

# APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA “DOC” (*Dilute Oxygen Combustion*) EM FORNOS DE REAQUECIMENTO DE AÇO<sup>(1)</sup>

Abílio Tasca (2)  
William Kobayashi (3)  
Ricardo Bastos (4)  
Ismar Sardinha (5)

## Resumo

A tecnologia "*Diluted Oxygen Combustion*" utiliza o conceito de introduzir jatos separados de alta velocidade, de oxigênio e combustível, na câmara de combustão de um forno para promover a combustão entre o combustível e o comburente formado pela mistura de gases do forno e oxigênio injetado. Estes queimadores de ultra baixa taxa de emissão de NOx têm sido aplicado comercialmente em fornos de reaquecimento de aço. A tecnologia “DOC” reduz sensivelmente as taxas de emissão de NOx, na relação de 10:1. Numa câmara de combustão que opera a temperaturas ao redor de 1200 °C, com teor de oxigênio de 2% (base úmida) nos gases de combustão, a emissão de NOx medida com queimador “DOC” é equivalente a 1 ppm de um queimador a ar convencional. A tecnologia "DOC" em fornos de reaquecimento de aço proporciona redução de custos operacionais através da redução de consumo específico de combustível de até 50%, aumento de taxa de produção de até 40% e baixíssimas taxas de emissão de poluentes.

**Palavras-chave:** Oxigênio; Combustão; Reaquecimento; Aço.

<sup>1</sup> Trabalho apresentado no 60º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, MG, Julho 2005

<sup>2</sup> Gerente de Desenvolvimento de Aplicações, White Martins Gases Industriais Ltda., Diadema-SP

<sup>3</sup> Global Applications Transfer and Market Development Manager, Praxair, Inc., Tonawanda-NY

<sup>4</sup> Diretor, Praxair Metals Technology, Rio de Janeiro-RJ

<sup>5</sup> Gerente de Negócios, Praxair Metals Technology, Contagem-MG

## QUEIMADORES OXI-COMBUSTÍVEL E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Queimadores oxí-combustível tradicionais geram chamas radiantes e de alta temperatura. Quando se iniciaram as primeiras discussões de aplicações de processo 100% oxí-combustão em fornos de reaquecimento de aço, no final dos anos 70 como ferramenta para a redução do consumo específico de combustível, a grande preocupação levantada foi não encontrar uniformidade no aquecimento. As chamas radiantes geradas pelos queimadores oxí-combustíveis foram consideradas danosas ao processo e ao revestimento refratário do forno. Um novo tipo de queimador oxí-combustível, o Queimador Praxair tipo “A” (Aspirado), foi desenvolvido para promover chamas de alta quantidade de movimento e baixa temperatura, semelhantes as chamas a ar [1,2]. Este queimador foi comercializado com sucesso em vários fornos industriais. Excelente uniformidade de temperatura e baixíssimas taxas de emissão de  $\text{NO}_x$  foram alcançadas. O princípio fundamental do projeto do Queimador “A” foi a de promover aspiração dos gases do forno pelo uso de jatos de alta velocidade de oxigênio, resultando em intensa recirculação de tal forma a gerar composições próximas aos obtidos com combustão a ar antes de promover a mistura do comburente com o combustível. Apesar da recirculação dos gases do forno (RGF) ter se tornado um método comum para projetar queimadores de baixas taxas de emissão de  $\text{NO}_x$ , isto foi um conceito inovador para aquela época.

O Queimador tipo “A” foi projetado com refrigeração a água para proteger seus componentes do calor intenso do forno. A condensação de espécies voláteis sobre a superfície camisa d’água do queimador foi observada em alguns fornos usando gás de coqueria, o que reduzia a vida útil do queimador devido à corrosão. O queimador “SJ” (*Stabilized Jet Burner*) [3] foi desenvolvido para solucionar o problema da condensação e para aumentar a flexibilidade em alterar o formato da chama. O Queimador “SJ” tem sido usado com sucesso em fornos poços e de reaquecimento utilizando gás de coqueria como combustível. No final dos anos 80, a Praxair desenvolveu o queimador, o tipo “R” (*Recessed*), sem refrigeração a água. O queimador “R” utiliza bocais metálicos instalados recuados dentro de uma cavidade de refratária. A mistura do combustível com o oxigênio dentro da cavidade do bloco refratário é minimizada através de efeitos aerodinâmicos para prevenir o sobre aquecimento do bloco refratário. Recesso de bocais metálicos são também aplicados em outros projetos de queimadores não refrigerados com água, incluindo os queimadores “JL” utilizados para implementar o “*Dilute Oxygen Combustion*” (“DOC”).

A eficiência na transferência de calor é um dos fatores importantes a ser considerado tanto para o projeto do queimador como para o do forno. Chamas de alta temperatura e de intensa luminosidade, geralmente, acentuam a transferência de calor devido à maior radiação da chama. Um erro comum na interpretação é que altas eficiências térmicas atingidas pela oxí-combustão são devidas a chamas de altas temperaturas, e que reduzindo a temperatura de chama resultaria numa menor eficiência térmica do processo. Estudos [3] e experiências mostram que a eficiência térmica global de um forno operado com oxí-combustão é insensível ao tipo de chama oxí-combustível desenvolvida. A causa está no efeito da transferência de calor e no calor perdido nos gases de exaustão. Uma redução na transferência de calor para a carga do forno resulta no aumento da temperatura dos gases de

exaustão e aumento do calor sensível perdido pelos gases de exaustão. Como o volume de fumos num forno operado com oxi-combustão é reduzido, em até 70% comparado a um forno operado com ar, um aumento na temperatura dos gases de exaustão causa apenas pequena perda através do calor sensível associado aos gases de exaustão. Por outro lado, uma relativamente pequena elevação na temperatura dos gases no interior do forno acarreta uma acentuada elevação na transferência de calor dos gases para a carga, devido à forte dependência da transferência de calor por radiação com a temperatura. Assim, qualquer perda em transferência de calor de uma chama oxi-combustível de mais baixa temperatura é, naturalmente, compensada pela elevação da taxa de transferência de calor dos gases para a carga causada pela pequena elevação da temperatura dos gases do forno. De fato, a combustão com oxigênio é inerentemente eficiente em transferência de calor devido as altas concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  na atmosfera do forno e muito maior tempo de residência dos gases, ambos intensificando a transferência por radiação.

### TECNOLOGIA “DILUTE OXYGEN COMBUSTION”

Considera-se um sistema de combustão ideal um reator homogêneo no qual a temperatura do forno e concentração de espécies químicas são uniformes no seu interior. Emissões muito baixas de  $\text{NO}_x$  e aquecimento uniforme podem ser obtidos neste sistema. A Praxair desenvolveu a tecnologia “*Dilute Oxygen Combustion*” no final anos 80 para produzir condições de combustão próximas à de um reator homogêneo. O conceito deste sistema único de combustão é apresentado na Figura 1 [4]. O conceito básico é promover a reação entre combustível e uma atmosfera oxidante diluída e aquecida, contendo de 2% a 10% de oxigênio para gerar chama de baixa temperatura na “zona de reação”. Oxigênio ou ar é injetado dentro do forno, separadamente do jato de combustível, para gerar a “atmosfera oxidante aquecida e diluída” através da aspiração dos gases da atmosfera do forno na “zona de mistura”. A “zona de reação” e a “zona de mistura” são segregadas dentro do forno para evitar a mistura direta que resultaria na combustão de oxidante não diluído e combustível. Equipamentos, para compor um ou mais pares de jatos oxidante e combustível, são instalados nas paredes do forno para criar os perfis de recirculação de gases no interior do forno que promovem a diluição do oxidante e boa mistura com o combustível. Neste processo é necessário que a temperatura dos gases no interior do forno estejam acima de  $760\text{ }^\circ\text{C}$  ( $1400\text{ }^\circ\text{F}$ ) para garantir a estabilidade de chama.

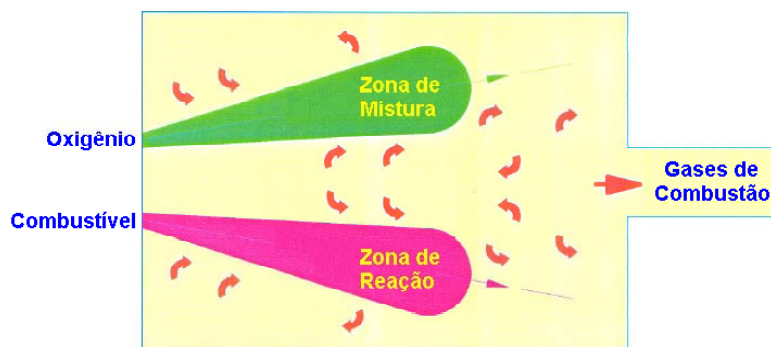


Figura 1. Conceito da Tecnologia “*Dilute Oxygen Combustion*”.

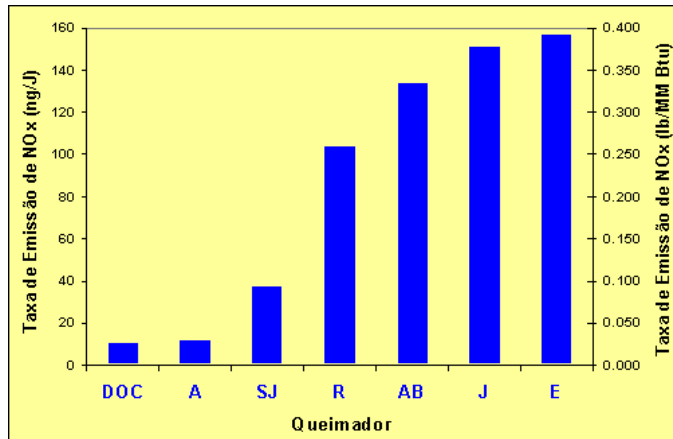
## EMISSÕES DE NOx

A formação de NOx na combustão de gás natural ocorre, principalmente, nas regiões de alta temperatura da chama pelo mecanismo de Zeldovich (“NOx Térmico”) e é função dos seguintes parâmetros: temperatura de chama, concentração de oxigênio e concentração de nitrogênio. O parâmetro mais importante é a temperatura de chama já que a formação de NOx é fortemente dependente da temperatura. Queimadores de baixo NOx operados com ar ou com oxigênio são projetados para reduzir a temperatura de chama por: diluição com outros gases (ex.: recirculação de gases do forno); resfriamento convectivo por um trocador de calor (ex.: chamas direcionadas para a carga); resfriamento radiativo (ex.: chama de alta luminosidade). Minimizando o excesso de oxigênio ou operando um queimador com relação sub-estequiométrica, também, reduz a formação de NOx significativamente. Na combustão com ar, um pequeno aumento no excesso de ar tende a elevar a formação de NOx devido à maior concentração de oxigênio na chama. Em níveis de excessos de ar elevados, entretanto, o efeito de redução de temperatura pelo excesso de ar tende a ser mais relevante e reduzir as emissões de NOx. Na combustão com oxigênio, elevando a concentração de excesso de oxigênio eleva-se a formação de NOx já que o efeito de redução da temperatura da chama é praticamente insensível, a menos que se utilize uma enorme quantidade de oxigênio como diluente. A concentração de nitrogênio na atmosfera do forno é de cerca de 70% com a combustão com ar e não varia significativamente. Entretanto, ela tem forte influência quando a combustão é realizada com oxigênio puro como será discutido adiante.

A Figura 2 apresenta as emissões de NOx de diferentes tipos de queimadores da Praxair, medidas em forno laboratorial a 1535 °C (2800 °F) e concentração de nitrogênio de 7% em base seca. Os queimadores tipo “DOC” e “A” são os que geram mais baixas emissões de NOx devido à alta recirculação de gases do forno para reduzir a temperatura de chama para 150 °C a 300 °C (300 °F a 500 °F) acima temperatura do forno. Em contraste, os queimadores tipo “AB”, “J”, e “E” são projetados para produzir chamas oxicombustível com temperatura adiabática de chama mais elevadas. Esta grande diferença em temperatura de chama faz com que as emissões de NOx dos queimadores “DOC” e “A” sejam de cerca de 1/10 para 1/20 daquelas obtidas com queimadores oxicombustível de alta temperatura de chama. A diferença em emissão de NOx entre diferentes queimadores oxicombustível tendem a ser maiores em fornos de mais baixa temperatura. Torna-se evidente que o projeto do queimador é um fator importante para alcançar baixas emissões de NOx.

No experimento relatado acima, a concentração de nitrogênio no forno de teste foi controlada para estar em 7%, base úmida, pela introdução controlada de nitrogênio pela parede lateral do forno para simular a condição infiltrações de ar que, normalmente, ocorrem em fornos industriais. A maioria dos fornos industriais operam com pressões internas próximas da pressão atmosférica e, normalmente, experimentam uma significativa infiltração de ar ambiente. No mecanismo de formação de NOx térmico de Zeldovich, a taxa de formação de NOx é proporcional a concentração de nitrogênio. Por exemplo, se a concentração de nitrogênio é reduzida para 7% com combustão com oxigênio e a temperatura de chama mantida constante, isto resultaria a formação de NOx em 10 vezes do nível de uma chama

com ar. Como o queimador “DOC” produz temperaturas de chama abaixo daquelas de queimadores típicos operados com ar, o efeito combinado menor temperatura de chama e baixa concentração de nitrogênio resulta em ultra baixas emissões de NOx, abaixo de 1 ppm equivalente a uma combustão com ar.



**Figura 2.** Comparação da taxa de emissão de NOx de diversos queimadores a 1535 °C (2800 °F) com 7% de nitrogênio e 2% de oxigênio – base úmida.

## APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA “DOC” NA INDÚSTRIA DO AÇO

O reaquecimento de aço é um importante mercado para a tecnologia “DOC” por duas razões:

- (i) A indústria do aço é uma das maiores consumidoras de energia sendo o reaquecimento um dos maiores utilizadores de energia. De acordo com as estatísticas da *American Iron & Steel Institute* (AISI), a indústria siderúrgica consumiu  $2,86 \times 10^8$  GJ ( $2,71 \times 10^5$  GBtu) de gás natural e gás de coqueria para aquecimento e recozimento em 1999 [5].
- (ii) Processos de refino do aço são os maiores consumidores de oxigênio industrial e a maioria das siderúrgicas são supridas com plantas de separação do ar *on-site* ou por gasodutos de grande capacidade. A AISI reportou um consumo de oxigênio de  $11 \times 10^6$  t ( $12 \times 10^6$  st) de oxigênio em 1999 [5]. Assim, a familiaridade da indústria com o uso de oxigênio e a disponibilidade de oxigênio a relativamente custo reduzido são esperados para facilitar a aplicação do sistema “DOC” em fornos de reaquecimento de aço.

Os três principais parâmetros a serem considerado em processos de reaquecimento de aço são: produtividade, consumo de combustível e emissões. A importância relativa de cada questão varia com o tipo de forno de reaquecimento.

Produtividade é a principal questão para grandes fornos contínuos. O aço percorre esses fornos continuamente em contra corrente com o fluxo de gases de combustão do forno. Fornos contínuos modernos possuem uma longa zona sem queima na região de alimentação da carga na qual o calor sensível contido nos gases de combustão é utilizado para aquecer o aço frio que adentra o forno. Nesta zona, a

temperatura dos gases pode ser baixa como 820 °C (1500 °F), elevando significativamente a eficiência do combustível na operação.

Devido à eficiência térmica, estes fornos representam a grande maioria do mercado de reaquecimento de aço. A habilidade em elevar a produtividade destes fornos com um mínimo custo de capital pode aumentar sensivelmente a flexibilidade e a rentabilidade. Sistemas de oxicombustão, como o “DOC” podem promover aumento na capacidade térmica sem significativo aumento no volume de gases de combustão, permitindo elevar a taxa de produção sem significativo investimento em forno ou na construção de estruturas ou alterações no sistema de gases de exaustão.

Economia de combustível é a primeira questão para pequenos fornos intermitentes, tipo *batch*. Estes fornos geralmente tem um formato de uma caixa alongada, tipicamente com 15 m de comprimento, 6 m de largura e 3 m de altura interna (50 ft x 20 ft x 10 ft). O aço é carregado e retirado através de uma das extremidades ao longo do eixo longitudinal do forno. As temperaturas do forno e dos produtos de combustão estão tipicamente na faixa de 1200 °C a 1350 °C (2200 °F a 2450 °F). As altas temperaturas dos gases de combustão acarretam baixa eficiência térmica nestes fornos. Substituindo os queimadores a ar por queimadores oxicombustível, economia do consumo específico de combustível de 50% a 60% é obtida devido à significativa redução do nitrogênio proveniente do ar.

As emissões de NOx estão se tornando uma questão importante para fornos de reaquecimento de aço. Enquanto que os incentivos monetários, como *Emission Reduction Credits (ERCs)*, não são normalmente aplicadas a áreas de produção de aço, todos os produtores de aço encontram algum nível de legislação ambiental a se enquadrar. Reduzindo os níveis de NOx poderão ser vislumbradas maior flexibilidade para aumento de produção, expansão e atualização de equipamentos.

## **DADOS DA PERFORMANCE DO QUEIMADOR "DOC"**

### **Testes em Escala Laboratorial**

Quando um forno é parcialmente convertido para oxicombustão, por exemplo, pela instalação de queimadores oxicombustível na zona de pré-aquecimento de um forno contínuo de reaquecimento de aço, é difícil atingir baixos níveis de emissões de NOx. Grande quantidade de produtos de combustão dos queimadores operados com ar fluem para a zona equipada com queimadores oxi-combustível e suas chamas interagem com a atmosfera do forno que contém altas concentrações de nitrogênio. Para simular uma condição como esta, uma série de testes laboratoriais foram conduzidos. Os testes foram realizados num forno de geometria cilíndrica (diâmetro interno de 0,91 m [3 ft] e comprimento de 3,2 m [19,5ft]) a potência constante de 188 kW (0,64 MMBtu/h). A temperatura da parede refratária do forno variou entre 900 °C e 1260 °C (1650 °F a 2300 °F). A concentração de nitrogênio no forno foi controlada pela injeção de nitrogênio por diversas aberturas na parede lateral. Os detalhes deste teste podem ser encontrado nas referências [6,7].

## Testes em Escala Comercial

Duas implantações da tecnologia “DOC” ocorreram nos últimos anos. Na Nucor Steel Auburn, Inc., Auburn, NY, os queimadores “DOC” foram instalados na zonas de pré-aquecimento de forno contínuo de reaquecimento para atingir 30% de aumento de produção sem elevar a taxa de emissão de NOx. Na Bethlehem Steel Co., Burns Harbor, IN, um forno não contínuo de reaquecimento foi convertido com queimadores “DOC” para atingir 60% de redução no consumo de combustível e redução das taxas de emissão de NOx. Nestas duas instalações foram demonstradas uma grande variedade de práticas de operação de fornos e permitiu que diversos efeitos dos parâmetros operacionais sobre a performance do “DOC” relativo a NOx fossem medidos. Detalhes de ambas demonstrações podem ser encontrados nas referências [8] e [9]; um sumário dos pontos relevantes destas referências são fornecidos abaixo.

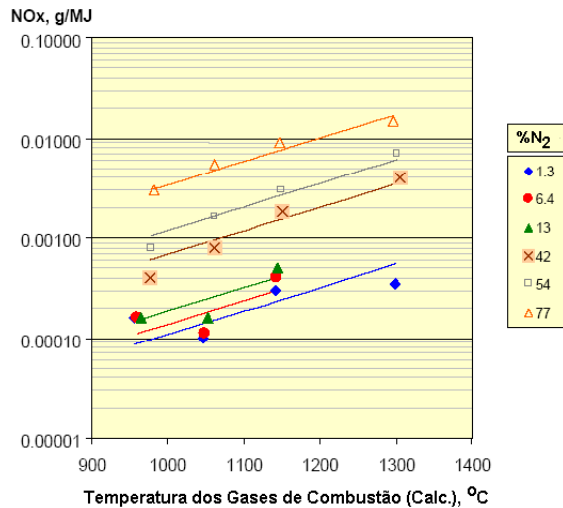
Na Nucor Steel Auburn, Inc., os queimadores “DOC” foram instalados próximo à zona de carregamento do forno para propiciar um rápido aquecimento inicial do aço. Oito queimadores “DOC” foram adicionados para a condição operacional prevista em projeto de 16.4 MW (56 MMBtu/h). Como o aço e os gases de combustão fluem em contra corrente, os produtos da combustão dos queimadores a ar de outras zonas fluem para a zona de combustão dos queimadores “DOC”. Como resultado, apesar dos queimadores “DOC” operarem com oxícombustão, a zona onde os queimadores “DOC” estão instalados sofreram a interferência de uma atmosfera com altas concentrações de nitrogênio. As temperaturas dos gases do forno são elevadas para propiciar altas taxas de transferência de calor necessárias para aumentar a taxa de produção do forno. Estes testes provaram a performance esperada da tecnologia “DOC” numa condição crítica para um forno de reaquecimento de aço.

Na Bethlehem Steel, os queimadores existentes foram todos substituídos por queimadores “DOC” modificados para a capacidade total de 7,3 MW (25 MMBtu/h). Como mencionado anteriormente, num forno intermitente, as portas de carregamento são muito grandes. Devido à potencialidade do ar que se infiltra no forno através de frestas poderem causar instabilidade nos queimadores “DOC”, os queimadores “DOC” foram equipados com um pequeno fluxo de oxigênio anular ao jato de combustível para assegurar estabilidade. Nestes queimadores “DOC” estabilizados, 15% do oxigênio foi fornecido através da seção anular de estabilização. Os testes na Bethlehem também permitiram a comparação de geração de NOx com gás natural e com gás de coqueria. Devido às frestas em torno das portas, os testes na Bethlehem tiveram níveis moderados de nitrogênio nos gases do interior do forno.

## ANÁLISE DA PERFORMANCE DOS QUEIMADORES “DOC” EM TAXA DE EMISSÃO DE NOx

A Figura 3 apresenta os resultados medidos de emissão de NOx nos testes de laboratório para queimadores “DOC” em função do nível de concentração de nitrogênio e temperatura calculada dos gases no interior do forno. A temperatura dos gases no interior do forno foi calculada pela medida da temperatura da parede interna do forno usando o modelo de transferência de calor com dois sorvedouros

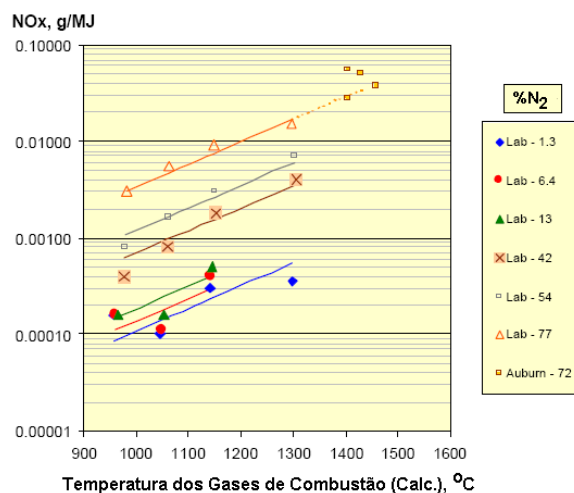
não intercalados (“*Two Sink, Non Speckled*”). A Figura 3 sugere uma relação exponencial entre NOx e ambos temperatura e concentração de nitrogênio. Um aumento na temperatura de 100 °C gera aumento da taxa de emissão de NOx de cerca de 75%, enquanto que elevando em 10% a concentração de nitrogênio no interior do forno gera aumento da taxa de emissão de NOx da ordem de 60%.



**Figura 3.** Teste em escala laboratorial - Emissão de NOx em função da concentração de nitrogênio e temperatura calculada dos gases no forno.

### Efeito do Fator de Escala do Queimador

A Figura 4 compara os dados de teste realizados em laboratório com os obtidos nos testes na Nucor Steel Auburn, Inc.. Dados de ambas medições representam operação de “DOC” com altas concentrações de nitrogênio, mas em diferentes ordens de grandeza no que se refere à potência dos queimadores. A Figura 4 ilustra que o fator de escala do queimador tem pouco efeito na taxa de emissão de NOx comparada com a temperatura de gases do forno.

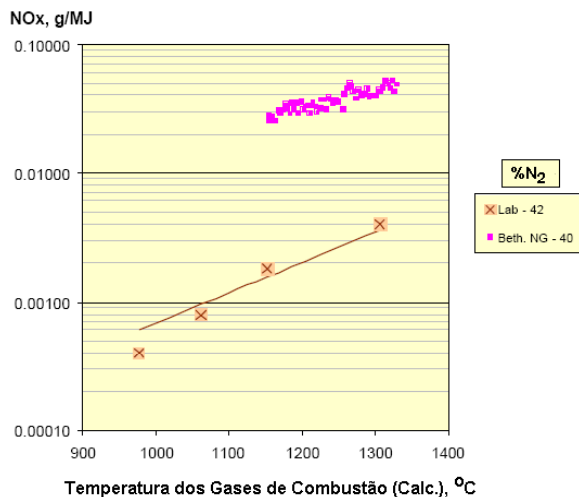


**Figura 4.** Comparação dados de NOx entre queimador em escala laboratorial e do queimador em escala comercial (Auburn Steel).



### Efeito do Oxigênio de Estabilização (Estagiamento do Queimador)

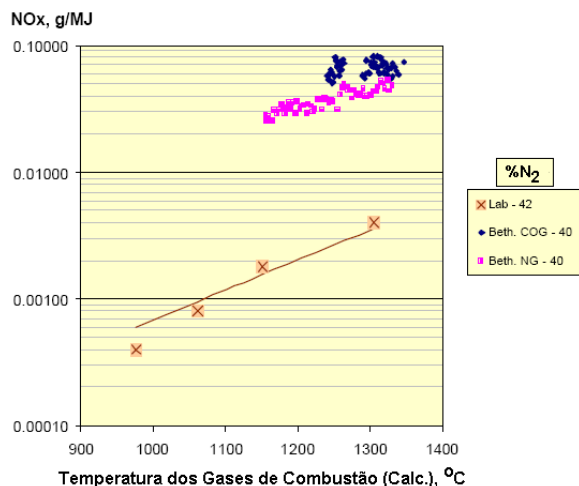
A Figura 5 compara os dados de taxa de emissão de NOx medidas em forno de laboratório com as medições efetuadas na Bethlehem Steel. Ambos os dados representam a queima com gás natural. Entretanto, os dados da Bethlehem Steel são de queimadores com potência uma ordem de grandeza superior e com 15% de oxigênio usado para estabilizar a ignição. A operação estabilizada representa uma forma de combustão estagiada, i.e., 85% de oxigênio estagiado comparado com 100% de estagiamento no caso do "DOC". Como esperado, isto levou a níveis de NOx em uma ordem de grandeza. O efeito de temperatura é o mesmo em ambos os casos.



**Figura 5.** Comparação da taxa de emissão de NOx do queimador testado em laboratório com 100% de estagiamento, com medições em escala industrial (Bethlehem Steel).

### Efeito do Combustível

A Figura 6 compara os dados da Figura 3 com os dados da Bethlehem Steel onde gás de coqueria foi utilizado como combustível. A composição do gás de coqueria é fornecida na Tabela 1. A taxa de emissão de NOx é da ordem de 50% superior com gás de coqueria comparado com gás natural. Isto é consistente com os dados publicados [10] o qual conclui que a formação de NOx com gás de coqueria é maior devido a temperatura adiabática de chama mais elevada.



**Figura 6.** Comparação dos dados de gás natural e de gás de coqueria na taxa de emissão de NOx.

**Tabela 1.** Composição do Gás de Coqueria

Componente	% Volume	Componente	% volume
Hidrogênio	57,1	Propano	0,031
Dióxido de Carbono	1,06	Propeno	0,175
Eteno	2,43	Propadieno	0,003
Etano	0,88	Propino	0,008
Oxigênio/Argônio	0,68	Butano	0,005
Nitrogênio	5,39	Buteno	0,020
Metano	26,5	Butadieno	0,023
Monóxido de Carbono	4,64	Hexano +	0,465
Etileno	0,084	Sulfeto de Hidrogênio	0,49
		Sulfeto de Carnolia	0,003

## CONCLUSÕES

A Tecnologia “*Dilute Oxygen Combustion*” foi desenvolvida e comercialmente implantada em fornos contínuos e não contínuos de aquecimento de aço. A performance da tecnologia “*DOC*” foi medida sob uma série de condições em laboratório e em escala industrial. Emissão de NOx equivalente a 1 ppm de um queimador a ar pode ser atingida a 1200 °C (2200 °F) num forno cuja atmosfera interna contendo 7% de nitrogênio base úmida e 2% de excesso de oxigênio. Tanto a temperatura como a concentração de nitrogênio mostram uma relação exponencial com a taxa de emissão de NOx, com 100 °C de elevação na temperatura causando 75% de aumento da taxa de emissão de NOx; e que 10% de aumento na concentração de nitrogênio na atmosfera do forno causando 60% de aumento na taxa de emissão de NOx. Gás de coqueria gera taxa de emissão de NOx cerca de 50% acima do que o gás natural. A utilização de 15% de fluxo de oxigênio para estabilização leva a um aumento de 10 vezes na concentração de NOx.

## Agradecimentos

O projeto da Nucor Steel Auburn, Inc. foi conduzido sob o U.S. Department of Energy (DOE) Cooperative Agreement DE-FC07-95ID13331. O projeto da Bethlehem Steel foi conduzido sob o Grant Agreement SE-012 do Estado de Indiana através do Indiana Department of Commerce, Energy Policy Division and the NICE<sup>3</sup> (National Industrial Competitiveness through Energy, Environment and Economics) Programs do Department of Energy, Office of Industrial Technologies. Entretanto, qualquer opinião, observação, conclusão, ou recomendação expressa aqui são aquelas dos autores e não necessariamente reflete a visão do DOE ou do Indiana Department of Commerce.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Anderson, J.E. and Kobayashi, H., "Fuel Reduction in Steel Heating Furnaces with a New Oxygen Combustion System" American Iron & Steel Institute Technical Symposium No. 9, "Energy Conversion in the Steel Industry", Pittsburgh, PA, April 28<sup>th</sup>, 1983.
- 2 Anderson, J. E., "Oxygen Aspirator Burner and Process for Firing a Furnace", U.S. Patent 4.378.205, March 29<sup>th</sup>, 1983.
- 3 Kobayashi, H., "Oxygen Combustion System Performance Study, Vol. I Technical and Economic Analysis, Report No. DOE/ID/12597, U.S. Department of Energy, Idaho Falls, ID, March 1987.
- 4 Kobayashi, H., "Segregated Zoning Combustion", U.S. Patent 5.076.779, December 31<sup>st</sup>, 1991.
- 5 1999 Annual Statistical Report, American Iron & Steel Institute, Washington, DC, 2000, pp. 87-88.
- 6 Ryan, H.M., et al., Dilute Oxygen Combustion – Phase I Report, Report No. DOE.ID/13331-TA, U.S. Department of Energy, Washington DC, October 1997.
- 7 Ryan, R.M., et al., "Development of the Dilute Oxygen Combustion Burner of High Temperature Furnace Applications", 4<sup>th</sup> International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environmental, Lisboa, Portugal, July 7<sup>th</sup>-10<sup>th</sup>, 1997.
- 8 Riley, M.F., Dilute Oxygen Combustion – Phase III Report, Report No. DOE/ID/13331-T2, U.S. Department of Energy, Washington DC, May 2000.
- 9 Martocci, A.P., et al, Bethlehem Steel's Evaluation of a Low-NOx Oxy-Fuel Burner, NICE<sup>3</sup> Project Report, U.S. Department of Energy, Washington DC, June 2000
- 10 Lighty, J.S., Minimizing NOx Emission from By-Product Fuels in Steelmaking, Combustion Project Fact Sheet, U.S. Department of Energy, Washington, DC, January 1999.

# APPLICATION OF DILUTE OXYGEN COMBUSTION (DOC) TECHNOLOGY FOR STEEL REHEATING FURNACES <sup>(1)</sup>

*Abílio Tasca (2)*  
*William Kobayashi (3)*  
*Ricardo Bastos (4)*  
*Ismar Sardinha (5)*

## **Abstract**

Dilute Oxygen Combustion technology uses separate high-velocity fuel and oxygen jets to generate strong in-furnace gas recirculation, producing combustion between the fuel and a highly diluted oxygen-furnace gas mixture. These very low NO<sub>x</sub> oxy-fuel burners have been developed and commercially demonstrated in steel reheating furnaces. The burner design meets steel industry needs for increased productivity and lower operating costs with minimal capital expense and low maintenance. The DOC technology reduces significantly NO<sub>x</sub> emission rate to 10:1 ratio compared to air fuel burners. In a combustion chamber operated at around 1200 °C, with 2% oxygen concentration (wet basis) in the flue gases, the NO<sub>x</sub> emission with “DOC” technology is equivalent to 1 ppm from a conventional air fuel burner. The “DOC” technology in steel reheating furnaces promotes operating costs reduction through reduction of specific fuel consumption up to 50%, increasing throughput up to 40% and ultra low pollutant emission.

**Key-words:** Oxygen; Combustion; Reheating; Steel.

- (1) Paper presented in the 60° ABM Annual Congress in Belo Horizonte, MG.*
- (2) Application Development Manager, White Martins Gases Industriais Ltda., Diadema-SP.*
- (3) Global Applications Transfer and Market Development Manager, Praxair, Inc., Tonawanda-NY*
- (4) Director, Praxair Metals Technology, Rio de Janeiro-RJ*
- (5) Business Manager, Praxair Metals Technology, Contagem-MG*