

## INFLUÊNCIA DA AERODINÂMICA DE COMBUSTÃO NA EMISSÃO DE $\text{NO}_x$ EM UMA CÂMARA CILÍNDRICA HORIZONTAL

**Marcos R. Mafra** - mmafra@feq.unicamp.br

**Waldir A. Bizzo** - bizzo@fem.unicamp.br

**Fábio Luis Fassani** - fassani@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos

Caixa Postal 6122 – 13083-970 Campinas, SP, Brasil

**Resumo.** *A tendência de utilização de incineradores no tratamento de resíduos, exige um melhor conhecimento desta técnica, principalmente no que diz respeito as emissões gasosas por eles produzidas. A câmara de combustão é a etapa responsável pela oxidação térmica dos gases produzidos pela volatilização dos resíduos. As condições típicas de operação desta câmara, alto excesso de ar e altas temperaturas, são ideais para a formação de  $\text{NO}_x$ . Desta forma, foi estudado em uma câmara de combustão cilíndrica a influência da injeção de ar através de jatos com rotação na combustão e na emissão de gases de combustão. Através da variação do número de rotação foram construídas curvas relacionado diretamente a concentrações de saída dos gases com o número de rotação do escoamento. Foram também levantado perfis de temperatura e de concentração dos gases ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{NO}_x$ ) no interior da câmara para dois números de rotação em duas condições de temperatura. Os resultados permitiram verificar a influência do número de rotação na intensidade da zona central de recirculação, na concentração dos gases e conseqüentemente nos níveis de temperatura no interior da câmara. Verificou-se também que para um número de rotação menos intenso as flutuações e temperatura são maiores, o que causou uma maior taxa de formação de  $\text{NO}_x$ , do que o previsto pelo mecanismo do  $\text{NO}_x$  térmico. Entretanto, o mecanismo do  $\text{NO}_x$  térmico foi comprovado como sendo a rota principal de formação de  $\text{NO}_x$  na câmara de combustão.*

**Palavras Chaves:** *Combustão; Poluição;  $\text{NO}_x$ ; Escoamento; Número de rotação*

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre as alternativas existentes no tratamento de resíduos, o tratamento térmico tem se mostrado um dos mais eficientes. Esta técnica transforma resíduos sólidos e/ou líquidos em efluentes gasosos como: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e materiais particulados.

O desafio no projeto de incineradores é aliar eficiência na destruição de resíduos e mínima emissão de poluentes. Para poluentes como o SO<sub>2</sub> existem técnicas capazes de neutralizá-lo na corrente de saída dos gases de exaustão. Essas técnicas são chamadas de técnicas de pós-combustão.

Soluções baratas e eficientes para o combate ao NO<sub>x</sub> têm sido muito pesquisadas nos últimos anos. Entretanto, fatores técnicos como a baixa solubilidade deste poluente em água tem dificultado esse objetivo através de técnicas de pós combustão.

Desta forma, as alternativas mais racionais no combate ao NO<sub>x</sub> têm sido as técnicas de prevenção que se baseiam na eliminação dos fatores responsáveis pela formação do poluente no interior do incinerador.

As técnicas de combustão evoluem a medida que os mecanismos que governam a formação de NO<sub>x</sub> são desvendados. A queima com recirculação de gases de exaustão, os queimadores de pré-mistura, e os queimadores de baixo NO<sub>x</sub> são as três principais técnicas de combustão.

Neste trabalho foi estudado a formação e emissão de NO<sub>x</sub> e sua relação com a fluidodinâmica da câmara de combustão, utilizando-se um queimador com número de rotação variável.

## 2. MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO NO<sub>x</sub>

Os poluentes nitrogenados encontrados nos processos de combustão são três: óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), sendo que destes somente o NO e o NO<sub>2</sub> são coletivamente denominados NO<sub>x</sub> (Muzio e Quartucy, 1997). O NO normalmente representa cerca de 95% do NO<sub>x</sub> gerado na combustão e não é considerado tão poluente quanto o NO<sub>2</sub>. Porém o NO é o precursor da formação de NO<sub>2</sub> na atmosfera pela oxidação com ozônio (Hayhurst e Vince, 1980; Rao, 1991).

As rotas químicas responsáveis pela formação do NO<sub>x</sub> durante a etapa de combustão dos resíduos volatilizados são três: NO<sub>x</sub> térmico, NO<sub>x</sub> imediato e o NO<sub>x</sub> combustível.

A rota térmica é, segundo Miller e Bowman (1989), a maior responsável pela formação do NO<sub>x</sub> na etapa de combustão de combustíveis não nitrogenados. Este mecanismo proposto originalmente por Zeldovich (1946) (reações 1 e 2) e modificado posteriormente por Fenimore e Jones (1957) (Eq. 3) baseia-se na oxidação térmica do nitrogênio gasoso (N<sub>2</sub>). As condições típicas de operação da combustão, alto excesso de ar e altas temperatura, favorece a formação do NO<sub>x</sub> por este mecanismo.



A forte dependência das reações que compõe o mecanismo do NO<sub>x</sub> térmico com relação a temperatura, se deve, segundo Hayhurst e Vince (1980), a alta energia de ativação deste mecanismo ( $E_A = 315 \text{ kJ/mol}$ ).

O mecanismo do NO<sub>x</sub> imediato (Eq. 4 a 7) é proposto por Fenimore (1971) devido a incapacidade do mecanismo térmico de prever uma maior formação de NO<sub>x</sub> em regiões de chama com mistura rica em combustível.



Fenimore observou que a velocidade de formação do NO<sub>x</sub> era muito alta, não condizendo como o mecanismo do NO<sub>x</sub> térmico, onde as reações são relativamente lentas. No caso de haver altas concentrações de O e OH os compostos cianos são então convertidos em NO pelo mesmo mecanismo do NO<sub>x</sub> combustível como mostra a Fig. 1 (Van der Lans *et al.*, 1997). Apesar de haver vários radicais hidrocarbonetos responsáveis por esta rota química, o CH e o CH<sub>2</sub> são considerados os de maior importância (Miller e Bowman, 1989).

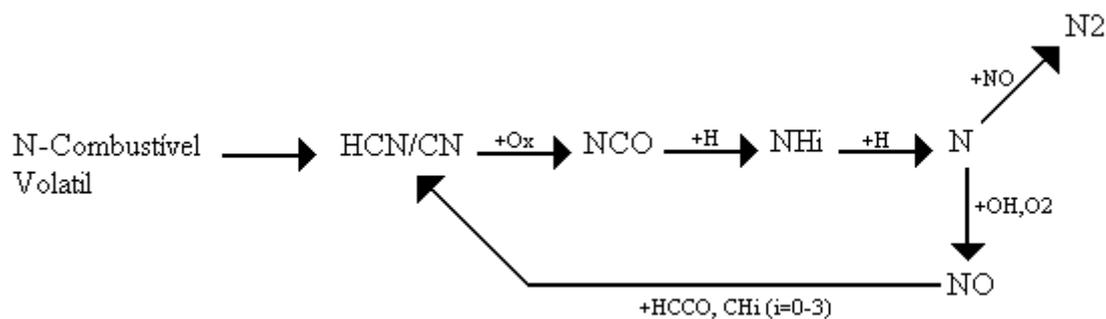


Figura 1 - Principais reações de conversão do N-combustível em NO e N<sub>2</sub>.

Segundo Muzio e Quartucy (1997) o conceito atual de queimador de baixo NO<sub>x</sub> foi proposto por Takahashi *et al.*, (1982) denominado MACT (do inglês "Mitsubishi Advanced Combustion Technology").

Os queimadores de baixo NO<sub>x</sub> são projetados de forma que a entrada tanto de ar como de combustível provoquem a formação de uma Zona Central de Recirculação (ZCR) com mistura rica em combustível. Esta região pobre em oxigênio é formada pela injeção de combustível através de um lança central. O oxigênio necessário para a combustão é então misturado por meio de escoamento com rotação do ar secundário, na região posterior a ZCR.

O controle da emissão de NO<sub>x</sub> nestes queimadores se dá por dois aspectos: na ZCR, onde a temperatura é alta devido a recirculação de gases quentes (Van der Lans *et al.*, 1997), não favorece a formação de NO<sub>x</sub> térmico, pois há deficiência de oxigênio (Miller e Bowman, 1989); na região posterior a ZCR, onde a temperatura é menor e a concentração de oxigênio é alta devido a injeção de ar secundário (Van der Lans *et al.*, 1997), também não é favorecida a formação de NO<sub>x</sub> térmico em virtude da baixa temperatura (Miller e Bowman, 1989).

### 3. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo estudar a formação e emissão de  $\text{NO}_x$  em uma câmara cilíndrica, operando em condições similares à câmaras secundárias de incineradores, caracterizados por alta temperatura e alto excesso de ar.

A distribuição de ar de combustão e o controle da fluidodinâmica da câmara de combustão foi feito através de jatos com rotação, utilizando-se um queimador de blocos móveis, para controle do número de rotação.

O número de rotação, conforme Beér e Chigier (1972) é definido pela Eq. (8), onde  $S'$  é o número de rotação que relaciona a quantidade de movimento tangencial ( $G\phi$ ) e a quantidade de movimento axial ( $Gx$ ) do escoamento no interior da câmara de combustão com o raio do queimador ( $R$ ).

$$S' = \frac{G\phi}{Gx \cdot R} \quad (8)$$

### 4. DESCRIÇÃO DA BANCADA E DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A bancada experimental é composta por uma câmara de combustão cilíndrica horizontal com um queimador equipado com dispositivo de regulagem do número de Rotação. Os produtos de combustão saem da fornalha por um duto de exaustão, onde são resfriados rapidamente por um lavador e então succionados por um exaustor para a chaminé de descarga de gases que os lança para fora do laboratório. O fluxograma da câmara com a vista geral da bancada é mostrado nas Fig. 3. A câmara de combustão tem diâmetro interno de 470 mm e comprimento de 1800 mm.

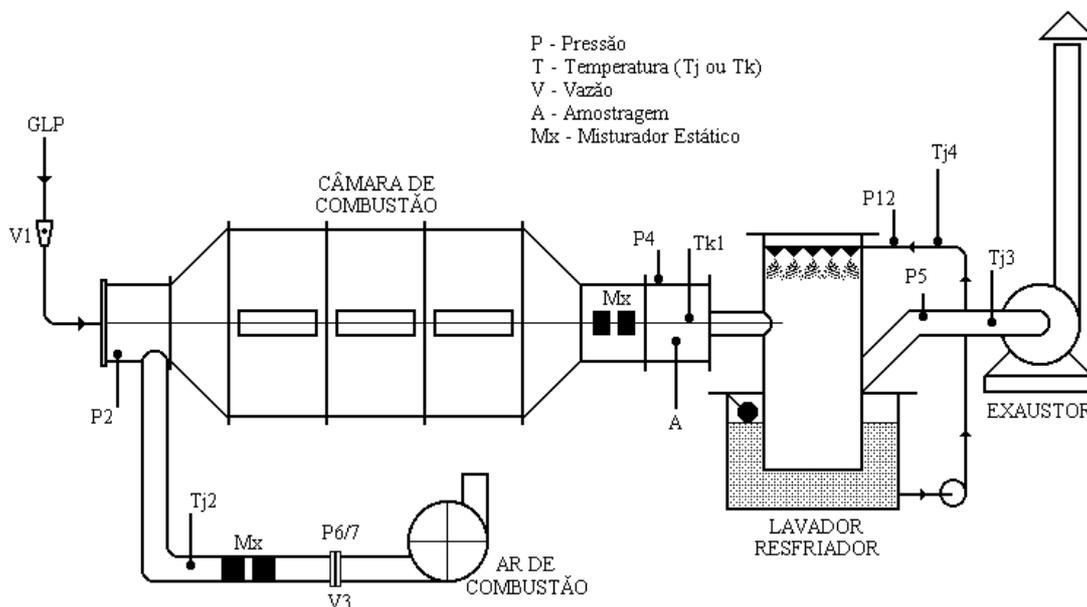


Figura 3 - Fluxograma do processo.

Nos testes experimentais foram fixados os seguintes parâmetros: tipo de combustível (GLP) e tempo médio de residência (cerca de 2 segundos). A escolha do GLP elimina a formação do  $\text{NO}_x$  combustível e o tempo médio de residência escolhido é típico de câmaras

secundárias de incineração. Foram variados a temperatura de saída dos gases e o número de rotação.

O efeito da temperatura foi estudado realizando-se os teste em duas condições de temperatura dos gases de saída da câmara: 1000 e 1175 °C. As temperaturas foram escolhidas usando-se de critérios tais como: garantia da operação; variação suficiente que permitisse notar a influência da temperatura; preservação da bancada e da instrumentação e segurança no processo de operação e amostragem. Por fim o escoamento foi estudado considerando-o função direta do número de rotação aplicado ao fluxo do ar de combustão. Operou-se com números de rotação que variaram de 0,364 a 1,463.

Para cada uma das temperaturas realizou-se os seguintes testes:

- i - Variação do número de rotação ( $S'$ ): variou-se o número de rotação, enquanto a emissão de  $\text{NO}_x$  na saída da câmara era monitorado continuamente utilizando-se uma sonda de amostragem e um analisador contínuo de  $\text{NO}_x$  por infravermelho não dispersivo, fabricação Horiba®;
- ii - Perfil de concentração: dentre os valores de número de rotação aplicado ao escoamento escolheu-se dois onde foram levantados, através da sonda de amostragem móvel, os perfis de concentrações de  $\text{NO}_x$  e  $\text{O}_2$ , no interior da câmara de combustão;
- iii - Perfil de temperatura: nos mesmos dois números de rotação escolhidos para a construção dos perfis de concentração, levantou-se através de um pirômetro de sucção os perfis de temperatura no interior da câmara.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes a emissão de  $\text{NO}_x$  em relação ao número de rotação apresentado na Fig. 4 e mostram a forte influência de  $S'$ . Esta relação revela ainda que existe uma mesma tendência nas duas temperaturas. Observa-se na Fig. 4 que a formação de  $\text{NO}_x$  é alta em números de rotação baixos para ambas as temperaturas e tendem a se manter constante e relativamente baixa, independentemente da temperatura, para valores de  $S'$  intermediários. Desta forma existiu uma faixa de números de rotação, onde as emissão de  $\text{NO}_x$  se manteve em valores mínimos e constantes independente da temperatura de operação na etapa de combustão.

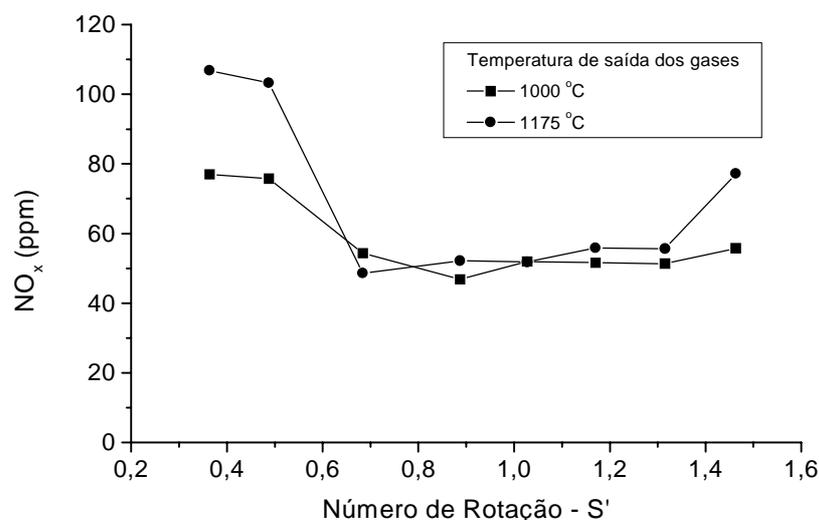


Figura 4 - Emissão de  $\text{NO}_x$  em função do número de rotação.

Os valores de números de rotação ( $S'$ ) escolhidos para a construção dos perfis de concentração e de temperatura foram 0,488 e 1,315 por serem típicos das duas regiões observada na Fig. 4: a região de baixo  $S'$  e alta emissão de  $\text{NO}_x$  e a região de número de rotação mais intenso onde as emissões de  $\text{NO}_x$  permanecem estáveis com relação a  $S'$  e praticamente igual em ambas as temperaturas de operação.

As Figuras 5 e 6 mostram os perfis de concentração de oxigênio a 1000 e 1175 °C, respectivamente, para os dois números de rotação estudados ( $S'_1 = 0,488$  e  $S'_2 = 1,315$ ).

Os perfis de concentração de oxigênio não sofrem grandes modificações com relação a temperatura para o número de rotação  $S'_1$  (Fig. 5a e 6a). Observa-se que para este valor de número de rotação a intensidade da recirculação na zona central é baixa, pois a concentração de  $\text{O}_2$  neste ponto atinge seu menor valor.

As Figuras 5b e 6b apresentam os perfis de concentração de  $\text{O}_2$  a 1000 e 1175 °C, respectivamente, para o número de rotação mais intenso ( $S'_2$ ). A 1000 °C, os perfis de concentração (Fig. 5b) revelam um comportamento contrário ao observado para  $S'_1$  (Fig. 5a). Devido a alta intensidade dos jatos com rotação, surge para esta condição um gradiente de pressão responsável por uma elevada taxa de recirculação de ar na ZCR. Este fato é comprovado pelos picos de concentração de  $\text{O}_2$  alcançado na região central próximo ao queimador. Já a 1175°C os perfis de concentração de  $\text{O}_2$  (Fig. 5b) não apresentam modificações para o número de rotação  $S'_2$ . Desde o início da câmara a distribuição evolui para um perfil plano, revelando que a combinação de número de rotação alto com alta temperatura de operação torna a distribuição uniforme desde seu início.

A formação das regiões de recirculação, em especial a ZCR, é comprovada através de perfis de velocidades para escoamentos com rotação em câmaras de combustão nos trabalhos de Kenbar *et al.* (1995) e Bizzo (1997).

O posicionamento de cada ponto dos perfis levantados neste trabalho foram normalizados de forma que a posição axial foi expressa em  $x/D$ , onde  $x$  é a posição axial e  $D$  o diâmetro da câmara, enquanto que a posição radial foi expressa em  $r/R$ , onde  $r$  é a posição radial e  $R$  o raio da câmara. Considerou-se ainda que o comportamento no interior da câmara é simétrico em relação ao eixo axial central.

Quanto aos perfis de temperatura (Fig. 7 e 8) observa-se que existe uma relação inversamente proporcional entre temperatura e concentração de  $\text{O}_2$  no interior da câmara de combustão. Este fato revela que o oxigênio além de promover a reação de combustão é também importante no controle da temperatura nos processos de queima do combustível. O oxigênio não é propriamente o único e principal responsável pela absorção de calor. É o nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) presente juntamente com oxigênio no ar de combustão o grande responsável pela absorção de calor.

Os perfis de concentração de  $\text{NO}_x$  são apresentados pelas Fig. 9 e 10 para as condições de temperatura da câmara, 1000 e 1175 °C respectivamente. A comparação entre os perfis de concentração do  $\text{NO}_x$  e os seus respectivos perfis de temperatura mostra que o mecanismo térmico é responsável pela formação do  $\text{NO}_x$ . Já a comparação entre os perfis de concentração de  $\text{NO}_x$  e seus respectivos perfis de concentração de  $\text{O}_2$ , revela que o  $\text{NO}_x$  térmico depende mais da temperatura do que da alta concentração de oxigênio. Isto se deve possivelmente ao fato de que mesmo a concentração de  $\text{O}_2$  sendo relativamente menor na região central do que nas regiões próximas a parede, ela é suficientemente alta em valores absolutos para promover o mecanismo do  $\text{NO}_x$  térmico, uma vez que a operação de queima se dá com alto excesso de ar.

Essas mesmas relações entre os perfis de concentração de  $\text{O}_2$ , perfis de temperatura e perfis de concentração de  $\text{NO}_x$  foi observada por Kenbar *et al.* (1995).

Os perfis de concentração de  $\text{NO}_x$  apresentados neste trabalho revelam que as emissões de  $\text{NO}_x$  são significativamente maiores para o menor número de rotação ( $S'_1$ ). Essa diferença se deve possivelmente aos seguintes fatores:

- i - Distribuição do tempo de residência: em condições de baixo número de rotação a distribuição não uniforme do tempo de residência tende a favorecer as reações lentas de formação do  $\text{NO}_x$  nas regiões de alta temperatura;
- ii - Flutuações de temperatura podem ser responsáveis por uma maior formação de  $\text{NO}_x$  do que a prevista pelo mecanismo de Zeldovich. Hayhurst e Vince(1980) apresentam um critério baseado numa relação com a energia de ativação que quando aplicado aos resultados deste trabalho não permitem negligenciar o efeito das mesmas. As temperaturas registradas por meio de um ploter e do pirômetro de sucção demonstraram grandes flutuações em regiões próximas ao queimador para o número de rotação mais baixo( $S''=0,488$ ).
- iii - Mistura ar/combustível: para um número de rotação baixo, os perfis de concentração de  $\text{O}_2$  mostram que o grau de mistura entre o ar de combustão e o combustível é baixo. Neste caso a temperatura tende a ser maior na zona central de recirculação (ZCR) favorecendo a formação do  $\text{NO}_x$  térmico;
- iv -  $\text{NO}_x$  imediato: em condições de mistura rica em combustível ocorre a formação de  $\text{NO}_x$  pelo mecanismo do  $\text{NO}_x$  imediato, devido a presença de hidrocarbonetos não queimado. O fato do grau de mistura entre ar e combustível ser menor para baixos números de rotação produz uma maior taxa de formação de HC não queimado responsáveis pela formação do  $\text{NO}_x$  imediato.

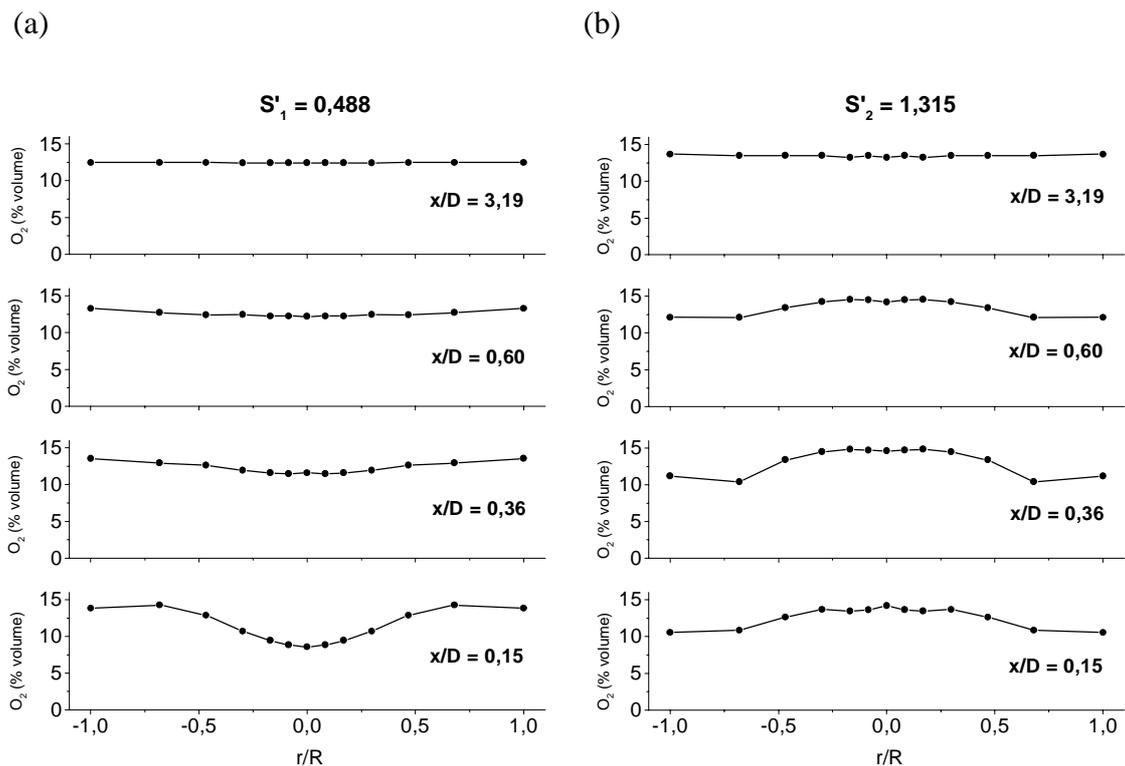


Figura 5 - Perfis de concentração de  $\text{O}_2$  a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ : a)  $S'_1 = 0,488$ ; b)  $S'_2 = 1.315$ .

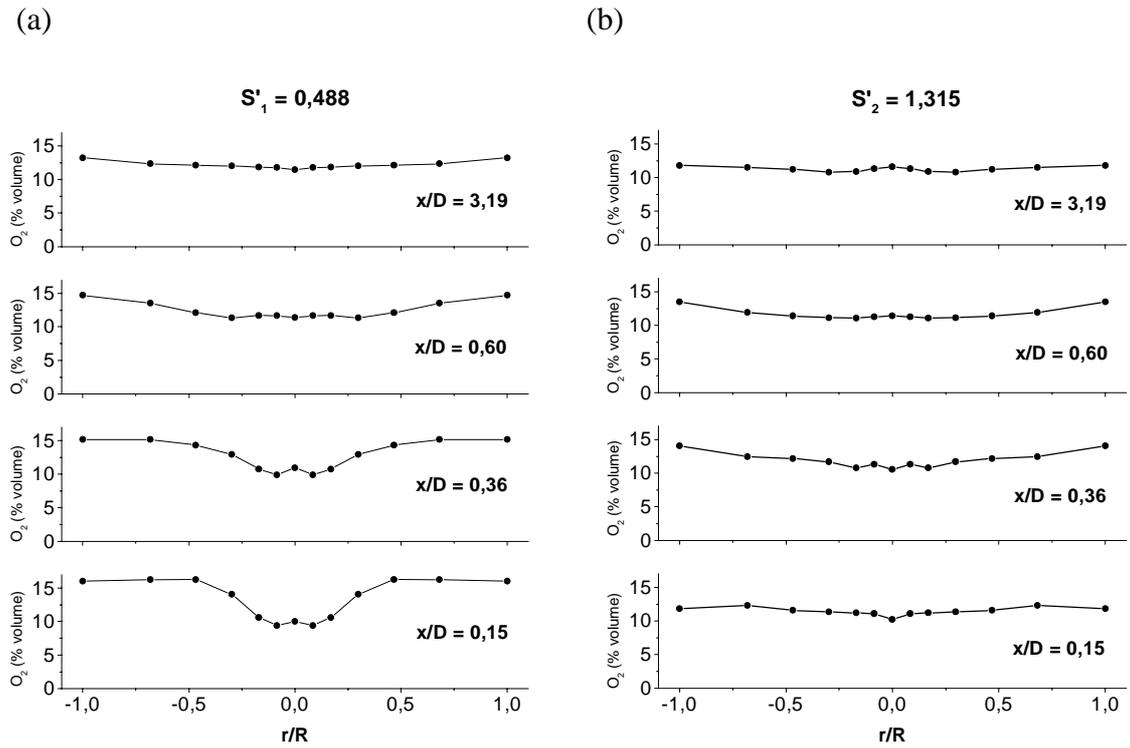


Figura 6 - Perfis de concentração de  $O_2$  a  $1175\text{ }^\circ\text{C}$ : a)  $S'_1 = 0,488$ ; b)  $S'_2 = 1.315$ .

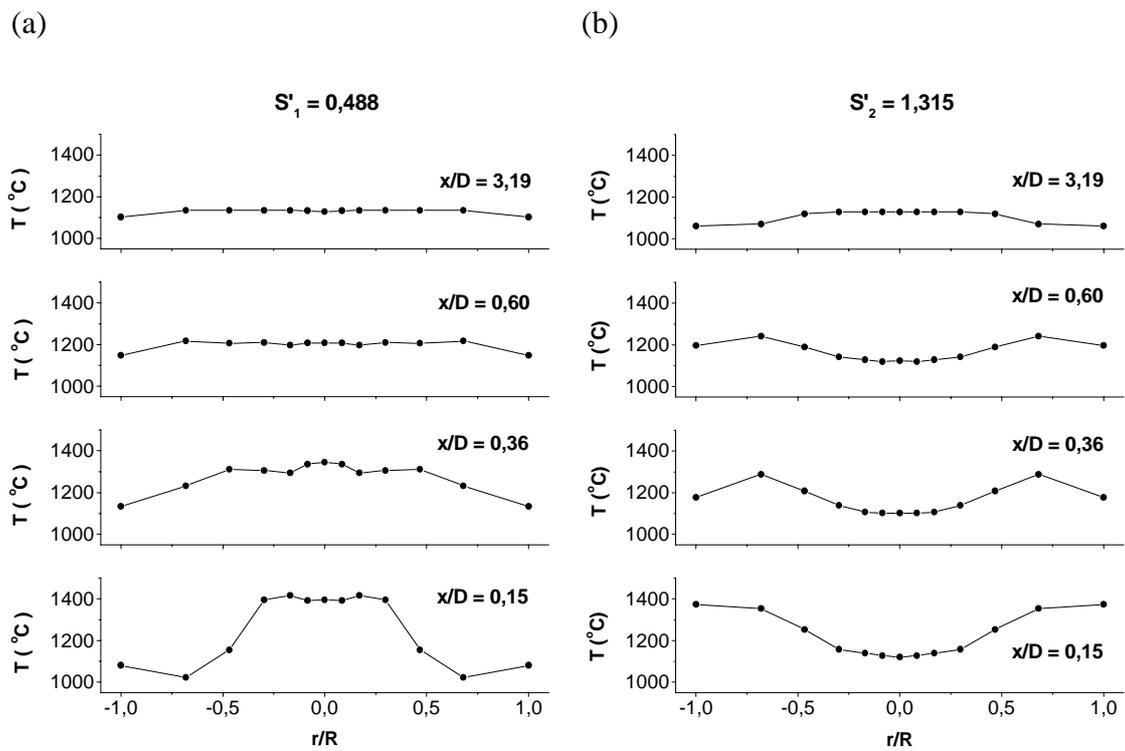


Figura 7 - Perfis de temperatura a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ : a)  $S'_1 = 0,488$ ; b)  $S'_2 = 1.315$ .

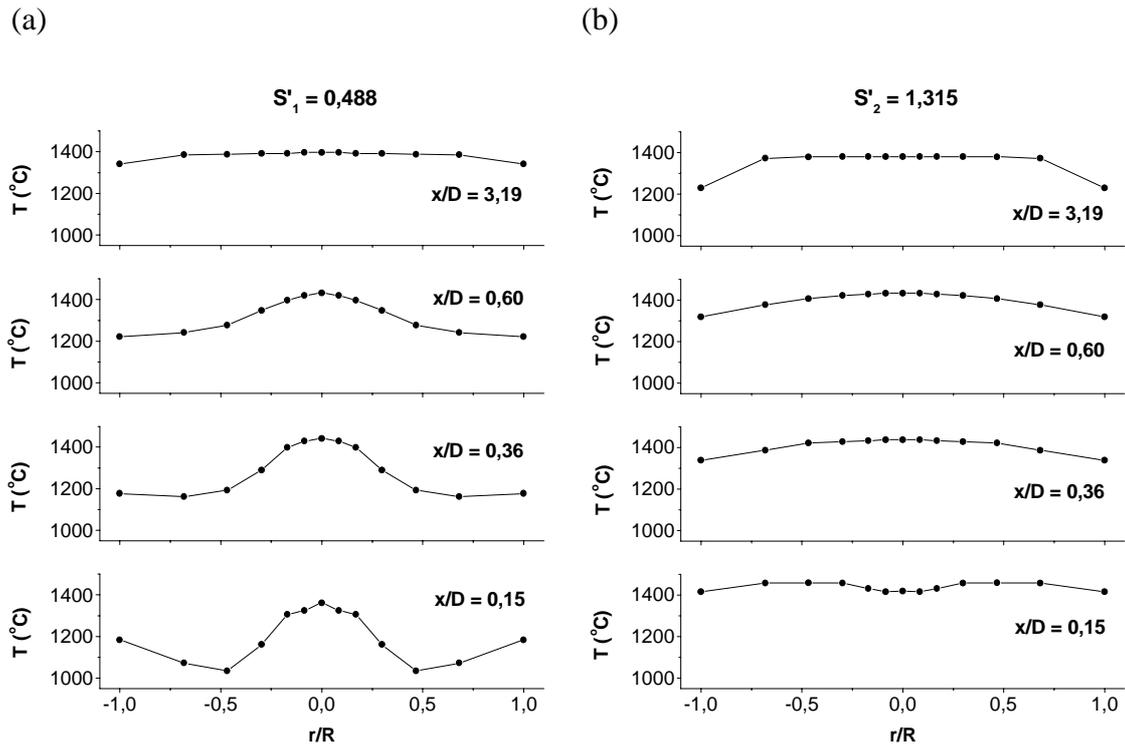


Figura 8 - Perfis de temperatura a 1175 °C: a)  $S'_1 = 0,488$ ; b)  $S'_2 = 1,315$ .

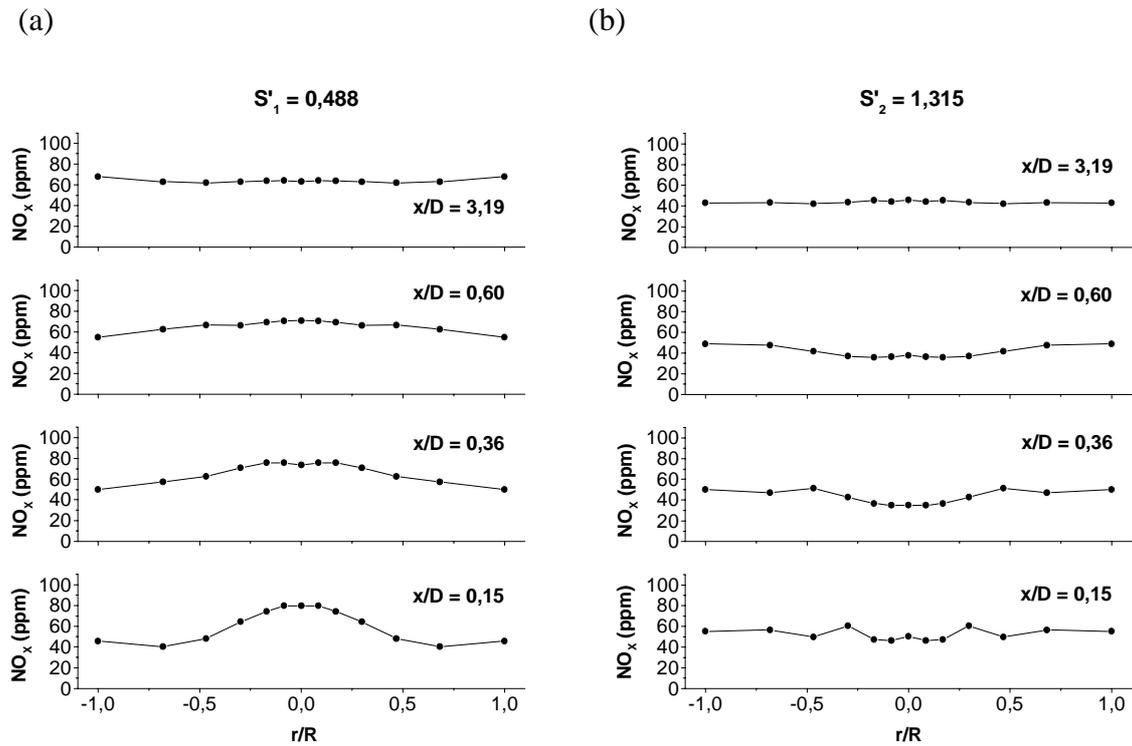


Figura 9 - Perfis de concentração de  $NO_x$  a 1000 °C: a)  $S'_1 = 0,488$ ; b)  $S'_2 = 1,315$ .

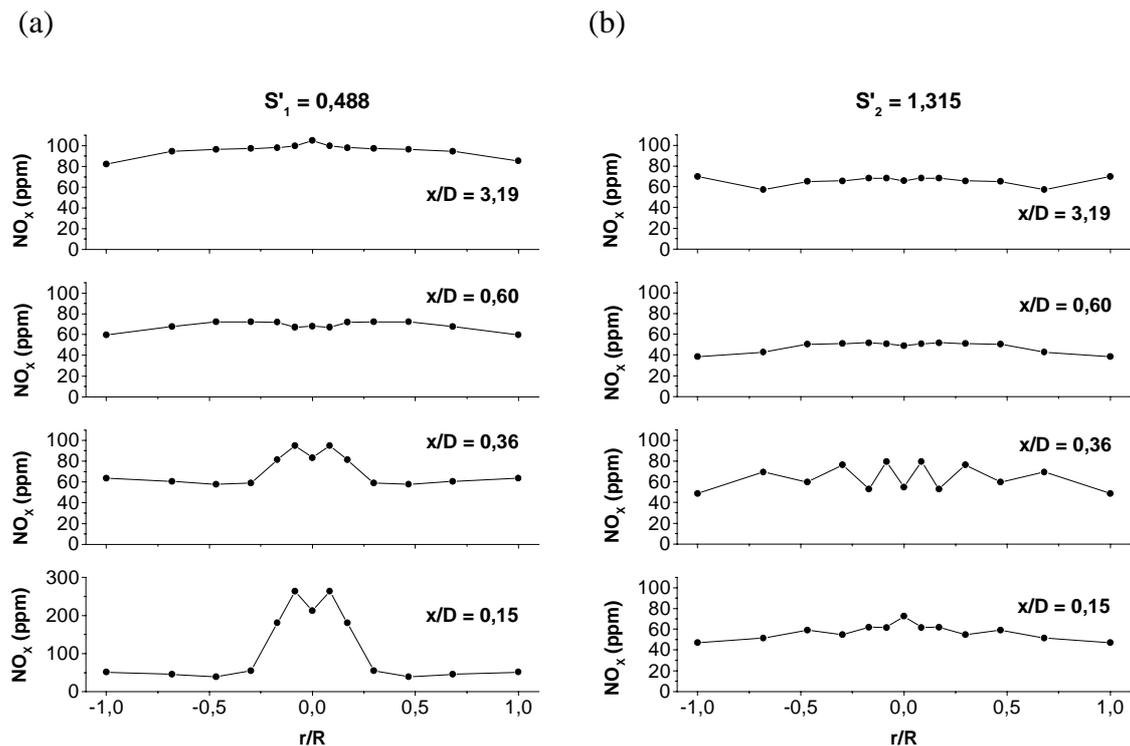


Figura 10 - Perfis de concentração de  $\text{NO}_x$  a 1175 °C: a)  $S'_1 = 0,488$ ; b)  $S'_2 = 1,315$ .

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais permitem uma série de conclusões a respeito da formação de  $\text{NO}_x$  em uma câmara de combustão cilíndrica com injeção de ar através de jatos com rotação:

- i - A intensidade da zona central de recirculação é afetada diretamente pelo número de rotação. Em valores de  $S'$  menos intenso o fluxo reverso é menor;
- ii - A intensidade do fluxo reverso na ZCR é comprovado pela concentração de  $\text{O}_2$  nesta região. Em um números de rotação mais intenso ocorrem picos de concentração de  $\text{O}_2$  na ZCR enquanto em valores de  $S'$  menor a concentração de  $\text{O}_2$  atinge um mínimo;
- iii - A distribuição de temperatura no interior da câmara de combustão esta relacionada com a concentração de  $\text{O}_2$  através de uma relação inversamente proporcional. Isto se deve a capacidade do ar de combustão de promover a combustão e absorver o calor gerada.
- iv - A temperatura tem uma relação diretamente proporcional com a concentração de  $\text{NO}_x$  devido a forte presença do mecanismo do  $\text{NO}_x$  térmico.
- v - Os dados experimentais indicam a possibilidade de haver a formação de  $\text{NO}_x$  imediato além de desvios no mecanismo térmico causado por flutuações locais da temperatura na região próxima ao queimador para baixos números de rotação.
- vi - O controle da formação e emissão de  $\text{NO}_x$  pode ser feito através do controle da fluidodinâmica da câmara de combustão.

### Agradecimentos

À FAPESP pelo financiamento do projeto e à CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

## REFERÊNCIAS

- Beér, M. J. e Chigier, N. A., 1972, Combustion Aerodynamics, Applied Science Publishers LTD, London.
- Bizzo, W. A., 1997, Emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos totais em câmara de incineração; Efeito do número de rotação e composição do combustível, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil.
- Fenimore, C. P. & Jones, G. W., 1957, Nitric oxide decomposition at 2200 degress K 2400 degress K, Journal of Physical Chemistry, vol. 61, n. 5, pp.654-657.
- Fenimore, C. P., 1971, Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames, In.: 13<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion,, Salt Lake City, Utah. Combustion Institute. Pittsburgh, Pa: pp. 373-380.
- Hayhurst, A. N. e Vince, I. M., 1980, Nitric oxide formation from N<sub>2</sub> in flames: the importance of "Prompt" NO, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 6, pp.35-51.
- Kenbar, A. M. A., Beltagui, S. A. e Maccallum, N. R. L., 1995, Combustion aerodynamics of a gas-fired furnace with perifheral injection, Experimental Thermal and Fluid Science, vol.10, pp.335-346.
- Miller, J. A. e Bowman, C. T., 1989, Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. . Progress in Energy and Combustion Science, vol.15, pp.287-338.
- Muzio, L. J., e Quartucy, G. C., 1997, Implementing NO<sub>x</sub> control: research to application. Progress in Energy and Combustion Science, vol.23, pp.266-233.
- Rao, C. S., 1991, Environmental pollution control engineering, Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- Takahashi, Y., *et al*, 1982, Developmente of "MACT" in-furnance NO<sub>x</sub> removal process for steam generators, In: Symp. on Stationary Combustion, Dallas.
- Van der Lans, R. P., Glarborg, P. e Dam-Johansen, K., 1997, Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners, Progress in Energy and Combustion Science, vol.23, p.349-377.
- Zeldovich, Y. B., 1946, Acta Phys.-Chim., URSS, vol.21, pp. 577.

## COMBUSTION AERODYNAMICS INFLUENCE ON NO<sub>x</sub> EMISSION IN A HORIZONTAL CYLINDRICAL CHAMBER

**Marcos R. Mafra** - mmafra@feq.unicamp.br

**Waldir A. Bizzo** - bizzo@fem.unicamp.br

**Fábio Luis Fassani** - fassani@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos

Caixa Postal 6122 – 13083-970 Campinas, SP, Brasil

***Abstract.** The use of incinerators on industrial waste treatment requires the knowledge of its pollutant gases emissions. Thermal oxidation of the gases produced by waste volatilization takes place within the combustion chamber, whose typical parameters are high air excess and high temperature. These parameters favours NO<sub>x</sub> production. In this paper, the effects of air injection by swirl jets on the combustion and gas emission characteristics were studied. Temperature and gas concentration profiles within the chamber were obtained for two swirl numbers in two level of gas exit temperature. Results showed that the temperature fluctuations were higher for low swirl numbers, thus causing high rates of NO<sub>x</sub> formation. It was shown, however, that the main NO<sub>x</sub> formation route was the thermal one.*

***Keywords:** Combustion; Pollution Control; NO<sub>x</sub> Emission; Swirl Number.*