

# REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> EM PROCESSOS DE COMBUSTÃO UTILIZANDO CHAMAS ENRIQUECIDAS <sup>(1)</sup>

*Pedro Teixeira Lacava <sup>(2)</sup>*

*João Andrade de Carvalho Junior <sup>(3)</sup>*

## **Resumo**

O objetivo do presente trabalho é mostrar que processos industriais que operam com chamas enriquecidas possuem potencial para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> durante a combustão de combustíveis fósseis. O CO<sub>2</sub> é um dos poluentes que absorvem a radiação infravermelha e contribuem para o aquecimento global (“efeito estufa”). Como exemplo de aplicação dessa tecnologia, o presente trabalho mostra resultados sobre a redução da emissão normalizada de CO<sub>2</sub> na incineração de resíduos líquidos aquosos em função da porcentagem volumétrica de O<sub>2</sub> no oxidante. O combustível auxiliar foi o diesel e os experimentos foram realizados em uma fornalha vertical não refrigerada de escala laboratorial. Os resultados apontaram que a emissão de CO<sub>2</sub> pode ser reduzida em até 50% com essa técnica; contudo, os experimentos também apontaram que é necessário observar que o enriquecimento aumenta consideravelmente as emissões de NO<sub>x</sub>, como consequência da maior temperatura na região de chama. Desta forma, é fundamental o implemento de alguma estratégia para controlar a emissão de NO<sub>x</sub> nos processos de combustão enriquecida.

**Palavras-chave:** Emissão de CO<sub>2</sub>; Emissão de poluentes; Enriquecimento; Incineração.

*(1) 60 Congresso Anual da ABM, Julho 2005, Belo Horizonte*

*2 – Prof. Adjunto - ITA – São José dos Campos*

*3 – Prof. Titular - UNESP – Guaratinguetá / Pesquisador – INPE – Cachoeira Paulista*

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização da energia térmica liberada pelas reações de combustão de combustíveis fósseis, como o carvão, os derivados de petróleo e o gás natural, é uma prática corrente em diversos setores industriais.

Em um processo de combustão idealizado, diversas reações químicas se desenvolvem até a completa oxidação dos constituintes dos combustíveis. De uma maneira simplista, a combustão de hidrocarbonetos pode ser caracterizada como um processo de dois passos, o primeiro envolve a quebra do combustível para formar CO (monóxido de carbono) e o segundo é a oxidação final do CO para CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono). Assim, em processos de combustão idealizados onde se aproveita toda energia potencial química do combustível, todo carbono contido no combustível se converte a CO<sub>2</sub>. Contudo, por problemas de deficiência de mistura entre o combustível e o oxidante, de volume inadequado da câmara de combustão ou de regiões de baixa temperatura no interior da câmara, parte do CO não se converterá a CO<sub>2</sub>. A emissão de monóxido de carbono não representa apenas um desperdício de energia, pois o CO é um gás inodoro e venenoso. Por exemplo, a exposição do ser humano a uma concentração de 4000 p.p.m. de CO leva a morte em menos de uma hora, conforme citado em Carvalho Jr. e Lacava (2003).

Dentro desse contexto, a oxidação do CO é sempre desejável; no entanto, não soluciona totalmente o problema da emissão de poluentes em processos de combustão. A ausência do CO em áreas urbanas é sempre desejável, devido à sua alta toxicidade. No entanto, o CO<sub>2</sub> na atmosfera é um dos gases que absorvem a radiação infravermelha, contribuindo para o aquecimento global, ou seja, o chamado “efeito estufa”. O CO<sub>2</sub> e traços de outros gases permitem a penetração da radiação solar na superfície da Terra, mas reabsorvem a radiação infravermelha emitida desta.

Desde a década de 50, as concentrações de gases com capacidade de absorver a radiação infravermelha aumentaram muito na atmosfera, principalmente em função das nações se tornarem mais industrializadas. Apesar disso, foram nas décadas de 80 e 90 que os índices de aquecimento global se tornaram alarmantes. Muitas incertezas ainda pairam sobre o papel de cada gás nesse processo. No entanto, já se sabe que o CO<sub>2</sub> é o responsável por cerca da metade da radiação infravermelha retida na atmosfera (Manahan, 1993). Infelizmente, o aproveitamento de energia da maioria dos países altamente industrializados ou não está baseado na queima de combustíveis fósseis e essa situação deve se manter por algumas décadas.

Uma maneira de se minimizar a emissão de CO<sub>2</sub> é através do enriquecimento do oxidante, que nada mais é do que aumentar a concentração do oxigênio acima dos 21% (base volumétrica) presentes no ar atmosférico, ou seja, reduzir a concentração de N<sub>2</sub>, que do ponto vista energético é inerte, apenas absorve energia que poderia estar disponível para o processo. A utilização de chamas enriquecidas pode minimizar este impacto de duas formas: 1) nas situações onde a energia disponibilizada pela menor ou não presença de nitrogênio se traduz em economia de combustível; com isso, há uma redução da vazão mássica de CO<sub>2</sub> descarregado para atmosfera; 2) ou no caso onde a energia disponibilizada é utilizada para aumentar a capacidade de um processo, como em incineração. Nesta última situação, mesmo a potência do processo sendo mantida constante, a massa de CO<sub>2</sub>

emitida para atmosfera, normalizada pela massa de resíduo, diminuirá, ou seja, para incinerar uma determinada massa de resíduo uma menor quantidade de CO<sub>2</sub> será emitida se a incineração for realizada com oxidante enriquecido. Desta forma, a utilização da combustão enriquecida pode contribuir significativamente tanto para redução da emissão de CO como de CO<sub>2</sub>. No entanto, é necessário levar em conta que, com o enriquecimento há um aumento substancial da temperatura na região de chama, o que favorece a formação de NO<sub>x</sub>. Assim, é preciso associar ao enriquecimento do oxidante algum método para controlar a emissão de NO<sub>x</sub>. Por outro lado, as emissões de CO, hidrocarbonetos não queimados e fuligem diminuem em consideravelmente.

O presente trabalho apresenta uma investigação experimental sobre o comportamento da quantidade de CO<sub>2</sub> lançada para atmosfera em uma unidade de incineração de resíduos líquidos aquosos de escala laboratorial. O trabalho ainda apresenta resultados sobre o aumento da capacidade de incineração da câmara e sobre a emissão de NO<sub>x</sub>.

## 2 ARRANJO EXPERIMENTAL

Em todos ensaios realizados, utilizou-se apenas água para simulação do resíduo, em virtude das facilidades experimentais envolvidas e pelo fato do enriquecimento do oxidante ser vantajoso para incineração de resíduos não combustíveis. Além disso, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar a redução da emissão de CO<sub>2</sub> para atmosfera e não a destruição térmica de compostos presentes no resíduo.

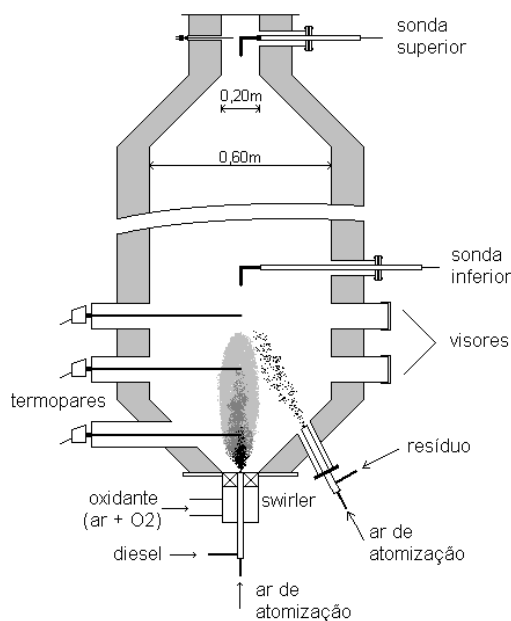
Os ensaios foram realizados em uma câmara de combustão vertical, com parede refratária de 0,15 m de espessura, sem refrigeração externa e com o volume total de 1000 litros. Como combustível auxiliar utilizou-se diesel, injetado na câmara através de um queimador com dispositivo para ancorar a chama do tipo *swirler*. A Figura 1 apresenta um esquema da câmara com o queimador posicionado em sua extremidade inferior. A injeção de resíduo é feita por um injetor tipo *Y-jet*, de tal forma que o spray formado não incida completamente sobre a chama para não apagá-la.

A instrumentação associada à câmara conta com medidas de temperatura por termopares nas posições: 0,18, 0,70, 1,05, 1,40, 1,75, 2,50, 3,00 e 4,20 m a jusante do queimador; análise dos gases de combustão através de amostragens contínuas feitas por duas sondas devidamente refrigeradas e posicionadas em dois pontos da câmara: na região próxima ao final da chama, correspondendo ao volume 227 litros, e a 30 cm da saída da câmara, correspondendo ao volume de 997 litros. Utilizaram-se analisadores do tipo infravermelho para os gases CO e CO<sub>2</sub>, quimiluminescente para NO<sub>x</sub> e termomagnético para O<sub>2</sub>.

As medidas das vazões de diesel, resíduo, ar e oxigênio foram obtidas através de rotâmetros.

Para os ensaios, manteve-se a vazão de diesel constante em 3,11 g/s, o que representa uma potência liberada de 133,55 kW. As vazões de ar e de oxigênio foram combinadas de tal forma que a vazão mássica do oxigênio na saída da câmara fosse 1,58 g/s em qualquer condição de ensaio. Desta forma, a queima sempre ocorreu com excesso de oxigênio em torno de 15 %. Finalmente, o aproveitamento da energia disponibilizada pela redução da presença de nitrogênio foi feito ajustando a vazão de resíduo, mas mantendo a temperatura na saída da

câmara em 1030 K. A injeção de oxigênio puro foi feita na linha de ar oxidante antes da passagem do mesmo pelo queimador.



**Figura 1.** Esquema da câmara de combustão.

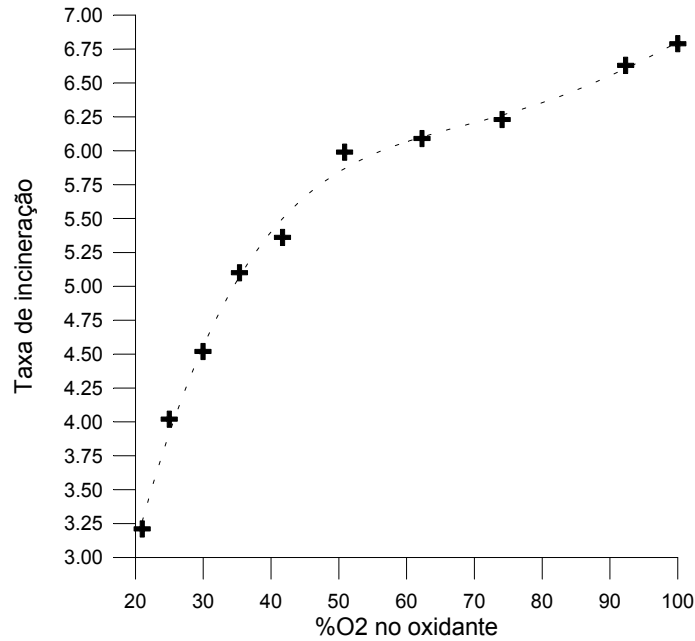
### 3 RESULTADOS E COMENTÁRIOS

#### 3.1 Aumento da Capacidade de Incineração

A Figura 2 apresenta o comportamento experimental da taxa de incineração, definida como a razão entre as vazões mássica de resíduo e combustível ( $m_{res}/m_f$ ), em função da porcentagem de oxigênio no oxidante. Percebe-se que há um aumento considerável até aproximadamente o nível de enriquecimento de 50 % de oxigênio, cerca de 85 % acima da operação com ar. No entanto, a partir deste ponto, a taxa de incineração aumenta discretamente com o incremento da porcentagem de O<sub>2</sub> no oxidante. Para combustão com oxi-chama (100 % O<sub>2</sub>), o aumento da taxa de incineração foi de 111% em relação à operação com ar e 13,4% em relação ao enriquecimento de 50 % de O<sub>2</sub>.

Com o enriquecimento há uma redução acentuada da vazão de ar até aproximadamente 50% de O<sub>2</sub> no oxidante. Deste ponto em diante, a redução ocorre de maneira mais branda. Como a vazão total de oxigênio (O<sub>2</sub> do ar + O<sub>2</sub> injetado) é constante para cada valor enriquecimento, basicamente o responsável pelo comportamento de elevado aumento da taxa de incineração até 50% de O<sub>2</sub> é a acentuada redução da quantidade de nitrogênio até esse ponto.

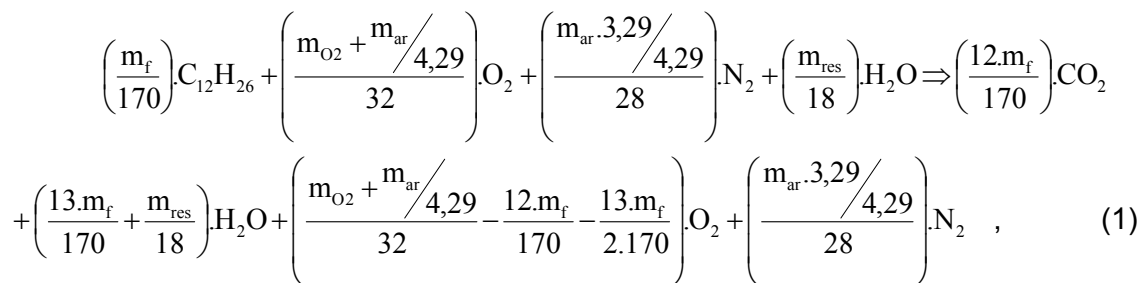
Discussões detalhadas sobre o aumento da capacidade de incineração de resíduos líquidos aquosos através do enriquecimento do oxidante podem ser encontradas em Melo et al. (1998) e Lacava et al. (1999). Resultados específicos para presente montagem experimental estão disponíveis em Lacava et al. (2003) e Lacava et al. 2004.



**Figura 2.** Comportamento da taxa de incineração com a porcentagem de oxigênio no oxidante.

### 3.2 Emissões de CO<sub>2</sub>

Com a redução do nitrogênio no oxidante, a porcentagem volumétrica de CO<sub>2</sub> nos gases de combustão aumenta demasiadamente, principalmente pelo fato das medidas serem feitas em base seca. Desta forma, a obtenção experimental da porcentagem de CO<sub>2</sub> só foi possível até 30% de oxigênio no oxidante; acima disso, o fundo de escala do analisador (20% de CO<sub>2</sub>) é ultrapassado. Para as situações onde não foi possível realizar as medidas, adotou-se o diesel como tendo fórmula C<sub>12</sub>H<sub>26</sub> e estimou-se a porcentagem de CO<sub>2</sub> em base seca e na saída da câmara através da reação:



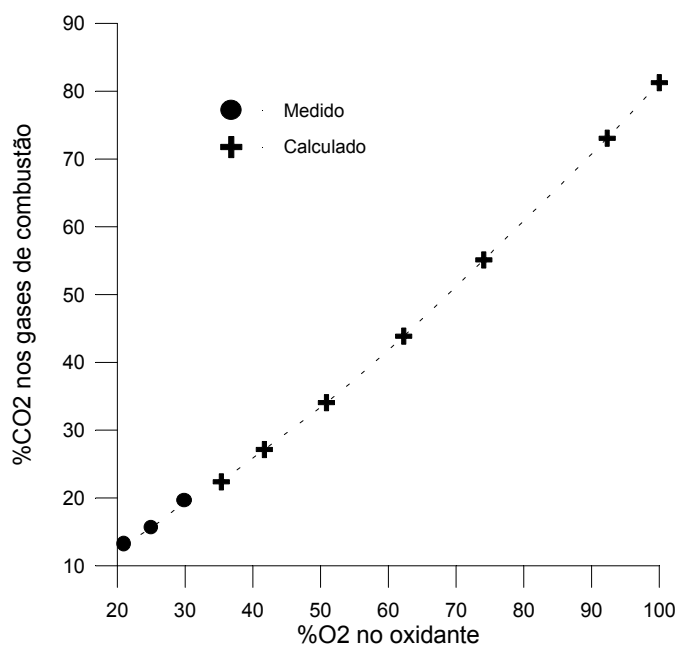
onde  $m_f$  é a vazão de diesel,  $m_{O_2}$  é a vazão total de oxigênio (combustão + atomização),  $m_{ar}$  é a vazão total de ar (combustão + atomização) e  $m_{res}$  a vazão de resíduo. Não foi considerada a presença de CO e NO<sub>x</sub> nos gases de combustão, em função de apresentarem valores desprezíveis na saída da câmara em comparação com as emissões de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, e N<sub>2</sub>. Também não foi considerada a hipótese de dissociação, em virtude da baixa temperatura na saída da câmara. Mesmo que se atinjam temperaturas locais elevadas na chama, condição necessária para ocorrência da dissociação, à medida que a temperatura diminui ao longo da câmara,

os compostos possivelmente formados seriam reconvertidos em compostos de oxidação completa.

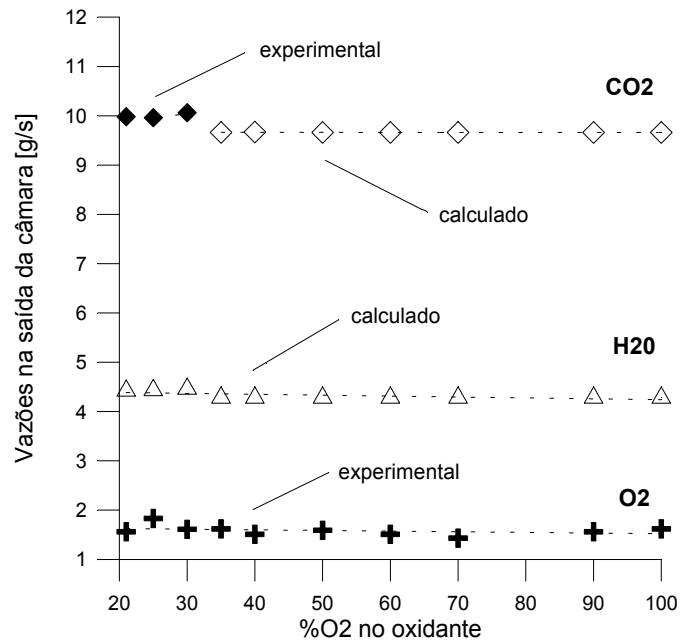
A Figura 3 apresenta os resultados experimentais e calculados para a porcentagem de CO<sub>2</sub> em base seca na saída da câmara em função da porcentagem de oxigênio no oxidante. A ligeira discordância entre a tendência dos resultados experimentais e dos calculados está no fato de incertezas quanto à composição do diesel, admitido como sendo C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>.

A porcentagem volumétrica do CO<sub>2</sub>, na verdade não é a maneira mais adequada de se analisar a emissão desse gás em um processo de enriquecimento. Uma observação desatenta da Figura 3 poderia levar à conclusão de que o enriquecimento causa um aumento brutal na emissão de CO<sub>2</sub> que, como já discutido, é um dos responsáveis pelo indesejável “efeito estufa”. Como a vazão de combustível e a vazão total de oxigênio (proveniente do ar + injetado puro) foram mantidas constantes nos ensaios, a emissão mássica de CO<sub>2</sub> também permaneceu constante. A Figura 4 mostra o resultado da conversão das emissões de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O (este último somente o que foi gerado pela combustão) de porcentagem volumétrica para emissão em massa.

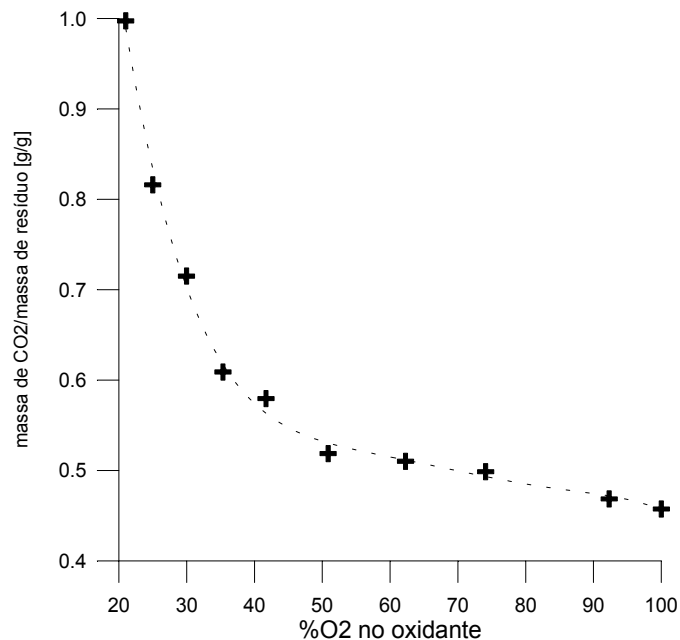
É importante observar que, ao mesmo tempo em que a emissão mássica de CO<sub>2</sub> permanece constante com o enriquecimento, há um aumento na taxa de incineração. Sendo assim, a razão entre a massa de CO<sub>2</sub> lançada para atmosfera e a massa de resíduo incinerado ( $m_{CO_2}/m_{res}$ ), emissão normalizada de CO<sub>2</sub>, reduz com aumento do enriquecimento. Ou seja, lança-se menos CO<sub>2</sub> para atmosfera quando se incinera uma certa massa de resíduo aquoso em condições de enriquecimento. A Figura 5 mostra o comportamento da emissão normalizada de CO<sub>2</sub> com o enriquecimento do oxidante. Para 100% de O<sub>2</sub>, a redução na emissão normalizada de CO<sub>2</sub> chegou a 55% em relação à condição de operação com ar.



**Figura 3.** Porcentagem volumétrica de CO<sub>2</sub> nos gases de combustão em base seca na saída da câmara em função da porcentagem de O<sub>2</sub> no oxidante. Valores medidos ou calculados.



**Figura 4.** Emissões mássicas de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, sendo que para H<sub>2</sub>O foi considerado apenas o que se forma nas reações de combustão.



**Figura 5.** Massa de CO<sub>2</sub> / massa de resíduo em função da porcentagem de oxigênio no oxidante.

### 3.3 Emissão de NO<sub>x</sub>

O positivo resultado da redução da emissão de CO<sub>2</sub> com o aumento da capacidade de incineração apresenta uma contrapartida negativa, o aumento da emissão de NO<sub>x</sub>. Tal termo é utilizado para designar a soma de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). Em geral, as quantidades de NO

formadas são muito maiores que as de  $\text{NO}_2$ . Contudo, uma vez lançado na atmosfera, o NO rapidamente se converte a  $\text{NO}_2$  e a taxa de emissão mássica de  $\text{NO}_x$  é sempre calculada considerando seus dois compostos como sendo exclusivamente  $\text{NO}_2$ . Como conseqüências da presença desse poluente na atmosfera pode-se citar: chuva ácida, *smog* fotoquímico, formação de ozônio no nível do solo, edemas pulmonares, cianose, entre outras.

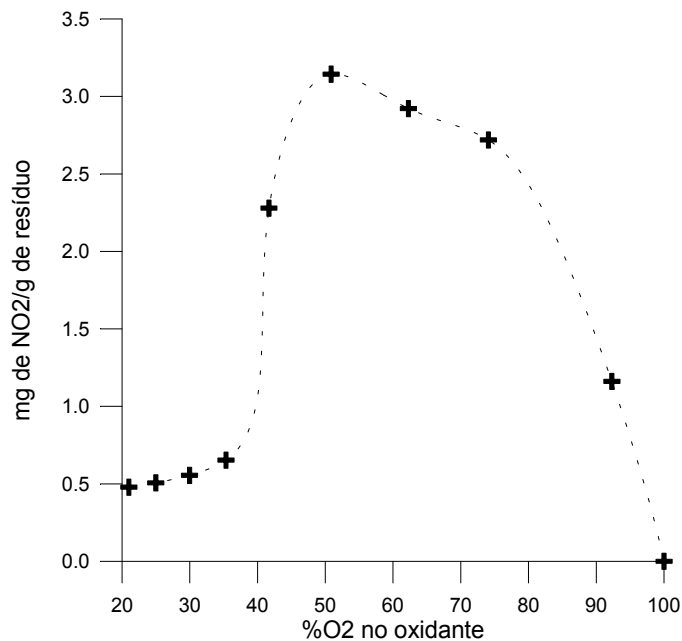
A Figura 6 mostra a razão entre a emissão em massa de  $\text{NO}_x$ , convertida a  $\text{NO}_2$ , e vazão de resíduo incinerado (emissão normalizada de  $\text{NO}_x$ ) em função da porcentagem de  $\text{O}_2$  no oxidante. Nota-se que essa emissão normalizada aumenta mais de 6 para operação com 50% de enriquecimento em relação à operação com ar (21% de  $\text{O}_2$ ). Esse aumento está relacionado com a elevada temperatura na região de chama provocada pelo enriquecimento, o que é extremamente favorável aos mecanismos reacionais que formam o  $\text{NO}_x$ . Analisando a Fig. 6, para não se atingir níveis elevados de emissão de  $\text{NO}_x$  seria preciso ou operar em baixos níveis de enriquecimento, até 30% de  $\text{O}_2$ , o que limita os benefícios do enriquecimento, ou operar com oxí-chamas (100% de  $\text{O}_2$ ), aumentando demasiadamente o custo da operação. Contudo, Lacava et. al (2004) mostraram que esses níveis de emissão normalizados de  $\text{NO}_x$  podem ser evitados utilizando algumas técnicas de controle da emissão desse poluente, sem prejuízo do aumento da capacidade de incineração e redução da emissão normalizada de  $\text{CO}_2$ , conforme a Figura 5. Entre as técnicas avaliadas por esses autores, destaca-se o estagiamento da injeção dos reagentes, ou seja, fracionar a injeção de combustível ou oxidante, para criar regiões de menor temperatura na câmara e desfavoráveis à formação de  $\text{NO}_x$ . Os resultados dessa pesquisa apontam que operações com combustão estagiada e enriquecimento de 50% possuem emissão normalizada de  $\text{NO}_x$  inferior à operação de combustão sem estagiamento se sem enriquecimento. Assim, pode-se concluir que é possível utilizar os benefícios do enriquecimento para aumentar a capacidade de incineração de uma câmara e redução da emissão normalizada de  $\text{CO}_2$  sem ter uma contrapartida negativa do aumento da emissão de  $\text{NO}_x$ .

#### 4 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que é possível utilizar o enriquecimento da combustão com oxigênio puro para aumentar a capacidade de operação de uma unidade de incineração de resíduo líquido aquoso de escala laboratorial e, além disso, reduzir a quantidade de dióxido de carbono lançado para atmosfera. Os resultados experimentais mostram que para um enriquecimento de 50% de  $\text{O}_2$  é possível alcançar uma redução próxima a 50% na emissão normalizada de  $\text{CO}_2$ .

O lado negativo do processo de enriquecimento é o aumento da emissão de  $\text{NO}_x$  como conseqüência do incremento de temperatura na região de chama. Contudo, a parte dos resultados desse projeto sobre controle da emissão de  $\text{NO}_x$  foi publicada recentemente em Lacava et al (2004) e os resultados indicam que é perfeitamente possível conciliar os benefícios do enriquecimento com práticas de controle usuais para o combate desse poluente.





**Figura 6.** Comportamento da razão mg de NO<sub>2</sub>/g de resíduo em função da porcentagem de O<sub>2</sub> no oxidante.

No presente trabalho não é feita nenhuma consideração sobre a viabilidade econômica do enriquecimento em um processo de incineração de resíduos líquidos aquoso, pois isso dependem de diversos aspectos não tecnológicos, como, por exemplo, o preço que se paga pelo oxigênio. Nas últimas décadas a diferença de preço entre o oxigênio e os combustíveis fósseis tem diminuído bastante, principalmente em relação ao derivados do petróleo; em consequência das instabilidades internacionais que atinge o preço desse último e do avanço das técnicas criogênicas de separação do ar para obtenção do oxigênio. O preço que uma indústria paga pelo oxigênio depende do seu consumo desse gás, ou até mesmo do consumo total de gases; o que dificulta uma análise econômica que não seja um estudo de caso. Outro ponto a destacar é o aumento da capacidade de incineração, pois, para o caso de uma unidade cuja capacidade de incineração está esgotada, com certeza é mais barato implementar e operar com combustão enriquecida do que pagar para incinerar em uma unidade externa.

### **Agradecimentos**

Para Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, através dos projetos 96/10310-0 e 95/4167-7, e ao Laboratório de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pelo suporte aos experimentos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 CARVALHO JR, J.A.; LACAVA, P.T., 2003, **Emissões em Processos de Combustão**.São Paulo: Editora UNESP, v. 1. 135 p.
- 2 LACAVA, P. T.; CARVALHO JR., J A; PIMENTA, A P; FERREIRA,M.A., 2004. Increase on Incineration Capacity and NO<sub>x</sub> Control for Air Enrichment in the Experimental Simulation of Aqueous Residue Incineration. **Combustion Science and Technology**, v. 176, n. 7, p. 1117-1152.
- 3 LACAVA, P.T.; PIMENTA, A P; VERAS, C A G; CARVALHO JR, J A., 1999 Theoretical Analysis of Aqueous Residues Incineration with Oxygen Enriched Flames. **International Comm. Heat and Mass Transfer**, v. 29, p. 1029-1040.
- 4 MANAHAN, S. E., 1993, **Fundamentals of Environmental Chemistry**, Lewis Publisher.
- 5 MELO, G F; LACAVA, P.T.; CARVALHO JR., J A, 1998, A Case Study of Air Enrichment in Rotary Kiln Incineration. **International Communication in Heat and Mass Transfer**, v. 255, p. 681-692.

# REDUCTION ON THE CO<sub>2</sub> EMISSION IN ENRICHED FLAME COMBUSTION PROCESS<sup>1</sup>

Pedro Teixeira Lacava <sup>(2)</sup>  
João Andrade de Carvalho Junior <sup>(3)</sup>

## Abstract

The objective of the present work is to show that industrial processes operating with oxygen enriched flames have potential to reduce the CO<sub>2</sub> emissions in fossil fuels combustion. CO<sub>2</sub> is a pollutant that absorbs the infrared radiation, and contributes to the global warming (the “green house effect”). As example of application, the present work presents experimental results of the normalized CO<sub>2</sub> emissions reduction on the aqueous liquid waste incineration as consequence of the oxidant enrichment. The auxiliary fuel was diesel, and the experiments were conducted in a non-refrigerated vertical furnace of laboratorial scale. The results pointed CO<sub>2</sub> emissions can be reduced up to 50% using this technology; however, the experiments also pointed it is necessary to observe that the enrichment increases considerably the NO<sub>x</sub> emissions, as consequence of higher temperature in flame region. So that, it is necessary to implement any strategy to control the NO<sub>x</sub> emission in enriched combustion processes.

**Key-words:** CO<sub>2</sub> emissions; Pollutant emissions; Enrichment; Incineration.

<sup>1</sup> 60th ABM Congress, July – 2005, Belo Horizonte

<sup>2</sup> Adjunct Professor – ITA – São José dos Campos

<sup>3</sup> Titular Professor – UNESP – Guaratinguetá / Researcher – INPE – Cachoeira Paulista