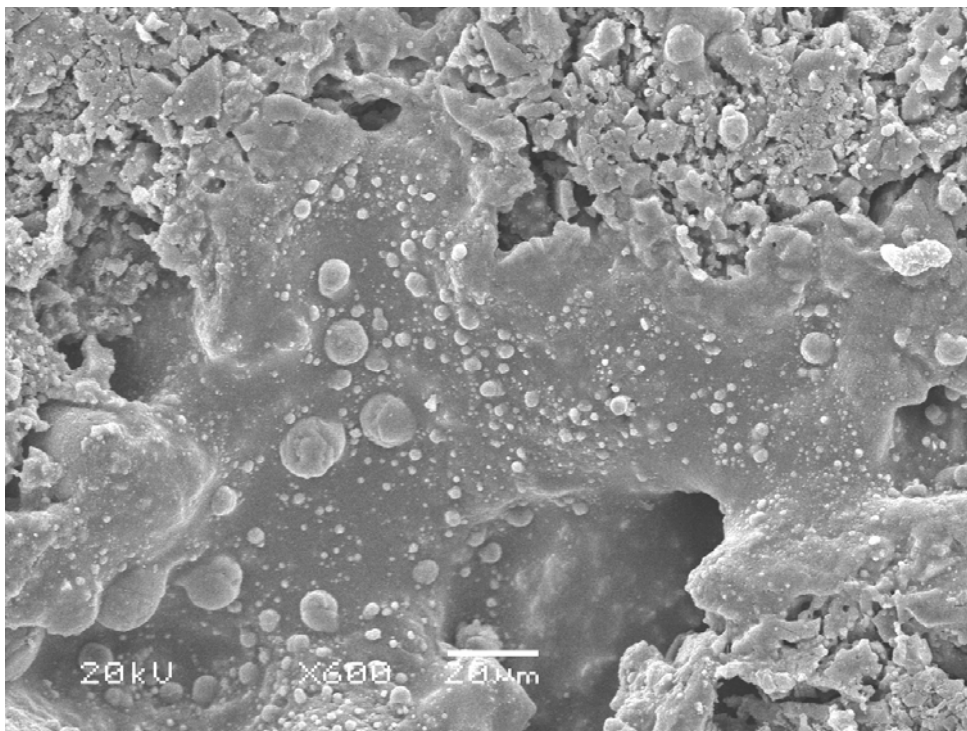
**Figura 11.** Micrografia da amostra sinterizada a 1.200°C.

Nota-se que entre as partículas apontadas pela seta há uma região onde há maior concentração de difusão. A porosidade é acentuada, pois houve o início da sinterização do composto. A Figura 12 exhibe a micrografia da amostra sinterizada a 1.300°C.



**Figura 12.** Micrografia da amostra sinterizada a 1.300°C.

A Figura 10 apresenta uma região encontrada na amostra de enorme difusão entre as partículas e possível início da fase líquida indicada por uma seta, mas apenas com a dilatométrica pode-se determinar esta informação. É possível observar que houve enorme difusão, mas há porosidade entre partículas e os grandes aglomerados sinterizados. A Figura 13 apresenta a região periférica dos poros da amostra.



**Figura 13.** Micrografia da amostra sinterizada a 1.300°C na região periférica de um poro.



Observa-se que a amostra está com a estrutura dentro do centro até a periferia evidenciando que a temperatura de 1.300°C permite uma amostra com microestrutura homogênea. A porosidade não é interconectada, mas evidencia poros que variam de 10 a 150µm.

A microestrutura apresentada em amostras sinterizadas em temperatura de 1300°C mostram uma matriz eficiente de sinterização, pois contém significativo volume de poros aproximadamente esféricos e isolados. Esses poros têm tamanho predominantemente entre 10 e 150 µm.

A formação de porosidade fechada é esperada em amostras compactadas e sinterizadas, porém os poros irregulares e não interconectados provavelmente são formados pela evolução dos gases resultantes da decomposição dos carbonatos presentes nas cinzas em temperaturas em que a fase vítrea tem baixa viscosidade, dados semelhante foram obtidos em outros trabalhos.<sup>(13)</sup> Foi ainda reportado,<sup>(10,14)</sup> que a apresentação de porosidade isolada em corpos de prova obtidos a partir de óxidos sinterizados indica eficiência na formação de fase líquida e da sinterização. Na Tabela 3 são apresentados os valores obtidos de densidade após a sinterização bem como a contração volumétrica em função da temperatura de sinterização.

**Tabela 3.** Dados da compactação

Temperatura (°C)	Contração Linear - Altura (%)	Contração volumétrica (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1.200	0,64	6,65	2,34
1.200	0,88	8,60	1,98
1.200	0,96	8,67	2,06
1.300	1,68	8,67	2,08
1.300	2,16	9,10	2,01
1.300	2,60	9,10	2,05

Essas amostras apresentaram baixíssima contração linear e declínio da densidade do sinterizado em função do aumento da temperatura, evidenciando que o aumento da temperatura significa a elevação da energia livre no sistema para haver a reação que separa o oxigênio dos óxidos durante o processo. A contração volumétrica também sofre o efeito da temperatura maior.

A microdureza HV foi realizada adicionando uma carga de 100g, devido ao material ter fraturado no ensaio de microdureza com carga de indentação de 200g. A microdureza obtida do compósito é apresentada na Tabela 4.

**Tabela 4.** Resultados de microdureza HV<sub>0,2</sub>

Medições	Microdureza (HV <sub>0,2</sub> )
1	831,06
2	781,93
3	798,72
4	737,01
5	687,39
6	831,06
7	781,93
média	781,93± 56,06

Tentou-se realizar ensaio de dureza, mas os corpos de prova fraturaram durante a aplicação da pré-carga do ensaio. A decomposição dos carbonatos e conseqüente formação de poros irregulares de tamanho relativamente grande, resulta na queda de densidade e das propriedades mecânicas, resultando em uma microdureza da matriz de valor mais baixo. Observa-se uma variação de 7,16% devido aos muitos constituintes compostos na cinza e formados durante a sinterização.

A presença de  $\text{CaSiO}_3$  confirma a ocorrência do mecanismo de formação de poros nas amostras sinterizadas, pela decomposição de sulfatos presentes, em wolastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ) e em  $\text{SO}_2$ , decomposição que resulta na estrutura rica em poros irregulares. A ocorrência desse mecanismo em material semelhante também foi verificada por <sup>(11)</sup>.

#### 4 CONCLUSÕES

Foram obtidos cermets por mistura, compactação e sinterização das cinzas da queima de carvão mineral com 20% de Alumínio e 3% de parafina. A microestrutura apresenta elevado volume de porosidade fechada e também poros não interconectados irregulares. A microestrutura apresenta uma matriz predominantemente cerâmica com a presença de fase metálica formada pelo Alumínio. A combinação das propriedades encontradas nos cermets não se mostra adequada para aplicação em agregados de baixa densidade e devido a péssima resistência a compressão e instabilidade estrutural. Sua aplicação adequada devido ao compósito possuir baixo custo não se mostrou promissor, pois para aumentar a resistência estrutural deve-se usar a temperatura de 1300°C, porém com isso a densidade diminui. Comparando os resultados deste trabalho com o trabalho de cinza com 20% de ferro, o último apresenta melhores resultados.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro de Microscopia Eletrônica (CME) e aos órgãos Capes e CNPq pelo apoio ao projeto e investimento na área da pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Oliveira, Edmar Antunes de. *PERSPECTIVAS DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA A CARVÃO NO BRASIL NO HORIZONTE 2010-2030*. [ed.] UFRJ. Rio de Janeiro : COPPE, Junho de 2009.
- 2 Plumer, Brad. All of the world's power plants, in one handy map. *Wonk Blog*. [Online] The washington post, 8 de December de 2012 . [Citado em: 28 de Fevereiro de 2013.] <http://www.washingtonpost.com/blogs/wonkblog/wp/2012/12/08/all-of-the-worlds-power-plants-in-one-handy-map/>.
- 3 Code and Data, Inc. Electricity from Renewables. *Market Size Blog*. [Online] Code and Data, Inc., 31 de March de 2011. [Citado em: 28 de 02 de 2013.] <http://www.marketsize.com/blog/index.php/2011/03/>.
- 4 HUMBERTO, JORGE JOSÉ. Combustão e combustíveis apostila química tecnológica geral; . *Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC*. CentroTecnológico – CTC , 2004, Departamento de engenharia química e engenharia dealimentos- EGA, laboratório de energia e meio ambiente – lema.
- 5 DEPOI, F. S., POZEBON, D., KALKREUTH, W. D. Caracterização de Carvões e suas Cinzas Provenientes da Região Sul do Brasil. *Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química*. 25, 2005.



- 6 ROCHA, J. C., et al. Reaproveitamento das Cinzas Pesadas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda na Elaboração de Materiais de Construção: Aspectos Tecnológicos e Ambientais. *Seminário de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. 15, 1999, pp. 1-5.
- 7 LEANDRO, R. P. FABRI, G. T. P. Aproveitamento da cinza pesada de carvão, mineral na construção de bases e sub-bases de pavimentos flexíveis.. 2001, pp. 1- 8 .
- 8 CHEESEMAN, C.R., VIRDI, G.S. Properties and Microstructure of Lightweight Aggregate Produced from Sintered Sewage Sludge Ash. *Resources*. 45, 2005, pp. 18-30.
- 9 HUANG, L.P., Li, J.P. Properties of cobalt-reinforced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC ceramic matrix composite made via a new processing route . 1999., Vol. 30, pp. 615-618.
- 10 Schicker S, Erny T, Garcia DE, Janssen R, Claussen.N. Microstructure and mechanical properties of Al-assisted sintered Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *of the European Ceramic Society*. 1999, Vol. 19, pp. 2455 – 2463.
- 11 SONG, M., S., GUO, B., GEERT, M., SCHUTTER, D., LI, X. Effect of Shale Addition on Properties of Sintered Coal Fly Ash, Construction and Building Materials. 2011, Vol. 25, pp. 617- 622.
- 12 S. Bethanis, C.R. Cheeseman, C.J. Sollars. Properties and microstructure of sintered incinerator bottom ash. *Ceramics International* . 2002, Vol. 28, pp. 881-886.
- 13 ZHAO, Y., YE, J., LOU, X., LIU, M., LIN, Y., GONG, Y., NING, G. Preparation of sintered foam materials by alkali-activated coal fly ash . *Journal of Hazardous Materials*,. 174, 2010, pp. 108-112.
- 14 BOLOGNINI, S., MARI, D., VIATTE, T., BENOIT, W. , Fracture Toughness of Coated TiCN-WC-Co Cermets with graded composition. *Internacional Journal of Refractory Metals & Hard Metals*. 2001, Vol. 19, pp. 285-292.