

# UTILIZAÇÃO DO PROCESSO OXI-COMBUSTÍVEL EM FORNOS DE REAQUECIMENTO E RECOZIMENTO PARA O AUMENTO DA PRODUÇÃO E REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL – TECNOLOGIA & RESULTADOS INDUSTRIAIS <sup>1</sup>

*Per Vesterberg<sup>2</sup>  
Gelson Rigobello<sup>3</sup>  
Ola Ritzén<sup>4</sup>  
Joachim von Schéele<sup>5</sup>*

## **Resumo**

A maioria dos fabricantes de aço precisa de soluções que aumentem o rendimento da produção em seus fornos de reaquecimento e recozimento. Os objetivos são: vender mais, aprimorar a utilização dos investimentos feitos nos processos de laminação e recozimentos existentes, 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 remoção do lastro de nitrogênio do processo de combustão e a transferência de calor melhoram drasticamente o funcionamento do forno. Relata-se que em mais de 90 instalações 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; Recozimento

## **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 utilisation 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 90 all 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. Oxyfuel combustion 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; Annealing

<sup>1</sup> 43º Seminário de Laminação – Processos, Produtos Laminados e Revestidos, 17-20 Outubro de 2006, Curitiba, Brasil.

<sup>2</sup> Gerente de Produto, Aço, Linde AG

<sup>3</sup> Especialista Sênior em Combustão, AGA Brasil

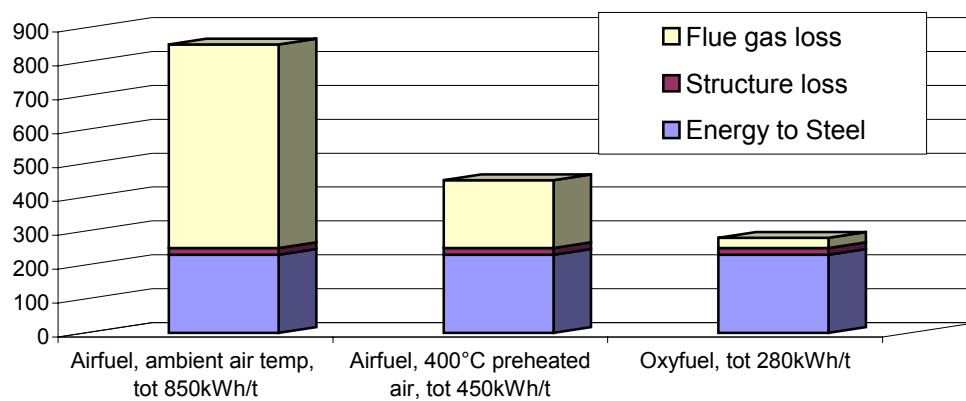
<sup>4</sup> Especialista Sênior em Metalurgia, AGA Suécia

<sup>5</sup> Gerente Senior de Produto, Aço, Linde AG

## INTRODUÇÃO

Há uma contínua busca por maior capacidade de produção e flexibilidade nos fornos de aquecimento, e nas operações de recozimento. Simultaneamente, os preços dos combustíveis sobem acompanhados de 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 mostram uma eficiência de 37% a 67% nos fornos de aquecimento e recozimento, Figura 1. O uso efetivo do oxigênio na fabricação do aço apontava também para a adoção e o uso de processos oxí-combustível nas operações de aquecimento e recozimento.



**Figura 1.** Aço aquecido energia/ton é comumente 37-67% menor com oxí-combustível.

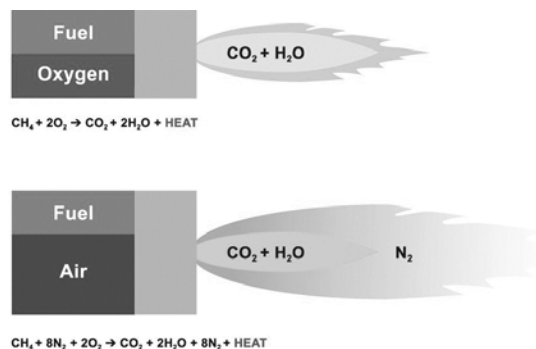
O presente trabalho discute o uso de queimadores oxí-combustível e sua implantação em fornos de aquecimento e linhas de recozimento com resultados significativos no aumento da produção e na redução no consumo de combustível.

### Oxí-combustível – larga experiência e utilização na fabricação do aço

Após a Segunda Guerra Mundial, grandes volumes de oxigênio começaram a ser 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 aquecimento 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.

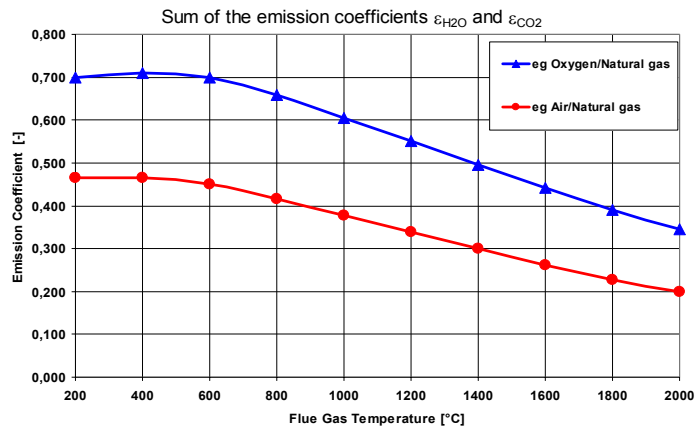
## Combustão à base de oxigênio sem lastro de nitrogênio

Apenas três coisas são necessárias para se iniciar e manter a combustão: combustível, oxigênio e energia suficiente para ignição. O processo de combustão torna-se mais eficiente se o combustível e o oxigênio puderam se encontrar e reagir sem qualquer restrição. 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. O oxigênio diluído em 78% de nitrogênio e 1% de argônio, ou seja, o ar que respiramos, não oferecerá condições ideais para a combustão e a transferência de calor. O nitrogênio será aquecido no processo de combustão e depois a energia transferida para o nitrogênio deve ser recuperada, a fim de economizar combustível, Figura 2.<sup>(1)</sup>



**Figura 2.** O processo oxi-combustível não perde calor para o nitrogênio na combustão.

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 possui uma pressão parcial muito maior quando nos referimos aos dois produtos da combustão, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> e do H<sub>2</sub>O são maiores, mas também porque ambos são gases atômicos-3 de alta radiação de calor, Figura 3.



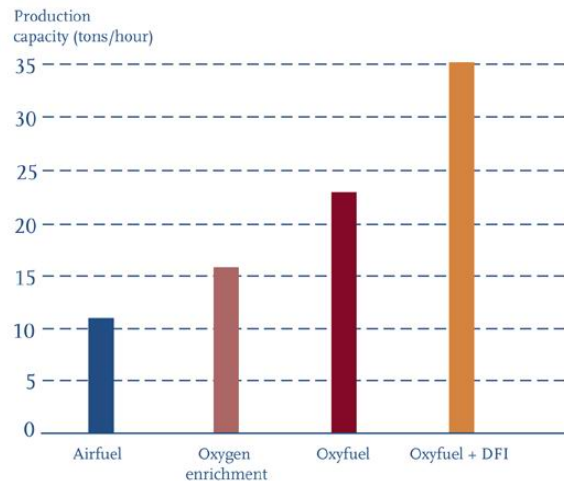
**Figura 3.** Emissividade do  $\text{CO}_2$  e do  $\text{H}_2\text{O}$  é maior para a combustão de oxi-combustível resultando em um aquecimento mais eficiente para aumento de produção dos fornos e menor consumo de combustível.

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.

### 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 frequentemente menos eficiente gerar estoque de produto ou introduzir um turno adicional de trabalho.

A linha de recozimento de tiras a frio da Outokumpu Stainless em Nyby é um bom exemplo desta evolução do uso do oxigênio para impulsionar o rendimento do forno. Desde o enriquecimento inicial do oxigênio em 1988, eles triplicaram o resultado no mesmo forno. A implantação total de queimadores oxi-combustível ocorreu em 1995, aumentando a capacidade para 23 t/h. A busca por rendimentos ainda melhores antecipou a instalação do oxi-combustível Direct Flame Impingement, DFI, elevando os números da produção para 35 t/h, Figura 4. A ThyssenKrupp Steel, da Alemanha, também instalou uma unidade de DFI em 2005.



**Figura 4.** A aplicação de oxi-combustível triplicou o rendimento do forno de recozimento de tiras na Outokumpu Stainless, fábrica de Nyby, Suécia.

A experiência de ter convertido mais de 90 fornos de aquecimento e recozimento, de ar-combustível para oxi-combustíveis, 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.

A Ascometal, Fos-sur-Mer, França, usa fornos-poço para aquecer lingotes antes da laminação. Desde a primeira instalação de queimadores sem chama (Flameless Burners) em 2004, que substituiu o sistema de combustão ar-combustível incluindo sopradores elétricos e recuperadores de calor, eles agora se beneficiam de ciclos de aquecimento 33% mais curtos. A meta é usar apenas 9 em lugar dos 13 fornos para o mesmo volume total de produção, o que implica em redução de 40% do consumo específico de combustível, aquecimento mais uniforme, menos formação de carepa e menos manutenção e logística melhorada.

### **Redução do custo e da dependência do combustível**

Hoje, ao convertamos ar-combustível em oxi-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% com economias ainda maiores de combustível, Figura 5.

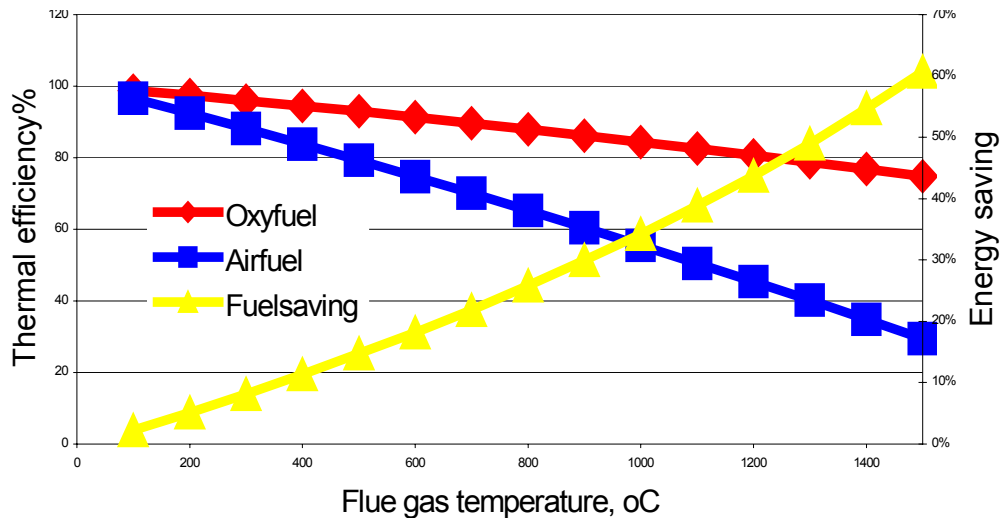


Figura 5. Eficiência térmica em função da temperatura do gás combustível com  $\lambda = 1.02$ . A eficiência do oxi-combustível é maior com significativa economia de combustível.

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 (2).

### Queimador oxi-combustível – 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-efetivas no que se refere à aplicação da tecnologia e sua manutenção. Não há mais necessidade de grandes queimadores ou dutos de ar de combustão que requerem sopradores elétricos. Os queimadores são compactos, Figura 6, e de fácil instalação em fornos existentes, seja para boosting ou para conversão completa do forno para oxi-combustível. Por exemplo, um queimador moderno oxi-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 6. A Figura à esquerda mostra um queimador de oxi-combustível cerâmico auto-refrigerado de 2 MW tipo sem chama. À direita, um queimador oxi-combustível tipo sem chama refrigerado a água, 0.5-5 MW. Ambos integram ignição e célula UV.

A aplicação do oxí-combustível em um forno existente, previamente equipado com ar-combustível, aumenta a capacidade de produção, evitando a necessidade de se 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 para que possam ser implementados ou modificados.

Em 2003, a Outokumpu Stainless - fábrica da Degerfors - Suécia, encomendou melhorias em seu forno walking beam, Figura 7. A AGA (membro do grupo Linde) foi premiada pelo projeto *turnkey*, que também incluía a reconstrução e a reforma do forno já gasto pelo uso. Um dos pontos de decisão foi que com oxí-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 7.** Com aumentos de 40-50% no rendimento, este forno laminador de placas existente na Outokumpu Stainless, Suécia, pode acumular volumes de produção de outro local.

Quanto ao design dos novos fornos de aquecimento e de recozimento, a tecnologia oxí-combustível facilita o uso de designs mais compactos para os fornos oferecendo a mesma capacidade de produção dos fornos ar-combustível.

### **Menos 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 oxí-combustível 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>

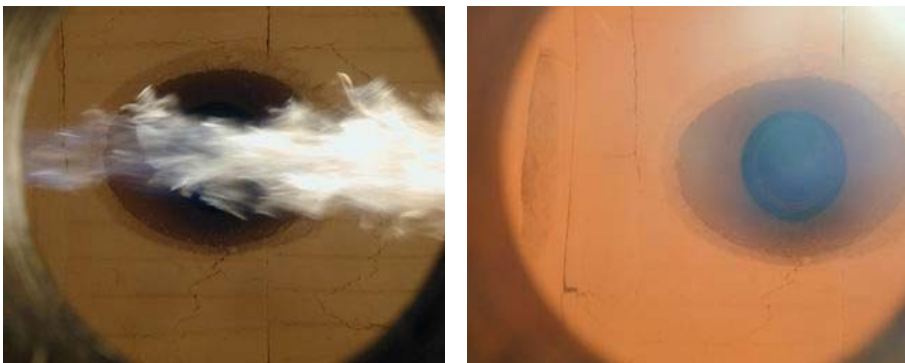


## Aquecimento uniforme melhorado

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 repetíveis. 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 oxí-combustível oferece condições ideais de aquecimento, que ocorre de modo mais rápido e completo.

## Mesmo 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 oxí-combustível e adaptada para aplicação em fornos de escala industrial. No processo oxí-combustível sem chama a temperatura da chama é próxima à temperatura da parede do forno, ou seja, até 100°-200°C, de forma que para o olho humano, torna-se praticamente impossível detectá-la, Figura 8. 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 8.** A foto à esquerda mostra uma chama convencional de oxí-combustível, enquanto a foto da direita mostra o mesmo queimador em modo sem chama; ou seja, combustão invisível .

Além da redução da temperatura da chama, os queimadores de oxí-combustível sem chama efetivamente dispersam os gases da combustão por todo o alto-forno, assegurando com um pequeno número de queimadores, um aquecimento mais eficaz e uniforme do material. Tem se demonstrado que a tecnologia de oxí-combustível sem chama é insensível ao ingresso de ar, o que é um grande benefício para alto-fornos antigos e contínuos. Desde a introdução do oxí-combustível sem chama em 2003, 17 aplicações em escala total foram instaladas em aplicações de reaquecimento e recozimento. A tecnologia oxí-combustível sem chama tem sido usada e adaptada a outras aplicações, como no reaquecimento de navios e na refusão do alumínio, apresentando o mesmo tipo de resultados: consumo reduzido de combustível, mais capacidade de aquecimento, aquecimento uniforme melhorado e níveis ultrabaixos de  $\text{NO}_x$  (5).



A Ovako, em Hofors na Suécia, usa oxi-combustível em um total de 48 fornos-poço e 2 fornos de soleira giratória, Figura 9. Atingiram um aumento de 30% a 50% da capacidade de aquecimento nos alto-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 oxi-combustível para performance máxima (6).



**Figura 9.** Ovako, fábrica Hofors, Suécia, usa oxi-combustível em 50 fornos para aumento de capacidade de produção e da flexibilidade.

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 oxi-combustível em 1994.<sup>(7)</sup>

## **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 que deve ser mais tarde recuperado, requerendo designs de grandes alto-fornos e soluções recuperativas. 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 oxi-combustível, removendo os grandes queimadores de ar-combustível, os volumosos dutos de ar de combustão, ventiladores e recuperadores.

A transferência eficiente de calor do oxi-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 oxi-combustível pode efetivamente reduzir custo. O consumo de combustíveis fósseis é reduzido de 30% a 50%, tendo o mesmo impacto correspondente de  $\text{CO}_2$ . 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 oxi-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 oxi-combustível, resultando em sistemas de aquecimento de bom funcionamento. Desde 1990, tem se constatado em mais de 90 instalações a viabilidade da tecnologia do oxicombustível 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 W. Blasiak, K. Narayanan, W. Yang, "Evolution of new combustion technologies for CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> reduction in steel industries", Air Pollution 2004 (2004), Greece
- 6 L. Arvidsson, M. Gartz, J. Von Scheele, Nordic Steel and Mining Review (2003).
- 7 P. Fredriksson, A. Lugnet, "Application of oxyfuel combustion in reheating at Ovako Steel, Sweden, Steel Rolling 2006 conference, Paris, France, 19-21/6