

APLICAÇÕES DE SISTEMAS OXI-COMBUSTÍVEIS PARA MAIOR EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, COM MENOR EMISSÃO ATMOSFÉRICA E MAIOR PRODUTIVIDADE¹

Edson Escudeiro Basilio²

Flavio Dostal Zanini²

Emerson Mattos dos Anjos²

Vinicius Castanheira do Nascimento²

Resumo

A implementação de sistemas oxi-combustíveis tem se tornado um grande aliado na redução de custos para as empresas presentes no disputado mercado da re-fusão de alumínio. A tecnologia apresentada neste trabalho visa primeiramente a redução do consumo energético de um forno rotativo e associados a este benefício estão alguns outros como o aumento da produtividade, a redução das emissões atmosféricas e a redução da formação de escória que, em conjunto, que refletem de maneira significativa na redução dos custos da re-fusão do alumínio. A Air Products tem desenvolvido novos queimadores específicos para serem utilizados em fornos rotativos, onde acrescidos de um sistema de controle de última geração, têm se tornado o estado da arte no que diz respeito ao fornecimento de tecnologias para oxi-combustão. Estas novas tecnologias são possíveis devido ao grande compromisso da Air Products com a inovação tecnológica, contando com os mais modernos laboratórios e um centro de excelência em combustão, onde as necessidades do mercado são avaliadas. A Air Products tem desenvolvido equipamentos e tecnologias capazes de se tornarem seu maior diferencial, agregando valor aos processos produtivos de seus clientes. Este trabalho irá apresentar os aspectos técnicos para implementação de sistemas oxi-combustíveis e, em destaque, a relação da seleção de sistemas oxi-combustíveis com o mecanismo de formação de escória, o aumento da produtividade, e as reduções no consumo de combustíveis e emissões atmosféricas. Todos os dados apresentados serão reforçados por resultados práticos de instalações em clientes da Air Products.

Palavras-chave: Alumínio; Oxi-combustão; Oxigênio; Queimadores.

APPLICATION OF OXI-FUELS SYSTEMS FOR HIGH PRODUCTIVITY AND ENERGY EFFICIENCY WITH LOWER ATMOSPHERIC EMISSIONS

Abstract

Oxy-fuel systems have become an ideal solution for the secondary aluminum melting. This technology has been used in rotary furnaces primarily for fuel saving and in addition some other benefits as productivity increased, emissions reductions and yield improvement. When this benefits work together, the aluminum maker will have significantly reduction on production costs. Air Products has developed new burners especially to be applied to rotary furnaces, where together with a last generation control system has become the state-of-the-art on oxy-fuel systems. These new technologies are result of the strong commitment that Air Products has with the innovation. Air Products has a modern combustion labs and a combustion center of excellence where we identify the market needs and develop the solutions that really add value to our customers. This paper will present the technical aspects of oxy-fuel systems, and specially, the oxy-fuel system selection associated with the dross formation, productivity increase, fuel savings and reduction on emissions. All data submitted will be supported by practical results.

Key words: Aluminium; Oxy-combustion; Oxygen; Burners.

¹ *Contribuição técnica ao 12º Seminário de Metais Não-ferrosos, 31 de outubro a 1 de novembro de 2011, São Paulo, SP.*

² *Engenheiro de Aplicações e Desenvolvimento, Air Products Brasil Ltda.*

1 INTRODUÇÃO

O oxigênio vem sendo utilizado desde a década de 1980 na indústria de alumínio, e desde então novos desenvolvimentos, conhecimento da aplicação e avançados sistemas de controle da combustão tem viabilizado o uso contínuo desta tecnologia em fornos rotativos e também revérberos.⁽¹⁾

A Air Products tem desenvolvido novas tecnologias de queimadores, especialmente para serem aplicados em fornos rotativos, onde acrescido de um sistema de controle de última geração tem se tornado o estado da arte no que diz respeito aos sistemas de oxi-combustão. Estas novas tecnologias são possíveis devido ao grande comprometimento da Air Products com a inovação, contando com os mais modernos laboratórios e um centro de excelência em combustão, onde as necessidades do mercado são avaliadas. Este trabalho irá apresentar os aspectos técnicos para implementação de sistemas oxi-combustíveis e, em destaque, a relação da seleção de sistemas oxi-combustíveis com o mecanismo de formação de escória, o aumento da produtividade, e as reduções no consumo de combustíveis e emissões atmosféricas. Todos os dados apresentados serão reforçados por resultados práticos de instalações em clientes da Air Products.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 O Uso do Oxigênio na Combustão

A combustão é a reação química do oxigênio com materiais combustíveis na qual se apresentam luz e rápida produção de calor. O ar contém aproximadamente 20,9% de oxigênio, sendo o restante na maior parte nitrogênio, que se mantém inalterado durante o processo de combustão. Quando a concentração de oxigênio é elevada acima do normal de 20,9%, dizemos que o ar está enriquecido de oxigênio. Com o aumento da quantidade de oxigênio no ar, reduz-se a quantidade de gás nitrogênio inerte que está na mistura que passa pelo processo da combustão, aumentando dramaticamente a eficiência térmica.⁽²⁾ O impacto do enriquecimento de oxigênio na temperatura da chama já esta muito bem documentada e comprovada. A Figura 1 demonstra o gráfico de temperatura adiabática da chama de uma combustão estequiométrica de gás natural com ar (21°C) contendo concentrações variadas de oxigênio. Através deste gráfico podemos observar que o aumento da temperatura adiabática da chama vai de 1.850°C com ar até mais de 2.750°C com oxigênio puro. As temperaturas de chama adiabática assumem uma mistura perfeita e não são atingidas na prática. As temperaturas típicas de chama são aproximadamente 1.700°C para ar-combustível e 2.500°C para oxi-combustível.^(3,4)

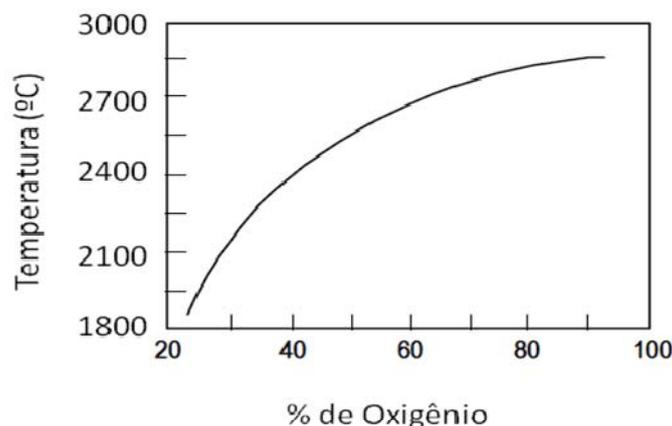


Figura 1. Efeito do enriquecimento do oxigênio na temperatura da chama.⁽⁴⁾

A eliminação do nitrogênio reduz a perda de energia pelos gases de exaustão, aumentando o calor disponível para o processo. Portanto, a eficiência térmica aumenta. A Figura 2 mostra a melhoria da eficiência térmica devido exclusivamente à eliminação de nitrogênio em diversos níveis de enriquecimento com oxigênio.

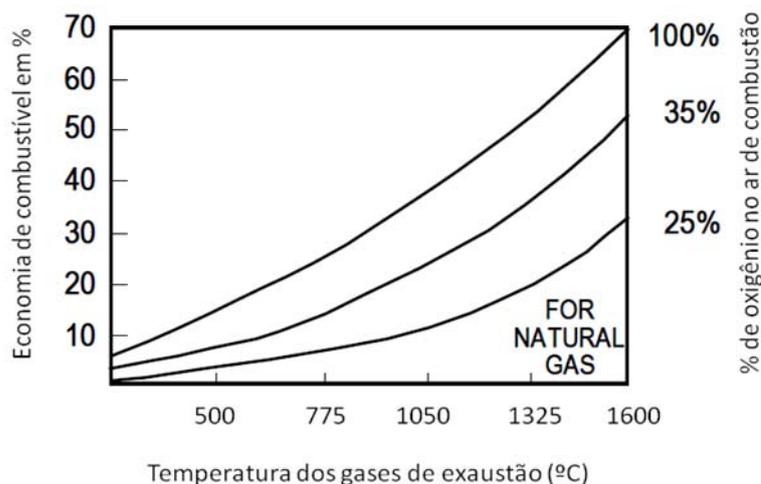


Figura 2. Economia de combustível com a eliminação do nitrogênio do ar.

Ao eliminar o nitrogênio do processo de combustão o volume de gases de exaustão é reduzido drasticamente. Com menores vazões de exaustão, também serão menores os arrastes de particulados e as temperaturas desses gases, já que será possível uma diluição dos gases de exaustão, resfriando a temperatura de 100°C a 200°C. A redução de particulados e também das temperaturas, permite a utilização de sacos menores nos filtros de manga, reduzindo também o desgaste e conseqüentemente o trabalho de manutenção.

Há uma variedade de técnicas para realizar o enriquecimento com oxigênio. O oxigênio pode ser misturado no ar de combustão, utilizando uma sub-lança ou uma lança na parte inferior da chama, utilizando uma lança central no queimador a ar, ou ainda, utilizando um queimador oxi-combustível, onde quantidades estequiométricas de oxigênio e combustível são misturadas em um queimador especialmente projetado para tal. A escolha de uma técnica especial pode ter um impacto

significativo sobre o funcionamento do forno e a magnitude da redução de custos conseguida. Para ser realizada a escolha correta da tecnologia será necessário um levantamento em conjunto com o cliente, onde deve-se levar em consideração o tipo e tamanho do forno, quais serão os benefícios desejados pelo produtor de alumínio secundário, as considerações de custo e de capital de investimento disponível para o projeto.⁽²⁾

Instalando queimadores projetados para o uso de oxigênio em vez de ar, geralmente, resulta em maior economia no custo operacional por tonelada de alumínio produzida. No entanto os custos relativos à aquisição de um novo sistema de combustão são superiores aos de outras técnicas mais simples de utilizar oxigênio, e por este motivo, para cada projeto será aplicada uma tecnologia específica, de modo a se adequar as necessidades do produtor de alumínio secundário.

A primeira aplicação bem sucedida de oxigênio na fusão de alumínio, foi em um forno rotativo e utilizou uma combinação de ar-combustível e oxi-combustível chamado EZ-Fire™.

2.2 A Primeira Aplicação Bem Sucedida de Oxigênio na Fusão de Alumínio

A tecnologia de oxi-combustão EZ-Fire™ foi desenvolvida pela Air Products no final dos anos 1980. A primeira instalação comercial foi em 1989 em um forno de 11 toneladas, rotativo de passe simples. A instalação proporcionava ao usuário uma integração de um queimador oxi-combustível com um queimador ar-combustível, com a flexibilidade de o usuário escolher o fornecimento de calor para o forno com ar-combustível ou com oxi-combustível de forma independente. Desta forma foram otimizadas as taxas de fusão, compensando as restrições de operações existentes, tais como, tempo de carregamento e vazamento do alumínio líquido muito lento.⁽⁵⁾

A maioria dos sistemas ar-combustíveis são compatíveis com a tecnologia EZ-Fire™. Um queimador oxi-combustível desenvolvido sob encomenda é inserido no queimador ar-combustível existente. O tempo necessário para a instalação deste sistema é de aproximadamente 3 horas e é feito geralmente entre as corridas do forno de fusão. Todo o sistema de controle e painel de vazão deverão estar totalmente integrados para oferecer um sistema de combustão seguro e eficiente ar-oxi-combustível. Este conceito de queimador no queimador consiste em um queimador ar-combustível envolvendo uma chama oxi-combustível, protegendo o queimador e o material carregado da parte mais quente da chama. Este sistema foi muito adotado durante a década de 1990 e atualmente aproximadamente 10 fornos utilizam esta tecnologia.⁽⁵⁾

Melhorias operacionais alcançadas incluem aumento da produção em mais de 30%, economia de combustível de 20% a 30%, redução das emissões para os filtros de mangas, menor temperatura nos filtros de mangas e redução de 50% no transporte de particulados. Desde a primeira instalação do sistema ar-oxi-combustível, foram feitas significativas melhoras. Com as evoluções tecnológicas, os sistemas ar-oxi-combustível foram sendo aplicados nos fornos revérberos e os fornos rotativos foram atualizados e adaptados para utilizarem 100% de oxigênio na combustão, eliminando completamente o ar.⁽¹⁾

Queimador Ar/Oxi-Combustível em forno rotativo de passe simples

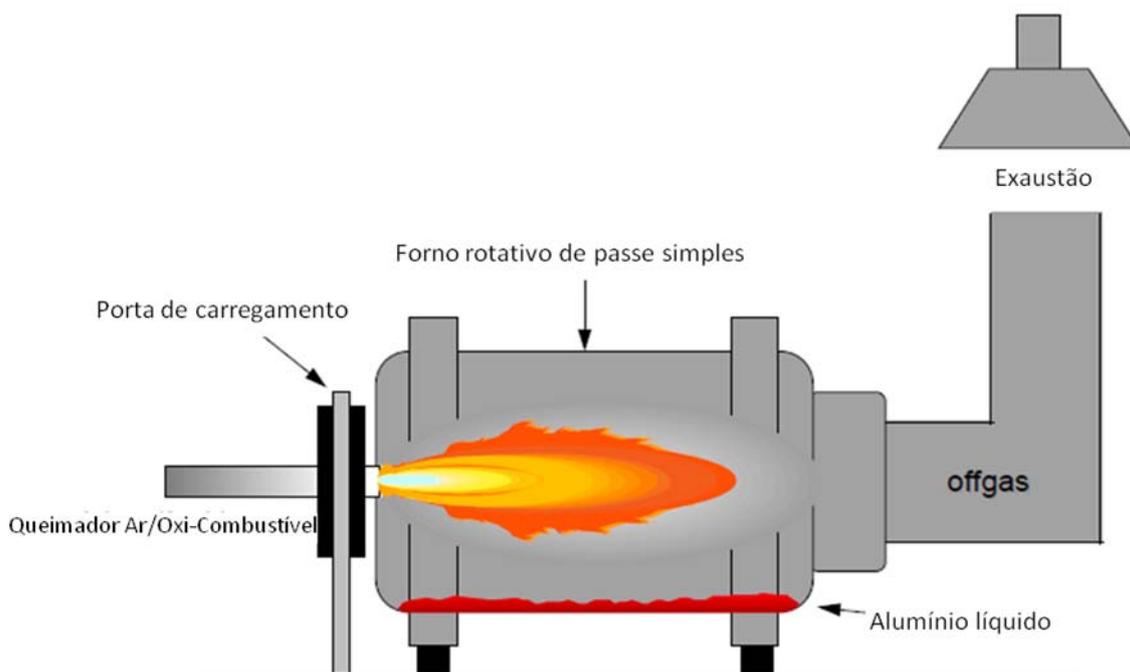


Figura 3. Queimador Ar/Oxi-Combustível em forno rotativo de passe simples.

Nas atualizações dos fornos rotativos para utilização de oxigênio, tornou-se claro que o uso de oxigênio proporciona melhoria nos métodos tradicionais de fusão. Houve, no entanto, limitações dependendo do forno, método e prática operacional. Por exemplo, reduzir o tempo de vazamento do forno, torna-se mais importante do que as reduções dos tempos de fusão.

2.3 Mecanismos de Transferência de Calor

Em fornos rotativos a transferência de calor é via radiação da chama e via contato direto entre a parede refratária e o banho de alumínio. A constante mistura do banho de alumínio e o contato direto com a parede refratária quente maximizam a transferência de calor no interior da sucata, tornando o forno rotativo um dos mais eficientes em transferência de calor. Por exemplo, para uma queima ar combustível os fornos rotativos utilizam normalmente de 800 kcal/kg - 950 kcal/kg, enquanto um forno revérbero utiliza de 1.100 kcal/kg – 1.600 kcal/kg. As experiências com fornos rotativos mostraram que eles são eficientes o suficiente para aproveitar todo o calor fornecido pelo queimador 100% oxi-combustível.⁽³⁾

2.4 Performance de Fornos Rotativos

Os principais tipos de fornos rotativos estão classificados da seguinte maneira:

- fixo de passe simples (queimador de um lado e exaustão do outro);
- fixo de passe duplo (queimador e exaustão do mesmo lado); e
- basculante de passe duplo (conhecido como forno tipo pêra, queimador e exaustão no mesmo lado, porém com porta e basculante).

Com as experiências em fornos rotativos, foram sendo constatadas algumas limitações típicas para cada modelo de forno e trabalhando com estas limitações que os fabricantes foram modernizando os projetos de fornos rotativos até chegarmos ao

que há de mais moderno no mercado de alumínio hoje que é o forno rotativo basculante. Com esta modernização constatamos que todas as medidas devem ser tomadas de modo a proporcionar uma boa vedação da porta. As vantagens da porta incluem:^(3,6)

- menor perda de calor por radiação, podendo chegar a uma economia de 200.000 kcal/h (isto corresponde a aproximadamente 22 Nm³/h de gás natural ou 18 kg/h de GLP);
- melhor controle da atmosfera do forno;
- redução de arraste de particulados, maior economia com filtro tipo manga.
- redução do ruído;
- aumento da produção de 10% a 15%; e
- aumento na eficiência da ordem de 15%.

Forno rotativo passe duplo 100% oxi-combustível

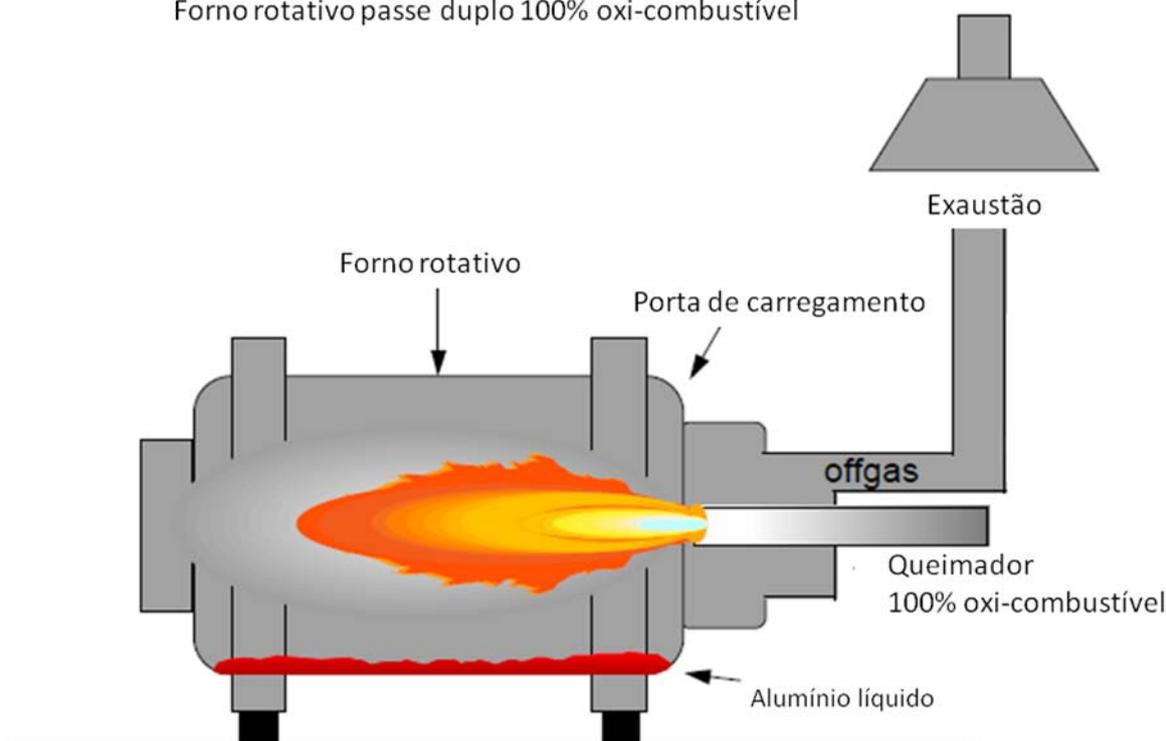


Figura 4. Forno rotativo passe duplo 100% oxi-combustível com porta de carregamento.

2.5 Queimadores Oxi-Combustível

Com a busca constante da melhoria dos processos, os queimadores também evoluíram na direção de melhor performance. A Air Products, por sua vez, tem investido fortes recursos no desenvolvimento de queimadores específicos para serem aplicados em fornos rotativos, com o objetivo de maximizar as taxas de produção, eficiência metálica e eficiência térmica do processo, maximizando o benefício econômico do processo 100% oxi-combustível.

Através de experiências em fornos rotativos constatamos a importância de fornecer uma chama de alta luminosidade e radiação, para isso é preciso fazer um estudo do projeto do forno para dimensionarmos o queimador ideal para o processo. Com um queimador corretamente selecionado e um forno bem vedado pela porta, o queimador 100% oxi-combustível minimiza os gases de combustão no interior do forno, aumentando o tempo de residência dos gases e conseqüentemente maximiza a produção e proporciona um excelente controle da atmosfera do forno. As

características da chama são essenciais para a performance do forno e foi pensando nisso que a Air Products desenvolveu a tecnologia Rapidfire™.

2.6 Sistema de Controle (PLC)

Em conjunto com o desenvolvimento dos queimadores está o desenvolvimento da lógica de controle (PLC) do sistema de combustão. O PLC permite uma fácil interface com o processo e promove flexibilidade operacional. Além de definir e incluir todos os parâmetros de intertravamento de segurança do processo, ele proporciona ao usuário utilizar ao máximo o benefício tecnológico proporcionado pelo queimador.⁽⁵⁾

O sistema de coleta de dados permite ao usuário controlar parâmetros como a temperatura do forno, o consumo de combustível, o consumo de oxigênio, o tempo total de cada processamento (corrida), além de demonstrar as principais variações do processo e indicar quando o forno está com todo o material processado e pronto para vaziar o alumínio líquido.

Para cada tipo de material processado podemos utilizar uma prática operacional diferente pré-estipulada no PLC. Por exemplo, uma opção estará disponível para quando houver o processamento de uma sucata contaminada. Hidrocarbonetos e outros combustíveis (tinta e verniz da lata e óleo de cavaco de usinagem) deixam o processo lento devido a quantidade excessiva de fumos, pois quando este material é colocado no forno quente há uma volatilização destes produtos e com isso uma falta de oxigênio no forno, não promovendo uma combustão completa, emitindo elevadas quantidades de CO para a atmosfera e, juntamente, reduzindo a energia gerada pela combustão. Para promover uma combustão completa o usuário então selecionaria uma prática operacional de forma a utilizar este combustível gratuito contido no alumínio como energia para o processo, uma vez que os gases da exaustão mostrarem que não há mais combustíveis livres o sistema voltará automaticamente ao fluxo padrão de oxigênio e combustível. Esse recurso economiza combustível, aumenta consideravelmente a produção, minimiza as emissões atmosféricas e permite um processamento de sucata de propriedades inferiores e com menores custos.

2.7 Mecanismo de Formação de Escória

A formação de escória sempre foi um fator decisivo na seleção de um sistema de combustão para fornos de alumínio, de fato esta função é a mais importante economicamente, já que, ao reduzir a formação de escória haverá um aumento da produtividade do forno mantendo os mesmos custos de processamento.

É de conhecimento que a formação de escória se dá, principalmente, devido a três fatores, sendo eles:⁽⁷⁾

- tempo de exposição – manter o alumínio líquido exposto por longo período com calor excessivo;
- nível de oxigênio na atmosfera – expor o alumínio líquido a uma atmosfera adjacente oxidante; e
- temperatura excessiva – manter a superfície do alumínio exposto a altas temperaturas. Pode ser ocasionado também por contato direto do banho de alumínio líquido com a chama.

Estes fatores são de grande importância e demonstram por que muitas empresas têm dificuldades nas conversões para sistemas de aquecimento oxi-combustíveis em fornos de fusão de alumínio, já que a chama oxi-combustível promove todas estas características (alta temperatura e chama rica em oxigênio) e com isso seria um sistema propício a formação de escória. Porém, através de uma análise criteriosa da operação dos fornos rotativos e também dos sistemas de combustão, a Air Products desenvolve queimadores e sistemas especialmente aptos para trabalharem neste tipo de forno. A partir dos potenciais problemas foram desenvolvidas as soluções que viabilizaram a tecnologia oxi-combustível para a indústria de re-fusão do alumínio. Os novos sistemas de combustão (queimadores e sistemas de controle) desenvolvidos pela Air Products para o processo oxi-combustível são capazes de reduzir a formação de escória, quando comparados com sistemas ar-combustível, uma vez que não deixam a atmosfera do forno oxidante (Figura 5).

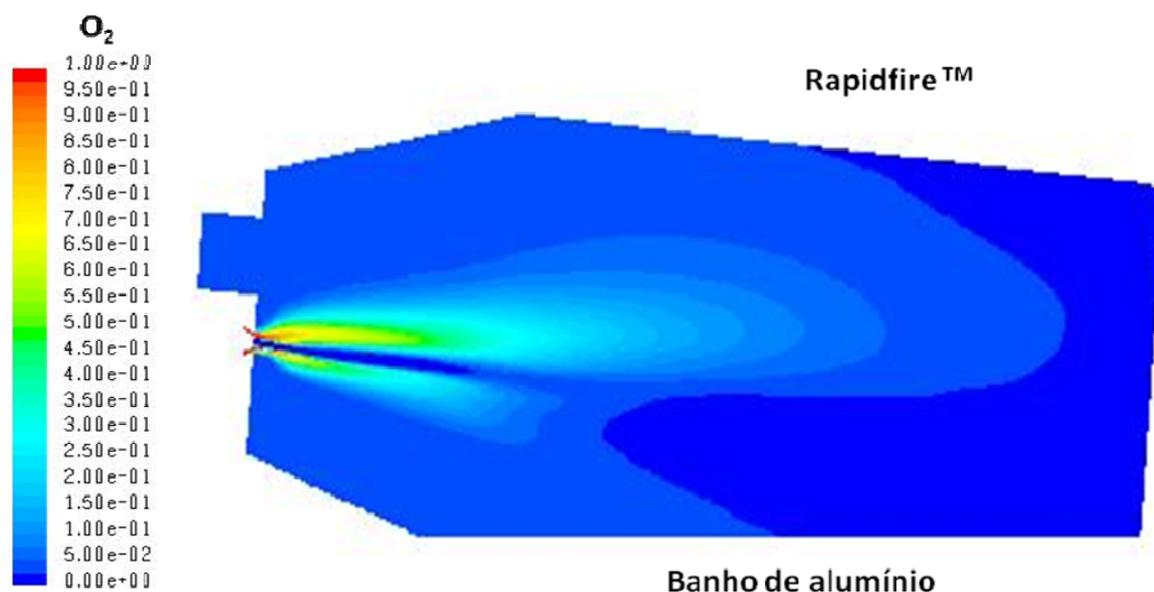


Figura 5. Análise do oxigênio contido na atmosfera do forno.

3 RESULTADOS

Para ilustrar exemplos de sucesso da aplicação de oxi-combustão em fornos rotativos para fusão de alumínio, abaixo serão apresentados dois estudos de caso. Estes dois estudos estão entre os casos de sucesso da Air Products no mundo e demonstram claramente os benefícios auferidos ao utilizar a tecnologia de sistemas oxi-combustíveis.

3.1 Forno Rotativo Basculante Oxi-Combustível de 12 Toneladas

Neste caso demonstraremos a performance de um forno de 12 toneladas operado a oxi-combustível.

- consumo de gás: 300 kcal/ton de Al produzido (37 m³/ton);
- consumo de oxigênio: 75 m³/ton de alumínio produzido;
- % de perdas de metal: 1,8% de perdas ao fogo;
- tempo de queimador ligado: 55 minutos;
- tempo de carregamento e operação: 35 minutos;
- tempo de vazamento e limpeza: 25 minutos; e
- tempo total do processo: 1h 55min.

Os dados acima indicam um ciclo de produção relativamente curto, bem como um consumo específico energético reduzido, quando comparado com resultados práticos industriais observados para fornos rotativos.

O ponto chave para o sucesso desta aplicação foi o correto ajuste dos parâmetros do queimador, que incluem configuração do controle do sistema de combustão, estequiometria de chama, o controle da chama de modo a evitar a queima prematura do metal, o correto posicionamento do queimador no forno e tudo isso associado a uma correta operação do forno.

4 DISCUSSÃO

Este estudo de caso demonstra o comparativo de um forno de 12 toneladas operado com ar-combustível e convertido para oxi-combustível. Todos os custos foram adotados utilizando os custos atuais e uma média de processamento de materiais durante um ano.

Tabela 1. Comparativo ar-combustível X oxi-combustível para forno de 12 toneladas

	Ar Combustível	Oxi combustível
Produção diária (kg)	51.750	93.500
Custo diário com Gás (R\$)	6.174,00	3.988,60
Custo diário com Oxigênio (R\$)	-	2.887,50
Custo fixo diário (R\$)	11.500,00	11.500,00
Custo variável com sal (R\$)	2.580,00	4.675,02
Custo total diário (R\$)	20.254,00	23.051,12
Custo específico (R\$/kg)	0,3913	0,2465

Assumindo um processamento de 1.500 toneladas/mês, o benefício econômico mensal desta operação será proporcional a R\$ 217.268,40.

5 CONCLUSÃO

A utilização de sistemas de combustão oxi-combustível permite redução significativa do consumo de combustível, da ordem de 55%, redução na perda de metal ao fogo, aumento das taxas de produção com o mesmo custo fixo, e redução de até 70% nas



emissões atmosféricas, economizando com a manutenção e instalação de filtros do tipo manga. A utilização de oxi-combustível é perfeitamente viável tanto economicamente como operacionalmente. Podemos constatar que a utilização de 100% oxi-combustível é o processo mais adequado para um forno rotativo de fusão de alumínio. Entretanto, foi constatado que a utilização deste sistema depende da correta análise do forno e do ajuste de parâmetros operacionais associado a uma tecnologia de queimadores e sistemas de controle da combustão. É um ponto chave a experiência operacional do sistema a fim de auferir todos os benefícios oferecidos pela tecnologia.

Agradecimentos

Aos clientes e a todos os envolvidos no processo de desenvolvimento deste processo. A Air Prodducts do Brasil bem como a Air Products and Chemicals, Inc.

REFERÊNCIAS

- 1 D.Saha and C.E. Baukal, Non Ferrous Metals, no Oxygen- Enhanced Combustion, C.E. Baukal (ed.), CRC Press, Boca Raton,FL, pg. 181-214, 1998
- 2 M.D. D' Agostini.,” High Efficiency, High Capacity, Low -Nox Aluminum Melting Using Oxygen Enhanced Combustion”, relatório final para U.S. Department of Energy, Cooperative Agreement No. DE-FC07-97ID13514, Maio 2000
- 3 L. Gluns e S. Schemberg, Advantages of oxy-fuel burner systems for aluminium melting, publicado na revista Aluminium World, 2003
- 4 North American Combustion Handbook, segunda edição.
- 5 R.S. Heweterson e D. Vandall, Improvements in Scrap Recycling and Dross Processing Using Oxygen, Air Products, 2002
- 6 M.W. Paget, J.F. Heffron, P. Richer “The Evolution of Rotary Melting at Recyclage D’Aluminum Quebec Inc.’s Two Aluminum Dross Processing Plants” T.M.S. 1996.
- 7 J.S. Becker e J.F. Heffron., “The Changing Role of Oxygen-Based Combustion in Aluminum Melting”. Light Metal Age, Junho , 1994.