

## DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DO DESGASTE DE CADINHO DE ALTO-FORNO

Gilberto Cardoso Parreira <sup>1</sup>

Rodrigo Junqueira dos Santos <sup>1</sup>

### Resumo

Este trabalho descreve a implementação de um sistema para monitoramento dos fluxos de calor e do desgaste do cadinho do Alto-Forno "A" da Belgo, Usina de João Monlevade, visando obter uma ferramenta que permita avaliar mudanças no processo do forno destinadas à preservação dos refratários do cadinho e conseqüente aumento da vida útil do equipamento. Durante a construção do alto-forno, vários termopares foram instalados em diferentes níveis do cadinho para consulta das temperaturas presentes naquelas áreas. Utilizando-se destes valores e de dados referentes aos materiais refratários envolvidos na construção do cadinho foi implementado um modelo do comportamento dos fluxos de calor que atravessam as paredes daquele componente. Isto nos permite obter informações sobre a interface entre os refratários e o gusa líquido e obter a situação real do desgaste dos refratários. A disponibilização eficiente destas informações sobre a situação do cadinho permite avaliar como a permeabilidade do homem morto está direcionando os fluxos de líquidos em seu interior. Atuações no processo com base nestas informações podem amenizar a carga destes líquidos sobre o fundo e as paredes laterais e evitar, desta maneira, seu desgaste prematuro ou até mesmo acidentes com sua perfuração. Como a vida útil do alto-forno normalmente é limitada diretamente pelo desgaste do cadinho, este sistema auxilia a que o equipamento não tenha sua campanha abreviada e abre a possibilidade de aumento de sua vida útil.

**Palavras-chave:** Alto-forno; Cadinho; Monitoramento.

## DEVELOPMENT OF A BLAST FURNACE HEARTH WEAR MONITORING SYSTEM

### Abstract

This paper describes a computer system implementation to evaluate heat flows and hearth wear at Belgo's blast furnace "A" at Monlevade works. The main purpose is to provide a tool to evaluate furnace process changes aiming hearth refractory preservation and equipment life increase. During blast furnace construction, several thermocouples were installed at different hearth levels to provide temperature measurements from those areas. Using those values and refractory material data it is possible to implement a model of the heat flow that crosses the hearth walls. This can give us information about the refractory and hot metal interface and measurements of the real situation of the refractory wear. The efficiency in providing this information about the hearth situation allows evaluation of how dead man's permeability is driving the flow of hot metal. Process changes that use this data can minimize hot metal charge effects on bottom and walls and avoid premature wear and even accidents caused by perforation of the walls. As blast furnace lifecycle is strongly connected to hearth wear, this system can avoid campaign reduction and even opens the possibility of lifecycle increase.

**Key words:** Blast furnace; Hearth.

### I INTRODUÇÃO

A partir de dezembro de 1999, com a partida do novo alto-forno da usina de João Monlevade, a Cia. Siderúrgica Belgo Mineira passou a contar com um equipamento extremamente

eficiente e bem projetado, que veio substituir as quatro unidades em operação até aquela data. Esta substituição trouxe ganhos substanciais no volume de ferro-gusa produzido e, mais importante ainda, na qualidade deste produto. A

<sup>1</sup> Membro da ABM, Engenheiro da Cia. Siderúrgica Belgo Mineira - Usina de Monlevade – Grupo Arcelor.

junção de um projeto moderno, de acordo com as principais tendências mundiais no desenvolvimento deste tipo de equipamento, e de novas tecnologias, permitiu que o novo alto-forno possuísse um sistema de acompanhamento e controle altamente eficiente, monitorando o processo de produção de gusa de maneira detalhada desde o recebimento de matérias primas até o despacho do produto final. A maioria das informações do processo está disponível para consulta on-line e também para análises históricas, permitindo que as condições que causaram situações não previstas possam ser analisadas, sistematizadas e transformadas em procedimentos que visem evitar estas situações em momentos futuros.

A grande quantidade de dados obtidos do processo pode, porém, se tornar um empecilho para análises de maior profundidade, a não ser que ferramentas adequadas sejam implementadas para armazenamento, recuperação, tratamento e análise destes dados. Suprir esta necessidade é tarefa atual da equipe de Automação da Gerência de Engenharia de Manutenção, Utilidades e Meio-Ambiente - GMUA, que esteve envolvida com a operacionalização destes sistemas de controle e tratamento de dados deste equipamento desde sua implantação inicial. Hoje estão disponibilizados modelos de processo, relatórios e ferramentas de aquisição de dados que permitem aos usuários efetuar a maioria de seus estudos com grande facilidade. Existem áreas, porém, em que ainda existe a necessidade de implementação de ferramentas mais eficazes, e o cadinho do alto-forno é uma destas áreas.

O alto-forno foi projetado objetivando uma vida útil de 15 anos (acima de 15 milhões de toneladas). Porém, de modo a otimizar os recursos disponíveis e postergar sua reforma, há um projeto em andamento para permitir que o equipamento tenha uma vida útil superior a 20 anos (acima de 16.500 t/m<sup>3</sup> de volume útil).

O presente trabalho faz parte deste projeto e descreve a implementação de um sistema para monitoramento dos fluxos de calor e do desgaste do cadinho, visando obter uma ferramenta que permita avaliar mudanças no processo destinadas à preservação dos refratários desta área e conseqüente aumento da vida útil do equipamento.

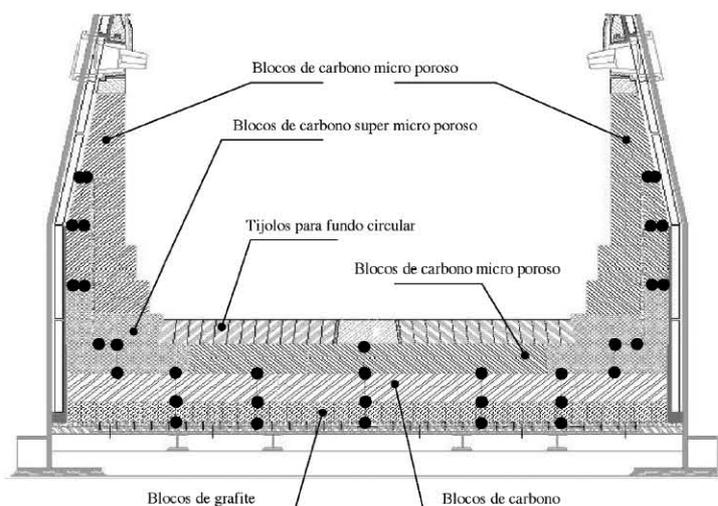
## 2 CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO

O alto-forno A está equipado com refrigeração por “staves” do cadinho ao topo, sendo estes distribuídos em ferro fundido comum no cadinho, cobre da rampa à cuba inferior e ferro fundido nodular nas cubas médias e superior. O topo é equipado com um “bell less top” Paul Wurth de alimentação central (apenas um silo pressurizado).

O volume interno do alto-forno é de 1357 m<sup>3</sup>, e o volume útil é de 1186 m<sup>3</sup>. O diâmetro do cadinho é de 8 metros. A produção projetada é de 1.040.000 t/ano. O forno conta com apenas um furo de gusa, e por isto o controle do desgaste se torna mais crítico.

Chama-se cadinho à região localizada na base do alto-forno, próxima ao furo por onde se drena o gusa. Esta região é altamente crítica para a operação do equipamento, devido aos seguintes fatores:

- O contato permanente com o gusa líquido torna esta área altamente suscetível a desgaste. A construção do cadinho é realizada de modo a minimizar este efeito, e no caso do Alto-Forno A foram utilizados blocos de carbono de alta resistência em suas paredes e na base, além de uma camada de material cerâmico sobre a base. Com a ajuda do sistema de refrigeração busca-se obter nesta área uma camada de material solidificado (gusa resfriado) sobre os blocos de carbono, impedindo o contato do gusa líquido sobre estes blocos e minimizando o seu desgaste.
- Nos equipamentos atuais, devido às melhorias obtidas no processo de refrigeração das áreas do ventre, rampa e cuba, a área do cadinho tornou-se o ponto mais crítico para a vida útil do equipamento. Pode-se dizer que a vida útil do alto-forno hoje é limitada diretamente pela vida útil do cadinho. Portanto, qualquer ganho que se obtenha da redução do desgaste do cadinho estará impactando diretamente os ganhos totais obtidos.



Fonte: Arquivo técnico Belgo – Detalhamento dos blocos de carbono

Figura 1. Perfil refratário do cadinho do AF A (corte 90 – 270 graus)

O desenho do cadinho do alto-forno A está mostrado na Figura 1. Basicamente trata-se de um cadinho com dois anéis de blocos de carbono micro-poroso e super micro-poroso nas paredes e fundo com um revestimento de tijolos cerâmicos de 500 mm, anterior aos blocos de carbono micro-porosos e comuns. Na figura são mostradas também as posições aproximadas dos sensores de temperatura.

A evolução das temperaturas do centro do subcadinho é mostrada na Figura 2. É possível perceber a freqüente ocorrência de estados transientes (causados por fatores variados, tais como má qualidade das matérias-primas, problemas operacionais, entrada de água no forno, etc.) com resfriamentos significativos. Nestes períodos a condição de operação do forno é extremamente prejudicada, com perda de produção e redução das taxas de injeção de carvão. Por outro lado, nos pontos de elevação das temperaturas, há ocorrência de desgastes localizados, que devem ser evitados. Em função deste comportamento, em meados de 2002, algumas medidas começaram a ser tomadas para evitar estas flutuações exageradas. As primeiras atuações foram na vazão da água da soleira, com reduções quando as temperaturas caíam a valores inferiores ao considerado ideal segundo experiências anteriores. Mais recentemente, outros recursos do sistema de refrigeração têm sido usados para amenizar as variações.

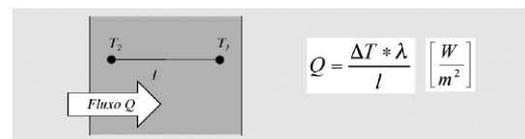
O alto-forno A possui 104 sensores de temperatura instalados na área do cadinho. A instalação destes sensores foi realizada com extremo cuidado, tornando possível que hoje se saiba precisamente sua localização e o material presente ao redor de cada um destes sensores. Estas condições tornam possível o cálculo do fluxo de calor entre dois sensores posicionados no sentido destes fluxos e, a partir daí, obter o comportamento da camada mais interna do cadinho, precisamente onde ela se encontra com o gusa líquido. Estima-se que nesta região possam ocorrer duas situações:

- O gusa líquido encontra-se em contato direto com as paredes do cadinho. Esta situação é detectada através da obtenção, através de cálculos, da isoterma de 1150 °C (temperatura de fusão do ferro saturado em carbono) diretamente junto a algum ponto da parede. Esta é uma situação que se deseja evitar, pois certamente causará o desgaste dos materiais das paredes.
- O gusa encontra-se solidificado junto as paredes do cadinho. Esta é a situação que se deseja obter, uma vez que o gusa solidificado (chamado costumeiramente de “bode”) forma uma camada protetora entre as paredes do cadinho e o gusa líquido. Esta proteção contribui eficazmente para diminuir o desgaste das paredes. Deve-se notar, porém, que esta camada não pode ser excessivamente grossa, uma vez que isto significaria redução do volume do cadinho e perda de permeabilidade do mesmo.

Para se obter então um retrato fiel das condições das paredes do cadinho, devemos calcular todos os fluxos obtidos através destes 104 sensores e partir destes valores para obtenção das condições presentes nas paredes em cada ponto. O grande volume de cálculos envolvidos torna esta tarefa difícil de se realizar rotineiramente, a não ser que uma ferramenta específica para esta tarefa seja construída.

### 3 MODELAMENTO TÉRMICO

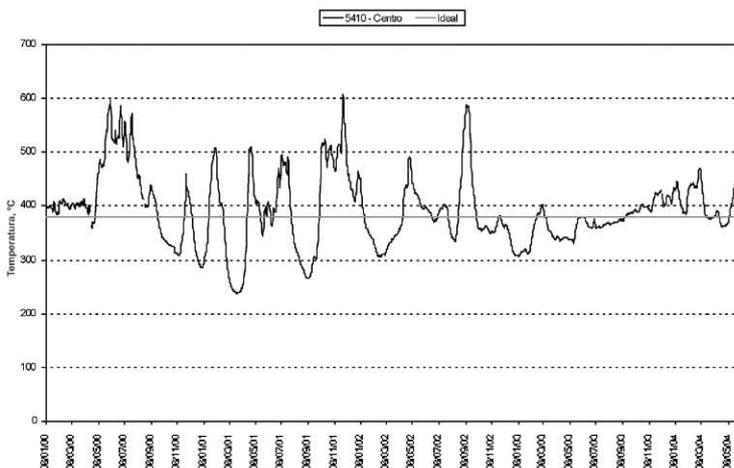
O modelo utilizado assume que o fluxo de calor ocorre de forma unidimensional e usa a equação de Fourier (equação 1) para determinar o desgaste ou a formação de camada solidificada.



Equação 1. Fluxo térmico entre dois pontos

Onde:

- $Q$  = fluxo de calor;
- $\Delta T = T_2 - T_1$  = diferença de temperatura entre dois termopares em linha;
- $\lambda$  = condutividade térmica;
- $l$  = distância entre os dois termopares considerados.



Fonte: Automação Belgo – Bases de dados históricas

Figura 2. Temperatura do centro do subcadinho desde o start-up

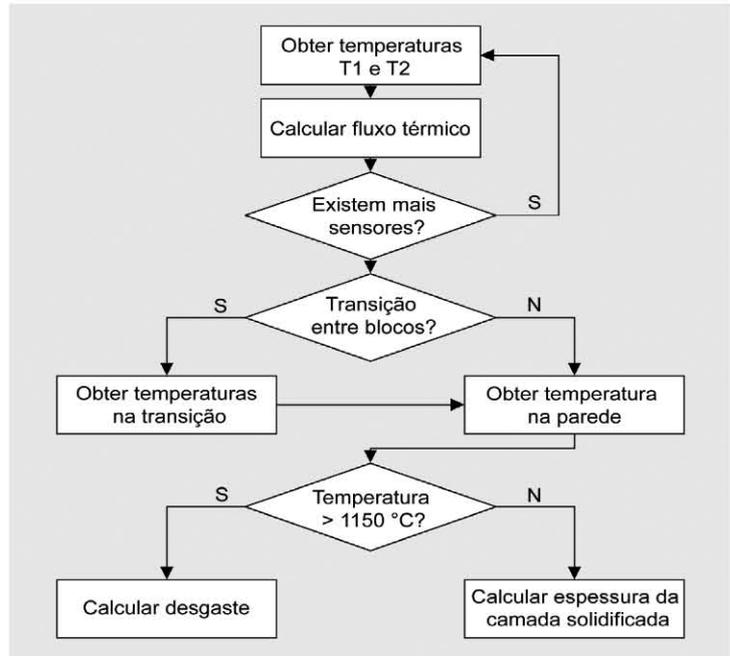
A disposição em que os termopares foram instalados contribui para que sempre existam dois termopares que possam ser utilizados para se calcular o fluxo em cada área do cadinho. Combinando a diferença entre estes dois valores de temperatura, a condutividade térmica do material existente entre eles (fornecido pelo fabricante dos blocos de carbono) e a distância entre os termopares pode-se calcular o fluxo que deixa o cadinho em uma determinada direção. Pode-se então utilizar este fluxo para calcular, por exemplo, novas temperaturas nas interseções entre os blocos de carbono ou distâncias entre um destes termopares e uma das paredes. O fluxo resultante fica como mostrado Diagrama I.

#### 4 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

O sistema é todo fundamentado em dados coletados regularmente pelo sistema supervisor do alto-forno. Todas as temperaturas do equipamento são coletadas a cada minuto, porém são armazenados registros históricos com médias a cada 15 minutos, horárias, de cada turno e diárias. A utilização do modelamento para estudos sobre o comportamento histórico do cadinho utiliza apenas os dados diários. Pode-se utilizar o sistema também em modo on-line, onde os dados da última hora podem ser visualizados e analisados.

As seguintes funções estão disponíveis ou se encontram em fase de disponibilização:

- Visualização de todas as temperaturas para uma determinada data;
- Visualização das temperaturas máximas obtidas em cada termopar;
- Cálculo e visualização de todos os fluxos presentes no cadinho;
- Cálculo e visualização do desgaste presente no cadinho ou do perfil da camada solidificada de gusa, se esta existir;
- Visualização da posição e forma das isotermas. Especial ênfase é dada às isotermas de 750 °C (que indica a temperatura de fragilização dos blocos de carbono) e 1150 °C (que indica a temperatura de fusão do gusa).
- Determinação do volume útil do cadinho.
- Totalização dos fluxos de calor pelo fundo e pela parede, para viabilizar a agregação de um módulo para controle automático da refrigeração.

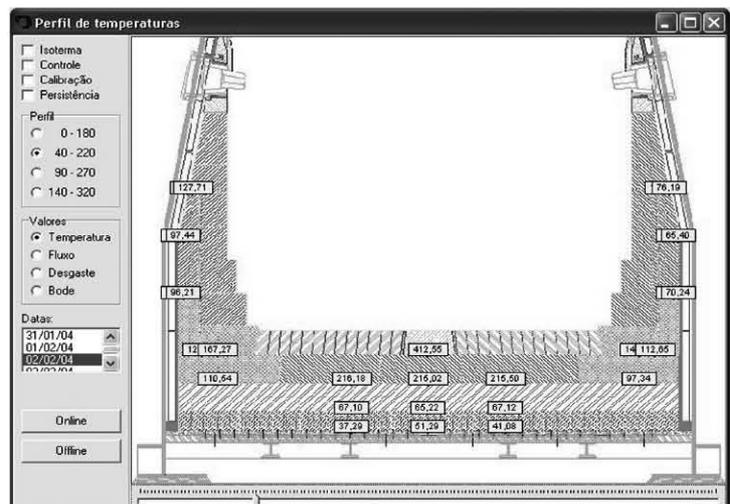


Fonte: Automação Belgo – Documentação de software

Diagrama I. Fluxo de cálculo do desgaste do cadinho

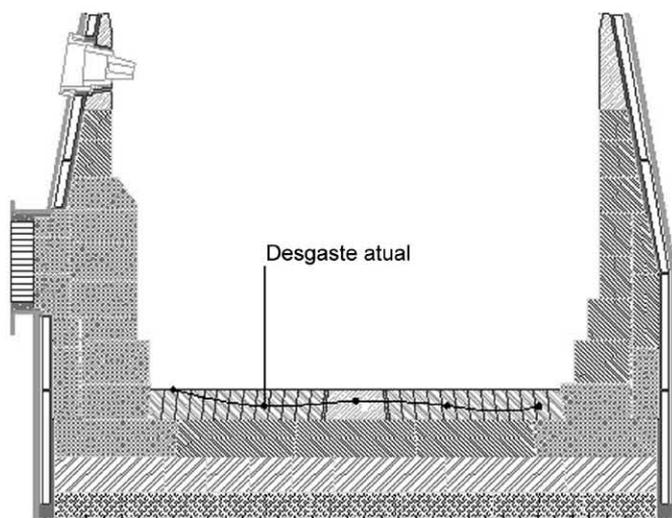
A Figura 3 mostra a tela principal do sistema implementado, mostrando o perfil do cadinho. Nela estão indicadas as temperaturas dos termopares para uma determinada data. À esquerda da tela estão localizados os comando para exibição das isotermas, polígonos de controle das isotermas e polígono de calibração da imagem (para acerto da escala da imagem às dimensões reais do cadinho).

Podem ser vistas também as caixas de seleção onde se possibilita trocar o perfil mostrado para uma das outras orientações e selecionar qual informação será exibida (temperatura, fluxo térmico, espessura remanescente e altura da camada solidificada).



Fonte: Automação Belgo – Sistema de Monitoramento do Desgaste do Cadinho

Figura 3. Tela de visualização do perfil do cadinho



Fonte: SETRED - Seminário técnico da área de redução - Belgo

Figura 4. Perfil atual de desgaste.

## 5 CONCLUSÃO

O sistema mostrado encontra-se em fase final de desenvolvimento, onde estão sendo feitas a conferência dos cálculos mostrados e melhorias da interface gráfica. Uma vez implantado, ele trabalhará como uma ferramenta de apoio aos operadores da cabine de controle do alto-forno e para os engenheiros de processo, inclusive fornecendo alertas sobre situações críticas que possam iniciar um processo de desgaste do cadinho. Em um segundo momento, as informações sobre os fluxos totais que

atravessam as paredes e o fundo serão utilizadas para controle das malhas de refrigeração destas áreas, contribuindo para que o controle da camada solidificada de proteção se torne ainda mais efetivo.

Os ganhos a serem obtidos com este projeto são de difícil estimativa, uma vez que se está trabalhando para o alongamento da campanha do equipamento de uma estimativa inicial de 15 anos para um prazo otimizado de 20 anos. Teoricamente então, apenas em 2015 estaremos começando a verificar se as ações tomadas durante todos estes 15 anos foram realmente efetivas. Na prática, porém, a observação direta das condições do cadinho também contribuirá para que o próprio processo do alto-forno como um todo seja mais estável, apresente menos problemas de operação e produza com maior qualidade.

Vários estudos já estão sendo feitos com os dados gerados pelo sistema. Na Figura 4 pode-se ver, por exemplo, o perfil de desgaste atual dos tijolos do fundo do cadinho. Com mais de 4 milhões de toneladas já produzidas, o desgaste da parede (principalmente na junção com a base, configurando um desgaste conhecido como "pé de elefante") ainda não é percebido, e o desgaste dos tijolos refratários na base do cadinho está dentro da expectativa.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 SANTOS, R. J. **Controle das temperaturas dos blocos de carbono do alto-forno, através de seu sistema de refrigeração, visando o prolongamento de campanha.** Belo Horizonte, 2004. 31 pp. Proposta de dissertação (Mestrado - Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- 2 SANTOS, R. J.; BORGES, W. O.; SANTOS, J. A.; TAVARES, R. P. Proposta de controle do desgaste do cadinho através de um sistema de refrigeração baseado em "stave coolers". In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 23., 2003, Ouro Preto. **Proceedings...** Ouro Preto: ABM, 2003.

Recebido em: 22/02/05

Aceito em: 21/12/05

Proveniente de: SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS, 8., 2005, Belo Horizonte. São Paulo: ABM, 2005.