

## **DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DA INJEÇÃO DE AR SECUNDÁRIO NO PROCESSO DE COMBUSTÃO DE CARVÃO EM LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE**

**Eugênio de Souza Morita, morita@fem.unicamp.br<sup>1</sup>**  
**Araí Augusta Bernárdez Pécora, arai@fem.unicamp.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, CP 6122, 13083-970, Campinas, SP, Brasil.

***Resumo:** A tecnologia de combustão aplicada a leito fluidizado circulante permite controlar as emissões de gases nocivos ao meio ambiente, entre eles o NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>. Uma das vantagens de combustores com leito fluidizado circulante reside na possibilidade de adição de ar secundário, fator importante na redução das emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> em função de proporcionar maior disponibilidade de oxigênio na região onde predomina a combustão de voláteis. Este trabalho visa estudar a influência da injeção de ar secundário sobre o processo de combustão de carvão na presença de calcário do tipo dolomítico em leito fluidizado circulante (LFC). Foram determinadas as emissões de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO e O<sub>2</sub> além dos perfis de temperatura e de pressão estática ao longo do circuito principal do LFC. Areia quartzosa com diâmetro médio de 312 μm foi utilizada como material inerte. O sistema experimental é composto por uma coluna principal de 0,102 m de diâmetro e 4 m de altura, ciclone, válvula de amostragem, coluna de retorno de sólidos e válvula de recirculação de sólidos tipo L. Testes foram realizados para razões entre a vazão de ar secundário e de ar total (AS/AT) de 0, 16 e 27 %, mantendo-se o excesso de ar em torno de 30 % e a relação molar Ca/S igual a 1. Os gases de combustão foram medidos de forma contínua, em regime permanente, pelo método baseado no princípio de detecção por infravermelho não dispersivo e analisador portador de célula eletroquímica. A temperatura na coluna principal, em regime permanente, oscilou entre 800 e 850 °C. A partir dos resultados obtidos foi possível observar que a adição de ar secundário provocou a redução nas emissões de NO<sub>x</sub> e de CO, sendo que as variações para NO<sub>x</sub> foram maiores. O perfil de temperaturas apresentou maior uniformidade com a adição de ar secundário e a análise do perfil de pressão indicou a presença de maior concentração de sólidos na base do reator.*

**Palavras-chave:** Combustão, carvão mineral, calcário dolomítico, leito fluidizado circulante, emissões.

### **1. INTRODUÇÃO**

Durante as últimas décadas é possível observar um aumento do uso de combustores de leito fluidizado circulante para a produção de energia elétrica devido à flexibilidade desta tecnologia em relação ao uso de diferentes tipos de combustíveis, entre eles madeira, biomassa, carvão, resíduos urbanos e misturas destes materiais (Ravelli *et al.*, 2007; Pallarès e Johnsson, 2006 e Gayán *et al.*, 2003), visando o controle das emissões de poluentes atmosféricos. Dentre os principais poluentes atmosféricos emitidos no processo de combustão estão o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), o qual pode ser reduzido pela adição de calcário na mistura com carvão, e os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), os quais podem ter seus níveis reduzidos através do estagiamento do ar. Os limites máximos para emissão de gases poluentes, provenientes de processos de combustão tem se tornado progressivamente menores exigindo a busca por parâmetros de combustão mais eficientes com o intuito de reduzir e controlar as emissões para o meio ambiente.

Lu *et al.* (2008), Basu (2006) e Ersoy *et al.* (2004) em trabalhos precedentes revelam que o aumento da temperatura de combustão aumenta as emissões de NO<sub>x</sub> e reduz as emissões de óxido nítrico (N<sub>2</sub>O). Assim como o oxigênio é necessário para a oxidação do nitrogênio do combustível, níveis elevados deste gás aumentam ambos o N<sub>2</sub>O e o NO<sub>x</sub> durante a combustão. Estes parâmetros estão intimamente relacionados com a fluidodinâmica na coluna principal ou riser do LFC. Estes gases podem ser controlados com a injeção de ar secundário (AS) em determinadas posições na coluna principal, método que favorece a redução das emissões de NO<sub>x</sub> especialmente durante a combustão de voláteis. Fatores como propriedades do combustível, geometria do reator e regime de fluidização também afetam consideravelmente as emissões (Li *et al.*, 2007 e Lyngfelt *et al.*, 1997).

É reconhecido que a injeção de ar secundário altera a distribuição axial e radial de sólidos e o fluxo de sólidos principalmente na região próxima da injeção. O projeto do dispositivo de injeção de ar secundário, posição da injeção e a razão entre a vazão mássica de ar secundário e a vazão mássica de ar total (AS/AT) constituem parâmetros que afetam

o fluxo gás-sólido em sistemas LFC (Ersoy *et al.*, 2004). A presença de ar secundário aumenta a concentração de sólidos abaixo do ponto de injeção devido ao decréscimo do ar de fluidização quando se compara ao fluxo na condição sem operação de AS para uma mesma velocidade superficial do gás e taxa de recirculação de sólidos (Koksal *et al.*, 2007; Koksal e Hamdullahpur, 2004 e Marzocchella e Arena, 1995).

Uma ineficiente mistura gás-sólido pode conduzir a emissão de hidrocarbonetos ou a uma sulfatação reversa em regiões deficientes de oxigênio assim como na formação de NOx em regiões com disponibilidade de oxigênio no *riser* (Koksal e Hamdullahpur, 2004).

Koksal e Hamdullahpur (2004) em seus estudos envolvendo injetores de ar secundário do tipo tangencial e axial observaram, por exemplo, que ambos injetores aumentam consideravelmente a quantidade de sólidos no *riser* quando comparado com experimentos onde apenas ar primário foi utilizado. Este aumento de sólidos também influenciou o coeficiente de troca de calor estudados por Koksal *et al.* (2008). Esses autores relatam ainda que muitas pesquisas envolvendo a fluidodinâmica de combustores de leito fluidizado tratam apenas da injeção primária de ar. Salientam a necessidade de pesquisas envolvendo a injeção de ar secundário para a compreensão dos fenômenos de interação gás-sólido e fornecimento de subsídios para a construção de diferentes tipos de injetores.

A quantidade necessária de ar para combustão depende da composição do combustível, projeto do combustor e das condições operacionais do teste estabelecidas para quantidades fixas de excesso de ar ( $\phi$ ), que normalmente está entre 20 e 30 %. Este excesso de ar é necessário para assegurar a combustão completa. Basu (2006) aponta para a dificuldade em se estabelecer uma relação AS/AT fixa otimizada. Este autor afirma que para combustores LFC freqüentemente são empregadas quantidades que variam de 1/3 até 2/3 do ar requerido para combustão.

A distância entre a placa distribuidora e o plano de injeção de AS determina o volume da região subestequiométrica e o tempo de residência das partículas nesta região densa do leito.

A injeção tangencial de AS favorece o aumento da velocidade tangencial das partículas e conseqüentemente leva ao escoamento do tipo redemoinho no interior do *riser*. No modo de injeção radial, o fluxo de ar é direcionado na linha que passa pelo centro do duto em um plano horizontal. Um terceiro modo trata-se de um projeto híbrido no qual o injetor possui componentes radiais e axiais antes de entrar no *riser* (Ersoy *et al.*, 2004).

O objetivo deste trabalho é investigar os efeitos da injeção de ar secundário nas emissões de NOx, SO<sub>2</sub>, CO e O<sub>2</sub> no perfil de temperaturas e perfil de pressão estática e na eficiência de conversão de carbono no combustor LFC operando em regime permanente para relação fixa cálcio/enxofre (Ca/S) de 1,0 e excesso de ar ( $\phi$ ) entre 25 e 30 %.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Sistema experimental

Os ensaios foram realizados em combustor de leito fluidizado circulante presente no Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, Fig. (1). O circuito principal do sistema experimental, mostrado na Fig. (2) é composto por uma coluna principal (0,102 m de diâmetro), ciclone, válvula de amostragem de sólidos, coluna de retorno ou *stanpipe* (0,063 m de diâmetro) e válvula de recirculação tipo L. O sistema é isolado termicamente através de manta cerâmica coberta com alumínio corrugado.

Testes experimentais foram realizados utilizando carvão (diâmetro médio de 461  $\mu\text{m}$ ) como combustível e calcário dolomítico como adsorvente (diâmetro médio de 145  $\mu\text{m}$ ) tendo a adição prévia de areia (diâmetro médio de 312  $\mu\text{m}$ ) como material inerte.

A velocidade superficial do gás ( $U_g$ ) no *riser* variou entre 8 e 9 m/s caracterizando regime de fluidização rápida.

Na Figura (2) também é possível visualizar o dispositivo de injeção de ar secundário, o qual injeta ar em quatro posições, através de tubos com diâmetro de 0,042 m dispostos radialmente e situados a uma altura de 0,92 m acima da base do *riser*.

Equipamentos auxiliares como um compressor de deslocamento positivo do tipo *roots* fornece ar de fluidização ao sistema. Este ar é pré-aquecido, antes de chegar à base do reator, por dois aquecedores, um elétrico e outro onde ocorre a queima de gás liquefeito de petróleo (GLP). Um bocal convergente-divergente (tipo Venturi) assegura elevadas velocidades, evitando a obstrução da linha pelo material sólido. O sistema apresenta ainda trocadores de calor para resfriamento dos gases que deixam o ciclone, filtro de mangas, chaminé, placas de orifício e rotâmetros para determinação da vazão de gases.

Ao longo do circuito principal estão distribuídos 11 termopares tipo K e 14 válvulas solenóides conectadas a um transdutor de pressão para monitoramento de temperatura e pressão estática, respectivamente. Os sensores estão conectados a um sistema de controle e aquisição de dados, programado em LabView. O alimentador de sólidos, composto por uma rosca sem fim, injeta as partículas sólidas de areia, carvão e calcário a uma altura de 0,77 m acima da base do reator.

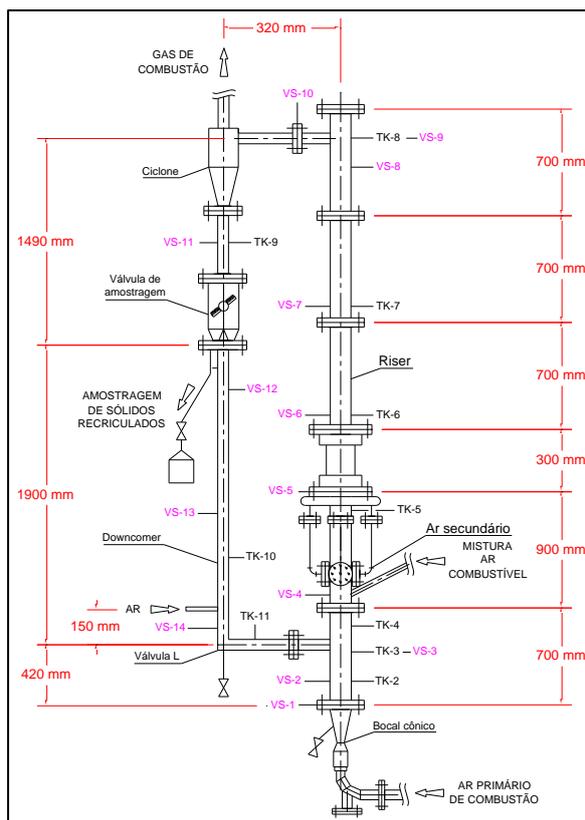


Figura 1: Combustor de Leito Fluidizado Circulante. Figura 2: Esquema do circuito principal LFC.

A massa específica da partícula ( $\rho_p$ ), diâmetro médio de Sauter ( $d_p$ ), esfericidade ( $\phi$ ) e poder calorífico superior (PCS) dos materiais sólidos utilizados estão exibidos na Tab. (1). Esses materiais estão classificados como pertencentes ao grupo B de Geldart.

Tabela 1: Propriedades das partículas sólidas

Material	Tipo	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$d_p$ [μm]	
Areia	Quartzosa	2525	312	$\phi=0,81$
Carvão	CE-4500	1613	461	PCS=18134 kJ/kg
Calcário	Dolomítico	2528	145	

As composições químicas do calcário dolomítico e do carvão estão mostradas nas tabelas (2) e (3), respectivamente.

Tabela 2: Composição química do calcário dolomítico

Elemento químico	Composição em massa (%)
Ca	17
Mg	8,1
S	0,1

Tabela 3: Composição química do carvão CE-4500

Elemento	Composição em massa (%)
C	52,0
H	3,5
N	1,1
O	7,9
S	1,9

A análise imediata do carvão, mostrada na Tab. (4), juntamente com sua composição química, permitiu o cálculo da relação molar Ca/S e excesso de ar utilizado em cada teste:

**Tabela 4: Análise imediata do carvão CE-4500**

Parâmetro	Composição em massa
Umidade (% b.u.)	1,76
Carbono (% b.s.)	29,80
Voláteis (% b.s.)	27,77
Cinzas (% b.s.)	42,42

Foram realizados 3 testes experimentais tendo fixo os seguintes parâmetros operacionais: relação molar Ca/S igual a 1, inventário de material inerte igual a 7 kg e excesso de ar em torno de 30 %. A mistura combustível era composta por 87,7 % de carvão mineral e 12,3 % de calcário, em massa. A Tabela (5) exhibe a condição de operação em cada teste ensaiado, onde se verifica a utilização de ar secundário em dois deles (testes 2 e 3).

**Tabela 5: Condições operacionais ensaiadas**

Teste	AS/AT (%)	$\phi$ (%)	$T_{riser}$ (°C)	$U_g$ (m/s)	$m_{mist}$ (kg/h)	$x_{C,mist}$
1	0	29	810	8,5	9,85	0,88
2	16	30	843	9	9,91	0,88
3	27	30	845	9	9,92	0,88

Na condição de regime permanente, a temperatura média no *riser* ( $T_{riser}$ ) foi mantida ao redor 850° C. Nessa condição foram medidos os valores das concentrações dos gases emitidos pelo processo, logo após o filtro de mangas, além do perfil de pressão estática e de temperatura ao longo do circuito principal do combustor de LFC.

As eficiências de conversão de carbono ( $\eta$ ) foram calculadas segundo a Eq. (1) (Gayán *et al.*, 2004), a partir da determinação das vazões mássicas da mistura de carvão e calcário alimentada ( $\dot{m}_{mist}$ ) e de cinzas volantes ( $\dot{m}_{cinzas}$ ) e das concentrações de carbono na mistura ( $x_{C,mist}$ ) e nas cinzas ( $x_{C,cinzas}$ ).

$$\eta = \frac{[\dot{m}_{mist} \cdot x_{C,mist} - \dot{m}_{cinzas} \cdot x_{C,cinzas}]}{\dot{m}_{mist} \cdot x_{C,mist}} \quad (1)$$

Para uma melhor comparação e padronização das emissões, os valores em ppm<sub>v</sub> foram corrigidos para a base de 6 % de oxigênio presente no gás de combustão, segundo a Eq. (2) conforme norma ANSI/ASME PTC 19.10 (1981):

$$\chi_{gas}^{ref} = \chi_{gas}^{med} \cdot \frac{(21 - \chi_{O_2}^{ref})}{(21 - \chi_{O_2}^{med})} \quad (2)$$

Os gases de combustão foram coletados de forma contínua em regime permanente e analisados pelo princípio de detecção por infravermelho não dispersivo (medida das concentrações de SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em analisador Horiba modelo Enda 1000 com imprecisão de 5 ppm<sub>v</sub>) e por célula eletroquímica (medida das concentrações de CO e O<sub>2</sub>, com imprecisão de 20 ppm<sub>v</sub> e 0,2 %, respectivamente, em analisador Testo modelo 325M).

### 3. RESULTADOS

Neste item são apresentados os perfis de temperatura e pressão obtidos para um dos testes realizados sem injeção de ar secundário com o intuito de compará-lo com os perfis obtidos nos testes onde ar secundário foi adicionado. Em seguida são apresentados os resultados obtidos para as emissões gasosas e eficiência de conversão de carbono nos cinco testes realizados.

#### 3.1. Perfis de temperaturas

As Figuras (3) a (5) mostram os perfis de temperatura obtidos nos testes sem e com a presença de ar secundário.

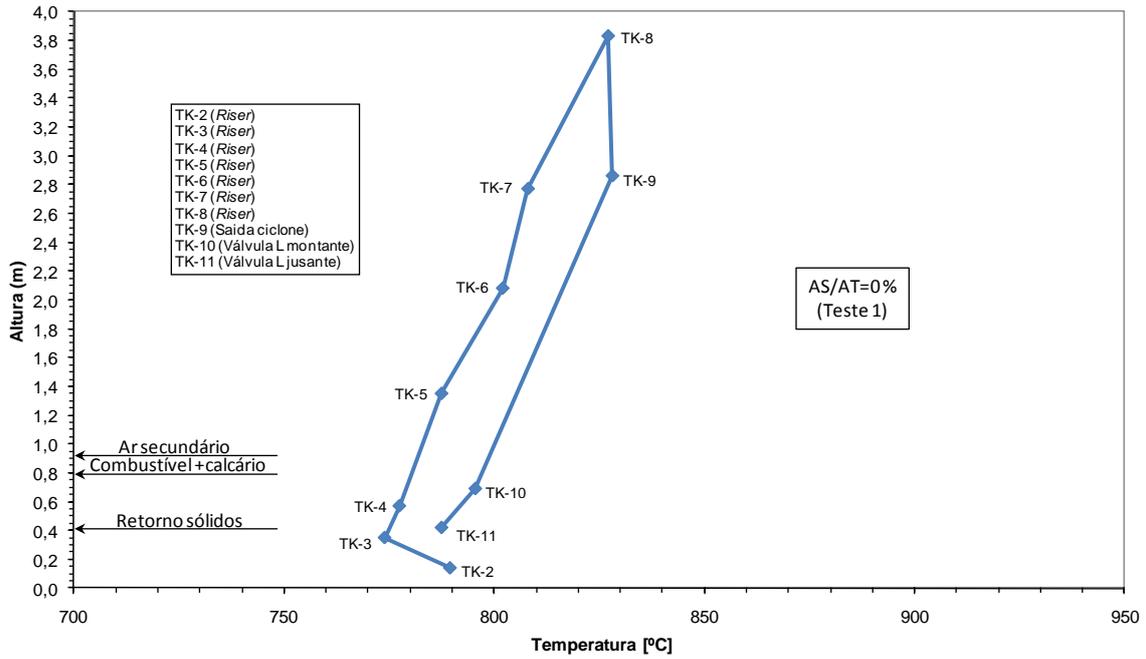


Figura 3: Perfil de temperaturas no circuito principal para a razão AS/AT=0 %

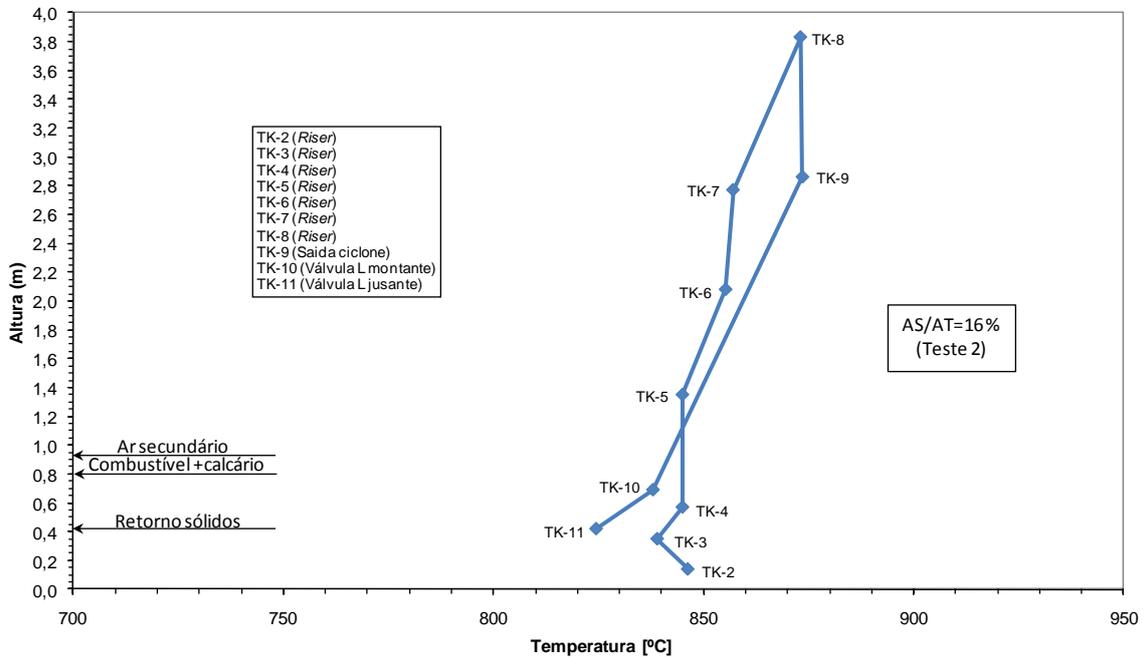


Figura 4: Perfil de temperaturas no circuito principal para a razão AS/AT=16 %

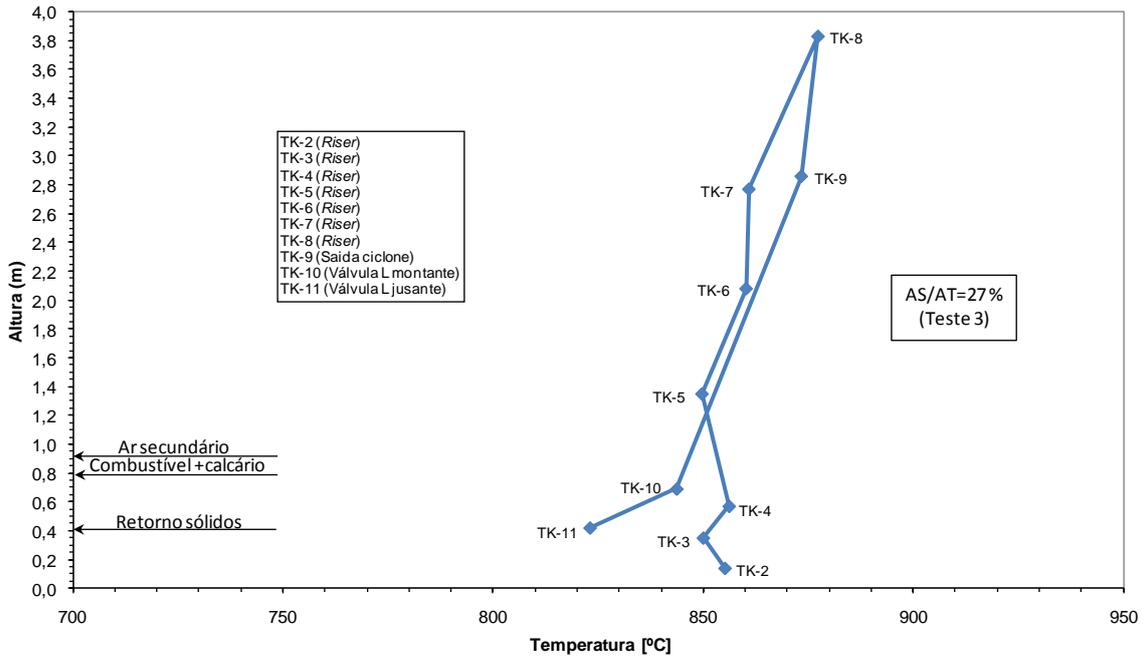


Figura 5: Perfil de temperaturas no circuito principal para a razão AS/AT=27 %

Maiores variações de temperatura entre a base e o topo do reator foram observadas nos testes sem a presença de ar secundário, indicando que a injeção de AS favorece a uniformidade de temperatura no riser. Verifica-se ainda que a injeção desse ar ocasiona a redução da temperatura na região próxima à entrada de AS (TK-5) sendo que essa redução é proporcional à quantidade de ar insuflada.

### 3.2. Perfis de pressão estática

Os perfis de pressão estática ao longo do circuito principal para os testes sem e com injeção de ar secundário estão apresentados na Fig. (6).

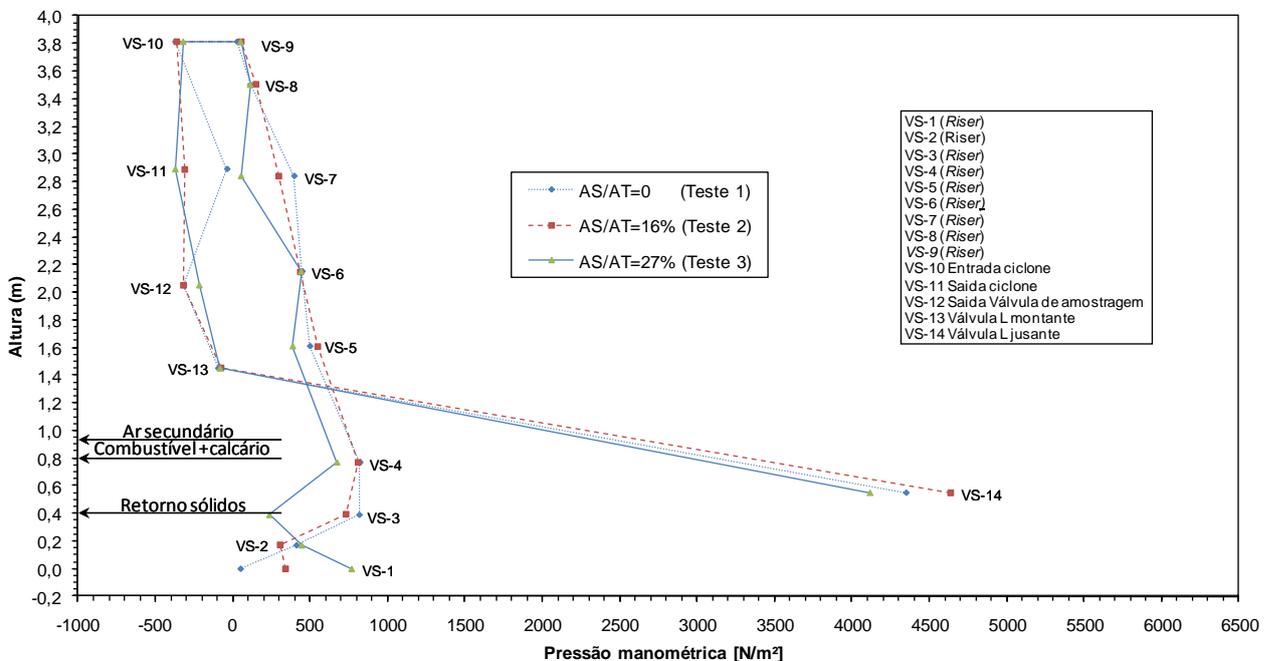


Figura 6: Perfil de pressão estática no circuito principal para os testes com razão AS/AT de 0, 16 e 27 %.

Verifica-se que a presença do ar secundário influencia significativamente a fluidodinâmica do sistema. É possível observar um aumento do material particulado na base do reator, denotado pelo aumento dos valores de pressão registrados pela válvula VS-01. Esse efeito também foi evidenciado nos trabalhos de Koksai *et al.* (2008), Koksai e Hamdullahpur (2004) e Ersoy *et al.* (2004). Para esses autores, a injeção de AS afeta significativamente a fluidodinâmica na região abaixo da injeção.

A coluna de retorno apresentou perfis de pressão típicos de sistemas operando com leito fluidizado circulante (Basu, 2006 e Rhodes e Laussmann, 1992), onde se verificam valores de pressão máximos na base da coluna (VS-14).

### 3.3. Emissões gasosas e eficiência de conversão de carbono

A análise elementar das cinzas volantes mostrada na Tab. (6) fornece subsídios para o cálculo da eficiência de conversão de carbono nos testes realizados.

**Tabela 6: Análise elementar CHN presentes nas cinzas volantes**

Teste	Magnésio (%)	Cálcio (%)	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Nitrogênio (%)	Enxofre (%)
1	0,72	1,98	9,6	<0,5	<0,5	1,86
2	0,82	2,15	9	<0,5	<0,5	1,89
3	0,9	2,33	7,5	<0,5	<0,5	1,64

Os resultados de emissões dos gases de combustão na saída do sistema (corrigidos para a base de 6 % de oxigênio), descarga de cinzas, teor de carbono nas cinzas e eficiência de conversão de carbono estão reportadas na Tab. (7).

**Tabela 7: Resultados obtidos para as concentrações O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO e NOx no gás de exaustão, descarga de cinzas, teor de carbono nas cinzas e eficiência de conversão de carbono**

Teste	AS/AT (%)	$\phi$ (%)	Ca/S	O <sub>2</sub> [% <sub>v</sub> ]	SO <sub>2</sub> [ppmv]	CO [ppmv]	NOx [ppmv]	m <sub>cinzas</sub> (kg/h)	x <sub>C, cinzas</sub>	$\eta$ (%)
1	0	29	1	8,4	<10	103	171	0,365	0,096	91,91
2	16	30	1	10	<10	100	150	0,342	0,090	92,41
3	27	30	1	9,5	<10	105	139	0,285	0,075	93,68

Conforme também verificado nos trabalhos de Liu *et al.* (2009), Li *et al.* (2007), Berge (1988), Ishizuka *et al.* (1988) e Kullendorf e Anderson (1985), a emissão de NOx teve suas concentrações reduzidas com a adição de ar secundário. Li *et al.* (2007) explicam que a combustão estagiada de ar ocorre em duas regiões: região primária e região secundária. Na região primária a razão estequiométrica é menor que 1 (subestequiométrica) e a combustão se processa com falta de ar, reduzindo a disponibilidade de oxigênio e ocasionando a baixa formação de NOx térmico e combustível. Na região secundária, a atmosfera é rica em oxigênio ocasionando a combustão do combustível não queimado e do CO formado na região primária.

Não foi possível estabelecer a influência da injeção de ar secundário sobre a emissão de SO<sub>2</sub> uma vez que quantidades muito pequenas foram detectadas pelo analisador de gases, indicando que a eficiência de adsorção foi elevada, em todos os testes realizados.

Observa-se um leve aumento da eficiência de conversão de carbono com o aumento da injeção de ar secundário, indicando melhores condições para oxidação do carbono presente no combustível, também verificado na Tab. (7), com menores concentrações de carbono presentes nas cinzas volantes, fato também observado por Gungor e Eskin (2008).

O teor de carbono presente nas cinzas de fundo não foram consideradas nos cálculos devido à dificuldade experimental apresentada em sua determinação em função do tamanho das partículas e da não uniformidade do material. Observou-se que o teor de cinzas de fundo era muito pequeno em relação ao teor de cinzas volantes. O material descarregado pelo fundo do *riser*, ao final de cada teste, era constituído basicamente pelo material inerte utilizado no reator (areia).

#### 4. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos foi comprovado que misturas carvão dolomita podem ser queimadas eficientemente em um combustor com leito fluidizado circulante com excesso de ar ao redor de 30 %. Os valores de eficiência de conversão de carbono variaram de 91 a 94 % para uma temperatura média na câmara de combustão próxima a 850 °C.

As emissões de SO<sub>2</sub> foram inferiores a 10 ppm<sub>v</sub>, valor mínimo detectado pelos analisadores, mostrando a elevada capacidade de adsorção do calcário dolomítico utilizado, fato já detectado por Crnkovic *et al.* (2004). A injeção de ar secundário não influenciou significativamente as emissões de SO<sub>2</sub>. A adição de 30 % de ar secundário em relação ao ar total provocou a redução das emissões de NO<sub>x</sub>, de 171 para 139 ppm<sub>v</sub>, mostrando a redução significativa desse poluente devido à combustão estagiada, resultado que concorda com os trabalhos de Liu *et al.* (2009), Li *et al.* (2007), Berge (1988), Ishizuka *et al.* (1988) e Kullendorf e Anderson (1985).

A injeção de AS exerceu influência na fluidodinâmica do LFC verificada através dos perfis de pressão e de temperatura no circuito principal. Os perfis de pressão indicam a presença de maior quantidade de sólidos na base do reator conforme também observado por Gungor e Eskin (2008), Koksall e Hamdullahpur (2004), Ersoy *et al.* (2004) e Marzocchella e Arena (1995).

A eficiência de conversão de carbono foi favorecida pela adição de ar secundário indicando que sua presença favorece a mistura entre combustível e comburente.

Os testes experimentais realizados mostraram que a combustão de carvão mineral brasileiro em reatores com leito fluidizado rápido com adição de ar secundário constitui uma alternativa viável do ponto de vista técnico e ambiental para o aproveitamento do combustível nacional e redução das emissões.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq pela bolsa de estudos e à FAPESP (Processo n° 07/06714-4) pelo auxílio financeiro.

#### 6. REFERÊNCIAS

- ANSI/ASME PTC 19.10., 1981, "Flue and Exhaust Gas Analyses".
- Basu, P., 2006, "Combustion and gasification in fluidized beds", Taylor & Francis Group, CRC Press.
- Berge, N., 1988, "NO<sub>x</sub> Control in a Circulating Fluidised Bed Combustor", 2<sup>nd</sup> International Conference on Circulating Fluidized Bed Technology, France, pp. 421-429.
- Crnkovic, P. M., Polito, W. L., Silva F. C. G., Milioli, F. E., Pagliuso, J. D., 2004, "Efeito da granulometria na decrepitação dutante a decomposição térmica de calcários e carvão", Química Nova, Vol. 27, pp. 58-61.
- Ersoy, L. E., Golriz, M. R., Koksall, M., Hamdullahpur, F., 2004, "Circulating fluidized bed hydrodynamics with air staging: an experimental study", Powder Technology, Vol. 145, pp. 25-33.
- Gayán, P., Adanez, J., Diego, L. F., Labiano, F. G., Cabanillas, A., Bahillo, A., Aho, M., Veijonen, K., 2003, "Circulating fluidised bed co-combustion of coal and biomass". Fuel, Vol. 83, pp. 277-286.
- Gungor, A., Eskin, N., 2008, "effects of operational parameters on emission performance and combustion efficiency in small-scale CFBCs", Journal of the Chinese Intitute of Chemical Engineers, Vol. 39, pp. 541-556.
- Ishizuka, H., Hyvarinen, K., Morita, A., Suzuki. T., Yano, K., Hirose, R., 1988, "Experimental Study on NO<sub>x</sub> Reduction in CFB Coal Combustion", 2<sup>nd</sup> International Conference on Circulating Fluidized Bed Technology, France, p.437-443.
- Koksall, M., Hamdullahpur, F., 2004, "Gas mixing in circulating fluidized beds with secondary air injection", Institution of Chemical Engineering, Vol. 82, pp. 979-992.
- Koksall, M., Golriz, M. R., Hamdullahpur, F., 2007, "Effect of staged air on heat transfer in circulating fluidized beds", Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 1008-1014.
- Li, S., Xu, T., Sun, P., Zhou, Q., Tan, H., Hui., S., 2007, "NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions of a high sulfur self-retention coal during air-staged combustion", Fuel, Vol. 87, pp. 723-731.
- Liu, R. W., Zhou, Q. L., Hui, S. E., Xu, T. M., 2009, "Experimental Study of Nitrogen Oxide Emissions in a Circulating Fluidized Bed", Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on Fluidized Bed Combustion, Xi, China, pp. 1011-1016.
- Lu, Q., Zhu, J., Niu, T., Song, G., Na, Y., 2008, "Pulverized coal combustion and NO<sub>x</sub> emissions in high temperature air from circulating fluidized bed", Fuel Processing Techonology, Vol. 89, pp. 1186-1192.
- Lyngfelt, A., Åmand, L. E., Leckner, B., 1997, "Reversed air staging – a method for reduction of N<sub>2</sub>O emissions from fluidized bed combustion of coal", Fuel, Vol. 77, pp. 953-959.
- Marzocchella, A., Arena, U., "Hydrodynamics of a circulating fluidized bed operated with different secondary air injection devices", Powder Technology, Vol. 87, pp. 185-191.
- Pallarès, D., Johnsson, F., 2006, "Macroscopic modelling of fluid dynamics in large-scale circulating fluidized beds", Progress in Energy and Combustion Science, Vol.32, pp. 539-569.

- Ravelli, S., Perdicizzi, A., Barigozzi, G., 2007, "Description, applications and numerical modelling of bubbling fluidized bed combustion in waste-to-energy plants", Progress in Energy and Combustion Science, Vol.34, pp. 224-253.
- Rodhes, M., Lausmann, P., 1992, "A study of the pressure balance around the loop of a circulating fluidized bed", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol .70, pp.625-630.

## **7. DIREITOS AUTORAIS**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## EXPERIMENTAL STUDY OF AIR STAGING EFFECT ON COAL COMBUSTION IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED

Eugênio de Souza Morita, morita@fem.unicamp.br<sup>1</sup>  
Araí Augusta Bernárdez Pécora, arai@fem.unicamp.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup> University of Campinas, School of Mechanical Engineering, Thermal and Fluids Engineering Department, P.O. Box 6122, 13083-970, Campinas –SP, Brazil.

**Abstract:** *Circulating fluidized bed (CFB) technology allows control nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) emissions. CFB's advantages inhabit in the application of staged combustion by secondary air (SA) injection, important in the reduction of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions due to provide greater availability of oxygen in the volatile's combustion region. The aim of this work is to study the influence of SA injection in CFB combustor using mineral coal as fuel and dolomite as adsorber. Besides the measurement of temperature and static pressure profiles throughout the CFB loop, the NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO and O<sub>2</sub> emissions were determined. The inert material used in this study was quartz sand with an average diameter of 312 μm. The CFB loop is composed of riser (0.102 m internal diameter and 4 m height), cyclone, sampling valve, standpipe and L-valve. The experiments were carried out with secondary air/total air flow ratio (SA/TA) of 0, 16 and 27 %, remaining the excess air around 30 % and Ca/S molar ratio equal to 1. Exhaustion gases have been continuously measured at steady state condition using infra-red ray non-dispersive technique (for SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>) and electrochemical cells (for O<sub>2</sub> and CO). The main column temperatures during the tests were around 850 °C. Results showed that the SA injection induces to NO<sub>x</sub> emission reduction, good temperature uniformity inside the riser and high solid concentration in the bottom riser, when compared to experiments without air staging.*

**Keywords:** *Combustion, mineral coal, dolomite, circulating fluidized bed, gas emissions.*