

## UTILIZAÇÃO DE CHAMAS ENRIQUECIDAS NA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS LÍQUIDOS AQUOSOS

**Pedro Teixeira Lacava** – lacava@aer.ita.cta.br

**Amilcar Porto Pimenta** – amilcar@aer.ita.cta.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica

Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, Brasil

CEP: 12228-900

**João Andrade de Carvalho Jr.** – joao@feg.unesp.br

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Depto. de Energia

Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá –SP, Brasil, CEP: 12500-000

**Marco Aurélio Ferreira**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão

Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, SP, Brasil, CEP: 12700-000

***Resumo.** O uso de oxigênio para enriquecer o oxidante pode ser uma atrativa alternativa para aumentar a taxa de incineração de uma câmara de combustão originalmente desenhada para operar com ar. Para uma certa vazão de combustível, se alguns parâmetros de incineração forem mantidos constantes (como temperatura da câmara, nível de turbulência e tempo de residência), um aumento na taxa de incineração torna-se possível com a injeção de oxigênio. O presente trabalho apresenta uma avaliação experimental do enriquecimento do ar de combustão em uma câmara de combustão laboratorial projetada para incinerar resíduos aquosos usando diesel como combustível e ar como oxidante.*

***Palavras-chave:** Combustão, Incineração, Chamas enriquecidas, Emissão de Poluentes.*

### 1. INTRODUÇÃO

A utilização de chamas enriquecidas com oxigênio vem ganhando cada vez mais espaço em processos de combustão industrial que necessitam de elevada energia térmica disponível. O emprego de tal tecnologia teve início nos anos cinquenta (Gitman, 1986) e, desde então, muitos estudos e desenvolvimentos foram realizados. No entanto, com aumento do preço dos combustíveis em relação ao preço do oxigênio, principalmente devido à crise do petróleo e à diminuição dos custos de produção do oxigênio com o avanço das técnicas criogênicas de separação do ar, as chamas enriquecidas surgiram como uma forte alternativa nos últimos anos (Shahani et al., 1996).

A idéia básica do enriquecimento é bastante simples. A grande maioria dos processos de combustão utiliza o ar ambiente como fonte de oxigênio. Durante a combustão as reações envolvendo esse oxigênio com o carbono e o hidrogênio presentes nos combustíveis

hidrocarbonetos, liberam energia térmica. No entanto, uma grande parte dessa energia liberada é absorvida pelo nitrogênio, visto que o ar é constituído de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de traços de outros constituintes. Do ponto de vista térmico, o nitrogênio é inerte, ou seja, apenas absorve a energia liberada pelas reações de combustão, que poderia estar sendo utilizada em um processo industrial. Enriquecendo a mistura oxidante para porcentagens de oxigênio acima dos 21% do ar atmosférico, a vazão total dos gases de combustão diminui e a eficiência térmica do processo aumenta (Griffith, 1990). Basicamente, o enriquecimento do oxidante encontra espaço em processos industriais que necessitam temperaturas elevadas e alta eficiência térmica. As chamas enriquecidas são amplamente utilizadas para aumentar a capacidade de produção de fornalhas de fusão, entre elas as utilizadas nas indústrias de vidro, metais fundidos e óxidos metálicos

Outra aplicação promissora para as chamas enriquecidas é na incineração de resíduos com baixo poder calorífico, ou com elevado teor de água (aquosos), que, quando comparada com a utilização em fornos de fusão, ainda está na “infância” (Sharani et al., 1996). O uso de oxigênio para enriquecer o oxidante pode ser uma alternativa atrativa para aumentar a taxa de incineração em uma câmara de combustão projetada para operar com ar. Para uma certa vazão de combustível, se alguns parâmetros de incineração forem mantidos constantes (como temperatura da câmara, nível de turbulência e tempo de residência), o aumento da taxa de incineração torna-se possível com a injeção de oxigênio (Melo et al., 1998).

Apesar da aparente vantagem, a redução do volume de nitrogênio no gás oxidante, devido ao enriquecimento, tem consequências diretas em alguns parâmetros importantes de combustão, como por exemplo: temperatura, tempo de residência, turbulência, comprimento da chama, taxa de mistura entre reagentes, entre outros (Melo et al., 1998). Assim, a utilização de chamas enriquecidas não é simplesmente um problema de ajuste de vazões de ar, oxigênio e resíduo, devendo ser cuidadosamente estudada antes de seu emprego.

Dentro deste contexto, o presente trabalho apresenta os resultados de uma investigação experimental sobre o aumento da capacidade de incineração de resíduos líquidos aquosos em uma câmara de combustão de escala laboratorial, operando com chamas enriquecidas. Além de focar a eficiência do processo, o trabalho também analisa a emissão de poluentes, visto as exigências ambientais atuais sobre o emprego de qualquer tecnologia.

## **2. MONTAGEM 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 o balanço de energia na câmara e não a destruição térmica de compostos presentes no resíduo.

Como combustível auxiliar utilizou-se diesel, injetado na câmara através de um atomizador tipo “Y-jet”. Neste caso, a atomização do combustível é feita através da injeção de um gás auxiliar a alta velocidade sobre o escoamento de líquido em uma câmara de mistura. A maior vantagem deste tipo de injetor é permitir o controle do tamanho das gotas do spray sem alterar a vazão de combustível, apenas ajustando a vazão do gás auxiliar. Na presente investigação, utilizou-se ar comprimido como gás auxiliar de atomização, com exceção do ensaio com 100% de O<sub>2</sub> no oxidante, onde o próprio oxigênio foi utilizado. Tal injetor foi acoplado à lança central de um queimador com dispositivo para geração de “swirl”. O conjunto atomizador/queimador está representado na Fig. 1. O dispositivo gerador de swirl permite a variação do ângulo entre suas pás; com isso, foi possível alterar a intensidade da zona de recirculação interna (ZRI) formada a jusante do queimador, sem modificar a vazão

mássica do escoamento de oxidante. Para quantificar a estrutura da ZRI, foi utilizado o parâmetro adimensional conhecido como “número de swirl”, sendo que o modelo empregado para seu cálculo é basicamente o apresentado por Lawn (1987), com as considerações de coeficiente de bloqueio feitas por Couto et al. (1995).

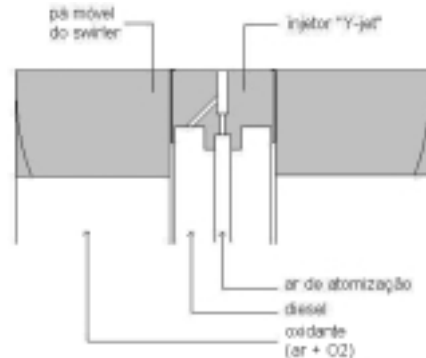


Figura 1- Esquema do conjunto atomizador/queimador.

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. A Fig. 2 apresenta um esquema da câmara, com o queimador posicionado em sua extremidade inferior. A injeção de resíduo também 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. Através de visores posicionados ao longo da câmara, observou-se que o resíduo vaporiza-se imediatamente após ser injetado na mesma, em função da temperatura elevada nessa região.

A instrumentação associada à câmara conta com medidas de temperatura, análise da composição dos gases de combustão e vazões. Para obtenção da distribuição de temperatura, foram previstos 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. Para as regiões mais próximas à chama (0,18 e 0,70 m) utilizaram-se termopares tipo “S”; para as regiões de menor temperatura, o tipo “K”.

A amostragem dos gases de combustão foi feita por duas sondas devidamente refrigeradas, 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. Os gases de amostragem, sugados por uma bomba de vácuo, passam por filtros e condensadores antes de chegarem aos analisadores contínuos de CO (infravermelho), CO<sub>2</sub> (infravermelho), O<sub>2</sub> (termomagnético) e NO<sub>x</sub> (quimiluminescente). As leituras dos analisadores (em base seca), juntamente com as dos termopares, foram feitas em um sistema de aquisição de dados HP6554, que realiza três varreduras completas por minuto.

As vazões de diesel, ar de atomização do diesel, oxigênio de atomização do diesel, resíduo, ar de atomização do resíduo, oxigênio de atomização do resíduo e oxigênio de combustão, foram medidas através de rotômetros. Já a vazão do ar de combustão foi medida através de um sistema de placa de orifício.

Para os ensaios, manteve-se a vazão de diesel constante em 3,11 g/s, o que representa uma potência 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. 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 feita ajustando a vazão de resíduo, mas mantendo a temperatura na saída da câmara em 1030 K.

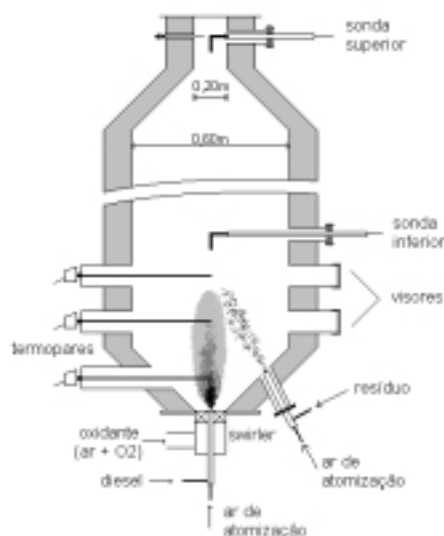


Figura 2 – Esquema da câmara de combustão.

A injeção de oxigênio puro foi feita na linha de ar oxidante antes da passagem do mesmo pelo queimador, com exceção dos ensaios onde se desejou estagiar a combustão, conforme descrito na seção seguinte. As vazões de ar de atomização foram mantidas constantes em 0,45 g/s e 0,85 g/s, para o diesel e para o resíduo, respectivamente. No entanto, conforme mencionado anteriormente, para o ensaio com 100 % de O<sub>2</sub> como oxidante, o ar comprimido de atomização foi substituído por oxigênio nas mesmas quantidades. Os resultados aqui apresentados referem-se à condição de regime permanente de operação, utilizando a distribuição de temperatura para caracterizá-la.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Taxa de incineração

A Fig. 3 apresenta o comportamento da taxa de incineração, definida como a razão entre as vazões mássicas 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 “lentamente” 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>.

O comportamento da taxa de incineração, apresentado na Fig. 3, está atrelado à vazão mássica de ar na câmara, mais especificamente a vazão de N<sub>2</sub>. Quanto menor a quantidade de N<sub>2</sub> presente no oxidante, mais energia estará disponível para incineração, visto que a vazão de oxigênio total (O<sub>2</sub> do ar + O<sub>2</sub> injetado) não foi alterada nos ensaios. No entanto, a vazão de ar diminuiu acentuadamente até aproximadamente 50 % de O<sub>2</sub>. Deste ponto em diante, sua redução é menos acentuada e, conseqüentemente, menos energia estará disponível para aumentar a capacidade de incineração da câmara. Isso explica a eficiência do processo de enriquecimento até 50 % de O<sub>2</sub>.

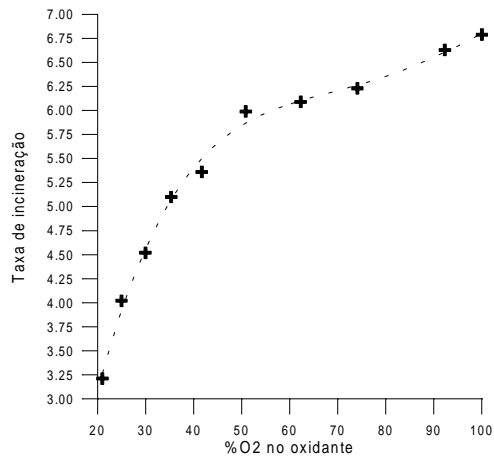


Figura 3 – Comportamento da taxa de incineração com %O<sub>2</sub> no oxidante.

A Fig. 4(a) apresenta o comportamento das vazões na câmara em função da porcentagem de oxigênio no oxidante. A Fig. 4(b) apresenta o comportamento da vazão de resíduo em função da vazão de oxigênio puro, adicionado à câmara. Percebe-se que a vazão de resíduo tem um aumento aproximadamente linear com o aumento da vazão de oxigênio adicionado. Assim, conhecendo a relação entre o aumento da capacidade de incineração e a quantidade de oxigênio adicionado em uma determinada condição de enriquecimento, pode-se estimar o aumento da capacidade de incineração em qualquer outro nível de enriquecimento. Evidentemente, para que haja coerência nesta estimativa, as condições de excesso de oxidante, temperatura na saída da câmara e poder calorífico do resíduo devem ser conservadas.

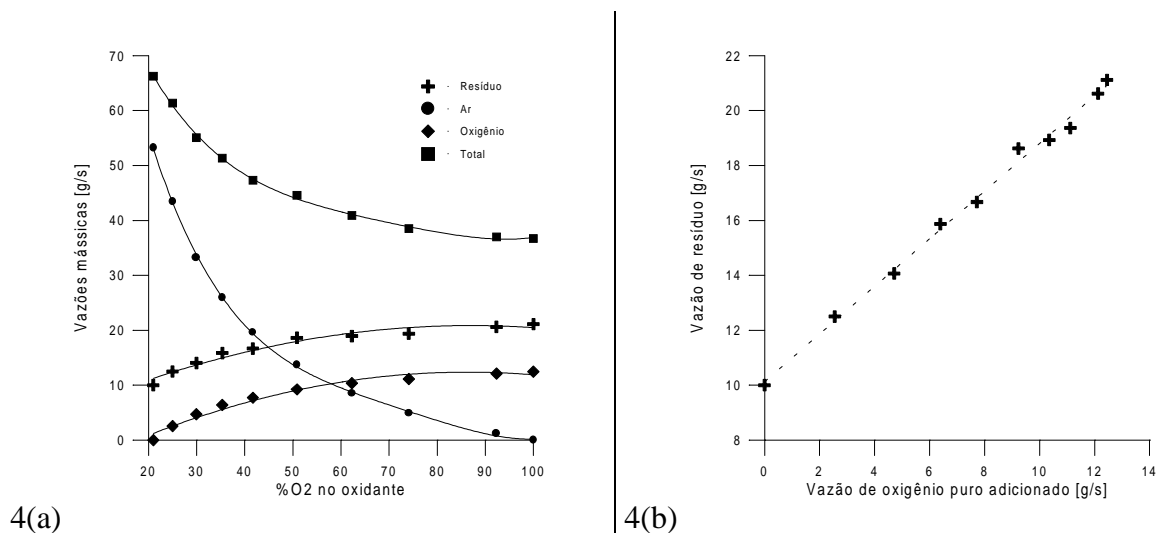


Figura 4 – (a) vazões de resíduo, ar, oxigênio e total, em função da %O<sub>2</sub> no oxidante, (b) vazão de resíduo em função da vazão de oxigênio puro injetado na câmara.

### 3.2 Emissão de gases

Em processos que fazem uso da combustão enriquecida deve-se atentar, em especial, para as emissões de NO<sub>x</sub>. O aumento da temperatura na região de chama, aliado à alta concentração de oxigênio, são os principais fatores responsáveis pelo aumento da taxa de

produção deste poluente, em ambientes de operação com chamas enriquecidas. Como a conversão do NO para NO<sub>2</sub> na atmosfera ocorre rapidamente, a Fig. 5 apresenta a emissão de NO<sub>x</sub> na saída da câmara (997 litros) através da razão entre a massa de NO<sub>2</sub> liberada para atmosfera pela massa de resíduo incinerado (mg de NO<sub>2</sub>/g de resíduo). Os resultados mostram que até o nível de enriquecimento de 35% de O<sub>2</sub>, o aumento da emissão de NO<sub>x</sub> é pouco significativo. Por outro lado, deste ponto em diante, inicia-se um aumento acentuado, atingindo o valor máximo em 50% de O<sub>2</sub>, cerca de 6 vezes o valor obtido para incineração sem enriquecimento.

Após 50% de O<sub>2</sub> a emissão mássica de NO<sub>x</sub> começa a diminuir em função da redução da concentração do N<sub>2</sub> nos gases de combustão. A taxa de formação de NO, tanto pelo mecanismo de Zeldovich como pelo de Fenimore, é fortemente dependente da temperatura e da concentração de oxigênio, sendo que as reações envolvidas no mecanismo de Zeldovich necessitam de elevadas energias de ativação (Miller e Bowman, 1989). Espera-se um comportamento exponencial para emissão de NO<sub>x</sub> com aumento da temperatura, para valores acima de 1750 K. No entanto, as temperaturas mais elevadas na câmara, obtidas pelo termopar posicionado a 0,70 m a jusante do queimador, não ultrapassaram os 1670 K. Assim, seria de se estranhar a elevada emissão de NO<sub>x</sub> para níveis de enriquecimento acima dos 35 % de O<sub>2</sub>, conforme apresenta a Fig. 5. Contudo, é importante observar que as medidas realizadas pelo termopar 2 apresentar apenas o comportamento médio de uma região onde já há uma forte presença de resíduo vaporizado, o que dificulta atrelar esses valores de temperatura à emissão de NO<sub>x</sub>. Em geral, mais NO<sub>x</sub> é formado do que o esperado, quando se leva em conta somente as temperaturas médias de algumas regiões da chama, como relatam Rink e Lefebvre (1989). A emissão de NO<sub>x</sub> em chamas de sprays está fortemente relacionada com as condições locais de mistura entre o combustível e o oxidante. Assim, mesmo que a temperatura média obtida experimentalmente, ou a temperatura de chama calculada, seja suficientemente baixa para não haver uma elevada emissão de NO<sub>x</sub>, se a distribuição da razão de equivalência, ao longo da chama e/ou dos produtos de combustão, propiciar “bolsões” onde as reações se desenrolam próximas à condição estequiométrica, a emissão de NO<sub>x</sub> será mais elevada do que o esperado (Lyons, 1982).

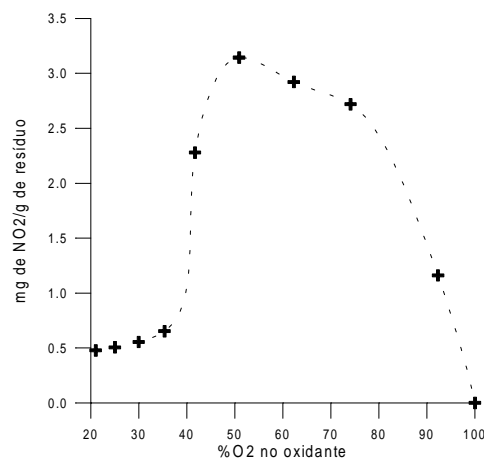


Figura 5 – Razão mg de NO<sub>2</sub>/g de resíduo, em função da % de O<sub>2</sub> no oxidante.

O grau de não uniformidade, ou a qualidade da mistura entre o combustível e o oxidante, pode ser um dos fatores responsáveis pelo comportamento da emissão de NO<sub>x</sub>. Na presente investigação experimental, não foi possível realizar medidas da distribuição de temperatura e razão de equivalência ao longo da chama. No entanto, a comparação entre as análises de O<sub>2</sub> e

CO, feitas a 227 e 997 litros (Fig. 6), ou seja, logo após a chama e na saída da câmara, nos dá uma idéia de como se processou a qualidade da mistura entre os reagentes na chama. Observa-se que, para porcentagens de  $O_2$  no oxidante inferiores a 50 %, há uma diferença significativa entre os resultados dos dois pontos de amostragem, para ambos os gases. Acima de 50 % de  $O_2$  já não há diferença entre a análise na região pós-chama e a análise na saída da câmara. Tal comportamento está atrelado à redução do comprimento de chama e à melhor eficiência na qualidade de mistura entre o oxigênio e o combustível vaporizado. Assim, os resultados indicam que a medida que a porcentagem de oxigênio no oxidante vai aumentando, maior é a capacidade de penetração do  $O_2$  no interior do spray de combustível e que, como consequência, mais rapidamente as reações químicas estão sendo finalizadas. É importante observar que apesar da qualidade da mistura na chama, a concentração de CO na saída da câmara sempre esteve próximo a zero, indicando que o tempo de residência foi suficiente, em qualquer situação, para oxidação completa do combustível (4,18 s, para 21 % de  $O_2$ , a 6,48 s, para 100 % de  $O_2$ ).

Apesar da redução do número de Reynolds com aumento do enriquecimento, decorrente da menor vazão de oxidante, a qualidade da mistura entre o combustível e o oxidante aumentou na região de chama. Alguns fatores que favorecem esta situação podem ser destacados: 1) a elevação da temperatura na região de chama aumenta a taxa de vaporização das gotas, ou seja, o combustível é vaporizado em um tempo menor, facilitando a penetração do oxidante na região central do spray; 2) o aumento da concentração de oxigênio no oxidante facilita as condições locais para o desenrolar das reações químicas; 3) a combustão enriquecida propicia uma maior concentração de espécies hidrogenadas nos gases de combustão, como, por exemplo  $H_2O$  e  $H_2$ , o que acelera consideravelmente a conversão do CO em  $CO_2$ ; e 4) com a redução do comprimento da chama, esta se distancia do spray de resíduo, evitando que o mesmo “congele” parte das reações químicas em desenvolvimento, devido à redução local de temperatura.

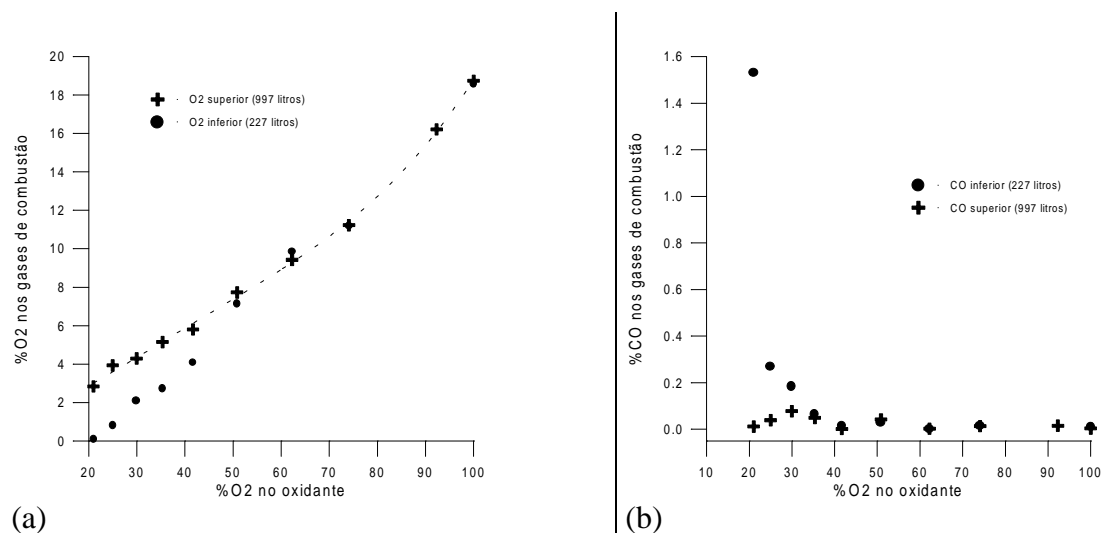


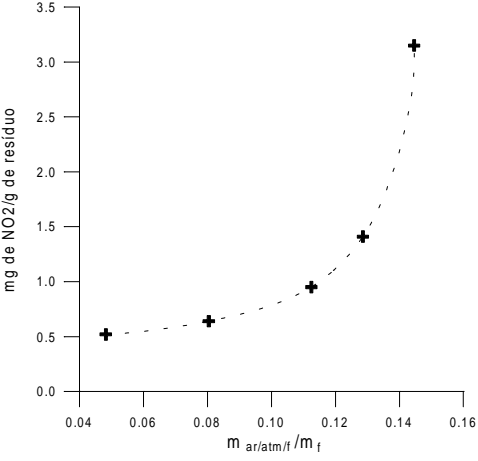
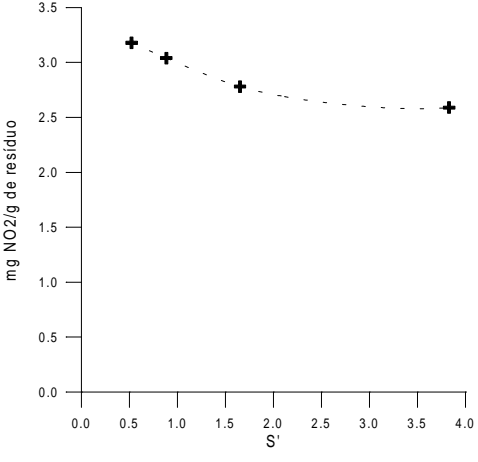
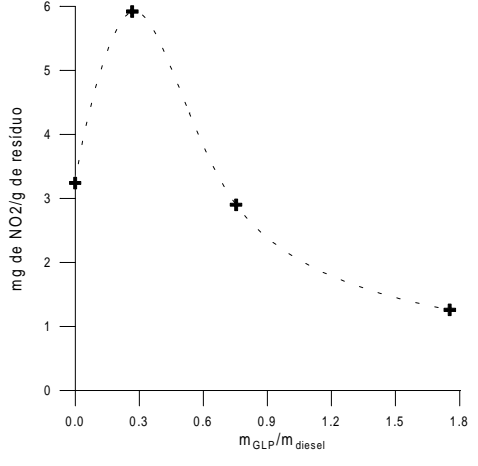
Figura 6 - Porcentagem volumétrica de  $O_2$  (a) e CO (b) nos gases de combustão em função da porcentagem de  $O_2$  no oxidante, para medidas realizadas a 227 e 997 litros.

### 3.3 Controle da emissão de $NO_x$

Os altos níveis de emissão de  $NO_x$  observados para enriquecimentos acima dos 35%, limitariam a utilização de chamas enriquecidas. No entanto, deve-se observar que apesar dos

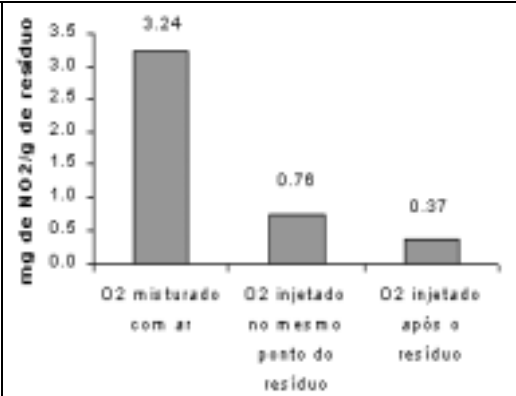
níveis elevados atingidos, diversas tecnologias conhecidas ainda podem ser empregadas para minimizar a emissão de tal poluente. A Tabela 1 destaca os resultados obtidos com o emprego de algumas delas.

Tabela 1- Técnicas e resultados obtidos para minimizar a emissão de  $\text{NO}_x$ .

<p><b>Controle através da atomização:</b> diminuindo a razão entre as vazões mássicas do ar de atomização de combustível e do combustível (<math>m_{\text{ar/atm}/f}/m_f</math>), aumenta-se o tamanho das gotas do spray, conseqüentemente também aumenta o tempo de vaporização das gotas, dificultando a penetração do oxigênio no interior do spray. Assim, a combustão ocorre predominantemente em condições ricas e em temperaturas mais baixas, favorecendo a redução da emissão de <math>\text{NO}_x</math>. Conforme o resultado apresentado para 50 % de <math>\text{O}_2</math>, a redução da (<math>m_{\text{ar/atm}/f}/m_f</math>) de 0,145 para 0,048, diminui em 6 vezes a emissão de <math>\text{NO}_x</math>, atingindo o mesmo nível da operação com ar.</p>	 <table border="1"> <caption>Dados do Gráfico 1</caption> <thead> <tr> <th><math>m_{\text{ar/atm}/f} / m_f</math></th> <th>mg de <math>\text{NO}_2</math>/g de resíduo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,048</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>0,08</td> <td>0,6</td> </tr> <tr> <td>0,11</td> <td>0,9</td> </tr> <tr> <td>0,13</td> <td>1,4</td> </tr> <tr> <td>0,145</td> <td>3,1</td> </tr> </tbody> </table>	$m_{\text{ar/atm}/f} / m_f$	mg de $\text{NO}_2$ /g de resíduo	0,048	0,5	0,08	0,6	0,11	0,9	0,13	1,4	0,145	3,1
$m_{\text{ar/atm}/f} / m_f$	mg de $\text{NO}_2$ /g de resíduo												
0,048	0,5												
0,08	0,6												
0,11	0,9												
0,13	1,4												
0,145	3,1												
<p><b>Controle do número de swirl:</b> através da modificação do ângulo entre pás do swirler do queimador, foi possível controlar a intensidade da ZRI. A medida que aumenta-se o ângulo entre pás, intensifica-se a ZRI, quantificada pelo número de swirl (<math>S'</math>). Assim, as gotas do spray com pequenos diâmetros e o combustível já vaporizado vão sendo confinados na ZRI, caracterizando uma região de combustão rica (Ballester e Dopazo, 1994). O resultado apresentado para 50 % de <math>\text{O}_2</math> mostra que o aumento de <math>S'</math> causa apenas uma sensível redução na emissão de <math>\text{NO}_x</math>, no entanto, pode facilitar o emprego de uma segunda tecnologia de redução.</p>	 <table border="1"> <caption>Dados do Gráfico 2</caption> <thead> <tr> <th><math>S'</math></th> <th>mg de <math>\text{NO}_2</math>/g de resíduo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,5</td> <td>3,2</td> </tr> <tr> <td>1,0</td> <td>3,0</td> </tr> <tr> <td>1,5</td> <td>2,8</td> </tr> <tr> <td>2,0</td> <td>2,7</td> </tr> <tr> <td>3,5</td> <td>2,6</td> </tr> </tbody> </table>	$S'$	mg de $\text{NO}_2$ /g de resíduo	0,5	3,2	1,0	3,0	1,5	2,8	2,0	2,7	3,5	2,6
$S'$	mg de $\text{NO}_2$ /g de resíduo												
0,5	3,2												
1,0	3,0												
1,5	2,8												
2,0	2,7												
3,5	2,6												
<p><b>Combustão com combustível estagiado:</b> injetando parte do combustível após o ponto de injeção de resíduo, cria-se uma região primária pobre em combustível e uma região secundária onde a combustão final se processa em temperaturas mais baixas. O resultado apresentado é para 44 % de <math>\text{O}_2</math> e 30 % de excesso de oxidante, sendo utilizado GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) como combustível para região secundária. Este tipo de estratégia deve ser cuidadosamente empregada, pois é eficiente para situações onde o excesso de oxidante na região primária é extremamente elevado, caso contrário pode aumentar a emissão de <math>\text{NO}_x</math>, vide os resultados.</p>	 <table border="1"> <caption>Dados do Gráfico 3</caption> <thead> <tr> <th><math>m_{\text{GLP}}/m_{\text{diesel}}</math></th> <th>mg de <math>\text{NO}_2</math>/g de resíduo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,0</td> <td>3,2</td> </tr> <tr> <td>0,3</td> <td>5,8</td> </tr> <tr> <td>0,7</td> <td>2,9</td> </tr> <tr> <td>1,7</td> <td>1,2</td> </tr> </tbody> </table>	$m_{\text{GLP}}/m_{\text{diesel}}$	mg de $\text{NO}_2$ /g de resíduo	0,0	3,2	0,3	5,8	0,7	2,9	1,7	1,2		
$m_{\text{GLP}}/m_{\text{diesel}}$	mg de $\text{NO}_2$ /g de resíduo												
0,0	3,2												
0,3	5,8												
0,7	2,9												
1,7	1,2												



**Combustão com oxidante estagiado:** neste caso, uma parte do oxidante é injetado diretamente na região primária da câmara, propiciando uma combustão rica em combustível. A outra parte é injetada posteriormente, completando as reações de oxidação, sem elevar demasiadamente a temperatura. A combinação que melhor minimizou a emissão de  $\text{NO}_x$ , foi injetar o ar na região primária e posteriormente o oxigênio, sendo que o menor valor ocorre quando este último é injetado após o resíduo, conforme os resultados apresentados para 44 % de  $\text{O}_2$  e 30 % de excesso de oxidante.



Para todas os ensaios correspondentes aos resultados apresentados na Tabela 1, a emissão de CO em base seca sempre esteve abaixo de 0,02 % em volume na saída da câmara, indicando que as técnicas empregadas não alteraram a eficiência global do processo de combustão. É importante observar que o tempo de residência da câmara sempre foi relativamente alto (entre 4,0 seg e 6,5 seg). Para uma câmara com baixos tempos de residência, é possível que o emprego de tais técnicas possam aumentar a emissão de CO, pois elas estão relacionadas com as razões de equivalência locais.

Mesmo passando a operar nas condições apresentadas na Tabela 1 a temperatura na saída da câmara foi mantida em 1030 K e não houve alteração nas taxas de incineração em relação às condições onde não há o emprego de nenhuma das técnicas de redução de  $\text{NO}_x$ .

#### 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma investigação experimental sobre o enriquecimento do ar oxidante de uma câmara de combustão laboratorial projetada para incinerar resíduos líquidos aquosos utilizando diesel como combustível e ar como oxidante. O teor de oxigênio no oxidante foi variado desde os 21 % do ar atmosférico até 100 %, ou seja, combustão com oxigênio puro. Os resultados mostraram que o processo de enriquecimento é bastante eficiente para aumentar a capacidade de incineração até aproximadamente 50 % de  $\text{O}_2$  no oxidante. Deste ponto em diante, o enriquecimento contribui muito pouco para aumentar a taxa de incineração. Este comportamento está atrelado ao fato da redução de nitrogênio no oxidante ser acentuada até os 50 % de  $\text{O}_2$ , acima deste ponto a redução vai ocorrendo mais lentamente.

As análises dos gases produtos de combustão mostraram que a emissão de  $\text{NO}_x$  é um parâmetro importante a ser analisado quando se pretende empregar o enriquecimento do oxidante. Acima de 35 % de  $\text{O}_2$ , observou-se que há uma intensificação da mistura entre os reagentes, o que propicia condições favoráveis para a formação de NO. Para valores de enriquecimento superiores a 50 % de  $\text{O}_2$ , a emissão de  $\text{NO}_x$  começa a diminuir, mas ainda permanecendo em valores elevados. Finalmente, em 100 % de  $\text{O}_2$  nenhum  $\text{NO}_x$  é observado, pois não há mais  $\text{N}_2$  presente no oxidante.

Assim, levando em conta os fatores ambientais, o aumento da taxa de incineração estaria limitado a baixos níveis de enriquecimento (> 35 % de  $\text{O}_2$ ). No entanto, o presente trabalho apresentou uma breve discussão sobre o emprego de algumas técnicas utilizadas em processos convencionais, para reduzir a formação de NO em situações de elevado nível de enriquecimento. Os resultados mostraram que o ajuste de alguns parâmetros de funcionamento do queimador, como as condições de atomização e a estrutura da ZRI, podem contribuir significativamente para minimizar a emissão de  $\text{NO}_x$ , conseguindo chegar a valores

próximos à operação com ar. Também observou-se que a injeção estagiada de combustível ou oxidante pode contribuir para diminuir a emissão deste poluente. No entanto, deve-se atentar para as razões de equivalência nas regiões primária e secundária, pois, em determinadas circunstâncias a combustão estagiada pode aumentar a emissão de  $\text{NO}_x$ .

Em última análise, o enriquecimento do oxidante é uma tecnologia promissora para incineração de resíduos aquosos, pois permite mais que dobrar a capacidade de incineração da câmara. No entanto, é um assunto que ainda deve ser alvo de diversas pesquisas e desenvolvimento tecnológicos.

### ***Agradecimentos***

Este trabalho teve o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, através da bolsa de doutorado 95/4167-7 e do auxílio à pesquisa 97/5511-9, além do apoio do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão – INPE de Cachoeira Paulista.

### **REFERÊNCIAS**

- Ballester, J.M., Dopazo, C., 1994, Experimental Study of the Influence of Atomization Characteristic on Combustion of Heavy Oil, Comb. Sci. and Tech., 103, 235-263.
- Couto, H.S., Muniz, W.F., Bastos-Netto, 1995, Geometrical Parameters for Flows Across Axial Swirlers, Proc. 3<sup>rd</sup> Asian-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Hong Kong, 255-260.
- Gitman, G., 1986, Pyretron, a Variable Gas/Oxygen/Air Combustion System, Proc. Industrial Combustion Technology, Chicago, Il, 171-178.
- Griffith, C.R., 1990, Diverse Experience Using Oxygen Systems in Waste Incineration, presented at the Fourth Annual National Symposium on Incineration of Industrial Wastes, Houston, Texas.
- Lawn, C. J., 1987, Principles of Combustion Engineering for Boilers, New York, NY, Academic Press.
- Lyons, V.J., 1982, Fuel/Air Nonuniformity – Effect on Nitric Oxide Emissions, AIAA Journal, 20(5), 660-665.
- Melo, G.F., Lacava, P. T., Carvalho Jr., J.A., 1998, A Case Study of Air Enrichment in Rotary Kiln Incineration, International Comm. in Heat and Mass Transfer, 25(5),681-692.
- Miller, J.A., Bowman, C.T., 1989, Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion, Prog. Energy Combust. Sci., 15, 287-338.
- Rink, K.K., Lefebvre, A.H., 1989, The Influences of Fuel Composition and Spray Characteristics on Nitric Oxide Formation, Combust. Sci. and Tech., 68, 1-14.
- Shahani, G.H., Gunardson, H.H., Easterbrook, N. C., 1996, Consider Oxygen for Hydrocarbon Oxidations, Chemical Engineering Progress, 66-71.

**Summary.** *The use of oxygen to enrich the oxidizer can be an attractive alternate to increase incineration rates of a combustion chamber originally designed to operate with air. For a certain fuel flow rate, if some incineration parameters are held constant (as combustion chamber temperature, turbulence level and residence time), an increase of incineration rates becomes possible with injection of oxygen. This work presents an experimental evaluation of combustion air enrichment in a combustion chamber designed to incinerate aqueous residues using diesel as fuel and air as oxidizer.*

**Key-words:** *Combustion, Incineration, Enriched Flames, Pollutant Emissions.*