

Artigo

Estudo da Correlação Entre a Temperatura de Fusão e Composição Química das Cinzas Gerada em Usina Termelétrica no Sul do Brasil

João, J. J.;* Skoronski, E.; Machado, D. B.; Ribeiro, J. M.; Costa, F. S.

Rev. Virtual Quim., 2017, 9 (2), 740-750. Data de publicação na Web: 10 de fevereiro de 2016

<http://rvq.sbq.org.br>

The Correlation Between the Melting Point and the Chemical Composition of the Ash Generated in Thermal Power Plant in South-Brazil

Abstract: In this work, a study of the relationship between the chemical composition and the melting temperature of the ash produced by burning coal in boilers. The analytical methodology applied for the oxides determination in the ashes was the X-rays fluorescence. The melting point was assessed using a heating microscope with automatic image analysis. The obtained data were correlated using linear and nonlinear models, with factors such as the chemical composition of the ashes and in response to melting temperature. The nonlinear model showed a higher correlation between the data related to the deformation, hemisphere and flow temperature. However, a linear model was the best model to describe the sphere temperature. The results revealed that the chemical composition of the ash influences its melting temperature, and this information can be applied in the management of the units to control the quality of the coal used in boilers.

Keywords: Coal ash; thermal power plant; oxides; x-ray fluorescence.

Resumo

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre a correlação da composição química e a temperatura de fusão das cinzas produzidas a partir da queima do carvão mineral em caldeiras. A metodologia analítica empregada para determinação dos óxidos constituintes da cinza foi à fluorescência de raios-X. O ponto de fusão foi determinado com a utilização de um microscópio de aquecimento com análise automática de imagem. Os dados obtidos foram correlacionados a partir de modelos lineares e não lineares, tendo como fatores a composição química da cinza e como resposta a temperatura de fusão. O modelo não linear apresentou uma maior correlação entre os dados para as temperaturas de deformação, semiesfera e o ponto de fluidez. Para a temperatura de esfera, o modelo linear apresentou melhor ajuste. Os resultados obtidos evidenciaram que a composição química da cinza influencia na sua temperatura de fusão. Estas informações são extremamente importantes e podem ser aplicadas no gerenciamento das unidades de forma a controlar a qualidade do carvão empregado nas caldeiras.

Palavras-chave: Cinza de carvão; termoeletrica; óxidos; fluorescência de raio-X.

* Universidade do Sul de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química, CEP 88708-400, Tubarão-SC, Brasil..

✉ jair.joao@unisul.br

DOI: [10.21577/1984-6835.20170045](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170045)

Estudo da Correlação Entre a Temperatura de Fusão e Composição Química das Cinzas Gerada em Usina Termelétrica no Sul do Brasil

Jair Juarez João,^a Everton Skoronski,^b Diego B. Machado,^c Jéssica M. Ribeiro,^a Fabio S. Costa^d

^a Universidade do Sul de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química, CEP 88708-400 Tubarão-SC, Brasil.

^b Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, CEP 88520-000, Lages-SC, Brasil.

^c Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, CEP 88040-900, Florianópolis-SC, Brasil.

^d Tractebel Energia, Setor de Utilidades do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda, CEP 88789-000, Capivari de Baixo-SC, Brasil.

* jair.joao@unisul.br

Recebido em 25 de agosto de 2016. Aceito para publicação em 7 de fevereiro de 2017

1. Introdução

2. Parte Experimental

- 2.1. Preparação das amostras de cinzas
- 2.2. Análise de óxidos por fluorescência de raios-X de energia dispersiva
- 2.3. Análise de temperatura de fusão
- 2.4. Análises de regressão multivariada

3. Resultados e Discussão

- 3.1. Caracterização das amostras de carvão
- 3.2. Análises de regressão múltipla

4. Conclusão

1. Introdução

O carvão representa por volta de 41% das fontes de energia para geração termelétrica de todo o mundo, sendo que no Brasil as reservas provadas estão estimadas em cerca

de 7.068 milhões de toneladas. Em nível nacional, a geração de energia elétrica é dominada pela hidroeletricidade restando à energia térmica apenas 22% da capacidade instalada. A participação do carvão na matriz elétrica brasileira é ainda menor, representando pouco mais de 1,5% da energia gerada. Devido à baixa qualidade do

carvão nacional, as usinas termoelétricas que utilizam o carvão nacional estão todas localizadas nas proximidades das minas nos estados da região sul do país, totalizando 1.415 MW em operação.¹

A energia térmica obtida pela queima de combustíveis pode empregar além do carvão, outros combustíveis como óleo, derivados do petróleo e, atualmente, também o bagaço da cana de açúcar (biomassa). Neste processo, alguns cuidados precisam ser tomados, tais como: os gases provenientes da queima do combustível devem ser filtrados, evitando a poluição da atmosfera local; a água aquecida precisa ser resfriada ao ser devolvida para os rios porque várias espécies aquáticas não resistem a altas temperaturas e, além disso, deve existir um controle de qualidade da composição do carvão em termos de compostos voláteis e também quantidade e composição de cinza.²

As cinzas remanescentes da combustão do carvão consistem de uma mistura complexa de fases cristalinas e amorfas sem um ponto de fusão definido. Essa parcela inorgânica do carvão se caracteriza por agregar em sua composição uma grande diversidade de óxidos, entre eles SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , K_2O e Na_2O .³ Sabe-se que a composição química (óxidos) da cinza está associada à sua temperatura de fusão. Neste sentido, caso a caldeira possua uma temperatura maior que a de fusão da cinza, a mesma irá formar uma lama que irá escoar para as partes mais frias da caldeira, causando problemas de incrustação e conseqüentemente paradas não programadas da unidade de geração⁴. Desta forma, estudos adequados sobre a composição das cinzas de carvão vêm sendo realizados desde a década de 70 no sentido de utilizar estas informações como subsídio para a prevenção de problemas ocasionados pela fusibilidade de cinzas.⁵

O tema abordado neste trabalho é objeto de estudo em institutos de pesquisa internacionais. Podemos observar na literatura citações de excelentes trabalhos sobre o tema.⁶⁻¹² Em todos estes estudos, os autores buscaram correlacionar a

temperatura de fusão com a composição química das cinzas. Entretanto, os dados obtidos não podem ser extrapolados para o carvão queimado nas termoelétricas no sul do Brasil, pois a correlação entre temperatura de fusão e composição química das cinzas do carvão varia consideravelmente de região para região, dependendo intimamente das características do carvão a ser analisado.¹² No Brasil existem poucos trabalhos relacionados a este tema. Na literatura nacional podemos encontrar os trabalhos de Bagatini (2007)¹³ e Fallavena et al. (2013).¹⁴

Deste modo, para obtenção de uma correlação fidedigna para o carvão consumido no sul do Brasil é necessário à obtenção de dados específicos que permitam correlacionar a composição química da cinza deste carvão com a sua temperatura de fusão.

O Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda, usina modelo utilizada neste estudo, recebe, mensalmente, cerca de 200.000 toneladas de carvão mineral CE 4500 proveniente de 10 (dez) fornecedores da região carbonífera do sul do Estado de Santa Catarina. Este carvão provém de distintas lavras, com características físico-químicas diferentes entre si. Nos últimos anos foi observada uma indisponibilidade operacional de 750 horas de operação nas unidades 5 e 6 da UTLB, com um custo aproximado de R\$ 9.250.000,00. Esta ocorrência está associada à temperatura de fusão das cinzas presentes no carvão. Cabe salientar que o carvão de Santa Catarina possui um teor elevado de cinzas, em torno de 43%. Como esta ocorrência tem se agravado consideravelmente nos últimos anos, fato que não se verificava em anos anteriores, foi necessário a realização de um estudo mais aprofundado das características do carvão que possam estar ocasionando a formação de cinzas fundidas e, conseqüentemente, a indisponibilidade forçada das unidades.

Diante deste cenário, o objetivo deste trabalho foi avaliar a correlação entre a temperatura de fusão das cinzas do carvão mineral e a composição química das mesmas,

para o carvão extraído na região carbonífera de Santa Catarina. cinzas.

2. Parte Experimental

2.1. Preparação das amostras de cinzas

Para a realização deste trabalho foram coletadas 140 amostras de carvão, obtidas de mineradoras da região de Criciúma, sul do Estado de Santa Catarina, Brasil. A amostragem foi realizada segundo a metodologia de quarteamento. Após esta etapa, foi realizada a moagem do carvão e posterior classificação para obtenção de granulometria uniforme, utilizando as peneiras 170 e 200 *mesh* Tyler. Desta forma o material obtido possuía diâmetro entre 70 e 95 μm , simulando a condição de alimentação do carvão na caldeira da usina Jorge Lacerda. Em seguida, realizou-se a combustão completa da amostra na temperatura de 850°C, com isoterma de 4 horas, em forno do tipo mufla, para obtenção das amostras de

2.2. Análise de óxidos por fluorescência de raios-X de energia dispersiva

Os óxidos analisados são apresentados na Tabela 1, bem como suas temperaturas de fusão quando puros. Para realização das análises foram pesados 300 mg de amostra, dissolvidas posteriormente em 2 mL de HF (ácido fluorídrico), 3 mL de HNO₃ (ácido nítrico) e 2 mL de HCl (ácido clorídrico) concentrados para digestão em forno de micro-ondas por 4 minutos.¹⁵ As análises da composição química das cinzas do carvão foram realizadas empregando o método ISO 12677:2003, por meio de um espectrômetro de fluorescência de raios-X de energia dispersiva (EDX), modelo EDX-800 HS (Shimadzu Scientific Instruments). A análise de enxofre foi realizada segundo a metodologia 4500 SO₃²⁻ B descrita no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.¹⁶

Tabela 1. Óxidos analisados e suas respectivas temperaturas de fusão¹⁷

Óxido	Fórmula Química	Temperatura de fusão (°C)
Alumínio	Al_2O_3	2053
Cálcio	CaO	2898
Enxofre	SO_3	16,8
Ferro	Fe_2O_3	1377
Magnésio	MgO	2825
Potássio	K_2O	350*
Silício	SiO_2	2950
Sódio	Na_2O	1132*
Titânio	TiO_2	1843

* decomposição

2.3 Análise de temperatura de fusão

Para cada amostra de cinza foram determinados os seguintes parâmetros relacionados à sua temperatura de fusão (°C):

ponto de deformação (p.d.), ponto de esfera (p.e.), ponto de semiesfera (p.s.e.) e ponto de fluidez (p.f.). Para realização destas determinações foi utilizado um microscópio de aquecimento com análise de figura e dilatômetro óptico modelo EM201 (Hesse

Instruments), empregando a norma DIN 51730.

2.4. Análises de regressão multivariada

Após a determinação da composição química da cinza buscou-se estabelecer uma correlação entre a composição em termos de seus óxidos e sua temperatura de fusão. Para estabelecer esta correlação, foi realizada uma análise de regressão linear e não linear

múltipla, utilizando o software STATISTICA 10 (StatSoft Inc. 2010). Nesta análise foi assumido um nível de significância estatística de 95% ($p=0,05$). Os parâmetros da equação foram determinados pelo método de estimação de Quasi-Newton.

Além da composição química da cinza, foram considerados ainda como variáveis independentes, os seguintes grupos de composição, referentes a parâmetros empíricos, listados a seguir.¹⁸

- valor de sílica: $SiO_2 / SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO$;
- base: $Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O$;
- ácido: $SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2$;
- R_{250} : $SiO_2 + Al_2O_3 / SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO$;
- razão dolomita: $CaO + MgO / Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O$.

Foram analisados cinco casos, onde foram consideradas diferentes variáveis independentes para compor a equação utilizada nas análises de regressão, de acordo com o que se segue:

Caso 1 – composição química da cinza;

Caso 2 – composição química da cinza + valor de sílica;

Caso 3 – composição química da cinza + valor de sílica + base;

Caso 4 – composição química da cinza +

valor de sílica + base + ácido;

Caso 5 – composição química da cinza + valor de sílica + base + ácido + R_{250} .

Caso 6 – composição química da cinza + valor de sílica + base + ácido + R_{250} + razão dolomita

As equações gerais que foram aplicadas nas análises de regressão são expressas nas Equações 1 e 2, para os modelos de regressão linear e não linear, respectivamente:

$$T(^{\circ}C) = l_1 + l_2[SiO_2] + l_3[Al_2O_3] + l_4[Fe_2O_3] + l_5[CaO] + l_6[K_2O] + l_7[SO_3] + l_8[Na_2O] + l_9[TiO_2] + l_{10}[MgO] + l_{11}[\text{valor de sílica}] + l_{12}[\text{base}] + l_{13}[\text{ácido}] + l_{14}[R_{250}] + l_{15}[\text{dolomita}]$$

Eq. 1

$$T(^{\circ}C) = c_1[SiO_2]^{c_2}[Al_2O_3]^{c_3}[Fe_2O_3]^{c_4}[CaO]^{c_5}[K_2O]^{c_6}[SO_3]^{c_7}[Na_2O]^{c_8}[TiO_2]^{c_9} * [MgO]^{c_{10}}[\text{valor de sílica}]^{c_{11}}[\text{base}]^{c_{12}}[\text{ácido}]^{c_{13}}[R_{250}]^{c_{14}}[\text{dolomita}]^{c_{15}}$$

Eq. 2

Onde $[X]$ representa a composição química do óxido X , os valores de l_i representam os coeficientes do modelo de regressão linear e c_i os coeficientes do modelo de regressão não linear. O ajuste dos modelos foi determinado através de análise de variância ANOVA e expressos em termos de coeficiente de correlação (R).

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização das amostras de carvão

Os resultados obtidos para análise do ponto de fusão são apresentados na Tabela

2. A transformação física do carvão inicia-se, em média, a uma temperatura de 1363 °C, onde se observa o ponto de deformação, e se estende até 1545 °C, em média, sendo este o ponto de fusão. Ainda pode-se perceber uma variabilidade entre os valores dos pontos de fusão da cinza, sobretudo para o ponto de deformação onde está variação é mais acentuada. Isso demonstra a variabilidade nas características do carvão utilizado para os estudos, o que por consequência influencia no comportamento físico da cinza.

Sob o ponto de vista de composição química (Tabela 3), o óxido de silício é o composto mais presente nas amostras, seguido pelo alumínio, ferro e potássio que juntos correspondem a mais de 90 % da composição mássica das amostras de cinza.

Tabela 2. Resultados obtidos para a análise do ponto de fusão da cinza

Valores	p.d. (°C)	p.e. (°C)	p.s.e. (°C)	p.f. (°C)
Média	1363	1490	1513	1545
Máximo	1582	1599	1606	1605
Mínimo	959	1366	1403	1451
Desvio padrão	130	72	61	48

Tabela 3. Resultados das análises da composição química da cinza em termos de óxidos, determinada por fluorescência de raios-X

Valores	Silício	Alumínio	Ferro	Potássio	Cálcio	Titânio	Sódio	Magnésio	Enxofre
Média	60,34	24,78	3,75	3,05	2,04	1,23	0,46	0,78	0,48
Máximo	64,73	30,25	5,66	3,43	3,89	1,59	0,88	1,01	0,71
Mínimo	54,56	20,59	2,98	2,35	0,90	0,93	0,11	0,59	0,19
Desvio padrão	1,94	2,70	0,36	0,21	0,62	0,17	0,19	0,10	0,15

Valores semelhantes também foram observados em outras trabalhos como o de Fallavena *et al.* (2013),¹⁴ que analisou o carvão do sul de Santa Catarina; van Dyk *et al.* (2009),¹⁹ analisou o carvão da África do Sul; e Unuma *et al.* (1986),⁵ analisando

carvão nos Estados Unidos da América e no Canadá. Por outro lado, Song *et al.* (2009)²⁰ trabalhando com o carvão Chinês, observou 28 % de óxido de cálcio na composição da cinza; Ozbayoglu e Ozbayoglu (2006)¹² estudando o carvão obtido na Turquia e

obtiveram cinzas contendo 49,62 % de óxido de ferro, 36,85 % de óxido de cálcio e 32,95 % de óxido de enxofre, sendo os valores máximos após analisar diversas amostras. Diante destes resultados, é possível observar que o local de mineração do carvão é fundamental para a composição química da cinza, o qual irá influenciar nas suas características de fusibilidade.

Embora a temperatura de fusão do óxido de silício e do alumínio sejam acima de 2950 e 2053 °C (Tabela 1), respectivamente, a cinza apresentou temperatura de fusão abaixo de 1605. Isso demonstra a complexidade da mistura constituída pelos óxidos, resultando em misturas eutéticas com menor temperatura de fusão como observado neste trabalho.

3.2. Análises de regressão múltipla

Os resultados obtidos com o ajuste de dados entre a composição química da cinza e a temperatura de fusão pela técnica de regressão são apresentados na Tabela 4. Os valores de coeficiente de correlação ficaram por volta de 0,80 e 0,90, indicando uma forte correlação entre os dados analisados. O valor do coeficiente de correlação é considerado aceitável, quando acima de 0,7; bom para valores acima de 0,8; e excelente para coeficientes superiores a 0,9.²¹ Desta forma, os valores das correlações obtidas neste trabalho foram considerados bons.

Conforme relatado anteriormente alguns autores corroboram que a composição química das cinzas pode ser relacionada com a temperatura de fusão da cinza como Unuma *et al.* (1986),⁶ Liu *et al.* (2013)²² e Özbayoğlu e Özbayoğlu (2006).¹² Por outro lado, alguns pesquisadores relatam que esta

relação é inadequada, sendo necessário relacionar a composição mineralógica para a correlação citada.¹³ Neste trabalho, foi possível obter correlações aceitáveis, mesmo considerando o fato de existirem a formação de misturas eutéticas entre os óxidos presentes na cinza, o que pode apresentar efeitos diversos que diminuem a capacidade da correlação dos efeitos aqui abordados.

Com relação aos modelos matemáticos avaliados neste trabalho, o caso 6, proposto para todas as temperaturas, apresentou o mais elevado coeficiente de correlação, sendo que o modelo não linear proporcionou uma maior correlação entre os dados apresentados em relação ao modelo linear aplicado. Este resultado apresentou exceção para o ponto de esfera da cinza, no qual o ajuste linear apresentou a melhor correlação. Estas observações corroboram com os resultados obtidos por Özbayoğlu e Özbayoğlu (2006),¹² que estudaram a temperatura de fusão da cinza de carvão indiano e também apresentaram a proposta de correlação linear e não linear com a composição química da cinza.

Observou-se que dentre os coeficientes não lineares que correlacionam à composição química da cinza, a concentração de silício é o fator que apresenta maior influência sobre a temperatura de fusão, uma vez que seu coeficiente é equivalente a 2,622, 7,990, 7,170 e 7,675 para as temperaturas de deformação, esfera, semiesfera e fusão, respectivamente (Figura 1). Os valores de composição molar para este óxido oscilam entre 54,56 e 64,73 %. Seguindo do silício, a concentração de alumínio é a variável que apresenta maior influência na temperatura de fusão em relação aos outros constituintes químicos presentes na cinza. Para os outros elementos, os valores sempre ficaram abaixo de 1,0.

Tabela 4. Valores dos coeficientes de correlação (R) para as análises de regressão múltipla, levando em consideração a concentração molar da cinza e os parâmetros do ponto de fusão

	Modelo	p.d.	p.e.	p.s.e.	p.f.
Caso 1	Linear	0,4750	0,785	0,7869	0,8018
	Não linear	0,7797	0,7894	0,8321	0,8366
Caso 2	Linear	0,5737	0,8166	0,8147	0,8389
	Não linear	0,7824	0,7902	0,8321	0,8377
Caso 3	Linear	0,5737	0,8166	0,8147	0,8389
	Não linear	0,7928	0,7936	0,8499	0,8566
Caso 4	Linear	0,5737	0,8166	0,8147	0,8389
	Não linear	0,7933	0,7951	0,8672	0,8783
Caso 5	Linear	0,5883	0,8321	0,8258	0,8437
	Não linear	0,7946	0,7965	0,8720	0,8800
Caso 6	Linear	0,5924	0,8332	0,8262	0,8446
	Não linear	0,7988	0,8006	0,8728	0,8800

Os coeficientes de regressão também foram positivos, o que sugere que o aumento na composição destes óxidos aumenta a temperatura de fusão. Ainda, as observações realizadas neste trabalho estão diretamente ligadas à composição quantitativa da cinza, uma vez que juntos estes dois compostos, óxidos de silício e alumínio, representam em torno de 85 % da massa total presente na mistura. Desta forma, as possíveis alterações que ocorrem na temperatura de fusão devem estar associadas, principalmente, a variação na composição da concentração de óxido de silício e alumínio, com uma influência menos acentuada da composição dos outros óxidos constituintes da cinza. Vassilev *et al.* (1995)³ verificaram como regra que os óxidos SiO₂ e Al₂O₃ aumentam a temperatura de fusão da cinza e que estes óxidos encontram-se entre os 5 compostos que mais influenciam o comportamento de fusibilidade, juntamente com os óxidos de ferro, cálcio e enxofre.

De acordo com Liu *et al.* (2013)²² um aumento na concentração de óxido de cálcio diminui as temperaturas de fusão da cinza até uma concentração de 30 %. Neste

trabalho, foram observados valores deste óxido entre 0,90 e 3,98 % (Tabela 2), o que justifica o sinal de negativo nos coeficientes do modelo matemático, conforme os parâmetros 4 da Figura 1.

Óxido de ferro também diminui as temperaturas de fusão da cinza, conforme estudo de Liu *et al.* (2013),²² que estudou a influência deste óxido até 30 %. Uma vez que a faixa de concentração de óxido obtida neste trabalho foi de 2,98 a 5,66%, é possível justificar o valor negativo dos coeficientes com subíndice 5, na Figura 1. A influência dos óxidos de ferro na temperatura de fusão da cinza também foi estudada por Dyk *et al.* (2009),¹⁹ sendo que os autores também concluíram que os óxidos citados também apresentam um favorecimento na fusibilidade da cinza. Este efeito ainda não é bem esclarecido, mas Liu *et al.* (2013)²² e Dyk *et al.* (2009)¹⁹ associam este efeito a possíveis misturas eutéticas formadas entre os diversos óxidos.

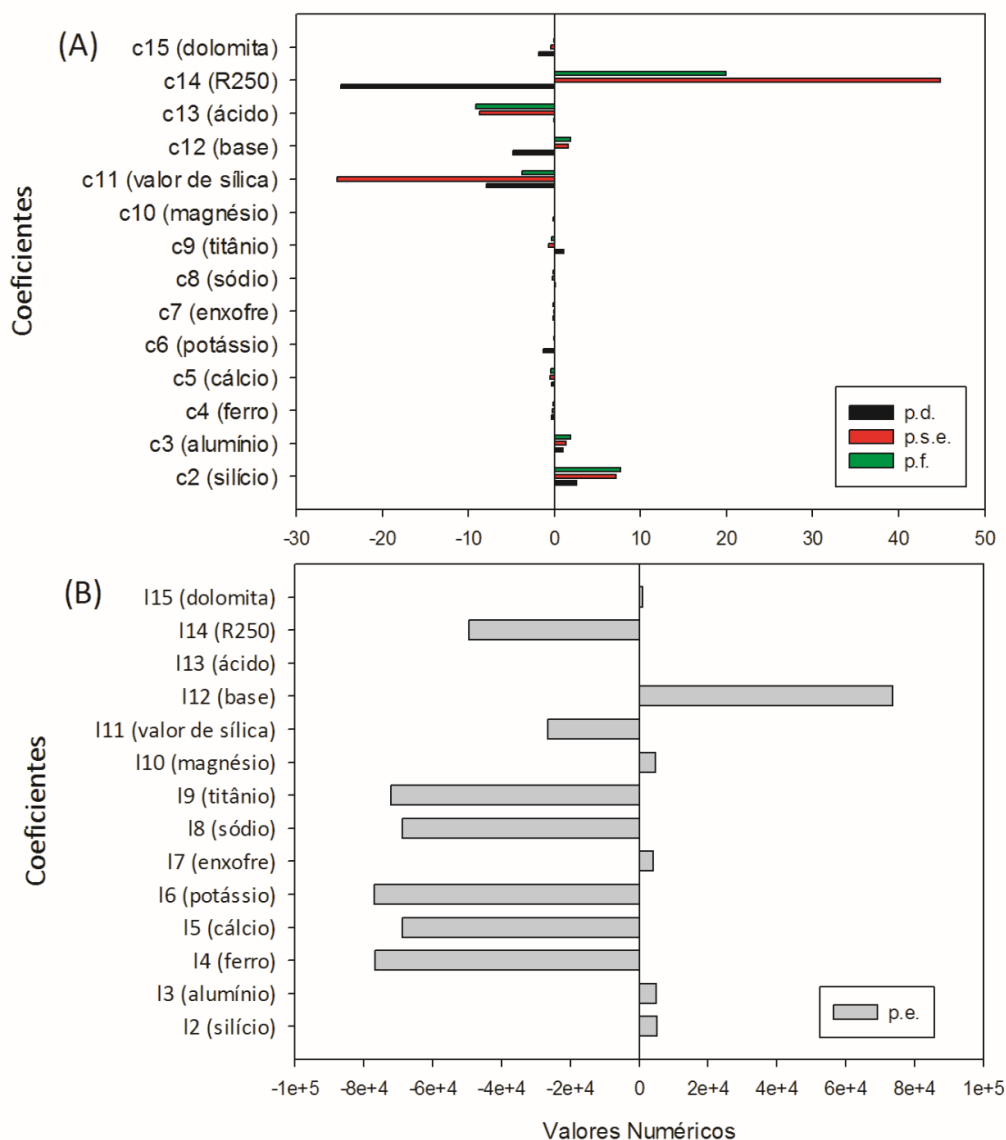


Figura 1. Coeficientes obtidos para os modelos de regressão não-linear (A) para os parâmetros p.d., p.s.e. e p.f. e para o modelo de regressão linear (B) para o parâmetro p.e.

A importância dos parâmetros, valor de sílica, base, ácido, R_{250} e razão dolomita ficam evidentes quando se compara o coeficiente de regressão do caso 1, que leva em conta apenas a composição química da cinza, com os demais casos que incluem estes efeitos. Os melhores coeficientes de correlação são obtidos quando todos os efeitos são incluídos no modelo (Figura 1). Entre estes efeitos, a razão dolomita foi a que apresentou maior influência nas temperaturas de deformação, semiesfera e fluidez, sendo que nestes casos o ajuste não linear apresentou melhor correlação entre os dados. Para o ponto de

esfera a concentração de base foi mais significativa e neste caso o modelo linear apresentou melhor ajuste aos dados experimentais. Estas observações estão em acordo com as observações anteriormente discutidas, principalmente com relação à concentração de cálcio. A razão dolomita representa a razão entre as concentrações de CaO e MgO em relação aos óxidos básicos presentes na cinza (concentração de base). Vassilev *et al.* (1995)³ indicaram que a ordem de influência nas temperaturas de fusão são $SO_3 > CaO > MgO > FeO$. Neste sentido, CaO e MgO apresentam forte influência na

temperatura de fusão. Uma vez que neste estudo a concentração de óxido de enxofre foi uma das menores entre todos os óxidos avaliados, não foi observada uma influência tão acentuada como no estudo anteriormente citado.

4. Conclusão

Um dos principais objetivos deste trabalho foi estudar a composição química e a temperatura de fusão da cinza do carvão do sul do estado de Santa Catarina, além de propor uma correlação matemática entre os resultados obtidos. Assim, a metodologia de análise baseada em fluorescência de raios-X se apresentou como uma técnica viável, embora os coeficientes de correlação entre a temperatura de fusão da cinza e a análise química determinada pela metodologia de fluorescência de raios-X apresente uma forte correlação entre os dados, principalmente através de um modelo não linear. É importante ressaltar que outras formas de correlação podem ser propostas, sendo a técnica de regressão por redes neurais uma potencial metodologia para ser aplicada em trabalhos futuros. Em resumo, a partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que a aplicação de técnica de regressão não linear multivariada, apresenta-se como uma metodologia adequada para correlacionar a composição química e a temperatura de fusão da cinza, utilizando técnica de fluorescência de raios-X.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Engie Tractebel Energia pelo suporte financeiro para a realização do projeto.

Referências Bibliográficas

- ¹ ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*, 3^a ed. Brasília, 2008. [Link]
- ² Kalkreuth, W.; Borrego, A.; Alvarez, D.; Menendez, R.; Osorio, E.; Ribas, M.; Vilela, A.; Cardozoalves, T. Exploring the possibilities of using Brazilian subbituminous coals for blast furnace pulverized fuel injection. *Fuel* **2005**, *84*, 763. [CrossRef]
- ³ Vassilev, S. V.; Kitano, K.; Takeda, S.; Tsurue, T. Influence of mineral and chemical composition of coal ashes on their fusibility. *Fuel Processing Technology* **1995**, *45*, 27. [CrossRef]
- ⁴ van Dyk, J. C.; Baxter, L. L.; van Heerden, J. H. P.; Coetzer, R. L. J. Chemical fractionation tests on South African coal sources to obtain species-specific information on ash fusion temperatures (AFT). *Fuel* **2005**, *84*, 1768. [CrossRef]
- ⁵ Winegartner, E. C.; Rhodes, B. T. J. An empirical study of the relation of chemical properties to ash fusion temperatures. *J. Eng. Gas Turbines Power* **1975**, *97*, 395. [CrossRef]
- ⁶ Unuma, H.; Takeda, S.; Tsurue, T.; Ito, S.; Sayama, S. Studies of the fusibility of coal ash. *Fuel* **1986**, *65*, 1505. [CrossRef]
- ⁷ Bryers, R. W. Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* **1996**, *22*, 29. [CrossRef]
- ⁸ Gupta, S.; Wall, T. F.; Creelman, R. A.; Gupta, R. Ash fusion temperatures and the transformations of coal ash particles to slag. *ACS Division of Fuel Chemistry* **1996**, *41*, 647. [CrossRef] [PubMed]
- ⁹ Ichida, M.; Orimoto, T.; Tanaka, T.; Koizumi, F. Behavior of Pulverized Coal Ash and Physical Property of Dripping Slag under High Pulverized Coal Injection Operation. *ISIJ International* **2001**, *41*, 325. [CrossRef]
- ¹⁰ Jak, E. Prediction of coal ash fusion temperatures with the F*A*C*T thermodynamic computer package. *Fuel* **2002**, *81*, 1655. [CrossRef]
- ¹¹ Lolja, S. A.; Haxhi, H.; Dhimitri, R.; Drushku,

- S.; Malja, A. Correlation between ash fusion temperatures and chemical composition in Albanian coal ashes. *Fuel* **2002**, *81*, 2257. [[CrossRef](#)]
- ¹² Özbayoğlu, G.; Evren Özbayoğlu, M. A new approach for the prediction of ash fusion temperatures: A case study using Turkish lignites. *Fuel* **2006**, *85*, 545. [[CrossRef](#)]
- ¹³ Bagatini, M. C.; Ghiggi, M. L. F.; Osório, E.; Vilela, A. C. F.; Cruz, R.; Defendi, G. Estudo da fusibilidade das cinzas de carvões em função da composição química e mineralógica. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração* **2007**, *3*, 52. [[CrossRef](#)]
- ¹⁴ Fallavena, V. L. V.; Abreu, C. S. de; Inácio, T. D.; Pires, M.; Azevedo, C. M. N. Caracterização detalhada de material de referência certificado de carvão brasileiro. *Química Nova* **2013**, *36*, 859. [[CrossRef](#)]
- ¹⁵ AOAC International *Official methods of analysis*, 16a. ed, Gaithersburg, 1977.
- ¹⁶ ALPHA *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*, 20a. ed, American Public Health Association: Washington, 1998.
- ¹⁷ Lide, D. R. *CRC handbook of chemistry and physics : a ready-reference book of chemical and physical data : 1995-1996*, 76a. ed, CRC Press: Boca Raton, 1995.
- ¹⁸ Niessen, W. R. *Combustion and Incineration Processes: Applications in Environmental Engineering*, 4a. ed, CRC Press: New York, USA, 2010.
- ¹⁹ Van Dyk, J. C.; Benson, S. A.; Laumb, M. L.; Waanders, B. Coal and coal ash characteristics to understand mineral transformations and slag formation. *Fuel* **2009**, *88*, 1057. [[CrossRef](#)]
- ²⁰ Song, W.; Tang, L.; Zhu, X.; Wu, Y.; Rong, Y.; Zhu, Z.; Koyama, S. Fusibility and flow properties of coal ash and slag. *Fuel* **2009**, *88*, 297. [[CrossRef](#)]
- ²¹ Seggiani, M. Empirical correlations of the ash fusion temperatures and temperature of critical viscosity for coal and biomass ashes. *Fuel* **1999**, *78*, 1121. [[CrossRef](#)]
- ²² Liu, B.; He, Q.; Jiang, Z.; Xu, R.; Hu, B. Relationship between coal ash composition and ash fusion temperatures. *Fuel* **2013**, *105*, 293. [[CrossRef](#)]