

FERRARESI, Henrique Nardon; BARBOSA, Gustavo Franco; MORAES, Anderson Antonio Ubices de. Proposta de correlação da eficiência de absorção de  $\text{SO}_2$  em reator de leito fluidizado operando com carvão CE-4500 e calcário dolomítico Ipeúna. In: WORKSHOP DE INOVAÇÃO, PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO, 4., 2019, São Carlos, SP. *Anais...* São Carlos, SP: IFSP, 2019. p. 174-177. ISSN 2525-9377.

## PROPOSTA DE CORRELAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO DE $\text{SO}_2$ EM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO OPERANDO COM CARVÃO CE-4500 E CALCÁRIO DOLOMÍTICO IPEÚNA

Henrique Nardon Ferraresi<sup>1</sup>; Gustavo Franco Barbosa<sup>2</sup>; Anderson Antonio Ubices de Moraes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica, Uberlândia, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, São Carlos, Brasil.

**RESUMO:** A geração de energia a partir da combustão de carvão mineral impõe elevado ônus ao meio ambiente devido a emissão de gases poluentes. O processo de combustão em leito fluidizado permite reduzir tais emissões utilizando calcário para remoção de óxidos de enxofre. Desenvolveu-se neste trabalho uma correlação para estimar a eficiência da absorção de enxofre em reator utilizando de carvão CE-4500 e calcário dolomítico Ipeúna com índice de correlação de 0,831. O banco de dados foi composto por 75 testes em dois reatores com seções transversais de 0,02 e 0,25m<sup>2</sup>, com razões molares Ca/S de até 16,7 e variações de  $U/U_{mf}$  de 4,3 a 12,2 m/s.

**PALAVRAS-CHAVE:** Correlação. Leito Fluidizado. Carvão CE-4500. Calcário Ipeúna.

**ABSTRACT:** Energy generation from the combustion of mineral coal imposes a high damage to the environment due to the emission of polluting gases. The combustion process on fluidized bed allows reducing such emissions using limestone to remove sulfur oxides. This work has developed a correlation to estimate the efficiency of sulfur absorption in a reactor using mineral coal CE-4500 and Ipeuna dolomitic limestone with a correlation index of 0,831.

The database used was composed by 75 tests in two reactors with cross section of 0,02 and 0,25m<sup>2</sup>, Ca/S molar ratio up to 16,7 and  $U/U_{mf}$  variations from 4,3 to 12,2m/s.

**KEYWORDS:** Correlation. Fluidized bed. Coal CE-4500. Limestone Ipeúna.

### INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um insumo fundamental na sociedade atual e necessária para garantir o desenvolvimento econômico e social de um país. O Brasil, devido a sua grande extensão territorial, dispõe e utiliza largamente de usinas hidroelétricas para geração de energia. Segundo Ferraresi (2015), o Brasil vem enfrentando graves crises no setor elétrico devido a diversos fatores, entre eles, o aumento do mercado consumidor, o mau planejamento no uso dos recursos hídricos na produção de eletricidade, uma forte dependência da geração de energia por hidroelétricas e a ocorrência frequente de fortes estiagens.

Sabe-se que a construção de novas hidroelétricas apresentam sérios problemas relativos a viabilidade ecológica, financeira e social (GAVRONSKI, 2007). O uso do petróleo e do gás natural são atrelados ao mercado mundial, trazendo incertezas e podendo representar um grande ônus à balança comercial (MORAES, 2011). O uso da energia nuclear ainda se depara com enormes restrições técnicas devido à segurança e demandar um enorme tempo de construção. Dentro desta perspectiva, a busca de novas tecnologias que apresentem um alto grau de confiabilidade, que atenda aos requisitos de segurança do meio ambiente, alta eficiência e possua viabilidade técnica e econômica tem um papel fundamental na escolha de sua implementação.

À combustão de carvão mineral em reatores de leito fluidizado é um forte candidato para produção de energia por permitir minimizar as emissões de gases poluentes aliados com uma alta eficiência de combustão. Neste trabalho é apresentado uma nova correlação da eficiência da absorção de  $\text{SO}_2$  durante queima de carvão CE-4500 com uso de calcário dolomítico Ipeúna.

## MATERIAL E MÉTODOS

A captura de dióxido de enxofre gerado durante a combustão de carvão mineral no interior de um reator de leito fluidizado ocorre pela adição de calcário. A eficiência desta captura depende de um grande número de parâmetros tais como das cinéticas químicas das reações envolvidas no processo, do diâmetro da partícula de calcário, das condições hidrodinâmicas do reator de leito fluidizado e outros.

O uso de uma modelagem fundamental ou fenomenológica do problema é altamente desejável, entretanto, devido ao grande número de fenômenos envolvidos aliados com a complexidade de ajustes de diversos parâmetros tornam seu uso desaconselhável, principalmente quando as dinâmicas físico-químicas são desconhecidas.

Uma segunda abordagem é utilizar de parâmetros conhecidos que influenciam o sistema e, a partir do teorema de *Pi de Buckingham*, propor parâmetros adimensionais e independentes, que através de uma análise estatística, possibilitem gerar uma correlação específica para um determinado banco de dados sendo esta proposta dotado neste trabalho. Essa metodologia é dividida nas seguintes etapas:

- Definição dos grupos adimensionais;
- Criação do banco de dados;
- Ajustes dos coeficientes.

### Adimensionais.

A partir da análise dos trabalhos de Moraes (2011) e Ferraresi (2015) é possível destacar 7 grupos adimensionais de interesse apresentados nas equações de (1) a (7). A tabela 1 fornece os parâmetros utilizados nestas equações.

**Tabela 1 – Lista dos parâmetros utilizados nos adimensionais  $\pi_1$  a  $\pi_7$ .**

Símbolo	Nome	Unidade
$A$	Área da seção transversal do reator	$m^2$
$C_{SO_2,CC} d_f$	Concentração de dióxido de enxofre com adição de calcário no reator	$ppm$
$C_{SO_2,SC}$	Concentração de dióxido de enxofre sem adição de calcário no reator	$ppm$
$\left(\frac{Ca + Mg}{S}\right)_{molar}$	Relação molar de Cálcio e Magnésio presente no calcário sobre de enxofre presente no carvão mineral	$Kmol/Kmol$
$F_{calcário}$	Taxa de alimentação de calcário dolomítico	$g/s$
$F_{carvão}$	Taxa de alimentação de carvão mineral	$g/s$
$H_{dreno}$	Altura do dreno	$m$
$M_{leito}$	Massa de particulado no reator	$kg$
$T_{(Kelvin)}$	Temperatura do reator	$K$
$U$	Velocidade de fluidização do reator	$m/s$
$U_{mf}$	Velocidade de mínima fluidização do reator	$m/s$

Fonte: Elaborada pelos autores.

$$\pi_1 = 100 - \frac{C_{SO_2,SC} - C_{SO_2,CC}}{C_{SO_2,SC}} \quad (1) \quad \pi_2 = \left(\frac{Ca + Mg}{S}\right)_{molar} + 1 \quad (2) \quad \pi_3 = \frac{U}{U_{mf}} \quad (3)$$

$$\pi_4 = \frac{A}{H_{dreno}^2} \quad (4) \quad \pi_5 = T_{(Kelvin)} \quad (5) \quad \pi_6 = \frac{M_{leito}}{A \cdot H_{dreno}} \quad (6)$$

$$\pi_7 = \frac{M_{leito}}{F_{carvão} + F_{calcário}} \quad (7)$$

### Banco de dados

O banco de dados para geração da correlação é composto por 75 pontos experimentais sendo 25 pontos experimentais do trabalho de Costa (2005), 46 pontos de Ávila (2008) e 4 de Moraes (2011). Em todos os trabalhos foi utilizado de insumos nacionais sendo do carvão mineral CE-4500 e do calcário dolomítico de Ipeúna. Os dados foram obtidos de dois reatores, um de bancada de corpo cilíndrico com área de 0,02m<sup>2</sup> e outra bancada piloto de seção retangular com área de 0,25m<sup>2</sup>. Foram utilizadas alturas de dreno de 120 a 270 mm, razões de velocidade do reator sobre a de mínima fluidização variando de 4,3 a 12,2 e razão molar (Ca+Mg)/S de 0 a 16,7.

#### Ajuste dos coeficientes

Para avaliação do coeficiente de correlação e ajustes dos coeficientes dos adimensionais foram utilizados, respectivamente, as funções CORREL e PROJ.LIN do programa Excel 2013.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 proporciona uma análise dos índices de correlações entre os adimensionais propostos. Os melhores índices de correlação com o adimensional  $\pi_1$  são os adimensionais  $\pi_2$  (89%),  $\pi_6$  (-37%) e  $\pi_3$  (-24%).

**Tabela 2 – Índice de correlação entre os números adimensionais propostos.**

	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_6$	$\pi_7$
$\pi_1$	1.00	-0.89	-0.24	-0.20	-0.09	-0.37	0.05
$\pi_2$	-	1.00	0.21	0.032	0.02	0.18	-0.24
$\pi_3$	-	-	1.00	0.18	0.38	0.31	-0.16
$\pi_4$	-	-	-	1.00	0.53	0.37	0.26
$\pi_5$	-	-	-	-	1.00	0.42	0.12
$\pi_6$	-	-	-	-	-	1.00	0.72
$\pi_7$	-	-	-	-	-	-	1.00

Fonte: Elaborado pelos autores.

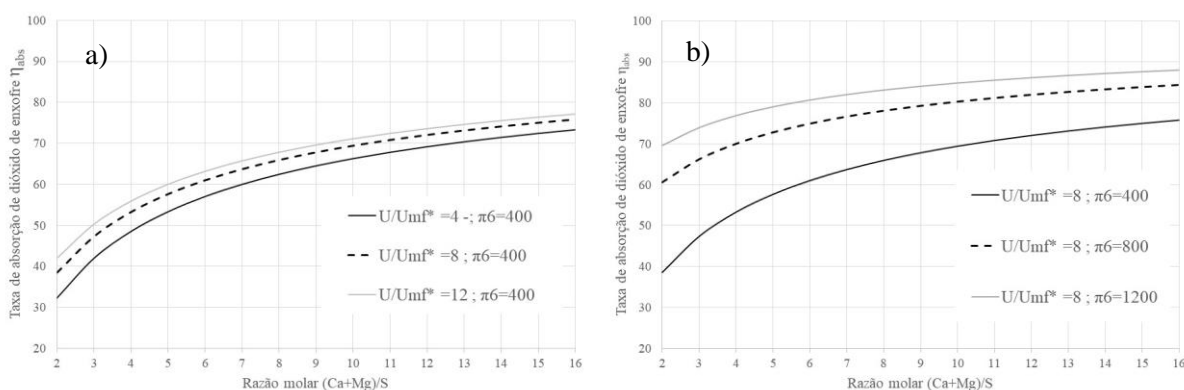
As equações (8) e (9) fornecem, respectivamente, as correlações para eficiência da absorção de enxofre utilizando-se de todos os adimensionais propostos e dos 3 adimensionais com maior índice de correlação. Percebe-se que o coeficiente de determinação da equação (8) de 0,84 é levemente superior a equação (9), onde seu coeficiente é de 0,831. Pela simplicidade e pequena diferença do índice de correlação recomenda-se o uso da equação (9).

$$\eta_{abs,SO_2} = 100 - 1,32 \cdot 10^{-4} \pi_2^{-0,58} \pi_3^{-0,44} \pi_4^{-0,003} \pi_5^{2,39} \pi_6^{-0,33} \pi_7^{-0,26}, R^2=0,840 \quad (8)$$

$$\eta_{abs,SO_2} = 100 - 6,85 \cdot 10^3 \pi_2^{-0,54} \pi_3^{-0,14} \pi_6^{-0,64}, R^2=0,831 \quad (9)$$

A Figura 1 apresenta a eficiência de absorção de enxofre, utilizando da correlação (9), variando-se a razão molar (Ca+Mg)/S em duas situações. Na primeira, caso a), manteve-se fixo o adimensional 6 e variou-se a razão entre velocidade de fluidização e de mínima. No caso b, fixou a razão de velocidades modificando-se o adimensional 6.

**Figura 1 – Eficiência de retenção de enxofre obtido pela correlação (9) em função da razão molar (Ca+Mg)/S. Caso a)  $\pi_6=400$  com  $U/U_{mf}$  de 4,8 e 12. Caso b)  $U/U_{mf}=8$  com  $\pi_6$  de 400, 800 e 1200.**



Fonte: Elaborado pelos autores.

Percebe-se da figura acima, em ambos os casos, o aumento da eficiência de absorção de enxofre com o aumento da razão molar (Ca+Mg)/S. Esta mesma tendência é observada no caso do aumento da velocidade de fluidização, caso a, que pode ser explicado pelo melhor agitação do leito fluidizado. Com aumento do adimensional 6, também se nota uma melhoria da eficiência de absorção. Um possível explicação para este aumento pode ser explicado por uma maior massa e tempo de residência das partículas de calcário no reator.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido uma nova correlação para estimar a eficiência de absorção de enxofre em reatores de leito fluidizado utilizando-se de dois insumos nacionais, carvão CE-4500 e calcário dolomítico de Ipeúna. Devido a simplicidade propõe-se o uso da correlação com uso de apenas 3 adimensionais. Nota-se que as tendências da correlação são compatíveis com os resultados experimentais.

## REFERÊNCIAS

ÁVILA, I. **Um estudo da sorção de SO<sub>2</sub> por calcário em analisador termogravimétrico e na combustão de carvão em leito fluidizado.** Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica - EESC/USP. São Carlos, p. 296. 2008.

COSTA, M. C. D. **Emissões poluentes na combustão em leitos fluidizados de carvão mineral.** Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica - EESC/USP. São Carlos, p. 114. 2005.

FERRARESI, H. N. **Estudo teórico de geração de vapor através da queima de carvão mineral brasileiro em um reator de leito fluidizado atmosférico borbulhante.** Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica - UFTM. Uberaba, p. 81. 2015.

GAVRONSKI, J. D. **Carvão mineral e as energias renováveis no Brasil.** Tese de Doutorado em Engenharia de Minas - UFRG. Porto Alegre, p. 290. 2007.

MORAES, A. A. U. D. **Modelagem e simulação da combustão em leito fluidizado de carvão mineral com alto teor de cinzas com de carvão mineral com alto teor de cinzas com.** Tese em Doutorado em Engenharia Mecânica - EESC/USP. São Carlos, p. 254. 2011.