

# INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE SWIRL NA EMISSÃO DE NO<sub>x</sub> EM UMA FORNALHA DE 110kW QUEIMANDO DIESEL

**Pedro Teixeira Lacava**

**Amilcar Porto Pimenta**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica, Departamento de Propulsão, Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP, Brasil, 12228-900

lacava@aer.ita.cta.br, amilcar@aer.ita.cta.br

**João Andrade de Carvalho Jr.**

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Departamento de Energia, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, SP, Brasil, 12500-000

Joao@feg.unesp.br

**Marco Aurélio Ferreira**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, SP, Brasil, 12700-000

## Resumo

Um dos meios para minimizar a emissão de poluentes é controlar o processo de queima pelo formato da chama. No entanto, para queima de combustíveis líquidos este controle torna-se bem mais complexo do que para o caso de combustíveis gasosos, em função das interações entre os processos de atomização e vaporização com a taxa de mistura do combustível e oxidante. Desta forma, o presente trabalho apresenta resultados experimentais sobre a influência da estrutura da zona de recirculação próxima à região da chama, quantificada pelo número de *swirl*, na emissão NO<sub>x</sub> em uma fornalha de paredes refratárias operando a uma potência de 110kW e diesel como combustível. Os resultados apontam que a alteração do número de *swirl* pode contribuir significativamente para minimizar a emissão de NO<sub>x</sub>.

**Palavras-chave:** combustão industrial, emissão de NO<sub>x</sub>, número de *swirl*.

## 1. INTRODUÇÃO

A alta temperatura de operação das câmaras de combustão industrial e de sistemas propulsivos e a utilização de combustíveis com alto teor de nitrogênio são fatores convenientes para a formação de NO<sub>x</sub> (soma de NO e NO<sub>2</sub>) que, além de, como o SO<sub>2</sub>, provocar chuva ácida, é um componente importante das reações fotoquímicas que levam à formação do ozônio (O<sub>3</sub>). Além dos fatores ambientais, o NO<sub>x</sub> é responsável direto por diversos problemas de saúde, com a metaemoglobina ou cianose, edemas pulmonares e alteração das características hereditárias.

A formação deste poluente é atribuída à dois processos distintos: (a) NO<sub>x</sub> do Combustível, formado a partir da quebra das ligações do nitrogênio presente no combustível e reação com oxigênio; (b) NO<sub>x</sub> Atmosférico, formado a partir da oxidação do N<sub>2</sub> do ar atmosférico, seguindo dois mecanismos de formação, o NO<sub>x</sub> Térmico, formado na região de pós-chama, e o NO<sub>x</sub> *Prompt*, formado na região de frente de chama.

Em geral, quando não há presença de nitrogênio no combustível, o principal mecanismo de formação do  $\text{NO}_x$  é o Térmico, que possui dependência exponencial com a temperatura (Glarborg, 1993). Desta forma, algumas das técnicas utilizadas para minimizar a emissão deste poluente envolvem a redução da temperatura ou a não formação de regiões com pico de temperatura na chama. Entre elas destacam-se: combustão estagiada, injeção de água ou vapor, recirculação dos gases de saída da câmara e controle do formato da chama. O presente trabalho enfoca a minimização da emissão de  $\text{NO}_x$  através do controle no formato da chama por modificações na estrutura da zona de recirculação interna (ZRI) a jusante da saída do queimador. As alterações na ZRI provocam modificações na taxa de mistura entre o ar oxidante e o combustível vaporizado (para o caso da combustão de líquido), conseqüentemente, também alterando a temperatura e a concentração de oxigênio (razão de equivalência) na região de chama (Ballester e Dopazo, 1994).

## 2. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados em uma câmara de combustão vertical, com parede refratária, sem refrigeração externa e com o volume total de 1000 litros. A Figura 1a apresenta o esquema da câmara. Para obtenção da distribuição de temperatura ao longo da câmara, foram previstos termopares nas posições: 0,18, 0,70, 1,05, 1,40, 1,75, 2,50, 3,00 e 4,20m a jusante do queimador.

O queimador utilizado possui um *swirler* com o ângulo entre pás variável, permitindo alterar a estrutura da zona de recirculação formada a frente do queimador. Através do controle do ângulo entre pás foi possível variar o número de *swirl*, parâmetro utilizado nesse trabalho para quantificar a intensidade da zona de recirculação. Para atomização do combustível foi usado um injetor do tipo “Y-Jet”. A Figura 1b apresenta um esquema do queimador com o injetor acoplado.

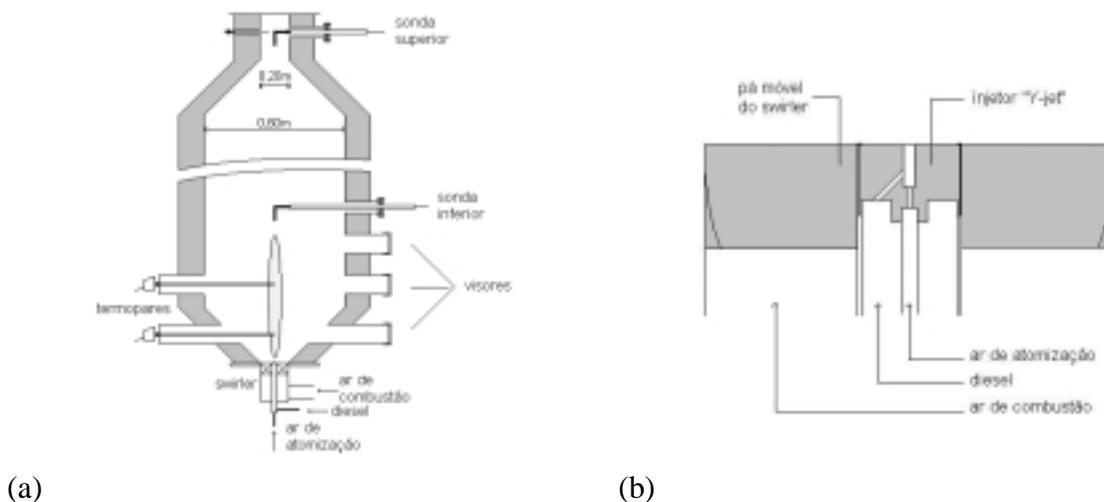


Figura 1. Montagem experimental. (a) Esquema da câmara de combustão. (b) Queimador.

Em todos ensaios, as vazões de diesel e ar de atomização foram mantidas constantes em 2,50 e 0,45g/s, respectivamente. Desta forma, o potência gerada pela queima de diesel foi fixada em 110kW. A vazão de ar de combustão também foi mantida fixa em 47,7g/s, que somada com a vazão do ar de atomização, representam um excesso de ar de 29% ou 5% de  $\text{O}_2$  na saída da câmara (em base seca). As vazões de diesel e ar de atomização foram medidas

utilizando rotâmetros e a vazão de ar de combustão um medidor de vazão volumétrica tipo turbina.

As amostragens de gases foram feitas por duas sondas refrigeradas posicionadas em dois pontos da câmara: na região próxima ao final da chama, correspondendo ao volume 227 litros, e a 30cm da saída da câmara, correspondendo ao volume de 994 litros. Os gases de amostragem passam por filtros e condensadores antes de chegarem aos analisadores de CO (infravermelho), CO<sub>2</sub> (infravermelho), O<sub>2</sub> (termomagnético) e NO<sub>x</sub> (quimiluminescente). As leituras dos analisadores, juntamente com as dos termopares, foram feitas em um sistema de aquisição de dados HP6554.

### 3. CÁLCULO DO NÚMERO DE SWIRL

A relação adimensional que caracteriza a intensidade do *swirl*, utilizado aqui para quantificar a intensidade da zona de recirculação, é dada pelo número de *swirl*  $S'$ , que corresponde a razão entre a componente axial do fluxo da quantidade de movimento angular e a componente axial do fluxo da quantidade de movimento linear. O modelo utilizado para cálculo do número de *swirl* é basicamente o apresentado por Lawn (1987), com as considerações de coeficiente de bloqueio feitas por Couto et al. (1995). A Figura 2 apresenta o esquema genérico de um *swirler* axial e os raios característicos.

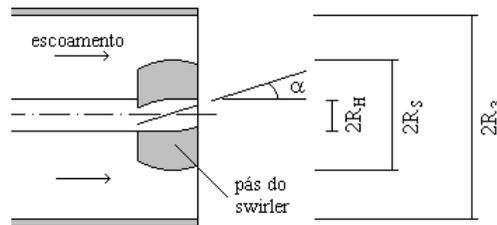


Figura 2 . Esquema genérico de um *swirler* axial

O número de *swirl* pode ser definido baseando-se na distribuição de velocidade no próprio swirler (Lawn, 1987), que, para o caso onde apenas o escoamento secundário externo passa pelo *swirler* (ar de combustão), pode ser escrito como (Couto et al., 1995):

$$S' = \frac{S'_s}{(1 + Mr)} \quad , \quad (1)$$

onde  $S'_s$  é o número de *swirl* do escoamento secundário e  $Mr$  a razão entre as componentes axiais dos fluxos da quantidade de movimento linear dos escoamentos primário interno (combustível) e secundário externo (ar de combustão).  $S'_s$  e  $Mr$  podem ser calculados como:

$$S'_s = \frac{G_\phi}{(R_3 - R_H) \cdot G'_x} \quad , \quad (2)$$

$$Mr = \frac{(\rho / m^2)_s \cdot (m^2 / \rho)_p \cdot (R_3^2 - R_H^2)}{R_I^2} \quad , \quad (3)$$

sendo  $\rho$  a massa específica,  $m$  a vazão mássica,  $R_I$  o raio do orifício do injetor de combustível e os subscritos  $p$  e  $s$  são referentes aos escoamentos primário e secundário, respectivamente.

A razão entre as componentes axiais do fluxo da quantidade de movimento angular e fluxo da quantidade de movimento linear é dada por:

$$\frac{G_{\phi}}{G_x'} = \frac{2.(CB).tan g \alpha.(R_s^3 - R_H^3)}{3.(R_s^2 - R_H^2)} \quad , \quad (4)$$

onde  $\alpha$  é ângulo entre pás do *swirler* e  $CB$  é o coeficiente de bloqueio devido a espessura finita das pás direcionais. O cálculo do coeficiente de bloqueio foi feito seguindo a metodologia apresentada por Couto et al. (1995), que considera a situação de pás direcionais com espessura finita e a influência do número de Reynolds como pequena. Assim, o coeficiente de bloqueio depende apenas das dimensões geométricas das pás direcionais na seção reta perpendicular ao eixo do duto, sendo verificado que:

$$CB = \frac{l}{(l - \sigma)} \quad , \quad (5)$$

onde  $\sigma$  o fator de bloqueio dado por:

$$\sigma = \frac{(A_S - A_{ef})}{(A_{3a} - A_S)} \quad , \quad (6)$$

sendo:  $A_{3a}$  a área anular entre o *swirler* e a parede do tubo,  $A_S$  a área da coroa circular do *swirler* e  $A_{ef}$  a área efetiva de escoamento no próprio *swirler*, que é determinada geometricamente por:

$$A_{ef} = 2.(R_S - R_H).(K - 2T).cos \alpha \quad , \quad (7)$$

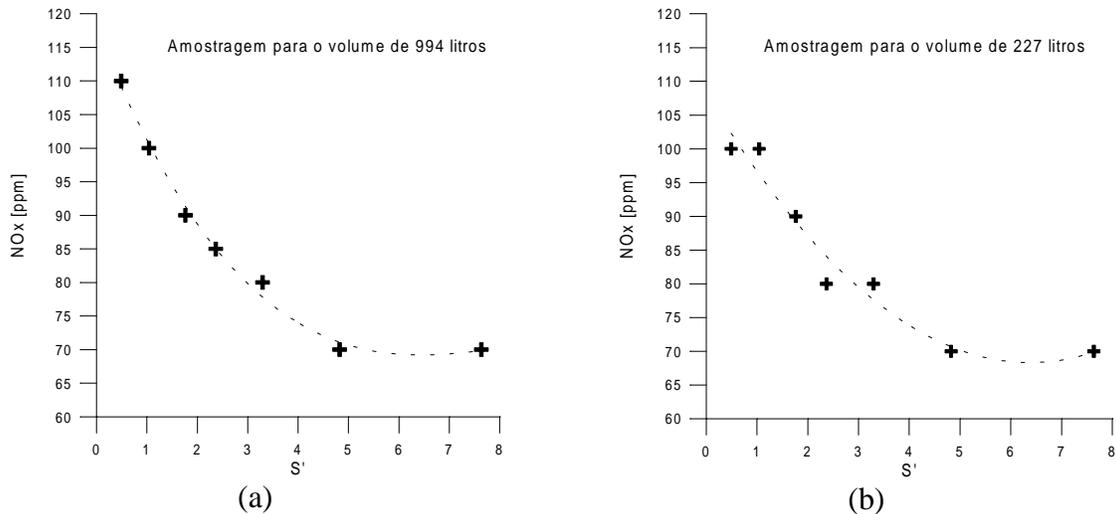
onde  $K$  é dado por:

$$K = cos(\pi / 2.Z).[R_s.sin(\pi / Z) + R_H.tan(\pi / Z)] \quad . \quad (8)$$

sendo  $Z$  o número de pás do *swirler* e  $T$  a espessura das mesmas. As dimensões geométricas do *swirler* são:  $R_3 = 79\text{mm}$ ,  $R_S = 79\text{mm}$ ,  $R_H = 21\text{mm}$ ,  $R_l = 0,875\text{mm}$ ,  $\alpha = 0 - 70^\circ$ ,  $Z = 8$  e  $T = 2\text{mm}$ . Como para o queimador utilizado  $R_S = R_3$ , os ensaios foram realizados na condição de máximo bloqueio para um determinado ângulo de inclinação  $\alpha$ .

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 apresenta o comportamento da emissão de  $\text{NO}_x$  em função do número de *swirl* para as amostragens de gases feitas em 994 e 227 litros. As curvas da figura mostram comportamentos qualitativos e quantitativos bastante semelhantes para as emissões de  $\text{NO}_x$  em ambos pontos de amostragem, indicando que a maior parte do  $\text{NO}_x$  é formado na região de chama e não ao longo da câmara. Isso deve-se principalmente à queda de temperatura dos gases de combustão em função da transferência de calor para a parede da câmara após a região de chama. A temperatura obtida na saída da fornalha foi em torno de  $850^\circ\text{C}$ , com o tempo de residência de aproximadamente 5 segundos.



**Figura 3.** Comportamento da emissão de NO<sub>x</sub> (base seca) em função do número de *swirl*: (a) amostragem dos gases feita a 994 litros e (b) amostragem dos gases feita a 227 litros.

O comportamento da emissão de NO<sub>x</sub> observado na Figura 3 está atrelado às interações existentes entre o processo de vaporização das gotas do spray com a estrutura da zona de recirculação. Basicamente, a combustão de sprays com a presença de uma zona de recirculação interna (ZRI), gerada pela presença do *swirler* no escoamento do ar oxidante, segue as observações experimentais feitas por Ballester e Dopazo (1994). O spray é injetado diretamente na ZRI, com as gotas mantendo-se concentradas ao longo do cone formado pelo spray. As gotas passam a ser aquecidas pela radiação proveniente da chama e das paredes da câmara, além de uma combinação de convecção e condução devido aos gases quentes retornados da chama que são carregados para ZRI. Desta forma, as gotas evaporam e são desaceleradas ao longo de suas trajetórias a uma taxa que depende do tamanho de cada uma. Gotas de menores diâmetros tendem a seguir o escoamento reverso e evaporam quase instantaneamente, suprimindo as condições de ignição e ancorando a chama próxima ao queimador. Por outro lado, as gotas maiores possuem quantidade de movimento suficiente para atravessar o escoamento reverso e terão a vaporização completa a jusante da ZRI. No entanto, parte da vaporização ocorre ainda na ZRI, resultando em uma região de alta geração de vapor e apenas uma limitada quantidade de oxigênio é suprida do escoamento de ar ao redor do spray, caracterizando uma região de combustão rica com alta concentração de hidrocarbonetos não queimados e CO. A medida que fortalece-se a região de recirculação, aumentando-se S' grande parte da vaporização das gotas é confinada nessa região (Barreiros et al., 1993).

A Figura 4 apresenta um esquema da região de queima e fotografias do primeiro visor da câmara (centro do visor a 18cm do queimador) para chamas em três condições diferentes de número de *swirl*. Para S'=0,264 ( $\alpha = 15^\circ$ ) não é possível visualizar a influência da ZRI na estrutura da chama. No entanto, sua atuação se faz presente, visto que para S' inferiores a esse valor não foi possível estabilizar a chama. As fotografias ainda mostram que a medida que S' aumenta a tendência da chama é de concentrar-se mais próxima ao queimador. Isto também pode ser comprovado pelo comportamento da temperatura medida pelo termopar 1 posicionado 18cm a jusante do queimador (Figura 5a). O aumento da temperatura com o incremento do número de *swirl*, comprova que há uma maior liberação de energia por unidade de volume nas proximidades do queimador.

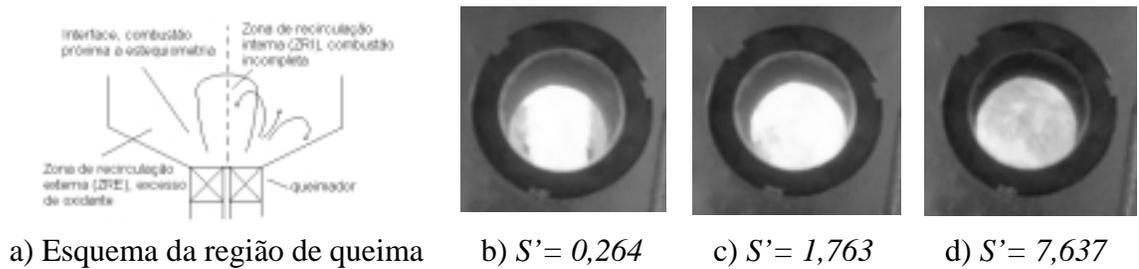


Figura 4. Esquema da região de queima e fotografias a 18cm do queimador.

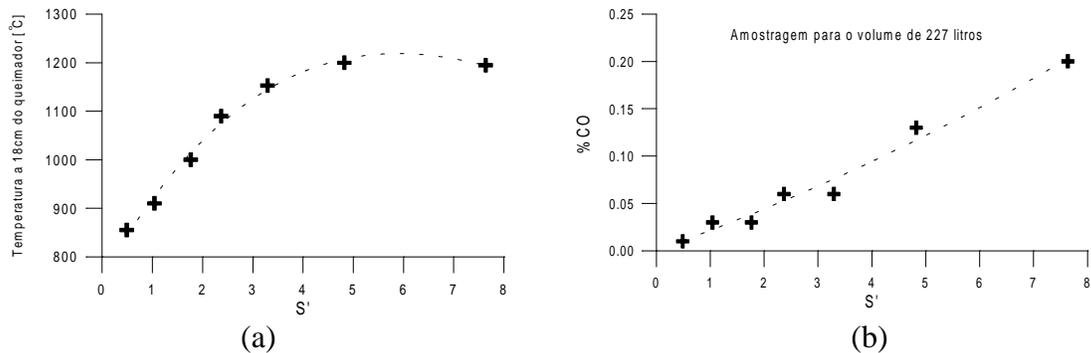


Figura 5. (a) Comportamento da temperatura medida pelo termopar posicionado a 18cm do queimador, com a variação do número de *swirl*. (b) Comportamento da porcentagem de CO com  $S'$ . Amostragem dos gases de combustão feita para o volume da câmara de 227 litros.

Apesar do aumento da temperatura na região próxima ao queimador, devido a redução do comprimento da chama e confinamento da vaporização das gotas na ZRI, quando  $S'$  aumenta a combustão acaba acontecendo sob condição rica e os gases de combustão apresentam alto teor de hidrocarbonetos não queimados e CO. A Figura 5b mostra o aumento da porcentagem de CO nos gases de combustão logo após a região de chama. No entanto, a jusante da ZRI tais compostos de oxidação parcial vão reagindo com o oxigênio presente em alta concentração. Na saída da câmara a porcentagem de CO nos gases de combustão manteve-se em zero para qualquer valor de  $S'$ , demonstrando que o tempo de residência em torno de 5 segundos foi suficiente para mistura dos gases provenientes das reações da ZRI com o oxigênio remanescente e que as reações de oxidação foram finalizadas.

Comparando as curvas (a) e (b) da Figura 3 percebe-se que a maior parte do  $\text{NO}_x$  é formado na região de chama. Sabe-se que a formação de NO por meio do mecanismo reacional térmico ou de Zeldovich é predominantemente na região de pós-chama, em virtude das reações de tal mecanismo serem lentas quando comparadas com as reações de oxidação dos hidrocarbonetos. Além disso, o mecanismo Térmico é extremamente dependente de elevada temperatura, acima de  $1500^\circ\text{C}$ , em função da alta energia de ativação das reações envolvidas. A dependência da taxa de formação de NO com a temperatura e com as concentrações de  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$  está representada na equação (9) (Glarborg, 1993).

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 1,3 \cdot 10^5 \cdot \exp(-67650/T) \cdot [\text{O}_2]^{1/2} \cdot [\text{N}_2] \quad (9)$$

Em função das observações feitas para a Figura 3 é bastante razoável considerar que a que uma boa parte do NO é formado através do mecanismo *Prompt NO<sub>x</sub>*, onde a formação de NO envolve radicais intermediários do mecanismo reacional de oxidação dos

hidrocarbonetos. Em chamas de hidrocarbonetos em condições de combustão rica, considera-se que a principal fonte de NO é a fixação do nitrogênio atmosférico (N<sub>2</sub>) por hidrocarbonetos fragmentados, em reações como (Syska, 1993):



O nitrogênio proveniente da reação (10) pode participar da reação rápida:



Contudo, os outros produtos, HCN e NH, serão parcialmente convertidos em N<sub>2</sub> em temperaturas acima de 1100°C. Ainda para o caso de chamas ricas, o NO pode ser convertido em N<sub>2</sub> através da reação intermediária (13), que converte o NO em HCN, sendo este último finalmente reduzido a N<sub>2</sub>. Spliethoff et al. (1996) também relataram para queima de carvão pulverizado, que o aumento da temperatura em regiões ricas acelera as taxas de decomposição dos compostos nitrogenados, diminuindo a emissão de NO<sub>x</sub>.



A interpretação para o comportamento do NO<sub>x</sub> pode ser dada como segue: segundo a fotografia (b) da Figura 4, para S' baixo, o jato cruza a fraca região de recirculação e as gotas acabam vaporizando em regiões com alta concentração de oxigênio, o que é fundamental para formação de NO<sub>x</sub>. Aumentando-se S', fortalece-se a ZRI, confinando a vaporização das gotas na região rica. Isto resulta em uma progressiva redução na conversão do nitrogênio para NO<sub>x</sub>.

Apesar dos comentários feitos sobre redução do NO formado pelo mecanismo *Prompt*, não se pode descartar que flutuações locais de temperatura (que não podem ser detectadas pelos termopares utilizados) e concentrações de superequilíbrio de O e OH em algumas regiões da chama, possam acelerar a taxa de reação das reações (14) e (15) do mecanismo de Zeldovich.



Assim, o aumento da temperatura na região próxima ao queimador pode favorecer a formação do NO<sub>x</sub> térmico, explicando o fato de que a medida que S' vai aumentando a sua eficiência na redução da emissão de NO<sub>x</sub> vai diminuindo. Ou seja, a medida que S' aumenta a vaporização das gotas em regiões ricas diminui a formação do NO<sub>x</sub> *Prompt*, por outro lado eleva a temperatura na região próxima ao queimador, podendo favorecer a formação do NO<sub>x</sub> térmico. Os valores de temperatura apresentados na Figura 5a estão longe de representar a distribuição de temperatura na chama, mas indicam a tendência da mesma.

O comportamento para o NO<sub>x</sub> em função de S' relatado no presente trabalho está de acordo com os resultados experimentais observados por Barreiros et al.(1993), em experimentos de queima de óleo pesado. Para os números de *swirl* 0,6, 0,9, e 1,3 a emissão de NO<sub>x</sub> foi de 400, 150 e 100ppm, respectivamente. Também observaram que a eficiência na redução da emissão de NO<sub>x</sub> também diminui com aumento de S' e que temperatura também aumentou na região de chama. Para o caso da queima de óleo pesado, também está presente a formação de NO devido ao nitrogênio contido no combustível. No entanto, Barreiros et al. observaram que o comportamento do NO proveniente do combustível, frente a presença da ZRI, é o mesmo observado para o NO<sub>x</sub> *Prompt*.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou os resultados da investigação experimental sobre o comportamento da emissão de  $\text{NO}_x$  com número de *swirl*, em uma fornalha laboratorial operando a 110kW e utilizando diesel como combustível. Os resultados apontam que o aumento do número de *swirl* causa uma redução na emissão de  $\text{NO}_x$ . Aumentando-se *S'* fortalece-se a zona de recirculação interna, confinando a vaporização das gotas nessa região onde a penetração de oxigênio é reduzida. Assim, cria-se uma região de combustão extremamente rica a jusante do queimador e os compostos de oxidação parcial formados nessa região, como por exemplo CO e hidrocarbonetos não queimados, são oxidados na região pós-chama, onde há oxigênio presente em alta concentração. Além disso, para caso de chamas de hidrocarbonetos ricas, os compostos nitrogenados HCN e NH são preferencialmente convertidos para  $\text{N}_2$  e o NO formado pode ser convertido para  $\text{N}_2$  através da reação com o radical CH, dependendo da razão de equivalência e da temperatura.

Apesar da utilização de zonas de recirculação fortes a jusante do queimador mostrar ser conveniente para a redução da emissão de  $\text{NO}_x$ , é preciso prever um tempo de residência suficiente para oxidação completa dos compostos intermediários (como CO e hidrocarbonetos não queimados). Desta forma, em câmaras de combustão com baixo tempo de residência o controle da emissão de  $\text{NO}_x$  por meio da intensificação da zona de recirculação, pode aumentar a emissão de CO e diminuir a eficiência de combustão.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo suporte dado através do projeto 95/4167-7 e ao Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do INPE por disponibilizar sua estrutura e equipamentos.

## 7. REFERÊNCIAS

- Ballester, J.M., Dopazo, C., 1994, "Experimental Study of the Influence of Atomization Characteristic on Combustion of Heavy Oil, Comb. Sci. and Tech., vol. 103, pp. 235-263.
- Barreiros, A., Carvalho, M.G., Costa, M., Lockwood, F.C., 1993, "Predictions of Near Burner Region and Measurements of  $\text{NO}_x$  and Particulate Emissions in Heavy Fuel Oil Spray Flames", Combustion and Flame, vol. 92, pp. 231-240
- Couto, H.S., Muniz, W.F., Bastos-Netto, 1995, "Geometrical Parameters for Flows Across Axial Swirlers", 3<sup>rd</sup> Asian-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Hong Kong, pp.255-260.
- Glarborg, P., 1993, "NO<sub>x</sub> Chemistry in Pulse Combustion", Workshop in Pulsating Combustion and Its Applications, keynote Lecture C, Lund Institute of Technology, Sweden, August 2-5.
- Lawn, C.J., 1987, "Principles of Combustion Engineering for Boilers, New York, Academic, 628p.
- Splithoff, H., Greul, U., Rudiger, H., Hein, K.R.G., 1996, "Basic Effects on  $\text{NO}_x$  Emissions in Air Staging and Reburning at a Bench-Scale Test Facility", Fuel, vol. 75, n<sup>o</sup>5, pp.560-564.
- Syska, A., 1993, "Low  $\text{NO}_x$  Staged Air Recirculation Burner Undergoing Field Trials After Excellent Test Performance", Industrial Heating, september, pp. 40-43.