



# TECNOLOGIA OXI-COMBUSTÍVEL - REBOX<sup>®</sup> “FLAMELESS” - EM FORNOS DE REAQUECIMENTO E RECOZIMENTO PARA O AUMENTO DA CAPACIDADE PRODUTIVA E REDUÇÃO DOS CUSTOS ENERGÉTICOS - RESULTADOS INDUSTRIAIS<sup>1</sup>

Carlos Eduardo Kfour<sup>2</sup>  
Paulo Rogério Nunes<sup>3</sup>  
Anders Lugnet<sup>4</sup>  
Joachim von Schéele<sup>5</sup>

## Resumo

Grande parte dos fabricantes de aço buscam soluções para aumentar a capacidade produtiva de seus fornos de reaquecimento e recozimento em laminações e forjarias. Os objetivos são: vender mais, aprimorar a utilização dos investimentos feitos nos processos de laminação e recozimento existente e promover uma possível reestruturação da empresa e melhor gerenciamento da demanda para picos de produção. Um aumento de produção adicional também permite ações de reparo e manutenção dos fornos. A tecnologia em queimadores flameless 100% a oxigênio permite simular um queimador ar-combustível, evitando pontos quentes dentro do forno e a não uniformidade do material durante aquecimento. Além disso, a remoção do lastro de nitrogênio do processo de combustão melhora drasticamente a transferência de calor da atmosfera do forno para o material, aumentando consideravelmente a eficiência térmica do forno. Relata-se que em mais de 120 instalações Rebox<sup>®</sup> oxi-combustível a substituição do ar de combustão por oxigênio puro industrial, pode aumentar em até 50% o rendimento do forno e reduzir em até 50% o consumo de combustível, podendo ser usados combustíveis de baixo poder calorífico uma vez ser possível atingir altas temperaturas de chama. O processo de combustão a base de oxigênio é compacto e de alta potência e se adapta a projetos em novos fornos ou em fornos já existentes, estando em conformidade com os requisitos cada vez mais rígidos acerca de emissão de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>.

**Palavras-chave:** Oxi-combustível; Reaquecimento; Rebox.

## OXYFUEL TECHNOLOGY – REBOX<sup>®</sup> FLAMELESS- FOR REHEATING AND ANNEALING FURNACES TO INCREASE CAPACITY AND REDUCE OPERATION COSTS – INDUSTRIAL RESULTS

### Abstract

Most steel producers need solutions for higher production throughput in their reheat and annealing furnaces. The goals are to sell more and to improve utilization of investments in existing rolling mills and annealing operations, but also to facilitate the possible restructuring of business and to better manage peak volume demand. Additional throughput capacity also allows for repair and maintenance activities. Removing the nitrogen ballast from the combustion and heat transfer process improves furnace operation drastically. It has in over 120 all Rebox oxyfuel installations been reported that if replacing the combustion air with industrial grade oxygen, that furnace throughput can be boosted by up to 50%, and fossil fuel consumption cut by 50%. It facilitates the use of low-grade fuels since the necessary high flame temperatures can be achieved. Rebox is compact and powerful for a cost-effective retrofit in an existing or new furnace. It complies with ever-stricter requirements for emissions of CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>.

**Key words:** Oxyfuel; Reheating; Rebox.

<sup>1</sup>

*Contribuição técnica ao 31º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 25º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 17 a 20 de agosto de 2010, Foz do Iguaçu, PR*

<sup>2</sup>

*Engenheiro de Aplicação, Iron Foundry & Steel, The Linde Group*

<sup>3</sup>

*Gerente de Segmento - Metalurgia, The Linde Group*

<sup>4</sup>

*Steel Application Development, The Linde Group*

<sup>5</sup>

*Marketing Manager – Metals & Glass Industries, The Linde Group*



## 1 INTRODUÇÃO

Aumento de produção e flexibilização operacional são muitas vezes os principais objetivos de diversas indústrias no setor de laminação e forjaria. Simultaneamente, os preços dos combustíveis sofrem grandes variações, tornando margens pré-calculadas e preços ao consumidor difíceis de serem planejados e mantidos sendo, portanto, de real interesse a redução dos custos de produção. Paralelamente ocorre uma escassez de capital e forte competição, implicando na máxima utilização dos recursos existentes, equipamento e pessoal, devendo também haver controles rígidos sobre as emissões, que podem ter impacto no custo final do produto.

Dados sobre a combustão ar-combustível comparativamente com uma combustão oxí-combustível em fornos de reaquecimento e recozimento são mostrados na Figura 1. O uso efetivo do oxigênio puro na combustão melhora substancialmente a eficiência energética em fornos de reaquecimento e recozimento e diminui aproximadamente 70% o volume dos gases de exaustão.

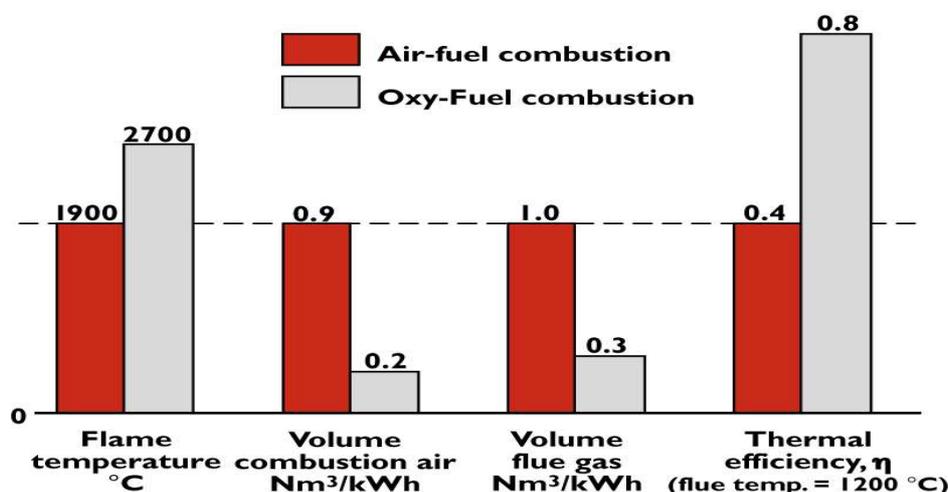


Figura 1- Comparação de combustão com e sem oxigênio.

O presente trabalho discute o uso de queimadores oxí-combustível Rebox<sup>®</sup> Flameless e sua implantação em fornos de reaquecimento e linhas de recozimento com resultados significativos no aumento de produção e na redução no consumo de combustível.

## 2 OXI-COMBUSTÍVEL – LARGA EXPERIÊNCIA E UTILIZAÇÃO NA FABRICAÇÃO DO AÇO

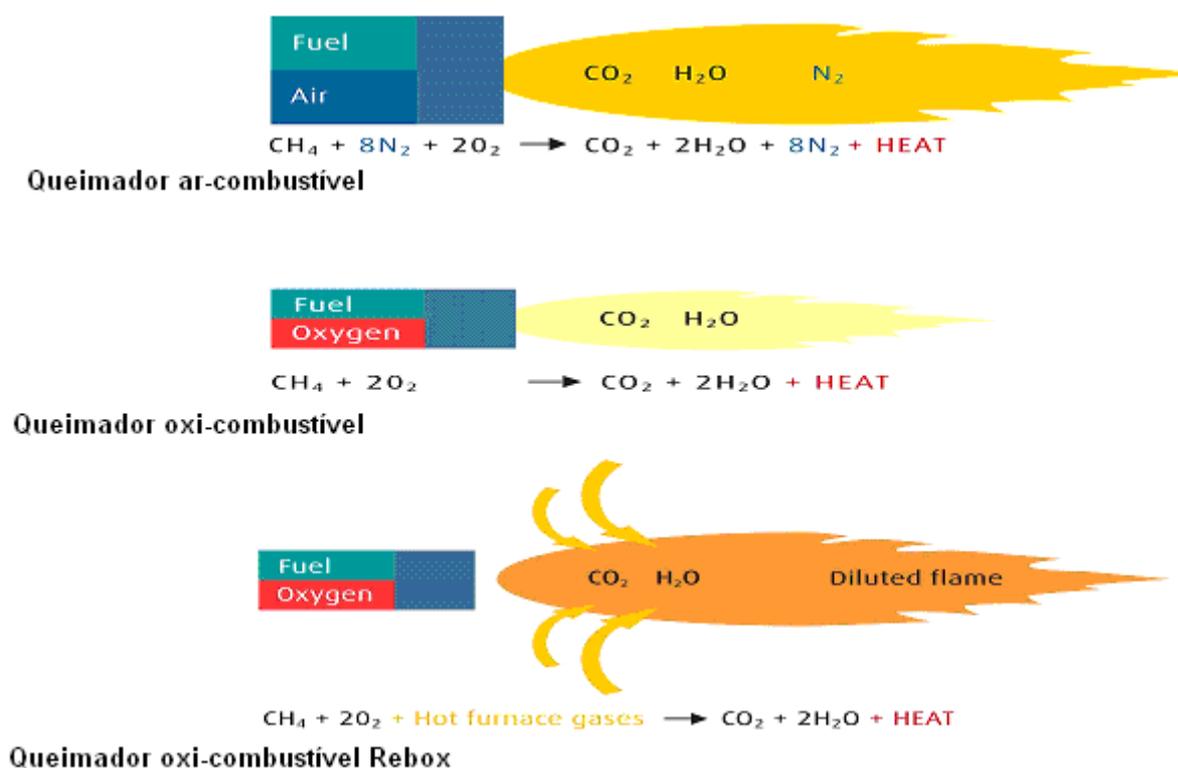
Após a Segunda Guerra Mundial, grandes volumes de oxigênio começaram a serem usados na fabricação do aço, especialmente através do processo do Basic Oxygen Furnace (BOF). Os benefícios em se utilizar o oxigênio em várias aplicações nesta fabricação, tais como boosting em Fornos Arco Elétrico e preaquecimento de vasos (ex: painéis de transporte, convertedores e painéis intermediárias) são bem conhecidas: consumo reduzido de energia, maior vida útil dos fornos, menor tempo de ciclo, menos painéis em operação, menos desgaste de refratário, eletrodos e etc. Os bons resultados destas aplicações são, contudo, ainda limitados quando comparados à utilização de queimadores oxí-combustível em aplicações envolvendo aço semi-acabado; isto é, no processo de laminação a quente e operações de



recozimento. Aqui, grandes volumes de aço são aquecidos pelo menos uma vez durante longos períodos a altas e controladas temperaturas, requerendo grande volume de energia.

## 2.1 Combustão à Base de Oxigênio sem Lastro de Nitrogênio

Como é sabido, são necessários três elementos para haver uma combustão: combustível, comburente e energia suficiente para ignição. O processo de combustão torna-se mais eficiente se o combustível e o comburente puderem se encontrar e reagir sem qualquer restrição. O oxigênio diluído em 78% de nitrogênio e 1% de argônio, ou seja, o ar que respiramos, não oferece condições ideais para a combustão e a transferência de calor.<sup>(1)</sup> Na Figura 2, seguem os tipos de chamas que obtemos com diferentes tipos de comburente.



**Figura 2** – Diferentes tipos de queimadores proporcionam diferentes tipos de chama.

Em processos de aquecimento considerar somente uma combustão eficiente não é o suficiente, deve-se também levar em consideração o aspecto da transferência de calor. Através de convecção, condução e radiação, o calor é transferido para a superfície de um produto sólido. A transferência de calor para o produto se dá apenas por condução. Para um aquecimento eficaz e uniforme, a composição do gás e o padrão do fluxo dentro do forno são importantes. Comparada ao ar-combustível, a combustão à base de oxigênio puro possui uma pressão parcial muito maior quando nos referimos aos dois produtos da combustão,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , que melhoram a transferência do calor. Uma vez que os gases de exaustão não são diluídos com o nitrogênio, a fase gasosa terá um papel mais ativo no processo de transferência de calor, não apenas porque a condutividade desta transferência e a



capacidade de aquecimento do  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , são maiores, mas também porque ambos são gases atômicos-3 de alta radiação de calor, conforme Figura 3.

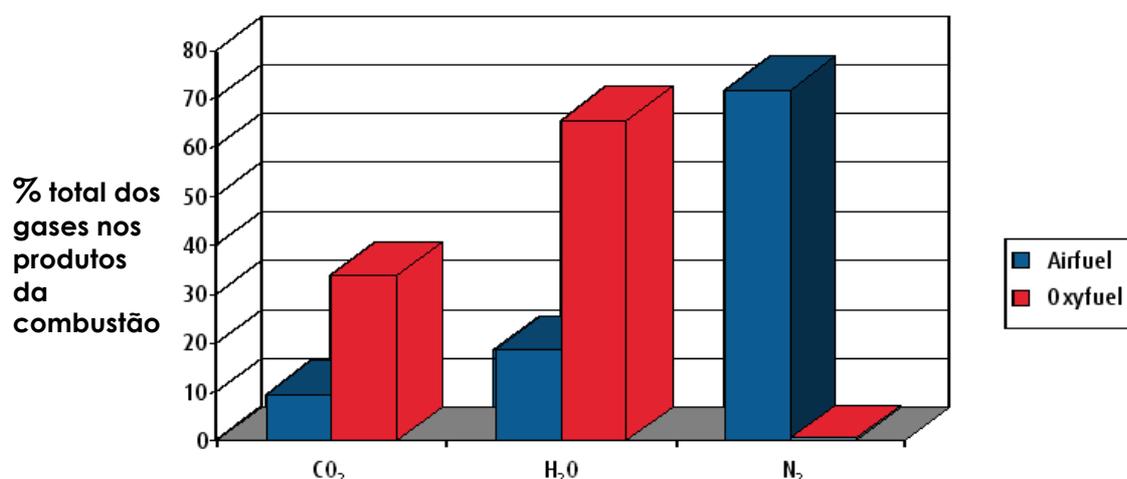


Figura 3 - Composição dos produtos de uma combustão estequiométrica Airfuel x Oxyfuel.

O volume dos gases de exaustão é reduzido em 70% a 80% por não haver presença de nitrogênio e devido a um menor consumo de combustível. Sendo assim, o tempo de residência dos gases de combustão será maior, com mais tempo para transferir calor para o produto. Na verdade, o produto é imerso em um fluido de gases à base de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , isto é, um ambiente úmido com uma maior capacidade de transferência de calor. Quando comparamos um forno oxi-combustível com um forno ar-combustível, programados para a mesma temperatura, o material no primeiro atinge mais rapidamente os dados pré-estabelecido.

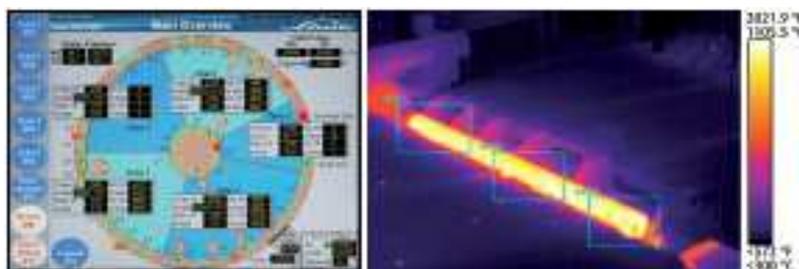
### 3 MAIOR CAPACIDADE DE PRODUÇÃO EM FORNOS EXISTENTES

Qualquer empresa deve expandir e crescer a ponto de pelo menos cobrir a taxa de inflação, mas acima de tudo a ponto de ganhar negócios e aumentar sua participação de mercado. Na fabricação do aço, o excesso da capacidade de produção nem sempre se encontra alocada em locais ideais. As operações em um ou mais lugares estão cada vez mais sendo concentra na melhor utilização dos investimentos feitos em equipamento e pessoal, nos processos de laminação e nas operações de recozimento. A falta de capacidade e de flexibilidade também impede planejamento eficiente, produção a volumes máximos ou a gestão de paradas repentinas da produção, comuns na fabricação do aço. O desenvolvimento avançado de aços de alta qualidade tende a demandar procedimentos de aquecimento mais longos e complexos, implicando às vezes em várias repetições. Isto requer maior capacidade de aquecimento e flexibilidade para se produzir uma vasta gama de produtos. A maioria dos fabricantes gostaria de encontrar soluções que não envolvam a aquisição de um novo forno ou a expansão de um forno que já possuem. É também caro e freqüentemente menos eficiente gerar estoque de produto ou introduzir um turno adicional de trabalho.

O Forno de Soleira Rotativa da Arcelor Mittal Shelby nos EUA exemplifica a evolução do uso do oxigênio impulsionando o rendimento do Forno. Foi realizada a conversão total para tecnologia de queimadores REBOX<sup>®</sup>, redistribuindo a potência



de 32MW para 17,9 MW e redefinindo as zonas de aquecimento, que passaram de 4 para 5 zonas, além da eliminação de 2 das 3 saídas dos gases de exaustão.



**Figura 4** – Definição das zonas de aquecimento e visualização da uniformidade de temperatura na peça.

Foram obtidos os seguintes resultados:

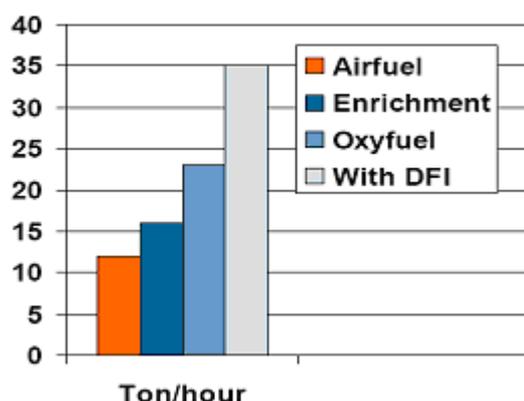
- aumento de produção: +25%;
- redução consumo específico de combustível: -65%;
- melhor uniformidade de temperatura (50% menos diferença de temperatura ao longo do Billet); e
- redução formação carepa: -50%.

A experiência de ter convertido mais de 120 fornos de reaquecimento e recozimento de ar-combustível para oxi-combustível mostra que a alta eficiência da combustão e o processo de transferência de calor reduziram o tempo do ciclo de aquecimento e aumentou a produção dos fornos. Melhorias de 50% não é incomum em casos relatados sobre aumento de até 80% da capacidade de produção.

O aumento da capacidade de produção pode ser usado de várias formas. Para aumentar a produção com flexibilidade de acompanhar as flutuações de pedidos, o manuseio rápido de picos de produção e o planejamento do trabalho e das atividades de manutenção, evitando a necessidade de se introduzir turnos adicionais de trabalhadores.

Na linha de recozimento da Outokumpu Stainless steel, na Suécia, temos a utilização do sistema Rebox-DFI, desenvolvido especificamente para linhas de recozimento e galvanização, e os resultados obtidos em termos de eficiência de produção estão descritos na Figura 5.

**DFI – Outokumpu Stainless Annealing line**



**REBOX®**  
Increased production in existing furnaces 42

**Figura 5** – Produtividade na linha de recozimento da Outokumpu Stainless Steel.



### 3.1 Redução do Custo e da Dependência do Combustível

Hoje, ao convertemos ar-combustível em oxí-combustível, a economia do combustível específico ocorre em torno de 25% a 50%, atingindo níveis de 250 kWh/tonelada de aço aquecido. A redução do consumo também reduz o impacto dos custos flutuantes do combustível sobre o produto. A eficiência térmica encontra-se em torno de 75-90% (Figura 6) com economias ainda maiores de combustível.

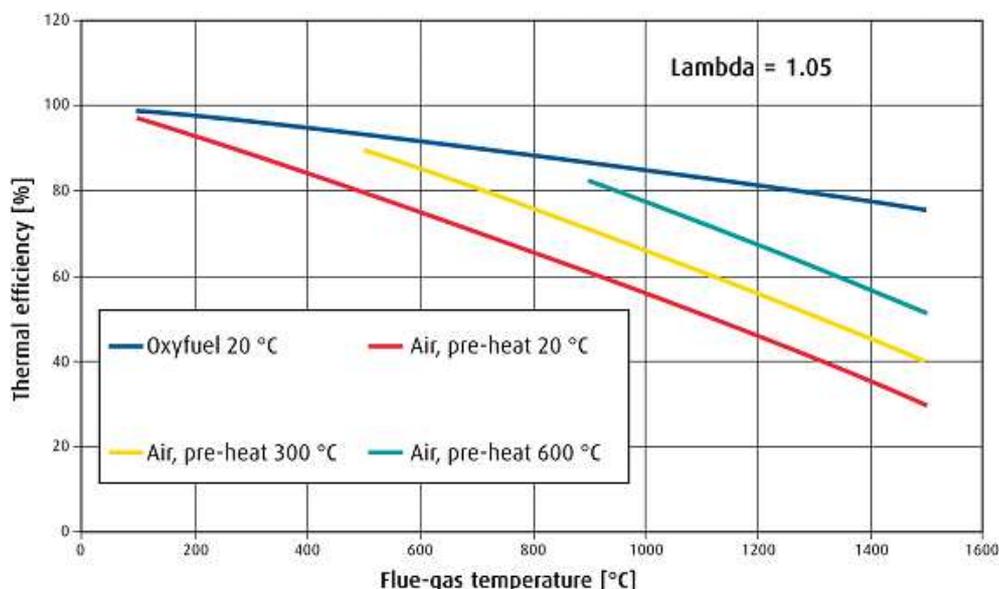


Figura 6 - Comparação de eficiência térmica.

A gestão da energia na fabricação do aço é encarada com seriedade uma vez que reduz os custos e a dependência do fornecimento de combustível. Gases de baixo conteúdo calórico, como o gás do alto-forno, gás de sopro para alto-fornos ou BOF podem ser reutilizados na combustão, pois o oxigênio proporciona à chama as temperaturas requeridas para as aplicações de aquecimento.<sup>(2)</sup>

### 3.2 Queimador Rebox – Compacto, Simples e De Rápida Aplicação

O fato de a combustão com oxigênio puro não ter a presença do nitrogênio implica em soluções práticas e custo-efetivo no que se refere à tecnologia e sua manutenção. Não há mais necessidade de grandes queimadores ou dutos de ar de combustão que requerem sopradores elétricos. Os queimadores Rebox são compactos (Figura 7), e de fácil instalação em fornos existentes, seja para boosting ou para conversão completa do forno para oxí-combustível. Por exemplo, um queimador moderno oxí-combustível de 2.5 MW, tipo flameless e refrigerado a água, pesa apenas 10-20 kg. Sistemas de limpeza de gases de combustão também podem ser eliminados ou mais eficientemente utilizados, reduzindo assim manutenção, custos operacionais e de instalação.



**Figura 7-** A figura à esquerda mostra um queimador oxi-combustível cerâmico de 2MW – tipo flameless. À direita, um queimador oxi-combustível flameless refrigerado a água. Ambos integram ignição e célula UV.

A aplicação do oxi-combustível em um forno existente, previamente equipado com expandir o forno ou construir uma unidade adicional. Este dado é de considerável interesse uma vez que a logística do material, a instalação da linha de produção e o espaço de piso disponível dentro da fábrica normalmente demandam tempo par que possam ser implementados ou modificados. Em 2003, a Outokumpu Stainless - fábrica da Degerfors - Suécia, encomendo um projeto *turnkey*, que consistiu na troca de todos queimadores existentes ar-combustível por queimadores Rebox, e também incluía a reconstrução e a reforma do forno já gasto pelo uso. Um dos pontos de decisão foi que com oxi-combustível, o rendimento do forno poderia ser aumentado de 40% a 50% sem qualquer necessidade de aumento do tamanho do forno e de mudança das placas de carga. A performance foi garantida, incluindo menor consumo de combustível e melhor uniformidade da temperatura.



**Figura 8.** Forno da Outokumpu reformado com queimadores Rebox.

Com o aumento de 45%-50% no rendimento, o forno laminador de placa da Outokumpu, Suécia pode acumular volumes de produção de outros locais. Quanto ao design dos novos fornos de reaquecimento e de recozimento, a tecnologia oxi-combustível facilita o uso de design mais compacto para os fornos oferecendo a mesma capacidade de produção dos fornos ar-combustível.



### 3.3 Menor Formação de Carepa

Um outro parâmetro do custo da qualidade diz respeito à formação de carepa, que normalmente é responsável por 1% - 2%, ou mais, da perda de material, isto é, um lingote de cada 100 ou 50 é refugo. A formação de carepa é função das propriedades do material, do conteúdo de oxigênio nos gases de combustão, da temperatura do forno e do tempo de aquecimento exigido. A temperatura do forno e o conteúdo de oxigênio são ambos parâmetros controláveis, sendo que aqui, o oxidante facilita uma redução importante do tempo de exposição do aço durante a operação de aquecimento. A experiência dos clientes e dos testes de laboratório indica níveis reduzidos da formação de carepa, apontando também para carepas de propriedades corretas quando consideramos uma operação de quebra simples e eficiente de carepa, antes das operações de laminação.<sup>(3)</sup>

O forno de recozimento contínuo de tiras na Outokumpu Stainless, em Nyby -Suécia, é provavelmente o mais eficiente do mundo neste tipo de forno considerando seu tamanho de 20m e capacidade de produção de 38 ton/h. A formação reduzida de carepas tornou possível manter a mesma capacidade de decapagem, apesar de um maior rendimento. Isto também resultou na não necessidade de passe de encruamento em certos aços 2B laminados a frio.<sup>(4)</sup>

### 3.4 Aquecimento Uniforme Melhorado

O processo de aquecimento afeta e aprimora certas propriedades, a qualidade e os acabamentos do produto que devem ser tanto previsíveis quanto controláveis, oferecendo resultados constantes. Os custos da qualidade frequentemente aumentam, devido a uma uniformidade precária da temperatura, o que torna a laminação e a forja sub-ideais, levando por vezes à necessidade de re-introdução do produto para uma segunda seqüência de aquecimento. Como anteriormente discutido, tem-se visto que as propriedades da transferência de calor do oxidante oferece condições ideais de aquecimento, que ocorre de modo mais rápido e completo.

### 3.5 Mesma Energia, mas Menor Temperatura da Chama

Para um aquecimento uniforme e mais eficiente é interessante ter uma baixa e plana curva de temperatura da chama, com limites para os picos de temperatura. A resposta para isto é a combustão *flameless* (sem chama) que tem sido utilizada em processos oxidante e adaptada para aplicação em fornos de escala industrial. No processo oxidante sem chama a temperatura da chama é próxima à temperatura da parede do forno, ou seja, até 100°C-200°C, de forma que para o olho humano, torna-se praticamente impossível detectá-la (Figura 9). Uma definição mais precisa seria a de que a combustão é diluída pelos gases da combustão espalhando assim um grande volume, chamado por alguns cientistas de “volume da combustão”, resultante de uma baixa temperatura da chama.



**Figura 9** – A imagem da esquerda mostra uma chama oxí-combustível convencional, enquanto a imagem da direita mostra o mesmo queimador com efeito flameless.

Além da redução da temperatura da chama, os queimadores Rebox efetivamente dispersam os gases da combustão por todo o forno, assegurando com um pequeno número de queimadores, um aquecimento mais eficaz e uniforme do material. A Ovako, em Hofors na Suécia, usa oxí-combustível em um total de 48 fornos-poço (figura 10) e 2 fornos de soleira giratória. Atingiram um aumento de 30% a 50% da capacidade de aquecimento nos fornos já existentes, atrelado a uma redução de 30% a 45% do consumo de combustível específico. A capacidade de rendimento extra possibilitou à Ovako uma maior flexibilidade, permitindo-lhe seguir as flutuações de entrada de pedidos e dos ciclos comerciais, promovendo paradas de manutenção melhor planejadas. Os fornos giratórios de laboratório têm hoje um consumo de combustível de 290 kWh/ton de aço aquecido. Um novo forno giratório foi comissionado em 1998, incluindo o oxí-combustível para performance máxima.<sup>(5)</sup> Há um longo tempo, a cidade de Hofors tem monitorado a emissão de  $\text{NO}_x$  e os dados mostram uma queda nos níveis de emissão desde a primeira introdução do oxí-combustível em 1994.<sup>(6)</sup>



**Figura 10** - Forno Poço na Ovako Steel – Suécia.

#### 4 CONCLUSÕES – OXI-COMBUSTÍVEL PARA RESULTADOS ECONOMICAMENTE VIÁVEIS

Combustão trata de combustível, oxigênio e ignição. Deixar o lastro de nitrogênio fora da equação não apenas aprimora o processo de combustão, mas também melhora os aspectos mais importantes da transferência de calor, uma vez que



nenhum calor se perde para o nitrogênio. Todos os três aspectos da transferência de calor são promovidos: convecção, radiação e condução. Isto também traz benefícios para uma simples instalação de poderosos queimadores de oxí-combustível, removendo os grandes queimadores de ar-combustível, os volumosos dutos de ar de combustão, ventiladores e recuperadores.

A transferência eficiente de calor do oxí-combustível reduz o tempo necessário de aquecimento, o que aumenta a capacidade de rendimento em até 50% nos fornos existentes, sem qualquer necessidade de mais pessoal. A utilização aprimorada dos investimentos feitos em equipamentos de produção e pessoal é a questão chave para a redução dos custos totais. A capacidade adicional cria também mais flexibilidade para o gerenciamento de picos de pedidos, paradas repentinas da produção e planejamento eficiente da manutenção. Ao intensificar a capacidade de rendimento, o oxí-combustível pode efetivamente reduzir custo. O consumo de combustíveis fósseis é reduzido de 30% a 50%, tendo o mesmo impacto correspondente de CO<sub>2</sub>. Torna-se possível uma maior redução do consumo de combustível através da utilização de formas de energia de baixa caloria, uma vez que temperaturas aceitáveis de chama podem ser atingidas com oxigênio.

O oxí-combustível não mais é simplesmente um meio bem conhecido de melhorar a fabricação do aço. Ele é o know-how dos processos de consumo que têm sido adquiridos, dos requisitos impostos por autoridades e das inovações técnicas que têm impulsionado o desenvolvimento da combustão do oxí-combustível, resultando em sistemas de aquecimento de bom funcionamento. Desde 1990, tem se constatado em mais de 120 instalações a viabilidade da tecnologia do oxí-combustível em criar soluções de custo total efetivas para fornos de reaquecimento e linhas de recozimento.

## REFERÊNCIAS

- 1 R. Eichler, IFRF Online Combustion Journal, (2003), p2.
- 2 J. Von Scheele, "Short-term opportunities for decreasing CO<sub>2</sub> emissions from the steel industry", SCANMET II (2004).
- 3 B. Holm, R. Pettersson, "Oxidation and pickling of stainless steel when annealing by oxyfuel", SIMR.
- 4 S. Ljungars, M. Gartz, J. Von Scheele, Nordic Steel and Mining Review (2004).
- 5 Arvidsson, M. Gartz, J. Von Scheele, Nordic Steel and Mining Review (2003).
- 6 P. Fredriksson, A. Lugnet, "Application of oxyfuel combustion in reheating at Ovako Steel, Sweden, Steel Rolling 2006 conference, Paris, France, 19-21/6