

ARTIGO REF: 6480

APLICAÇÃO DO PROJETO DE EXPERIMENTAÇÃO PARA OPTIMIZAÇÃO DO ENXOFRE NAS CAMADAS INFERIORES DE CARVÃO DE CANDIOTA, RS-BRASIL

David Selemane José^{1(*)}, Carlos Hoffmann Sampaio¹, Romualdo R. J. Brito²

¹Laboratório de Processamento mineral (LAPROM)- Escola de Engenharia, UFRGS- RS, Brasil

²University of the Witwatersrand-School of mining engineering- South Africa

(*)Email: jdselemane@gmail.com

RESUMO

Este artigo apresenta o estudo da otimização do enxofre nas granulometrias das camadas inferiores de carvão de Candiota. Estas granulometrias podem definir a maior ou menor facilidade no processo de beneficiamento gravimétrico, sabendo que o Carvão Mineral de Candiota, pela sua composição mineralógica e pelo seu processo de formação geológica, possui altos teores de enxofre, o que não é satisfatório para a sua aplicação em altos fornos assim como na fabricação de aço. Sendo assim a variável de resposta do estudo é do tipo menor-é-melhor. Para realizar a otimização do enxofre nas camadas inferiores foi aplicado um projeto fatorial completo contemplando três fatores controláveis e três repetições, resultando em um número total de 54 ensaios. A análise dos dados foi feita através da tabela ANOVA e modelos de regressão.

INTRODUÇÃO

O Planejamento de Experimentos (em inglês Design of Experiments, DOE) é uma técnica utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível nas conclusões com um menor custo. É, portanto, uma técnica de extrema importância para a indústria, pois seu emprego permite resultados mais confiáveis economizando dinheiro e tempo, parâmetros fundamentais em tempos de concorrência acirrada. A sua aplicação no desenvolvimento de novos produtos é muito importante, onde uma maior qualidade dos resultados dos testes pode levar a um projeto com desempenho superior seja em termos de suas características funcionais como também sua robustez.

A maior reserva brasileira de carvão encontra-se na jazida de Candiota, minerada atualmente pela Companhia Riograndense de Mineração - CRM, no estado do Rio Grande do Sul. As camadas inferiores dessa jazida correspondem a 30% de toda a sua reserva, porém não são mineradas. Dentre elas, apenas as camadas C1, C2 e C3 são tratadas neste artigo.

Foram elaboradas curvas de lavabilidade, através de ensaios de afunda-flutua para avaliar as principais características desses carvões para um futuro estudo de beneficiamento gravimétrico. A partir dessas curvas, foram elaboradas as suas curvas médias, representando assim, de forma mais aproximada, as características de cada camada. Através disso foi realizado um estudo comparativo para beneficiamento gravimétrico seletivo e simultâneo dessas três camadas, sem levar em consideração a eficiência no processo.

Com relação ao beneficiamento das camadas inferiores de carvão mineral de Candiota, foram elaboradas tabelas comparativas nas faixas granulométricas (-25,4 +2,0 mm e -2,0 +0,1 mm) com uma alimentação de 100%. Tais tabelas foram elaboradas a partir das curvas-dos-flutuados e afundados, assim como das curvas densimétricas e NGM (*Near- Gravity Material*).

Neste trabalho, pretende-se caracterizar o teor de enxofre do carvão de Candiota para o seu beneficiamento nas camadas inferiores do carvão contemplando duas frações granulométricas compreendidas entre (-25,4+2,0mm) e (-2,0+0,1mm), assim como definir se elas influenciam no teor de enxofre nas nas três camadas em estudo.

METODOLOGIA

Estudos em relação às camadas inferiores de carvão de Candiota

De acordo com Kalkreuth (2004), em geral as camadas de carvão de Candiota são caracterizadas por alto teor de cinzas de mais de 50wt% (porcentagem em peso). A matéria orgânica está intimamente misturada com os minerais e uma série de emendas caracterizadas por liptinite relativamente elevado e conteúdos de inertinite.

Estudos realizados por Correa da Silva (1981), mostram que as camadas de carvão de Candiota apresentam características petrográficas indicativo de uma origem em turfeiras limno-telmatic, onde o material vegetal foi acumulado depois de ser transportado.

Por sua vez Holz et al. (2002) e Holz & Kalkreuth (2004), interpretaram focando na sequência estratigráfica das camadas de carvão de rolamento, e que propriedades da emenda de carvão foram encontradas para a mudança em relação a sua posição estratigráfica.

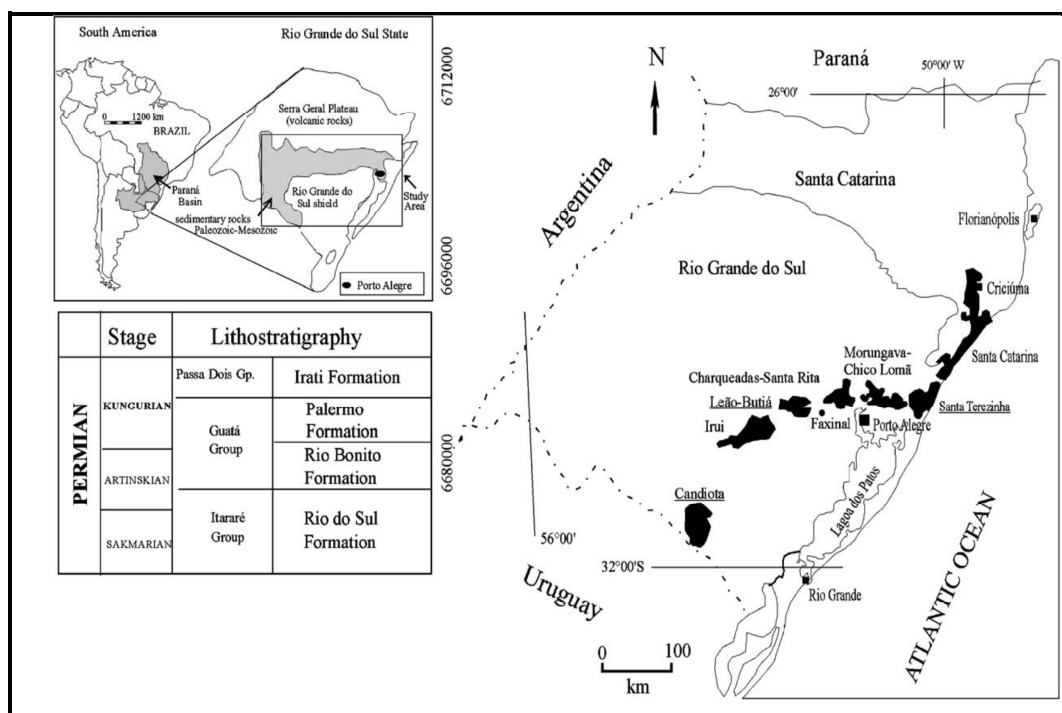


Fig. 1 - Localização geográfica da região de Candiota e principais jazidas de Carvão no Sul do Estado do Rio Grande do Sul, adaptado de Migliavacca (2001)

O estado do Rio Grande do Sul concentra as maiores jazidas deste mineral que é usado principalmente na geração de energia pela queima termoelétrica e na fabricação de aço nas siderurgias através de altos fornos. É nesse contexto que o objeto de estudo será a jazida de Candiota que se encontra localizada 380 km de Porto Alegre, no sudoeste do Rio Grande do Sul, com uma área de 430 km². A Figura 1 apresenta a região de Candiota, e as principais áreas com a presença de Carvão mineral no estado do Rio Grande do Sul.

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Materiais e métodos

Na interpretação dos dados foram usadas as curvas de lavabilidade para o cálculo dos teores de cinzas e do enxofre. Para a caracterização das camadas com relação ao beneficiamento gravimétrico foram elaboradas tabelas comparativas nas faixas granulométricas entre (-25,4 +2,0 mm) e (-2,0 +0,1 mm) e foram considerados três cortes de teores de cinzas, 35, 42 e 48 % com ROM de 100%.

O beneficiamento do carvão tem por objetivo promover tanto a redução do teor de cinza e de enxofre, quanto o aumento do teor da matéria carbonosa e do poder calorífico, assim como a obtenção de granulometrias adequadas às especificações industriais, visando a sua utilização em função das necessidades do mercado consumidor.

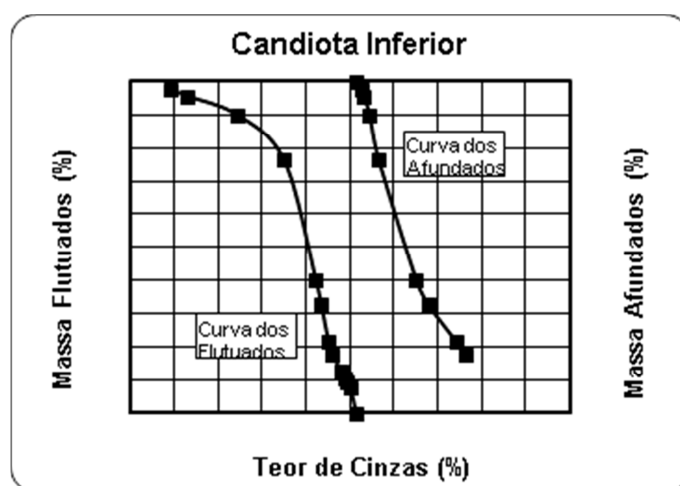


Fig. 2 - Curvas de Lavabilidade das Camadas Inferiores de Candiota. Fonte: Sampaio (2005).

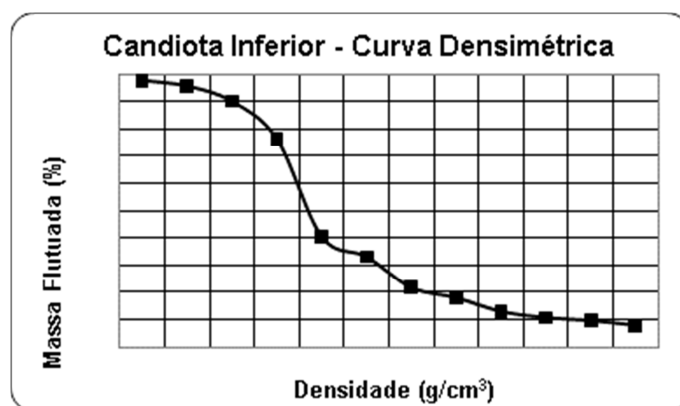


Fig. 3 - Curva densimétrica das Camadas Inferiores de Candiota. Fonte: Sampaio (2005).

O projeto experimental escolhido foi um projeto fatorial completo contemplando três fatores controláveis, sendo eles: profundidade da camada investigada a três níveis (C1, C2 e C3), granulometria investigada a dois níveis (-25,4 +2,0 mm) e (-2,0 +0,1 mm) e corte do teor de cinza investigado a três níveis (35%, 42% e 48%). Para cada combinação dos níveis dos fatores, foram realizadas três repetições (n=3), totalizando 54 ensaios. As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os teores de enxofre para as três camadas, os três cortes de teor de cinza e duas granulometrias estudadas.

Tabela 1 - Fração granulométrica de (-25,4 +2,0mm) e (-2,0 +0,1 mm). Corte de 35% de cinzas

| Fração granulométrica (-25,4+2,0 mm) | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------|---------|-------------------------|
| Camadas | Alimentação (100%) | Teor de cinzas (%) | Massa dos flutuados (%) | Teor de enxofre total (%) | NGM (%) | Massa dos afundados (%) |
| C1 | 100 | 35 | 28 | 0,8 | 19 | 72 |
| C2 | 100 | 35 | 52 | 1,1 | 26 | 48 |
| C3 | 100 | 35 | 78 | 1,0 | 18 | 22 |

| Fração granulométrica (-2,0 + 0,1 mm) | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------|---------|-------------------------|
| Camadas | Alimentação (100%) | Teor de cinzas (%) | Massa dos flutuados (%) | Teor de enxofre Total (%) | NGM (%) | Massa dos afundados (%) |
| C1 | 100 | 35 | 6 | 0,8 | --- | 94 |
| C2 | 100 | 35 | 10 | 1,1 | 27 | 90 |
| C3 | 100 | 35 | 49 | 1,0 | 35 | 51 |

Tabela 2 - Fração granulométrica de (-25,4 + 2,0mm) e (-2,0 + 0,1 mm). Corte de 48% de cinzas.

| Fração granulométrica: (-25,4 +2,0 mm) | | | | | | |
|--|-------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------|---------|-------------------------|
| Camadas | Alimentaça ão (100%) | Teor de cinzas (%) | Massa dos flutuados (%) | Teor de enxofre total (%) | NGM (%) | Massa dos afundados (%) |
| C1 | 100 | 42 | 16 | 0,7 | 46 | 84 |
| C2 | 100 | 42 | 32 | 1,1 | 42 | 68 |
| C3 | 100 | 42 | 76 | 0,9 | 14 | 24 |

| Camadas | Alimentaça ão (100%) | Teor de cinzas (%) | Massa dos flutuados (%) | Teor de enxofre total (%) | NGM (%) | Massa dos afundados (%) |
|---------|-------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------|---------|-------------------------|
| C1 | 100 | 42 | 76 | 0,6 | 41 | 24 |
| C2 | 100 | 42 | 78 | 0,9 | 30 | 22 |
| C3 | 100 | 42 | 71 | 0,9 | 20 | 29 |

Tabela 3 - Fração granulométrica de (-25,4 +2,0mm) e (-2,0 +0,1 mm). Corte de 48% de cinzas.
[Fonte: Elaborado pelo autor do trabalho]

| Fração granulométrica (25,4 + 2,0 mm) | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|---|----------------|-------------------------------|--|
| Camadas | Alimenta ção (100%) | Teor de cinzas (%) | Massa dos flutuados (%) | Teor de enxof re total (%) | NG M (%) | Massa dos afundados (%) | |
| C1 | 100 | 48 | 86 | 0,7 | 34 | 14 | |
| C2 | 100 | 48 | 92 | 1,0 | 28 | 8,0 | |
| C3 | 100 | 48 | 99 | 1,9 | 16 | 1,0 | |

| Fração granulométrica (-2,0 + 0,1 mm) | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|---|----------------|-------------------------------|--|
| Camadas | Alimenta ção (100%) | Teor de cinzas (%) | Massa dos flutuados (%) | Teor de enxof re total (%) | NG M (%) | Massa dos afundados (%) | |
| C1 | 100 | 48 | 39 | 0,5 | 59 | 61 | |
| C2 | 100 | 48 | 48 | 0,9 | 43 | 52 | |
| C3 | 100 | 48 | 88 | 0,8 | 20 | 12 | |

A tabela 4 apresenta os resultados do teor de enxofre.

Tabela 4: Resultados do teor de enxofre para o experimento realizado
Granulometria das camadas inferiores de Carvão-Candiota (B)

| Prof. Corte (A) | B1 (-1) -25,4+2,0 mm | | | B2 (1) -2,0+0,1mm | | | MEDIA |
|--------------------|----------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|-------|
| | C1(-1) | C2 (0) | C3 (1) | C1(-1) | C2 (0) | C3 (1) | |
| A1 (-1) | 0,82 | 1,12 | 1,00 | 0,80 | 1,00 | 1,10 | 0,95 |
| | 0,71 | 1,10 | 0,91 | 0,60 | 0,90 | 0,91 | |
| | 0,51 | 0,90 | 0,81 | 0,71 | 1,92 | 1,21 | |
| A2 (0) | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 1,5 | 0,8 | 0,94 |
| | 0,7 | 0,9 | 0,7 | 0,7 | 1,9 | 1,8 | |
| | 0,3 | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 1,9 | |
| A3 (1) | 0,9 | 0,8 | 0,5 | 1,2 | 0,8 | 1,8 | 1,13 |
| | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,9 | 1,2 | 0,9 | |
| | 1,9 | 0,9 | 0,8 | 1,9 | 1,9 | 1,7 | |
| Média B | B1 | 0,81 | | B2 | 1,21 | | |
| Media C | C1 | 0,9 | C2 | 1,1 | C3 | 1,1 | T... |
| Soma C | 7,2 | 7,6 | 6,9 | 8,5 | 12,0 | 12,1 | 54,4 |

Esse tipo de projeto foi selecionado, uma vez que se limitou em três o número de fatores controláveis do experimento e também devido ao fato de que todos os experimentos poderiam ser realizados na mesma condição, não sendo necessário bloquear fatores secundários. Sendo assim, o projeto fatorial completo foi considerado como uma proposta adequada aos experimentos a serem realizados.

ANÁLISE DOS DADOS

Os resultados dos experimentos realizados podem ser visto na Tabela 4.

Análises de Variância (ANOVA)

Para análise dos dados, elaborou-se uma Análise de Variância (ANOVA), apresentada na Tabela 5. Considerou-se efeito significativo do fator controlável quando o valor de F calculado foi maior do que o valor de F tabelado associado a um nível de significância definido em 5% ou 10%.

Conforme análise da tabela ANOVA, o fator B (granulometria) é significativo considerando um nível de significância de 5% e a interação AC é significativa considerando um nível de significância de 10%. Os demais fatores controláveis e interações não foram significativos, já que o F calculado apresentou valores inferiores ao F tabelado. O fator controlável B (granulometria) é o que possui maior efeito sobre o teor de enxofre, pois apresentou uma Média Quadrada (MQ) superior às demais.

Análises de regressão múltipla

A Tabela 6 apresenta o resumo do modelo de regressão, sendo os coeficientes dos fatores controláveis e seus respectivos valores-p apresentados na Tabela 7.

Tabela 6 - Estatística da regressão

| Estatística de regressão | |
|--------------------------|------------|
| R múltiplo | 0,59445315 |
| R-Quadrado | 0,35337455 |
| R-quadrado ajustado | 0,28601773 |
| Erro padrão | 0,36801159 |
| Observações | 54 |

Tabela 7: Coeficientes do modelo de regressão e seus respectivos valores-p

| | Coeficientes | Erro padrão | Stat t | Valor-P | 95% inferiores | 95% superiores | Inferior 90,0% | Superior 90,0% |
|------------|--------------|-------------|----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Interseção | 1,00685185 | 0,05008 | 20,10486 | 5,05982E-25 | 0,906159 | 1,107544508 | 0,92285641 | 1,090847298 |
| A | 0,09194444 | 0,061335 | 1,499047 | 0,140410125 | -0,03138 | 0,215267259 | 0,01092855 | 0,194817436 |
| B | 0,20018519 | 0,05008 | 3,997305 | 0,000219879 | 0,099493 | 0,300877842 | 0,11618974 | 0,284180631 |
| C | 0,0925 | 0,061335 | 1,508105 | 0,138082033 | -0,03082 | 0,215822815 | -0,01037299 | 0,195372991 |
| AC | -0,11875 | 0,07512 | -1,5808 | 0,120490971 | -0,26979 | 0,032288985 | 0,24474317 | 0,007243169 |
| BC | 0,11027778 | 0,061335 | 1,797951 | 0,078475884 | -0,01305 | 0,233600592 | 0,00740479 | 0,213150769 |

Como se pode verificar na Tabela 7, foram considerados significativos o fator controlável B (valor-p=0,000219879) e a interação AC (valor-p=0,120490971).

Análise gráfica dos fatores significativos

Para auxiliar na definição dos níveis dos fatores controláveis que vão garantir um menor teor de enxofre, foi elaborado o gráfico de efeito principal do fator B (granulometria) e o da interação AC (profundidade da camada e corte do teor de cinza), apresentados nas Figura 4 e 5. Como se pode visualizar na Tabela 8, a granulometria B1 (-25,4+2,0 mm) apresenta o menor teor de enxofre.

Tabela 8 - Média dos níveis do Fator B

| Yij. | B1 | B2 |
|-------|------|------|
| A1 | 0,88 | 1,02 |
| A2 | 0,64 | 1,24 |
| A3 | 0,90 | 1,36 |
| Media | 0,81 | 1,21 |

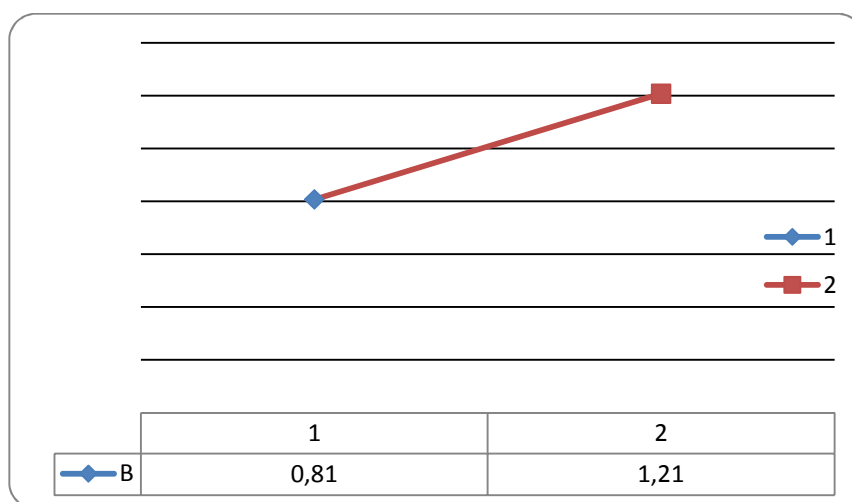


Fig. 4 - Gráfico do efeito principal B (granulometria)

A Tabela 9 apresenta as médias utilizadas na elaboração do gráfico da interação AC.

Tabela 9: Média do teor de enxofre para a interação AC

| Yi.k | C1 | C2 | C3 |
|------|------|------|------|
| A1 | 0,69 | 1,16 | 0,99 |
| A2 | 0,97 | 1,13 | 1,08 |
| A3 | 1,28 | 1,01 | 1,10 |

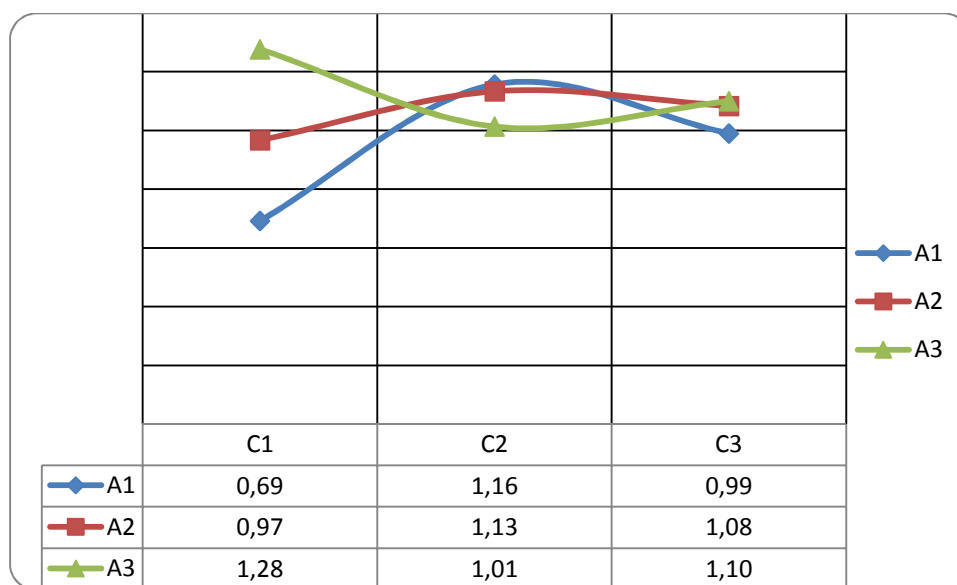


Fig. 5 - Gráfico da interação AC (profundidade da camada e corte do teor de cinza)

Comparação Múltipla de Médias para a interação AC

O resultado da comparação múltipla de médias apresentado na Tabela 10, mostrou que para o nível A1 (teor de cinzas 35%), as camadas C1-C2 apresentaram diferença significativa. Ou seja, o teor de enxofre nas camadas inferiores C1 e C2 de carvão de Candiota diferem significativamente, sendo que C1 apresenta o menor teor de enxofre. O teor de enxofre nas camadas C2 e C3 não difere significativamente.

Tabela 10 - Comparação múltipla de médias para a interação AC

| CMM | | Fixando | | Fixando A2 | Fixando A3 |
|-----|--------|---------|-------|------------|------------|
| | | A1 | | | |
| Sy= | 0,21 | C1-C2 | -0,47 | -0,17 | 0,26 |
| Ld= | 0,41 * | C2-C3 | 0,17 | 0,05 | -0,09 |
| | | C3-C1 | -0,18 | -0,12 | -0,18 |

[*Calculado pela fórmula 1, 96xSy]

CONCLUSÕES

Este artigo teve como objetivo o estudo do teor de enxofre nas camadas inferiores de carvão mineral de Candiota.

Foi realizado um projeto fatorial completo contemplando três fatores controláveis, sendo eles: profundidade da camada, investigada a três níveis (C1, C2 e C3); granulometria, investigada a dois níveis (-25,4 +2,0mm e -2,0 +0,1 mm) e cortes de teores de cinza, investigado a três níveis (35%,42% e 48%). Para cada combinação dos níveis dos fatores, foram realizadas três repetições (n=3), totalizando 54 ensaios.

Os resultados foram analisados pela Tabela ANOVA e por modelos de regressão múltipla. Os fatores considerados significativos sobre o teor de enxofre foram a granulometria e a interação profundidade da camada e corte do teor de cinza. Os menores valores de enxofre foram encontrados na camada inferior C1, teor de cinza 35% e granulometria (-25,4 +2,0 mm).

REFERÊNCIAS

- [1]-A. Muller, H.M. dos Santos, J.C.C. Schmitt, L.A.C. Maciel, M.A. Bertol, S.B. César. Perfil Analítico do Carvão. DNPM, Boletim nº 6, 2ed. Revisada e atualizada. Porto Alegre, 1987, p.140.
- [2]-C. H.Sampaio L. M. Tavares. Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. 1ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, RS-Brasil, 2005.
- [3]-Doerell, P.E. Coal Home page- Engineering & Mining Journal, 2001.
- [4]-Introdução a Projetos de Experimentos. Caderno didático. UFSM, Departamento de estatística, 2002.
- [5]-Laus, R., Laranjeira,M.C.M., Martins, A. Et al. Chitosan Microspheres crosslinked with tripolyphosphate used for the removal of the acidity, iron (III) and manganese in water contaminated in coal mining. Quím. Nova, Jan./Feb.2006,vol 29, no1, p.34-39.ISSN 0100-4042.
- [6]-Ribeiro, J. L. D; Caten, C. S. Ten. Projeto de Experimentos. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Ed, 2010.
- [7]-Toninibutton, S. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, 2005.
- [8]-GOMES, Aramis José. Pereira. 2002; Carvão do Brasil /turfa agrícola-geologia, meio ambiente e participação estratégica na produção de eletricidade no sul do Brasil; p 1535.

[9]-José, D.S; Estudo de liberação do carvão de Candiota-RS, visando seu beneficiamento (Dissertação de mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2011.

[10]-Kalkreuth, W. Holz, M., Kern, M.; Machado, G. Mexias, A. Silva, M.B; Willett, J., Finkelman, R., Burger, H., 2006; Petrology and Chemistry of Permian Coals from the Paraná Basin. 1. Santa Teresinha, Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. International journal of Coal geology, v.68 p79-116.