

CAMPANHA DO ALTO-FORNO Nº1 DA CST⁽¹⁾

*Fernando Kaoru Fujihara⁽²⁾
Guilherme Antonio Defendi⁽³⁾
Jorge Issamu Gushiken⁽⁴⁾
Mauro Correa da Silva⁽⁵⁾*

Resumo

Consumo de combustíveis, produtividade e vida útil têm sido os principais parâmetros de avaliação da performance dos altos-fornos. O desgaste do cadinho tem sido responsável por grande parte das reformas efetuadas nos altos-fornos e, conseqüentemente, um fator muito importante para os resultados de uma usina siderúrgica. Na CST, o controle de distribuição de carga é a melhor ferramenta de controle operacional usada para garantir a performance e prolongar a vida útil do alto-forno. No decorrer de 21 anos de operação contínua, alta produtividade e baixo consumo de combustíveis têm sido mantidos sem o aparecimento de trincas na carcaça e sem desgaste excessivo do cadinho.

Palavras-chave: Operação do alto-forno; Desgaste do cadinho; Distribuição de carga; Vida útil.

(1) Trabalho a ser apresentado no 60º Congresso Anual da ABM – 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte-MG

(2) Engenheiro metalurgista e especialista de controle técnico dos altos-fornos da CST

(3) Engenheiro metalurgista e especialista de controle técnico dos altos-fornos da CST

(4) Engenheiro metalurgista e especialista de controle técnico dos altos-fornos da CST

(5) Engenheiro metalurgista e especialista de controle técnico dos altos-fornos da CST

1 INTRODUÇÃO

A performance do alto-forno é um fator de grande importância para os resultados de uma usina siderúrgica, uma vez que este é responsável por, aproximadamente, 60% dos custos de produção. Produtividade e consumo de combustíveis são parâmetros normalmente usados para representar tal performance. Devido aos altos custos envolvidos com reformas e perdas de produção, outros parâmetros têm sido levados em consideração quando se analisa o desempenho de um alto-forno.

2 CAMPANHA DO ALTO-FORNO

Histórico

Embora existam diversas razões, a reforma de um alto-forno é sempre realizada quando a performance operacional não pode ser mantida tornando a operação do equipamento economicamente inviável. O aparecimento de trincas na carcaça bem como desgaste do cadinho podem levar a perda de produção e conseqüente deterioração no desempenho operacional. A Tabela 1 mostra os principais motivos para a reforma de um alto-forno.

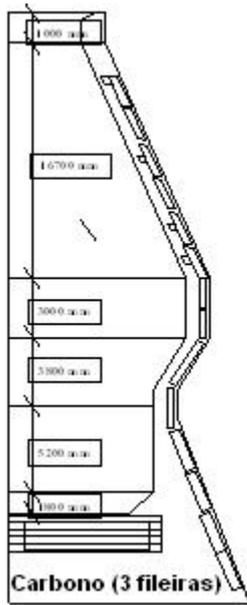
Tipicamente, até a década de 70, os altos-fornos apresentavam campanhas de até 6 anos. Após estudos de dissecação, realizados em alguns fornos nos anos 70, o processo do alto-forno pode ser mais bem compreendido fornecendo informações para um melhor desempenho operacional e para desenvolvimentos de novos refratários que possibilitaram a extensão da campanha dos fornos para 8 ou 10 anos (Steiler, 1998).

Com o intuito de melhorar ainda mais a performance, os altos-fornos tiveram suas capacidades de produção aumentadas, associadas a melhorias na qualidade da matéria-prima, além de aperfeiçoamentos na instrumentação e equipamentos que resultaram em maior produtividade e menor consumo específico de combustíveis.

Neste contexto foi projetado o alto-forno nº1 da CST, que teve seu início em novembro de 1983 com expectativa de uma campanha de 8 anos. A Figura 1 mostra o perfil do alto-forno nº 1.

Tabela 1. Principais motivos para a reforma de um alto-forno.

CARCAÇA	29,0%
CONTROLE DE PRODUÇÃO	22,0%
REFRIGERAÇÃO	19,0%
CADINHO	17,4 %
TOPO	12,0 %
REGENERADORES	0,6 %



NÍVEL	Nº DE STAVES	Nº DE TUBOS	REFRATÁRIO
S-6	52	4/1	35% Al ₂ O ₃
S-5	52	4	35% Al ₂ O ₃
S-4	56	4/2	40% Al ₂ O ₃
S-3	56	4	40% Al ₂ O ₃
S-2	60	4/2	C-SiC(20%)
S-1	60	4/2	C-SiC(20%)
B-3	60	4	C-SiC(20%)
B-2	60	4	C-SiC(20%)
B-1	60	4	C-SiC(20%)
VENTANEIRA	12/32	4/6	Alta Alumina
H-4	60	4	Carbono
H-3	52/8	4/2	Carbono
H-2	60	4	Carbono
H-1	60	4	Carbono

Figura 1. Perfil do alto-forno 1 da CST.

Após o “start up” a elevação de produção foi feita gradualmente com aumento gradativo de produtividade e diminuição de “coke rate”, como mostrado na Figura 2. Nos meses iniciais, o principal objetivo foi ajustar a distribuição de carga para manter a estabilidade operacional.

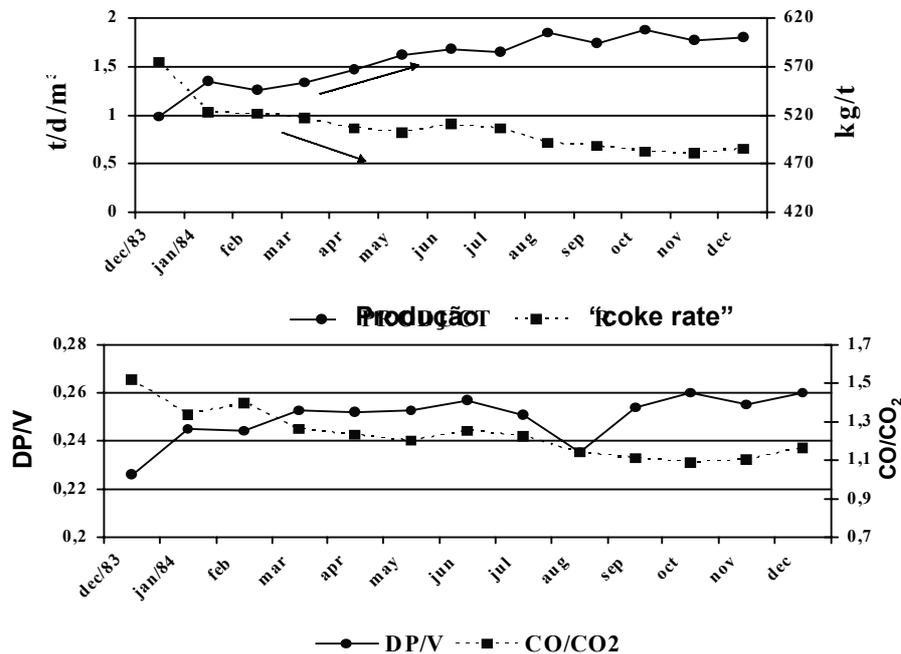


Figura 2. Dados operacionais durante a elevação de produção.

Depois de alcançada a estabilidade operacional nos primeiros meses de operação, o principal objetivo era de melhorar a performance do forno e atingir produtividade de 2,0 t/d/m³-IV com consumo de combustível em 460 Kg/t.

Em contrapartida, melhorar a performance do alto-forno significa maximizar a utilização do equipamento e pelo fato da produção total da usina estar baseada neste forno, um extenso programa de prolongamento de vida útil foi iniciado,

assegurando estabilidade operacional com alta produtividade e baixo consumo de combustíveis.

Os principais trabalhos iniciados eram relacionados à distribuição de carga, visando controlar todos os agentes que poderiam interferir no escoamento gasoso, a fim de garantir a integridade da parede do forno. Os resultados deste programa foram descritos anteriormente (Fujihara, 2003) apresentando resultados satisfatórios.

No início, o principal interesse do programa de prolongamento de vida útil era como conseguir condições de equipamento que proporcionassem um controle do fluxo gasoso apropriado para manter a operação estável e, conseqüentemente, estender a campanha do forno, como mostrado no fluxograma da Figura 3.

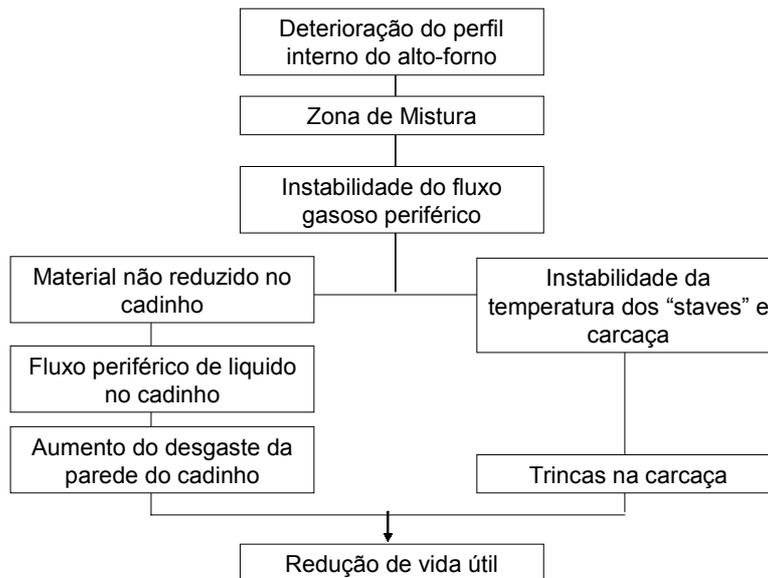


Figura 3. Relação entre o perfil interno e vida útil do forno.

3 MECANISMO DE DESGASTE

O principal mecanismo de desgaste do cadinho é atribuído ao fluxo de gusa e escória dentro deste. Diferentemente da cuba, onde o desgaste pode ser controlado por medidas de distribuição de carga e seleção da qualidade das matérias-primas, o desgaste do cadinho parece ser determinado pela produtividade. Então, o projeto do cadinho e os materiais de revestimento interno tornam-se fatores importantes na campanha do forno.

Baseado neste princípio, os efeitos de refrigeração tornaram-se um importante capítulo. Conseqüentemente, um eficiente sistema de refrigeração, refratários com alta condutividade térmica e baixa porosidade foram desenvolvidos e aplicados no cadinho. A Figura 4 mostra o perfil do alto-forno nº 1 da CST.

Na metade dos anos 80 surgiram novas idéias sobre o mecanismo de desgaste do cadinho. A idéia mais aceita se refere ao desgaste da parede do cadinho como função do fluxo periférico de líquidos provocando um desgaste tipo "elephant foot". Logo, para minimizar o desgaste da parede do cadinho busca-se manter um fluxo central de líquidos, através do "homem-morto".

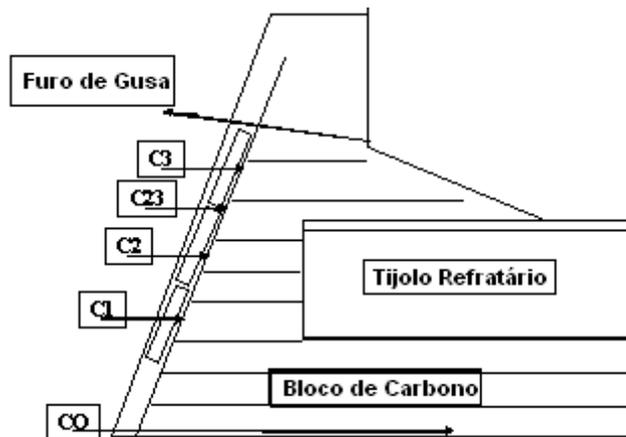


Figura 4. Perfil do cadinho do alto-forno 1 da CST.

4 CONTROLE DO FLUXO CENTRAL DE LÍQUIDOS

Como pode ser visto na Figura 5, com a operação “all coke” as temperaturas do cadinho sobem gradualmente, sem aumentos repentinos. Isto significa que o fluxo central de líquido no cadinho esta ocorrendo conforme esperado. Por exemplo: o efeito da refrigeração do cadinho é menor que o aquecimento provocado pelo fluxo de líquidos, impedindo a formação de uma camada sólida nos refratários. Neste período o desgaste do cadinho é comandado pela produção de gusa.

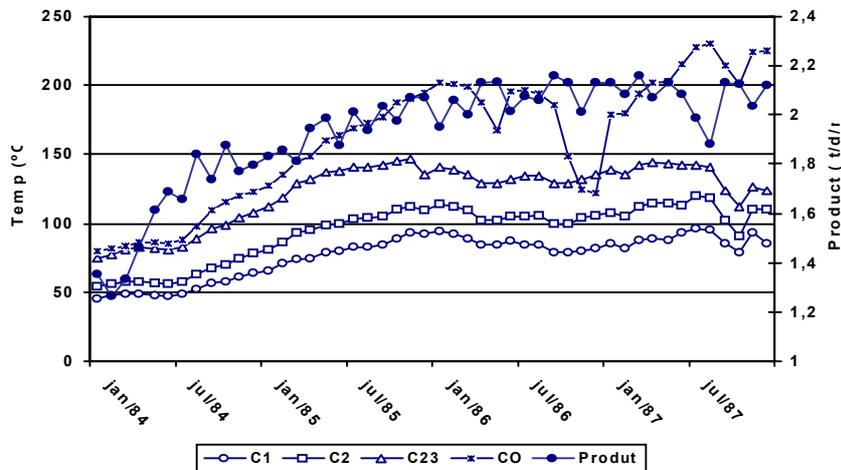


Figura 5. Temperaturas do cadinho e produção do alto-forno 1 de 1984 a 1987.

Uma vez que o equilíbrio térmico é estabelecido, pode ser notado que a temperatura da parede mostra a mesma variação do fundo do cadinho, significando que não existe competição entre fluxo periférico e fluxo central de líquidos. Além disso, o efeito de desgaste pela produtividade não é claramente notado, significando que o efeito da refrigeração pode compensar o efeito do fluxo de líquido.

Desta forma, as variações das temperaturas foram atribuídas ao fluxo térmico dentro do cadinho, como pode ser visto na Figura 6. Isto ocorre basicamente devido à elevada estabilidade operacional, evitando descida irregular de carga e material não reduzido no cadinho o que diminui um fluxo periférico de líquido no cadinho.

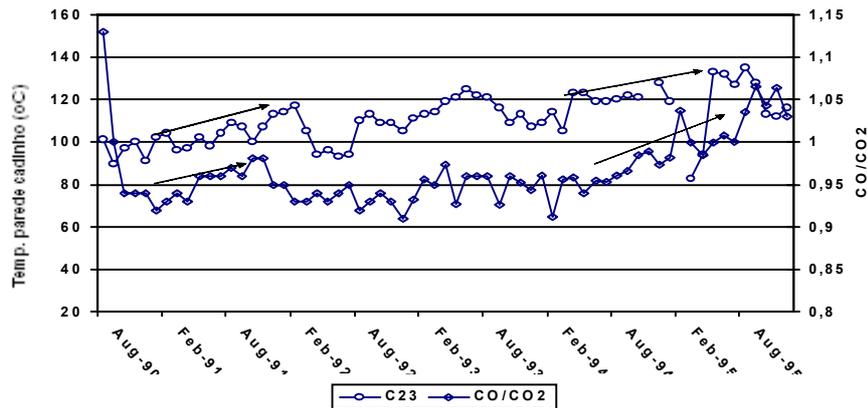


Figura 6. Temperatura do cadinho e eficiência do gás redutor no topo do forno.

Por outro lado, na operação “all coke”, o fluxo central de líquidos pode ser facilmente mantido devido à elevada permeabilidade do “homem-morto”.

Em 1996, foi iniciada a injeção de carvão pulverizado e, conforme era esperado, grandes mudanças operacionais ocorreram especialmente no controle da distribuição de carga e na carga térmica dos “staves” (Morimasa, 1999).

A diminuição da carga térmica dos “staves” foi relacionada ao abafamento do fluxo central de gases devido ao aumento da relação O/C. Como conseqüência, a utilização do gás redutor aumentou, fato que se tornou evidente com a diminuição da relação CO/CO₂ no gás de topo, acarretando redução de “fuel rate”.

A pesar de terem sido realizadas várias mudanças na distribuição de carga, não foram notadas significativas mudanças nas temperaturas do cadinho. É interessante notar, como pode ser visto na Figura 7, a relação entre temperatura do cadinho e “fuel rate” (consumo de combustíveis), significando que as temperaturas dependem do fluxo de calor para o cadinho.

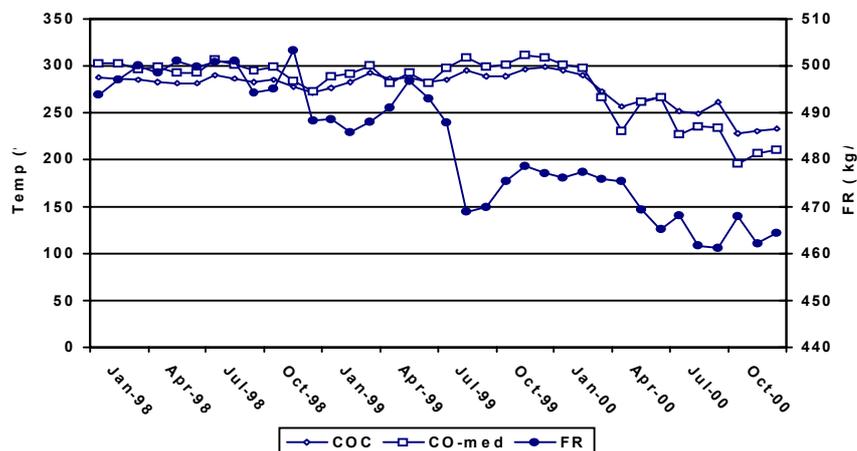


Figura 7. Temperatura do cadinho e “fuel rate”.

5 DISTRIBUIÇÃO DE CARGA

O alto-forno nº1 da CST é dotado de sistema duplo cone e placas móveis para controle de distribuição de carga e, conforme conhecido, existem várias dificuldades no controle do fluxo de gases sob altas taxas de injeção de carvão pulverizado.

Para garantir altas taxas de injeção, um fluxo central de gás foi objetivado. Isto levaria a uma perda do rendimento gasoso e aumento do “fuel rate”. Conseqüentemente, um maior fluxo de calor no cadinho seria notado. Além disso, este fluxo gasoso central permitiria uma maior passagem de coque para o centro do cadinho e um fluxo central de líquidos poderia ser mantido, minimizando o fluxo periférico de líquidos e o desgaste do cadinho. Mas para manter uma elevada performance operacional em curto intervalo de tempo, torna-se necessário reduzir o “fuel rate”. Neste caso, um fluxo periférico de gás (aumentando a carga térmica dos “staves”) melhoraria o rendimento gasoso tornando possível a redução do “fuel rate”. Além disso, aumentando a relação O/C (Minério/Coque) minimiza-se o fluxo gasoso central com conseqüente aumento do rendimento gasoso e diminuição do fluxo de calor no cadinho.

Este efeito duplo, tal como a diminuição do fluxo de calor no cadinho e redução do fluxo gasoso central, vai reduzir as temperaturas do cadinho podendo limitar a redução do “coke rate”.

No caso desta situação persistir por um longo período, o fluxo de líquido no cadinho pode ser alterado, levando a um fluxo periférico, como mostrado na Figura 8.

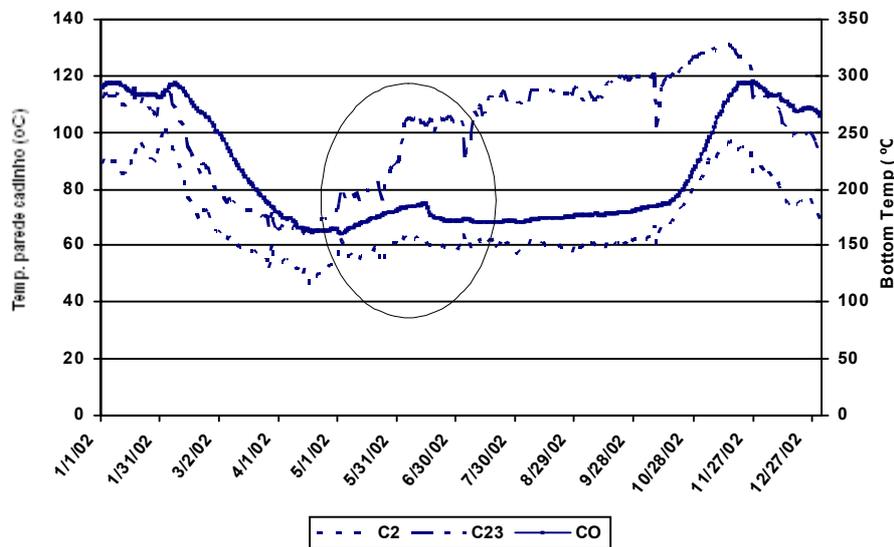


Figura 8. Tendência da temperatura da parede e do fundo do cadinho.

6 CONTRAMEDIDAS EM CASO DE AUMENTO DA TEMPERATURA DO CADINHO

As contramedidas mais clássicas adotadas em caso de aumento da temperatura do cadinho são:

- Fechamento das ventaneiras;
- Aumento do “input” de titânio (via topo ou injetado pelas ventaneiras).

O fechamento das ventaneiras acima da região que apresenta aumento de temperatura significa em diminuição da produção de gusa nesta região e conseqüente diminuição de temperatura. No caso do alto-forno 1 da CST não foi notado nenhum resultado com esta ação.

Uma outra ação para controle da temperatura do cadinho é o aumento do “input” de titânio via ventaneira ou carregado pelo topo do forno. A principal idéia é criar um

depósito de carbonitreto de titânio sobre a superfície do refratário, baseado na solubilidade do titânio no gusa líquido. Esta ação é controversa, pois é necessário reduzir o óxido de titânio para incorporá-lo ao gusa. Isto requer um elevado nível térmico dentro do forno (aumento do “fuel rate”) e um elevado tempo de reação (redução da produtividade).

Apesar do TiO_2 não aumentar a viscosidade da escória, titânio reduzido, ou mesmo o TiO_2 pode se ligar às cinzas ou a outros óxidos, piorando a viscosidade dos líquidos e a permeabilidade do “homem-morto”. Tal efeito pode comprometer a drenagem do cadinho e a estabilidade do forno, levando a redução de produção. Como resultado, o “fuel rate” aumenta e a redução de produção (para o tempo de reação ou para o controle operacional) torna-se necessária. Dessa forma, a efetividade do controle de temperatura do cadinho, pela adição de titânio no forno, não é completamente conhecido.

No alto-forno 1 da CST a adição de TiO_2 não apresentou nenhum resultado. De qualquer forma, esta é uma prática comumente adotada em altos-fornos de pequeno porte.

Uma outra maneira interessante de controlar a elevação das temperaturas do cadinho é através do efeito da refrigeração externa do cadinho. Trocadores de calor para reduzir a temperatura da água de refrigeração foram instalados com sucesso⁽⁴⁾, mas no caso do alto-forno 1 da CST esta medida não pôde ser aplicada pela existência do sistema de resfriamento por “staves” no cadinho. Para melhorar a eficiência de refrigeração do cadinho no alto-forno 1 foi realizado uma limpeza química nos tubos de “stave”.

Como conclusão, a contramedida mais eficiente para controle do aumento de temperatura do cadinho é a redução de produção, que pode ser:

- Redução do fluxo de líquidos no cadinho (parede e centro), intensificando o efeito da refrigeração no refratário;
- Aumentando o tempo de reação e os depósitos de titânio no cadinho;
- Melhora da estabilidade operacional, por:
 - Melhor esgotamento do cadinho (gusa e escória);
 - Menor velocidade do gás na carga.

7 ALTO-FORNO 1 DA CST

Conforme mencionado anteriormente, existe uma forte relação entre o “coke rate” e as temperaturas do cadinho. Devido ao aumento da relação O/C, quando se diminui o “coke rate”, a marcha central tornou-se menos efetiva, melhorando a eficiência do gás (reduzindo a relação CO/CO_2). Dessa forma, o homem-morto tornou-se menos permeável o que proporciona um menor fluxo de calor no cadinho, como mostrado na Figura 9. Esta condição operacional resultou no aparecimento de uma região de baixa permeabilidade resultando em baixas temperaturas no cadinho.

No entanto, esta marcha central abafada, conduziu a uma redução do consumo de combustíveis (“fuel rate”) e, aliada ao controle de carga térmica dos “staves” por razões de preservação da parede do forno, resultou em redução do espaço entre o início da zona coesiva e as ventaneiras (raiz da zona de coesão localizada em regiões mais próximas das ventaneiras), causando instabilidades na descida de carga.

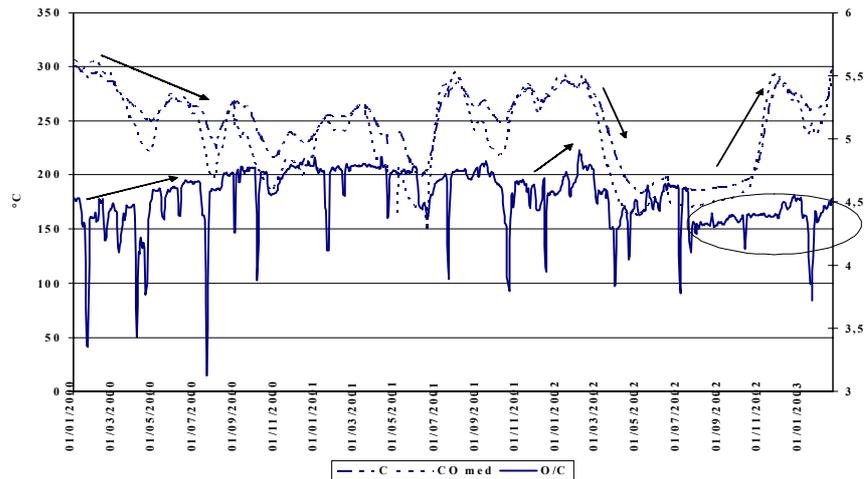


Figura 9. Temperatura da parede do cadinho e relação O/C.

Como pode ser visto na Figura 10, existe uma clara relação entre as temperaturas da parede do cadinho e o fluxo periférico de gás (medido pelas temperaturas do “skin flow”) que mostra uma necessidade de manter-se uma marcha periférica de gás adequada em caso de redução de “coke rate”. Logo, para manter um fluxo central de gás adequado (garantir a permeabilidade do homem-morto) e garantir um adequado espaçamento entre a raiz da zona coesiva e as ventaneiras, o “coke rate” não deve ser menor que 345 kg/ton.

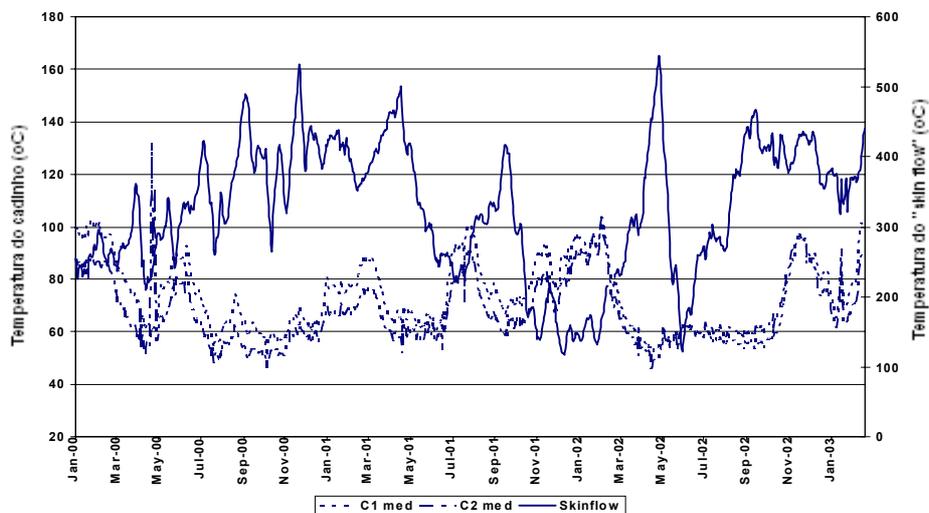


Figura 10. Temperaturas do cadinho e do “skin flow”.

Então, o controle de temperatura do cadinho pode ser definido por dois pontos principais:

1. Manter a permeabilidade do homem-morto
 - Usando coque de boa qualidade
 - Mantendo uma elevada marcha central
2. Manter uma descida de carga estável
 - Usando matérias-primas de boa qualidade
 - Manter um bom espaçamento entre a raiz da zona coesiva e as ventaneiras.

Logo, o controle operacional dos Altos-fornos deve considerar os seguintes aspectos:

1. Intenso fluxo central de gás
Para razões de controle de temperatura do cadinho e aumento da injeção de carvão pulverizado. Conseqüentemente ocorrerá aumento da relação CO/CO₂ e elevado consumo de combustíveis.
2. Suave fluxo central de gás
Por razões econômicas (redução de “coke rate”) e para reduzir o fluxo de calor no cadinho.
3. Intenso fluxo periférico de gás
Para manter uma alta raiz da zona de coesão a alta taxa de utilização do gás redutor (baixa relação CO/CO₂).
4. Suave fluxo periférico de gás
Para proteger as paredes e aumentar a campanha do Alto-forno.

Como o controle da distribuição de carga do Alto-forno 1 da CST era realizado somente através de placas móveis, existiam restrições do equipamento que impediam o estabelecimento de baixas relações O/C no centro do forno, proporcionando uma competição entre fluxo central e periférico de gás. Para reverter tal situação, foi instalado em 2003 um equipamento de carregamento de coque central (CCF). Tal equipamento possibilitou o estabelecimento de uma distribuição de carga adequada para o estabelecimento de uma marcha central de gás, sem perda de eficiência do gás redutor e redução no “coke rate”.

Por outro lado, o dilema de elevar a raiz da zona coesiva, sem aumentar as perdas térmicas nos “staves”, foi solucionado com o uso intenso de coque de menor granulometria.

Como resultado destas práticas, o “coke rate” foi reduzido mantendo-se as temperaturas do cadinho e cuba estáveis.

8 CONCLUSÃO

Atualmente, a performance dos Altos-fornos tem sido mensurada por suas respectivas produtividades, consumo de combustíveis e longevidade. Como o desgaste do cadinho tem sido responsável por grande parte das reformas dos Altos-fornos, a investigação deste fenômeno tornou-se muito importante.

Na CST, o controle da distribuição de carga é a melhor ferramenta de controle operacional para garantir a performance e prolongar a vida útil do Alto-forno.

No decorrer de 21 anos de operação contínua, alta produtividade com baixo consumo de combustíveis tem sido mantidos sem o aparecimento de trincas na carcaça e com pequeno número de tubos de “staves” queimados (2% do total). Embora existam vários aspectos ainda não solucionados, o entendimento dos efeitos da distribuição de carga no mecanismo de desgaste do cadinho tem sido fundamental para o controle de suas temperaturas.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 STEILER, J. M. State of the art of Blast Furnace Ironmaking. In: ICSTI IRONMAKING CONFERENCE, 1998, p161-173.
- 2 FUJIHARA, F. K. Elongation of CST n° 1 Blast Furnace - hearth wear control. In: INTERNATIONAL STEELMAKING DAYS – ATS, 2003, Paris.
- 3 MORIMASA, I. Control of the internal conditions in the lower part of the Blast Furnace by burden distribution control at top. **ISIJ International**, v.12, 1999.
- 4 HUR, N. S. Hearth wear control at Kwangyang No 1 Blast Furnace. In: ICSTI IRONMAKING CONFERENCE, p581-585.
- 5 MORIMASA, I. Longevity method of hearth brick and control of metal flow in the Blast Furnace hearth. **ISIJ International**, v.14, 2001.

CAMPAIGN OF CST N°1 BLAST FURNACE⁽¹⁾

*Fernando Kaoru Fujihara⁽²⁾
Guilherme Antonio Defendi⁽³⁾
Jorge Issamu Gushiken⁽⁴⁾
Mauro Correa da Silva⁽⁵⁾*

Abstract

Responsible for about 60 % of production costs, Blast Furnace operational performance is very important for the results of the steelworks. Nowadays, BF operational performance has been measured through its productivity, Fuel consumption and longevity. Hearth wear has been responsible for the most Blast Furnace recent shutdowns, and its investigation is very important. At CST, burden distribution control, certainly means the biggest tool available for increasing the operational performance and to control the furnace life. Through these 21 years of continuous operation, high productivity at low Fuel (and Coke) consumption are being kept with just few stove pipes (2.0 % of the total) burnt out and a very small length of shell cracks. And, although there are several issues unsolved, the understanding of the effect of burden distribution on the hearth wear mechanism has allowed the control of hearth temperatures.

Key-words: Blast furnace operation; Hearth wear; Burden distribution; Campaign life.

- 1) *Paper to be presented at 60^o Congresso Anual da ABM –July 25th to 28th, 2005, Belo Horizonte-MG*
- 2) *Metallurgical engineer and specialist of CST blast furnace*
- 3) *Metallurgical engineer and specialist of CST blast furnace*
- 4) *Specialist of CST blast furnace*
- 5) *Metallurgical engineer and specialist of CST blast furnace*