

## TECNOLOGIA DE AQUECIMENTO CONVECTIVO EM CANAIS DE CORRIDA DE ALTOS-FORNOS

*Alamar Kasan Duarte*<sup>1</sup>

*Jorge Adelino Faria*<sup>2</sup>

*Jose Antonio Pereira Novaes*<sup>2</sup>

*Marcelo Bernadino Brandão Leite*<sup>3</sup>

*Marco Antonio Munhão*<sup>4</sup>

*Paulo Roberto Ribeiro da Silva*<sup>5</sup>

*Ricardo Leite Passos*<sup>6</sup>

*Roberto da Cruz Júnior*<sup>7</sup>

### Resumo

Este trabalho descreve a técnica do aquecimento convectivo em canais de corrida dos Altos-Fornos da CST, onde um grande volume de ar pré-aquecido é introduzido. Os resultados obtidos com este método de aquecimento mostram uma redução no tempo de resfriamento e aquecimento, diminuição no risco de acidentes com o uso de sistemas de segurança, melhoria das condições de trabalho para pessoal e máquinas durante o processo de demolição, redução no consumo de combustível (gás natural), aquecimento mais homogêneo e potencial redução no consumo específico de refratários. Tudo isto resultou em aumento no tempo de disponibilidade dos canais de corrida para a produção.

**Palavras-chave:** Refratários; Aquecimento; Alto-forno.

## CONVECTIVE DRYING TECHNOLOGY IN BLAST FURNACE RUNNERS

### Abstract

The drying and heat-up of Blast Furnace runners has usually been conducted by the use of conventional irradiant dryers. This work describes the results obtained in the heating-up of runners by the convective method, where a great volume of pre-heated air is introduced. Results show a reduction of cooling and heating-up time, an improvement on risk of accidents by the use of a safety system, a great fuel economy (natural gas), as well as a more homogeneous heating and a potential reduction in refractory specific consumption. These advantages resulted in an increase of the availability of the runners for production.

**Key words:** Refractories; Heating; Blast-furnace.

### I INTRODUÇÃO

A CST possui dois Altos-Fornos: o Alto-Forno 1, que produz 10.500t/dia e possui quatro canais de corrida e o Alto-Forno 2, que produz 3.800t/dia de gusa líquido e possui dois canais de corrida. Durante a parada de um dos canais do Alto-Forno 2 para manutenção refratária, ocorre redução da produção/dia e

maior solicitação da parede interna do cadinho próxima ao furo de corrida em funcionamento. A redução do tempo de manutenção dos canais, o aumento do seu ciclo de operação e a diminuição do número de manutenções/ano são, portanto, muito importantes para a vida útil e a produção deste Alto-Forno.

<sup>1</sup> Gerente de Projetos Especiais, Magnesita S.A., Belo Horizonte

<sup>2</sup> Gerente de Alto-Forno, CST, Vitória

<sup>3</sup> Supervisor Técnico, Magnesita S.A., Vitória

<sup>4</sup> Supervisor de Canais, Magnesita S.A., Vitória

<sup>5</sup> Gerente de Contrato, Magnesita S.A., Vitória

<sup>6</sup> Especialista em Aquecimento e Secagem de Refratários, Thermojet, São Paulo

<sup>7</sup> Especialista de Altos-Fornos, CST, Vitória

Todo equipamento industrial revestido com refratários requer cuidados durante o seu processo de aquecimento. Tensões termomecânicas indesejáveis podem ser geradas por um aquecimento heterogêneo ou rápido demais. No caso de instalações refratárias que utilizam concretos refratários, onde a água é utilizada no processo de aplicação, cuidados adicionais para a remoção da mesma devem ser tomados.<sup>(1)</sup>

Os canais de corrida de altos fornos vêm usando concretos refratários especiais à base de  $Al_2O_3$ -SiC-C, de ultrabaixo teor de cimento, como revestimento de trabalho. A busca de produtos cada vez mais resistentes à corrosão e erosão tem levado a materiais cada vez mais densos. Esta densificação gera estruturas menos permeáveis e, conseqüentemente, de difícil secagem.

Água é adicionada ao concreto durante a sua instalação para auxiliar a mistura das partículas, conferir fluidez e permitir a hidratação do cimento e, portanto, a pega do concreto. O processamento de um concreto típico de canal de corrida de alto forno envolve aproximadamente 5% de água, sendo que somente parte desta água é usada na hidratação do cimento, a outra permanecendo como água livre.

A água usada na instalação do concreto deve ser eliminada durante o aquecimento de forma controlada, para que não haja a pressurização do vapor, que pode prejudicar as propriedades do material e o seu desempenho. A curva de secagem do revestimento deve ser, portanto, lenta o suficiente para não provocar danos à sua estrutura, mas rápida o suficiente para se ter ganhos de tempo na manutenção.<sup>(2)</sup>

Inúmeros estudos têm sido feitos de forma a compreender os mecanismos de remoção de água. Modelos de transferência de calor e umidade foram desenvolvidos para se estimar a curva de secagem mais rápida e segura para o revestimento. Entretanto, a experiência do refratarista continua a ser usada como base para a determinação destas curvas.

### 1.1 Sistema de Aquecimento Convencional (Irradiante)

O aquecimento de canais sempre foi feito com secadores convencionais de chama

irradiante, de acordo com curvas de aquecimento recomendadas pelo refratarista. Além de gerar uma heterogeneidade de temperatura, esta técnica apresenta um grande consumo de gás. Esse procedimento exige prolongados períodos em um patamar, garantindo que, na ocorrência de não-uniformidade térmica, o calor seja distribuído localmente antes de se prosseguir o aquecimento. Se for detectado vapor visível, o patamar deve ser estendido para sua remoção total.

No aquecimento convencional, a transferência de calor ocorre, sobretudo, pela absorção da radiação infravermelha. O fluxo de calor,  $q_{rad}$ , pode ser dado pela Equação 1:<sup>(3)</sup>

$$q''_{rad} = h_r (T_s - T_r) \quad (1)$$

onde  $T_s$  é a temperatura da chama,  $T_r$  é a temperatura do refratário, e  $h_r$  é o coeficiente de transferência térmica por radiação.

Para uma mesma temperatura de chama, o coeficiente  $h_r$  varia com a temperatura, indicando uma maior eficiência para temperaturas mais altas, e é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a chama e o refratário.

Pelo sistema convencional, o aquecimento é fortemente dependente da distância da chama ao refratário.<sup>(3)</sup> O processo gera então um gradiente de temperatura considerável na parede refratária, com um superaquecimento das regiões mais próximas à chama. Tal efeito é bastante prejudicial, uma vez que, além de elevar as tensões térmicas e a pressurização de secagem, a exposição a temperaturas elevadas por um longo tempo leva à oxidação do carbono existente no refratário.

Tradicionalmente, o aquecimento dos canais tem sido realizado com tubos posicionados ao longo do canal. Os tubos são perfurados, formando vários bicos de gás (Figura 1), sendo a transferência térmica governada pela absorção de radiação.

O ar de combustão entra no canal pelo vácuo formado na região aquecida. A velocidade dos gases é baixa, consumindo-se o oxigênio disponível e aumentando gradualmente a umidade no interior do canal.

Para o monitoramento do aquecimento, são introduzidos termopares ao longo do canal, e internamente no refratário. O controle de vazão de gás é efetuado por válvulas de regulação, aumentando a chama indiscriminadamente.

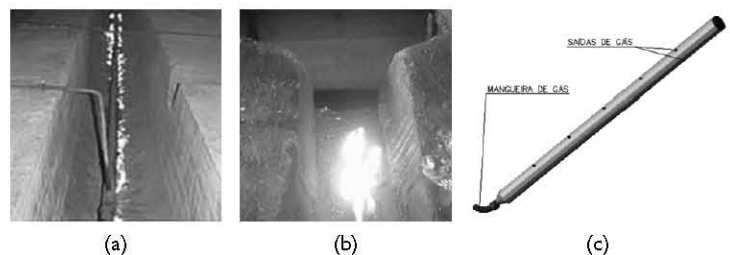


Figura 1. (a) Aquecimento convencional de canal de corrida; (b) superaquecimento ocorrido nas proximidades da chama direta; (c) detalhe de um bico de gás convencional.

## 1.2 Sistema de Aquecimento Convectivo

No aquecimento convectivo, a transferência de calor ocorre por convecção forçada. Esse aquecimento é governado pela equação:<sup>(3)</sup>

$$q'' = h_c (T_r - T_\infty), \quad (A)$$

onde  $h_c$  é o coeficiente de transferência térmica, e  $T_\infty$ , a temperatura do ambiente.

A eficiência do aquecimento depende do valor de  $h_c$  que, no escoamento turbulento ( $Re_x > 5 \times 10^5$ ), é proporcional a  $Re_x^{4/5}$ . Já que  $Re_x$  é proporcional à velocidade do fluido, obtém-se uma alta eficiência de transferência de calor no regime turbulento.

Até cerca de 400°C, a chama permanece integralmente no interior do queimador, e a transferência térmica ocorre exclusivamente pela convecção turbulenta. Mesmo em temperaturas superiores, o comprimento da chama externa ao queimador é pouco significativo frente ao comprimento do canal.

O método a ser descrito neste trabalho para secagem e aquecimento emprega técnicas e equipamentos especiais. Em operação, o queimador gera um movimento rápido de turbulência dos produtos da combustão e dessa forma alcança com eficiência todas as partes da estrutura refratária. Controles precisos de temperatura dos queimadores e de recirculação dos produtos de combustão asseguram que todas as partes da estrutura refratária

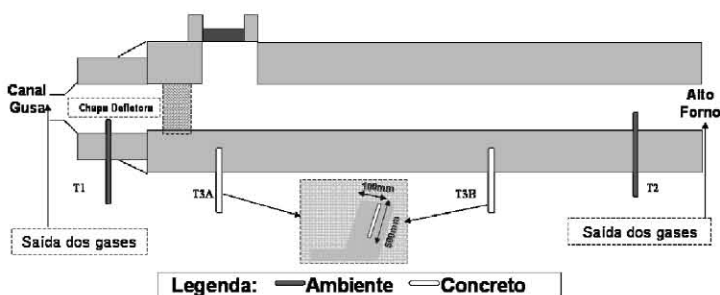


Figura 2. Posicionamento dos termopares no canal de corrida.

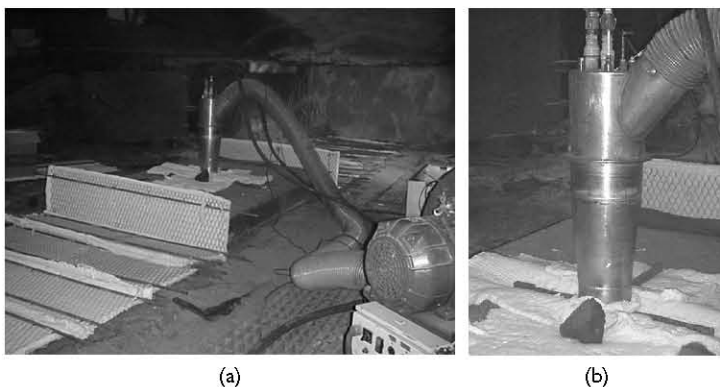


Figura 3. (a) Aquecimento convectivo de canal de corrida; (b) detalhe do queimador.

recebam um tratamento térmico uniforme durante o procedimento de secagem e aquecimento. Este método minimiza choques térmicos em refratários queimados e problemas de remoção de água em refratários monolíticos, como os concretos aplicados em canais de corrida de Altos-Fornos.

## 2 INTRODUÇÃO DA NOVA METODOLOGIA DE SECAGEM

Durante um aquecimento convencional (irradiante), quatro termopares foram posicionados ao longo do canal, conforme a Figura 2. Registrou-se as temperaturas no ambiente do canal, durante o período inicial de aquecimento. Nesse intervalo, a temperatura praticamente não variou, seguindo o comportamento mostrado na Tabela 1. Nota-se uma grande diferença entre a temperatura à 150 mm do bico de gás e aquela próxima à superfície da parede refratária.

A Figura 3 mostra o sistema portátil de combustão convectiva introduzido na CST. Este sistema consiste de um queimador, uma ventoinha de ar, um painel de controle eletrônico, um programador de temperatura e mangueiras de ar e de combustível. Um sensor de chama e uma válvula eletromagnética garantem a segurança. O equipamento de combustão tem capacidade para queimar propano, gás de coqueria, GLP, combustíveis leves destilados e misturas dos mesmos.

O novo processo baseia-se na convecção forçada. No queimador, ocorre a mistura do gás natural com o ar, injetado sob alta pressão por um ventilador centrífugo. Para distribuir o ar dentro do canal, é utilizado um cone com saída em "Y", permitindo o aquecimento em todo o seu interior a partir de seu centro. Além de direcionar o ar, esse cone funciona como uma câmara de combustão, concentrando toda a chama em seu interior.

Devido à mistura sob pressão e ao excesso de ar, a combustão é completa e, pela pressão exercida pelo ventilador, o ar do canal é renovado constantemente. O controle da temperatura é realizado por uma válvula de controle de vazão. Têm-se utilizado programas de aquecimento de 12 horas com o método convectivo.

Acompanhou-se a realização de um aquecimento no canal principal do Alto-Forno 2 da CST, utilizando-se o método convectivo. Para o monitoramento da temperatura, foram utilizados dois termopares no ambiente (T1 e T2), a cerca de 3 metros de distância de cada lado do queimador, alinhados com o eixo do canal, e a uma distância de 150mm da face externa do revestimento de trabalho (Figura 3). Além disso, foram introduzidos dois termopares no concreto (T3A e T3B) para o acompanhamento da secagem. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos.

Os termopares T1 e T2 mostraram o mesmo comportamento, seguindo de perto a curva solicitada. Os únicos momentos em que o aquecimento se desviou da curva foram no início, pela temperatura mais alta do revestimento residual, e próximos aos patamares, devido à inércia térmica. Ainda assim, os desvios não ultrapassaram 50°C. Os termopares posicionados dentro do concreto registraram um aumento de temperatura gradual, e diferenças um pouco maiores entre si. Isso é esperado, dada a distância desses termopares da face quente.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido às diferenças com relação ao sistema convencional, o convectivo apresenta diversas vantagens (Tabela 2), tais como menor tempo de aquecimento, redução do consumo de gás, segurança, preservação do refratário, etc. Essas vantagens são ainda maiores no aquecimento em temperaturas moderadas, quando o  $h_f$  é menor.

#### 3.1 Homogeneidade da Temperatura

No aquecimento convencional, a temperatura próxima ao queimador depende da temperatura de chama, da ordem de 1800°C. Além disso, a presença de vários pontos de chama, e à sua proximidade de algumas regiões, levam à formação de pontos de superaquecimento, podendo ocorrer uma maior oxidação do carbono do concreto, comprometendo as suas propriedades. Isso gera a necessidade de curvas de aquecimento bastante lentas. No sistema convectivo, emprega-se

apenas uma fonte de calor, com controle total sobre o aquecimento. Praticamente toda a chama é encapsulada, evitando a geração de pontos quentes no refratário. A ausência de chama direta gera uma maior homogeneidade térmica e o aquecimento pode então seguir curvas mais rápidas, sem prejuízo ao refratário, mantendo a sua integridade.

#### 3.2 Pressão sobre o Canal

Uma diferença importante consiste na pressão dos gases dentro do canal. No sistema convectivo, a ventilação forçada, com velocidade de até 140 m/s, leva ao aumento da pressão e à exaustão contínua dos gases. A relação entre a vazão de ar e a de gás natural regula a temperatura, e pode ser controlada com precisão. Além disso, a renovação do ar quente no canal permite uma resposta rápida, com baixa inércia térmica. No caso convencional, ao contrário, a renovação do ar ocorre somente por convecção natural, de forma lenta. Há o surgimento de uma pressão negativa no canal, uma vez que o ar aquecido é menos denso que o frio. Ao invés de exaustão, há o acúmulo de produtos de combustão ( $CO + CO_2 + H_2O$ ) que, além de favorecerem a combustão incompleta, dificultam a saída da água do concreto.

Tabela 1. Curvas de secagem (12 e 24h) para os canais de corrida do Alto-Forno 2.

Tempo h	Curva de 24h - Secagem Irradiante					Curva de 12h - Secagem por Convecção				
	Curva padrão	150mm	Superfície	T3A	T3B	Curva padrão	T1	T2	T3A	T3B
0	50	522	108	65	68	50	190	182	99	97
1	100	550	131	73	70	100	212	201	100	104
2	150	549	139	80	77	150	189	172	100	105
3	150	549	119	82	80	150	174	176	100	106
4	150	555	112	82	80	200	189	188	103	108
5	150	525	102	82	80	250	277	259	107	114
6	175	524	100	82	80	300	306	302	114	129
7	200			90	120	300	318	315	130	164
8	225			100	130	400	382	403	146	192
9	250			142	210	500	490	502	179	231
10	275			140	210	600	549	603	225	283
11	300			142	202	600	550	605	270	339
12	300			130	200	600	584	612	296	361
13	300			126	198					
14	300			130	180					
15	300			135	211					
16	350			150	300					
17	400			192	345					
18	450			200	328					
19	500			200	360					
20	550			220	410					
21	600			240	428					
22	600			252	510					
23	600			300	600					
24	600			325	629					

Tabela 2. Comparação entre o aquecimento irradiante e o convectivo

Sistema convencional	Sistema convectivo
Baixa velocidade do ar	Alta velocidade do ar
Pressão negativa no canal	Pressão positiva no canal
Má distribuição de temperaturas no refratário	Alta homogeneidade de temperaturas no refratário
Temperatura alta próxima à chama desde o início do aquecimento	Temperatura próxima ao queimador variável em função da curva de aquecimento
Umidade relativa do ar crescente, devido à ausência de renovação da atmosfera	Renovação contínua do ar, e umidade constante, facilitando a secagem do refratário
Baixo controle da taxa de aquecimento	Alto controle da taxa de aquecimento
Sem sistemas de segurança	Segurança propiciada por pressão positiva, sensor de chama e válvulas solenóides
Combustão incompleta	Combustão completa, com excesso de ar
Alto risco de dano e modificações indesejadas no material	Manutenção da composição e propriedades esperadas do refratário

### 3.3 Efetividade da Secagem

Um dos problemas apresentados pelo sistema convencional refere-se à secagem do concreto. A transferência de umidade para o ambiente depende da convecção, e é mais rápida para maiores velocidades do ar. Como o sistema convencional opera por convecção natural, essa velocidade é baixa, e mesmo com a temperatura do ar próxima a 500°C, o refratário não chega a atingir 100°C inicialmente. Portanto, nesta temperatura existe uma probabilidade elevada de, após várias horas de aquecimento, ainda persistir alguma quantidade de água, que pode danificar o material (Tabela 1).

A alta velocidade do ar no sistema convectivo aumenta a eficiência da troca térmica e o arraste da umidade. Desta forma, estando a temperatura do ambiente em 150°C, a do refratário já atinge 115°C, permanecendo por mais tempo acima da temperatura de ebulição da água, e garantindo a eliminação da água em um tempo reduzido.

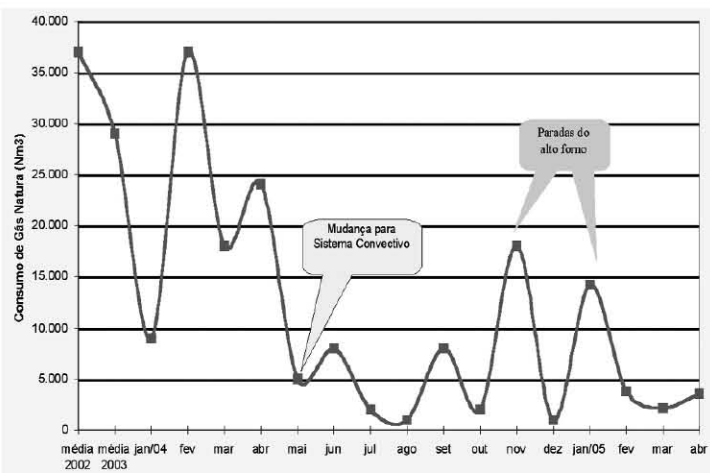


Figura 4. Economia de gás GNP com a mudança do sistema de secagem no Alto-Forno 2

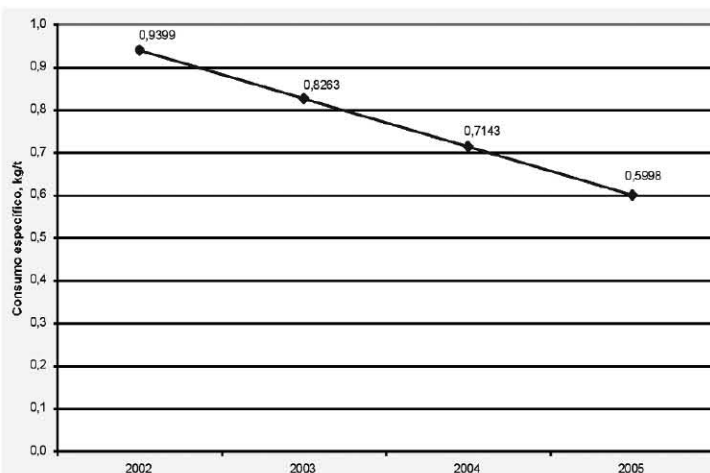


Figura 5. Evolução do consumo específico de refratários de canais no Alto-Forno 2

### 3.4 Economia de Combustível

A eficiência de transmissão do calor para o refratário pelo sistema convencional é baixa, de forma que é necessário impor curvas de aquecimento bastante extensas, gerando um alto consumo de gás. Além disso, o ar de combustão penetra no canal pela atmosfera, devido ao vácuo formado junto à parede refratária.

Em contrapartida, além da maior penetração de calor no material pelo método convectivo, todo o produto de combustão é forçado a passar por todo o revestimento, antes de sair pelas extremidades do canal, aproveitando ao máximo o calor no aquecimento das paredes. Embora o alto volume de ar demande o aumento da vazão de combustível, o menor tempo de aquecimento permite reduções de consumo da ordem de 70% (Figura 4).

### 3.5 Preservação do Refratário

Devido aos pontos de superaquecimento no sistema convencional, a perda de carbono é elevada, reduzindo a resistência à corrosão e ao choque térmico. Além disso, a baixa eficiência de secagem pode gerar trincas de secagem, que reduzem a vida útil do material. No sistema convectivo, o menor tempo de aquecimento e a homogeneidade térmica permitem conservar as características do refratário, contribuindo em parte para a queda do seu consumo específico (Figura 5).

### 3.6 Segurança de Operação

A exaustão do canal tem um papel fundamental no caso de um eventual apagamento da chama. Nesse caso, o gás natural é imediatamente dissipado, reduzindo o risco de explosão. Além disso, o queimador permite a incorporação de um sensor de chama, que fecha uma válvula elétrica no caso de apagamento. No aquecimento convencional, a baixa pressão faz com que a velocidade de dissipação dos gases seja lenta, permitindo seu acúmulo no caso de apagamento da chama. Com isso, o risco de explosão no caso de ignição é significativo. A existência de mangueiras espalhadas pela área também aumenta o risco de incêndio.

### 3.7 Repetibilidade do Processo

Dadas as características do sistema convectivo, e a presença de uma única fonte de calor, as principais dificuldades de controle do processo são eliminadas. Com isso, a dependência da sensibilidade do operador é diminuída, e pode-se estabelecer um padrão estrito de operação, com boa repetibilidade do processo. Eliminadas as fontes de variabilidade do processo de aquecimento, o desenvolvimento das formulações do concreto pode ser acelerado, já que o desempenho do canal decorrerá mais diretamente das características do produto.

### 3.8 Resfriamento Convectivo

O sistema convectivo passou também a ser usado para reduzir o tempo de resfriamento do revestimento, permitindo acelerar a sua demolição. Empregou-se ventilação de ar frio com névoa de água, diretamente sobre o refratário. A evaporação da água ocorre rapidamente, consumindo aproximadamente 610 kcal/L e reduzindo o tempo de resfriamento (Figura 6). Devido à nebulização da água, não há risco de oxidação do refratário, uma vez que, enquanto a temperatura do canal for muito elevada, a evaporação da água ocorrerá antes de qualquer contato direto com o mesmo.

## 4 CONCLUSÕES

O Método da chama irradiante é mais moroso no posicionamento dos queimadores,

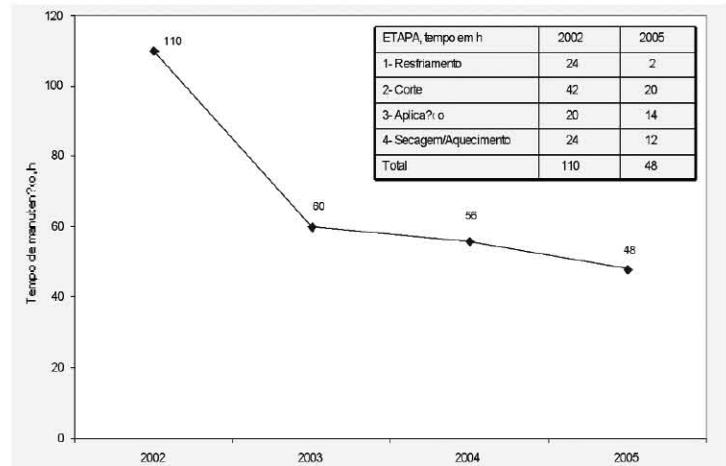


Figura 6. Contribuição do novo sistema de secagem na redução do tempo de manutenção dos canais do Alto-Forno 2

usa mangueiras espalhadas pela área, o que pode causar incêndio, apresenta um consumo elevado de mangueiras e queimadores, requer uma curva mais longa de secagem, gera maior emissão de gases provenientes da queima do GNP e demanda maior consumo de GNP.

O Método convectivo é mais ágil no posicionamento do aquecedor, apresenta maior facilidade de manuseio, requer o uso de apenas um ponto de GNP, demanda um menor consumo de GNP, possibilita um resfriamento mais rápido com o uso de parte dos equipamentos, gera uma secagem e aquecimento mais uniformes e mais rápidos e contribui para a redução do tempo de manutenção dos canais.

### Agradecimento

Os autores agradecem ao Engenheiro Caio Moldenhauer Peret da Thermojet e a todos os funcionários da CST e Magnesita, que direta ou indiretamente, tenham participado na elaboração deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 INNOCENTINI, M. D. M.; CARDOSO, F. A.; MIRANDA, M. F. S.; PANDOLFELLI, V. C. Vaporization processes and pressure buildup during dewatering of dense refractory castables. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 86, n. 9, p. 1500-1503, 2003.
- 2 INNOCENTINI, M. D. M.; STUDART, A. R.; AKYIOSHI, M. M.; PAIVA, A. E. M.; PANDOLFELLI, V. C.; BITTENCOURT, L. R. M. The drying behavior of high-alumina ultra-low cement refractory castables under different heating rates. **Refractories Applications and News**, v. 7, n. 5, p. 17-20, Sept.-Oct. 2002.
- 3 INCROPERA, F.P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro : LTC, 2003.

Recebido em: 25/11/05

Aceito em: 01/02/06

Proveniente de: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 35., 2005, Florianópolis. São Paulo : ABM, 2005.