

# OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO RECOZIMENTO EM CAIXA DA USIMINAS-IPATINGA<sup>1</sup>

Elias Pereira da Silva<sup>2</sup>  
 Giuliano Cesar Aguiar Costa<sup>3</sup>

## Resumo

A linha de recozimento em caixa da Usiminas de Ipatinga é composta por 192 bases de processo, das quais 165 utilizam gás HN como atmosfera de proteção e 27 utilizam gás Hidrogênio puro. O processo de recozimento em caixa consiste em tratar termicamente as bobinas laminadas a frio para promover a recristalização dos grãos e recuperar as propriedades mecânicas, promovendo aumento de ductilidade, diminuição da dureza e da resistência mecânica do aço. Neste processo, além do gás de proteção que também promove a transferência de calor, utiliza-se o gás de coqueria como combustível no forno. Este trabalho visou a otimização da eficiência térmica do recozimento em caixa, pela redução do consumo do gás de proteção, do gás de coqueria e de energia elétrica, além do aumento da disponibilidade do equipamento para produção. Para essa otimização foram realizadas algumas modificações no processo, tais como: alteração no tempo dos ciclos de recozimento para aços de qualidade comercial, utilização de fibra cerâmica no revestimento dos fornos em substituição ao tijolo refratário, utilização de analisador de combustão nos gases da queima, priorização de carregamento no recozimento a hidrogênio e utilização de revestimento nanocerâmico nas paredes refratárias do forno. Os resultados mostram redução no consumo dos gases e energia elétrica após a execução das ações citadas.

**Palavras-chave:** Recozimento em caixa; Eficiência térmica; Redução de consumo de gás; Revestimento refratário.

## OPTIMIZATION OF THERMAL EFFICIENCY OF BATH ANNEALING OF USIMINAS-IPATINGA

### Abstract

The bath annealing of Usiminas Ipatinga is composed by 192 bases of process, of which 165 use HN gas as protective atmosphere and 27 use pure hydrogen gas. The process of bath annealing consists of heat treating the cold-rolled coils promoting the grains recrystallization and restoring the mechanical properties promoting increased ductility, decrease of hardness and mechanical strength of steel. In this process, in addition to shielding gas that also promotes the transfer of heat, it uses the coke oven gas as fuel in the furnace. This work aimed at optimizing the thermal efficiency of bath annealing with lower consumption of protective gas, of coke oven gas and of electricity, besides increasing the availability of equipment for production. To this optimization, were performed some changes to the process, as such: a change in cycles times of annealing steel of commercial quality, use of ceramic fiber lining in the furnaces to replace the firebrick, use of analyzer combustion gases in the burning, prioritization of loading at the annealing hydrogen and use of nanoceramic coating on refractory walls of the oven. The results show reduction in gas consumption and electricity after the execution of the mentioned actions.

**Key words:** Bath annealing; Thermal efficiency; Reduced consumption of gas; Refractory coating.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> CQE ASQ, Mestrando da Escola de Engenharia da UFMG, Engenheiro de Materiais, Gerência de Processos de Laminação e Acabamento da Usiminas, Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> CQE ASQ, MBA em Gestão Empresarial, M.Sc., Engenheiro Metalurgista, Gerência de Recozimento e Encruamento da Usiminas, Ipatinga, MG.

## 1 INTRODUÇÃO

A linha de recozimento em caixa da Usiminas de Ipatinga é composta por 192 bases de processo, das quais 165 utilizam gás HN como atmosfera de proteção e 27 utilizam gás hidrogênio puro. O processo de recozimento em caixa também conhecido como BAF – *Bath Annealing Furnace* consiste em tratar termicamente as bobinas laminadas a frio promovendo a recristalização dos grãos, recuperando as propriedades mecânicas promovendo aumento de ductilidade, redução da dureza e da resistência mecânica do aço. Neste processo, além do gás de proteção, que promove a transferência de calor entre o forno e as bobinas, utiliza-se o gás de coqueria como combustível no forno.

Conforme Moss,<sup>(1)</sup> Diretor do Departamento de Desenvolvimento Energético da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia, dentre as diretrizes da eficiência energética estão: promover a eficiência de energia elétrica através do estímulo ao uso de equipamentos mais modernos, processos industriais mais eficientes e educação contra o desperdício; facilitar o acesso da população a meios para a substituição de equipamentos obsoletos ou aquisição de novos mais eficientes com aumento de benefícios sociais e ambientais; promoção de ações de efficientização para diminuir o consumo de energia elétrica até a redução anual de 10% do consumo em 2030, equivalente à economia de 106 TWh, o que equivale a aproximadamente o consumo residencial atual em um ano no país; redução da emissão de CO<sub>2</sub>.

A Usiminas, por sua vez, adotou o seu programa interno de eficiência energética adequando seus processos industriais visando reduzir o consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub>.

Este trabalho vem somar a este programa de eficiência energética da empresa, pois visa otimizar a eficiência térmica do recozimento em caixa pela redução do consumo de gás de proteção, gás de coqueria e energia elétrica, além do aumento da disponibilidade do equipamento para produção. Para o desenvolvimento deste trabalho foram propostas algumas modificações no processo como alteração no tempo do processo dos ciclos de recozimento dos aços de qualidade comercial, utilização de fibra cerâmica no revestimento dos fornos em substituição ao tijolo refratário, utilização de analisador de combustão nos gases da queima, priorização de carregamento no recozimento a hidrogênio e utilização de revestimento nanocerâmico nas paredes refratárias do forno.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

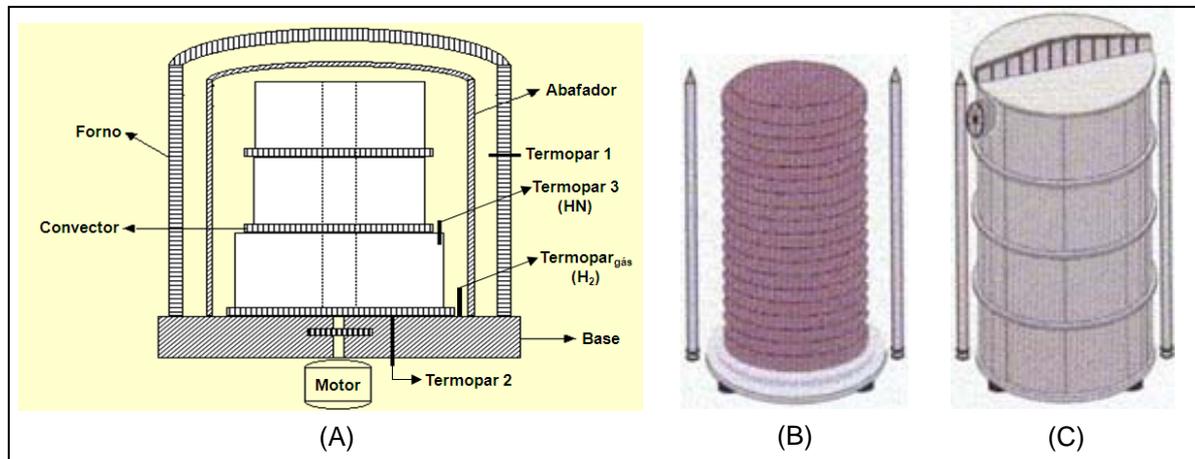
### 2.1 Descrição Básica do Processo de Recozimento em Caixa

O recozimento em caixa da usina de Ipatinga recebe bobinas do laminador a frio TCM – *Tandem Cold Mill* e da linha de limpeza eletrolítica.

O recozimento em caixa é um processo de baixa produtividade; é realizado em pilhas (geralmente de 03 a 04 bobinas), podendo variar para mais ou para menos, dependendo das dimensões das bobinas; tem como atmosfera de proteção 100% H<sub>2</sub> ou HN (95% N<sub>2</sub> + 5% H<sub>2</sub>); utiliza convector entre as bobinas e os fornos são de convecção e chama direta.

O processo consiste em aquecer as bobinas até uma temperatura determinada conforme o ciclo planejado, mantê-las nesta temperatura promovendo o tempo de encharque e finalmente resfriá-las até a temperatura de descarregamento. Para a

realização destas etapas de processo utilizam-se os seguintes equipamentos: base de processo, forno de aquecimento, abafador, campânula de resfriamento e convectores. Para controle do processo utilizam-se termopares na região do forno, da base e dos gases conforme Figura 1(A).



**Figura 1.** (A) Base do forno com bobinas, convectores e termopares; (B) Abafador; (C) Campânula de resfriamento.

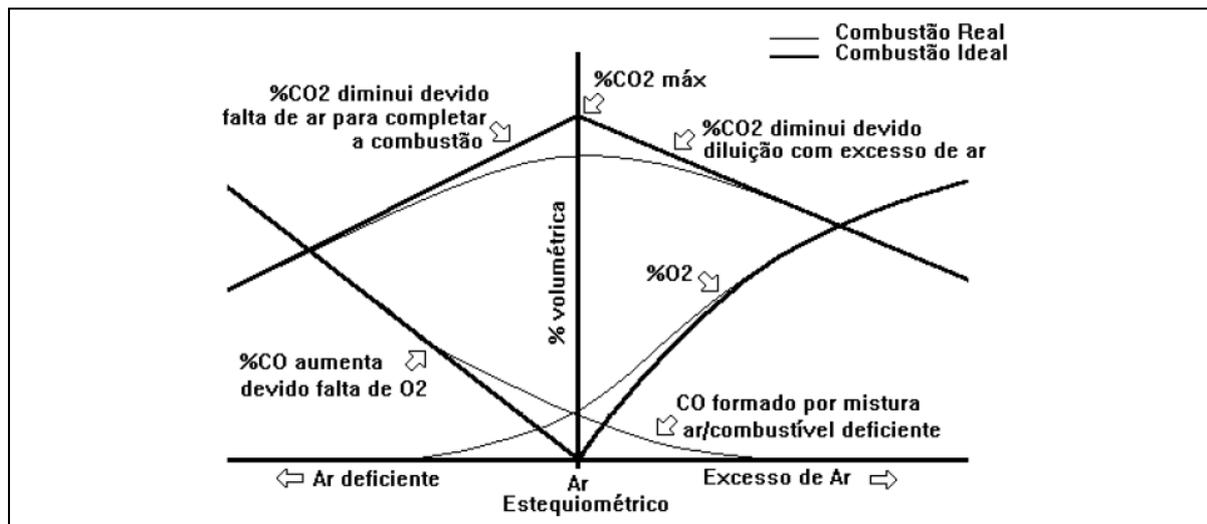
## 2.2 Processos de Transferência de Calor

No processo do recozimento em caixa a transferência de calor ocorre através de três formas: convecção, condução e radiação. O processo de convecção consiste na transferência de calor da parede do abafador para as bobinas através do gás de proteção (HN ou H<sub>2</sub>) em regime de turbulência forçada. O processo de condução acontece por contato das expiras externas das bobinas (maior temperatura) com as expiras internas (menor temperatura).

Já o processo de radiação ocorre a partir da combustão do gás de coqueria. Essa combustão gera calor que é dissipado através de doze queimadores posicionados equidistantes ao longo da circunferência da região inferior do forno.

Para que a combustão do gás de coqueria se processe de forma completa com um bom rendimento no aquecimento é necessário dosagem certa de ar e gás. A falta de ar é caracterizada geralmente por fumaça preta e o aparecimento do CO (monóxido de carbono) produto da combustão incompleta. O excesso de ar acaba levando a uma maior quantidade de calor sensível exaurido pela chaminé, esfriando a chama e aumentando o consumo de combustível.

Quanto maior o volume de ar introduzido no queimador, maiores volumes de fumos e perdas de calor se dão pela chaminé. O volume de ar deve ser ajustado no mínimo possível, para aumentar o rendimento da queima. Para se obter o máximo de eficiência na queima, deve se medir: o teor de CO<sub>2</sub> (dióxido carbono), O<sub>2</sub> (oxigênio), CO (monóxido carbono) e temperatura dos gases na chaminé. Pelo controle visual é impossível um ajuste mais fino do queimador, o operador só pode visualizar fumaça branca ou escura. Conforme a Figura 2 pode-se verificar como o ar influencia a eficiência da combustão.



**Figura 2.** Influência do ar na eficiência da combustão.<sup>(2)</sup>

Da Figura 2, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- ar em excesso desperdiça calor (curva do  $O_2$  é crescente);
- ar em deficiência desperdiça combustível (favorecendo formação do CO);
- deficiência na mistura ar/combustível causa poluição (formação de CO);
- quanto menor for o excesso de ar adotado melhor o rendimento térmico;
- queimadores sem ajuste de  $O_2$  necessitam de ar adicional;
- CO muito alto na queima significa perda de calor e queima incompleta;
- o CO começa a aparecer quando se reduz muito o excesso de ar.

Os gases da combustão podem nos informar:

- se a queima está sendo completa;
- se o calor despreendido na fornalha está sendo bem aproveitado;
- se o nível de poluição é alto;
- se o volume de ar para a queima é ideal.

Por este motivo, medir os gases da combustão é muito mais seguro para se ajustar queimadores.<sup>(3)</sup>

## 2.3 Ações para Melhoria da Eficiência Térmica dos Fornos do Recozimento em Caixa

A seguir são descritas as ações que permitiram a melhoria da eficiência térmica dos fornos do recozimento em caixa da planta de Ipatinga.

### 2.3.1 Otimização dos ciclos de recozimento dos aços de qualidade comercial

Os ciclos de recozimento de aços da qualidade comercial denominados ciclos 01, 02, 06 e 08, produzidos via recozimento com gás de proteção HN tiveram o tempo mínimo de aquecimento reduzido em três horas. Os testes foram realizados durante um ano.

### 2.3.2 Substituição do revestimento de tijolo refratário por fibra cerâmica

Os fornos do recozimento em caixa em sua maioria são revestidos com tijolo refratário do tipo sílico-aluminoso. Alguns fornos passaram a ter seu revestimento acima da região dos queimadores revestidos com módulos de fibra cerâmica. A

proposta é mostrar as vantagens do revestimento com fibra cerâmica justificando a substituição do revestimento de tijolo refratário nos demais fornos.

### 2.3.3 Acompanhamento periódico da condição do revestimento refratário dos fornos por meio de termografia

Atualmente a manutenção do revestimento refratário dos fornos do recozimento em caixa acontece de forma corretiva e preventiva. A corretiva ocorre principalmente quando há o desprendimento de parte do revestimento refratário. Já, a preventiva, consiste num planejamento elaborado pela Gerência de Serviços de Manutenção Civil e Refratários da Usiminas que prevê uma manutenção nos fornos anualmente. Um dos objetivos deste trabalho de melhoria de eficiência térmica dos fornos é fazer um acompanhamento periódico do seu revestimento refratário criando uma ferramenta de suporte para a operação, inspeção e manutenção de refratários para tomada de decisão para manutenção do revestimento refratário dos fornos, bem como diminuição do desgaste da chaparia do forno e possível retardamento das intervenções.

Para isso, foi feito acompanhamento de um dos fornos utilizando a técnica de termografia a fim de identificar as regiões onde apresentavam deficiência no refratário ocasionando perda de calor. A Figura 3 mostra o mapa térmico do forno 94 com as devidas temperaturas das regiões destacadas.

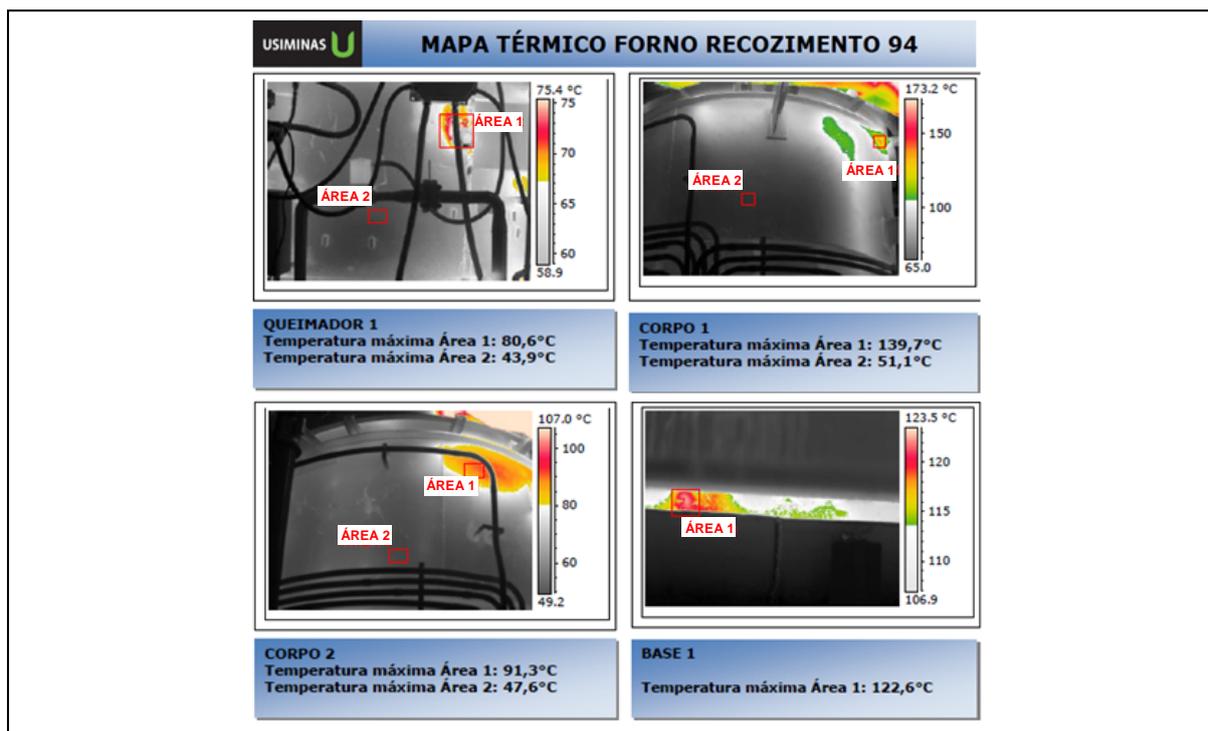


Figura 3. Mapa térmico do forno 94.



### **2.3.4 Concentração da produção no recozimento a hidrogênio**

O objetivo deste item do trabalho foi avaliar a diferença entre o custo do recozimento com gás de proteção H<sub>2</sub> e HN para os ciclos de aços de qualidade comercial (01, 02, 06 e 08) e para os ciclos de aços para estampagem (10, 11, 13 e 14). A partir daí, oferecer à Gerência de Recozimento e Encruamento uma ferramenta para priorizar o carregamento de material neste recozimento.

### **2.3.5 Controle da queima no processo de combustão**

O objetivo desta ação foi analisar a eficiência da combustão do gás de coqueria nos fornos do recozimento em caixa com atmosfera HN, através do uso de analisador de combustão portátil.

Para que a combustão do gás de coqueria se processe de forma completa com um bom rendimento no aquecimento é necessário uma dosagem certa de ar e gás. O analisador de combustão portátil conectado na região da queima do gás através de uma sonda apropriada permite medir o teor de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO e temperatura dos gases na chaminé obtendo uma resposta da eficiência e ajustando as vazões de ar e gás caso seja necessário.

### **2.3.6 Utilização de revestimento nanocerâmico nas paredes dos fornos**

A nanotecnologia tornou-se um conceito importante a partir da melhoria de todas as fases das novas tecnologias de produção industrial no cenário global. Os novos materiais e compósitos que estão sendo desenvolvidos devem ter impactos significativos sobre o desempenho dos projetos mais antigos e mais recentes. A ciência dos materiais tem e continuará tendo um papel importante no avanço do desempenho dos processos em todas as unidades de processamento químico e de hidrocarbonetos industriais.

O revestimento nanocerâmico é um material térmico desenvolvido inicialmente para os rigores da viagem espacial e que foi redesenhado e desenvolvido em materiais multifuncionais, para uso industrial em processos, com maior geração e transferência de calor.<sup>(4)</sup>

Este revestimento será aplicado na parede do refratário de um forno do recozimento a H<sub>2</sub>. Será aplicado também em dois abafadores: um somente na superfície externa e um nas duas superfícies (externa e interna).

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Quanto à otimização dos ciclos de recozimento de aços de qualidade comercial que tiveram o tempo mínimo reduzido em três horas na etapa de aquecimento, a Tabela 1 mostra os ganhos já obtidos no consumo. A Tabela 2 mostra os possíveis ganhos caso toda a produção destes ciclos tivesse seu tempo reduzido em três horas de aquecimento.

**Tabela 1.** Resultados reais obtidos com a redução no tempo de processo em três horas nos ciclos 01, 02, 06 e 08 do recozimento HN

Insumos	Redução no consumo	% Redução
Gás de coqueria	1,11 Mcal/t	0,55%
Amônia	351 kg	0,85%
Nitrogênio	15.226 Nm <sup>3</sup>	0,85%
Energia elétrica	126 kWh por processo	13,64%

A redução no consumo de gás de coqueria, amônia e nitrogênio foi obtida pelo produto da redução no tempo de processo (três horas) pelo consumo específico por ciclo em função da quantidade de toneladas processadas. Para o gás de coqueria, amônia e nitrogênio, o consumo específico foi em Mcal/t, Kg/t e Nm<sup>3</sup>/t respectivamente.

Para a energia elétrica foi considerada o consumo específico (42 kW) considerando os principais equipamentos elétricos do forno e da base. O valor na redução no consumo de energia elétrica de 126 kWh foi obtido pelo produto do consumo (42 kW) pela quantidade de horas reduzidas (três horas). Já o percentual de redução foi obtido pela redução no consumo em relação ao consumo total por processo.

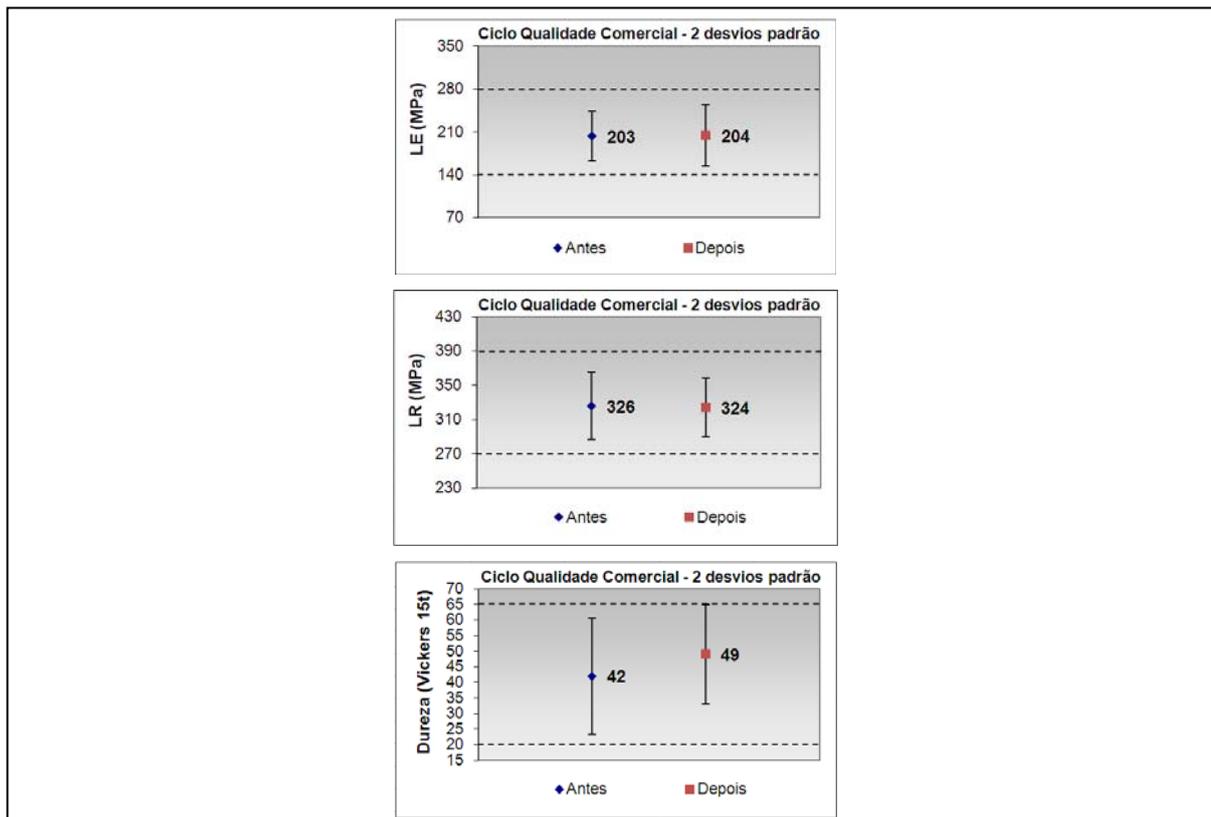
**Tabela 2.** Resultados possíveis com a redução no tempo de processo em três nos ciclos 01, 02, 06 e 08 do recozimento HN

Insumos	Redução no consumo	% Redução
Gás de coqueria	10,17 Mcal/t	5,08%
Amônia	3.198 kg	7,71%
Nitrogênio	139.836 Nm <sup>3</sup>	7,77%
Energia elétrica	126 kWh por processo	13,64%

Os valores descritos como reduções possíveis na Tabela 2 foram calculados da mesma forma que os valores da Tabela 1. O que difere é o aumento na quantidade de toneladas que poderiam ser processadas. No caso da energia elétrica o percentual de redução é o mesmo, pois está em função do processo e não da tonelagem processada.

Além dos ganhos na redução de consumo do gás de coqueria, amônia, nitrogênio e energia elétrica, as alterações permitiram um aumento de produtividade de 3.825 t/ano em função do aumento da produtividade dos equipamentos.

Nos gráficos da Figura 4 é mostrada a influência destas alterações nas propriedades mecânicas dos aços de qualidade comercial que processaram com ciclo de recozimento alterado.



**Figura 4.** Gráficos com os valores obtidos de LE - Limite de escoamento, LR - Limite de Resistência e dureza para os aços produzidos antes e depois da modificação – Maio/09 a Junho/10.

Observando os gráficos da Figura 4 não tivemos nenhuma ocorrência acima do limite superior da faixa de especificação dos aços produzidos com o tempo de processo reduzido em três horas no aquecimento. Comparando os resultados obtidos antes e depois da modificação observa-se que não houve grande variabilidade nos valores obtidos para LE, LR e dureza. Nos valores de dureza houve um acréscimo na média obtida, porém a dispersão ficou dentro dos limites máximo e mínimo

Quanto à substituição do revestimento por fibra cerâmica passou-se a obter:

- maior rendimento no aquecimento devido maior conservação de energia;
- menor massa específica do forno;
- maior produtividade (tonelagem horária);
- menor perda térmica pelas paredes;
- redução do consumo de gás;
- melhoria para condição de saúde e segurança, pois há redução considerável de poeiras e resíduos e maior praticidade de manutenção;
- estabilidade sob altas temperaturas;
- baixa condutividade térmica e baixo armazenamento de calor;
- excelente resistência aos choques térmicos; e
- maior resistência à corrosão.

Conforme Carvalho, Sá e Scudeller<sup>(5)</sup> a redução na perda térmica é de aproximadamente 4,3 vezes quando se utiliza fibra cerâmica podendo chegar a até 800 W/m<sup>2</sup> de ganho energético contribuindo para um ganho médio de 3 horas na etapa de aquecimento.

Além de todas as vantagens citadas acima sobre o revestimento com fibra cerâmica, o tempo de manutenção para troca do revestimento é menor, uma vez que a fibra já vem pré-montada em forma de módulos. Apesar do investimento inicial no revestimento de cada forno com fibra cerâmica ser 42,0% maior que o revestimento com tijolo refratário, ele apresenta uma taxa interna de retorno de 17,4% e tempo de retorno de 3,6 anos contabilizando os ganhos na redução do consumo do gás de coqueria, gás de proteção, energia elétrica e manutenção.

Quanto à concentração da produção no recozimento a H<sub>2</sub> foi evidenciada a diferença do custo de produção do recozimento a HN com relação ao recozimento a H<sub>2</sub> considerando os ciclos de aços de qualidade comercial e os de aços para estampagem. A diferença de custo de produção entre os dois recozimentos foi definida considerando a tonelagem horária e tempo médio de processo de cada ciclo conforme o recozimento, além dos consumos de eletricidade, gás de coqueria, nitrogênio, hidrogênio e amônia.

A partir deste levantamento foram definidos os valores da diferença de custo entre os ciclos de aços produzidos nos recozimentos com diferentes atmosferas de proteção. Também foi definido o possível aumento de produção caso toda a matéria-prima fosse destinada ao recozimento H<sub>2</sub> o que é apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3.** Diferença de custo entre HN e H<sub>2</sub> com o possível aumento de produção

Ciclo	Diferença de custo entre recozimento HN e H <sub>2</sub>	Aumento de produção (anual)
01	16,0%	920,2
02	16,8%	1.552,8
06	19,5%	4.684,5
07	19,7%	6.848,7
08	17,5%	2.970,2
10	20,8%	2.757,7
11	18,7%	1.883,3
13	18,1%	978,9
14	16,5%	386,7
Média	<b>18,2%</b>	-
Total	-	<b>22.983,0</b>

Conforme pode ser visto na Tabela 3, os custos de produção no recozimento HN são maiores em todos os ciclos com relação ao recozimento H<sub>2</sub>. A diferença de custo entre o recozimento HN e H<sub>2</sub> ocorre principalmente devido maior tonelagem horária do recozimento H<sub>2</sub>, o que reduz o tempo de processo com redução do consumo de energia elétrica e gás de coqueria.

Pode ser visto também que se toda a produção média mensal do recozimento HN fosse produzida no recozimento a H<sub>2</sub> haveria um aumento de produtividade de 22.983,0 t em virtude da maior tonelagem horária (considerando somente a t/h de aquecimento que é menor que a de resfriamento).

Quanto à utilização de revestimento nanocerâmico nas paredes dos abafadores e refratários dos fornos do recozimento, estimam-se os seguintes ganhos:

- Economia energética = 7,5%;
- Aumento de produtividade = 5,0%;



- Redução do uso do gás inerte = 5,0%;
- Aumento da vida útil do abafador = 100,0%.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados das ações propostas para a melhoria da eficiência térmica dos fornos do recozimento em caixa mostram que é possível obter redução no consumo de gás de proteção, gás de coqueria e energia elétrica, uma vez que melhorando o rendimento dos fornos é possível obter uma maior tonelagem horária e reduzir as perdas térmicas.

Os resultados também propiciam aumento da capacidade produtiva, devido aumento da disponibilidade dos equipamentos para funcionamento.

Com a redução da emissão de gases, estas ações reduzem a emissão de CO<sub>2</sub> contribuindo com o programa interno de eficiência energética da Usiminas.

Reduzindo o consumo de gases e o tempo de produção, é possível reduzir o custo de processo do recozimento em caixa, aumentando a produtividade a ele destinada.

## REFERÊNCIAS

- 1 MOSS, H. O Plano Nacional de Eficiência Energética – PNEF. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 16 a 17 de Junho de 2010. São Paulo. SP.
- 2 PINHEIRO, P.C., VALLE, R.M. Controle de Combustão: Otimização do excesso de ar. In: 2º CONGRESSO DE EQUIPAMENTOS E AUTOMAÇÃO DA INDÚSTRIA QUÍMICA E PETROQUÍMICA, 09 a 11 de Agosto de 1995. Rio de Janeiro. RJ, Anais... Automação Industrial São Paulo: ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados, p.157-162, 1995.
- 3 CONFOR. Melhorando o Rendimento de Queimadores. Disponível em: <[http://www.confor.com.br/catalogos\\_pdf/mel\\_rend1.pdf](http://www.confor.com.br/catalogos_pdf/mel_rend1.pdf)> Acesso em: 15 de outubro 2010.
- 4 SHEIL, P. C.; KLEEB, T. R. LEITE, P.R. High Emissivity Coating for Improved Performance of Electric Arc Furnaces. Presented at AISTech 2005 Iron and Steel Technology Conference, Charlotte, North Carolina, 2005.
- 5 CARVALHO, G. F.; SÁ, G. M.; SCUDELLER, L. A. M. Melhoria da eficiência térmica dos fornos de Recozimento em Caixa da Usiminas. In: 38º SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS DA ABM, Florianópolis. Santa Catarina. Outubro de 2001. P. 235-244.