

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

“Controle das temperaturas dos blocos de carbono
do alto-forno, através de seu sistema de
refrigeração, visando o prolongamento de campanha”

Autor: Rodrigo Junqueira dos Santos
Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

CONTROLE DAS TEMPERATURAS DOS BLOCOS DE CARBONO DO ALTO-
FORNO, ATRAVÉS DE SEU SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO, VISANDO O
PROLONGAMENTO DE CAMPANHA

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Autor: Rodrigo Junqueira dos Santos

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Área de concentração: Metalurgia Extrativa

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2005

Aos meus pais, José Abel e Iséa. Aos meus irmãos, Séfora e Maurício, Leopoldo e Liliane. Aos sobrinhos Dandara, Caio e Renata. E em especial à minha esposa Cinthya, e aos meus filhos Bruno e Marina.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Roberto Parreiras Tavares pela paciência e perseverança na orientação deste trabalho.

Ao Professor Luiz Fernando Andrade de Castro pelas valiosas sugestões durante a elaboração e na discussão da proposta de dissertação.

Aos Engenheiros Raimundo Nonato Batista Braga e Wander de Oliveira Borges, pelo incentivo e pelos comentários e sugestões no decorrer da elaboração do trabalho.

Aos colegas da Belgo que apoiaram, incentivaram e colaboraram na realização dos levantamentos de dados e experimentos, especialmente à equipe de operação do alto-forno A, ao controle de processo na pessoa do Haroldo Lacerda de Brito, e à automação, na pessoa do Engenheiro Gilberto Cardos Parreira, parceiro em grande parte do trabalho. E aos colegas Fabiano Cristeli e Alysson, pelas idéias.

A Evander Caíres Damasceno, pelo apoio no planejamento e análise dos experimentos.

Aos colegas Leandro Almeida, Osvaldo Neto, Guilherme Defendi e Frederico Fernandes pela convivência e os ensinamentos nos estudos em grupo.

Aos Engenheiros José Alencar dos Santos e Gerson Alves Menezes pela confiança e apoio.

A Universidade Federal de Minas Gerais pela infra-estrutura e pelos cursos de excelente qualidade na formação profissional dos Metalurgistas.

A minha esposa, Cinthya e aos meus filhos Bruno e Marina, pela compreensão e apoio.

Em especial à Belgo, pela oportunidade de aperfeiçoamento pessoal e profissional.

SUMÁRIO	PÁGINA
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Introdução	4
3.2 Alternativas de Projetos de Cadinho	7
3.3 Alternativas de Refrigeração do Cadinho	8
3.4 Fatores que Afetam Desgaste do Cadinho	9
3.4.1 Produtividade	10
3.4.2 Qualidade do coque	12
3.4.3 Situação do homem morto	14
3.5 Mecanismos de Desgaste do Cadinho	15
3.6 Formas de Controle de Desgaste do Cadinho Usadas Atualmente	27
3.6.1 Uso de titânio para proteção dos blocos de carbono	29
3.7 Modelos de Acompanhamento do Desgaste	31
4 METODOLOGIA	37
4.1 O Alto-Forno A da Belgo – Usina de Monlevade	37
4.1.1 O cadinho do alto-forno A	39
4.2 Análise dos Dados Históricos	42
4.3 Modelo de Acompanhamento do Desgaste do Cadinho do Alto-Forno A	42
4.4 Experimentos Exploratórios	43
4.5 Entrevistas e Visitas a Outras Usinas	44
4.6 Planejamento e Realização de Experimentos Controlados	49
4.6.1 Definição das variáveis para o experimento	49
4.6.2 Plano de experimento	50
4.7 Síntese das Ações de Controle Disponíveis	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1 Análise dos Dados Históricos	55
5.2 Experimentos Exploratórios	60
5.3 Experimentos Controlados	63
5.3.1 Execução e resultados imediatos	63
5.3.2 Análise dos resultados	73
5.4 Síntese das ações disponíveis	79

5.5	Evolução das temperaturas no cadinho do alto-forno A	80
5.6	Modelo de Acompanhamento do Desgaste do Cadinho do Alto-Forno A	83
6	CONCLUSÕES	87
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
	ANEXO I – Tabela de condutividade ($W / m * K$) dos materiais utilizados no cadinho do alto-forno A	90
	ANEXO II – Diagrama Fe-C	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

LISTA DE FIGURAS**PÁGINA**

Figura 3.1 – Relação entre produtividade e duração de campanha (Shinotake et alli, 2003).....	6
Figura 3.2 – Produtividade de campanha dos maiores altos-fornos do mundo (Kolijn et alli, 2001)	6
Figura 3.3 - Tipos de desgaste típicos de cadinho (Kolijn et alli, 2001).....	9
Figura 3.4 – Efeito da produtividade nas temperaturas do cadinho (Shinotake et alli, 2003).....	11
Figura 3.5 - Relação entre a fração retida em 40 mm na rampa e o I40 do coque enornado (Kolijn et alli, 2001).....	12
Figura 3.6 - Relação entre o tamanho do coque enornado e o tamanho do coque no homem morto (Kolijn et alli, 2001)	13
Figura 3.7 - Relação entre a queda no tamanho médio do coque entre o topo e o homem morto e o CSR do coque (Kolijn et alli, 2001)	13
Figura 3.8 - Relação entre a queda no tamanho médio do coque entre o topo e o homem morto e a TIP (Kolijn et alli, 2001).....	14
Figura 3.9 – Hipóteses de fases de desgaste do cadinho (Shinotake et alli, 2003)	16
Figura 3.10 – Estimativa da evolução do desgaste do alto-forno de Siderar (Gonzalez et alli, 2003)	16
Figura 3.11 – Perfil do desgaste do cadinho do alto-forno B de Sidmar na sua reforma de 2001 (Bonte et alli, 2001)	19
Figura 3.12 - Evolução do desgaste do bloco de carbono (Lima, 2000)	20
Figura 3.13 - Esquema de sondagem dos blocos de carbono do cadinho do alto-forno (Silva, 2000).....	20
Figura 3.14 - Indicação de ferro a partir da amostra 14, a 1442 mm da face fria (Silva, 2000).....	21
Figura 3.15 - Concentração de óxidos em função da profundidade (Silva,2000)	22
Figura 3.16 - Mecanismo de penetração de gusa nos blocos de carbono (Silva, 2000)	23
Figura 3.17 - Mecanismo de fragilização dos blocos de carbono (Silva, 2000).....	24
Figura 3.18 - Mecanismo de desgaste dos blocos de carbono por erosão e dissolução (Silva, 2000a).....	25

Figura 3.19 - Mecanismo de ataque dos blocos de carbono por oxidação (Silva, 2000a)	26
Figura 3.20 - Mecanismo de ataque dos blocos de carbono por CO (Silva, 2000a)	27
Figura 3.21 - Relação entre carregamento de TiO_2 e temperatura do furo de gusa (Lima, 2000)	30
Figura 3.22 - Relação entre Comprimento do furo de gusa e temperatura do cadinho na região (Lima, 2000)	30
Figura 3.23 - Gráficos das linhas de desgaste e camada estagnada para diferentes níveis (Pinto, 2000)	33
Figura 3.24 - Perfil de desgaste e proteção do cadinho para diferentes setores (Pinto, 2000)	34
Figura 3.25 - Perfil de temperaturas no cadinho do alto-forno "A" em seu design inicial (Kumar, 2005)	35
Figura 3.26 - Perfil de temperaturas no cadinho do alto-forno "B" em seu design inicial (Kumar, 2005)	35
Figura 3.27 - Posição da isoterma de 1.150°C no design inicial do cadinho do alto-forno "A", dependendo da temperatura do gusa na interface com o refratário. Caso 1, gusa a 1.400°C; Caso 2, gusa a 1.500°C (Kumar, 2005)	36
Figura 4.1 - Desenho do cadinho do alto-forno A	40
Figura 4.2 - Disposição dos termopares no cadinho do alto-forno A	41
Figura 4.3 - Forma gráfica de visualização dos resultados do experimento	53
Figura 5.1 - Evolução da temperatura do fundo do cadinho do alto-forno A até Fevereiro de 2002 (5m40cm, centro do cadinho, último antes da interface com o gusa líquido)	55
Figura 5.2 - Comportamento dos termopares do fundo do cadinho e da parede abaixo do furo de gusa, de 05/01/2000 a 28/02/2002	56
Figura 5.3 - Queda da temperatura do fundo causada por elevação da taxa de injeção. Período de 03/09 a 12/11/00	57
Figura 5.4 - Queda da temperatura do fundo causada por elevação da taxa de injeção. Período de 31/01 a 28/02/01	57
Figura 5.5 - Evolução do comprimento do furo de gusa desde o <i>start-up</i> do alto-forno A	59
Figura 5.6 - Evolução dos mínimos comprimentos de furo de gusa registrados na campanha do alto-forno A	59

Figura 5.7 - Evolução da temperatura do fundo do cadinho do start-up até julho de 2003 (Santos, 2003).....	61
Figura 5.8 - Perda térmica do sistema de refrigeração da soleira em função da vazão e temperatura da água de refrigeração (Santos, 2004)	62
Figura 5.9 - Vazão de água nos tubos da soleira nas etapas do experimento.....	65
Figura 5.10 - Temperatura de entrada da água nos tubos da soleira nas etapas do experimento	65
Figura 5.11 - Resultado das perdas térmicas da soleira nas 9 etapas do experimento.....	66
Figura 5.12 - Resultado das perdas térmicas dos <i>staves</i> do cadinho nas 9 etapas do experimento	67
Figura 5.13 - Evolução da temperatura abaixo do furo de gusa durante o experimento	67
Figura 5.14 - Evolução da temperatura do centro do cadinho a 5m40cm durante o experimento	68
Figura 5.15 - Evolução da temperatura do centro do cadinho a 4m80cm durante o experimento	69
Figura 5.16 - Evolução da temperatura do centro do cadinho a 4m20cm durante o experimento	70
Figura 5.17 - Evolução da temperatura do centro do cadinho a 3m80cm durante o experimento	70
Figura 5.18 - Localização dos termopares na vista frontal da representação tridimensional do cadinho do alto-forno A.....	71
Figura 5.19 – Perdas térmicas (kW) na soleira resultantes dos experimentos, apresentadas em forma gráfica.....	73
Figura 5.20 - Relação entre as perdas térmicas da soleira e a temperatura da água para diferentes vazões de água na soleira.....	76
Figura 5.21 - Relação entre as perdas térmicas dos <i>staves</i> e a temperatura da água para diferentes vazões de água na soleira.....	76
Figura 5.22 - Relação entre as temperaturas de entrada e saída da água nos tubos da soleira, para três vazões diferentes.....	77
Figura 5.23 - Relação entre a temperatura de entrada da água na soleira e a diferença entre as temperaturas de entrada e saída.....	78
Figura 5.24 - Relação entre as temperaturas de entrada e saída da água nos <i>staves</i> do cadinho, para três vazões de água nos tubos	78

Figura 5.25 - Evolução das temperaturas no centro do subcadinho, a 5m40cm, desde o <i>start-up</i> até novembro de 2005.....	80
Figura 5.26 - Evolução das temperaturas da parede abaixo do furo de gusa, do <i>start-up</i> até novembro de 2005	81
Figura 5.27 - Evolução das temperaturas da parede acima do furo de gusa, do <i>start-up</i> até novembro de 2005	81
Figura 5.28 - Tela do modelo de acompanhamento do desgaste do cadinho mostrando os fluxos de calor do dia 23/10/2002	84
Figura 5.29 - Tela do modelo de acompanhamento do desgaste do cadinho mostrando algumas isotermas no dia 27/03/2001	85
Figura 5.30 - Tela do modelo de acompanhamento do desgaste do cadinho mostrando algumas isotermas no dia 28/11/2001	85
Figura 5.31 - Tela do modelo de acompanhamento do desgaste do cadinho mostrando a evolução do desgaste do prato cerâmico	86

LISTA DE TABELAS	PÁGINA
Tabela III-1 - Causas de encerramento de campanha de altos-fornos entre 1986 e 2000 (Zubimendi et alli, 2003)	11
Tabela IV-1 - Principais dados de projeto do alto-forno A.....	38
Tabela IV-2 - Resumo das informações obtidas nas visitas a outras usinas.....	48
Tabela IV-3 - Plano original de experimentos	51
Tabela IV-4 - Níveis de estudo das variáveis A, B e C no experimento 2^3	51
Tabela IV-5 - Níveis de estudo das variáveis A e B no experimento 3^2	52
Tabela IV-6 - Plano de experimentos fatorial 3^2	53
Tabela V-1 - Ordem real dos experimentos	64
Tabela V-2 - Resultados dos experimentos	72
Tabela V-3 - Análise estatística dos resultados dos experimentos	74
Tabela V-4 - Máximas temperaturas registradas em locais selecionados no cadinho do alto-forno A	83

NOTAÇÃO

CSR	Teste que indica a resistência após reação do coque
CRI	Teste que indica a reatividade do coque
I40	Teste que indica a resistência mecânica do coque
AR	Arcelor Research, antigo IRSID com outros centros de pesquisa agregados.
IRSID	Institut de Recherches de La Sidérurgie Française
TIP	Taxa de injeção de carvão pulverizado, kg/t.
λ	Condutividade térmica, W/m.K
T	Temperatura, °C
q	Fluxo de calor, W/m ²
ΔT	Variação de temperatura, °C ou K
l	Distância, mm
C_p	Capacidade calorífica, cal/°C ou K

RESUMO

Com o objetivo de prolongar a vida útil do cadinho do alto-forno, este trabalho buscou alternativas de controle das temperaturas dos blocos de carbono desta região. Foram estudadas as causas do desgaste dos blocos e as formas de controle do desgaste utilizadas por outras empresas, como a utilização de minério titanífero, a redução de produtividade e o fechamento de ventaneiras, por exemplo. Vários modelos de acompanhamento do desgaste foram analisados, e com base neste estudo um modelo adequado às necessidades do alto-forno A da Usina de Monlevade, Belgo – Grupo Arcelor foi desenvolvido pela equipe de automação. Foi testado o efeito de alterações da vazão e da temperatura da água de refrigeração nas perdas de calor do cadinho, para verificar se há possibilidade de atuando nestes fatores, influenciar as temperaturas dos blocos. A conclusão do trabalho foi que é possível controlar, dentro de certos limites, as temperaturas dos blocos de carbono através do sistema de refrigeração. Um módulo de controle automático dos parâmetros de refrigeração deve ser desenvolvido para tal, assim como se deve separar a refrigeração das paredes do cadinho da refrigeração do fundo, de modo a se atuar em um sem afetar negativamente o outro.

ABSTRACT

With the aim of increasing blast furnace life, alternatives to control the carbon blocks temperature in a blast furnace hearth were studied. The main influences on the wear of the carbon blocks, as well as the control methods used in other plants, as productivity decrease and the use of titanium burden were analyzed. Many models designed to follow the hearth wear were studied, and based on this analysis a model was designed for the blast furnace A from Belgo – Arcelor, Monlevade Works. The influence of changes on the hearth cooling system were tested to check if the water flow rate or the water temperature were able to have an effect on the carbon blocks temperature, and the conclusion was that they can affect these temperatures, in a certain extend. A module to control the cooling parameter automatically, depending on the heat flux from the furnace hearth, in order to keep constant the carbon blocks temperature must be developed, as well as a split in the cooling system have to be done to allow changes in the bottom cooling avoiding temperatures peaks in the hearth walls.

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de sistemas de refrigeração mais eficientes para as regiões do ventre, rampa e cuba, o cadinho, que já era um ponto importante, se tornou o ponto mais crítico para a vida útil dos altos-fornos. No caso do alto-forno A da Belgo - Usina de Monlevade, empresa do grupo Arcelor, cujo sistema de refrigeração é composto por *stave coolers* do cadinho até a cuba superior, a expectativa de vida útil dos revestimentos da região acima do cadinho supera os 25 anos (Peters et alli, 2003). Neste quadro, o desgaste do cadinho se torna fundamental para a longevidade do alto-forno.

Após cinco anos de operação, a experiência mostrou que trabalhar com temperaturas muito baixas nos blocos de carbono do cadinho, o que seria ideal do ponto de vista da preservação dos mesmos, gera efeitos colaterais na operação do forno afetando sua produtividade. Normalmente temperaturas muito baixas no fundo significam baixa permeabilidade do cadinho, com fluxo preferencial pelas paredes – provocando desgaste na região mais crítica. Temperaturas muito baixas no fundo e nas paredes indica diminuição do volume útil do cadinho (formação de “bode”, ou no inglês *skull*), piorando o esgotamento e interferindo na operação. Portanto, não se trata apenas de usar a máxima capacidade de refrigeração durante todo o tempo de operação, mas sim de encontrar o equilíbrio entre o fluxo de calor proveniente do interior do alto-forno e a extração de calor pelo sistema de refrigeração.

Trabalhar com temperaturas elevadas no fundo e nas paredes leva à maximização do volume do cadinho, deixando o forno menos susceptível a problemas de esgotamento, porém acelera o desgaste e reduz a vida útil do equipamento.

Há que se encontrar, então, um meio de moldar as isotermas nos blocos de carbono, de modo a maximizar a vida do equipamento ao mesmo tempo operando com alta produtividade e baixo consumo de combustíveis. Para isto pode-se trabalhar nas matérias-primas e na prática de esgotamento e outros parâmetros operacionais, mas também adaptar o sistema de refrigeração às condições de trabalho do interior do forno.

O controle da posição das isotermas nos blocos de carbono através da alteração dos parâmetros do circuito de refrigeração certamente possibilitará ganho financeiro significativo para a empresa, com o adiamento da reforma do alto-forno, além de maior estabilidade de operação e de produção de gusa.

Este trabalho visa desenvolver formas efetivas de controle das temperaturas dos blocos de carbono de revestimento do cadinho do alto-forno de Monlevade de modo a retardar o desgaste dos mesmos, mas procurando manter a estabilidade operacional e alta produtividade com baixo consumo de combustíveis, notadamente o coque metalúrgico.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver formas de controle das temperaturas dos blocos de carbono do cadinho do alto-forno A de modo a garantir a estabilidade operacional do forno e o prolongamento da sua vida útil.

A intenção é trabalhar com alta produtividade e baixo consumo de combustíveis, especialmente coque metalúrgico, mas ainda assim preservar o cadinho do alto-forno de forma a levar sua campanha a mais de 20 anos.

Para chegar a este objetivo maior, têm-se os objetivos específicos:

- desenvolver um modelo de acompanhamento dos fluxos de calor no cadinho;
- identificar os efeitos individuais e as interações dos parâmetros de controle disponíveis no sistema de refrigeração;
- obter um conjunto compreensível e ordenado de ações de controle das temperaturas do cadinho através das ferramentas disponíveis no sistema de refrigeração e de processo do alto-forno A.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

O prolongamento de campanha dos altos-fornos é um tema chave hoje na área de redução e na siderurgia como um todo. Reformas têm se tornado cada vez mais onerosas, devido à tecnologia empregada. E, além dos custos diretos com obras, há a perda de produção que compromete o atendimento a clientes. Para usinas como a Belgo - Usina de Monlevade, que possuem apenas um alto-forno, uma reforma deve ser postergada ao máximo para minimizar as perdas para a empresa e seus clientes.

A importância de se retardar a reforma de um alto-forno tem, no caso da Usina de Monlevade, dois aspectos principais; primeiro, como a usina possui atualmente apenas um alto-forno, sua reforma vai afetar o nível de produção e atendimento aos clientes, comprometendo o faturamento de forma importante, uma vez que reformas de altos-fornos hoje têm duração acima de 60 dias. Em segundo lugar, o custo de uma reforma hoje é da ordem de US\$ 40,00 por tonelada anual de produção, no caso de Monlevade, acima de US\$ 40 milhões. Para um montante deste, a cada ano de prolongamento de campanha pode-se esperar um ganho financeiro da ordem de 15% (considerando o mercado financeiro atual), ou em torno de US\$ 6 milhões por ano de campanha acima do previsto. O cálculo por tonelada é confirmado, em ordem de grandeza, por Pecka (2003), que informa que, na reforma do alto-forno IV da ROGESA, foram investidos mais de 60 milhões de Euros para elevar a capacidade de produção de 5.000 para 6.400 t/dia.

Em virtude da importância do assunto, muito tem sido discutido com respeito a formas de preservação dos altos-fornos. Nos fornos modernos, a substituição do revestimento refratário por *stave coolers* mudou o ponto crítico de desgaste da rampa para os elementos de refrigeração e o cadinho (Fujihara et alli, 2003), uma vez que a expectativa de vida útil dos novos elementos de refrigeração supera os 25 anos (Peters et alli, 2003). Nesta dissertação o foco foi direcionado para o cadinho, uma vez que já existem alternativas de substituição de linhas de *staves* com paradas

relativamente curtas – as campanhas atuais devem ser limitadas, então, pela região inferior do forno.

A campanha do alto-forno A foi projetada para 15 anos, o equivalente a 13.000 toneladas produzidas por metro cúbico de volume interno. Segundo Shinotake et alli (2003), a melhor produtividade alcançada até o momento (entre os fornos japoneses que tiveram campanhas iniciadas entre 1975 e 1989) é de 16.000 t/m³ (figura 3.1).

Para fornos de volume útil de até 2.000 m³, como é o caso do alto-forno A, a melhor marca no momento é da ordem de 15.000 t/m³. Koliijn et alli (2001) mostram na figura 3.2 as campanhas dos maiores altos-fornos do mundo. O forno em destaque (Corus BF6) está acima da linha de 80 kt/m³ de volume do cadinho. No caso do alto-forno A de Monlevade, isto significaria uma produtividade da ordem de 17.500 t/m³ de volume interno.

No Brasil, o alto-forno 1 da CST deverá ultrapassar (Fujihara et alli, 2003) as 18.500 t/m³, se confirmar sua campanha até 2008.

A última campanha do alto-forno A de Sidmar (Bonte et alli, 2003) teve a produção de praticamente 11.000 t/m³ (volume útil). Este número é especialmente importante porque o cadinho do alto-forno A da Belgo é muito semelhante ao deste forno (o alto-forno A foi construído com assistência técnica de Sidmar). Projetando por este resultado, a vida útil do alto-forno A da Belgo seria de apenas 10 anos.

O desafio, proposto por um projeto em 2002, foi o de elevar a campanha do alto-forno A para 20 anos, ou acima de 17.000 t/m³. Porém, os resultados obtidos por Sidmar (Bonte, 2003) mostram que deverão ser desenvolvidos novos métodos para alcançar esta meta.

A revisão bibliográfica a seguir discute as alternativas de projetos de cadinho, as alternativas de refrigeração disponíveis, as causas do desgaste do cadinho, as formas de controle usadas atualmente como ferramentas para o prolongamento das campanhas e os modelos de monitoramento de desgaste disponíveis.

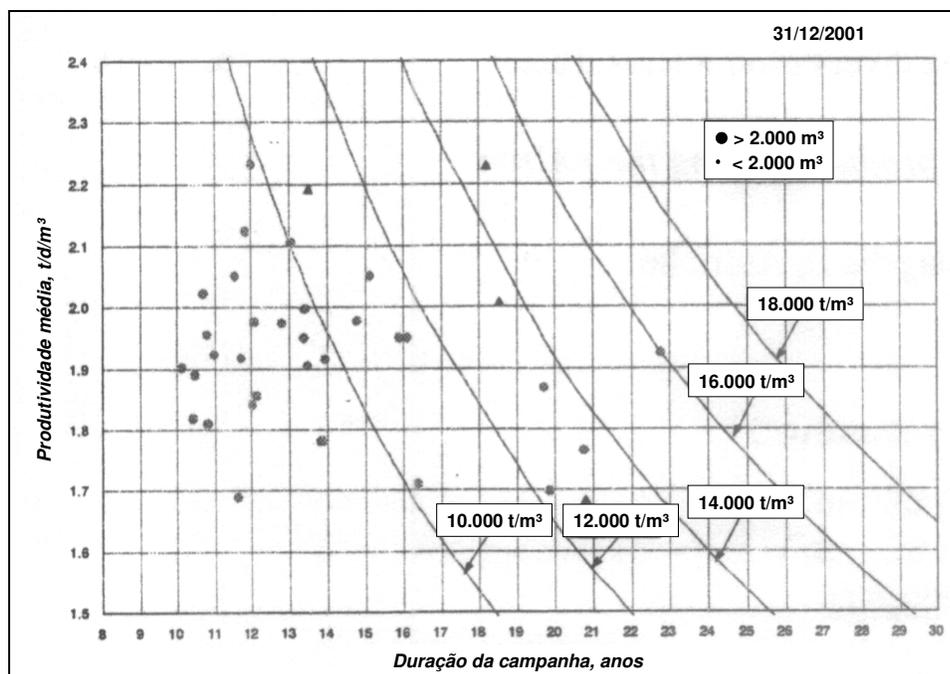


Figura 3.1 – Relação entre produtividade e duração de campanha (Shinotake et ali, 2003)

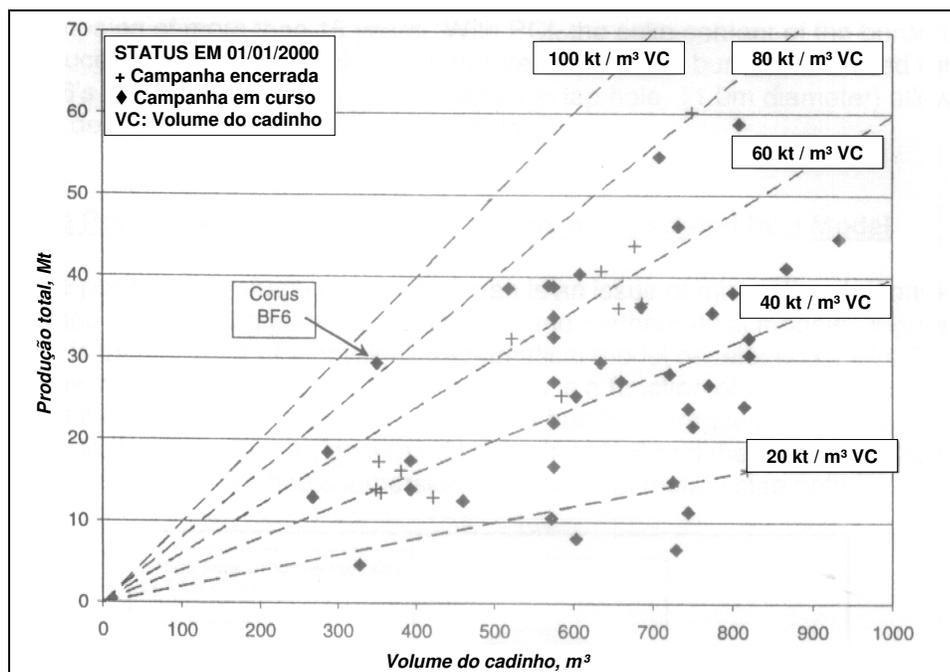


Figura 3.2 – Produtividade de campanha dos maiores altos-fornos do mundo (Koliijn et ali, 2001)

3.2 Alternativas de Projetos de Cadinho

Janz et alli (2003) sintetizam as duas linhas básicas atuais de projetos de cadinho: o revestimento com blocos de carbono de alta condutividade (solução térmica) e o revestimento com blocos de carbono coberto com copo cerâmico (solução refratária).

A segunda solução é uma evolução do projeto de cadinhos com blocos de carbono e uma camada de tijolos cerâmicos na base para proteger o fundo e reduzir a perda de calor. A vantagem da solução refratária é o menor consumo de energia – os blocos de carbono de alta condutividade favorecem altos fluxos de calor, que aumentam as perdas térmicas e o consumo de energia do processo.

Na solução térmica (que é a solução usada no cadinho do alto-forno A da Belgo, com uma camada cerâmica sobre a base), a expectativa é de se trabalhar com uma camada solidificada de proteção, que impede o contato do gusa líquido com os blocos de carbono e evita o desgaste. A espessura desta camada solidificada é determinada pelo equilíbrio entre as condições destrutivas do interior do cadinho e a eficiência do sistema de refrigeração.

A solução refratária reduz a possibilidade de formação desta camada solidificada, o que expõe o material ao desgaste. Porém, já há casos, como o de um alto-forno na Alemanha, com diâmetro de cadinho de 14,9 metros, que ainda mantém o copo cerâmico (camada cerâmica sobre a base e a parede) após 20 milhões de toneladas produzidas (Janz et alli, 2003).

A solução escolhida em Stahlwerke Bremen (Janz et alli, 2003) para a reforma do alto-forno 2, foi a utilização de um copo cerâmico cobrindo blocos de carbono de alta condutividade. Com isto espera-se que se trabalhe com a solução refratária enquanto durar o copo cerâmico e com a solução térmica após a deterioração do mesmo. Isto levaria a menores perdas térmicas no período inicial.

3.3 Alternativas de Refrigeração do Cadinho

Ainda existem altos-fornos em operação com refrigeração do fundo baseada em circulação forçada de ar, como é o caso do alto-forno 2 de Siderar (Zubimendi et alli, 2003). O uso de ventiladores para resfriar o fundo já foi uma evolução em relação aos fornos sem resfriamento, mas hoje (Janz et alli, 2003), o estado da arte é a refrigeração com tubos de água abaixo da *bottom plate*. Há alguns altos-fornos já adaptando a separação dos tubos em setores, de modo a refrigerar de forma individualizada regiões diferentes do forno de acordo com as indicações dos termopares dos blocos de carbono.

Nas paredes, ainda segundo Janz et alli (2003), o uso de cortina de água ou *sprays* refrigerando a carcaça foi substituído primeiro por caixas de refrigeração externa à carcaça, o que já melhorou a troca térmica por manter constantes a qualidade e a vazão da água, e evitar a formação de filmes isolantes na carcaça. A evolução seguinte, a partir dos anos 70, foi a introdução dos *stave coolers* no cadinho.

No princípio, os *staves* eram de ferro fundido nodular (*staves* de cobre, mesmo para uso em outras regiões do forno, só começaram a ser usados em 1993 nas usinas de Schwelgern e Salzgitter na Alemanha). Os *staves* foram um grande avanço na capacidade de refrigeração do cadinho e levaram a um aumento importante na vida média dos altos-fornos. Mas os *staves* de ferro fundido não evitariam a ocorrência de acidentes tipo perfuração da carcaça (*breakout*) se houvesse infiltração de material líquido. A capacidade de troca térmica do ferro fundido é insuficiente para solidificar o gusa em contato direto, e neste caso o *stave* fundiria. No caso dos *staves* de cobre, a expectativa é que, no contato com os mesmos, o gusa solidificaria imediatamente, evitando assim a perfuração da carcaça.

Na última reforma, então, o alto-forno 2 da Stahlwerke Bremen instalou *staves* de cobre no cadinho (Janz et alli, 2003). Também o alto-forno B de Sidmar (Bonte et alli, 2001) voltou de sua reforma de 2001 com *staves* de cobre no cadinho assim como o alto-forno A, também de Sidmar, após a reforma de 2003.

3.4 Fatores que Afetam Desgaste do Cadinho

Kolijn et alli (2001) mostram os dois formatos de desgaste mais comuns em cadinhos de altos-fornos (figura 3.3).

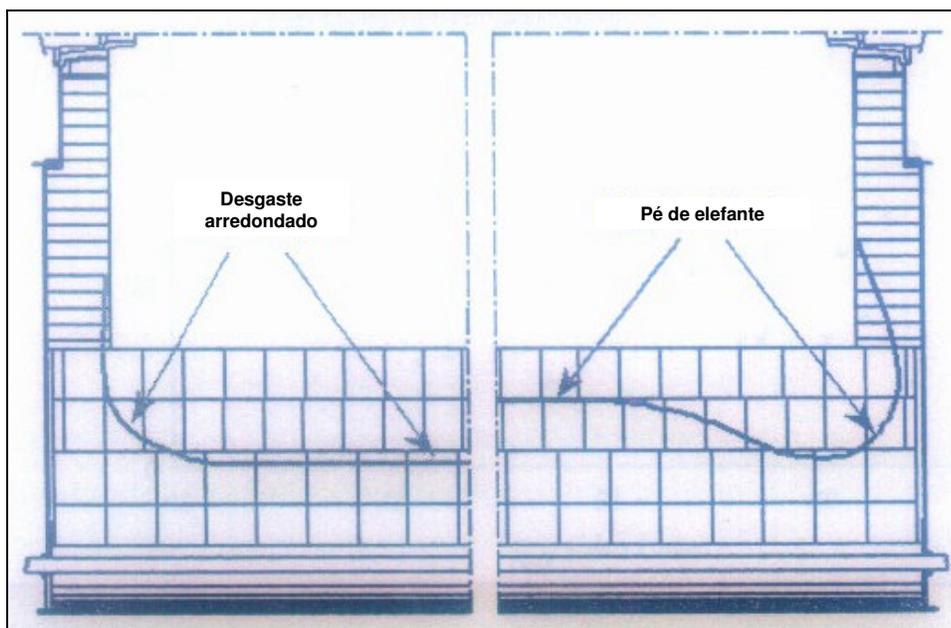


Figura 3.3 - Tipos de desgaste típicos de cadinho (Kolijn et alli, 2001)

Os dois tipos podem ter – e normalmente têm – causas diferentes. O desgaste tipo “pé de elefante” ocorre quando se opera com baixa permeabilidade no homem morto, por baixa qualidade de coque ou por injeção de carvão em taxas inadequadas à qualidade do coque, como será discutido mais à frente. O desgaste arredondado ocorre quando há boa permeabilidade do homem morto ou quando o diâmetro do cadinho é suficientemente pequeno e as demais condições favoráveis para que o homem morto flutue.

Szekely (1981) já apontava como possíveis causas para o desgaste do cadinho:

- penetração de metal líquido no revestimento;

- dissolução do carbono do cadinho;
- ataque por álcalis;
- oxidação do carbono do cadinho;
- destruição do revestimento devido a tensões térmicas.

Deste modo considera-se que, se for possível manipular a isoterma de 1.150°C (que corresponde ao eutético do diagrama ferro-carbono, mostrado no Anexo II), de modo a afastá-la dos blocos, pode-se preservar o revestimento da maioria das causas de desgaste. De fato a expectativa é a de que, dada a capacidade de resfriamento na superfície dos blocos, ao tocar a superfície o gusa se solidificaria. Por isto a isoterma de 1.150°C é considerada para o cálculo da interface entre bloco e material líquido.

3.4.1 Produtividade

Shinotake et alli (2003) relacionaram a longevidade do alto-forno à sua produtividade. Os fatores que fariam a ligação entre os dois parâmetros seriam:

- a vazão de gusa ao longo da parede do cadinho aumenta com o aumento da produtividade;
- a temperatura do gusa passando junto à parede do cadinho segue a mesma tendência;
- a transferência de calor por convecção aumenta;
- o fluxo de calor passando pelo revestimento do cadinho aumenta (como consequência dos dois itens anteriores).

Na figura 3.4, Shinotake et alli (2003) mostram a relação entre produtividade e temperatura em diversas posições no cadinho. Os valores foram calculados com auxílio de um modelo. Fica clara a influência da produtividade na temperatura da parede (principalmente abaixo dos furos de gusa) e na quina entre o fundo e a parede do cadinho.

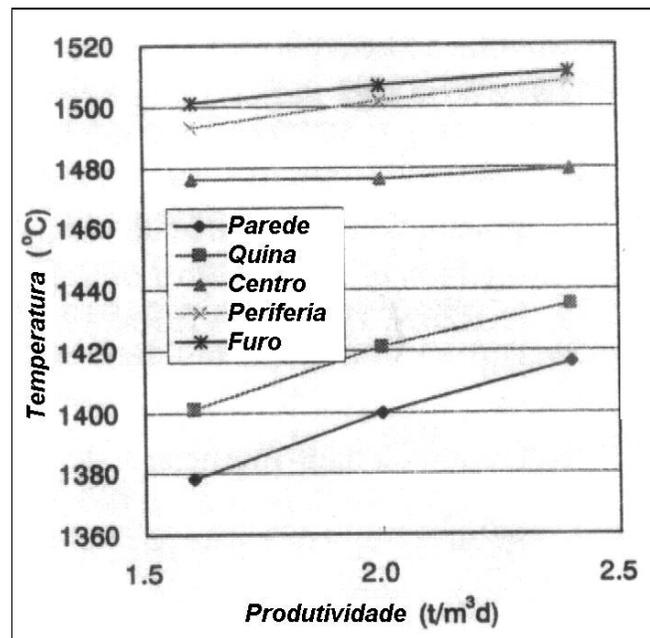


Figura 3.4 – Efeito da produtividade nas temperaturas do cadinho (Shinotake et alli, 2003)

A extensão da campanha também foi relacionada à produtividade em um trabalho desenvolvido por Zubimendi et alli (2003). Segundo eles, os japoneses têm conseguido boas campanhas (16.500 t/m³) mas com baixas produtividades (2,2 t/d/m³). Na Europa, as campanhas têm sido menores devido aos melhores índices de produtividade, como a do forno já citado na introdução, o alto-forno 6 da Corus, que finalizou a campanha com 12.800 t/m³. As principais causas de encerramento de campanha são mostradas na tabela III - 1.

Tabela III-1 - Causas de encerramento de campanha de altos-fornos entre 1986 e 2000 (Zubimendi et alli, 2003)

Causa	Fornos
Corpo do forno	22
Base do cadinho	3
Parede do cadinho	47
Outros equipamentos	6
Estrutura produtiva	22

3.4.2 Qualidade do coque

Kolijn et alli (2001) reuniram evidências das relações entre qualidade do coque, taxa de injeção de carvão e tamanho do coque no cadinho (figuras 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8). A figura 3.5 mostra a relação entre a fração acima de 40 mm na rampa do alto-forno e o I40 (índice que mede a resistência mecânica do coque), obtida no centro de pesquisa da Corus. A elevação de 1 ponto no I40 significa 1,5 % a mais de coque retido na malha de 40 mm na rampa.

Outro estudo citado por ele é da Nippon Steel, que encontrou relação entre o tamanho do coque enornado e o tamanho do coque no homem morto (figura 3.6).

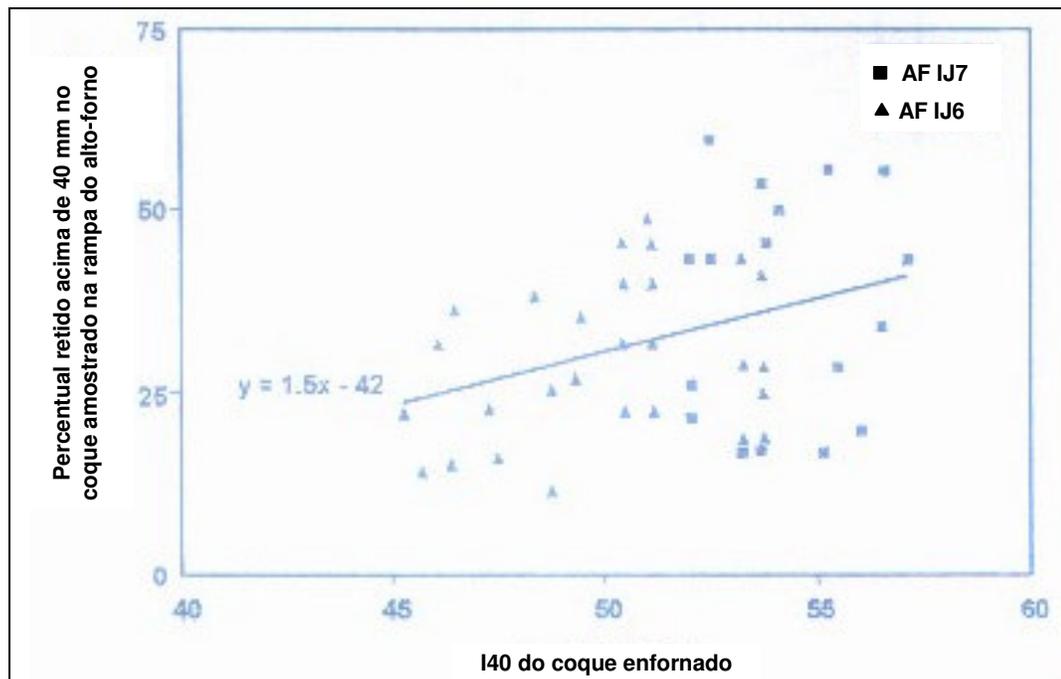


Figura 3.5 - Relação entre a fração retida em 40 mm na rampa e o I40 do coque enornado (Kolijn et alli, 2001)

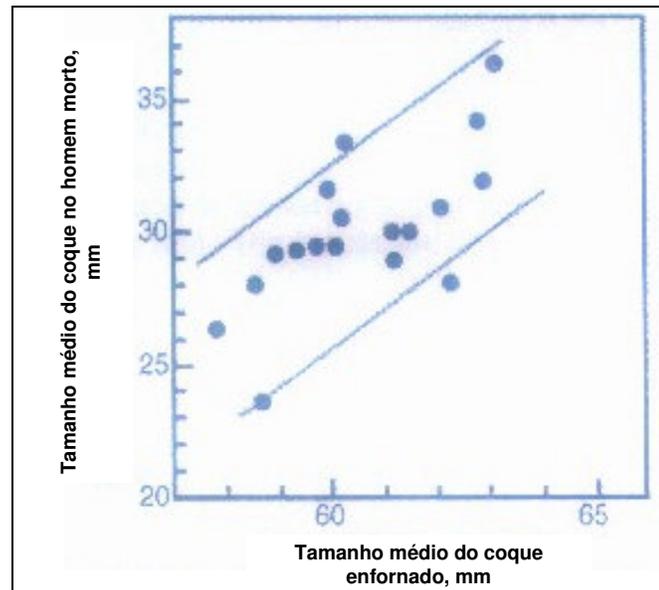


Figura 3.6 - Relação entre o tamanho do coque enornado e o tamanho do coque no homem morto (Kolijn et alli, 2001)

Estudos conduzidos em FOS (Sollac-Mediterranee), citados também por Kolijn et alli (2001), mostraram a relação entre o CSR (índice que mede a resistência do coque sob reação) e a degradação do coque dentro do alto-forno (figura 3.7).

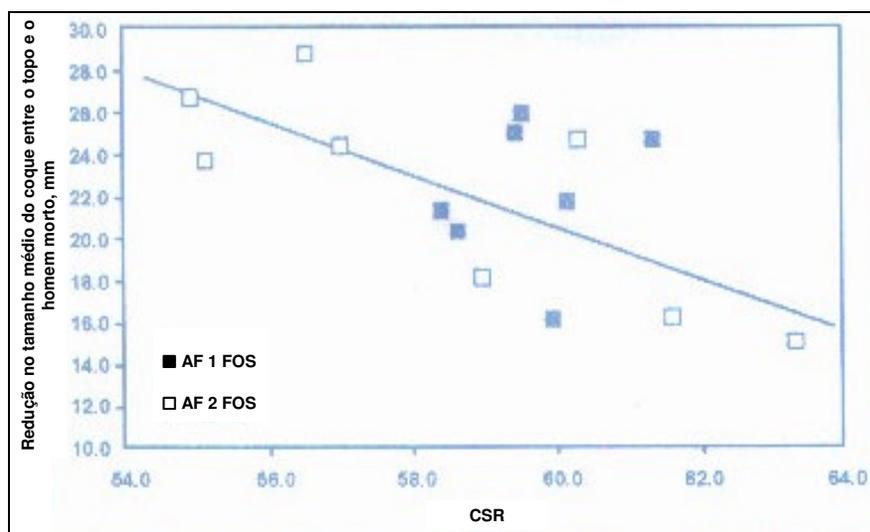


Figura 3.7 - Relação entre a queda no tamanho médio do coque entre o topo e o homem morto e o CSR do coque (Kolijn et alli, 2001)

Finalmente, Koliijn et alli, (2001) falam sobre a queda do tamanho médio do coque entre o topo e o homem morto correlacionado com a taxa de injeção de carvão pulverizado (TIP), em estudo realizado pelo IRSID-Sollac, hoje Arcelor Research, mostrado na figura 3.8.

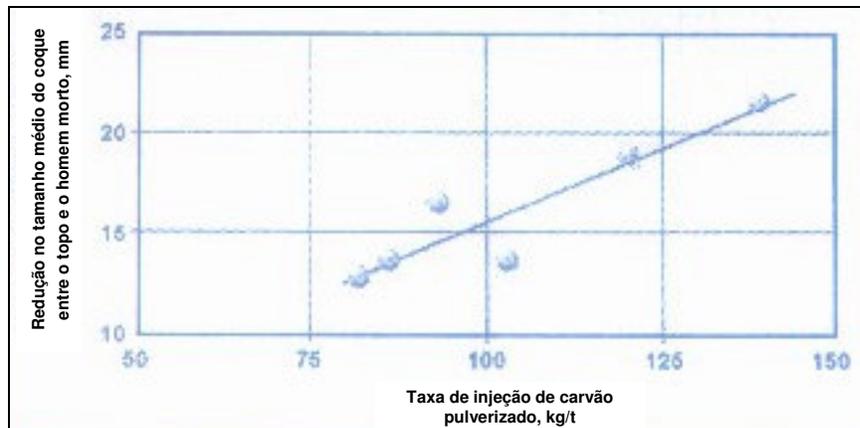


Figura 3.8 - Relação entre a queda no tamanho médio do coque entre o topo e o homem morto e a TIP (Taxa de Injeção de carvão Pulverizado) (Koliijn et alli, 2001)

A conclusão é que quanto maior o coque enforado, e quanto melhor sua resistência mecânica e à reação, maior seu tamanho no homem morto, maior a fração de vazios e melhor a permeabilidade nesta região. Com isto menor a chance da ocorrência do desgaste tipo “pé de elefante”. A elevação da taxa de injeção deve ser acompanhada da melhora da qualidade do coque de forma a evitar este tipo de desgaste.

3.4.3 Situação do homem morto

Pereira (1990) afirma que quando o homem morto se apóia no fundo do cadinho, ocorre a condição favorável para a formação da camada solidificada de gusa, devido às baixas velocidades de passagem do gusa líquido. Quando o homem morto flutua, a taxa de transferência de calor por convecção para esta camada solidificada aumenta, forçando a sua dissolução. Isto explica o ciclo que se observa normalmente nos altos-fornos, onde ocorre alternância entre períodos de temperaturas elevadas e baixas nos blocos de carbono.

3.5 Mecanismos de Desgaste do Cadinho

Para Koliijn et alli (2001), os refratários do cadinho estão expostos a vários mecanismos de ataque:

- físicos: erosão, dissolução, penetração de gusa líquido;
- químicos: ataque por álcalis e zinco, oxidação, deposição de carbono;
- termomecânicos: trincas por *stress* térmico, lascamento.

Enquanto alguns fenômenos são imediatos, outros levam um certo tempo para se manifestarem. A oxidação causada por vazamento em elementos de refrigeração pode causar grande desgaste em horas ou dias, enquanto a fragilização dos blocos de carbono, por exemplo, é um fenômeno que ocorre apenas a partir da exposição por certo tempo acima de uma determinada temperatura.

Quanto ao mecanismo de desgaste, Shinotake et alli (2003) propõem que ocorram três fases, dependendo da etapa de vida do forno. Na primeira fase, enquanto a espessura residual do refratário é grande, a erosão se dá por meio de ataque direto à superfície e retirada de lascas (*spalling*). Na segunda fase, após a redução da espessura a um nível que permita a formação de uma camada solidificada de gusa, a erosão não ocorre facilmente se a operação é mantida estável. Porém, com a exposição prolongada a temperaturas instáveis e elevadas, ocorre a fragilização do material refratário. Na terceira fase, novamente ocorre o fenômeno de retirada de lascas do revestimento (terceira fase) e a erosão leva ao final da campanha do forno. O processo é mostrado na figura 3.9.

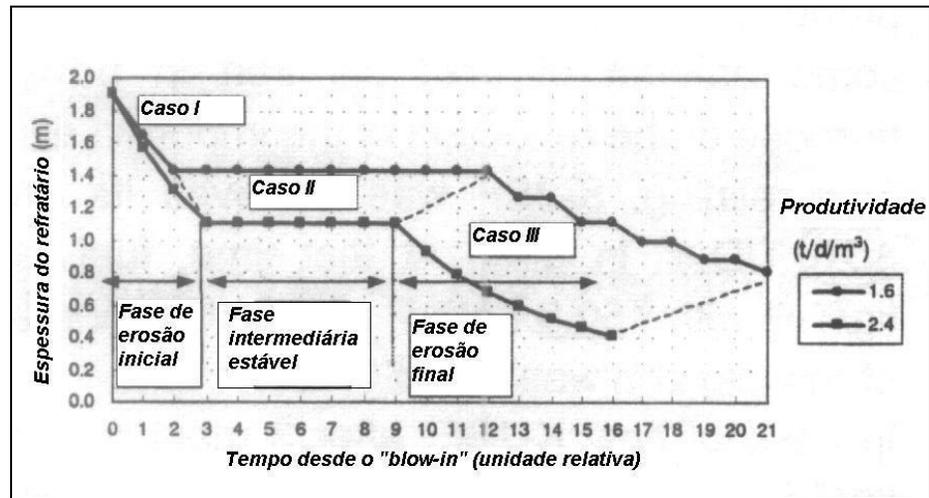


Figura 3.9 – Hipóteses de fases de desgaste do cadinho (Shinotake et alli, 2003)

Gonzalez et alli (2003) desenvolveram um modelo para acompanhar o desgaste do cadinho do alto-forno de Siderar, e este modelo gerou um resultado coerente com a teoria de Shinotake et alli (2003). A figura 3.10 mostra a evolução do desgaste do fundo do cadinho do alto-forno de Siderar, considerando a presença de camada solidificada. Este perfil é semelhante ao da figura 3.9.

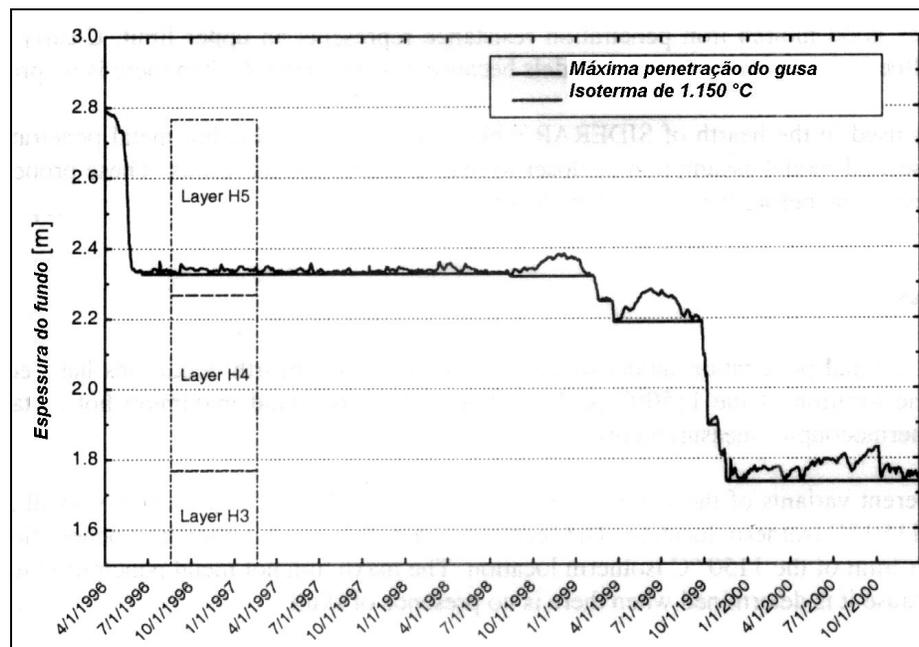


Figura 3.10 – Estimativa da evolução do desgaste do alto-forno de Siderar (Gonzalez et alli, 2003)

Já foi dito que o cadinho do alto-forno A da Usina de Monlevade segue a mesma filosofia dos cadinhos de Sidmar. Na reforma do alto-forno B de Sidmar (Bonte et alli, 2001), em 2001, foi feito um estudo detalhado do cadinho. A figura 3.11 mostra como estava a linha de desgaste e a localização das camadas fragilizadas. O que se observa é que o estado do cadinho era bom, sem ocorrência do desgaste conhecido como “pata de elefante”.

A camada fragilizada chama a atenção para a possibilidade de um desgaste acelerado. A região do furo de gusa foi a mais desgastada, atingindo o segundo anel dos blocos de carbono. Outra observação é que a base cerâmica foi toda deteriorada, mas, após o final dela, o desgaste não mais progrediu, provavelmente devido à formação da camada solidificada de proteção.

Um fenômeno interessante observado foi a existência de uma falha entre dois blocos de carbono, preenchida com quatro camadas distintas de gusa solidificado. A explicação é que a falha apareceu em quatro paradas de longa duração. Em regime contínuo, a temperatura faz com que os blocos dilatam com sentido à parte superior do forno. Em paradas longas, o cadinho contrai e podem aparecer falhas, que seriam tomadas pelo metal líquido. O gusa “congelaria” devido à elevada capacidade de refrigeração dos *staves*.

Lima (2000) descreve também as causas de desgaste dos blocos de carbono do cadinho, conforme a experiência da COSIPA. Para ele, o desgaste do cadinho pode comprometer a campanha do alto-forno em dois casos:

- ⇒ ocorrência de desgaste na parede lateral;
- ⇒ flutuação do bloco de carbono da soleira.

O mecanismo de desgaste seria a repetição do processo no qual uma camada fragilizada é formada e o refratário, além desta camada, é levado pelo gusa por ocasião de seu desprendimento. As trincas nas paredes refratárias são inicialmente causadas por tensão térmica, devido a mudança na distribuição de temperatura, e por esforços de compressão, gerados na superfície de cada tijolo devido a restrição ao

deslocamento imposta pela carcaça do forno. Ele considera que estes esforços são maiores na partida do forno.

Também a penetração de gusa, a absorção de álcalis e variações de temperatura facilitam o aparecimento de trincas e estas evoluem gerando as camadas fragilizadas mais observadas a partir de 800 °C.

Lima (2000) também cita dados históricos de fornos japoneses que indicam que o desgaste das paredes ocorre em ciclos sazonais, de frequência inversamente proporcional à espessura remanescente dos blocos. Compilando dados de diversos altos-fornos, foi identificado que o desgaste é de cerca de 15% a cada ciclo, e com a espessura do bloco acima de 1 metro, os ciclos ocorrerem uma vez ao ano, enquanto que para espessuras inferiores a 1 metro, a tendência é que ocorram a cada dois anos. A figura 3.12 mostra como seria a curva de desgaste neste caso.

Silva (2000) investigou os mecanismos de formação das camadas penetradas por gusa e “zona frágil” através de sondagens e estudo *post mortem* do cadinho dos altos-fornos 2 e 3 da CSN.

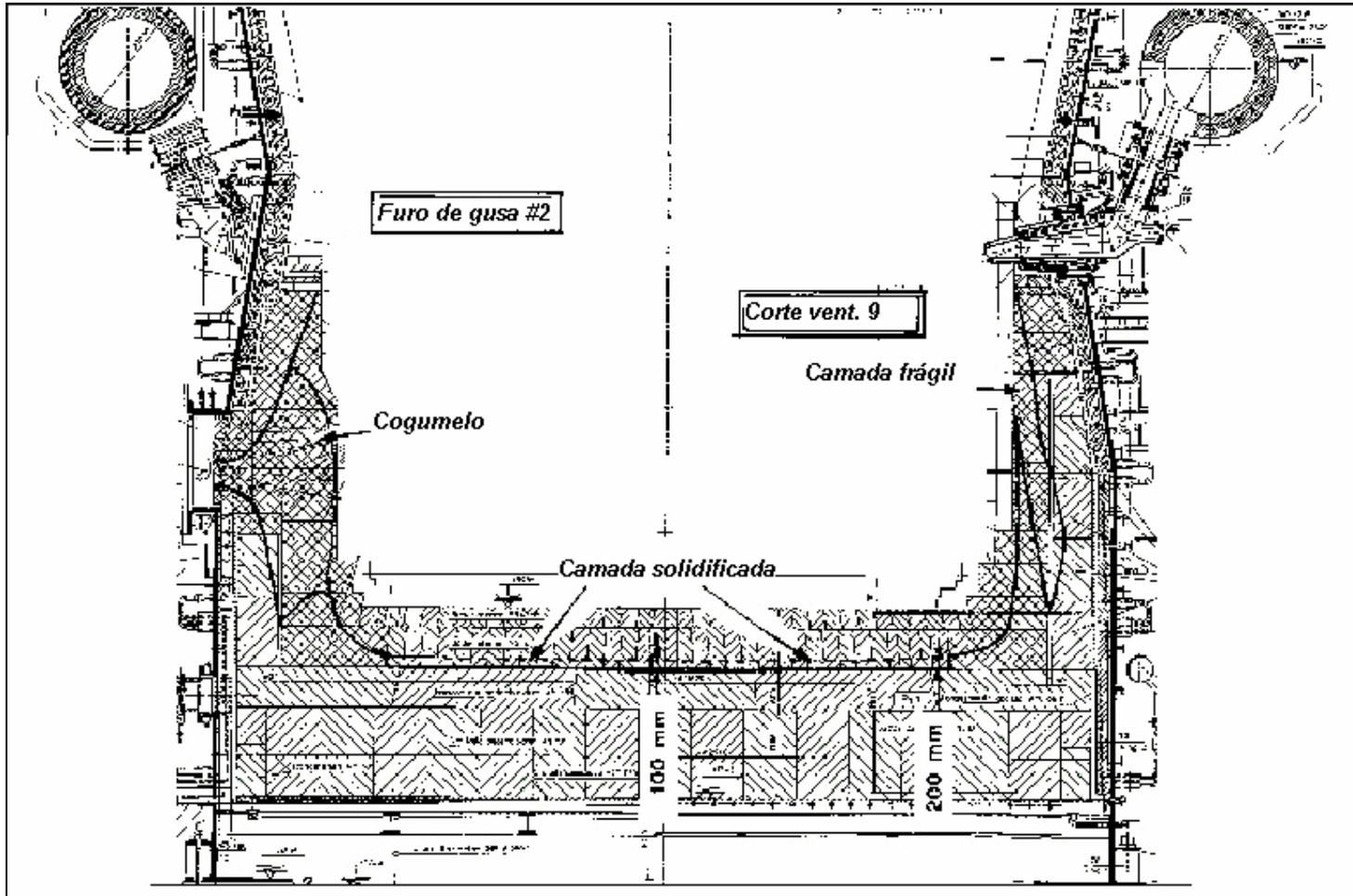


Figura 3.11 – Perfil do desgaste do cadinho do alto-forno B de Sidmar na sua reforma de 2001 (Bonte et alli, 2001)

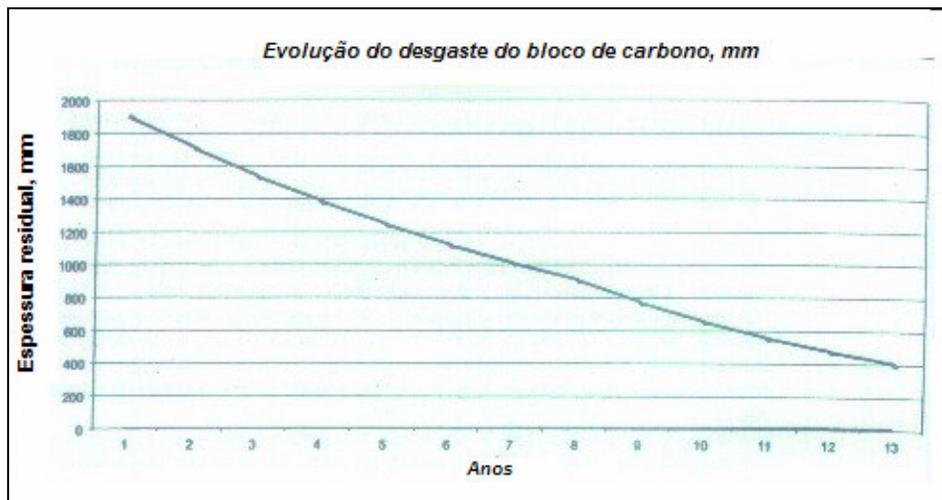


Figura 3.12 - Evolução do desgaste do bloco de carbono (Lima, 2000)

Foram feitos vários furos na carcaça e nos blocos de carbono, a uma profundidade tal que não ultrapassasse a temperatura de 500 °C na face interna do bloco. Os furos foram feitos nos locais mais críticos quanto ao desgaste (região do furos de gusa e soleira). A figura 3.13 mostra o esquema de sondagem usado na CSN.

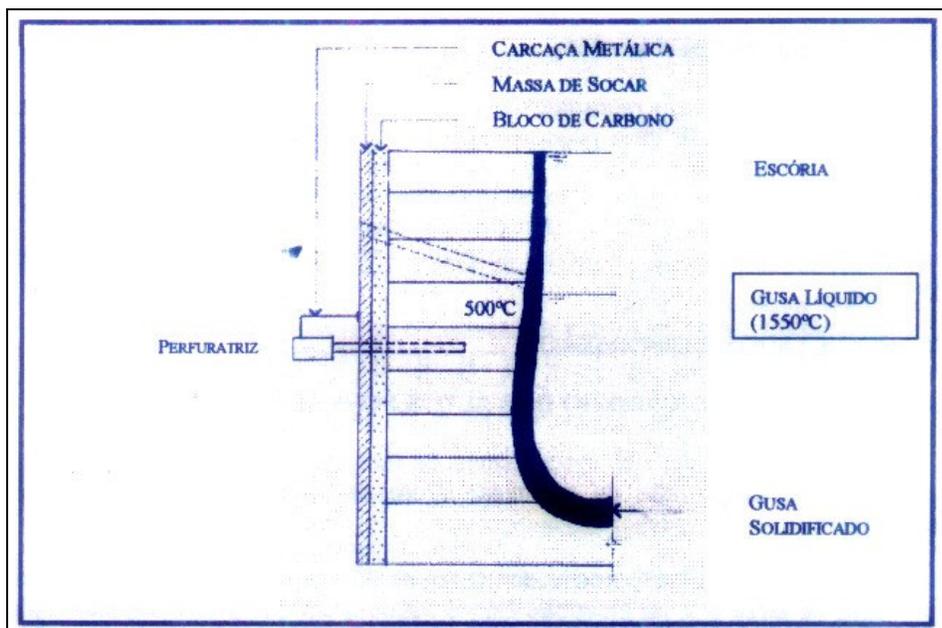


Figura 3.13 - Esquema de sondagem dos blocos de carbono do cadinho do alto-forno (Silva, 2000)

A sondagem mostrou dois fenômenos distintos, em pontos diferentes do cadinho: a penetração de gusa e a formação de zona frágil. A figura 3.14 mostra a ocorrência de penetração a partir do ponto da amostra onde foram encontradas as primeiras trincas paralelas à face quente, em um termopar da soleira abaixo do furo de gusa # 1.

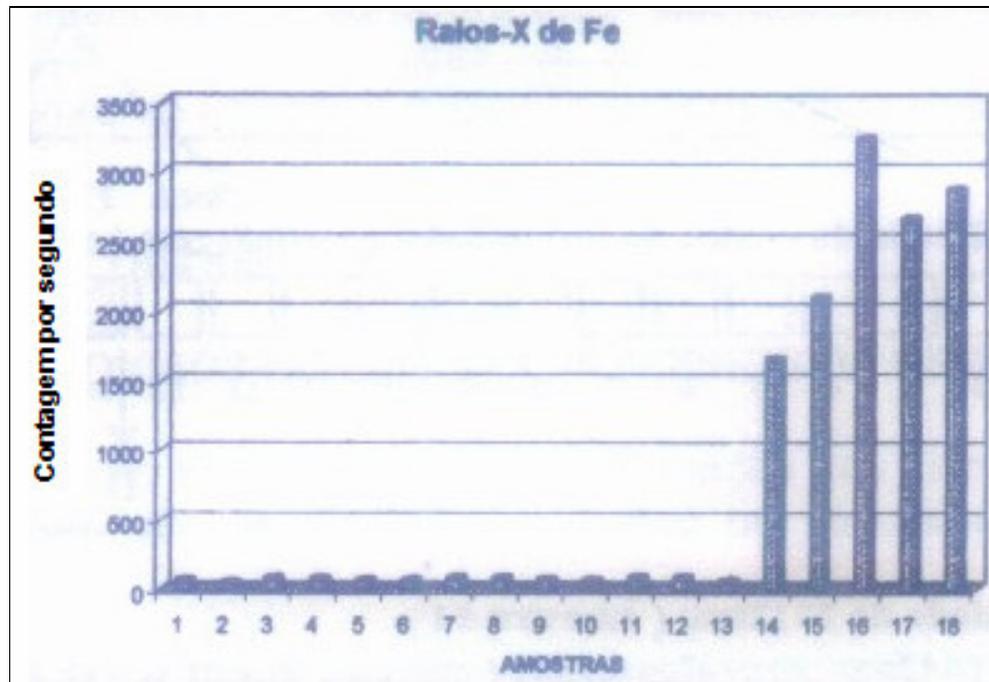


Figura 3.14 - Indicação de ferro a partir da amostra 14, a 1442 mm da face fria (Silva, 2000)

Já na região do furo de gusa # 2, Silva (2000) encontrou fragilização, identificada em função da desintegração do revestimento que estava na forma de pó. A figura 3.15 mostra que as amostras a partir de 400 mm apresentam elevação do teor de K_2O , enquanto que na zona frágil (565mm) há a elevação brusca de ZnO . Os dois óxidos estariam associados à desintegração do material.

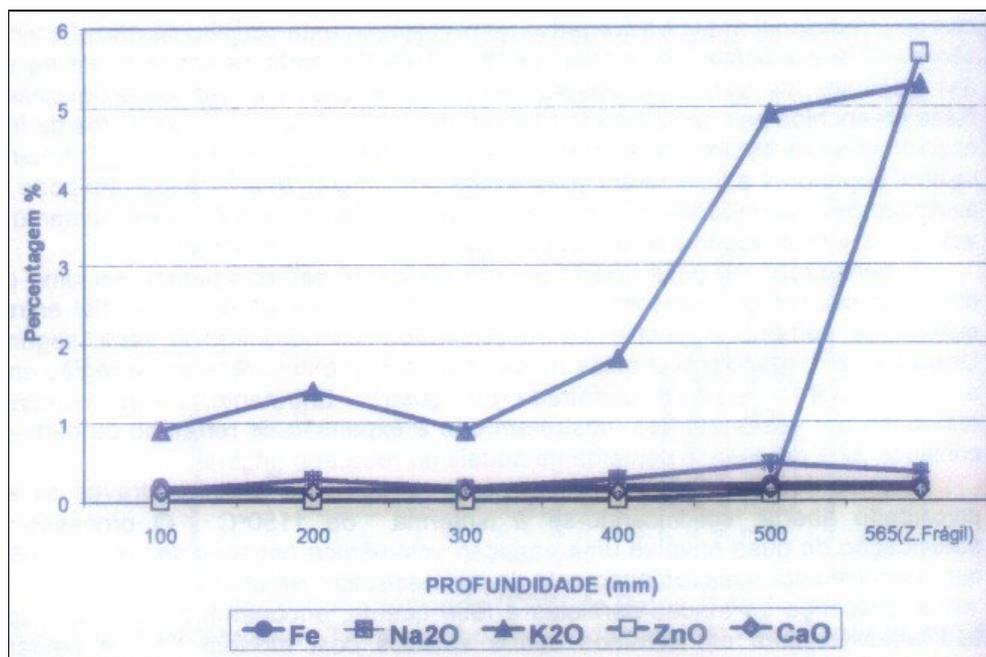


Figura 3.15 - Concentração de óxidos em função da profundidade (Silva,2000)

Os mecanismos propostos por Silva (2000) são apresentados a seguir. A figura 3.16 mostra o mecanismo de formação da camada penetrada por gusa, dividido em três estágios. Silva (2000) resume o processo: o gusa líquido penetra nos poros do bloco de carbono. A dissolução do carbono ocorre simultaneamente à penetração do gusa líquido. O gusa solidifica-se na isoterma de 1.150°C, com expansão volumétrica e propagação de trincas, que aumentam o volume de vazios a serem preenchidos pelo gusa líquido, numa próxima etapa. À medida que o desgaste do bloco de carbono avança, a isoterma de 1.150°C desloca-se em direção à sua face fria. A penetração do gusa líquido no revestimento é gradual e progressiva, com propagação de trincas paralelas à face quente, que produzem o perfil de desgaste do cadinho.

A figura 3.17 mostra o mecanismo de formação da camada frágil, dividido em cinco estágios. O mecanismo novamente é descrito em resumo por Silva (2000). Os vapores metálicos de potássio e zinco penetram no revestimento através da porosidade aberta dos refratários. Estes vapores são reoxidados e depositam-se no revestimento através de condensação, próximo a isoterma de 800°C. Os álcalis e zinco reagem com a mulita e a sílica, presentes nas cinzas do grafite, formando fases líquidas de aluminossilicatos de potássio e zinco.

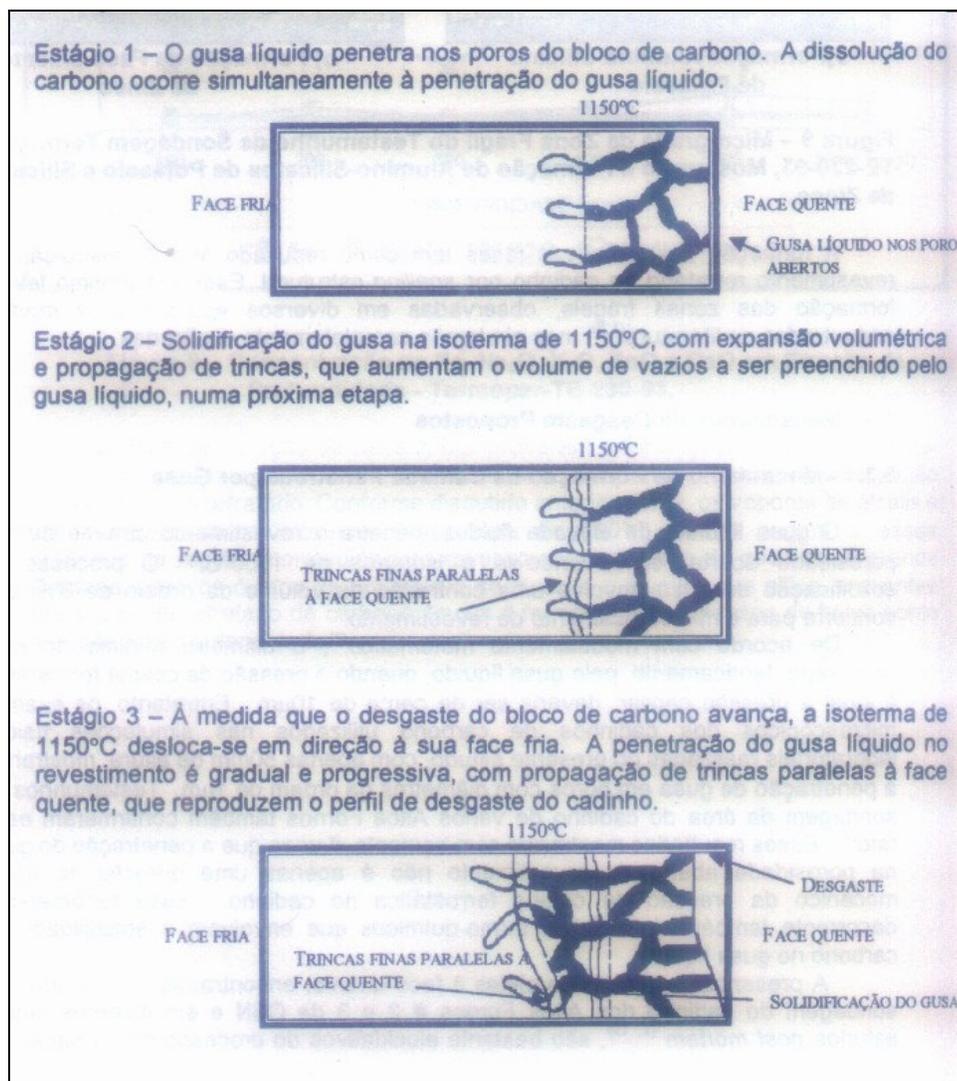


Figura 3.16 - Mecanismo de penetração de gusa nos blocos de carbono (Silva, 2000)

O elevado volume de fase líquida na porosidade aberta provoca colapso da microestrutura do material por *spalling* estrutural, resultando na sua completa desintegração, tornando-o pulverulento. A descontinuidade térmica provocada pela fragilização do revestimento prejudica a transferência de calor do cadinho para o sistema de refrigeração e reduz o gradiente de temperatura no bloco de carbono, junto a sua face quente. Aumenta-se a temperatura da face quente do bloco de carbono e acelera-se sua taxa de desgaste. Em adição, a isoterma de 1.150°C desloca-se em direção à face fria, aumentando a penetração do gusa líquido, aproximando as camadas frágil e penetrada de gusa.

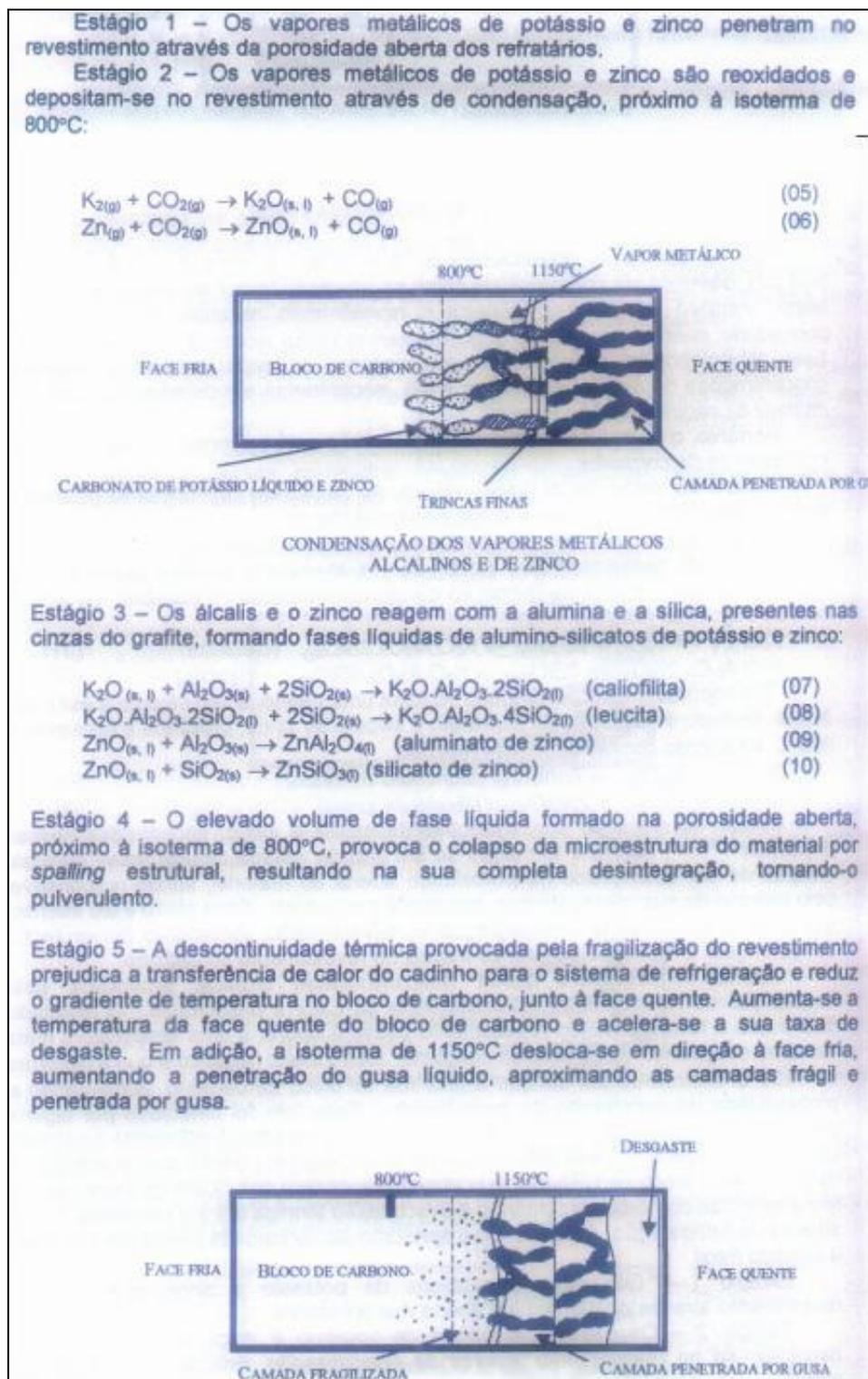


Figura 3.17 - Mecanismo de fragilização dos blocos de carbono (Silva, 2000)

Silva (2000a) também estudou outros mecanismos de ataque aos blocos de carbono, com destaque para a dissolução, a oxidação e a desintegração por CO. A figura 3.18 mostra o mecanismo de desgaste por dissolução do carbono no gusa líquido e por erosão.

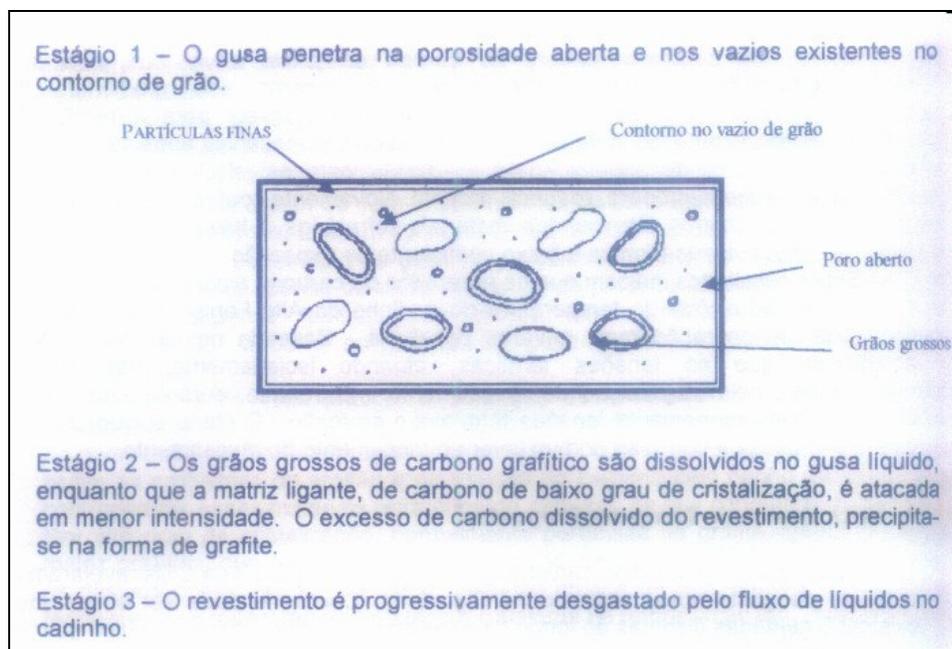


Figura 3.18 - Mecanismo de desgaste dos blocos de carbono por erosão e dissolução (Silva, 2000a)

O mecanismo proposto para o ataque por oxidação é mostrado na figura 3.19, enquanto o mecanismo proposto para a desintegração por CO é mostrado na figura 3.20.

Estes dois mecanismos são importantes na explicação da camada levemente alterada, identificada na observação *post mortem* do cadinho dos fornos da CSN. Silva (2000a) enumerou seis camadas distintas ao longo da espessura do revestimento, da face quente para a face fria:

1. Camada perdida (desgastada);
2. Camada de proteção (cascão de baixa condutividade térmica);
3. Camada penetrada pelo gusa;

4. Zona frágil;
5. Camada levemente alterada (ataque por CO e oxidação);
6. Zona inalterada

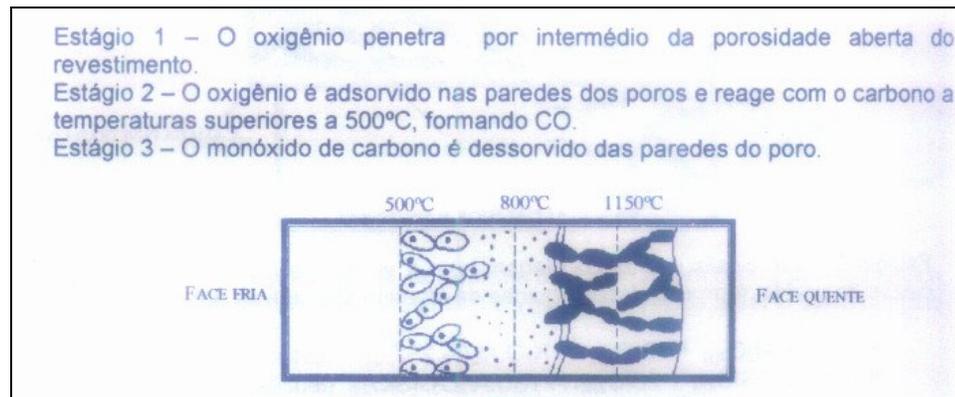


Figura 3.19 - Mecanismo de ataque dos blocos de carbono por oxidação (Silva, 2000a)

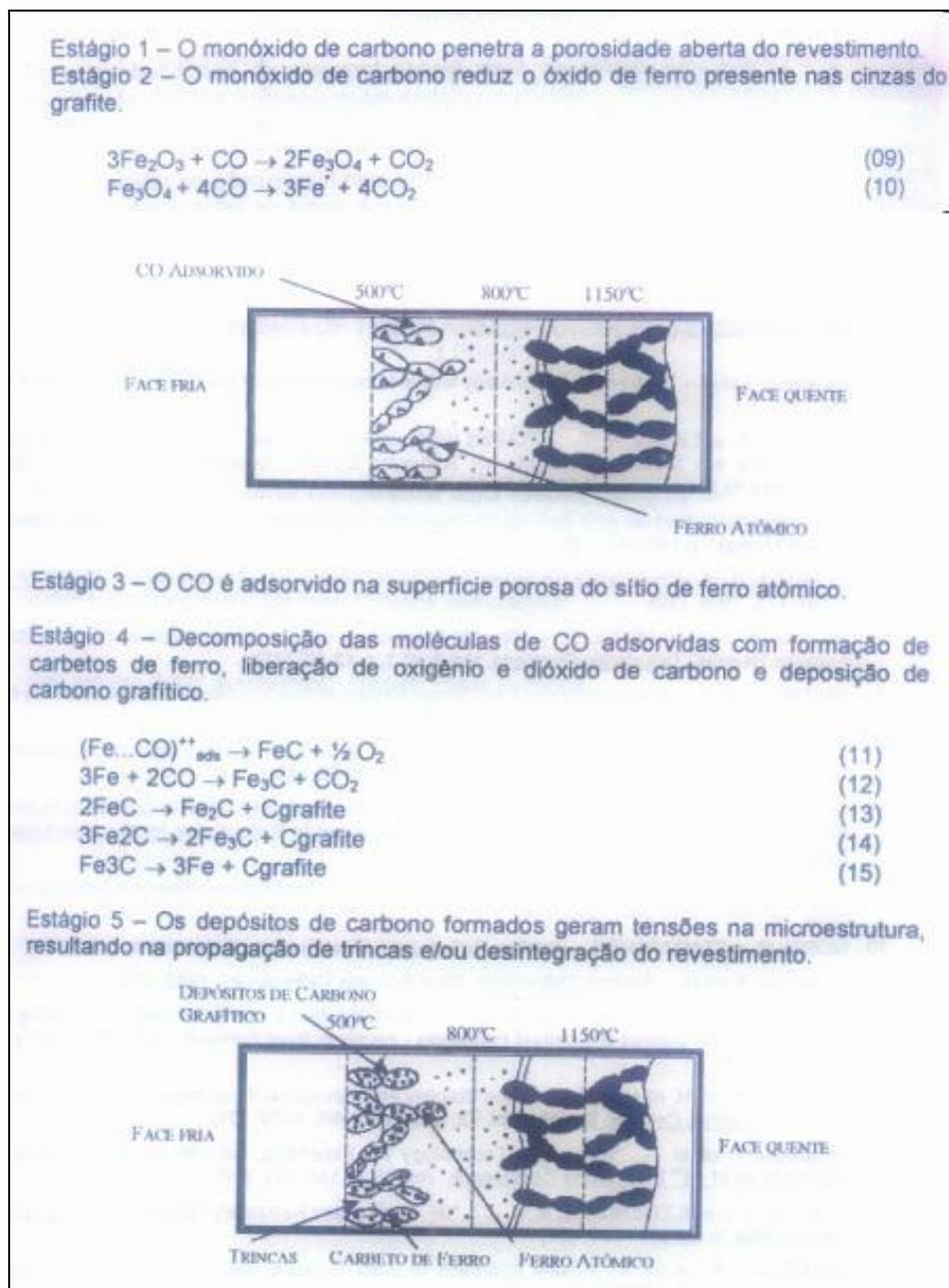


Figura 3.20 - Mecanismo de ataque dos blocos de carbono por CO (Silva, 2000a)

3.6 Formas de Controle de Desgaste do Cadinho Usadas Atualmente

Kolijn et alli (2001) relacionam a extensão da campanha à prática de esgotamento do cadinho (manter um ciclo de corridas que propicie ao cadinho o maior esgotamento

possível), à elevada qualidade do coque (melhora de resistência, tamanho e estabilidade), um bom sistema de detecção de vazamentos de água, excelente refrigeração na região do furo de gusa, fechamento seletivo de ventaneiras, ajustes de diâmetros de ventaneiras e uso de ilmenita.

Segundo Fujihara et alli (2003), o controle das matérias-primas, dos equipamentos e da instrumentação, quando somados ao controle da distribuição gasosa e à estabilidade operacional, levam a uma campanha longa.

O trabalho de Lima (2000) cita que a espessura mínima da parede do cadinho para uma operação segura está entre 400 e 500 mm. Para o fundo, deve-se evitar atingir valores mínimos entre 0,8 a 1,7 m, por dois motivos:

- ⇒ o limite máximo da temperatura na chapa do fundo é de 350 °C;
- ⇒ é necessário mais de uma fiada de blocos de carbono para manter segura a estrutura dos refratários.

As ações implementadas na COSIPA para controlar as temperaturas do cadinho do alto-forno 2 no final de sua campanha são resumidas no trabalho citado, e estão listadas abaixo:

- ⇒ Melhora da refrigeração;
 - desenvolvimento dos *sprays* do cadinho;
 - confecção de furos na carcaça e injeção de massa (pressão limitada a 20 kg/cm²);
- ⇒ Redução do fluxo de gusa pelas laterais do cadinho;
 - controle da vazão de água na soleira para equilibrar a retirada de calor pelas paredes e pelo fundo.
- ⇒ Aumento do comprimento do furo de gusa;
 - aumento do limite de injeção de massa de 300 kg/tamponamento para até 800 kg/tamponamento em caso de ocorrência de pontos quentes na região do furo;
 - broqueamento do furo de gusa, com refrigeração a nitrogênio e água pulverizada;
 - desenvolvimento de massa de tamponar para evitar trincas;

- redução dos problemas de injeção de massa nos fechamentos de corridas;
- fechamento de ventaneiras acima de regiões afetadas;
- instalação de redutor de diâmetro sobre os furos de gusa;
- aumento da vazão de água disponível para a refrigeração do cadinho (de 900 m³/h para 1700 m³/h, reduzindo também a temperatura em 5 °C);
- redução do intervalo entre manutenções dos canais de corrida;
- retirada de amostras para análise dos blocos de carbono;
- carregamento de TiO₂.

3.6.1 Uso de titânio para proteção dos blocos de carbono

Como visto acima, a COSIPA é uma das empresas que utiliza o enformamento sistemático de TiO₂ para proteção do cadinho. Para Lima (2000), a prática é polêmica e cara, mas foi adotada na razão de 5 kg/t no mínimo até a reforma do forno, com picos de utilização de 15 kg/t. Antes das paradas preventivas, o valor base era aumentado para 10 kg/t. Os resultados mostraram que a prática foi efetiva para o controle das temperaturas do fundo do cadinho, incluindo a região do “pé de elefante”, mas não para as paredes ou para a região do furo de gusa. No caso da COSIPA, o aumento do comprimento do furo de gusa foi mais eficaz para esta região, além claro dos fechamentos de ventaneiras. As figuras 3.21 e 3.22 mostram as relações entre TiO₂ carregado e temperatura de um determinado termopar, e comprimento do furo de gusa e termopares da parede.

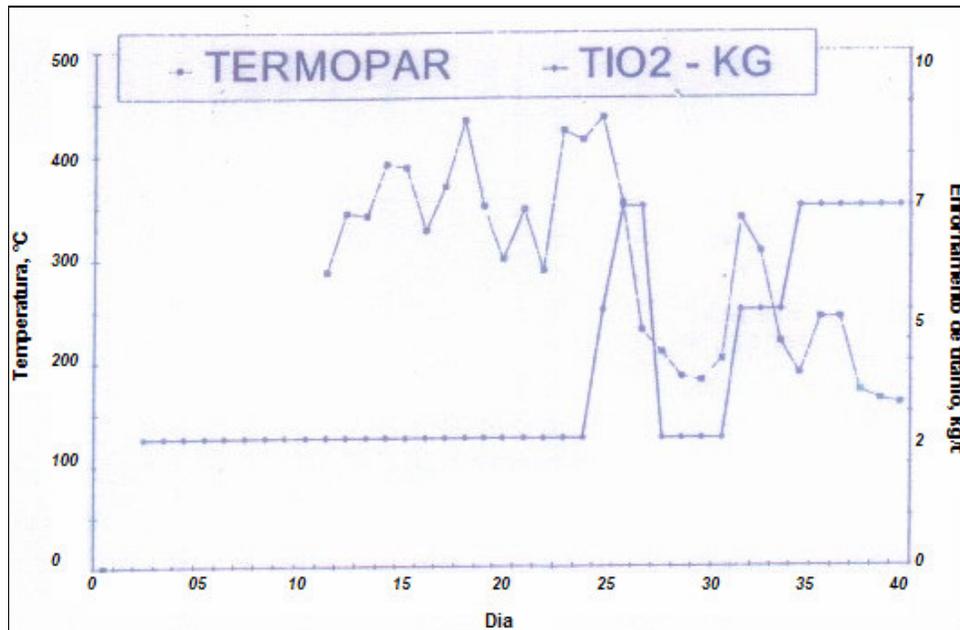


Figura 3.21 - Relação entre carregamento de TiO_2 e temperatura do furo de gusa (Lima, 2000)

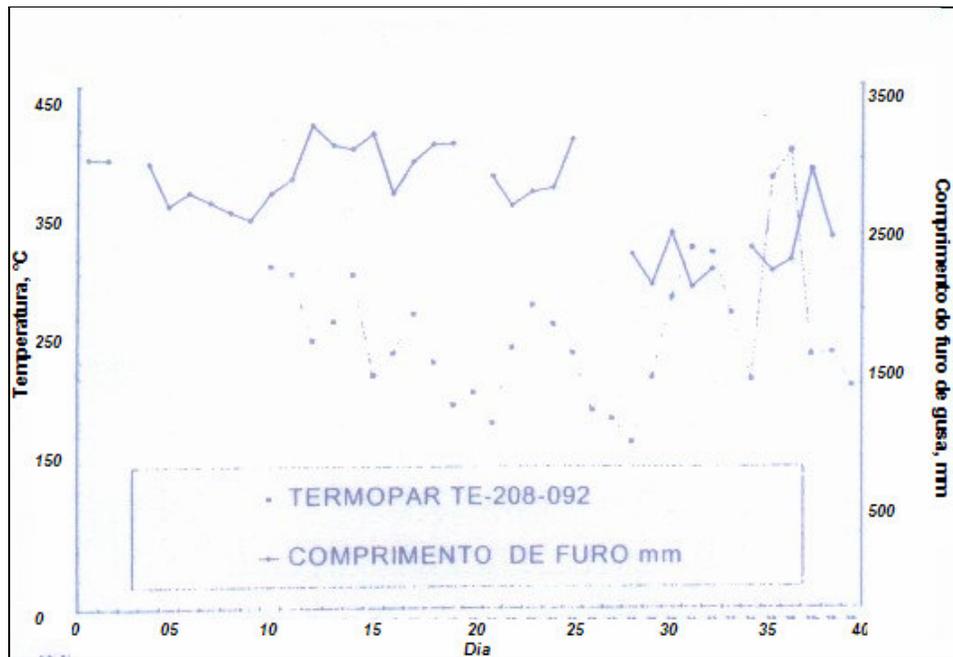


Figura 3.22 - Relação entre Comprimento do furo de gusa e temperatura do cadinho na região (Lima, 2000)

3.7 Modelos de Acompanhamento do Desgaste

Gonzalez et alli (2003) apresentam o modelo usado pela Siderar para estimar as condições do cadinho. Como a maioria dos modelos disponíveis, o de Siderar assume que a linha de desgaste ocorre na isoterma de 1.150°C, o ponto eutético do ferro saturado em carbono. O modelo em uso atualmente é unidimensional e assume que:

- se a isoterma de 1.150°C está acima da linha limite do revestimento, então, deve haver uma camada solidificada (mistura de gusa solidificado com coque e escória) sobre o revestimento;
- se a isoterma de 1.150°C está abaixo da linha limite do revestimento, então não há camada solidificada e está ocorrendo o desgaste (a linha de limite do revestimento está sendo deslocada).

Fraser et alli (2003) questionam a confiabilidade do uso da isoterma de 1.150°C como referência para determinar a extensão do desgaste. Seu argumento é que a infiltração de gusa nos blocos e a fragilização dos mesmos modificam a condutividade térmica. Desta forma os cálculos seriam imprecisos (a isoterma pode não estar onde se imagina). O que se verifica na prática é que os cálculos se tornam pessimistas – lado mais seguro, porém isso pode levar a reformas antes do ponto crítico, com perdas financeiras.

Em seu artigo ele informa o início dos testes com emissão acústica, que julga poder ter maior confiabilidade, mesmo com as alterações sofridas pelo material durante a campanha. Como a instalação ocorreu há pouco tempo, deve-se aguardar os resultados para uma melhor avaliação do método.

Torrkulla et alli (2002) desenvolveram um modelo bidimensional baseado na isoterma de 1.150°C, que, integrado nas diversas direções onde estão localizados os termopares, fornece a visão tridimensional do cadinho. O modelo é usado nas tomadas de decisão de adição de materiais titaníferos ou redução de produção para preservação do cadinho, por exemplo. A análise da evolução do perfil tridimensional permite a visualização da evolução do desgaste ou da formação da camada

solidificada, mas para correlações com outros parâmetros de processo, a saída mais utilizada do modelo é o volume disponível do cadinho para cada situação.

Pinto et alli (2000) descrevem o modelo desenvolvido na Usiminas para controle do desgaste. Os problemas identificados para o desenvolvimento do modelo são listados:

- ⇒ desconhecimento dos fenômenos que governam o movimento das fases líquidas no interior do cadinho, impedindo adotá-los como condição de contorno;
- ⇒ dificuldade de levantamento das propriedades da camada estagnada, que são função das características químicas do gusa e de seu estado térmico;
- ⇒ incerteza nas propriedades da massa socada injetada entre a carcaça (ou bloco de “stave cooler”) e o bloco de carbono, uma vez que não se conhece com precisão seu grau de compactação;
- ⇒ incerteza nas propriedades ligadas à transferência de calor na carcaça.

A solução para equacionar a transferência de calor, então, é a utilização de pares de termopares a distância conhecida, dentro dos blocos de carbono. O equacionamento na Usiminas usa também a isoterma de 1.150°C como referência, e é desenvolvido utilizando a lei de Fourier para condução de calor no bloco de carbono:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

A condutividade é calculada em função da temperatura dos blocos, utilizando os coeficientes da equação de condutividade fornecidos pelo fabricante. As figuras 3.23 e 3.24 mostram saídas do modelo usado pela Usiminas.

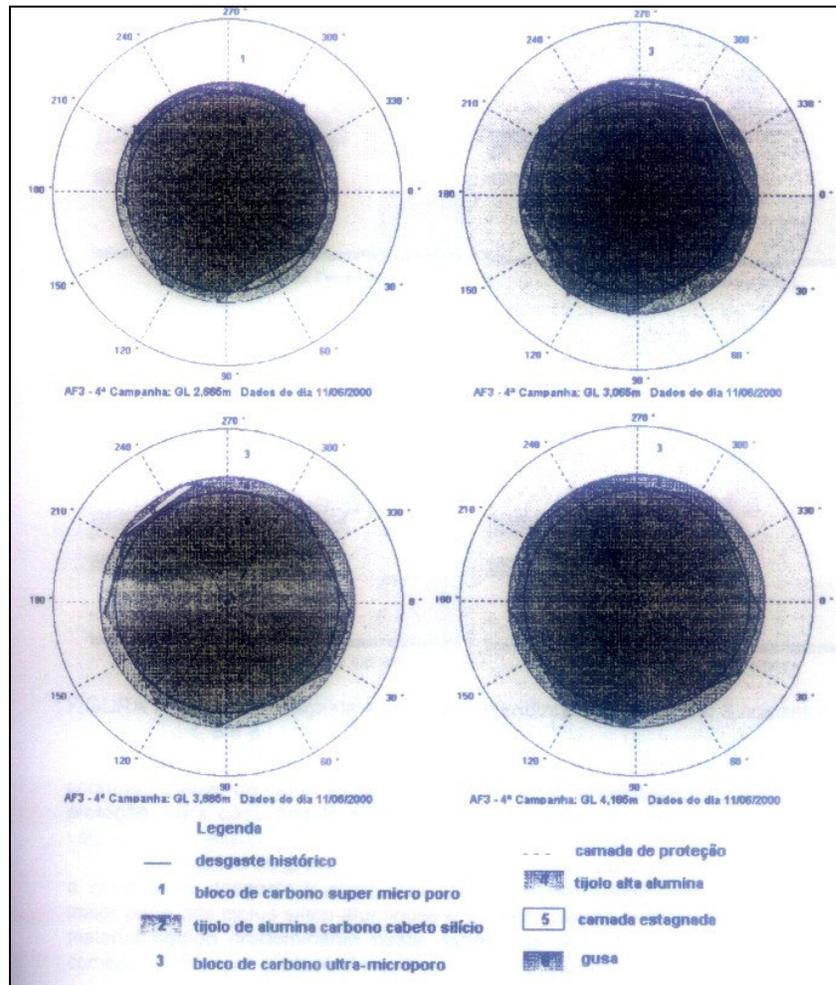


Figura 3.23 - Gráficos das linhas de desgaste e camada estagnada para diferentes níveis
(Pinto, 2000)

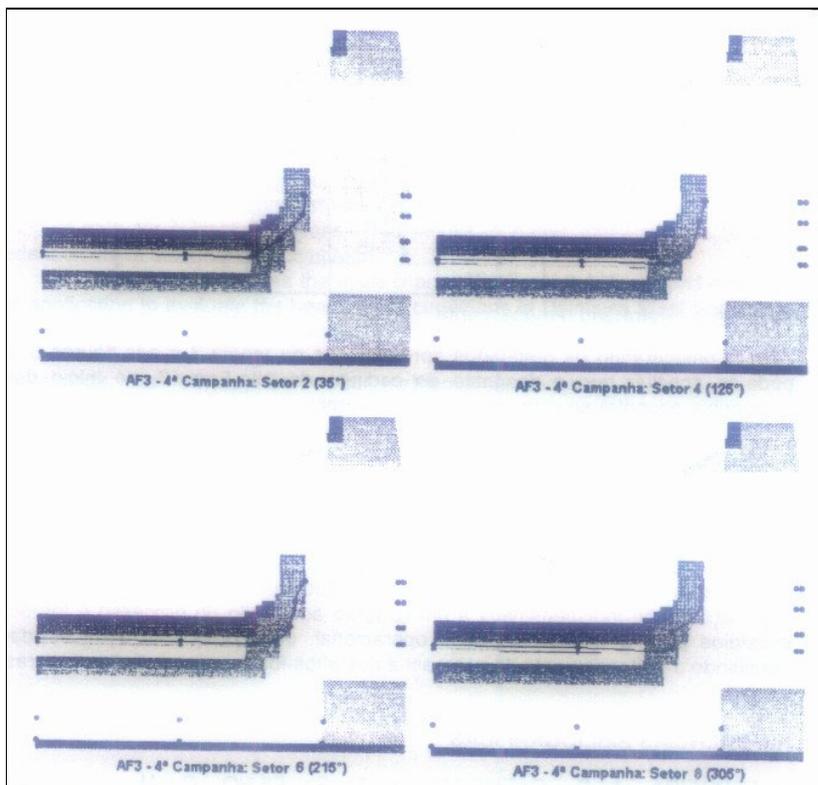


Figura 3.24 - Perfil de desgaste e proteção do cadinho para diferentes setores (Pinto, 2000)

Kumar (2005) desenvolveu um modelo utilizando diferenças finitas para acompanhamento do desgaste de cadinhos, baseado na isoterma de 1.150°C . O modelo considera alternativas como a flutuação ou não do “homem morto”, ou a formação da região livre de coque na quina inferior do cadinho. Também é possível avaliar os efeitos de alterações na temperatura do gusa, ou na temperatura do sistema de refrigeração. As figuras 3.25 e 3.26 mostram a distribuição das isotermas para dois cadinhos de diferentes altos-fornos na Índia (“A” e “B”), em seus projetos iniciais.

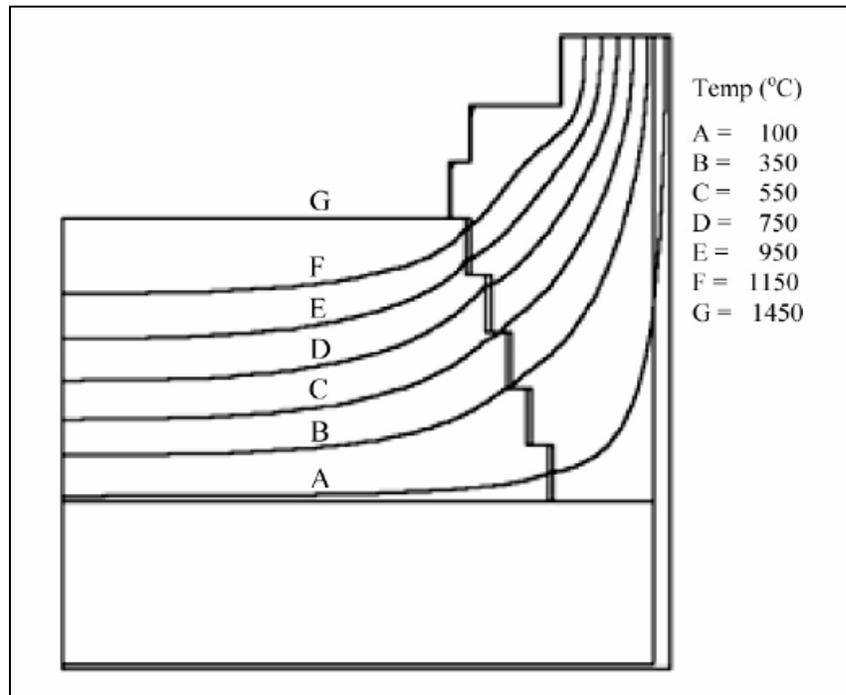


Figura 3.25 - Perfil de temperaturas no cadinho do alto-forno "A" em seu design inicial (Kumar, 2005)

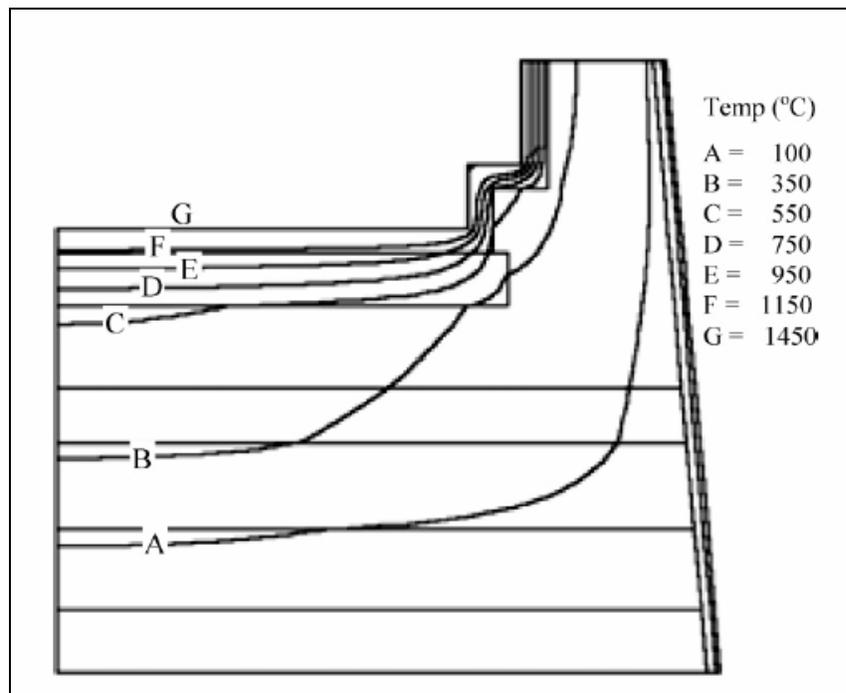


Figura 3.26 - Perfil de temperaturas no cadinho do alto-forno "B" em seu design inicial (Kumar, 2005)

A figura 3.27 mostra o efeito da temperatura do gusa em contato com ao refratário na posição da isoterma de 1.150°C, também considerando o perfil inicial do cadinho do alto-forno "A".

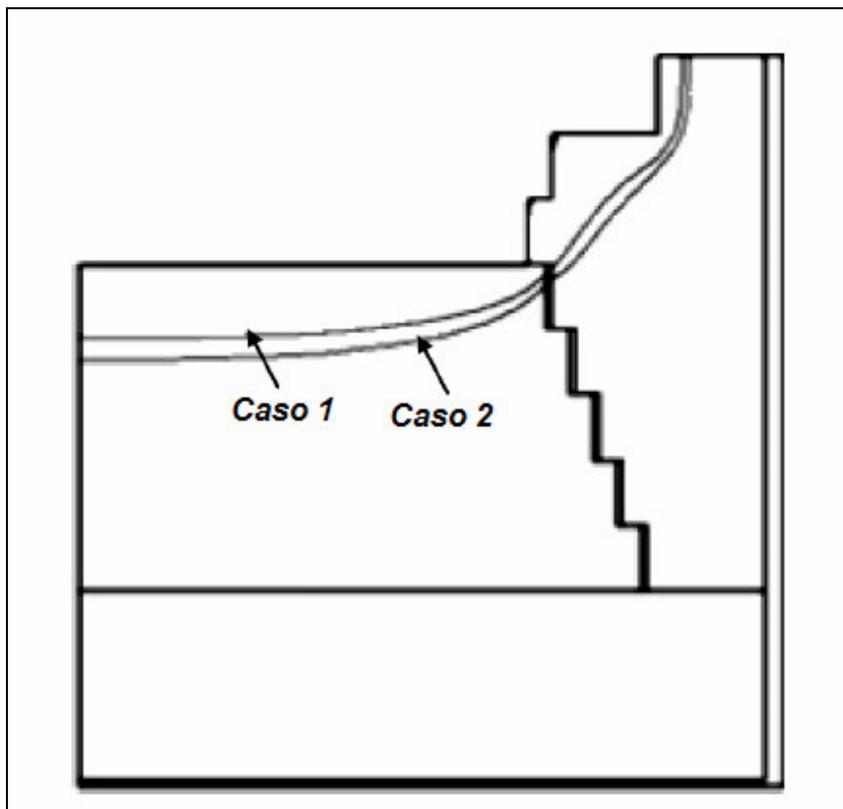


Figura 3.27 - Posição da isoterma de 1.150°C no design inicial do cadinho do alto-forno "A", dependendo da temperatura do gusa na interface com o refratário. Caso 1, gusa a 1.400°C; Caso 2, gusa a 1.500°C (Kumar, 2005)

4 METODOLOGIA

A metodologia para o desenvolvimento do conjunto de ações para o controle das temperaturas dos blocos de carbono foi baseada nos itens apresentados a seguir:

- Análise dos dados históricos;
- Definição do equacionamento para o modelo de acompanhamento do desgaste do cadinho do alto-forno A;
- Experimentos exploratórios;
- Entrevistas e visitas a outras usinas;
- Planejamento e realização de experimentos controlados.

Antes, porém, de detalhar estas etapas, será feita uma apresentação sucinta do alto-forno A e de sua importância para a Usina de Monlevade.

4.1 O Alto-Forno A da Belgo – Usina de Monlevade

O alto-forno A da Belgo – Usina de Monlevade teve seu *start-up* em 19 de Dezembro de 1999. Com o projeto, foram substituídos cinco altos-fornos de pequeno porte, originalmente projetados para operar com carvão vegetal, por um alto-forno de médio porte operado a coque. De fato, um dos altos-fornos operados anteriormente na Usina, o alto-forno 5, já vinha operando com coque desde 1992, mas o alto-forno A foi o primeiro projetado para tal.

O projeto ocorreu dentro de um processo de *benchmarking* com a Usina de Sidmar, na Bélgica, pertencente ao mesmo grupo, que apresentava (ainda apresenta) resultados entre os melhores do mundo em operação de alto-forno. Projetado em parceria entre Sidmar e a Paul Wurth, o alto-forno A é muito semelhante aos altos-fornos de Sidmar, exceto pela capacidade de produção, que no caso dos fornos de Sidmar, era 1,5 vezes superior na época.

A tabela IV.1 mostra os principais dados de projeto do alto-forno A.

Tabela IV-1 - Principais dados de projeto do alto-forno A

Diâmetro do cadinho	8,0 m
Área do cadinho	50,26 m ²
Volume do cadinho	296 m ³
Diâmetro da goela	6,4 m
Volume interno	1.357 m ³
Volume útil	1.186 m ³
Número de ventaneiras	22
Furo de gusa	1 (Canal principal removível)
Produção anual projetada	1.040.000 t
Produtividade por volume interno projetada	2,10 t/m ³ /24h
Produtividade por área do cadinho projetada	56,69 t/m ² /24h
Topo	<i>Bell less top</i> , tipo <i>central feeding</i> , Paul Wurth.
Refrigeração	<i>Staves</i> de ferro fundido no cadinho; <i>Staves</i> de cobre na rampa e cuba inferior; <i>Staves</i> de ferro fundido na cuba superior.
	Quatro circuitos fechados com água desmineralizada: Cadinho, <i>Staves</i> superiores, Corpo de ventaneiras e Nariz de ventaneiras.
Regeneradores	Três, com câmara de combustão interna.
	Pré-aquecimento de ar e gás de combustão (<i>Thermal oil</i>) a partir de Setembro de 2005.
Sistema de limpeza de gases	Coletor de pó, lavador de gás de fenda anular simples e <i>demister</i> externo.

Com a entrada em operação do alto-forno A, houve um salto na oferta de gusa, de 770.000 t/ano em 1998 para 1.090.000 t/ano em 2004. A meta de médio prazo é atingir 1.150.000 t/ano, alcançando o grupo das empresas que são referência em produtividade. Com a maior oferta de gusa, foi possível eliminar a compra de tarugos de outras usinas para suprir a capacidade dos laminadores, assim como foi possível reduzir a compra de sucata no mercado para utilização na aciaria. Como a linha de produtos da Usina de Monlevade é nobre, a sucata comprada tem preço acima do mercado normal deste insumo, sendo normalmente interessante substituí-la por gusa líquido.

O ponto de preocupação na mudança de fluxo de produção da Usina, no entanto, foi a dependência em apenas um equipamento para a produção de gusa. Há a necessidade, ainda maior que em usinas com mais de um alto-forno em operação, de operação estável, com baixa variação na oferta e previsibilidade de paradas e reduções de produção. Neste ponto, o acompanhamento da situação do cadinho do forno torna-se crítica.

4.1.1 O cadinho do alto-forno A

O cadinho do alto-forno A foi desenhado como o espelho dos cadinhos dos altos-fornos de Sidmar. A disposição dos termopares é muito semelhante, para facilitar comparações, e a disposição dos blocos de carbono segue a mesma lógica, com dois anéis nas paredes. O material é de fabricação Japonesa (NDK). Foram usados blocos super-micro-porosos nas regiões críticas (furo de gusa e região da “pata de elefante”) e micro-porosos nas paredes. A figura 4.1 mostra a configuração dos blocos de carbono do cadinho do alto-forno A, enquanto a figura 4.2 mostra a disposição dos termopares. O Anexo I mostra uma tabela com a condutividade térmica dos blocos utilizados.

O arranjo feito para os termopares permite várias combinações de direções para cálculo dos fluxos de calor, e deve permitir um acompanhamento preciso ao longo da campanha, desde que complementado por um modelo adequado.

O volume do cadinho em relação ao forno é uma vantagem deste projeto. A grande capacidade de armazenamento de gusa, projetada com o objetivo de minimizar os efeitos da operação com um furo de gusa apenas, permite um fluxo mais uniforme de gusa pelo cadinho, reduzindo o desgaste. Também a área do cadinho em relação à sua produção é bem dimensionada, permitindo um fluxo lento e, conseqüentemente, menor transferência de calor por convecção. Este ponto é uma diferença em relação aos projetos anteriores de Sidmar e foi implantado por insistência da Belgo. Hoje esta é a tendência nos fornos europeus.

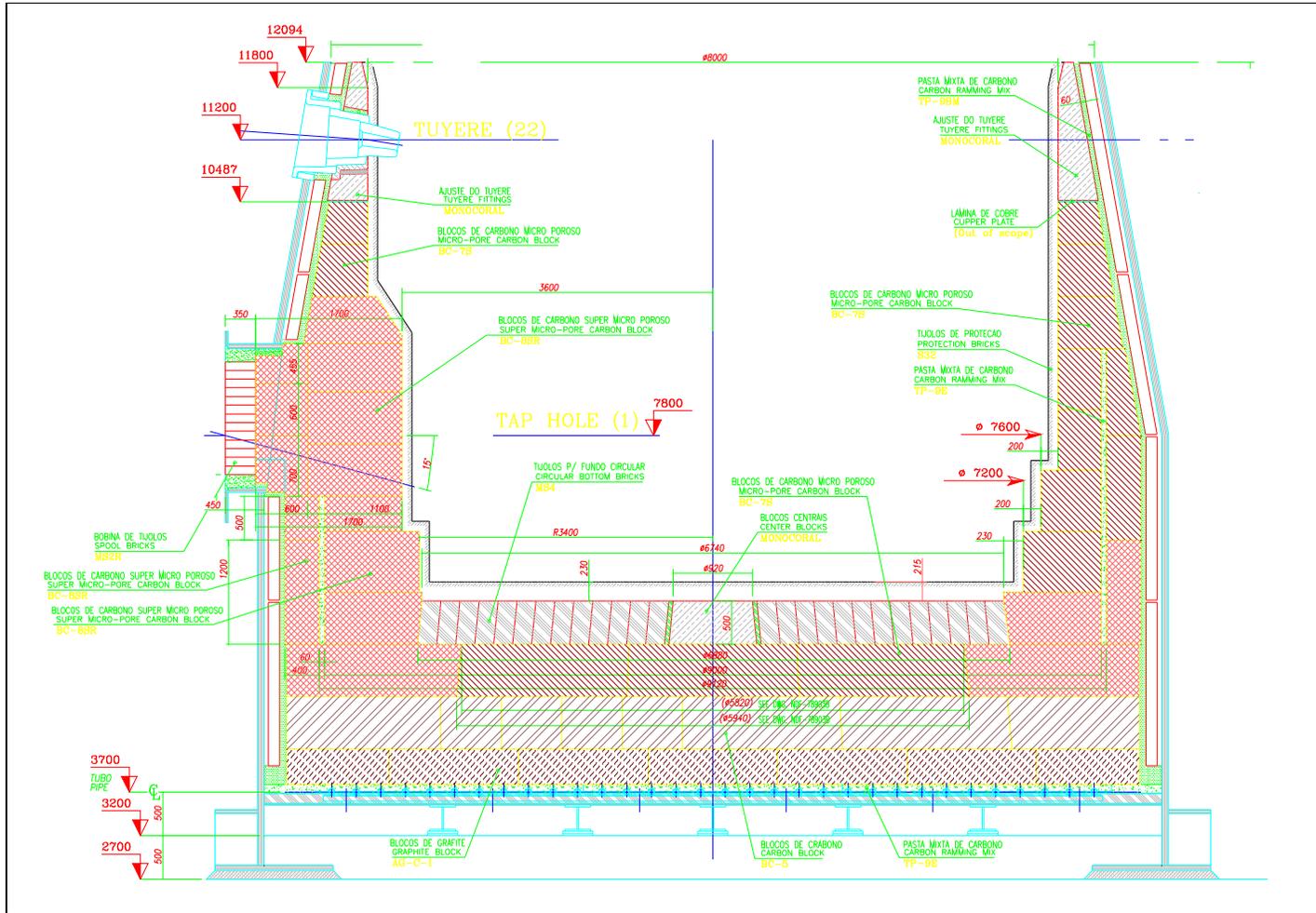


Figura 4.1 - Desenho do cadinho do alto-forno A

4.2 Análise dos Dados Históricos

O banco de dados do alto-forno A tem todos os pontos de medição registrados para a campanha do forno, com informações das temperaturas do cadinho, vazão e temperatura de água do sistema de refrigeração e produtividade, entre outras, em dados acumulados de mais de 5 anos de operação.

Estes dados foram levantados para confirmar ou não dados da literatura e a hipótese levantada de influenciar a condição dos blocos de carbono através de seu sistema de refrigeração.

4.3 Modelo de Acompanhamento do Desgaste do Cadinho do Alto-Forno A

A melhor opção de equacionamento para um modelo *on-line* de monitoramento da situação do cadinho foi estudada, considerando uma futura implantação de um módulo de controle automático do sistema de refrigeração.

Os prós e contras de um modelo simplificado foram levantados, assim como modelos tridimensionais foram pesquisados para colaborar na decisão do caminho a seguir. Para acompanhar o desgaste do cadinho foi desenvolvido um modelo matemático que assume que o fluxo de calor ocorra de forma unidimensional e usa a equação de Fourier (equação 4.1) para determinar o desgaste ou a formação de camada solidificada.

$$q = \frac{\Delta T * \lambda}{l} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4.1)$$

Onde:

q é o fluxo de calor, em W / m^2 ;

ΔT é a diferença de temperatura entre dois termopares a dada distância, em K;

λ é a condutividade térmica, em $W / m . K$;

l é a distância entre os termopares.

Apesar das considerações de Fraser (2003) sobre a confiabilidade da isoterma de 1.150°C, esta é a forma que mais se ajusta à construção do alto-forno A, porque outros dispositivos como sensores de ultra-som não foram instalados na montagem do forno. Os termopares foram dispostos em pares com distâncias conhecidas, de modo a minimizar os erros nos cálculos do fluxo de calor. A vantagem do modelo construído com este equacionamento é a velocidade do cálculo, muito superior à velocidade dos modelos bi e tri-dimensionais baseados em volumes ou diferenças finitas.

Os objetivos do desenvolvimento do modelo são:

- Fornecer resultados para o perfil de desgaste do cadinho;
- Mostrar a posição e forma das isotermas (principalmente as de 750 e 1.150°C);
- Determinar o perfil da camada solidificada, quando esta existir;
- Determinar o volume útil do cadinho em cada situação particular;
- Totalizar os fluxos de calor pelo fundo e pela parede, para viabilizar a agregação de um módulo para controle automático da refrigeração.

Todos os 96 termopares do cadinho foram mapeados no modelo e os fluxos de calor em todas as direções estão sendo acompanhados. Nem todos os módulos estão implantados no momento, mas a expectativa é que, até meados de 2006, o modelo esteja implantado plenamente.

Em paralelo, foram iniciadas discussões para a incorporação de um modelo mais completo, tridimensional, desenvolvido pela Arcelor Research. Este modelo permitiria uma visão mais detalhada das superfícies de desgaste. A expectativa é estar com o mesmo instalado também em 2006.

4.4 Experimentos Exploratórios

Com base nos dados levantados na análise dos dados históricos, experimentos exploratórios foram planejados para verificar a eficácia de mudanças no sistema de refrigeração e seu efeito nas perdas térmicas do cadinho.

4.5 Entrevistas e Visitas a Outras Usinas

Diversas empresas foram visitadas no período do trabalho, tendo sido discutidos os métodos de cada uma no acompanhamento e controle do desgaste do cadinho.

Foram buscadas usinas com altos-fornos com *staves* no cadinho (quatro delas), mas foram visitadas outras sem o mesmo recurso. Nove empresas estão relacionadas no próximo capítulo com suas práticas para monitoramento e controle do desgaste do cadinho. Desta lista, três são Brasileiras e seis Européias. Outras empresas visitadas não foram citadas por não implicarem em novos dados relevantes ao trabalho.

A Usina “A”, francesa, conta com refrigeração por cortina d’água na carcaça em seus altos-fornos. Nenhum deles é refrigerado com *staves* no cadinho.

A refrigeração do fundo do maior alto-forno é bem distribuída, empregando painéis com óleo. Apesar da sofisticação do projeto, não utilizam o recurso de controle proporcionado pela separação em painéis, e na próxima reforma vão passar a um projeto de refrigeração com água em tubos paralelos como o do alto-forno A.

Na rotina é utilizado um modelo unidimensional baseado na isoterma de 1.150°C, e mensalmente os dados são verificados com o modelo tridimensional da *Arcelor Research*, citado anteriormente. A cada três meses é feito um relatório completo com as informações relativas à expectativa de vida útil, espessura remanescente por região, pontos máximos por termopar, entre outras informações, que permitem determinar uma espécie de “idade” do cadinho.

A programação de reforma é determinada pelo atingimento da espessura remanescente de 500 mm. Já foi discutida a possibilidade de utilizar a espessura de 400 mm como limite, mas, por razões de segurança, foi mantida a espessura de 500 mm. Na programação da última reforma do maior alto-forno, feita em 2001, foi verificado que a mesma poderia ter sido retardada sem riscos, pois o desgaste chegou aos 500mm disparando o processo de preparação da reforma, mas, no início do *blow down*, a espessura permanecia nos 500mm, ou seja, o desgaste havia estabilizado.

Não é utilizada nenhuma forma de controle da refrigeração, se utiliza sempre a máxima capacidade disponível. Nunca houve problemas por temperaturas baixas. Foi testado minério de ferro titanífero antes da reforma do alto-forno de tamanho intermediário, em 1996, durante um mês. A temperatura caiu um pouco, mas a viscosidade da escória (Al_2O_3) deteriorou a um ponto que levou a decisão de não mais utilizar este recurso.

Injeta-se massa carbonosa no cadinho para restaurar o contato dos blocos com a carcaça, quando se identifica perda de eficiência da refrigeração em algum ponto. Não se injeta “preventivamente” devido ao risco de movimentação dos blocos e de deslocamento das massas originais das juntas. É considerado fundamental desenvolver um controle da pressão de injeção, para evitar deslocamento dos blocos, mas ainda não foi possível fazê-lo. Foram citadas Sidmar e BHP como empresas que já tem este controle, em no máximo 10 bar. A última medição feita mostrou 60 bar na saída da bomba, mas não se sabe dizer qual seria a pressão no bico de injeção. Após a injeção, é possível ver o efeito nos termopares da região.

Não se reduz produtividade quando são percebidos pontos quentes, mas se fecham ventaneiras na região afetada, com o cuidado de não fechar mais do que uma de cada vez para não perturbar a marcha do forno. Foram usadas ventaneiras de diâmetros diferentes sobre os furos de gusa, mas a prática foi abandonada por ser considerada prejudicial para a distribuição de carvão pulverizado. É medida a vazão em cada *down-leg*, sendo possível desta forma conhecer a vazão de ar em cada ventaneira. Com esta informação, se ajusta a vazão de carvão por lança, de modo a manter a taxa de injeção constante em todas as regiões do alto-forno.

Considera-se que a qualidade do coque é o fator fundamental para a boa campanha do alto-forno, e são colocados limites mínimos para a resistência mecânica em função disso.

A Usina “B”, espanhola, opera dois altos-fornos de mesmo diâmetro. Não se dispõe de *staves* no cadinho, sendo usada cortina d’água. Utiliza-se um modelo local unidimensional, baseado na isoterma de 1.150°C , e se contrata a análise da DME para avaliação em modelo tridimensional.

Os resultados dos modelos não refletem a realidade em função da fragilização dos blocos de carbono. Foi feita sondagem (furos nos blocos) e se percebeu um desgaste muito mais acentuado que o apontado pelo modelo. Apesar das medidas de controle adotadas, houve um *breakout* do cadinho em 2004.

Quanto às matérias-primas, procura-se manter uma relação MgO/Al_2O_3 maior que 0,6 como uma das formas para manter uma boa viscosidade da escória. A produtividade é reduzida, são fechadas ventaneiras e se eleva o *coke rate* quando há picos de temperatura no cadinho.

A Usina “C” é alemã e possui *staves* de cobre no cadinho de um dos altos-fornos. Os recursos do sistema de refrigeração não têm sido utilizados, por ainda não serem percebidos pontos quentes, e considera-se a qualidade do coque fundamental para a vida útil do cadinho. Como a última reforma foi em 1999, não há ainda preocupação com o uso de titânio na carga.

A Usina “D” é belga e possui *staves* de ferro fundido em um alto-forno e cobre em outro. A opção pelo cobre foi feita para ganhar diâmetro no cadinho em uma reforma. Não é usado controle de refrigeração, mas são feitas injeções de massa carbonosa ao se detectar perda de eficiência no contato entre os *staves* e os blocos de carbono. A injeção é feita através dos parafusos de fixação dos *staves*, e tem pressão controlada. São feitas injeções preventivas também.

Os altos-fornos foram reformados recentemente, por isto não sido usado titânio, redução de produção ou fechamento de ventaneiras, mas já houve experiências com estas medidas de controle em campanhas anteriores. Considera-se o coque fundamental para a longevidade do forno, e existem limites elevados para CSR. Se utiliza um modelo unidimensional simples para a rotina e outros dois tridimensionais periodicamente, sendo um deles o da Arcelor *Research*. Os modelos utilizam a isoterma de 1.150°C como referência.

A Usina “E” fica na Alemanha e houve uma experiência recente de *breakout* do cadinho. Acredita-se que o motivo é o mesmo que teria causado o *breakout* do cadinho do alto-forno da Usina B: a existência de duas camadas de mulita na base do cadinho, que, ao dilatar, pressionariam os blocos de carbono das paredes, facilitando

a infiltração e, conseqüentemente, a chegada de gusa na carcaça. Outra usina na Bélgica, com cadinho semelhante, sofreu o mesmo problema em 2004. Na parada de avaliação do problema foram identificados pontos com apenas 10mm de carbono são. Foram usados blocos de carbono e massa carbonosa para um reparo paliativo, ganhando tempo para preparar um maior em 2006.

São feitas injeções de massa carbonosa e se utiliza minério titanífero, apesar de não ter sido detectada a presença de Ti(CN) nas amostras colhidas do “bode” do fundo do cadinho. Não há *staves* nos cadinhos.

A Usina “F” fica na França e seus altos-fornos não possuem *staves* no cadinho. Não se usa minério titanífero, mas se fecha ventaneiras e se reduz produtividade quando são identificados pontos quentes. É feita injeção de massa quando se percebe perda de eficiência na refrigeração.

A Usina “G” é uma das usinas brasileiras visitadas e seus altos-fornos não possuem *staves* no cadinho. Utiliza-se minério titanífero, existe a prática de fechar ventaneiras e de reduzir produtividade quando há pontos quentes. Já foi feita injeção de massa no cadinho.

A Usina “H”, brasileira, tem *staves* em um de seus altos-fornos, e faz uso de minério titanífero para proteção do cadinho. São feitas também reduções de vazão quando há pontos quentes, injeção de massa carbonosa quando ocorre perda de contato com a refrigeração e fechamento de ventaneiras na região afetada por ponto quente. Já foram feitas alterações no sistema de refrigeração para controle de temperatura dos blocos de carbono (blocos muito frios), mas não se tem utilizado mais este recurso.

Finalmente a Usina “I”, brasileira, também tem um alto-forno com *staves*. As suas práticas são fechamento de ventaneiras, redução de produção, controle da qualidade do coque e eventualmente uso de minério titanífero. A refrigeração do cadinho é usada sempre no máximo. Uma prática vista também nesta usina é a de se instalar válvulas de controle de vazão antes de ventaneiras das regiões mais solicitadas (acima dos furos de gusa). Esta prática pode ajudar a controlar o desgaste, da mesma forma que as ventaneiras com diâmetros diferentes. A tabela IV.2 apresenta uma síntese das informações apresentadas acima.

Tabela IV-2 - Resumo das informações obtidas nas visitas a outras usinas

Usina	A	B	C	D	E	F	G	H	I
País	F	E	A	B	A	F	Br	Br	Br
Staves no cadinho	N	N	S	S	N	N	N	S	S
Uso de TiO₂	N	N	-	S	S	N	S	S	N
Injeção de massa	S	N	N	S	S	S	S	S	S
Controle de refrigeração	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Redução de produtividade	N	S	S	S	S	S	S	S	S
Fechamento de ventaneiras	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Diâmetro diferente de ventaneira	N	S	-	S	S	S	N	N	S
Modelo Unidimensional	S	S	S	S	S	S	N	S	S
Modelo 3D	S	S	S	S	S	S	N	S	S
Isoterma 1.150 °C	S	S	S	S	S	S	-	S	S

A: Alemanha; B: Bélgica; Br: Brasil; E: Espanha; F: França; N: Não; S: Sim.

Em suma, é prática comum atualmente a redução de produtividade e o fechamento de ventaneiras para controle de pontos quentes no cadinho. A injeção de massa carbonosa também é comum, com a preocupação em algumas usinas para a pressão de injeção (evitar deslocamento de blocos). Mesmo alguns altos-fornos com *staves* têm esta prática, mas normalmente ela só é usada quando há indicação de que o contato da refrigeração com os blocos não está adequado.

O uso de minério titanífero não é consenso. Algumas empresas citam que a piora na qualidade da escória é tal que a queda de produtividade decorrente acaba reduzindo a temperatura, e não a camada protetora em si. Há empresas com uso constante em pequena quantidade, e há outras com uso eventual (normalmente antes de paradas) em grande quantidade. Como normalmente esta medida é tomada junto a outras, como fechamento de ventaneiras e redução da produção, é difícil ter certeza de sua eficiência. Alguns casos de injeção de titânio pulverizado foram relatados, mas esta prática é ainda mais polêmica em função dos riscos de desgaste prematuro de ventaneiras.

Os modelos disponíveis sempre utilizam a isoterma de 1.150°C como referência de solidificação de gusa, confirmando que este é o método mais adequado atualmente, apesar das limitações em termos de infiltração de gusa, fragilização e as conseqüentes alterações na condutividade térmica dos blocos.

4.6 Planejamento e Realização de Experimentos Controlados

Uma regressão múltipla dos dados históricos poderia dar indicações boas, mas para verificar os efeitos das alterações nos parâmetros do sistema de refrigeração nas tendências de temperaturas nos blocos é desejável realizar experimentos controlados, isto porque ruídos podem interferir nos resultados. Por exemplo, o fluxo de calor depende do ritmo de produção, da qualidade da carga, do nível de limpeza do cadinho, entre outras coisas. Ao longo do tempo, estas condições se modificam e com isto fica mais difícil avaliar o efeito das variáveis de interesse.

Como normalmente em altos-fornos não se pode alterar bruscamente parâmetros de operação, a realização dos experimentos deve aguardar a ocasião mais adequada (temperatura do cadinho e produtividade estáveis).

4.6.1 Definição das variáveis para o experimento

Não são muitas as variáveis que se pode alterar no processo de produção de gusa. Algumas, como a produtividade, são determinadas por fatores alheios à vontade do operador do alto-forno.

4.6.1.1 Variáveis com atuação possível

Pode-se controlar a vazão e a temperatura da água do sistema de refrigeração, sem interferir, pelo menos no curto prazo, no ritmo de produção do alto-forno. Dependendo da condição do cadinho e da escória, pode-se testar também o uso de minério titanífero granulado como fonte de TiO₂. Uma carga de teste deste material foi comprada em Agosto de 2004 para um eventual experimento.

4.6.1.2 Ruídos

Existem outras variáveis que podem interferir na resposta, como a temperatura do gusa, sua composição, a composição da escória, o comprimento do furo de gusa a qualidade do coque em uso e a produtividade do alto-forno, por exemplo. Durante os experimentos, estas e outras variáveis foram armazenadas para verificação de sua possível influência nos resultados.

4.6.1.3 Respostas a serem acompanhadas

São respostas importantes para determinar o efeito das variáveis trabalhadas:

- Perdas térmicas para o sistema de refrigeração, tanto no fundo (soleira) como na parede (*staves* do cadinho);
- Temperatura nos termopares críticos (aqueles localizados na parede adjacente ao furo de gusa, e aqueles localizados no fundo do cadinho).

Com estas respostas, com o auxílio do software Minitab, pode-se avaliar o efeito de cada fator no resultado.

4.6.2 Plano de experimento

4.6.2.1 Plano original

Em função das informações levantadas na revisão bibliográfica e nas visitas, além dos dados obtidos com o histórico e os experimento exploratórios, um primeiro plano de experimentos foi proposto, sendo um fatorial ²³. A tabela IV-3 mostra este plano.

Tabela IV-3 - Plano original de experimentos

Variáveis		A	B	C
1	I	-	-	-
2	A	+	-	-
3	B	-	+	-
4	AB	+	+	-
5	C	-	-	+
6	AC	+	-	+
7	BC	-	+	+
8	ABC	+	+	+

Sendo

A = Variação da vazão de água do circuito de refrigeração;

B = Variação da temperatura da água do circuito de refrigeração;

C = Uso de minério titanífero;

+ = Nível superior;

- = Nível inferior.

Os níveis das variáveis são mostrados na tabela IV-4, e foram determinados com base em limites de equipamento (objetivou-se trabalhar próximo a estes limites), no caso das variáveis A e B e, no caso da variável C, com base nos dados disponíveis na literatura.

Tabela IV-4 - Níveis de estudo das variáveis A, B e C no experimento 2³

Variável	Nível superior (+)	Nível inferior (-)
A	140 m ³ /h	20 m ³ /h
B	45 °C	25 °C
C	10 kg/t	0 kg/t

4.6.2.2 Plano de experimentos executado

A utilização do minério titanífero somente pode ocorrer com temperaturas elevadas no cadinho. Desde o momento da compra deste material, o cadinho apresentou apenas uma elevação significativa, porém neste período a relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ na escória estava bastante desfavorável, e isto impediu que fosse utilizado este material, rico em Al_2O_3 . A experiência de Dunkerque neste ponto recomendou aguardar um momento com uma escória mais favorável.

Com a impossibilidade de testar o minério titanífero, a realização de um experimento de apenas duas variáveis com dois níveis seria uma perda de oportunidade de levantar dados relevantes neste trabalho. Com apenas duas variáveis fica relativamente simples a realização do experimento com três níveis (fatorial 3^2), o que permite verificar se alguma das variáveis tem efeito não linear nas variáveis resposta. Os níveis para este experimento foram definidos de forma a se aproximar dos limites práticos do sistema de refrigeração, garantindo uma distância suficiente entre eles para identificar possíveis não linearidades. A tabela IV-5 mostra os níveis escolhidos.

Tabela IV-5 - Níveis de estudo das variáveis A e B no experimento 3^2

Variável	Nível superior (+)	Nível central (o)	Nível inferior (-)
A	140 m ³ /h	80 m ³ /h	20 m ³ /h
B	45 °C	35 °C	25 °C

O plano de experimentos ficou, então, como pode ser visto na tabela IV-6.

Tabela IV-6 - Plano de experimentos fatorial 3²

Experimento	Vazão de água, m ³ /h	Temperatura da água, °C
1	+	+
2	+	0
3	+	-
4	0	+
5	0	0
6	0	-
7	-	+
8	-	0
9	-	-

Uma forma interessante de visualizar as respostas deste tipo de experimento é utilizar o gráfico da figura 4.3. Na análise dos resultados, além dos gráficos das variáveis, esta forma será também mostrada.

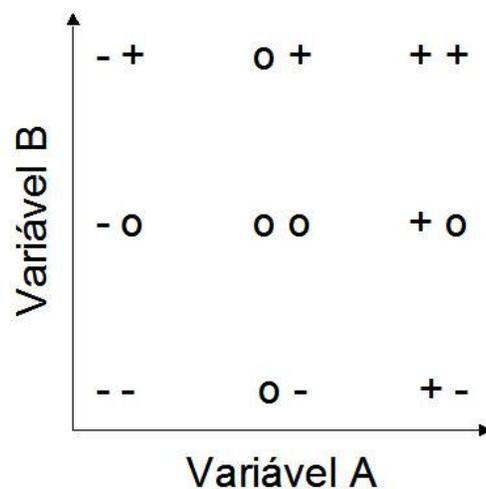


Figura 4.3 - Forma gráfica de visualização dos resultados do experimento

4.7 Síntese das Ações de Controle Disponíveis

Com base nos resultados obtidos, foi preparada uma síntese das ações de controle do desgaste (através do sistema de refrigeração ou não) consideradas por este trabalho aplicáveis ao alto-forno A, de modo a elaborar um procedimento hierarquizado de ações em função de cada situação.

Recomendações também foram feitas para otimizar os sistemas disponíveis de modo a maximizar a campanha do forno, compatíveis com a sua alta produtividade e baixo consumo de combustíveis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise dos Dados Históricos

No início do desenvolvimento do trabalho, os dados relativos às temperaturas dos blocos de carbono foram estudados. A temperatura do fundo, mostrada na figura 5.1, indicou que havia uma variação do comportamento do cadinho de forma não controlada. O período inicial, que foi do *start-up* até abril de 2000, teve temperatura aproximadamente constante. Em abril de 2000, foi necessária uma parada de 72 horas do forno para reparos no lavador de gás. Nesta parada, a camada de “sacrifício” se soltou do fundo. A partir daí, a temperatura teve uma primeira elevação, indicando o consumo de parte do prato cerâmico da base do cadinho.

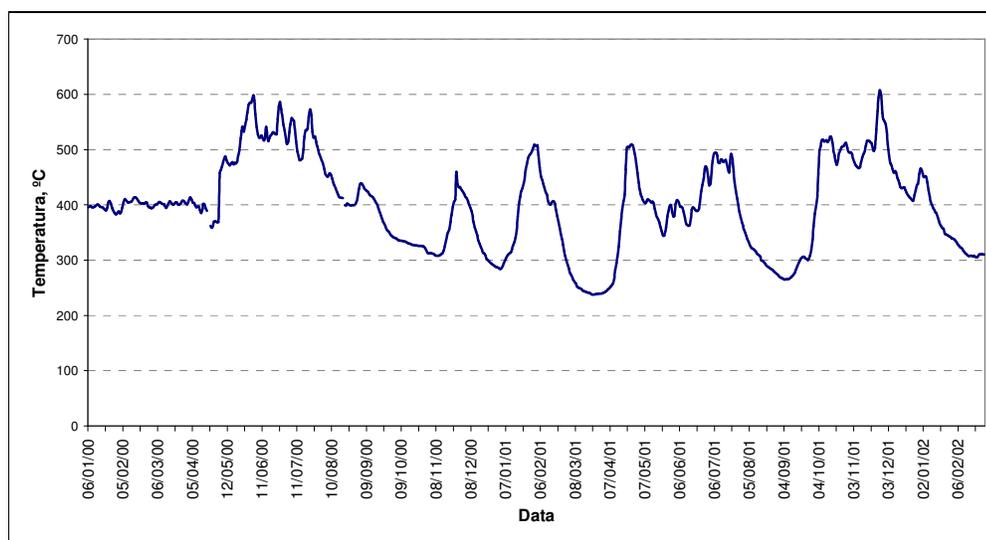


Figura 5.1 - Evolução da temperatura do fundo do cadinho do alto-forno A até Fevereiro de 2002 (5m40cm, centro do cadinho, último antes da interface com o gusa líquido)

Os destaques na figura 5.2 mostram alguns comportamentos simultâneos do fundo e do furo de gusa. Nas retas pretas, percebe-se que por várias vezes a queda da temperatura do fundo provocada pela piora da permeabilidade do homem morto,

provocada por uma elevação da taxa de injeção de carvão incompatível com os demais parâmetros de operação ou de qualidade de matérias-primas, refletia na elevação da temperatura no furo de gusa, ou seja, o fluxo de gusa no cadinho era forçado para a lateral. Este fenômeno é a causa do desgaste tipo “pata de elefante”. As figuras 5.3 e 5.4 mostram duas ocorrências desta natureza, onde a elevação da taxa de injeção levou à impermeabilização do homem morto e a queda da temperatura do cadinho. Os períodos estão destacados na figura 5.2.

A linha de tendência vermelha, no entanto, mostra outro fenômeno, onde a temperatura do fundo e a do furo de gusa caíram juntas, se elevando depois juntas novamente. O detalhe neste caso é que a queda não foi de fato acentuada, e se deveu mais a uma redução da produtividade sem perda de permeabilidade. Com a recuperação do ritmo de produção a temperatura se elevou em conjunto.

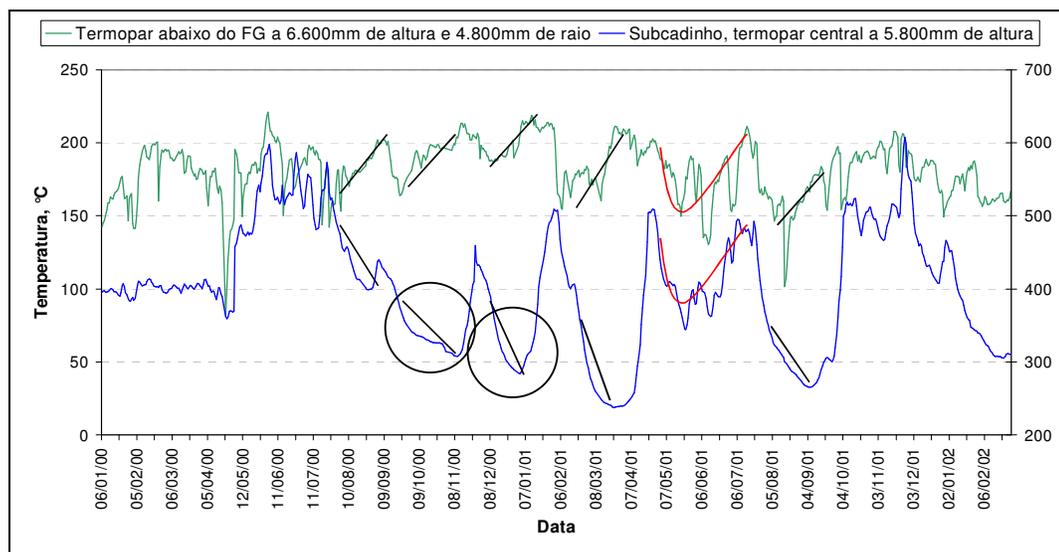


Figura 5.2 - Comportamento dos termopares do fundo do cadinho e da parede abaixo do furo de gusa, de 05/01/2000 a 28/02/2002

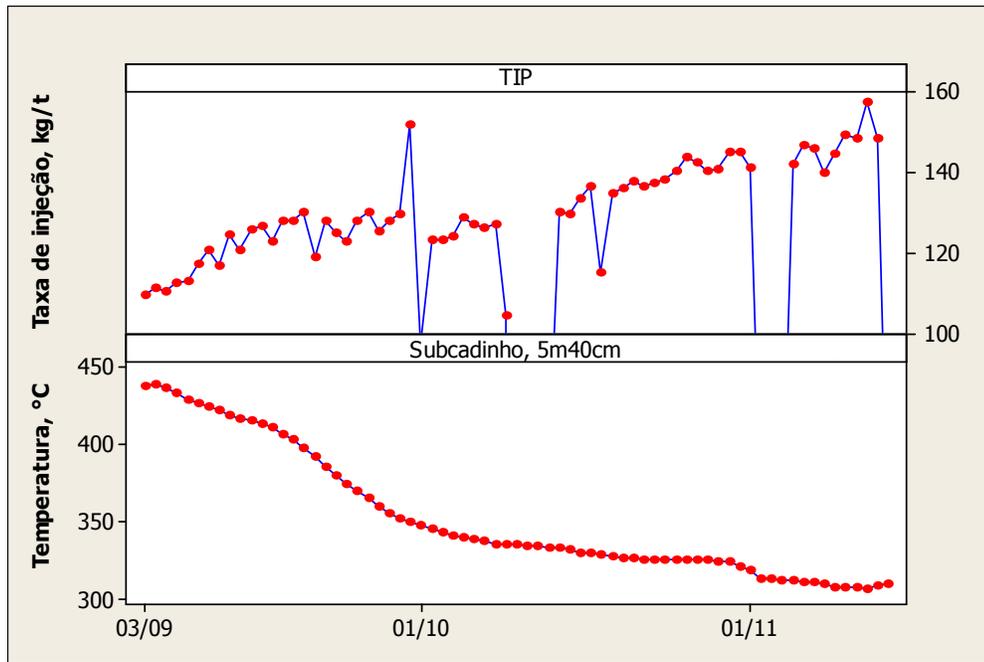


Figura 5.3 - Queda da temperatura do fundo causada por elevação da taxa de injeção. Período de 03/09 a 12/11/00

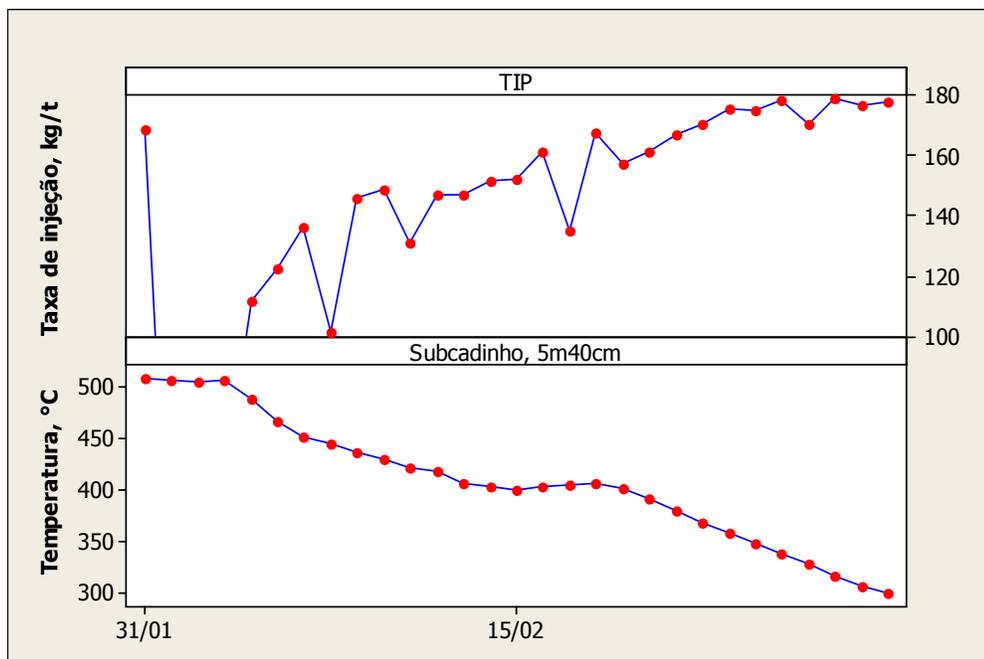


Figura 5.4 - Queda da temperatura do fundo causada por elevação da taxa de injeção. Período de 31/01 a 28/02/01

Podem-se identificar três situações quanto à relação entre as temperaturas do fundo e da região abaixo do furo de gusa:

- Fundo caindo e parede na quina inferior do cadinho subindo: fenômeno provocado por perda de permeabilidade do “homem morto”, que leva a fluxo periférico do gusa;
- Fundo caindo e parede na quina inferior do cadinho caindo: situação provocada pela melhora da permeabilidade do “homem morto”, que leva a um fluxo de gusa e de calor bem distribuídos;
- Fundo subindo e parede na quina inferior do cadinho subindo: pode significar a flutuação do “homem morto”, que força o fluxo por baixo do mesmo, ou então, a sobrecarga do cadinho, com produtividade acima da capacidade de extração de calor.

Pela análise destes dados, foi confirmado que havia a necessidade de estabelecer um acompanhamento sistemático das temperaturas do cadinho, como forma de identificar distúrbios e assim estabilizar a operação do alto-forno. A partir de março de 2002 foram iniciados testes no sistema de refrigeração com o objetivo de controlar estes fenômenos.

Outra análise histórica realizada diz respeito a uma forma de acompanhamento do desgaste do cadinho através do comprimento do furo de gusa. Esta prática foi vista na Usina de Sollac Atlantique (Dunkerque) e chamou a atenção para que fossem levantados os mesmos dados aqui, para verificar a situação sob este ponto de vista. O resultado surpreende porque, ao contrário de cair no decorrer da campanha, o comprimento do furo de gusa está aumentando, em função dos projetos realizados para melhoria da massa de tamponar e redução da variabilidade na operação da casa de corrida. De grande impacto também foi a entrada da nova perfuratriz, totalmente hidráulica, que passou a operar em 25/03/04. A marca no gráfico mostra este evento.

A partir de abril de 2005, a leitura do comprimento do furo de gusa ficou mais precisa. Até então o operador, que fazia o controle da abertura com o controle remoto na área de corrida, lia o valor em uma escala na própria perfuratriz, após perceber o fagulhamento de início de corrida. Agora, ao perceber este fagulhamento, ele aciona um botão para que a leitura da posição do carro seja feita automaticamente pelo

sistema supervisorio. Ainda não é o método ideal, que seria a percepção pelo sistema hidráulico do exato momento da queda da resistência à perfuração, mas já foi um avanço para a qualidade dos dados.

A melhoria contínua pode ser vista na figura 5.5. O gráfico dos mínimos comprimentos registrados é mostrado na figura 5.6.

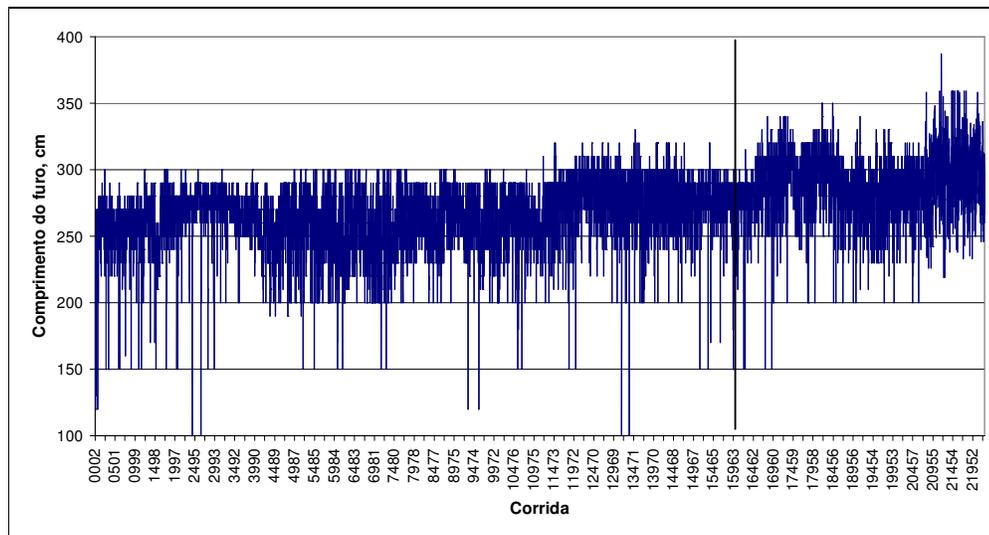


Figura 5.5 - Evolução do comprimento do furo de gusa desde o *start-up* do alto-forno A

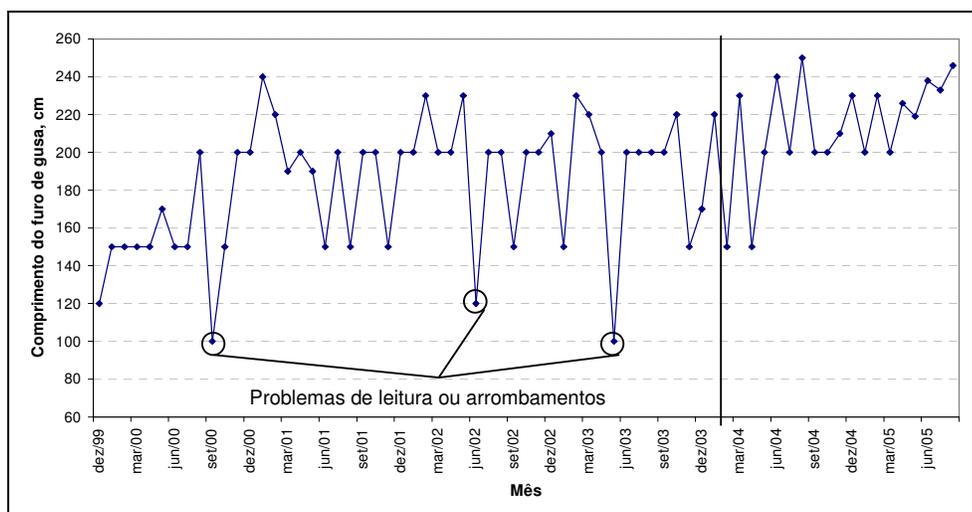


Figura 5.6 - Evolução dos mínimos comprimentos de furo de gusa registrados na campanha do alto-forno A

No projeto, a distância da face externa do furo de gusa à sua face interna é de pouco mais de 200 cm, dependendo do ângulo da perfuratriz e do desgaste do *print face*. Os dados indicados abaixo deste valor significariam desgaste no bloco de carbono desta região. É significativa a frequência de medições em 150 cm, enquanto foram anotados poucos valores abaixo deste comprimento. Estes pontos mais baixos podem decorrer de arrombamentos do furo de gusa ou de leituras incorretas. Já os de 150 cm, pela sua repetição, seriam representativos do desgaste atual.

A figura 3.11, na página 19, mostra o desgaste desta região no final da campanha do alto-forno B de Sidmar. Na última reforma deste alto-forno, houve um problema na aplicação da massa carbonosa no cadinho durante a montagem, o que levou à necessidade de abrir toda a região do furo de gusa poucos meses após o *start-up*. Como nesta região se considerava o desgaste crítico, foi feita uma observação detalhada para ver a condição no início da campanha. Foi constatado que em grande parte este desgaste já havia ocorrido, ou seja, a forma afunilada na região do furo de gusa ocorreria no início da campanha, com um desgaste acelerado, e depois este perfil seria estabilizado, mudando pouco até o final da campanha. No lugar do funil, haveria a formação do cogumelo, ou de um “bode” protetor.

Sendo verdade, então, que o menor comprimento real do furo foi da ordem de 150 cm, o desgaste desta região ainda é relativamente pequeno. Além disso, há mais de 16 meses não se registra comprimentos tão baixos, indicando que a região está protegida de forma estável.

5.2 Experimentos Exploratórios

Durante os primeiros meses de desenvolvimento deste trabalho, a partir de fevereiro de 2002, alguns testes exploratórios foram realizados e os primeiros resultados foram apresentados em dois trabalhos (Santos, 2003 e Santos, 2003a).

Nesta fase exploratória, foram variadas a vazão e a temperatura da água do sistema de refrigeração do cadinho, de forma a reagir a quedas ou elevações na temperatura dos blocos de carbono.

Os primeiros resultados mostraram boas perspectivas para o trabalho, com uma maior estabilidade na temperatura do fundo do cadinho, como na figura 5.7.

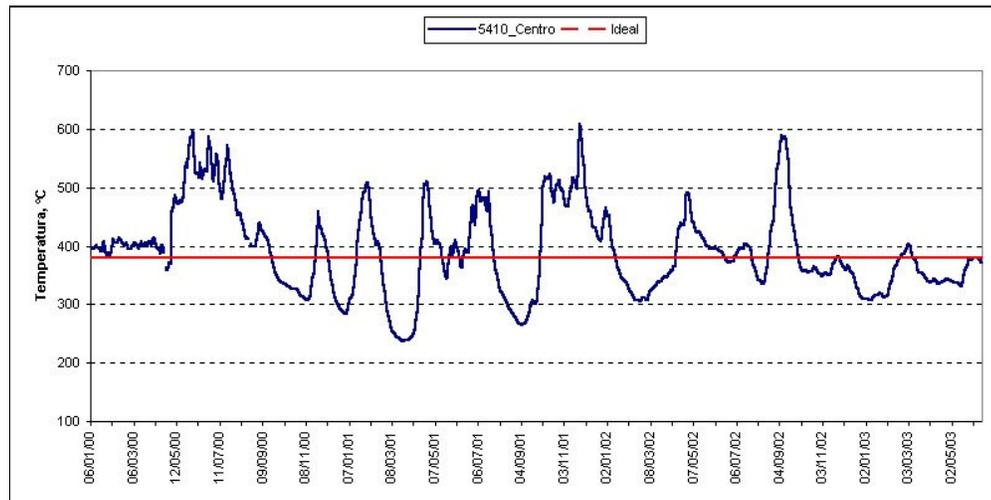


Figura 5.7 - Evolução da temperatura do fundo do cadinho do *start-up* até julho de 2003 (Santos, 2003)

Numa etapa posterior, a vazão e a temperatura foram levadas a pontos extremos do sistema, para verificar quais os valores de perdas térmicas que poderiam ser esperados com a manipulação destes parâmetros. Os resultados foram mostrados em outro trabalho (Santos, 2004). A figura 5.8 mostra os resultados do experimento.

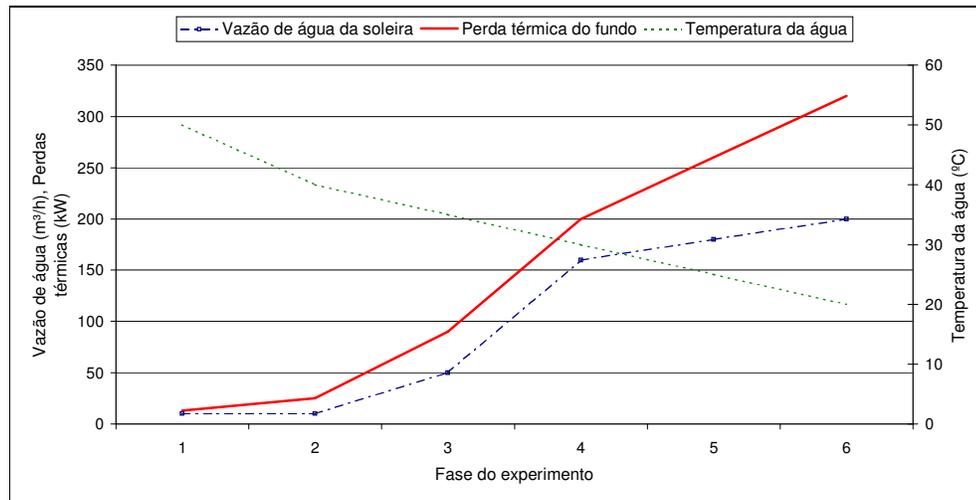


Figura 5.8 - Perda térmica do sistema de refrigeração da soleira em função da vazão e temperatura da água de refrigeração (Santos, 2004)

O cálculo da perda térmica no alto-forno A segue a equação a seguir:

$$PT = V * \Delta T * \rho * Cp * Fator \quad [kW] \quad (5.1)$$

Onde:

PT é a perda térmica para o circuito de refrigeração, em kW;

V é a vazão da água de refrigeração, em m³/h;

ΔT é a diferença de temperatura entre a saída e entrada da água, em K;

ρ é a densidade da água, em kg/m³;

Cp é a capacidade calorífica da água, em cal/g*K;

Fator é o fator de conversão para kW.

Como o Cp da água é igual a 1 cal/g*K, a densidade da água é 1.000 kg/m³ e o fator de conversão é igual a 1,163, tem-se a equação simplificada:

$$PT = V * \Delta T * 1,163 \quad [kW] \quad (5.2)$$

Na fase 1, a vazão foi colocada em 10 m³/h, um valor considerado ainda seguro para o sistema (cujo valor nominal de trabalho 120 m³/h), pois ainda não se observa a formação de grande quantidade de bolhas, que poderiam danificar o equipamento. A temperatura foi regulada para 50°C, o que levou a temperatura de saída da água dos

tubos da soleira a valores superiores a 65°C, também um limite considerando a segurança do equipamento. A perda térmica pelo sistema de refrigeração na soleira foi neste caso de 13 kW, ou da ordem de 0,2 kW/m² de área da *bottom plate* acima dos tubos da soleira.

No outro extremo, na fase 6, a vazão de água nos tubos foi de 200 m³/h, acima do valor nominal de trabalho, e a temperatura foi colocada em 20°C, mínimo possível com o sistema atual. A perda térmica subiu para 320 kW, ou algo em torno de 4,1 kW/m².

Os testes foram feitos em seqüência, pois alterações na temperatura do cadinho, na taxa de produção ou nas condições de matérias-primas poderiam interferir no fluxo de calor do interior para o exterior do forno, influenciando também a perda térmica do sistema de refrigeração.

Os resultados mostraram que as alterações no sistema de refrigeração podem equilibrar o fluxo de retirada de calor no sistema de refrigeração ao fluxo de calor gerado no interior do forno, ou em alguns casos até reverter alguma tendência deste fluxo do interior do forno. Isto porque, baseando no fluxo observado no centro do cadinho, os valores já variaram na campanha de 2,0 a 8,0 kW/m². A faixa normal de trabalho está entre 3,0 e 5,0 kW/m². Este fluxo do centro não representa todo o fundo. Para isto servirá o módulo do modelo que totalizará o fluxo tanto pelo fundo quanto pela parede, de modo a permitir que os parâmetros sejam ajustados para permitir este equilíbrio.

5.3 Experimentos Controlados

5.3.1 Execução e resultados imediatos

Os testes controlados foram feitos entre 08 e 10/08/2005. As etapas estão mostradas na tabela V.1. Entre cada uma delas foi aguardado um tempo de seis horas para estabilização do sistema de refrigeração no novo patamar. Apesar de o ideal neste caso ser executar as etapas em ordem aleatória, como as alterações na vazão de água dependem de ajuste manual do operador e a temperatura tem o controle

automático, o programa foi feito de forma a provocar o menor número de intervenções no sistema.

Durante o período dos experimentos não foram feitas alterações no *coke rate* nem em parâmetros de sopro que pudessem afetar a produtividade. Não foi observada também nenhuma alteração nos parâmetros de operação do forno, como permeabilidade ou consumo de combustíveis, sendo percebida somente uma ligeira melhora da qualidade do coque, em termos de tamanho médio e CSR, que entretanto não comprometeria o experimento.

As figuras 5.9 e 5.10 mostram as respostas do sistema em cada etapa. Na figura 5.9, a vazão fica estável no valor ajustado, enquanto a temperatura oscila em torno do desejado, uma vez que sua malha de controle do trocador de calor é de difícil ajuste. O trocador de calor fica a mais de 200 metros do cadinho e, em temperaturas mais altas, a vazão de água do circuito secundário necessária é muito pequena. Com isto a válvula fecha, a temperatura se eleva além do desejado, a válvula se abre novamente um pouco, mas em pouco tempo a temperatura cai aquém do valor desejado e a válvula se fecha outra vez, explicando a oscilação vista no gráfico para temperaturas de 35 e 45 °C.

Tabela V-1 - Ordem real dos experimentos

Experimento	Vazão de água, m³/h	Temperatura da água, °C
1	140	45
2	140	35
3	20	25
4	20	45
5	20	35
6	80	25
7	80	45
8	80	35
9	140	25

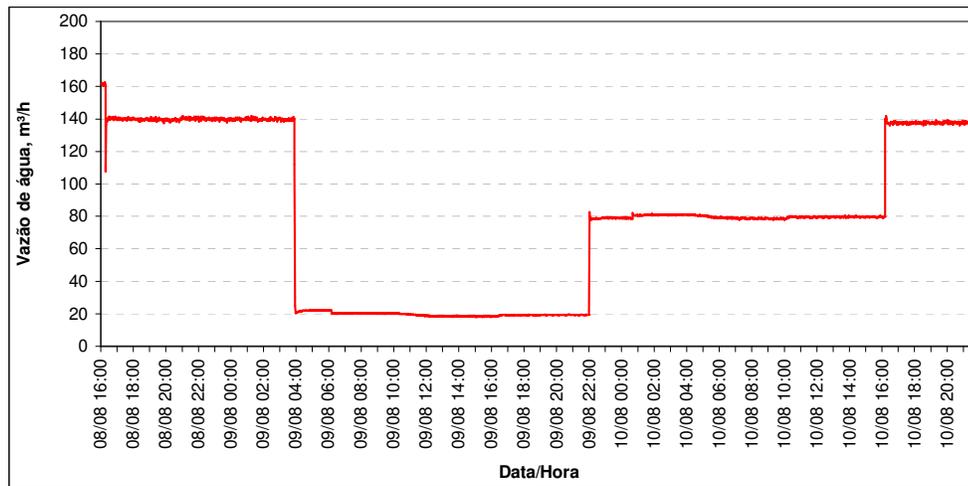


Figura 5.9 - Vazão de água nos tubos da soleira nas etapas do experimento

Antes do experimento, a vazão estava em 160 m³/h. Para o início da primeira etapa foi feito, então, apenas o ajuste para 140 m³/h. Os dados mostrados nos gráficos foram coletados minuto a minuto.

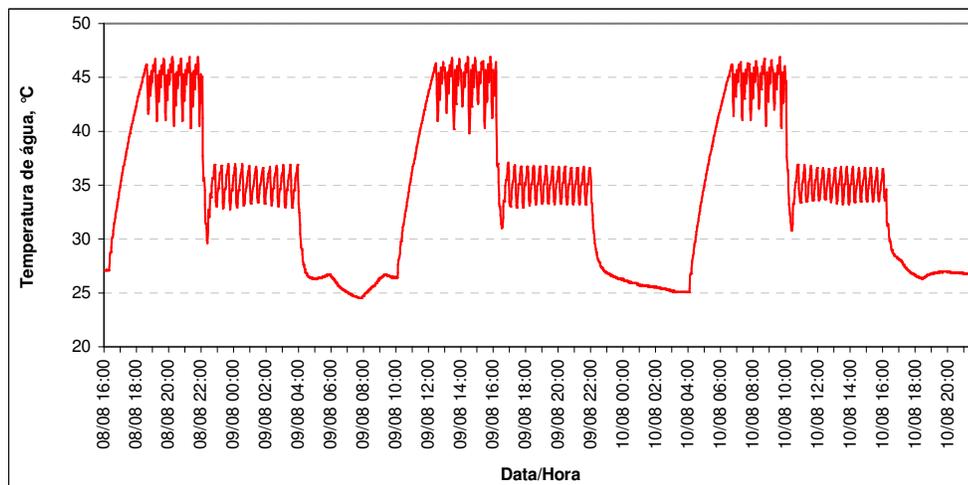


Figura 5.10 - Temperatura de entrada da água nos tubos da soleira nas etapas do experimento

Apenas nas etapas de 35°C, a temperatura média fica no valor desejado. A temperatura de 25°C pode ser atendida dependendo de condições climáticas e de ajustes do sistema secundário de refrigeração, que troca calor com o primário. Para efeitos práticos a diferença entre a temperatura real e a desejada observada no final de cada etapa não foi significativa.

As figuras 5.11 e 5.12 mostram as perdas térmicas da soleira e dos *staves* do cadinho em cada etapa. Percebe-se que, a cada alteração, há um pico; entretanto, ao longo das horas o sistema tende a estabilizar. O resultado de cada etapa foi considerado como a média das últimas duas horas antes da alteração seguinte.

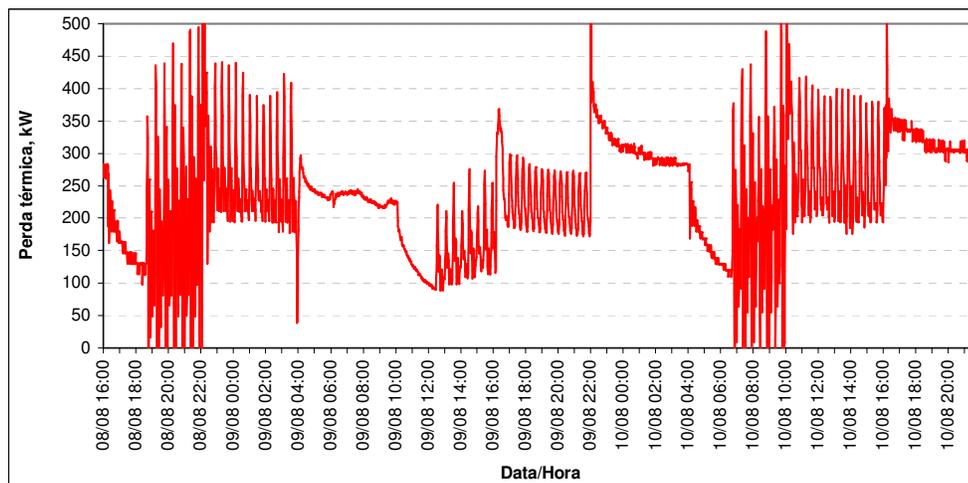


Figura 5.11 - Resultado das perdas térmicas da soleira nas 9 etapas do experimento

A oscilação é grande em função das oscilações da temperatura da água, mas é possível ver a estabilização em torno de um valor central nas últimas duas horas de cada etapa.

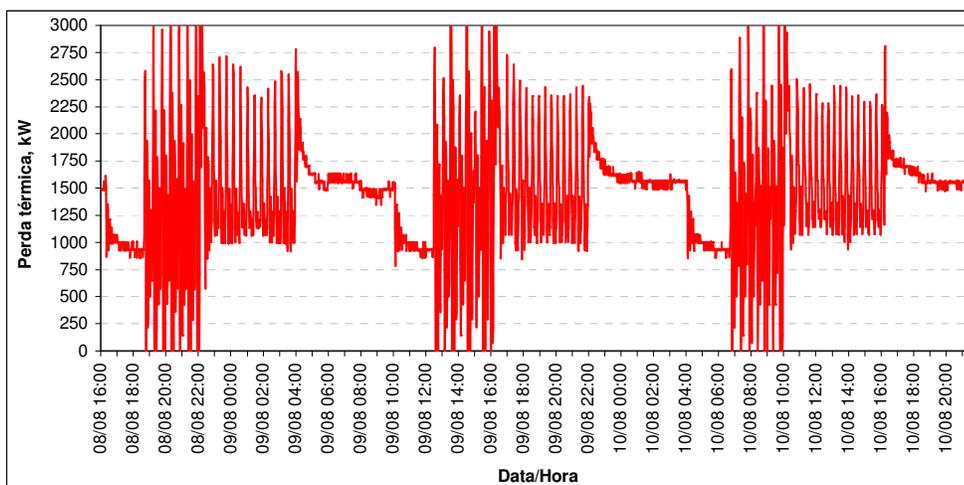


Figura 5.12 - Resultado das perdas térmicas dos *staves* do cadinho nas 9 etapas do experimento

É possível perceber que a influência da vazão de água dos tubos da soleira nas perdas térmicas dos *staves* é pequena, como era de se esperar.

As figuras 5.13 a 5.17 mostram as temperaturas dos termopares abaixo do furo de gusa e no centro do sub-cadinho. A figura 5.18 mostra esquematicamente a localização destes termopares, em uma representação tridimensional para a localização dos termopares do alto-forno A.

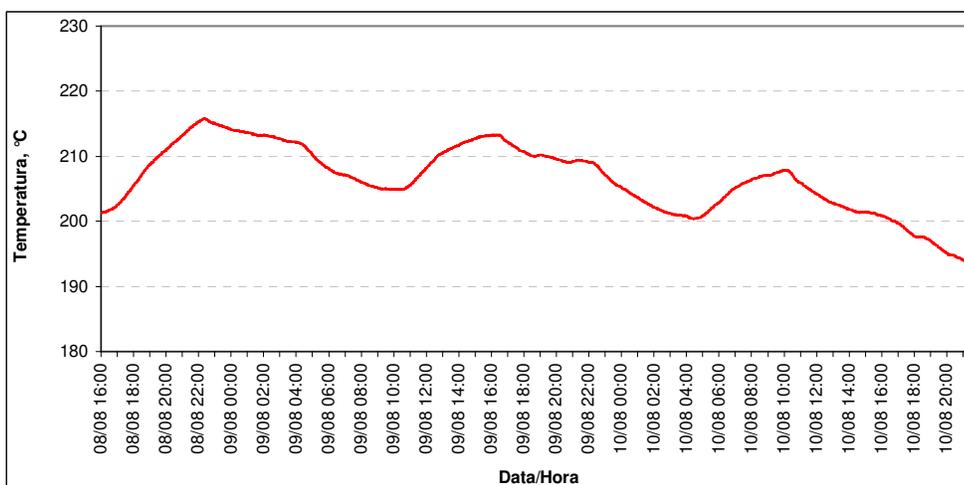


Figura 5.13 - Evolução da temperatura abaixo do furo de gusa durante o experimento

Há uma tendência de queda desta temperatura medida abaixo do furo de gusa, mas isto não encobriu os efeitos imediatos das alterações na temperatura da água (ou melhor, das perdas térmicas dos *staves* do cadinho). O efeito neste termopar, que está próximo à parede, é rápido devido à alta condutividade térmica dos blocos de carbono da região.

No caso das temperaturas do fundo, vê-se comportamentos diferentes. No termopar mais próximo ao fundo do cadinho, a 5m40cm de altura, há uma tendência de elevação provocada por outros fatores no período, provavelmente uma ativação do homem morto devido à melhora da qualidade do coque no período. As alterações na temperatura da água não se prolongaram por tempo suficiente para serem percebidas neste termopar, como era de fato a intenção. Um dos objetivos de realizar um teste rápido era justamente evitar que diferenças significativas de temperaturas no cadinho pudessem interferir nos resultados. A figura 5.14 mostra o comportamento deste termopar.

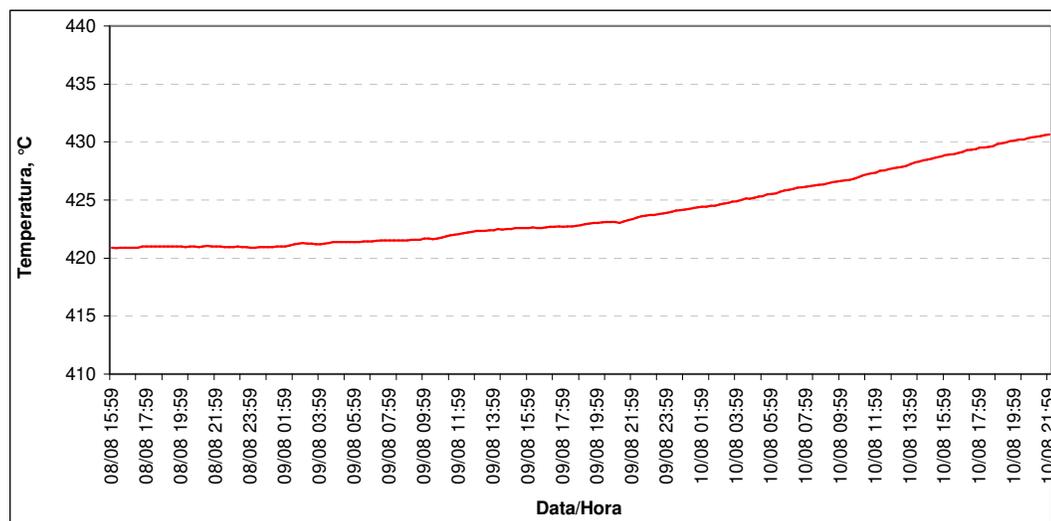


Figura 5.14 - Evolução da temperatura do centro do cadinho a 5m40cm durante o experimento

Já a figura 5.15 mostra o termopar que fica um pouco abaixo, a 4m80 com. Este já mostra alguma influência das alterações no sistema de refrigeração. Apesar de a tendência ser de elevação, como no caso do termopar acima dele, é possível perceber

que quando havia alguma alteração para elevar as perdas térmicas, a temperatura caía em resposta.

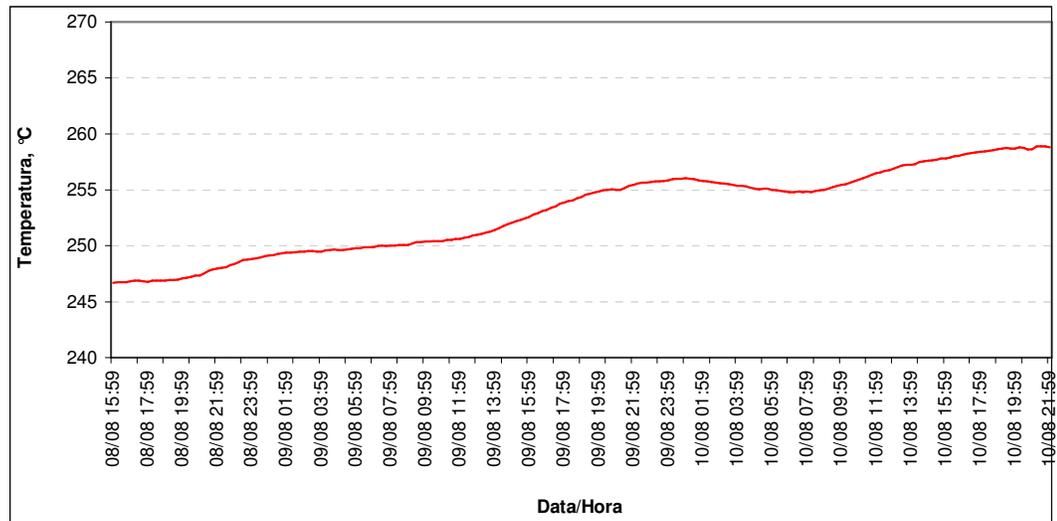


Figura 5.15 - Evolução da temperatura do centro do cadinho a 4m80cm durante o experimento

Na figura 5.16 a influência das perdas térmicas é mais evidente, como também na figura 5.17. Elas mostram os termopares mais próximos da soleira, a 4m20cm e 3m80cm, respectivamente. Os tubos estão a 3m70cm do nível 0m, ou seja, da linha férrea. A base do forno está a 3m20cm.

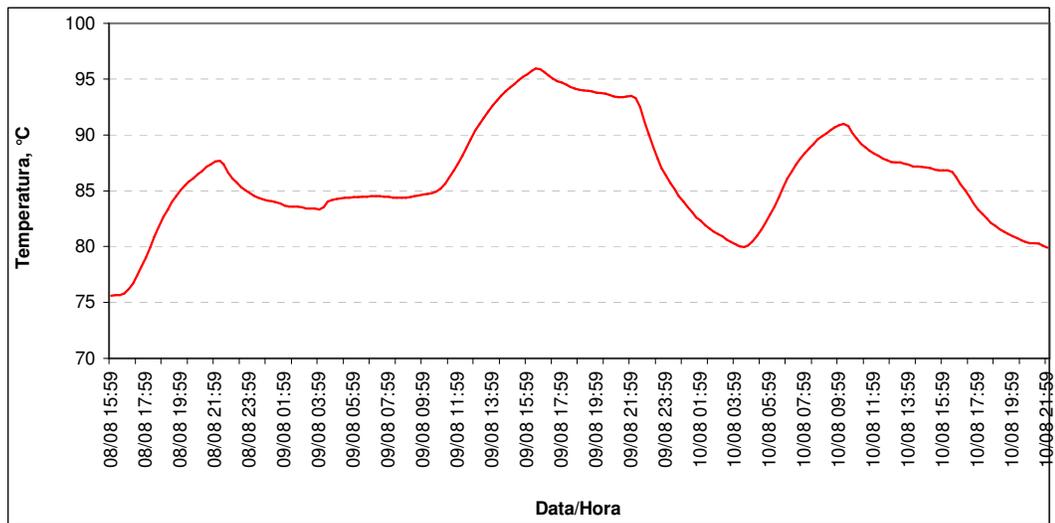


Figura 5.16 - Evolução da temperatura do centro do cadinho a 4m20cm durante o experimento

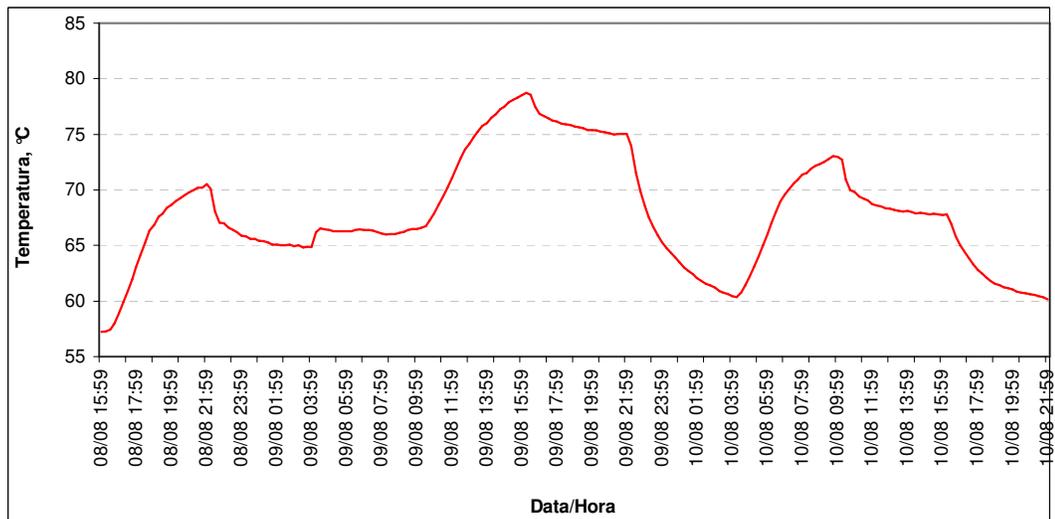


Figura 5.17 - Evolução da temperatura do centro do cadinho a 3m80cm durante o experimento

A tabela V.2 mostra os resultados dos testes, com as anotações de efeitos paralelos e dos valores reais atingidos pelo sistema de refrigeração. A figura 5.19 mostra estes dados da forma gráfica proposta no item 4.6.

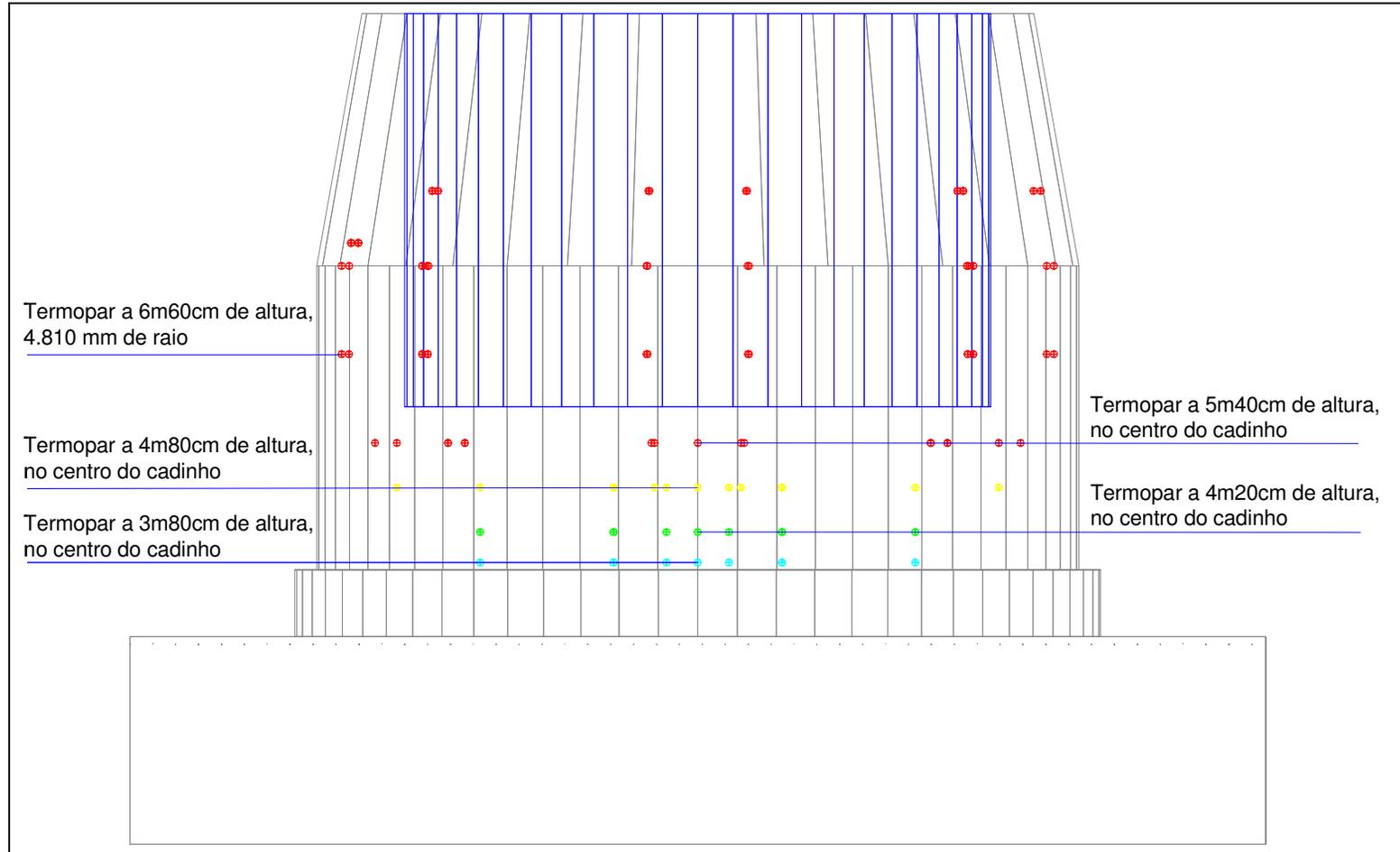


Figura 5.18 - Localização dos termopares na vista frontal da representação tridimensional do cadinho do alto-forno A

Tabela V-2 - Resultados dos experimentos

Experiência	Data	Hora	Vazão real, m ³ /h	Temperatura real, °C	Perda térmica do sub-cadinho, kW	Perda térmica dos Staves, kW	Temperatura saída da água do Sub-cadinho, °C	Temperatura saída da água dos staves, °C	Vazão de saída da água dos staves, m ³ /h	Temperatura do Sub-cadinho, °C	Temperatura do furo de gusa, °C
1	08/08	16:00	139,81	44,57	188,25	1278	45,72	46,36	613,62	420,99	213,24
2	08/08	22:00	139,65	34,97	247,64	1407	36,64	37,04	613,25	421,22	212,66
3	09/08	4:00	20,33	26,02	223,44	1469	35,47	28,10	609,31	421,56	205,28
4	09/08	10:00	18,48	44,58	158,48	1316	51,96	46,42	616,86	422,54	212,65
5	09/08	16:00	19,40	35,05	214,80	1442	44,58	37,08	612,65	423,15	209,28
6	09/08	22:00	81,02	25,25	285,65	1547	28,28	27,43	611,36	424,67	201,31
7	10/08	4:00	78,62	44,70	184,83	1254	46,72	46,45	618,28	426,42	207,13
8	10/08	10:00	79,65	35,05	252,32	1458	37,78	37,09	615,01	428,54	201,36
9	10/08	16:00	137,66	26,79	300,98	1540	28,67	28,67	607,80	430,41	194,02

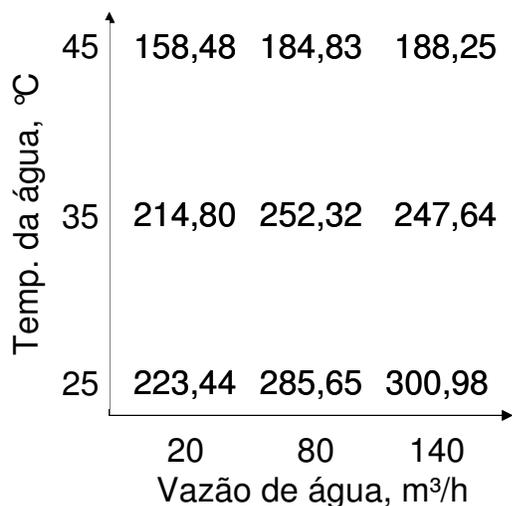


Figura 5.19 – Perdas térmicas (kW) na soleira resultantes dos experimentos, apresentadas em forma gráfica

Através da análise da figura 5.19, pode-se fazer as seguintes constatações:

1. para qualquer temperatura de água, a mudança de vazão média para alta não altera de forma significativa a perda térmica da soleira, ou seja, a partir de certa vazão não há mais sentido elevar o fluxo para extrair mais calor;
2. a alteração de temperatura da água provoca mudança significativa em qualquer vazão estudada, mas o efeito é mais forte quanto maior a vazão;
3. a alteração dos dois parâmetros simultaneamente tem um efeito significativo.

5.3.2 Análise dos resultados

Os resultados foram analisados com a utilização do software Minitab, no qual foram verificadas as influências dos dois fatores. Os resultados anteriores são revistos através de uma análise estatística.

Depois de lançados os dados na planilha do Minitab, foram feitas as análises estatísticas que resultaram na tabela V.3.

Tabela V-3 - Análise estatística dos resultados dos experimentos

12/8/2005 07:35:54

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Multilevel Factorial Design

Factors: 2 Replicates: 1
 Base runs: 9 Total runs: 9
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 3; 3

General Linear Model: PT_sol; PT_staves versus Vazão; Temperatura

Factor	Type	Levels	Values
Vazão	fixed	3	20; 80; 140
Temperatura	fixed	3	25; 35; 45

Analysis of Variance for PT_sol, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vazão	2	3970,7	3970,7	1985,3	10,33	0,026
Temperatura	2	13357,1	13357,1	6678,6	34,76	0,003
Error	4	768,6	768,6	192,2		
Total	8	18096,4				

S = 13,8621 R-Sq = 95,75% R-Sq(adj) = 91,51%

Analysis of Variance for PT_staves, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vazão	2	243	243	121	0,07	0,932
Temperatura	2	85994	85994	42997	25,30	0,005
Error	4	6797	6797	1699		
Total	8	93034				

S = 41,2230 R-Sq = 92,69% R-Sq(adj) = 85,39%

A análise de variância para a influência dos fatores na perda térmica da soleira mostrou que tanto a vazão como a temperatura da água na entrada da soleira têm influência significativa (p -valor $< 0,05$).

O p -valor é a probabilidade de cometer o erro de tipo I (rejeitar uma hipótese H_0 quando ela é verdadeira), com os dados de uma amostra específica. Este valor é dado pelo pacote estatístico. A comparação deste valor com o nível de significância escolhido permite a tomada de decisão. Se o p -valor for menor que o nível de significância escolhido, rejeita-se H_0 , caso contrário, aceita-se H_0 .

Portanto, um p-valor menor que 0,5 demonstra que, para um intervalo de confiança de 95%, a variável avaliada tem influência, ou seja, se for desprezada o modelo final poderá ser prejudicado.

Já a análise de variância para a influência dos fatores na perda térmica dos *staves* do cadinho mostrou que a temperatura da entrada da água influencia, mas a vazão de água nos tubos da soleira não.

Isto ocorre porque a vazão destinada para a soleira (nominal 120 m³/h, mas nos testes variando de 20 a 140 m³/h) é pequena em relação a vazão total deste circuito, que inclui os *staves* do cadinho e totaliza mais de 800 m³/h. Os resultados confirmaram a expectativa.

As figuras 5.20 a 5.24 apresentam os resultados obtidos na forma gráfica.

O gráfico da figura 5.20 reforça a observação feita anteriormente. Nas vazões mais altas (a partir de 80 m³/h), a perda térmica é praticamente independente da vazão, tendo relação maior com a temperatura de entrada da água. Por outro lado, a figura 5.19 mostra que a elevação de temperatura de 25 para 35°C não é tão efetiva para reduzir a perda térmica quanto a mudança de 35 para 45°C. Isto mostra que os efeitos tanto da vazão quanto da temperatura não são lineares.

A figura 5.21 mostra que as perdas térmicas dos *staves* não sofrem, como foi dito anteriormente na análise da figura 5.20, influência importante da vazão da água da soleira, porém a temperatura da água influencia fortemente.

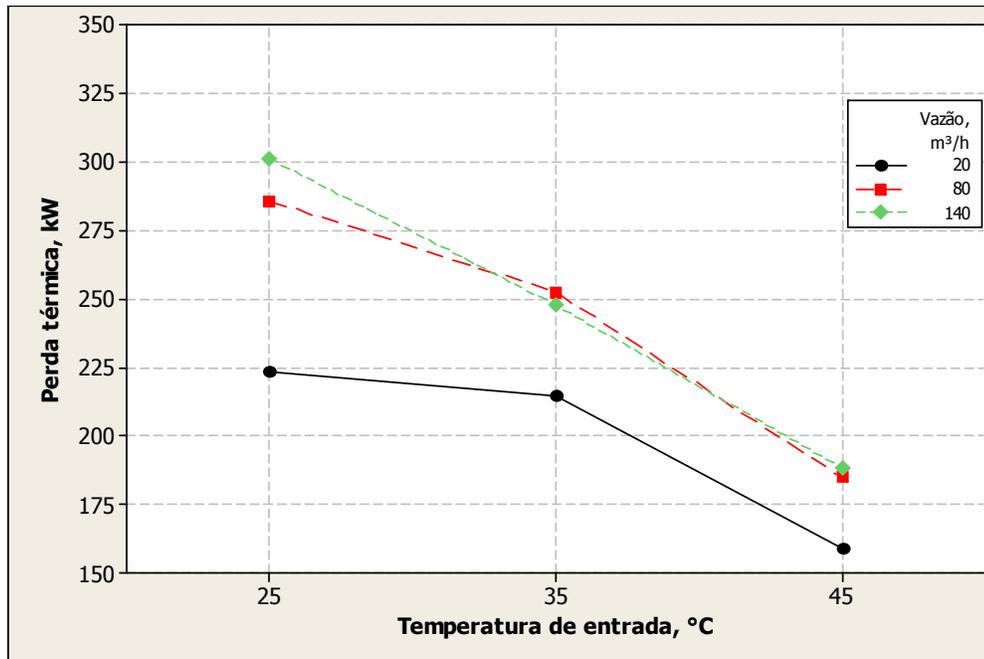


Figura 5.20 - Relação entre as perdas térmicas da soleira e a temperatura da água para diferentes vazões de água na soleira

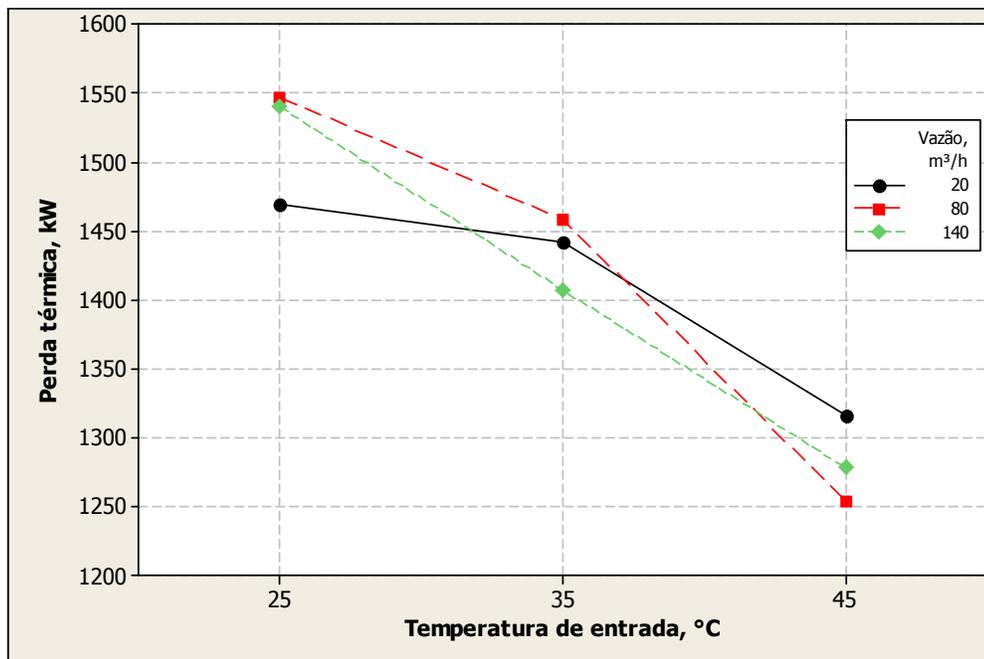


Figura 5.21 - Relação entre as perdas térmicas dos staves e a temperatura da água para diferentes vazões de água na soleira

A figura 5.22 mostra a relação entre as temperaturas de entrada e saída da água nos tubos da soleira. Este gráfico explica porque em vazões mais altas a relação entre vazão e as perdas térmicas não muda: as linhas de 80 e 140 m³/h de vazão são praticamente coincidentes. Já no caso da vazão de 20 m³/h a diferença entre temperaturas de entrada e saída é apreciável.

Outra forma de se verificar isso é através do gráfico 5.23, que mostra a relação entre a temperatura de entrada da água e a diferença entre as temperaturas de entrada e saída. Para a vazão de 20 m³/h, a diferença de temperaturas é muito mais significativa que para as demais.

A figura 5.24 mostra porque as vazões da água na soleira não influenciam nas perdas térmicas dos *staves*. Os pontos são praticamente coincidentes nas três vazões.

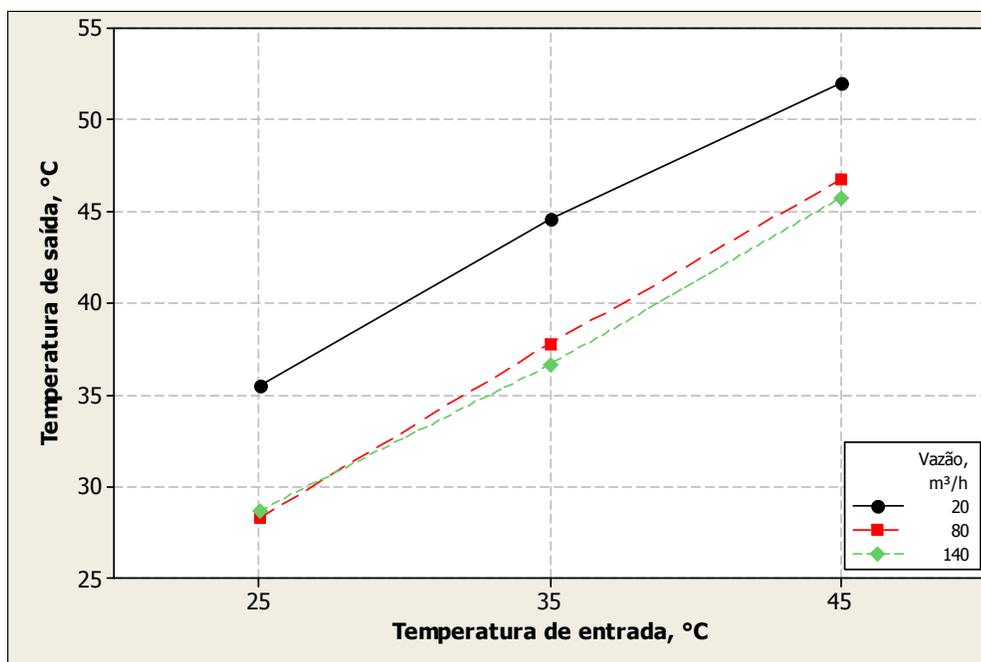


Figura 5.22 - Relação entre as temperaturas de entrada e saída da água nos tubos da soleira, para três vazões diferentes

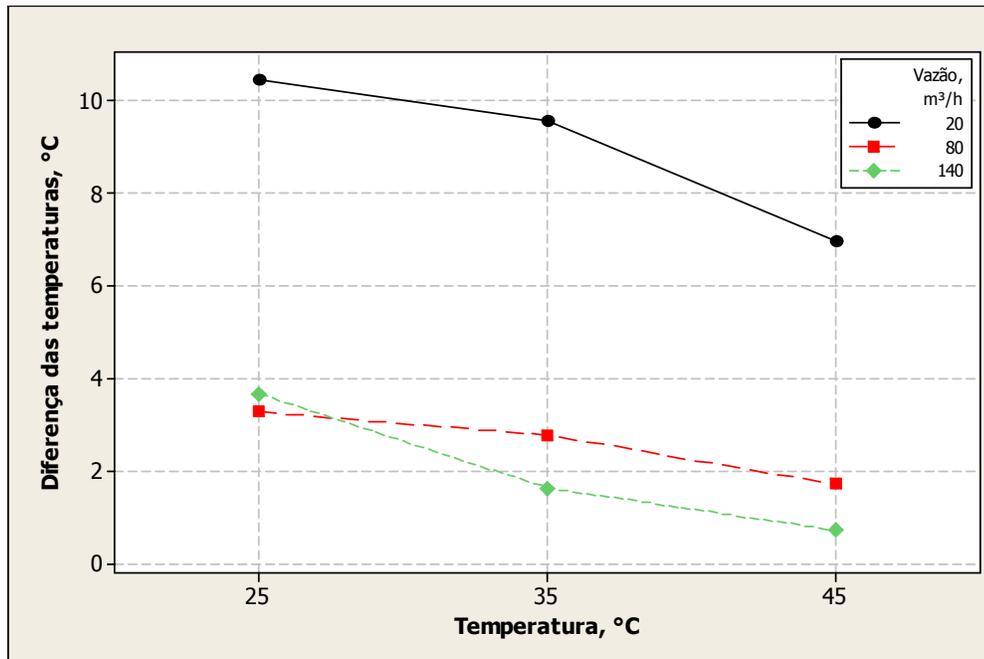


Figura 5.23 - Relação entre a temperatura de entrada da água na soleira e a diferença entre as temperaturas de entrada e saída

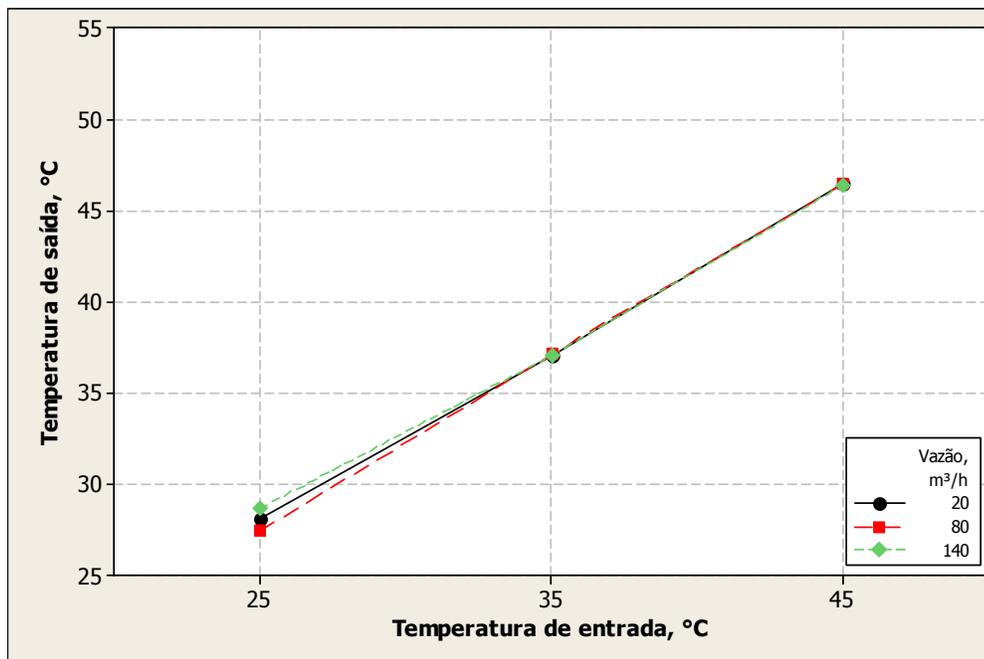


Figura 5.24 - Relação entre as temperaturas de entrada e saída da água nos staves do cadinho, para três vazões de água nos tubos

5.4 Síntese das ações disponíveis

Algumas ações para controle de temperaturas no cadinho foram testadas no decorrer deste trabalho, outras não, em função da não necessidade ainda das mesmas (como fechamento de ventaneiras ou uso de minério titanífero) ou da precaução contra efeitos colaterais (caso novamente do minério titanífero). Toda ação para controle das temperaturas do cadinho tem efeitos colaterais, portanto deve-se realizar uma análise cuidadosa antes da utilização. Porém, normalmente em crises de elevação de temperaturas, os efeitos colaterais são negligenciados frente ao risco de um *breakout*.

As listas a seguir ordenam as ações disponíveis de modo a evitar ou ao menos retardar efeitos colaterais indesejáveis. Elas foram separadas de acordo com as condições possíveis. Para cada caso devem-se determinar os limites a partir dos quais se toma cada ação.

- Ações para redução de temperatura no fundo do cadinho:
 - Redução da temperatura da água de refrigeração;
 - Aumento da vazão de água de refrigeração;
 - Redução da produtividade;
 - Uso de minério titanífero;
 - Parada do forno.
- Se houver indícios de flutuação do homem morto:
 - Redução da temperatura da água de refrigeração;
 - Aumento da vazão de água de refrigeração;
 - Elevação do *coke rate* (para melhorar a permeabilidade do homem morto);
 - Redução da produtividade;
 - Uso de minério titanífero;
 - Parada do forno.
- Ações para redução de temperatura nas paredes do cadinho:
 - Redução da temperatura da água de refrigeração;
 - Aumento da vazão de água de refrigeração;
 - Redução da produtividade;

- Redução do diâmetro ou da vazão de ar da ventaneira acima da região afetada;
 - Fechamento de ventaneira acima da região afetada;
 - Parada do forno.
- Ações para elevação de temperatura no fundo do cadinho:
 - Redução da vazão de água de refrigeração;
 - Aumento da temperatura da água de refrigeração;
 - Elevação do *coke rate* (para melhorar a permeabilidade do homem morto).

5.5 Evolução das temperaturas no cadinho do alto-forno A

A figura 5.25 mostra a evolução da temperatura do fundo do cadinho, reproduzindo sua menor variabilidade após os controles adotados a partir do início deste trabalho. As linhas indicam respectivamente o início do controle da vazão e da temperatura da água.

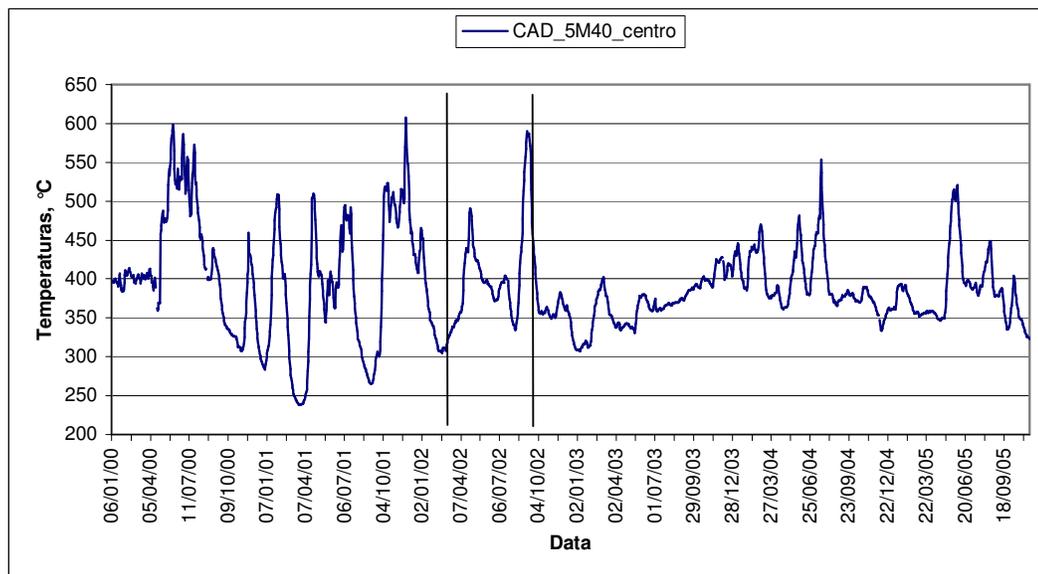


Figura 5.25 - Evolução das temperaturas no centro do subcadinho, a 5m40cm, desde o *start-up* até novembro de 2005

A figura 5.26 mostra a evolução das temperaturas na região do furo de gusa, logo abaixo do mesmo, a 6m60cm (o furo está a 7m80cm).

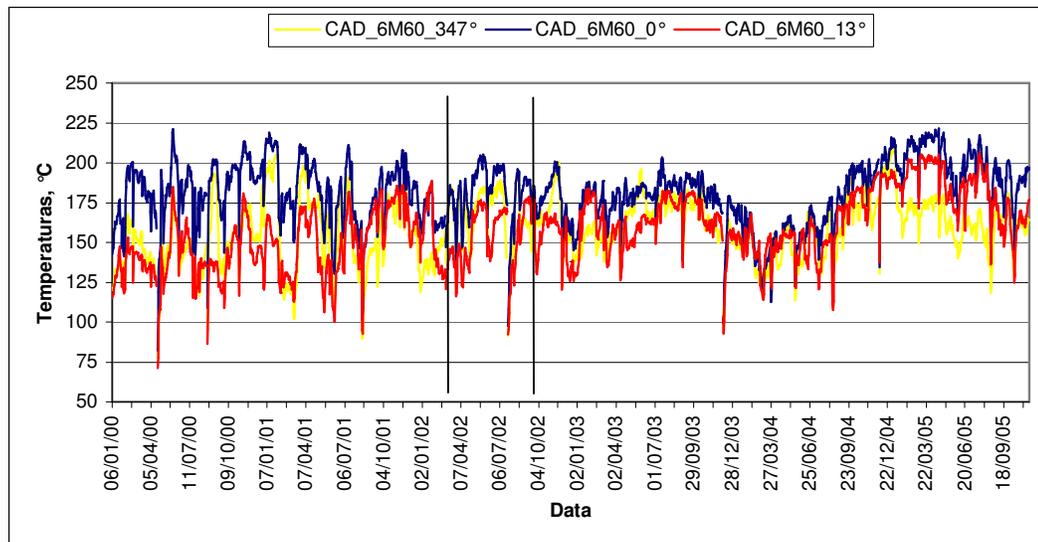


Figura 5.26 - Evolução das temperaturas da parede abaixo do furo de gusa, do *start-up* até novembro de 2005

A figura 5.27 mostra a evolução dos termopares pouco acima do furo de gusa, a 8m10cm.

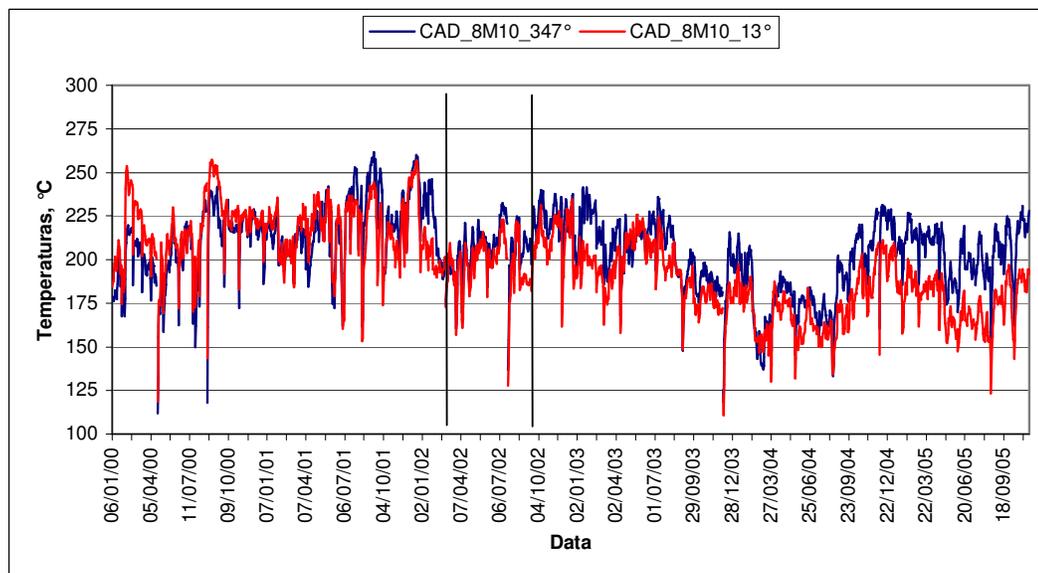


Figura 5.27 - Evolução das temperaturas da parede acima do furo de gusa, do *start-up* até novembro de 2005

A análise dos dados através da equação de Fourier (4.1) revelou que até o momento nada há de preocupante nestas regiões, conforme pode ser visto na tabela V.4.

No fundo houve um pequeno desgaste, de 18 cm de um total de 50 cm do bloco central de monocoral. Poder-se-ia esperar que este material já tivesse sido todo consumido. A máxima temperatura na face quente do bloco de carbono do subcadinho foi de 608 °C, abaixo ainda da temperatura de fragilização, que seria de 750 °C.

Na parede abaixo do furo de gusa, o ponto mais alto ocorreu ainda no ano 2000, em um período de elevação geral das temperaturas do cadinho, ainda com operação muito conturbada do forno. Na data da ocorrência do pico, a temperatura do fundo estava em 590 °C, uma das mais elevadas registradas até agora. Mesmo assim, este pico levou a face quente do bloco de carbono a 734 °C, abaixo ainda da temperatura de fragilização. A mínima espessura residual foi de 18 cm de “bode” em frente ao bloco de carbono nesta região.

Na parede acima do furo de gusa, a temperatura já atingiu a faixa de fragilização, em 2001. Isto ocorreu em um período de baixa atividade do fundo do cadinho (a temperatura do fundo estava em um de seus valores mais baixos, 272 °C), o que levou o fluxo de gusa e escória para a parte superior do furo. A máxima temperatura da face quente do bloco atingiu 843 °C, mas depois desta crise, de 2002 até agora não ocorreram mais valores da face quente acima de 750 °C. A espessura mínima de “bode” foi de 7 cm segundo o modelo desenvolvido.

Os resultados sobre a região da “pata de elefante” ainda não são precisos no modelo, sendo necessário um refinamento dos cálculos para identificar a localização exata das isotermas na quina inferior do cadinho. Porém mesmo sem a precisão desejada, o modelo indica pelos resultados atuais que a situação da região não é preocupante. Na figura 5.30 pode-se ver uma das telas do modelo, em um momento de temperaturas elevadas, e percebe-se que a quina inferior está ainda fora da exposição à fragilização ou desgaste.

Tabela V-4 - Máximas temperaturas registradas em locais selecionados no cadinho do alto-forno A

Elevação, mm	8.100		6.600		5.400	4.800
Ângulo em relação ao furo de gusa, °	347°		0°		Centro	
Raio, mm	4.754	4.854	4.810	4.910	Centro	
Data	11/09/2001		02/06/2000		25/11/2001	
Termopar 1, °C	262		221		608	
Termopar 2, °C		182		177		325
Fluxo de calor, kW/m ²	16.640		9.040		6.556	
Temperatura na face quente do bloco, °C	843		734		> 1.150	
Desgaste, mm	- 180		-70		+ 180	

5.6 Modelo de Acompanhamento do Desgaste do Cadinho do Alto-Forno A

O modelo de acompanhamento do cadinho em desenvolvimento pela equipe da automação da Belgo dispõe de várias ferramentas para acompanhar o desgaste das diversas regiões do cadinho.

A figura 5.28 mostra uma das telas do modelo, onde se vê um corte com os fluxos de calor médios do dia selecionado. As figuras 5.29 e 5.30 mostram outra opção do modelo; são mostradas algumas das isotermas em datas diferentes (02/06/2005 e 22/11/2005), e é possível perceber a movimentação das isotermas com a alteração das temperaturas principalmente do fundo; as datas escolhidas se referem a dias com temperaturas próximas aos extremos já atingidos. Percebe-se a variação do volume útil do cadinho entre estes extremos.

A figura 5.30 mostra também, para aquele corte, a linha de desgaste atual do cadinho; a isoterma de 1.150°C seria o máximo perfil de desgaste já atingido.

A figura 5.31 mostra outra informação disponível, o histórico do desgaste por região relacionada a um par de termopares, através de gráficos de tendências. No caso mostrado, pode-se ver a evolução do desgaste do prato cerâmico em todos os pontos.



Figura 5.28 - Tela do modelo de acompanhamento do desgaste do cadinho mostrando os fluxos de calor do dia 23/10/2002

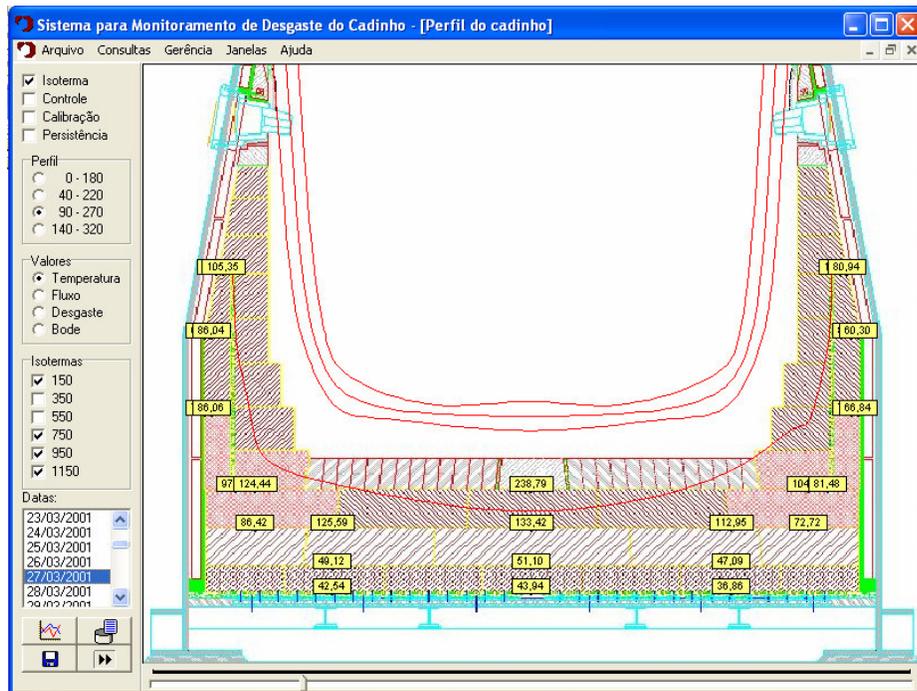


Figura 5.29 - Tela do modelo de acompanhamento do desgaste do cadinho mostrando algumas isotermas no dia 27/03/2001

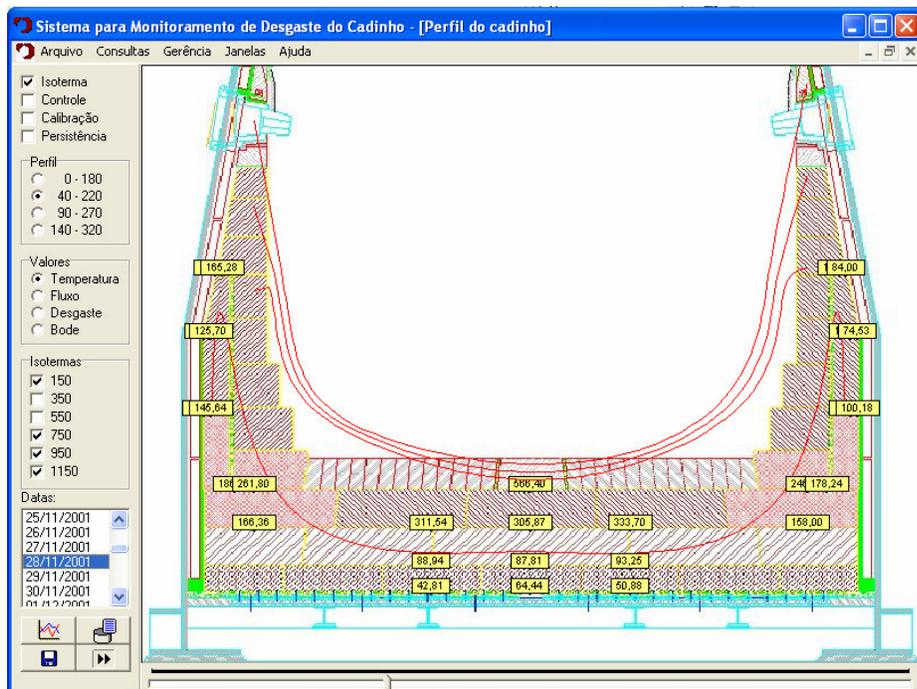


Figura 5.30 - Tela do modelo de acompanhamento do desgaste do cadinho mostrando algumas isotermas no dia 28/11/2001

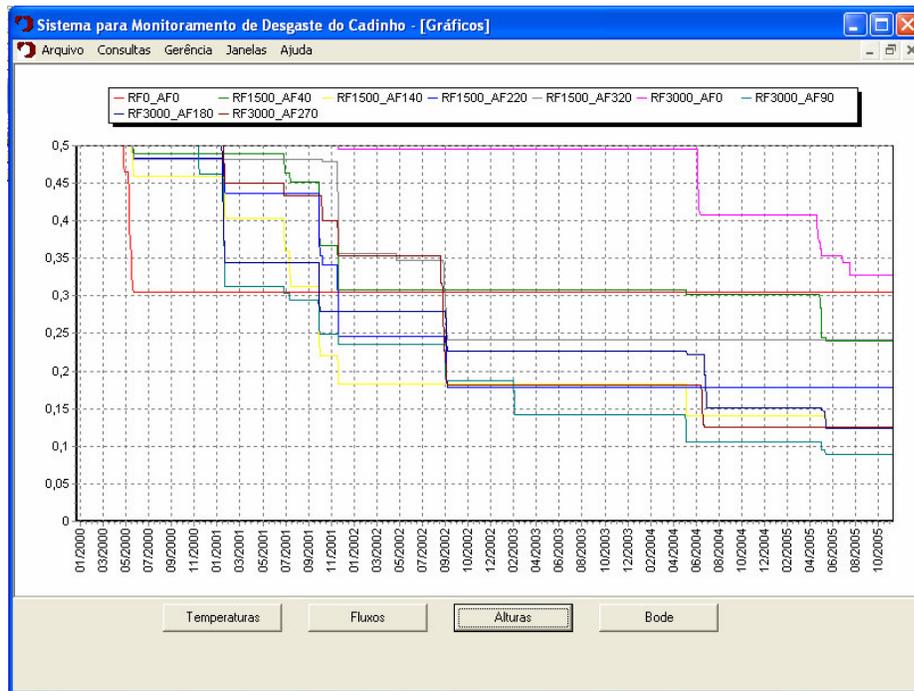


Figura 5.31 - Tela do modelo de acompanhamento do desgaste do cadinho mostrando a evolução do desgaste do prato cerâmico

6 CONCLUSÕES

Das visitas e discussões e da revisão bibliográfica, tem-se as ações tradicionais para controle do desgaste: redução de produção, fechamento de ventaneiras, uso de minério titanífero, injeção de massa carbonosa para corrigir falhas de contato dos blocos com a refrigeração, utilização de diâmetros diferentes de ventaneiras ou de válvulas de controle de vazão. Mas da revisão também se obtém que a fragilização dos blocos, parte importante do processo de desgaste, ocorre a temperaturas relativamente baixas. Isto leva a crer que é possível agir preventivamente, como proposto aqui, controlando a posição das isotermas de modo a manter a isoterma de 800°C sempre que possível fora dos blocos de carbono.

Da análise dos dados históricos percebe-se que temperaturas muito baixas levam a perda de produtividade (bloqueio do cadinho). Portanto, somente manter a isoterma de 800°C fora dos blocos não é resposta suficiente: é necessário manter a isoterma de 800°C fora, mas não muito longe dos blocos de carbono, ou seja, utilizar sempre o maior volume do cadinho desde que em condições que retardem o desgaste.

Dos experimentos pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Vazão e temperatura de água da soleira influenciam as perdas térmicas de forma suficiente para contrabalançar variações normais do fluxo de calor do interior do forno, permitindo que se mantenha a temperatura dos blocos de carbono mais constante;
- A temperatura da água do sistema de refrigeração influencia também nas perdas térmicas dos *staves* do cadinho, porém a vazão de água nos tubos da soleira não;
- As perdas térmicas dos *staves* do cadinho têm influência rápida e importante nas temperaturas da região do furo de gusa, portanto, enquanto os sistema de refrigeração dos *staves* e dos tubos da soleira forem pertencentes ao mesmo circuito, deve-se privilegiar as atuações em vazão para não provocar desgaste nas áreas mais críticas;

- Pode-se afirmar para efeito prático que a vazão de 20 m³/h é diferente da vazão de 80 m³/h quanto ao reflexo nas perdas térmicas da soleira, mas também pode-se afirmar que as vazões de 80 e 140 m³/h já não são tão diferentes. Isto quer dizer que elevar a vazão de água funciona até certo ponto. De fato, nos experimentos exploratórios já se havia visto que com vazão de 10 m³/h e temperatura de 50 °C a perda térmica caía para 13kW, valor bem inferior ao observado para 20 m³/h com 45 °C, da ordem de 160 kW. Isto indica que as perdas térmicas são muito sensíveis a baixas vazões de água.

Mesmo com a evolução da produtividade no alto-forno A, ainda não se identificam problemas de desgaste do revestimento demonstrando o correto dimensionamento do mesmo e o efeito das ações de controle.

Provou-se que dentro de determinados limites o controle da vazão e da temperatura da água ajudam no controle da posição das isotermas nos blocos, preservando os mesmos da exposição aos fatores de fragilização e desgaste, prolongando desta maneira a vida do revestimento.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foram vistas duas aplicações referentes a vazão por ventaneira: em uma Usina há uma medição por um venturi confeccionado em refratário em cada *down-leg*, e em outra já estão instaladas em alguns *down-legs* válvulas de controle de vazão de ar por ventaneira. A junção destas duas ferramentas pode aliar as vantagens de se ter uma distribuição mais homogênea da injeção de carvão pulverizado, uma melhor distribuição da chama, enfim, uma taxa de produção mais equilibrada ao longo da circunferência do alto-forno, com a vantagem de se poder ajustar a produção nas regiões mais afetadas por desgaste, quando este for o caso.

Com este conjunto (medição + controle de vazão) pode-se agir preventivamente (evitar produção mais acelerada em um lado do forno, que provoque desgaste preferencial) e corretivamente. Este tipo de ferramenta merece uma investigação mais aprofundada.

Outro trabalho recomendável é separar o circuito de refrigeração do cadinho em duas partes: uma contendo exclusivamente os tubos da soleira, de baixa pressão e com temperatura e vazão reguláveis automaticamente, e outra compreendendo todas as outras partes do circuito atual. Com isto poder-se-ia trabalhar os parâmetros de refrigeração do fundo sem se preocupar com o desgaste da parede, principalmente na região do furo de gusa.

Outra atividade interessante seria desenvolver um módulo do modelo de acompanhamento de desgaste do cadinho que atue automaticamente o sistema de refrigeração de acordo com o fluxo de calor do interior do forno, de modo a manter ao máximo possível a estabilidade das temperaturas dos blocos de carbono.

E, finalmente, confrontar após o final da campanha os resultados do modelo para verificar sua precisão e fazer os ajustes que forem necessários para a campanha seguinte.

ANEXO I – Tabela de condutividade (W / m * K) dos materiais utilizados no cadinho do alto-forno A

Nome	Descrição	Temperatura, °C					
		200	400	600	800	1000	1200
AG-C-1	Bloco de grafite		115	90	80	70	
BC-5	Bloco de carbono	10,9	11,8	12,7	13,7	14,6	15,5
BC-7S	Bloco de carbono micro poroso	12,8	13,5	14,2	14,9	15,6	16,3
BC-8SR	Bloco de carbono super micro poroso	20,8	21,1	21,6	21,9	22,3	22,5
MS-4	Tijolos refratários para fundo circular					2,25	
Monocoral	Bloco refratário central				3,8		4,0
TP-9E	Pasta mista de carbono	13,9					

ANEXO II – Diagrama Fe-C

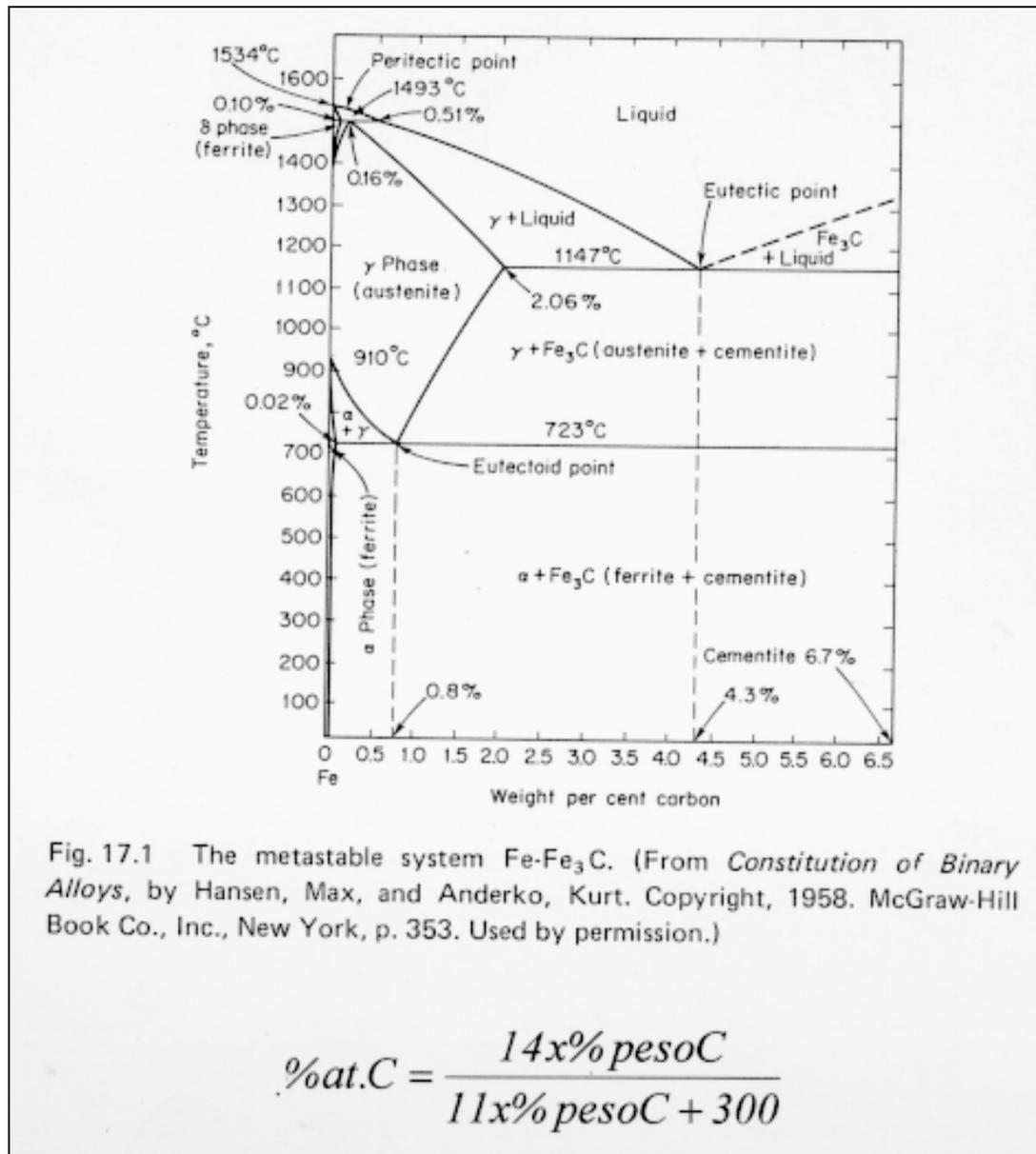


Fig. 17.1 The metastable system Fe-Fe₃C. (From *Constitution of Binary Alloys*, by Hansen, Max, and Anderko, Kurt. Copyright, 1958. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, p. 353. Used by permission.)

$$\%at.C = \frac{14x\% pesoC}{11x\% pesoC + 300}$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BONTE, L., et alli. Relining of the Sidmar Blast Furnace A in 2003. In: LA REVUE DE MÉTALLURGIE – ATS – JSI 2003, p. 10-11.

BONTE, L., HUYSSE, K. Operational Results at the Sidmar Blast Furnace Hearth With High Pulverized Coal Injection. In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY OF IRONMAKING, 2003, Duesseldorf. *Proceedings...* Duesseldorf: VDEh, 2003. p. 701-711.

BONTE, L., et alli. Relining of the Sidmar Blast Furnace B in 2001. In: LA REVUE DE MÉTALLURGIE – ATS – JSI 2002, p. 215-222.

FARIA, J. A., FUJIHARA, F. K., JUNIOR, R. C., NOVAES, J. A. P. El Desafío de una Campaña de 25 Años de Duración, REVISTA ACERO, n. 477, Abril 2003.

FRASER, B, et alli. Monitoring the Blast Furnace Hearth Refractory With the 1.150°C Isotherm and Acoustic Wave Measurements. In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY OF IRONMAKING, 2003, Duesseldorf. *Proceedings...* Duesseldorf: VDEh, 2003. p. 462-470.

FUJIHARA, F. K., et alli. Elongation of CST's No 1 Blast Furnace Life – Hearth Wear Control. In: LA REVUE DE MÉTALLURGIE – ATS – JSI 2003, p. 8-9.

GONZALEZ, M. et alli. Thermal Penetration Model to Estimate Blast Furnace Hearth Conditions. In 4th IAS IRONMAKING CONFERENCE, 2003, San Nicolas. *Proceedings...* San Nicolás: IAS, 2003. p. 381-386.

JANZ, J. et alli. Installation of Cooper *Staves* in Blast Furnace Hearths and Their Influence on Refractory Design. AISE STEEL TECHNOLOGY, May 2003. p. 42-51.

KOLIJN, C. J., et alli. Coke Quality and Hearth Life. In: 1st INTERNATIONAL MEETING ON IRONMAKING, 2001, Belo Horizonte. *Proceedings...* Belo Horizonte: ABM, 2001. p. 418-437.

KUMAR, S. Heat Transfer Analysis and Estimation of Refractory Wear in an Iron Blast Furnace Using Finite Element Method. *ISIJ International*, Vol 45 (2005) n° 8, p. 1122-1128.

LIMA, I. T. Controle do desgaste do cadinho. In: XXXI SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DA ABM, 2000, Santos. *Proceedings...* São Paulo: ABM, 2000. p. 803-813

OMATSU, Y, et alli. Advances in Blast Furnace Equipment Technology Manly for Extending Furnace Life. In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY OF IRONMAKING, 2003, Duesseldorf. *Proceedings...* Duesseldorf: VDEh, 2003. p. 376-379.

PECKA, A. Re-Comissioning of Blast Furnace IV at ROGESA after just 89 Days. In: METALS & MINING INTERNATIONAL NEWS, December 2003, p. 3.

PEREIRA, F. J. N. Estudo da Drenagem de Líquidos de Cadinhos de Altos-Fornos. Dissertação de Mestrado apresentada na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1990.

PETERS, M, LUNGEN, H. B.; Ironmaking Technology in Western Europe. In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY OF IRONMAKING, 2003, Duesseldorf. *Proceedings...* Duesseldorf: VDEh, 2003. p. 33-39.

PINTO, A. A. M., FERREIRA, J. P., FILHO, G. M. A., CARNEIRO, R. T. S.; Monitoramento do desgaste de cadinho em altos-fornos através de modelo matemático. In: XXXI SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DA ABM, 2000, Santos. *Proceedings...* São Paulo: ABM, 2000. p 837-851.

SANTOS, R. J., BORGES, W. O., SANTOS, J. A., TAVARES, R. P.; Control of the Stave Coolers of Belgo Arcelor Blast Furnace A Hearth: A Technical Approach Aiming at Campaign Increase. In: 4th IAS IRONMAKING CONFERENCE, 2003, San Nicolas. *Proceedings...* San Nicolás: IAS, 2003. p. 375-380.

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: XXXIII SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 2003a, Ouro Preto. *Proceedings...* Ouro Preto: ABM, 2003.

SANTOS, R. J., BORGES, W. O., SANTOS, J. A., TAVARES, R. P., PARREIRAS, G. C.; Control Of The Cooling System Based In Stave Coolers In A Blast Furnace Hearth. In: AISTech 2004 Iron & Steel Technology Conference, 2004, Nashville, Tennessee. *Proceedings...* Nashville: AISTech, 2004. p.

SHINOTAKE, A., et alli. Blast Furnace Campaign Life Relating to the Productivity. In: LA REVUE DE MÉTALLURGIE – ATS – JSI 2003, p. 4-5.

SILVA, S. N., MARQUES, O. R., LONGO, E., MATTA, G. S., JUSTUS, S. M., BRITO, H. L. O., VARELA, J. A.; Mecanismos de Formação das Camadas Penetradas por Gusa e Zona Frágil em Cadinho de Alto-Forno. In: XXXI SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DA ABM, 2000, Santos. *Proceedings...* São Paulo: ABM, 2000. p 789-802.

SILVA, S. N., MARQUES, O. R., LONGO, E., JUSTUS, S. M., VERNILLI JR, F., ANDRADE, R. M., VARELA, J. A.; Mecanismos de Desgaste do Revestimento Refratário de Cadinho de Alto-Forno. In: XXXI SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DA ABM, 2000a, Santos. *Proceedings...* São Paulo: ABM, 2000. p 817-835.

SWANLJUNG, J, et alli. Mid-Campaign Repair of Rautaruukki Nr 1 Blast Furnace in July 2002. In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY OF IRONMAKING, 2003, Duesseldorf. *Proceedings...* Duesseldorf: VDEh, 2003. p. 340-343.

SZEKELY, K., et alli. Mechanism of Blast Furnace Hearth Erosion. In: Ironmaking and Steelmaking, V 159-68, 1981

TORRKULLA, J. et alli. Indicators of the Internal State of the Blast Furnace Hearth. In ISIJ International, Vol 42 (2002) n° 5, p. 504-511.

ZUBIMENDI, J.L., et alli. Siderar Nº 2 Blast Furnace. Campaign Extension Versus Productivity. In 4th IAS IRONMAKING CONFERENCE, 2003, San Nicolas. *Proceedings...* San Nicolás: IAS, 2003. p. 335-344.

