

# UMA PERSPECTIVA EXPERIMENTAL DA INJEÇÃO DE OXIGÊNIO EM ALTA TEMPERATURA PARA MELHORIA DA COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS PULVERIZADOS EM ALTOS-FORNOS<sup>1</sup>

Sabuj Halder<sup>2</sup>  
Valmiro Correia e Sá Neto<sup>3</sup>

## Resumo

A injeção de combustíveis sólidos tais como carvão pulverizado através das ventaneiras de altos-fornos tem sido praticada por muitos anos a fim de reduzir o uso de coque metalúrgico. A combustão incompleta das partículas na zona das ventaneiras e a consequente perturbação nos fluxos gasosos e de carga no forno geralmente limitam a taxa de injeção de tais combustíveis sólidos acima de 200 kg/ton de metal líquido. A Praxair desenvolveu uma aplicação utilizando a sua tecnologia patenteada de bocal térmico para oxigênio com o objetivo de melhorar a eficiência de combustão dos combustíveis sólidos injetados. Isso é conseguido através da rápida ignição e devolatilização do combustível sólido usando uma corrente de oxigênio gerada no local com alta temperatura e momento. A investigação experimental da efetividade de tal abordagem sobre a eficiência da combustão é apresentada. Uma comparação com os métodos tradicionais de injeção também é estabelecida. Os testes e resultados de laboratório em escala reduzida e piloto são discutidos. Aspectos do nível de enriquecimento do sopro também são destacados.

**Palavras-chave:** Oxigênio quente; Eficiência de combustão; Enriquecimento; Alto-forno.

## AN EXPERIMENTAL PERSPECTIVE ON HIGH TEMPERATURE OXYGEN INJECTION TO ENHANCE PULVERIZED SOLID FUEL COMBUSTION FOR IRONMAKING BLAST FURNACES

### Abstract

Tuyere injection of solid fuels like pulverized coal in iron blast furnaces has been practiced for many years to reduce metallurgical coke usage. Incomplete combustion of char in the tuyere zone and consequent disturbances in gas and burden flow in the furnace have generally limited the injection rate of such solid fuels at rates over 200 kg/ton of hot metal. Praxair has developed an application utilizing its patented thermal nozzle technology using oxygen, which aims to improve the combustion efficiency of injected pulverized solid fuels. This is accomplished by virtue of quicker ignition and de-volatilization of the pulverized solid fuel using a high momentum, high temperature stream of oxygen generated *in situ*. An experimental investigation into the effectiveness of such an approach on pulverized fuel burnout is presented. A comparison with traditional injection methods is also established. Both small and pilot scale laboratory tests and results are discussed. Aspects of hot blast enrichment level are also highlighted.

**Key words:** Hot oxygen; Combustion efficiency; Enrichment; Blast furnace.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, Ph.D. – Praxair, Inc. 175 East Park Dr, Tonawanda, NY, 14150, USA. Email: sabuj\_halder@praxair.com.

<sup>3</sup> Engenheiro Químico – Praxair, Inc. 175 East Park Dr, Tonawanda, NY, 14150, USA. Email: valmiro\_correia@praxair.com.

## 1 INTRODUÇÃO

Altos-fornos usam o carbono como combustível para suprir a demanda energética do processo assim como agente redutor para reduzir o minério de ferro a ferro gusa. A forma de carbono largamente usada para esse propósito é o coque metalúrgico. A importância do coque metalúrgico reside na sua habilidade de manter a permeabilidade do leito e a integridade estrutural sob as condições redutoras e o peso da carga. O uso de outras formas de carbono como carvão mineral e vegetal é limitado em altos-fornos de grande capacidade devido à tendência desses materiais em se desintegrar (baixa resistência a compressão) sob o peso da carga e o ambiente termo-químico em seu interior. Sob tais circunstâncias, a permeabilidade do leito é prejudicada, levando a uma maior resistência ao fluxo de gases e aumento a perda de carga ao longo do mesmo. Isso produz um impacto negativo na transferência de massa e calor entre os gases e a carga sólida, levando a irregularidades na operação do forno.

Ao longo das últimas décadas, devido ao alto preço do coque e ao aumento da pressão nas coquearias como resultado de regulamentações ambientais mais restritivas, a opção de injeção de carvão pulverizado nos altos-fornos através das ventaneiras tem ganhado destaque em várias siderúrgicas. Carvão pulverizado ou finos de carvão, obtidos a partir da moinha gerada internamente ou comprada de terceiros, são relativamente mais baratos que coque metalúrgico e carvão vegetal. Eles são também mais facilmente disponíveis, embora a granulação e moagem representem um custo para os produtores de ferro. Além disso, eles possuem uma área superficial maior para reação química quando comparado ao coque ou carvão carregado no topo do forno. Devido a sua granulometria mais fina, eles são injetados através das ventaneiras para evitar um impacto negativo nos vazios do leito e na permeabilidade do forno. O objetivo é maximizar a combustão do carvão pulverizado no raceway para gerar energia térmica e gases redutores para reduzir o minério da carga. Essa prática, se efetivamente aplicada, resulta em redução do consumo de carvão vegetal/coque metalúrgico que são mais caros. Por outro lado, a combustão ineficiente do carvão pulverizado promove à formação de grandes quantidades de particulados, o que frequentemente leva à obstrução das rotas porosas na zona coesiva do forno que permitem a ascensão dos gases redutores bem como do coque ao redor do raceway, perturbando, dessa forma, a permeabilidade do leito e a distribuição gasosa. Além disso, pode ocorrer a liberação de material particulado, resultado da combustão incompleta, no gás de topo.

A fim de elevar a eficiência de combustão do carvão pulverizado injetado, é comum a prática de enriquecimento no ar de sopro com oxigênio entre 22% e 30% em volume e a operação do forno com altas temperaturas de sopro. O aumento da injeção de combustível sólido pulverizado a uma determinada temperatura de sopro e outras injeções nas ventaneiras, provoca a redução na temperatura adiabática de chama. A quantidade de oxigênio e a temperatura de sopro são ajustadas de maneira a compensar essa queda. O objetivo é manter a temperatura de chama constante e a permeabilidade do leito adequada, permitindo a operação estável do forno.

Algumas variáveis-chaves estão envolvidas na combustão de sólidos tais como temperatura da partícula, granulometria, concentração de oxigênio e tempo de residência, para citar algumas. Podem-se controlar diretamente as variáveis secundárias tais como taxa de aquecimento do combustível, taxa de mistura, taxa de injeção de oxigênio, e então tentar influenciar indiretamente as variáveis primárias.

Algumas dessas variáveis primárias podem ser relativamente mais difíceis de controlar do que outras sob um conjunto particular de condições. Por exemplo, a limitação imposta pelo curto tempo de residência disponível para o combustível sólido queimar no *raceway* do alto-forno é contornada por métodos indiretos para aumentar a temperatura da partícula (maior taxa de aquecimento pelo aumento na temperatura de sopro) e concentração de oxigênio (injeção de oxigênio ou enriquecimento do sopro), o que melhora a cinética da reação. O papel do oxigênio na melhoria nas características de combustão de sólidos tem sido mencionado em inúmeros trabalhos. Algumas referências, dentre as tantas disponíveis, serão discutidas a fim de ajudar o leitor a entender tal fenômeno.

No estudo da combustão de uma partícula de carvão, de Timothy, Sarofim e Beer,<sup>(1)</sup> foi observado que o tempo de queima da partícula tende a diminuir com o aumento progressivo da pressão parcial do oxigênio no ambiente em torno da mesma. O grau de redução do tempo de queima da partícula com o aumento da concentração de oxigênio é influenciado pelo diâmetro da partícula, temperatura do ambiente e tipo do carvão (percentual de cinzas). Medidas da temperatura da superfície da partícula também mostraram uma tendência direta de aumento com a concentração de oxigênio. A determinação experimental dos tempos aproximados de devolatilização sugere que altas concentrações de oxigênio são favoráveis à cinética da devolatilização.

Em outro estudo sobre a combustão de uma partícula de carvão, a imagem da ignição e devolatilização de uma partícula de carvão pulverizado em um processo oxicomcombustível foi observada por Shaddix e Molina.<sup>(2)</sup> Experimentos foram realizados com várias concentrações de oxigênio (12%-36% em volume) em misturas diluentes dos gases  $N_2$  e  $CO_2$ . Medidas indicaram que o uso do  $CO_2$  como diluente ao contrário do  $N_2$  retarda o início da ignição e aumenta o tempo de devolatilização da partícula. Shaddix e Molina atribuíram essa observação ao maior calor específico molar do  $CO_2$  e sua capacidade de reduzir a concentração local de radicais. O aumento da concentração de oxigênio em um meio diluente específico, por outro lado, contribuiu para a melhora no tempo de ignição e na cinética de devolatilização da partícula. Isso foi explicado com base no maior fluxo de massa de oxigênio para combustão da nuvem volátil em torno da partícula, que conseqüentemente, melhorou a taxa de devolatilização.

Ariyama et al.<sup>(3)</sup> conduziram modelos de experimentos a quente para injeção de carvão pulverizado usando um algaraviz se comunicando com uma coluna de coque, com a injeção do carvão pulverizado efetuada em diferentes posições axiais ao longo do comprimento do algaraviz. Eles reportaram que o posicionamento da lança dentro do algaraviz afeta a distribuição das partículas de carvão através de uma seção transversal do sopro. Não uniformidades na distribuição do carvão podem surgir devido ao posicionamento não ideal da lança e limitações no sistema de alimentação de carvão. Ariyama et al.<sup>(3)</sup> também reforçam a importância da disponibilidade local de oxigênio em torno das partículas de carvão durante o estágio de devolatilização, quando a nuvem volátil resultante da pirólise do carvão queima usando o oxigênio das proximidades, causando assim uma diminuição local do oxigênio próximo das partículas de carvão, influenciando negativamente a cinética das reações de combustão. Assim sendo, a reposição desse oxigênio consumido localmente em torno das partículas é necessária para manter as reações de combustão dos voláteis.

A Praxair inventou a tecnologia do Bocal Térmico no começo dos anos noventa<sup>(4)</sup> a fim de superar as limitações de injeção impostas pela baixa pressão de suprimento *on-site* de seus produtos, especialmente oxigênio, o que é normal quando produzido por sistemas de VPSA (*Vacuum Pressure Swing Adsorption*). O bocal térmico é um dispositivo no qual um reagente gasoso é aquecido dentro de um tubo *in situ* usando a entalpia de combustão de um hidrocarboneto líquido ou gasoso e um oxidante como o oxigênio. O gás principal junto com os produtos da combustão expandem ao fluir através do bocal existente no final do tubo para formar um jato sub-expandido de alta velocidade, temperatura e momento na saída do mesmo. O combustível é introduzido na zona de combustão dentro do tubo através de um outro tubo central com um bocal na sua extremidade onde a chama oxi-combustível fica colada. Um desenho esquemático do bocal térmico para oxigênio é mostrado na Figura 1. O bocal térmico usado para o oxigênio é referido como Dispositivo de Oxigênio Quente (DOQ). A foto de um DOQ transparente é mostrada na Figura 2. A combustão de sólidos pulverizados como carvão mineral ou vegetal, pet-coke etc. injetados através das ventaneiras de altos-fornos foi identificada como uma área com potencial para aplicação desse tipo de dispositivo.<sup>(5)</sup>

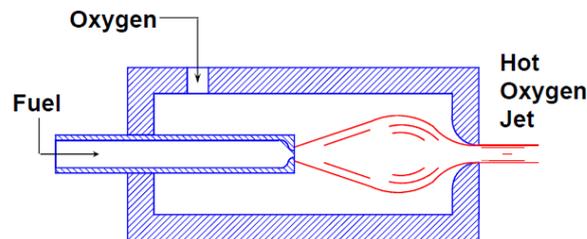


Figura 1. Desenho esquemático de um dispositivo de oxigênio quente.<sup>(4)</sup>



Figura 2. Dispositivo de Oxigênio Quente Transparente.

O objetivo primário desse desenvolvimento experimental foi estudar o efeito da injeção de oxigênio quente (usando um DOQ) nas características de combustão de sólidos pulverizados quando injetado em uma corrente de sopro simulado no laboratório. Testes dessa natureza, mas em uma escala muito menor foram conduzidos em um estudo anterior por Riley, Strayer e Zhao<sup>(6)</sup> As simulações na presente escala piloto, que embora seja uma escala reduzida quando comparada a escala industrial do alto-forno, foram desenhadas para capturar a essência dos fenômenos relacionados à combustão de sólidos. A vazão de sopro e as dimensões da câmara foram selecionadas de maneira a reproduzir as velocidades nas ventaneiras dos altos-fornos. Isso foi importante para simular o curto tempo de residência do combustível sólido pulverizado na zona de combustão.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Testes em Escala Reduzida

Os experimentos em laboratório para simular esse processo envolvem a geração do sopro de ar quente usando uma aparelhagem de tubos especialmente projetada para essa finalidade. Esse sistema compreende três seções de tubos flangeados refrigerados a água com um queimador oxi-gás natural de chama difusa montado em uma das extremidades e a outra aberta para a atmosfera. A pressão dentro do conjunto durante a operação foi próxima à atmosférica. O propósito desse queimador foi aquecer o ar de sopro até a temperatura desejada. O ar foi introduzido no sistema a jusante do queimador. Esse método de aquecimento do ar é rápido e permite que a temperatura de sopro seja flexivelmente controlada. Não requer trocadores de calor caros sendo adequado para esse tipo de experimentos. É importante notar que o ar de sopro simulado conterá impurezas que são os produtos da combustão do gás natural com o oxigênio, predominantemente dióxido de carbono e vapor d'água. Entretanto, devido à presença de oxigênio em excesso no sopro em relação ao que é necessário para a combustão completa do combustível sólido, as reações de gaseificação com essas impurezas são relativamente insignificantes. Foi usada uma vazão de ar de cerca de 1.000 Nm<sup>3</sup>/h para esses experimentos. Termopares e pontos de coleta de amostra de gases foram instalados em vários pontos axiais ao longo do comprimento do conjunto. O DOQ e a lança de combustível sólido pulverizado foram introduzidos na corrente de sopro através de portas específicas na terceira seção do conjunto tubular. Oxigênio adicional foi admitido no ar de sopro ou por meio de enriquecimento direto no próprio ar antes da sua injeção no sistema ou por meio de lanças injetando próximo à saída do conjunto. Esse ponto será discutido mais detalhadamente no parágrafo seguinte. O percentual de oxigênio foi medido por meio de um analisador de gases de bancada coletando-se amostras em um ponto próximo à saída do conjunto. A temperatura medida pelo termopar próximo à saída do conjunto durante a geração do ar de sopro foi considerada a temperatura de controle de sopro. Essa foi só uma temperatura de referência mantida nesse ponto em todos os experimentos. O desenho esquemático do aparato experimental é mostrado na Figura 3.

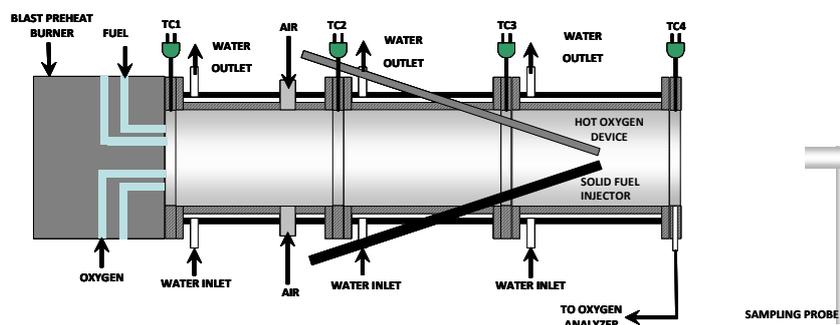


Figura 3. Desenho esquemático do aparato experimental para testes em escala reduzida.

Quatro condições experimentais diferentes em termos do modo de injeção de oxigênio foram investigadas. Esses cenários serão descritos em detalhes a seguir.

- **Condição de Base**  
Essa condição simula o sopro de ar quente normal contendo 21% (vol.) de oxigênio saindo do conjunto a uma temperatura de cerca de 1.073 K (800°C). Não houve enriquecimento com oxigênio nesse caso. Entretanto, como o sopro de ar quente no simulador é gerado aquecendo-se diretamente o ar com um queimador, uma parte do oxigênio no ar é utilizada para queimar o gás natural. Então, uma quantidade adicional de oxigênio é fornecida externamente para compensar essa deficiência e restaurar a concentração normal de oxigênio no ar. Os produtos da combustão permanecem na corrente do sopro de ar quente;
- **Enriquecimento do Sopro**  
Nessa condição, o sopro é enriquecido com 25% (vol.) de oxigênio disponível. O oxigênio adicional é pré-misturado com o ar antes dele ser admitido no sistema. A temperatura de sopro de referência próxima ao ponto de injeção é similar à condição anterior (1.073 K ou 800°C);
- **Oxigênio Ambiente com Injeção de Oxigênio por Lança**  
Essa condição é similar ao enriquecimento do sopro em termos da quantidade de oxigênio disponível. Entretanto, o oxigênio adicional é injetado à temperatura ambiente através do DOQ na corrente de sopro sem o fluxo de gás natural através do bocal de combustível. A temperatura de sopro no ponto de injeção foi mantida a mesma das condições anteriores. A vazão de oxigênio no dispositivo de injeção foi ajustada de tal forma que a concentração de oxigênio no sopro a jusante do ponto injeção fosse 25% (vol.);
- **Injeção de Oxigênio Quente**  
Nesse cenário, o oxigênio é injetado através do DOQ a alta temperatura. As vazões de oxigênio e gás natural na lança são ajustados de tal forma que a concentração final de oxigênio no sopro seja de 25% (vol.). A temperatura de sopro em torno do DOQ (1.073 K ou 800°C) foi adequada para a sua auto-ignição.

Foi usado para os testes carvão vegetal pulverizado (100 % < 100 mesh). O carvão foi alimentado por meio de um sistema de injeção de sólidos, usando ar como meio de transporte. A injeção do carvão pulverizado foi iniciada logo após a obtenção da temperatura de sopro de controle e a concentração do oxigênio na corrente de sopro ter sido conseguida através dos meios apropriados. A taxa de injeção do pó de carvão usada nos testes foi em torno de 190 kg/h a 218 kg/h (7 lb/min a 8 lb/min). A análise imediata típica do carvão usado é apresentada na Tabela 1. A injeção de finos de carvão com a condição de sopro simulada foi estudada por Babich, Senk e Fernandez.<sup>(7)</sup> Carvão vegetal é uma forma de carbono muito mais reativa que o carvão mineral, e sua composição é dependente das condições de carbonização da madeira a partir da qual é produzido. Babich, Senk e Fernandez<sup>(7)</sup> relataram que a eficiência de combustão do carvão vegetal é menos dependente da razão O<sub>2</sub>/C do que a dos carvões minerais.

**Tabela 1.** Análise Imediata do carvão vegetal usado nos experimentos

<b>Humidade (%Massa)</b>	<b>Matéria Volátil (%Massa)</b>	<b>Cinza (%Massa)</b>	<b>Carbono Fixo (%Massa)</b>
3.5-5	26-30	8-9.5	57-65

Amostras do material particulado residual foram coletadas a partir da corrente dos produtos da combustão usando-se uma sonda de sucção refrigerada a água e analisadas (análise imediata) para determinar o grau de combustão do carbono fixo em cada uma das condições descritas acima. Uma amostra de referência do carvão vegetal também foi enviada para análise. A partir dos resultados das análises e usando o princípio do balanço de cinzas, o grau de combustão do carbono fixo pode ser calculado usando a formulação a seguir.

$$F_{\text{carbon burnout}} = 1 - \left( \frac{\% C_{\text{final}} \cdot \% \text{Ash}_{\text{initial}}}{\% C_{\text{initial}} \cdot \% \text{Ash}_{\text{final}}} \right) \quad (1)$$

Onde F representa a fração de carbono fixo queimada, 'initial' refere-se a amostra de carvão, como recebida do fornecedor e 'final' refere-se à condição após a combustão. O princípio do balanço de cinzas utiliza o fato de que a massa de cinzas em uma certa quantidade de amostra de carvão é idêntica antes e após o processo de combustão.

Múltiplas amostras foram coletadas para cada condição a fim de anular os efeitos causados devido a não homogeneidade resultante da distribuição não uniforme das partículas e da temperatura dos gases ao longo de uma seção transversal da corrente de combustão. As amostras foram coletadas a cerca de 0.9 m da saída do aparato experimental. A escolha de tal distância baseia-se no fato de essa ser a dimensão típica do *raceway* em altos-fornos.<sup>(8)</sup> É importante notar que o grau de combustão das amostras coletadas dessa forma será mais baixo que o obtido usando-se o mesmo material e as mesmas condições de injeção no alto-forno. Isso pode ser atribuído ao fato de que a corrente de combustão é liberada em ambiente aberto nas condições do presente experimento. Dessa forma, a probabilidade de que as reações de combustão cessem quando ocorre o contato com o ar frio do ambiente aberto é muito alta. Contudo, tais efeitos resultantes da interrupção das reações de combustão irão manifestar-se em todas as condições experimentais consideradas nesse estudo.

## 2.2 Testes em Escala Piloto

Após os testes de prova do conceito usando o aparato tubular descrito anteriormente, foi feita a transição para a escala piloto tendo como aparato para conduzir testes similares um conjunto de algaraviz e ventaneira de alto-forno industrial. Um dos objetivos foi conduzir testes em uma escala maior, quase duas vezes a escala descrita na seção anterior.

O algaraviz utilizado tinha duas portas laterais para a introdução dos dispositivos de injeção e uma ventaneira de cobre refrigerada a água na sua extremidade. Uma câmara de pré-aquecimento do ar de sopro com revestimento refratário foi projetada para pré-aquecer o ar até a temperatura desejada. Essa seção foi montada, usando-se flanges, na extremidade do algaraviz para formar um conjunto contínuo de sopro de ar quente. Essa câmara de pré-aquecimento possui entradas de ar para o sopro localizadas a jusante de um queimador oxi-gás natural de chama difusa, seguindo os mesmos princípios do aparato tubular em escala reduzida descrito anteriormente. O oxigênio foi injetado diretamente no ar antes do seu ingresso na câmara de pré-aquecimento para se obter o nível de enriquecimento desejado. Furos foram abertos

através do revestimento refratário próximo ao bico do algaraviz para a inserção de termopares para medir a temperatura do sopro e para amostragem do gás a fim de monitorar a concentração de oxigênio. A Figura 4 mostra um desenho esquemático e uma foto desse arranjo experimental. Esses experimentos foram conduzidos a céu aberto com a pressão dentro do algaraviz e ventaneira próxima à atmosférica durante o sopro de ar quente. A velocidade do sopro na saída da ventaneira ficou dentro da faixa de operação normal dos altos-fornos industriais. A vazão de sopro do ar quente foi na faixa de 1.800 Nm<sup>3</sup>/h a 1.900 Nm<sup>3</sup>/h a uma temperatura de cerca de 1.090 K (817°C) próximo ao ponto de encaixe do algaraviz na ventaneira. O DOQ foi operado usando cerca de 215 Nm<sup>3</sup>/h de oxigênio. A taxa de injeção do carvão pulverizado foi mantida na faixa de 380 kg/h a 410 kg/h (14 lb/min a 15 lb/min). As amostras de material particulado da corrente de combustão foram coletadas a cerca de 0.9 m da saída da ventaneira, similar ao método de amostragem dos testes usando o aparato tubular.

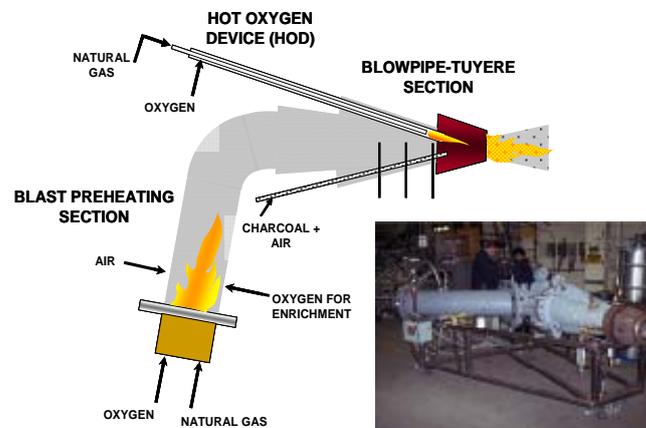


Figura 4. Desenho esquemático e foto do conjunto algaraviz-ventaneira experimental.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Testes em Escala Reduzida

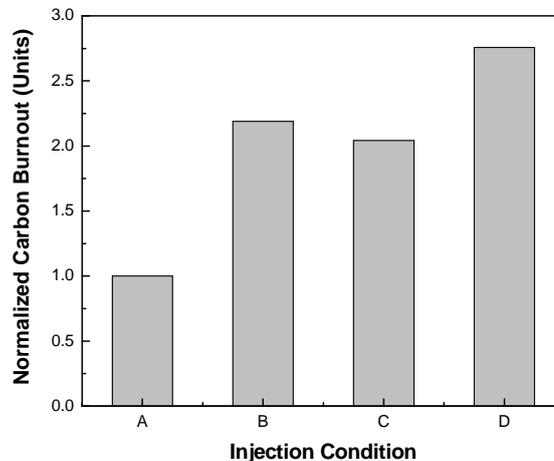
Fotos mostrando os padrões de chama observados para as diferentes condições são apresentadas na Figura 5. A comparação visual desses padrões mostra que o brilho da chama com a injeção do oxigênio quente reflete a alta temperatura a que as partículas de carvão são aquecidas como resultado da alta taxa de liberação de energia da combustão, o que as faz radiar. Os padrões de chama para as demais condições são relativamente menos brilhantes do que na injeção de oxigênio quente. A média do grau de combustão de carbono fixo de múltiplas amostras coletadas para cada condição foi calculada e normalizada pelo grau de combustão de carbono determinada na condição de base. Esses valores normalizados foram plotados na forma de um histograma na Figura 6. Com exceção da condição de base, a razão mássica O<sub>2</sub>/C na corrente de combustão para as outras três condições foi mantida constante. Deve-se observar que o 'O<sub>2</sub>' refere-se ao oxigênio livre disponível no sopro para reagir com o combustível sólido. O 'C' refere-se ao carbono presente no combustível sólido na forma de carbono fixo. Para a geometria do aparato experimental considerada e as condições de teste descritas, o grau de combustão do carbono fixo para a condição na qual o oxigênio é injetado a alta temperatura através do DOQ foi aproximadamente 25%-35% (em massa) maior do que nas

condições de enriquecimento do sopro e injeção, pela lança, de oxigênio frio (ambiente). É importante notar que os valores do grau de combustão de carbono para vários trabalhos experimentais desse tipo serão uma função direta da geometria do aparato experimental, condições experimentais e características físico-químicas do combustível sólido. Assim sendo, o que significa mais para o leitor é a tendência que esses dados experimentais apresentam.



**Figura 5.** Correntes de combustão para várias condições de injeção de oxigênio

**Normalized Average Carbon Burnout under Various Injection Conditions**



- A:** Baseline Condition (21 Volume Pct. O<sub>2</sub>)
- B:** Enriched Hot Blast (25 Volume Pct. O<sub>2</sub>)
- C:** Ambient (Cold) Oxygen Injection (25 Volume Pct. O<sub>2</sub>)
- D:** Hot Oxygen Injection (25 Volume Pct. O<sub>2</sub>)

**Figura 6.** Grau de combustão do carbono fixo sob várias condições de injeção de oxigênio.

### 3.2 Efeito do Enriquecimento do Sopro

Em complemento à injeção de oxigênio pelo DOQ, o percentual de enriquecimento de oxigênio no sopro pode ser importante na manutenção da combustão do carvão pulverizado no *raceway*. A fim de avaliar-se essa hipótese, foram conduzidos alguns testes nos quais a concentração de oxigênio no sopro (por meio de enriquecimento)

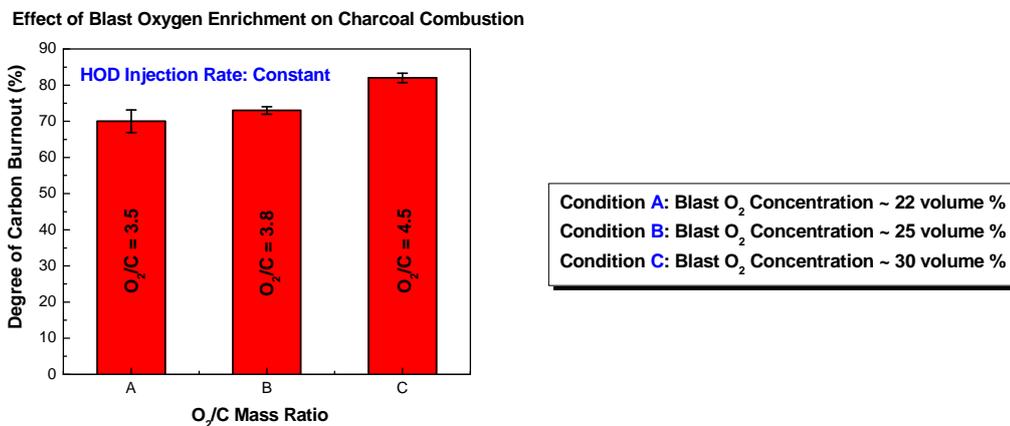
foi variado. A taxa de injeção de oxigênio pelo DOQ no sopro nessas condições de testes permaneceu a mesma. Essa foi a maneira pela qual a razão  $O_2/C$  na corrente de combustão pode ser variada. Todas as outras condições permaneceram as mesmas, tais como a posição dos dispositivos de injeção, temperatura de sopro, taxa de injeção de carvão, etc. Amostras do material particulado coletado da corrente combustão foram analisadas para determinar o grau de combustão do carbono. A Figura 7 mostra a comparação do grau de combustão do carbono (usando as cinzas como traçador) em função da razão  $O_2/C$  (em massa) entre os diferentes níveis de enriquecimento. É importante notar que a razão mássica  $O_2/C$  considera as contribuições do oxigênio no ar de sopro, enriquecimento, bem como do DOQ. Assume-se que o carbono fixo seja proveniente apenas do combustível sólido pulverizado (carvão vegetal nesse caso).

Apenas a contribuição do oxigênio de enriquecimento variando em cada um dos casos que é mostrada. Os valores indicados são as médias do grau de combustão do carbono fixo de múltiplos experimentos para cada caso. As barras de erro também são apresentadas. As condições A, B e C referem-se à concentrações de oxigênio no sopro de 22%, 25% e 30% (vol.) respectivamente.

A Figura 7 sugere que o aumento da razão mássica  $O_2/C$  na corrente de combustão por meio de níveis de enriquecimento mais altos tem uma influência favorável sobre a eficiência do grau de combustão de carbono. Deve-se notar que o objetivo do DOQ é iniciar a pirólise do combustível sólido pulverizado mais cedo do que com os métodos de injeção tradicionais em uma escala microscópica. O carvão pulverizado é tipicamente injetado nas ventaneiras a temperatura ambiente usando um gás de transporte. Como resultado, a transferência de calor externa da fase gasosa para as partículas se torna significativo antes do início da pirólise. O DOQ é efetivo nesse sentido por proporcionar taxas mais altas de aquecimento da partícula como consequência da alta temperatura local do jato. Isso, subseqüentemente, leva a uma cinética de devolatilização mais rápida e combustão do material volátil com o oxigênio disponível localmente, o que é ainda mais potencializado como resultado das fortes características de mistura do jato. A combustão da nuvem volátil em torno das partículas aumenta a temperatura das mesmas abruptamente resultando em mais pirólise. Essa sequência de processos em escala microscópica se traduz em uma razão material volátil / formação de particulados maior durante o processo de pirólise (usando o DOQ) do que na etapa de pirólise das outras condições de injeção de oxigênio. O oxigênio fornecido pelo DOQ não é adequado para completar as reações de combustão dos sólidos injetados. Dessa forma, a combustão parcial da matéria volátil e o material particulado resultante da ação do DOQ é completada pela interação com o oxigênio adicional presente no sopro. Em outras palavras, o oxigênio no sopro ajuda nas reações de combustão, que são iniciadas pelo DOQ sustentando-as mais adiante, sendo, dessa forma, igualmente importante para maximizar a eficiência de combustão. O papel da quantidade de oxigênio no sopro permitindo maiores taxas de injeção de sólidos pulverizados foi discutido em vários trabalhos.<sup>(9)</sup> Outras características específicas dos combustíveis sólidos tais como a concentração de hidrogênio e a granulometria podem, potencialmente impactar o grau de combustão, mas não foram considerados no presente estudo.

A eficiência de combustão de sólidos pulverizados injetados no *raceway* do forno é provavelmente dependente dos mecanismos limitantes que governam a cinética das reações de combustão da partícula. A melhoria na taxa de injeção de combustíveis sólidos como resultado da utilização de técnicas como o DOQ e enriquecimento do sopro deve ser examinada à luz de vários outros fatores. Alguns deles incluem as

práticas de carregamento do forno, redutibilidade da carga ferrosa, propriedades físico-químicas do coque metalúrgico, composição e qualidade dos combustíveis sólidos pulverizados, etc.



**Figura 7.** Variação do grau de combustão do carbono fixo em função da concentração de oxigênio no sopro

### 3.3 Efeito da Injeção de Oxigênio Quente e Frio

Em um experimento para observar as diferenças entre a injeção de oxigênio quente e frio no comportamento da combustão do combustível sólido injetado, os padrões de chama em cada um dos casos foram visualmente comparados. A única diferença entre os dois cenários foi a ausência do combustível fluído no DOQ para aquecer o oxigênio no caso da injeção de oxigênio frio. Outros parâmetros como vazão, temperatura e concentração de oxigênio no sopro e taxa de injeção de carvão permaneceram inalterados. As Figuras 8 e 9 mostram as fotos do padrão de chama emanando na saída da ventaneira em ambas as condições. A cor dos fumos além da zona de combustão também é mais escura (não vista nas fotos) na condição de injeção de oxigênio frio do que no caso onde o oxigênio foi injetado a alta temperatura.



**Figura 8.** Zona de Combustão no modo de oxigênio quente



**Figura 9.** Zona de Combustão no modo de oxigênio frio

## 4 CONCLUSÃO

A combustão de sólidos pulverizados (carvão vegetal), tipicamente injetados pelas ventaneiras de altos-fornos, em um simulador de sopro de ar quente, foi estudada para várias condições, cada uma representando uma forma diferente de introduzir o oxigênio na reação de combustão. Experimentos foram conduzidos em escala reduzida usando um simulador de sopro de ar quente bem como em escala piloto usando um conjunto de algarviz e ventaneira de alto-forno. O grau de combustão de carbono fixo usando oxigênio quente foi cerca de 25%-35% (em massa) maior que os métodos convencionais de injeção de oxigênio tais como enriquecimento e injeção de oxigênio frio nas condições apresentadas. A importância da quantidade de oxigênio no sopro de ar quente junto com o DOQ para melhorar o grau de combustão do carbono fixo do combustível sólido pulverizado também foi demonstrado.

## Agradecimentos

Os autores são gratos aos Senhores Bryan R. Bielec, Robert J. Churpita e William J. Wilson pela assistência na condução dos experimentos e desenhos e ao Dr. William J. Mahoney pelas sempre úteis sugestões e orientações.

## REFERÊNCIAS

- 1 Timothy, L.D.; Sarofim, A.F.; Beer, J.M. "Characteristics of Single Particle Coal Combustion", *Nineteenth International Symposium on Combustion*, Vol. 19, No. 1, 1982, pp. 1123-1130.
- 2 Shaddix, C. R.; Molina, A. "Particle Imaging of Ignition and Devolatilization of Pulverized Coal During Oxy-Fuel Combustion", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, No.2, 2009, pp. 2091-2098.
- 3 Ariyama, T.; Sato, M.; Yamakawa, Y.; Yamada, Y.; Suzuki, M. "Combustion Behavior of Pulverized Coal in Tuyere Zone of Blast Furnace and Influence of Injection Lance Arrangement on Combustibility", *ISIJ International*, Vol. 34, No. 6, 1994, pp. 476-483.
- 4 Anderson, J. E. "Thermal Nozzle Combustion Method", United States Patent 5,266,024, Nov. 30, 1993.
- 5 Riley, M. F. "Hot Oxygen Blast Furnace Injection System", United States Patent 6,090,182, Jul. 18, 2000.
- 6 Riley, M. F.; Strayer, T. J.; Zhao, Y. "Effect of Direct Oxygen Injection on Combustion of Injected Coal", *Proceedings of the 2nd International Congress on the Science and Technology of Ironmaking*, Iron & Steel Society, Warrendale PA, 1998, pp. 683-688.

- 7 Babich, A.; Senk, D.; Fernandez, M. “Charcoal Behavior by Its Injection into the Modern Blast Furnace”, ISIJ International, Vol. 50, No. 1, 2010, pp. 81-88.
- 8 Biswas, A. K. “Reactions in the Blast Furnace”, Principles of Blast Furnace Ironmaking, SBA Publications, Kolkata, India, 1999, pp. 308-309.
- 9 Geerdes, M.; van Laar, R.; Vaynshteyn, R. “Low-Cost Hot Metal: The Future of Blast Furnace Ironmaking”, Iron & Steel Technology, Association for Iron & Steel Technology, Warrendale PA, 2011, pp. 51-56.