

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –

PPGEM

**MELHORIAS NO AQUECIMENTO DE PANEAS DE AÇO  
DE UMA ACIARIA ELÉTRICA**

Fernando da Silva Christ

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre, janeiro de 2001

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGEM

**MELHORIAS NO AQUECIMENTO DE PANEAS DE AÇO  
DE UMA ACIARIA ELÉTRICA**

Fernando da Silva Christ  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Porto Alegre, janeiro de 2001

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Antônio Cezar Faria Vilela

Banca Examinadora:

Prof. Dr.-Ing. Nestor C. Heck..... PPGEM / UFRGS

Dr. Ney Francisco Ferreira ..... SOLVER CONSULTORIA LTDA.

Prof. Dr. Afonso Reguly..... PPGEM / UFRGS

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe  
Coordenador do PPGEM

## **AGRADECIMENTOS**

Deixo os meus agradecimentos a todos que participaram deste trabalho.

Ao professor Antonio Cezar Faria Vilela pela oportunidade e confiança depositada no trabalho da equipe envolvida no projeto de pesquisa que deu origem a esta dissertação.

À GERDAU – Aços Finos Piratini – pelo apoio dado ao trabalho de pesquisa e por acreditarem na cooperação técnica com a Universidade. Não devo esquecer a receptividade e a forma aberta com que a equipe foi sempre tratada, tornando a aciaria uma extensão da Universidade. Essa abertura possibilitou a convivência dos pesquisadores com a realidade do problema, tornando mais práticas e rápidas as soluções.

A toda equipe da aciaria da GERDAU – Aços Finos Piratini – que participou desse trabalho, em especial ao Engenheiro André Mendes Wollmann. Estendo os meus agradecimentos às equipes de Engenharia e Informática.

Aos colegas dos Laboratórios de Siderurgia e de Metalurgia Física pela amizade.

Esse trabalho foi desenvolvido em equipe, devendo ser prestados os maiores agradecimentos aos colegas Ney Francisco Ferreira, Lucas Luis Gutkoski e Tiago Alliatti Beleza.

Agradeço também aos meus pais, Ney Surllet Christ e Neusa da Silva Christ, por terem me possibilitado alcançar esse objetivo, e à minha filha Luísa e Claudia pelo amor, compreensão e dedicação.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>3</b>
2.1	ACIARIA ELÉTRICA	4
2.1.1	<i>O Ciclo de Produção do Aço</i>	4
2.1.1.1	Refino Primário	4
2.1.1.2	Refino Secundário	5
2.1.1.3	Lingotamento do Aço	7
2.1.2	<i>O Ciclo das Pannels</i>	9
2.1.3	<i>Perdas Térmicas na Panela</i>	10
2.2	PANELAS NA ETAPA DE RESFRIAMENTO	12
2.2.1	<i>Tempo sem aço</i>	12
2.2.2	<i>Tempos de espera</i>	15
2.3	PANELAS NA ETAPA DE AQUECIMENTO	17
2.3.1	<i>Aquecedores de Panela</i>	20
2.3.2	<i>Temperatura da Parede Refratária</i>	20
2.3.3	<i>Curvas de Pré-aquecimento</i>	21
2.3.4	<i>Tempo de Aquecimento</i>	23
2.3.4.1	Pré-aquecimento de Panela Nova e Fora do Ciclo	23
2.3.4.2	Aquecimento de Pannels no ciclo	26
2.4	PADRÕES OPERACIONAIS	28
2.5	NOVAS TECNOLOGIAS DE AQUECIMENTO	33
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>37</b>
3.1	AVALIAÇÃO E MELHORIAS DOS AQUECEDORES DE PANELA	37
3.1.1	<i>Aquecedores</i>	37
3.1.2	<i>Pannels Utilizadas e Instrumentação</i>	39
3.1.3	<i>Ensaio</i>	41
3.1.3.1	Ensaio para Obtenção e Avaliação da Curva de Secagem com o Aquecedor Vertical	41
3.1.3.2	Ensaio Comparativos dos Aquecedores Verticais e Horizontais	42
3.1.3.3	Ensaio de Homogeneidade de Aquecimento	44
3.1.3.4	Ensaio de Descarboxinação	44
3.2	OTIMIZAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DOS AQUECEDORES	45
3.2.1	<i>Acompanhamento da Situação de Movimentação das Pannels</i>	45
3.2.1.1	Layout de Aciaria	45
3.2.1.2	Observação da Situação de Movimentação das Pannels	46
3.2.1.3	Metodologia do Acompanhamento	48
3.2.2	<i>Implantação de Melhorias</i>	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>50</b>
4.1	AVALIAÇÃO E MELHORIA DOS AQUECEDORES DE PANELA	50
4.1.1	<i>Ensaio para Obtenção e Avaliação da Curva de Secagem com o Aquecedor Vertical</i>	50
4.1.2	<i>Ensaio Comparativos dos Aquecedores Verticais e Horizontais</i>	55
4.1.3	<i>Ensaio de Homogeneidade de Aquecimento</i>	57
4.1.4	<i>Ensaio de Descarboxinação</i>	58
4.2	OTIMIZAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DOS AQUECEDORES	58
4.2.1	<i>Acompanhamento da Situação de Movimentação das Pannels</i>	59
4.2.2	<i>Implantação das Melhorias</i>	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>66</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>69</b>

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma metodologia para a avaliação de aquecedores de panela de aciaria e de práticas de movimentação de panelas em uma aciaria elétrica. O objetivo final é a redução da variabilidade do estado térmico da panela durante o vazamento do aço do forno elétrico.

Neste estudo são investigados os aquecimentos realizados nos dois tipos de aquecedores existentes e as operações com as panelas durante a etapa sem aço do ciclo das panelas. A eficiência dos aquecedores são comparadas através de ensaios de aquecimento com panelas instrumentadas e a técnica de termografia. A análise da movimentação de panelas é realizada pelo levantamento dos dados operacionais diretamente na usina. Com a identificação dos problemas, são propostas soluções que minimizem seus efeitos sobre o estado térmico da panela.

Finalmente, os resultados das soluções propostas, medidas diretamente na aciaria, comprovam que estas medidas contribuíram para melhorar o estado térmico da panela no vazamento e conseqüentemente o controle sobre as perdas térmicas do aço na panela.

## **ABSTRACT**

This work aims at developing a methodology able to manage ladle heaters as well as to handle ladle inside an electrical steelmaking practice. The ultimate goal is to reduce the variability of the thermal state of the ladle during the tapping procedure of the electric arc furnace.

Heating carried out in the two types of heaters available in the plant and the operations with the ladle during its ladle empty time are investigated in this work. The two heaters are compared to each other with respect to their efficiencies through heating tests with ladles embedded with thermocouples in conjunction with thermography techniques. The analysis of ladles practices inside the plant is conducted by means of operational data directly gathered from plant records. After identifying the problems, solutions to minimize their effects on the thermal state of the ladles are proposed.

Finally, modifications originated from the proposed solutions brought about improvements in the thermal state of the ladle during tapping. As a consequence, a better control of the steel thermal losses in the ladle becomes possible.

## 1 INTRODUÇÃO

A melhoria da qualidade do produto e o aumento da produtividade de uma aciaria passam pelo preciso controle da temperatura do aço líquido desde o vazamento até a sua solidificação no molde do lingotamento contínuo. O grau de superaquecimento do aço líquido no distribuidor é uma das variáveis de grande importância para a qualidade do aço lingotado. A temperatura do aço líquido ao longo do processo depende fundamentalmente da magnitude das perdas térmicas do aço na panela. Assim, a avaliação e controle destas perdas é um requisito básico para se obter o controle dos processos que possibilitam produzir aços de melhor qualidade com menor custo.

Com o propósito de alcançar estes objetivos a GERDAU - Aços Finos Piratini estabeleceu um convênio de cooperação tecnológica com os Laboratórios de Siderurgia – LASID e de Metalurgia Física – LAMEF da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para a realização do projeto intitulado “Avaliação das Perdas Térmicas do Aço Líquido na Aciaria da Aços Finos Piratini”.

O aço contido na panela apresenta duas perdas térmicas principais; para o ambiente pela escória e para o revestimento refratário da panela. As perdas térmicas para a escória são de pequena variabilidade e de fácil controle pois dependem fundamentalmente da espessura e características físico-químicas da escoria. As perdas térmicas para os refratários apresentam grandes variações e são de difícil controle pois dependem do estado térmico da panela.

O presente trabalho tem por objetivo geral a redução da variabilidade do estado térmico da panela durante o vazamento do aço do forno elétrico. Neste estudo serão investigados a eficiência dos dois tipos de aquecedores de panelas e os procedimentos utilizados para o aquecimento de panelas em operação e fora do ciclo diretamente em uma aciaria elétrica. O objetivo é identificar problemas, avaliar os fatores e, quando necessário propor correções que possibilitem minimizar seus efeitos sobre o estado térmico. O trabalho está definido em duas linhas de ação conforme descritas a seguir:

- **Avaliação e melhoria dos aquecedores de panela e**
- **Otimização da utilização dos aquecedores.**

A avaliação dos aquecedores será obtida pelas medições de eficiência de aquecimento dos dois tipos de aquecedores existentes na aciaria em estudo através das medições das temperaturas internas do refratário mediante a utilização de termopares. A verificação da



homogeneidade do aquecimento será obtida através de termografias tiradas das paredes internas das panelas após o aquecimento.

A otimização da utilização dos aquecedores necessita, primeiramente, da análise da situação de movimentação das panelas existentes na aciaria e, posteriormente, propostas de melhorias que aumentem o tempo de aquecimento durante o tempo em que a panela fica sem aço.

Portanto, este trabalho se propõe a apresentar uma metodologia para soluções de problemas relacionados a práticas e sistemas de controle de temperatura de processos transientes, mais especificamente para aqueles envolvidos no aquecimento de panelas de aciaria.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os processos de produção do aço evoluíram devido à crescente exigência do mercado por produtos de melhor qualidade com baixo custo. Assim, a maioria dos fabricantes de aço viu-se obrigado a implementar novos processos como forma de manter sua posição de mercado. A introdução da metalurgia de panela para o refino secundário e o processo de degaseificação a vácuo contribuíram fundamentalmente para o aumento da qualidade do aço produzido. Um efeito direto da introdução destes processos foi o dramático aumento do tempo de residência do aço na panela. Este aumento do tempo obrigou a utilização de materiais refratários de melhor qualidade, traduzido pela melhor estabilidade físico-química e propriedades térmicas. A consequência direta destas alterações foi o aumento da temperatura de vazamento do forno para compensar a maior perda térmica do aço ao longo do processo. Assim, cada vez mais, estes fatores, que afetam o controle da temperatura do aço durante o processo e seus mecanismos de funcionamento, precisaram ser investigados e entendidos. Atualmente, tornou-se um consenso a necessidade de otimização das práticas de movimentação e da aplicação de métodos de secagem e aquecimento de painéis de aciaria.

Desde o início da década de 70, um número crescente de trabalhos foram realizados por siderúrgicas e centros de pesquisa com o objetivo de avaliar as variáveis de processo que mais afetavam o controle da temperatura do aço ao longo do processo. A disponibilidade de computadores possibilitou a implementação de modelos matemáticos dos fenômenos de transporte envolvidos nas etapas de processo e realização de simulações para um grande número de variáveis de forma fácil e barata. Os resultados mais importantes destes trabalhos, sob o ponto de vista abordado aqui, serão apresentados a seguir.

Este capítulo descreve a evolução das técnicas experimentais, numéricas e analíticas, apresentadas na literatura, associada aos processos que ocorrem durante o ciclo de panela de aciaria, mais precisamente nas etapas que ocorrem a partir do fim do lingotamento até o próximo vazamento, referido comumente como *tempo sem aço* da panela. Apresentam-se conclusões referentes ao estado da arte e das práticas correntes deste processo nas indústrias siderúrgicas.

## 2.1 ACIARIA ELÉTRICA

Inicialmente, será apresentado, resumidamente, o ciclo básico de produção do aço de uma aciaria elétrica, descrito por BRADASCHIA (1986), com o objetivo de inserir o leitor no cenário onde os processos, do qual este trabalho se ocupa, ocorrem. O leitor interessado em obter informações mais aprofundadas poderá fazê-lo consultando a seguinte referência bibliográfica, FRUEHAN (1998). O tópico seguinte descreve o ciclo da panela de aciaria com suas etapas ao longo do processo de produção do aço de uma aciaria elétrica. Por último, é apresentado as principais variáveis que afetam as perdas térmicas na panela e a importância de seu controle dentro do processo.

### 2.1.1 O Ciclo de Produção do Aço

O processo de fabricação do aço em aciarias elétricas compõe-se das seguintes etapas gerais:

- Refino Primário: são realizadas as operações de fusão, acerto da composição química do aço sob condições oxidantes, adições de elementos de liga (ferro-ligas) e ajuste da temperatura de vazamento.
- Refino Secundário: acerto da composição química sob condições redutoras e ajuste da temperatura de lingotamento.
- Lingotamento do aço.

#### 2.1.1.1 Refino Primário

O refino primário inicia-se com a fusão das matérias-primas, basicamente sucata de aço e/ou ferro-esponja (incluindo ou não gusa sólido na carga), seguido de adições de elementos de ligas; o refino, nesta fase, caracteriza-se pelo conjunto de reações com o oxigênio para o abaixamento dos teores de carbono, silício, manganês e fósforo do banho.

- **Forno Elétrico a Arco**

O processo inicia-se no forno elétrico a arco (FEA) com a fusão da matéria-prima por meio da energia liberada pelo arco elétrico estabelecido entre os eletrodos e a carga metálica, irradiando-se pela mesma, fundindo-a e mantendo o banho de metal líquido em temperaturas elevadas.

As principais operações desta etapa são:

Carregamento é feito por intermédio de cestões cheios de sucata criteriosamente distribuída com o objetivo de minimizar o impacto da carga sobre o revestimento do forno, evitar sucata alta que impeça o fechamento do forno e facilitar a penetração dos eletrodos no início da fusão sem o risco de quebra dos mesmos.

Fusão: nesta operação é formada a carga líquida de aço com o objetivo de atingir um nível predeterminado de carbono ao seu final e o ajuste da basicidade da escória de fusão. A fusão pode ser assistida pela injeção de oxigênio para aumento da energia calorífica transferida à carga e acelerar a fusão de cargas mais densas resultando numa diminuição do tempo de fusão.

Fase Oxidante: A fase oxidante inicia-se com a insuflação de oxigênio no banho metálico; com o banho completamente fundido são retiradas amostras para análise química de teores de carbono, fósforo, manganês, cromo etc.

Os objetivos metalúrgicos mais importantes nesta fase de refino são a eliminação de carbono e de fósforo.

Ao fim do período oxidante a escória deve ser totalmente removida pois qualquer quantidade remanescente possibilitará a reversão do fósforo, nela contido, para o banho na fase redutora que normalmente se segue.

Fase Redutora: Esta fase é realizada no FEA em aciarias que não possuem processos de refino secundário. Inicia-se imediatamente à retirada da escória oxidante. O banho metálico altamente oxidado deverá ser reduzido mediante agentes desoxidantes.

Os objetivos metalúrgicos a serem alcançados na fase redutora são os seguintes:

- Assegurar que a composição química especificada seja alcançada;
- Garantir um produto limpo com baixos teores de inclusões não metálicas;
- Reduzir o teor de enxofre a níveis baixos.

A conclusão desta etapa se dá com o acerto da temperatura do banho e vazamento do aço para a panela de aciaria.

#### 2.1.1.2 Refino Secundário

As siderúrgicas modernas se utilizam da técnica da metalurgia da panela para a execução do refino secundário, com o objetivo de aumentar a produtividade, a qualidade e a redução dos custos de processo. As operações do refino secundário são:

- Agitação por borbulhamento de gás inerte;
- Injeção de elementos de liga para ajuste da composição química;
- Reaquecimento;
- Aplicação de vácuo.

Essas operações são realizadas em diferentes equipamentos. No processo estudado, utiliza-se um forno-panela e um desgaseificador a vácuo tipo VD/VOD.

### **Forno-Panela**

No Forno-Panela, como o nome sugere, a própria panela é utilizada como o reator para as operações do refino secundário, liberando o forno elétrico para a próxima corrida. Construtivamente o forno-panela compõe-se de uma abóboda de aço revestida com material refratário por onde passam os eletrodos do sistema de aquecimento, de um sistema de borbulhamento de gás inerte, comumente um plug poroso, ou por agitação eletromagnética. Este sistema possibilita manter aquecidos o aço e a escória em uma atmosfera redutora que é fundamental para a qualidade do aço. As principais operações realizadas no forno panela são:

- Desoxidação;
- Dessulfuração;
- Adição de elementos especiais;
- Correção da composição química;
- Acerto da temperatura de liberação para as próximas etapas;

Após esta operação, a panela segue, dependendo da usina, para o processo de desgaseificação a vácuo onde serão reduzidos os níveis de hidrogênio, nitrogênio e oxigênio do banho metálico.

### **VD/VOD**

Este processo desenvolve-se em equipamentos especiais que possibilitam a redução dos gases dissolvidos através da exposição do aço ao vácuo. É usado em usinas que produzem aços especiais. O objetivo de submeter o banho ao vácuo é a eliminação de gases dissolvidos principalmente o hidrogênio. As principais operações realizadas no desgaseificador são:

- Desgaseificação;
- Adição de elementos de liga;

- Correção da composição química;
- Acerto da temperatura de saída para o lingotamento.

### 2.1.1.3 Lingotamento do Aço

O aço líquido deve ser solidificado de uma forma compatível com a forma final do produto, através de duas maneiras:

- Lingotamento Convencional;
- Lingotamento Contínuo.

#### **Lingotamento Convencional**

Recebe esta denominação a forma de produção do aço mais difundida até meados do século XX. Consiste do vazamento do aço da panela diretamente em lingoteiras e mantido aí até a sua completa solidificação. A explicação para sua intensa aplicação se deve à simplicidade da operação e a um mínimo controle da temperatura de lingotamento.

#### **Lingotamento Contínuo**

O lingotamento Contínuo é a última etapa do processo de fabricação do aço. A característica básica desta operação é a solidificação contínua do aço líquido no molde em uma peça de formato mais próximo e adequado ao do produto final. A continuidade do processo é obtida pelo sequenciamento de corridas enviadas à máquina do lingotamento contínuo. O aço líquido da panela é transferido para um distribuidor e deste para os moldes dos veios. A solidificação do aço no molde possibilita a extração contínua dos tarugos ou placas.

O crescimento e o impacto do lingotamento contínuo na siderurgia se deve principalmente as seguintes características: aumento de produção, melhora do rendimento entre o aço líquido e o produto final e a melhora na qualidade do aço.

O lingotamento contínuo apresenta as seguintes vantagens sobre o lingotamento convencional:

- Facilidade de controle do processo;
- Melhor rendimento;
- Economia de energia;
- Economia de mão de obra;
- Melhoria do controle de qualidade e consistência do produto;

- Menores emissões nocivas para o ambiente e operadores;
- Redução dos níveis de estoque.

Para que estas vantagens sejam alcançadas o lingotamento contínuo requer um controle preciso dos tempos e das temperaturas ao longo de todas as etapas do processo. Este controle tem sido possível através do desenvolvimento da metalurgia da panela, do aumento da precisão da composição química, da melhoria do processo primário e da instalação de equipamentos mais modernos.

As máquinas de lingotamento contínuo são classificadas de acordo com a direção preferencial de saída do lingote do molde em:

- Vertical
- Curva
- Horizontal

Uma máquina de lingotamento contínuo é constituída dos seguintes dispositivos básicos:

*Suporte das panelas* consiste de uma torre giratória que possibilita a troca rápida das panelas com um giro de 180 graus.

*Distribuidor* é o dispositivo que recebe o aço da panela e o distribui para os veios. Tem a função de promover a flotação das inclusões, suprir o molde com um fluxo constante de aço líquido e servir de reservatório durante as trocas de panelas.

*Molde* é o local em que se dá início a solidificação do aço, o chamado resfriamento primário.

*Oscilação do molde* evita a aderência da camada solidificada ao molde. A oscilação do molde é essencial para a eliminação das perfurações do lingote.

*Resfriamento Secundário* é composto por uma câmara de sprays d'água com o objetivo de consolidar a solidificação da barra e minimizar o risco de perfurações. O desenho dos bicos de sprays e a distribuição da água desempenham um papel fundamental no controle da temperatura da superfície do veio.

*Agitação eletromagnética* é utilizada para movimentar o aço líquido no interior do molde promovendo uma solidificação mais homogênea. No agitador é gerado um campo

magnético que é transmitido para o interior do molde produzindo um movimento circular no aço.

*Barra Falsa* é um dispositivo utilizado para o início do lingotamento com a finalidade de extrair o lingote do molde, minimizar o desgaste e a deformação do molde.

### **2.1.2 O Ciclo das Painelas**

O ciclo de uma painela de aciaria é composto por uma sequência de operações que podem ser agrupadas em duas etapas: uma em que a painela contém o aço líquido e está no processo e outra em que se encontra vazia aguardando o vazamento da próxima corrida. Este ciclo típico está esquematizado na Figura 1. Neste trabalho adotar-se-á a seguinte denominação para cada fase levando-se em consideração a aciaria analisada:

Tempo com aço inicia no momento que o aço é vazado para a painela e termina quando o aço é totalmente transferido para o distribuidor no lingotamento contínuo. Compreende as seguintes etapas:

1. Vazamento do aço do FEA;
2. Forno–painela;
3. Desgaseificação a Vácuo;
4. Lingotamento contínuo.

Tempo sem aço compreende o intervalo entre o fim do esvaziamento do aço da painela no lingotamento e o próximo vazamento. Formado das seguintes etapas:

1. Manutenção e manuseio de painelas;
2. Aquecimento;
3. Espera para vazamento.



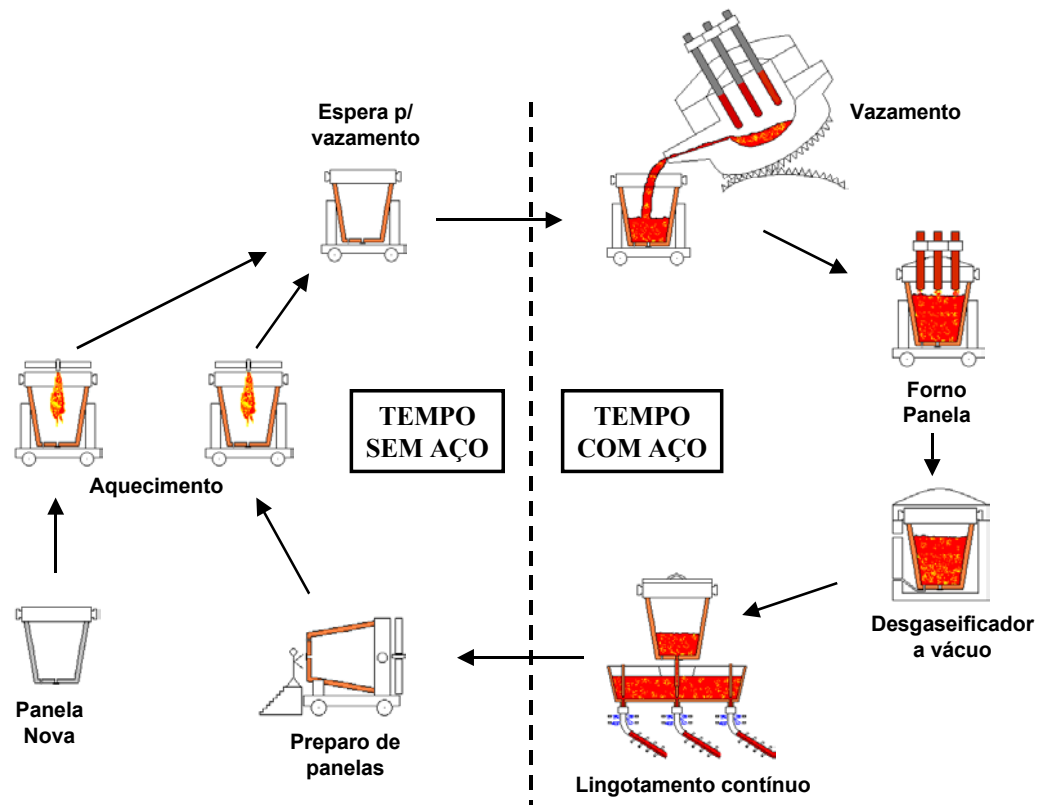


Figura 1 – Ciclo da panela de aciaria.

### 2.1.3 Perdas Térmicas na Panela

O ciclo produtivo de uma aciaria elétrica envolve várias etapas onde o aço líquido é mantido na panela ou transferido da mesma. A quantificação das perdas térmicas que ocorrem sob estas condições é de extrema importância para a otimização do processo uma vez que a temperatura do aço líquido deve satisfazer especificações rígidas em qualquer etapa do processo. O aço contido na panela apresenta duas perdas térmicas principais: a perda para o ambiente pela escória através da radiação e convecção e a perda por condução para as camadas refratárias. As perdas pela escória são de pequena variabilidade e sua influência sobre as perdas totais do aço durante o processo foram bem caracterizadas e quantificadas por SZEKELY e EVANS (1969), enquanto que as perdas para os refratários podem chegar a 80% do total das perdas e sua variação depende do estado térmico das panelas, conclusão apresentada por OMOTANI et al (1983).

O estado térmico da panela é um estado transiente caracterizado pelo quantidade de energia contida no refratário num dado instante. Assim, o estado térmico das panelas é o resultado da história térmica do ciclo da panela. A história térmica é constituída pelos repetidos aquecimentos e resfriamentos experimentados pela panela ao longo do processo. Após um número sucessivo de ciclos é atingido o que se chama estado térmico

dinamicamente permanente da panela em que o perfil de temperatura no interior do refratário se repetirá a cada ciclo. A duração destes ciclos combinados com o aquecimento antes do vazamento são os que determinam este estado. Assim, quanto maior for o tempo com aço, maior será o estado térmico da panela, pois o aço ao perder calor para o refratário está, na verdade, aquecendo-o chegando ao fim do lingotamento no seu ponto mais alto. Este tempo é determinado pela duração das etapas do processo de fabricação do aço e próprio de cada aciaria. Na prática, busca-se reduzi-lo ao máximo possível para o aumento da produtividade e diminuição da energia gasta para manter a temperatura do aço. Já, em relação ao tempo sem aço, o efeito é exatamente o inverso. Não se dispondo, nesta fase, de nenhuma fonte de calor tão eficiente quanto o próprio aço líquido, o estado térmico vai caindo gradativamente mesmo quando a panela é posta para aquecer imediatamente após o fim da manutenção, conforme os resultados apresentados por AUSTIN et al (1992). Sendo assim, um questionamento logo surge: O que e como fazer para manter o estado térmico da panela, para o próximo vazamento, o mais próximo possível daquele atingido no fim do lingotamento? Para responder esta pergunta devem ser citados alguns dos inúmeros trabalhos de pesquisa que abordaram esta questão.

OMOTANI et al (1983) apresentam as suas conclusões a respeito da melhor forma de utilização da energia envolvida no ciclo da panela:

*“O potencial para a conservação de energia e redução da queda de temperatura está relacionado com a qualidade da energia retornada ao sistema na forma de refratários aquecidos. Se esta energia reciclada é maximizada, a necessidade de pré-aquecimento por meio de uma fonte de calor externa é reduzida e ambas, temperatura e energia são conservadas. Isto pode ser realizado de duas formas. Primeiro, um retorno mais rápido da panela no ciclo reduzirá a possibilidade da perda de calor pela face quente do refratário. A segunda possibilidade é o uso de tampas sobre panelas vazias e lingotando.”*

A história térmica da panela é muito bem tratada tanto por HLINKA et al (1985) quanto TOMAZIN et al (1986) que, através de modelos matemáticos, mostraram que a história térmica afeta significativamente as perdas no vazamento do aço, durante o tempo de residência do aço na panela e no lingotamento. As diferentes condições térmicas encontradas nas panelas para vazamento devem ser compensadas via pré-aquecimento ou ajuste na

temperatura de vazamento, mas acima de tudo a melhor prática é aquela que mantém o encharque da panela.

MINION e LECKIE (1986) postularam que as perdas de temperatura do aço após o vazamento podem ser minimizadas com uma boa prática de panela quente consistindo de:

- Uma alta temperatura do refratário da panela no vazamento para reduzir a perda de calor para o refratário;
- Um refratário isolado térmicamente para reduzir a perda de calor por condução em regime estacionário;
- O uso de tampa para reduzir a perda de calor por radiação para a atmosfera.

O desenvolvimento de um sistema de tampa articulada foi o elemento chave para o sucesso desta prática pela possibilidade da tampa permanecer acoplada a panela durante todo o ciclo, exceção do vazamento. Isto garantiu uma ótima retenção da energia absorvida do aço durante o processo.

## 2.2 PANELAS NA ETAPA DE RESFRIAMENTO

Terminado o lingotamento, a panela vazia começa a resfriar continuamente e assim permanece até que ela seja colocada em aquecimento ou para vazamento. As perdas térmicas da panela para o ambiente são de tal magnitude que o efeito do estado térmico do revestimento, ao fim desta etapa, sobre as perdas de temperatura do aço nas etapas seguintes do processo precisam ser avaliadas.

### 2.2.1 Tempo sem aço

HLINKA et al (1985) utilizaram um modelo matemático para avaliar o efeito do tempo sem aço sobre a temperatura de vazamento. A Figura 2 compara o efeito do tempo de permanência da panela vazia sobre a temperatura de vazamento. Para cada variação no tempo sem aço, a temperatura de vazamento é ajustada por um valor dado pelo gráfico que resulte numa temperatura de saída do aço da panela igual àquela produzida por uma panela que é mantida por 2 hs sem aquecimento. A mesma figura mostra que o uso da tampa aumenta para 8 horas este tempo de permanência de panela vazia sem correção. Neste caso, a redução na temperatura de vazamento da panela tampada é de 19°C em relação à sem tampa.

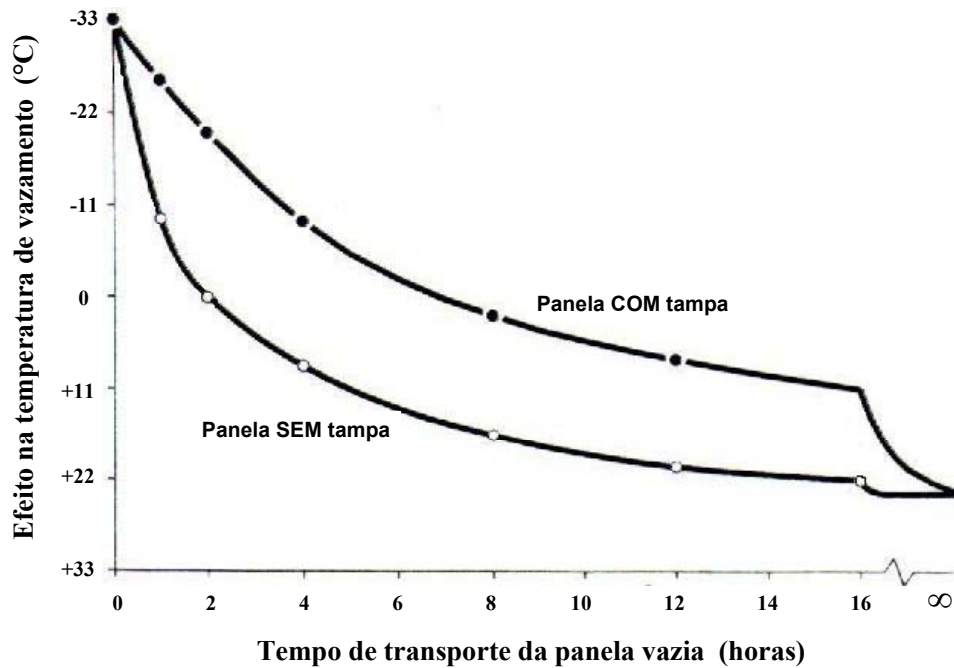


Figura 2 – Efeito na temperatura de vazamento causado pelas perdas térmicas de uma panela vazia durante o tempo sem aço para as duas situações: com tampa e sem tampa.

ADAPTADO: HLINKA, 1985, p.43

Procurando investigar a influência do tempo sem aço da panela na queda de temperatura do aço após o vazamento, Vatauvuk (1989) utilizou um modelo matemático que calculava a evolução das temperaturas e fluxos de calor no refratário de uma panela de aciaria ao longo do processo. A condição térmica da panela antes do vazamento foi avaliada por meio de uma sequência de ciclos de panela cheia e panela vazia de modo que ficasse estabelecido o regime dinamicamente permanente. Fazendo a simulação para três diferentes tempos de panela vazia, os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 3 onde se observam que um aumento deste tempo em uma hora corresponde a uma queda de temperatura do aço de 4°C. Quando o tempo sem aço passa de 2,5 horas para 3,5 horas a perda aumenta aproximadamente 2,5°C o que demonstra que a perda do estado térmico da panela vazia é altamente não linear para o tempo sem aço.

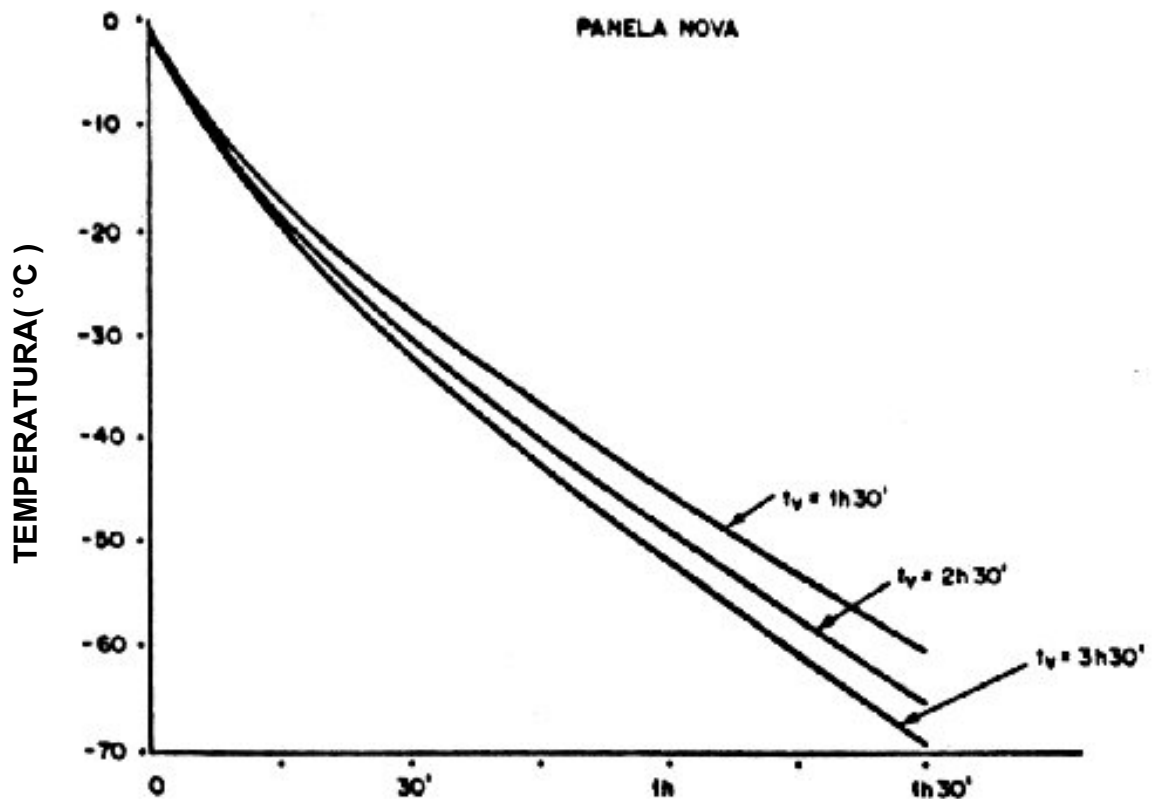


Figura 3 – Queda de temperatura do aço líquido após vazamento ( min ).

ADAPTADO: VATAVUK, 1989, p. 724

Seguindo a mesma linha de pesquisa, AUSTIN et al (1992) simulando um ciclo hipotético representativo da BHP Steel, Newcastle, Austrália, avalia o impacto do tempo sem aço (panela vazia) e do uso de tampa sobre a temperatura do aço na metade da duração do lingotamento. Os resultados, mostrados na Figura 4, são os esperados. Tempos sem aço muito longos resultam em maiores perdas térmicas da panela, causando temperaturas do metal líquido mais baixas na próxima corrida. Porém o uso da tampa, por reduzir a magnitude destas perdas, resulta numa temperatura mais alta do aço líquido para um mesmo tempo de panela vazia. Comparando este resultado com aqueles obtidos pelo uso da tampa na panela durante a etapa de tempo com aço, os autores concluem que o uso de tampa, durante o tempo sem aço, tem maior impacto sobre a temperatura do aço.

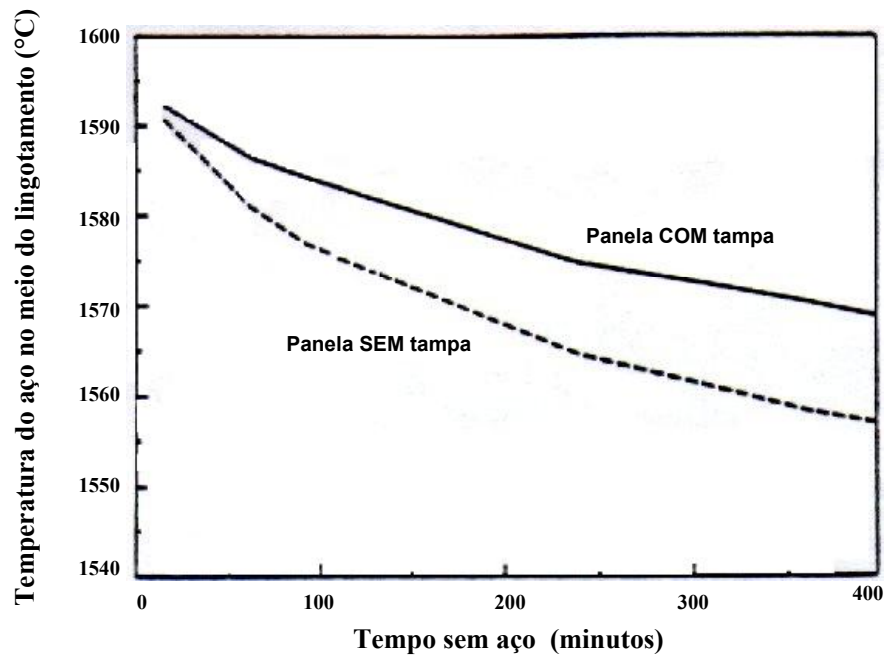


Figura 4 - Efeito do tempo sem aço e da utilização de tampa sobre a temperatura do aço na panela no meio do lingotamento.

ADAPTADO: AUSTIN, 1992, p. 322

A importância da tampa durante o tempo sem aço ficou definitivamente comprovada pelo trabalho desenvolvido por TOMAZIN et al (1986) ao estabelecerem o uso de tampa como um fator-chave para a manutenção do estado térmico de uma panela vazia. Simulando várias condições de tempo sem aço, previram que a manutenção da tampa na panela podia reduzir a perda de temperatura do aço na corrida subsequente em 15,5°C para um tempo sem aço de 60 min.

### 2.2.2 Tempos de espera

Muitos autores mencionam a importância do tempo de espera da panela na frente do forno antes do vazamento, entre eles THORILDSSON (1973) aconselha que o pré-aquecimento seja planejado de forma que possa finalizar imediatamente antes do vazamento, especialmente para altas temperaturas de aquecimento.

Num trabalho experimental para a planta da Laclede Steel, Alton, Illinois, KOPSER e KREM (1981) recomendaram que o tempo de espera não excedesse 20 minutos, limite que garantem não afetar adversamente o lingotamento.

Na Figura 5 pode-se observar o ajuste necessário na temperatura de vazamento em função do tempo de espera da panela antes do vazamento para duas temperaturas de aquecimento, 1079°C e 1166°C. TOMAZIN et al (1986) mostram que o ajuste é bastante

sensível para a temperatura real do fim do pré-aquecimento. Além disso, as variações normais deste tempo entre 10 a 20 minutos podem ocasionar variações nas quedas da temperatura do aço no fim do lingotamento entre 2,7 e 5,5°C.

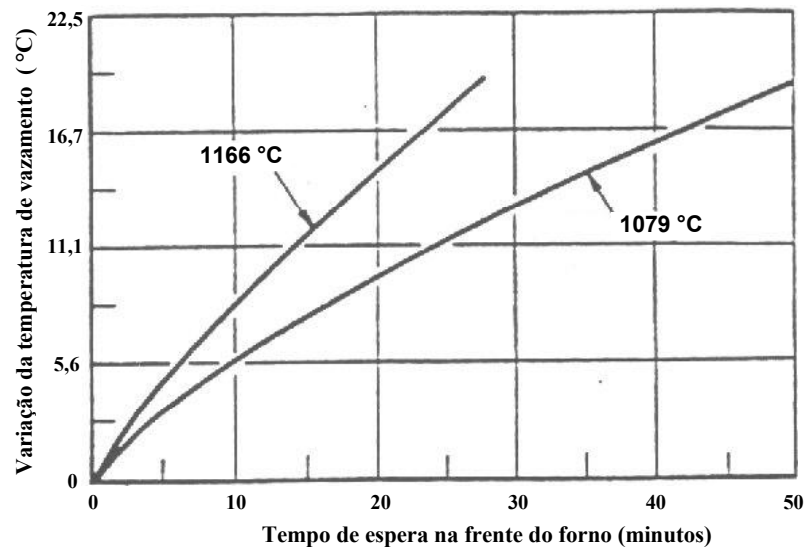


Figura 5 – O efeito do tempo de resfriamento na temperatura de vazamento para duas temperaturas diferentes de pré-aquecimento de uma panela sem tampa.

ADAPTADO: TOMAZIN, 1986, p. 227

Uma das formas de reduzir a variabilidade é o uso da tampa na panela. Na Figura 6 é mostrado o efeito da tampa (com ou sem aquecedor) no ajuste da temperatura de vazamento, nas instalações da LTV Steel em Indiana Harbor Works, USA. Por exemplo, uma panela com tampa leva 50 minutos para perder a mesma quantidade de energia que uma panela sem tampa perde em menos de 20 minutos. A tampa com aquecedor, por sua vez, é capaz de repor em menos de 20 minutos a energia perdida durante a operação de colocação da tampa.

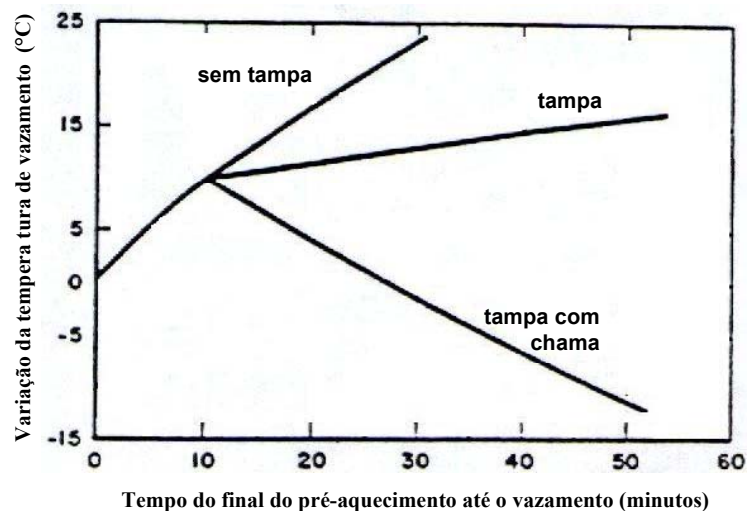


Figura 6 - Efeito da utilização de tampa (com ou sem aquecimento) no ajuste da temperatura de vazamento em função do tempo de espera na frente do forno.

ADAPTADO: TOMAZIN, 1986, p. 227

Um trabalho decisivo sobre a importância do uso da tampa na panela para a redução das perdas térmicas do aço durante o lingotamento foi apresentado por MINION e LECKIE (1986). Utilizando um modelo numérico simularam um ciclo hipotético para avaliar os efeitos da utilização de uma tampa acoplada à panela durante todo o processo. Conforme pode ser visto na Figura 7, as diferenças de temperaturas chegaram a 71 °C ao final do lingotamento, entre corridas com e sem tampa. Esta diferença caiu para 34 °C quando a comparação foi feita com corridas que tiveram aquecimento antes do vazamento.

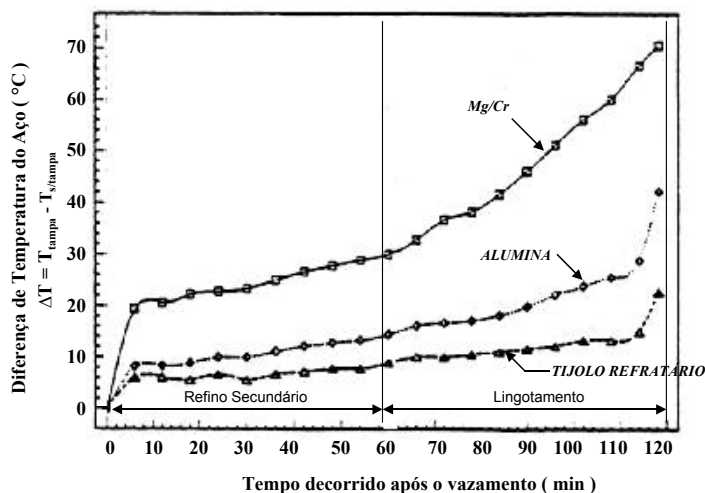


Figura 7 – Efeito da tampa articulada na diferença de temperatura do aço ao longo do processo para vários tipos de revestimentos.

ADAPTADO: MINION, 1986, p. 342

### 2.3 PANELAS NA ETAPA DE AQUECIMENTO

A grande maioria dos trabalhos sobre controle de temperatura do aço na panela faz menção da importância do aquecimento da panela antes do vazamento.

HLINKA e MILLER (1970) se utilizaram de um modelo físico em escala (água - acrílico) para determinar o efeito da temperatura de aquecimento da panela na temperatura de vazamento. O aquecimento foi simulado com água quente a diversas temperaturas durante um tempo pré-estabelecido. A Figura 8 mostra as possíveis reduções na temperatura de vazamento ( $\Delta T$ ) para várias temperaturas de aquecimento, tomando uma panela sem aquecimento como base para um  $\Delta T = 0$ ). Por exemplo, se é necessária uma temperatura de 1621°C para uma panela sem aquecimento, então, pela Figura 8, para uma panela com um aquecimento de 650°C a redução seria de 17°C, e para um aquecimento de 1537°C a redução seria de 56°C. Isto significa que, estas corridas poderiam ser vazadas a 1604°C e 1565°C, respectivamente.



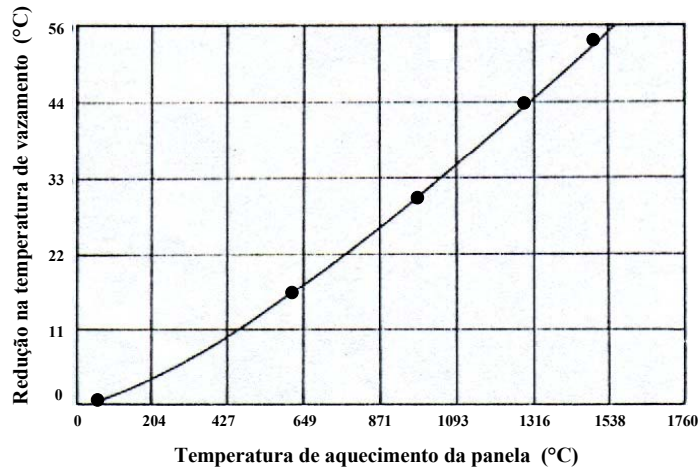


Figura 8 – Efeito do aquecimento sobre a temperatura de vazamento

ADAPTADO: HLINKA, 1970, p.128

O aquecimento da parede refratária exposta à radiação emitida pela superfície da escória em contato com o metal líquido tem uma importância significativa na redução da perda líquida de calor por radiação devido a diminuição da diferença de temperatura das superfícies. Esta conclusão foi apresentada por SZEKELY e EVANS (1969) através da formulação do problema de perda de calor por radiação da superfície do aço líquido na panela.

Também foram realizados trabalhos específicos sobre aquecimentos de panelas, como o de THORILDSSON (1973) simulando o impacto da capacidade da panela sobre a queda da temperatura do aço na panela para diferentes temperaturas de aquecimento. Conforme mostrado na Figura 9, ele recomenda que quanto menor for a panela maior devem ser as temperaturas de aquecimento.

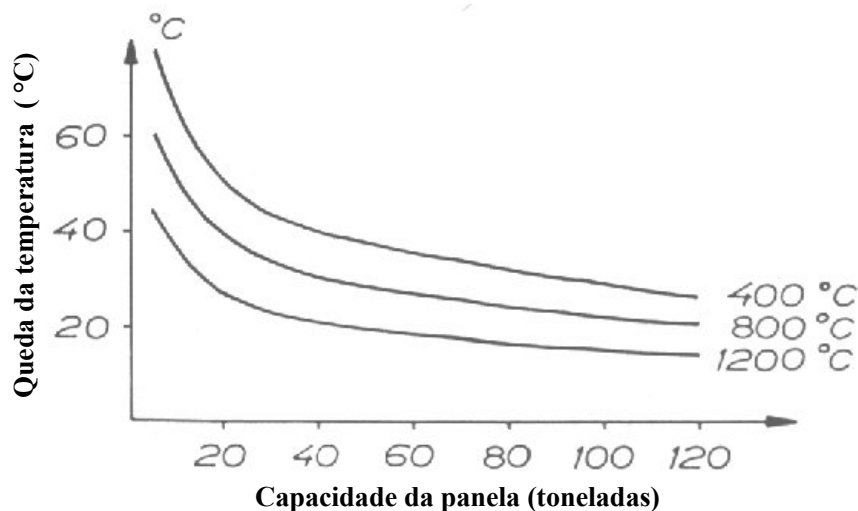


Figura 9 – Queda da temperatura do aço na panela em função da capacidade da panela, para diferentes temperaturas de aquecimento. Tempo de aquecimento: 150 minutos.

ADAPTADO: THORILDSSON, 1973, p. 279

A importância do aquecimento sobre a variabilidade da queda da temperatura do aço líquido na panela é confirmada pelos resultados obtidos por AUSTIN et al (1992). A Figura 10 apresenta a variação prevista na temperatura do aço durante uma corrida para duas situações, uma panela nova e outra no ciclo. Pode-se observar que a diferença se acentua com o passar do tempo podendo chegar a uma variação em torno de 20°C no fim do tempo com aço.

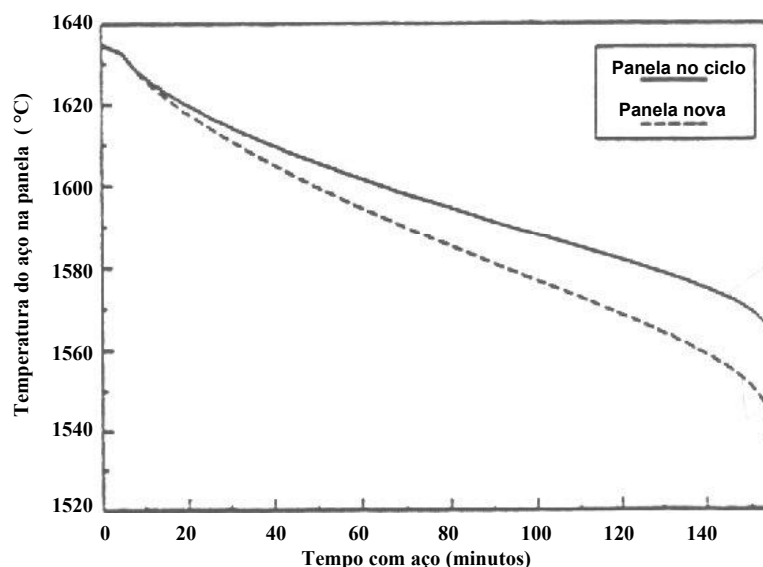


Figura 10 – Queda da temperatura do aço na panela em função do tempo para panelas nova e no ciclo.

ADAPTADO: AUSTIN, 1992, p.319

O efeito do aquecimento e a escala de rodízio das panelas em operação também aparecem no trabalho de MORROW e RUSSEL (1984). Simulando um ciclo teórico através de um modelo térmico em diferenças finitas demonstraram que o aquecimento antes da primeira corrida da panela pode resultar num acréscimo de 50°C na temperatura final do aço no lingotamento.

O impacto da utilização de novos materiais refratários, como os dolomíticos, no controle da temperatura do aço na panela, levou SAHA et al (1991) a desenvolverem um modelo matemático para a determinação de padrões de pré-aquecimento para panelas dolomíticas.

Entre os fatores que afetam o estado térmico da panela no fim do pré-aquecimento, três destacam-se como de fundamental importância:

- Potência do aquecedor;
- Temperatura de aquecimento;
- Tempo de aquecimento.

### 2.3.1 Aquecedores de Panela

Um resultado interessante sobre eficiência de aquecedores de panela de aciaria foi apresentado por BANDEIRA e LOSADA (1986), num trabalho realizado na aciaria da Aços Finos Piratini S.A, Charqueadas, Brasil. Avaliando comparativamente a performance de dois tipos de queimadores, um utilizando como combustível uma mistura de ar-óleo e o outro oxigênio-óleo, demonstraram as vantagens da mistura oxi-óleo nos seguintes pontos:

- Redução do volume dos gases de combustão pela eliminação do nitrogênio presente no ar atmosférico ( 78% em volume ) cuja presença diminui a parcela do calor disponível para o aquecimento do refratário;
- Redução da formação de CO e CO<sub>2</sub> nos gases de exaustão devido a alta reatividade do O<sub>2</sub> na combustão;
- Redução do tempo de aquecimento da ordem de 50% com o uso do queimador oxi-óleo decorrente da maior parcela de calor disponível para o aquecimento;
- Redução do custo operacional da ordem de 40%;
- Elevação do perfil de temperatura do refratário.

Uma característica dimensional dos aquecedores aparentemente pequena, porém muito importante é o “gap” entre a tampa do aquecedor, também denominado escudo, e a borda da panela. Na posta em operação de novos aquecedores, TOMAZIN et al (1986) observaram que a temperatura final do pré-aquecimento não passava dos 1000 °C quando esta distância era grande. Com a diminuição do “gap”, foram atingidas temperaturas de pré-aquecimento acima de 1200 °C. Outro efeito, observado por KOPSER e KREM (1981) em ensaios com aquecedores da Laclede Steel, Alton, Illinois, foi o aumento do consumo de combustível quando o escudo era afastado da panela. A uniformidade da temperatura dentro da panela também foi medida. Observaram variações de 27 °C para um “gap” de 25mm, chegando até uma variação de 220 °C para um “gap” de 300mm.

### 2.3.2 Temperatura da Parede Refratária

A temperatura da parede interna da panela no final do pré-aquecimento afeta significativamente as perdas térmicas do aço na etapas seguintes ao pré-aquecimento. A perda de calor por condução para a parede em contato com o aço mais a perda líquida por radiação da escória para a parede são governadas fundamentalmente pela diferença de temperatura existente. Muitos autores entre eles, SZEKELY e EVANS (1969), HLINKA e MILLER

(1970) relatam esta importância nas suas investigações conforme já mencionado no item 2.3 acima.

OMOTANI et al (1983) desenvolveram o cálculo analítico das perdas térmicas do aço na panela para um ciclo hipotético, estudando o efeito dos seguintes parâmetros operacionais: aquecimento, temperatura de vazamento e tipo de refratário. A Figura 11 mostra o efeito do aumento da temperatura do aquecimento sobre o comportamento da queda de temperatura do aço. A redução da perda com o aumento da temperatura de aquecimento é facilmente notada, sendo mais pronunciada para o caso de panelas pequenas. Para uma panela de 90 t verificou-se que um aumento da temperatura de aquecimento de 400°C para 1200°C acarreta numa diminuição da perda de aproximadamente 25°C no fim do lingotamento. A forma da curva é característica para os outros dois parâmetros analisados.

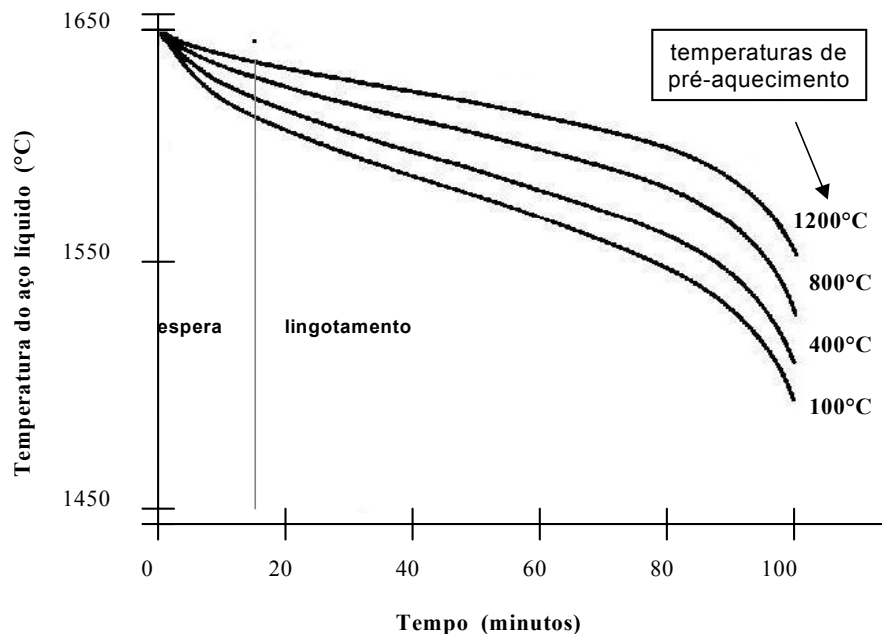


Figura 11 – Efeito da temperatura de aquecimento sobre a temperatura do aço líquido durante o ciclo.

ADAPTADO: OMOTANI, 1983, p. 33

### 2.3.3 Curvas de Aquecimento

Um aquecimento eficiente pode reduzir as necessidades de temperatura para o aço líquido em muitos graus e, como conseqüência, uma significativa redução de custos. PERKINS et al (1986) utilizando dados experimentais dos aquecimentos realizados durante o período de teste de uma panela instrumentada, correlacionaram os aumentos da temperatura média do revestimento de trabalho com a potência média aplicada expressa pela porcentagem do fluxo máximo do combustível do aquecedor. Concluíram que a taxa de aquecimento é

diretamente proporcional ao fluxo de combustível, sendo que as maiores taxas são dadas pelas curvas 70 e 74% da Figura 12. Uma curva padrão de tempo de aquecimento foi então deduzida a partir destes dados experimentais (Figura 13).

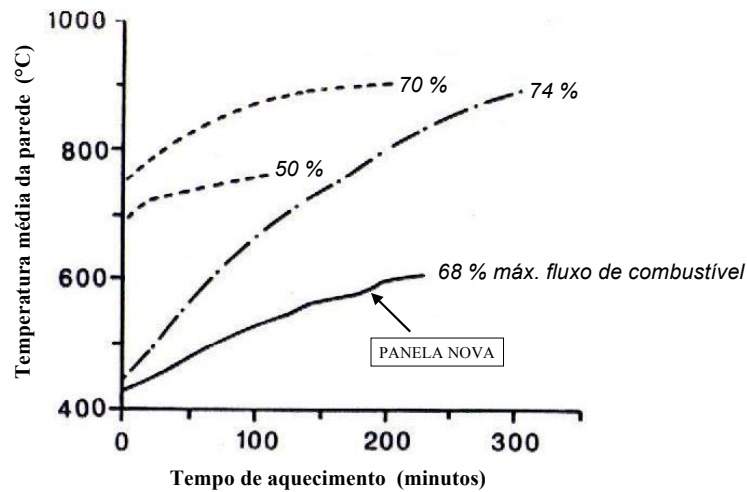


Figura 12 – Curvas de aquecimento de panela em função do fluxo de combustível (%).

ADAPTADO: PERKINS, 1986, p. 10:29

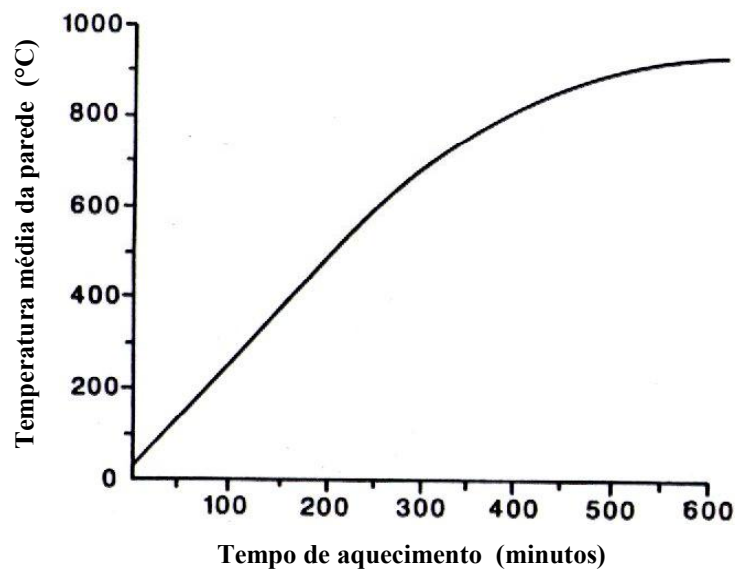


Figura 13 – Curva ideal de aquecimento: Temperatura média máxima da parede em função do tempo.

ADAPTADO: PERKINS, 1986, p. 10:29

Curvas de aquecimento específicas para cada tipo de refratário também devem ser observadas como forma de se tirar o máximo proveito das características termofísicas do material. SAHA et al (1991) prescrevem as seguintes recomendações para o aquecimento de painéis dolomíticos: (a) evitar longos períodos de aquecimentos por causa do risco de degradação do revestimento de trabalho; (b) a face quente deve ser aquecida até a temperatura de 950-1100 °C de tal forma que nas primeiras duas horas de aquecimento a temperatura da face quente aproxime-se da temperatura final e então gradualmente atinja esta no período

restante do pré-aquecimento; (c) a duração do pré-aquecimento não deve ultrapassar de 12 hs e (d) a temperatura externa da panela não deve exceder a 250 °C no fim do pré-aquecimento.

### 2.3.4 Tempo de Aquecimento

#### 2.3.4.1 Pré-aquecimento de Panela Nova e Fora do Ciclo

No mesmo estudo referido na seção 2.3, AUSTIN et al (1992) avaliaram os efeitos do pré-aquecimento no estado térmico da panela e as conseqüências nas perdas térmicas do aço. Um ciclo hipotético da panela foi simulado para um conjunto de condições de operação padrão. A Figura 14 apresenta os resultados previstos pelo modelo para a variação da energia absorvida pelo refratário de uma panela nova em função do tempo de aquecimento, para diferentes temperaturas de chama. O tempo necessário para atingir 90 % e 95 % da energia total de equilíbrio (o regime estacionário é atingido após 40h), calculado a partir do gráfico da Figura 14, é plotado contra as temperaturas de chama dos pré-aquecimentos na Figura 15.

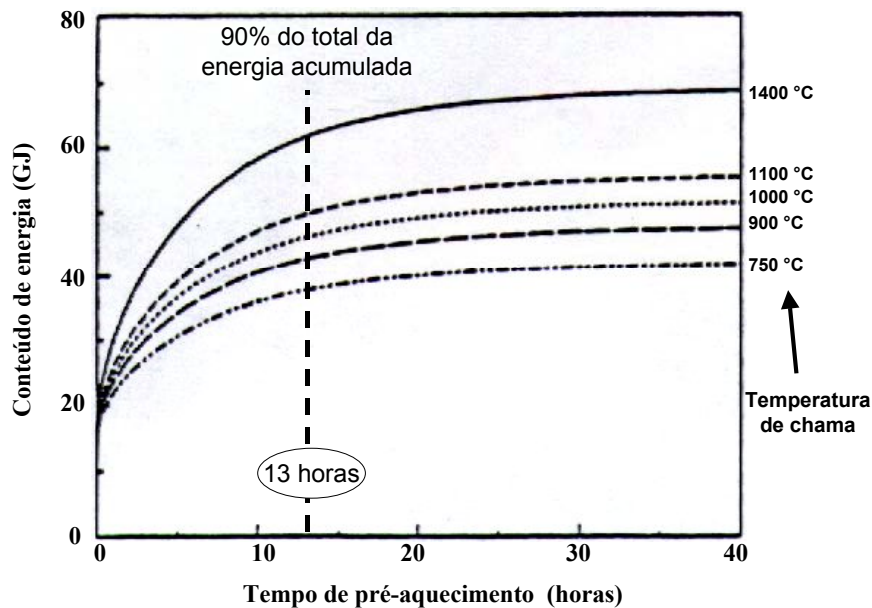


Figura 14 – Variação da energia contida na parede em função do tempo e da temperatura de chama.

ADAPTADO: AUSTIN, 1992, p. 319

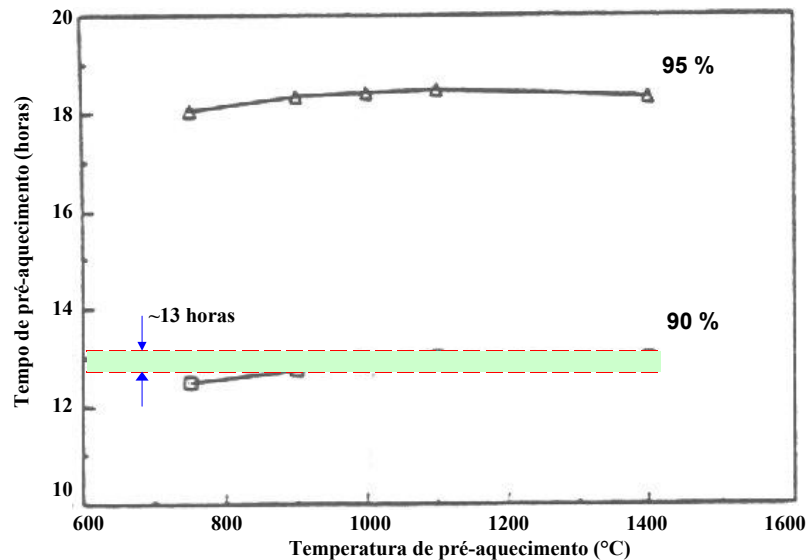


Figura 15 – Tempo para a parede atingir 90 e 95% da energia total em função da temperatura de chama.

ADAPTADO: AUSTIN, 1992, p. 319

Vê-se claramente que este tempo é de aproximadamente 13 horas para o refratário atingir os 90% da energia total e de 18,5 horas para 95%, independentemente da temperatura do aquecimento. Isto indica que a razão de encharque do refratário depende fundamentalmente do tempo e muito pouco do fluxo de calor que é promovido pela temperatura de chama. De forma inversa, para um mesmo tempo de aquecimento, quanto maior for a temperatura de chama maior será a energia armazenada pelo refratário.

A influência do tempo de aquecimento de uma panela nova sobre a variação da temperatura do aço no lingotamento para consecutivas corridas pode ser observada na Figura 16. Pode-se observar que o efeito do tempo se manifesta por várias corridas, sendo necessárias de 4 a 6 corridas, dependendo do tempo de aquecimento, para que a diferença de temperatura do aço não exceda àquela de uma panela no ciclo em 3 °C.

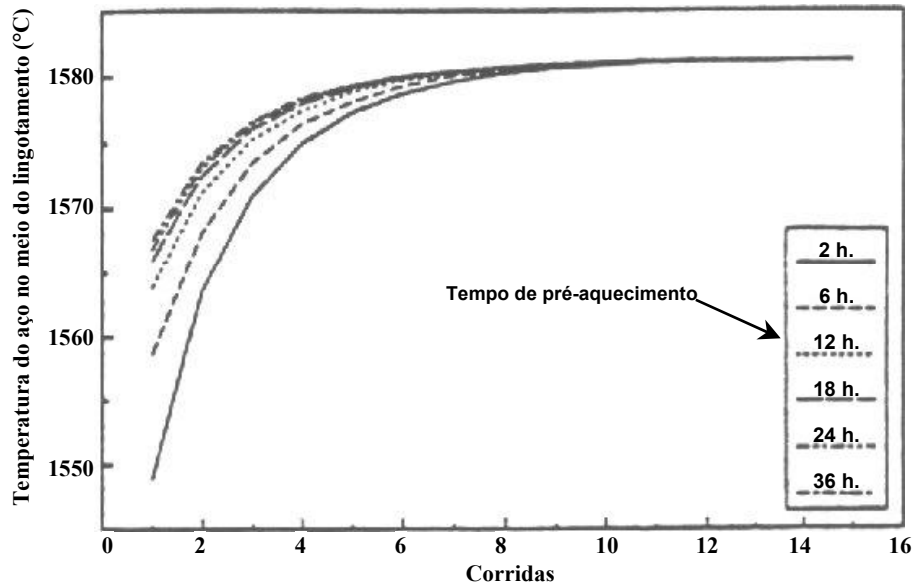


Figura 16 – Variação da temperatura do aço no lingotamento para sucessivas corridas e para vários tempos de aquecimento inicial.

ADAPTADO: AUSTIN, 1992, p. 319

Os mesmos resultados para o aquecimento de placas frias foram obtidos por TOMAZIN et al (1986). Concluem que 90% da energia total absorvida pelo refratário é atingida em 12 horas, sendo que o regime estacionário é alcançado após 17-18 horas de aquecimento. Recomendam, conforme mostra a Figura 17, um tempo mínimo de 7 horas para o alcance de 70% da energia total absorvida no estado permanente, menciona ser o mesmo critério estabelecido por SAUNDERS, citado por TOMAZIN et al (1986).

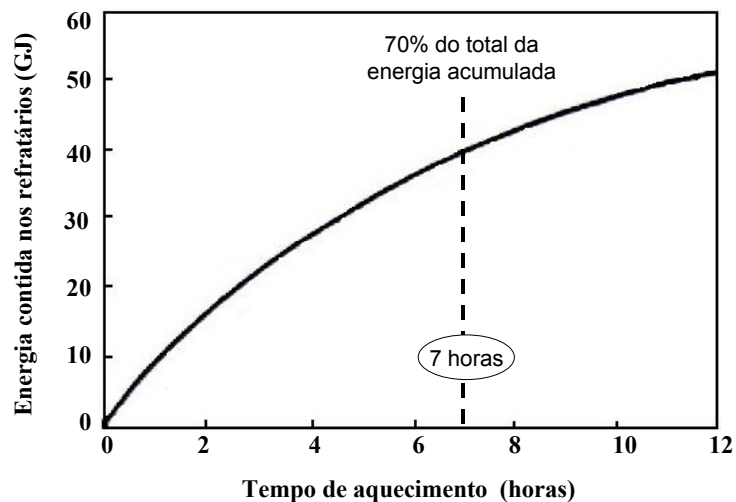


Figura 17 – Energia armazenada no refratário em função do tempo de aquecimento.

ADAPTADO: TOMAZIN, 1986, p. 227

REES et al (1987) confirmam o efeito do aquecimento de placas novas em seu estudo dos estados transientes experimentados pelas paredes refratárias nos ciclos da placa. Na



Figura 18 pode-se ver que o aquecimento de apenas 4 horas reduz pela metade a perda de calor para o primeiro ciclo.

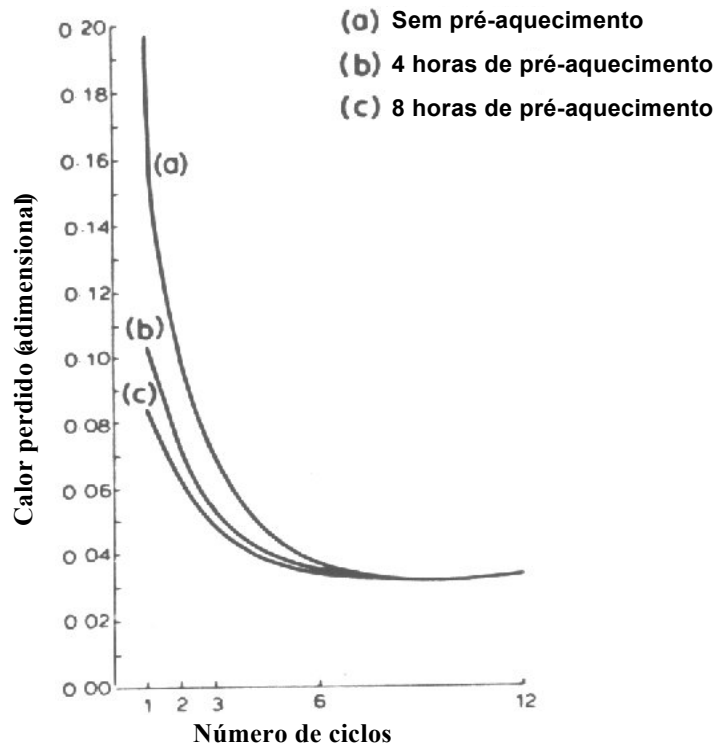


Figura 18 – O efeito do tempo de pré-aquecimento sobre a perda de calor em função do ciclo da panela.

ADAPTADO: REES, 1987, p. 136

#### 2.3.4.2 Aquecimento de Painéis no ciclo

Assim como feito para painéis frios, AUSTIN et al (1992) avaliaram o aquecimento de painéis no ciclo. A Figura 19 mostra o efeito do aquecimento sobre a temperatura de lingotamento em função do tempo sem aço do painel. Para tempos de painel vazia acima de 2,5h os resultados são os esperados. O aquecimento tende a contrapor a tendência da queda. Entretanto, para períodos curtos de painel vazia, a tendência é aparentemente reversa. Como exemplo, se um painel ficar só 30 minutos vazia qualquer aquecimento será contra produtivo, mesma conclusão mencionada por Kopser e Krem para painéis de 225 t com 45 min. de tempo de resfriamento, enquanto que após 1h de painel vazia o aquecimento de 30 min produzirá a maior temperatura no próximo lingotamento.

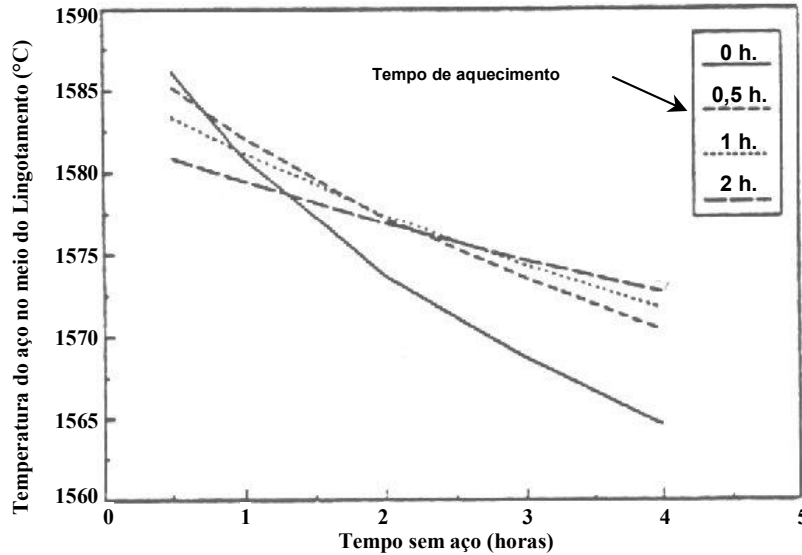


Figura 19 – Temperatura do aço em função do tempo de panela vazia e tempos de aquecimento variáveis.

ADAPTADO: AUSTIN, 1992, p. 320

A razão para esta tendência reversa é que o estado térmico do refratário próximo da superfície interna interage intensamente com o aço. A profundidade desta camada oscila entre 100-200 mm. Aquecimentos nos primeiros momentos após o lingotamento é contra-produtivo devido aos baixos gradientes térmicos entre o gás e o refratário, produzindo baixos fluxos de calor. Para um tempo sem aço curto, as camadas subjacentes à superfície estão com temperaturas ainda elevadas devido ao tempo de exposição com o aço. O aquecimento simplesmente manterá a temperatura de uma fina camada enquanto permitirá que o interior do refratário perca calor por condução para a superfície externa da panela, como pode ser visto na Figura 20. Neste caso, o aquecimento produzirá a diminuição da energia total da camada interativa, ocasionando temperaturas mais baixas no lingotamento.

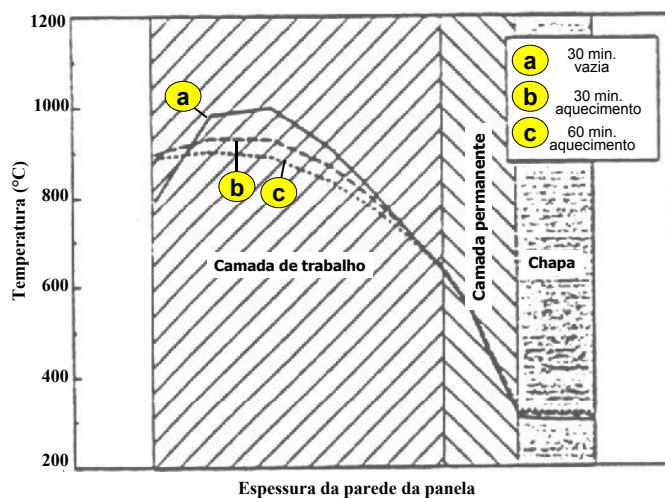


Figura 20 – Perfis de temperatura através da parede (a) após 30 minutos de panela vazia, (b) após subsequentes 30 minutos de pré-aquecimento, e (c) após 1 hora de pré-aquecimento.

ADAPTADO: AUSTIN, 1992, p. 320

## 2.4 PADRÕES OPERACIONAIS

Os esforços na direção de se estabelecer o melhor critério de escala de panela dependem de características particulares de cada processo e dos próprios fatores associados que mais afetam o estado térmico da panela. Os critérios descritos por PERKINS et al (1986) para o estabelecimento das condições necessárias para a padronização operacional de panelas do ciclo é:

- Utilizar um número mínimo de panelas no ciclo operando continuamente no processo, utilizando assim, a considerável capacidade de armazenamento de calor do revestimento da panela para a manutenção da temperatura do aço durante o lingotamento.
- O fornecimento de panelas quentes no ciclo deve ser suplementado por um sistema de aquecimento.
- Uma estratégia prática de gerenciamento de panelas deve se basear em regras que estabeleçam o intervalo de tempo máximo que a panela pode permanecer vazia antes da reutilização e o tempo mínimo de aquecimento necessário para restabelecer o estado térmico da panela que ficou vazia por muito tempo.

PERKINS et al (1986) estabeleceram que a formulação de tais regras poderia ser realizada pela consideração do estado térmico do revestimento da panela para estágios relevantes do processo. Assim, decidiram instrumentar uma panela e medir as temperaturas do refratário da panela nas condições reais de processo da usina de Lackenby da British Steel Corporation. O indicador utilizado para avaliação do estado térmico da panela foi a temperatura média do revestimento de trabalho da parede lateral. A Figura 21 mostra a curva de resfriamento da panela em função do tempo transcorrido a partir do fim do lingotamento. Esta curva foi gerada a partir das taxas médias de resfriamento medidas nos testes.

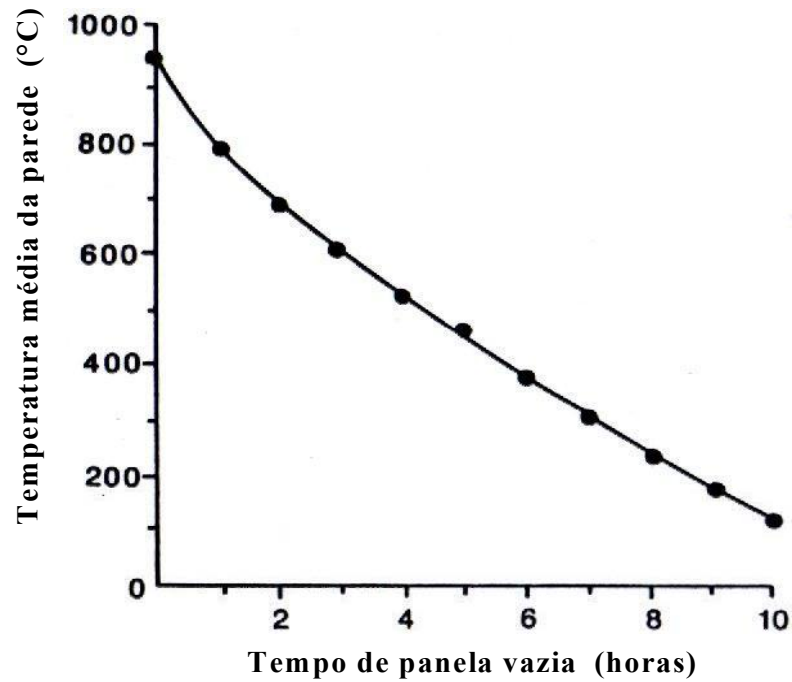


Figura 21 – Curva de resfriamento do refratário em função do tempo de panela vazia.

ADAPTADO: PERKINS, 1986, p. 10:28

Observaram também, a influência do fluxo de combustível dos queimadores nas taxas de aquecimento da parede refratária conforme já mencionado na seção 2.3.3 Curvas de Aquecimento. Usando estas curvas de resfriamento e aquecimento obtidas experimentalmente, PERKINS et al (1986) estabeleceram as regras de aquecimento. As curvas da Figura 22 mostram o tempo de aquecimento mínimo necessário em função do tempo sem aço a partir do fim do lingotamento para três níveis de temperatura do revestimento no momento do vazamento, nominalmente: 650, 700, e 750°C.

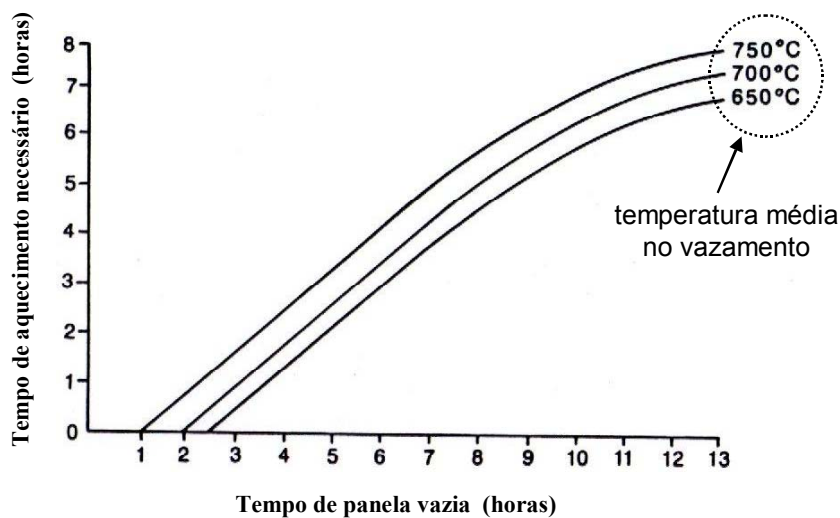


Figura 22 – Tempo de aquecimento necessário em função do tempo sem aço para três temperaturas médias de panela no vazamento.

ADAPTADO: PERKINS, 1986, p.10:29

As intercepções com o eixo x são os tempos de resfriamento máximos permitidos que uma panela pode ficar sem necessitar de aquecimento. Este tempo foi reduzido de 4 horas (padrão antigo) para o máximo de 2,5 horas. Encontraram dificuldade para aplicar este procedimento no sistema vigente de manuseio de panelas da usina. Foi necessário o desenvolvimento de um programa de computador para auxiliar a programação das panelas. O programa permitia o armazenamento e apresentação das informações das fases do processo ocorridas com cada panela em serviço. O programa calculava a condição térmica da panela baseado na temperatura média do revestimento da parede e o valor calculado é expresso por um código de condição que vai de 1 (quente) a 7 (frio). Os resultados, obtidos no período de duas semanas de testes, indicaram um bom desempenho do programa sendo que mais de 60% das panelas utilizadas tinham o código de condição 1. PERKINS et al (1986) comentam que o teste serviu para mostrar algumas deficiências na aplicação do programa que deveriam ser melhoradas.

TOMAZIN et al (1986) empenharam-se na determinação das causas da alta variabilidade das perdas térmicas do aço na panela das usinas de Aliquippa e Indiana Harbor, E.U.A., após a mudança do material refratário para tijolos de alto teor de alumina. Para tanto, a estratégia adotada foi a instrumentação de uma panela com termopares para a medição das temperaturas do refratário da parede durante todo o ciclo. Estes dados serviram tanto para definir padrões de aquecimento de panelas novas e usadas como para a calibração de um modelo computacional para a definição de condição térmica de panela para vazamento. Concluíram que, para a determinação do estado térmico seria necessário o conhecimento das temperaturas de face quente e fria da parede e o tempo sem aço a partir do fim do lingotamento, além das seguintes informações, consideradas como constantes, para uma dada instalação:

- Capacidade de aquecimento do aquecedor;
- “Gap” entre a borda e a tampa do queimador;
- Tempo de espera para vazamento;
- Tempo com aço do processo;
- Tempo de lingotamento;
- Uso de tampa durante e após lingotamento.

Com os dados e suposições acima, desenvolveram o padrão de compensação da temperatura de vazamento para cada condição térmica da panela antes do vazamento, conforme mostra a Figura 23. Estas relações também foram colocadas em forma de tabela. TOMAZIN et al (1986) comentaram que a aplicação prática do padrão apresentou uma

dificuldade operacional bastante crítica para a sua precisão: o momento e o ponto correto da medição da temperatura da face quente após o aquecimento no momento do vazamento. A existência de um relativo gradiente de temperatura entre a parte superior e inferior da parede, a partir do fim do aquecimento que se acentua a medida que o tempo passa. Isto pode ocasionar diferenças consideráveis na aplicação do padrão em relação a temperatura correta de vazamento. Sendo assim, a forma correta é medir a temperatura imediatamente após o fim do aquecimento e sempre na mesma altura da parede interna. Os resultados da aplicação deste padrão foram a diminuição significativa de corridas frias e um índice de 85-90% de corridas com temperaturas de saída da estação de tratamento entre  $\pm 5,5^{\circ}\text{C}$  da temperatura objetivada. TOMAZIN et al (1986) concluíram dizendo que este desempenho comprova a melhoria do gerenciamento das panelas bem como o melhor entendimento dos efeitos térmicos envolvidos.

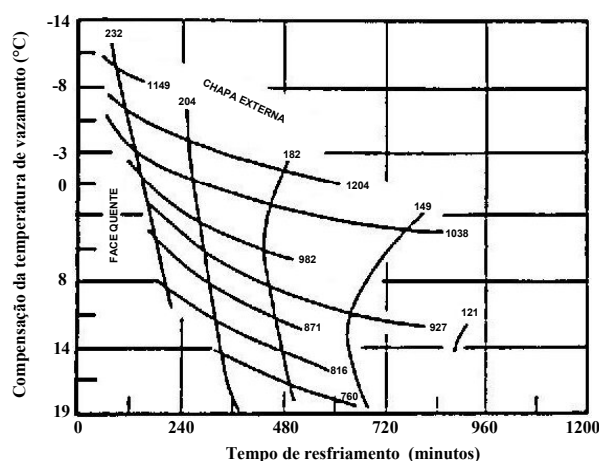


Figura 23 – Compensação da temperatura de vazamento em função da temperatura de face quente, fria, e do tempo de resfriamento da panela

ADAPTADO: TOMAZIN, 1986, p. 228

Com o objetivo de produzir aços com melhores propriedades metalúrgicas na aciaria LD da Tata Steel, Jamshedpur, Índia, todas as panelas revestidas com alumina foram gradualmente convertidas para panelas dolomíticas. A mudança exigiu um novo programa de pré-aquecimento específico para panelas novas, como também para as panelas em circulação. Os requisitos básicos para o pré-aquecimento de revestimento dolomítico são aqueles já mencionados por SAHA et al (1991) na 2.3.3 acima - Curvas de aquecimento. Para atender estes requisitos foi desenvolvido um modelo matemático que prevê as temperaturas dentro do refratário durante o pré-aquecimento para vários combustíveis, taxas de consumo de combustível, e configurações de refratário. O modelo foi aplicado para panelas dolomíticas de 140t aquecidas horizontalmente. Os cálculos foram realizados para algumas taxas de combustíveis típicas e para dois valores diferentes de eficiência de combustão aparente, 75 e

87%. SAHA et al (1991) concluíram que os valores calculados para a eficiência de combustão de 75% eram 15% acima daqueles reais medidos na planta. O tempo disponível para pré-aquecimento das panelas no ciclo era normalmente curto, aproximadamente 1 hora. A condição térmica adotada para a panela no início do aquecimento foi 600°C para a face quente e 230°C para a superfície externa. A temperatura final da face quente deveria alcançar 1000°C no intervalo desta 1 hora.

Os resultados das simulações permitiram a SAHA et al (1991) definirem as condições de aquecimento necessárias para o atendimento dos requisitos de panelas dolomíticas, abaixo resumidas e mostradas na Figura 24:

1. panelas novas podem ser adequadamente pré-aquecidas por um aquecimento com gás de coqueria (coke oven gas-COG) à razão de  $600 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$  por 12 horas sem pré-aquecimento do ar; para reduzir o tempo de aquecimento, o fluxo de gás pode ser aumentado ou utilizado óleo como combustível auxiliar.
2. panelas no ciclo, que ao chegarem no aquecimento tenham a condição térmica inicial anteriormente citada, atingirão temperaturas de face quente de aproximadamente 1125°C:

(a) em 75 minutos com uma taxa de consumo de combustível de  $300 \text{ l óleo diesel leve (light diesel oil-LDO) h}^{-1}$  junto com  $400 \text{ Nm}^3 \text{ COG h}^{-1}$  sem qualquer aquecimento do ar;

(b) em 50 min com  $300 \text{ l LDO h}^{-1}$  junto com  $400 \text{ Nm}^3 \text{ COG h}^{-1}$  com ar aquecido a 200°C;

(c) em aproximadamente 45 min se  $300 \text{ l LDO h}^{-1}$  é usado junto com  $400 \text{ Nm}^3 \text{ COG h}^{-1}$  com ar a 400°C.

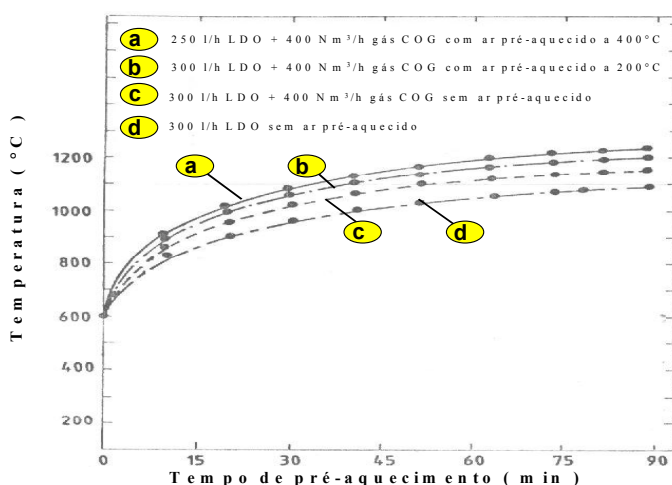


Figura 24 – Variação da temperatura de face quente de uma panela em circulação, em função do tempo para diferentes relações de combustível.

Finalmente, SAHA et al (1991) concluíram que medidas de temperaturas da panela para vários pontos na aciaria LD confirmaram que as previsões do modelo se ajustaram muito bem aos valores reais.

Recentemente, FERREIRA (2000) apresentou uma metodologia que estabelece regras para a padronização da operação de aquecimento de panelas para a aciaria da Aços Finos Piratini do Grupo Gerdau. O método teve como objetivo avaliar o estado térmico da panela ao longo do processo, para isso, foi definido um parâmetro adimensional que expressa o conteúdo de energia armazenado na parede da panela, denominado **índice de encharque IE**. O índice de encharque é o resultado dos tempos de resfriamento e aquecimento que a panela experimenta no seu ciclo. Através de dados estatísticos das condições operacionais existentes foi estabelecido o índice de encharque prático ideal para a entrada de panelas na operação. Um modelo matemático simplificado do ciclo completo da panela permitiu o desenvolvimento das curvas de aquecimento versus resfriamento para vários índices, como mostra a Figura 25, possibilitando a definição de um padrão operacional.

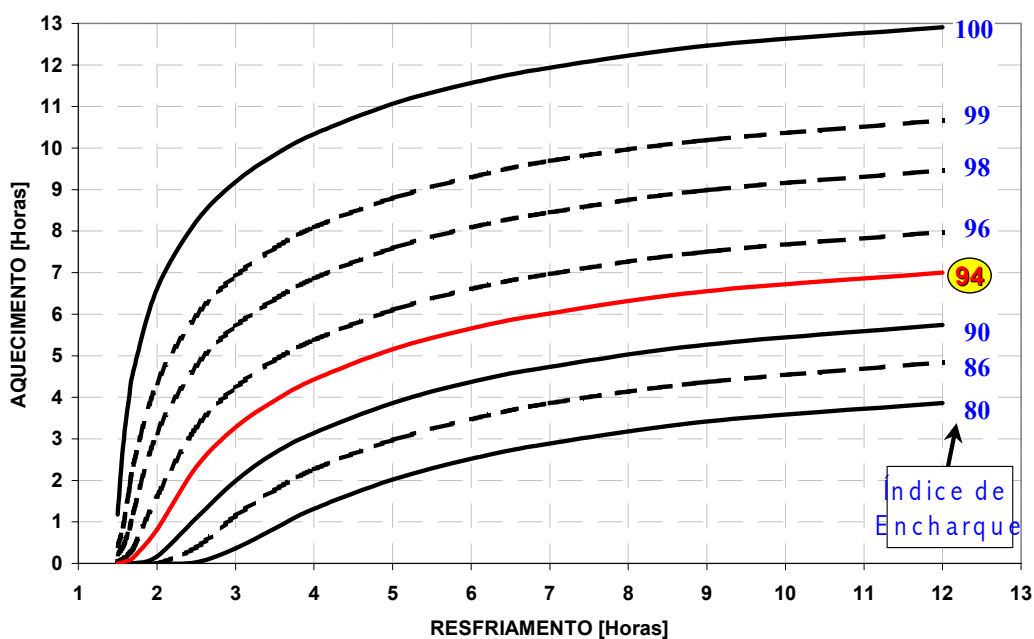


Figura 25 – Relação entre o tempo de resfriamento e o posterior aquecimento para atingir-se diferentes IEs.

ADAPTADO: FERREIRA, 2000, p. 96

## 2.5 NOVAS TECNOLOGIAS DE AQUECIMENTO

Com o advento do lingotamento contínuo e de novos revestimentos refratários resistentes as altas temperaturas, o aquecimento de panela deixou de ser considerado um



processo de combustão de baixa temperatura. Diversos fabricantes de aquecedores começaram pesquisas no sentido de tirar proveito desta nova característica dos refratários. O objetivo foi o de aumentar a temperatura e a taxa de aquecimento através do enriquecimento da mistura com a injeção de oxigênio, queimadores projetados especificamente para o uso de 100% de O<sub>2</sub>, e o desenvolvimento de novas tecnologias de aquecimento.

O aquecimento de panelas é uma operação usual na indústria siderúrgica. O objetivo do aquecimento de panelas é elevar uniformemente a temperatura do revestimento até um certo nível. A maximização da produtividade será alcançada se o aquecimento for realizado rapidamente e com a preservação da integridade do refratário.

A necessidade de se dispor destas características levou os fabricantes a pesquisar novas tecnologias de aquecimento que possibilitassem o aumento da temperatura de chama e da eficiência de aquecimento.

Uma das primeiras linhas adotadas foi o enriquecimento da mistura ar-combustível com O<sub>2</sub>. O trabalho de SMUCKER et al (1988) apresenta os resultados do desenvolvimento de um queimador especialmente projetado para uso de oxigênio na mistura. A propriedade inerente desta combustão é a alta temperatura de chama produzida o que aumenta o gradiente em relação a parede e o potencial de troca de calor para os três modos de transferência de calor: radiação, convecção e condução. A Figura 26 apresenta o efeito do enriquecimento do O<sub>2</sub> na temperatura de chama. Enquanto que para a convecção e condução a transferência de calor é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura, na radiação as temperaturas são elevadas a quarta potência o que dá significativa importância a maximização da temperatura de chama.

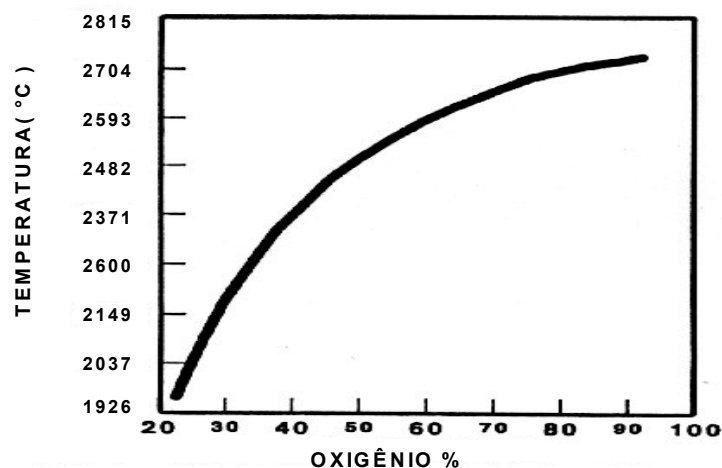


Figura 26 – Efeito do enriquecimento com oxigênio sobre a temperatura da chama.

ADAPTADO: SCHMUCKER, 1988, p. 184.

A aplicação deste novo queimador possibilitou os seguintes benefícios:

1. Rápidos aquecimentos;
2. Economia de combustível de até 70%;
3. Diminuição do volume de gases de exaustão em 90%;
4. Redução da manutenção;
5. Fundos de panelas mais quentes.

Semelhantes resultados foram apresentados por BATTLES (1981) e FERNANDEZ (1979) em seu trabalho com aquecimento de panelas num programa de pesquisa em parceria com instituições de pesquisa e a companhia de distribuição de gás local. O novo sistema de aquecimento provou ser 56% mais eficiente que o sistema de aquecimento convencional. As características principais que diferenciam estes dois sistemas são:

1. Selagem da tampa com a panela. Não há perda de calor pois não há frestas. Aquecimento homogêneo.
2. Potência do queimador consideravelmente menor que o convencional devido ao uso de pré-aquecedor de ar e selagem da tampa.
3. Redução do consumo de combustível de 60 a 80%.
4. Retorno do investimento em menos de um ano.
5. Sistema de recuperação de calor perdido através de trocador de calor e selagem da panela.
6. Potencial para significativa redução em reparos do refratário e abaixamento da temperatura de vazamento devido ao aquecimento uniforme da panela a altas temperaturas.

A vantagem do queimador a 100% de O<sub>2</sub> é de aumentar consideravelmente o calor disponível para o aquecimento pela redução ou eliminação do nitrogênio no processo de combustão, o que representa uma redução de 75% do volume dos gases produzidos em relação ao sistema convencional ar-óleo e 50% do consumo de combustível em aplicações de aquecimento de panela. Resultados semelhantes também relatados nas pesquisas de ARMOUR e al (1994) sobre a substituição do sistema convencional por aquecedores a oxigênio.

As pesquisas também se voltaram para o uso da energia elétrica que é outra fonte de energia concentrada que apesar de ser mais nobre possibilita alta eficiência devido a alta

temperatura obtida. A energia elétrica é transformada em energia calorífica pelo **efeito Joule** numa resistência elétrica ou pela geração de radiação eletromagnética na faixa do microondas.

Devido a magnitude da potência exigida para aquecimento de panelas de aciaria, o desenvolvimento destes aquecedores exigiu a formação de parcerias entre os fabricantes, instituições de pesquisa e as companhias de distribuição de energia.

A parte das dificuldades tecnológicas ainda presentes o potencial e vantagens do aquecimento elétrico sobre o óleo combustível são grandes, assim enumeradas por HENSLER e al (1987) após os testes operacionais de um aquecedor elétrico da Copperweld Steel Company, Ohio:

1. O aquecimento elétrico consome apenas 30% da energia utilizada pelo aquecedor a gás.
2. A eficiência térmica do aquecedor elétrico é da ordem de 70 a 80%, enquanto do aquecedor a gás é menor do que 25%.
3. Maior controle da temperatura de cura nas operações de aquecimento de panelas novas
4. Menor ruído.
5. Menor poluição
6. Menor umidade aprisionada no refratário proveniente dos gases da combustão que afetam a qualidade do aço lingotado.
7. Temperaturas de parede refratária podem atingir até 2400°C.

Nos últimos 5 anos iniciaram-se investigações sobre o uso da radiação por microondas para o aquecimento de refratário de panela. Os resultados mostraram que o microondas pode ser um método eficiente e uniforme de aquecimento do refratário.

O trabalho de investigação de DURANCE e al (1995) mostrou que a radiação por microondas aquecia muito bem panelas com revestimento aluminoso. Porém, o mecanismo de aquecimento é complexo e fortemente dependente das propriedades do refratário. Adições de quantidades de material que absorvam este tipo de radiação podem melhorar significativamente a capacidade térmica do refratário. A maior dificuldade reside em determinar a quantidade e o tamanho ótimos que resultem na melhor propriedade físico-química do refratário, bem como num material homogêneo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritas as técnicas e métodos utilizados para a avaliação das variáveis de processo que afetam o estado térmico das panelas, dentro de uma aciaria elétrica.

#### 3.1 AVALIAÇÃO E MELHORIAS DOS AQUECEDORES DE PANELA

##### 3.1.1 Aquecedores

A aciaria dispõe de cinco aquecedores para o aquecimento das panelas em operação, para a secagem e aquecimento de panelas novas e o aquecimento de panelas frias (fora do ciclo). Três destes aquecedores são do tipo horizontal com queimadores a óleo combustível (BPF- Baixo Ponto de Fulgor) com controle de chama manual, denominados aquecedores A, B, C e dois aquecedores verticais a gás GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) com controle automático de chama, os aquecedores D e E. Os dois aquecedores verticais são novos e foram instalados no final de 1997.

As características técnicas dos aquecedores utilizados são apresentados a seguir:

Tabela 1 – Especificações Técnicas dos Aquecedores avaliados.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	HORIZONTAL	VERTICAL
FABRICANTE	-----	Konus Icesa
POTÊNCIA NOMINAL (kW)	1000	1350
COMBUSTÍVEL	Óleo BPF	Gás GLP
COMBURENTE	Oxigênio	Ar soprado
TEMPERATURA MÁXIMA OPER ( C)	1750	1200
CONSUMO (kg/h)	125	----
CONTROLE	Manual	Automático

O arranjo físico dos equipamentos está mostrado na Figura 27. A disposição alinhada dos aquecedores possibilita a movimentação das panelas entre duas áreas adjacentes; a área de produção e a área do lingotamento convencional por meio das respectivas pontes rolantes. O aquecedor vertical E está instalado em frente ao forno elétrico. Esta posição permite que a

panela da próxima corrida seja aquecida no próprio carro de vazamento e mantida assim até momentos antes do vazamento. O aquecedor vertical D tem múltiplas funções; é utilizado para a secagem e aquecimento de painéis novas e recuperadas, e para manter em aquecimento painéis reservas (ou mesmo àquelas no ciclo). Este aquecedor possui um sistema automático de controle constituído de um controlador dedicado que possibilita executar as operações tanto de secagem como de aquecimento segundo curvas preestabelecidas através da variação da potência da chama e da regulagem da vazão de ar auxiliar.

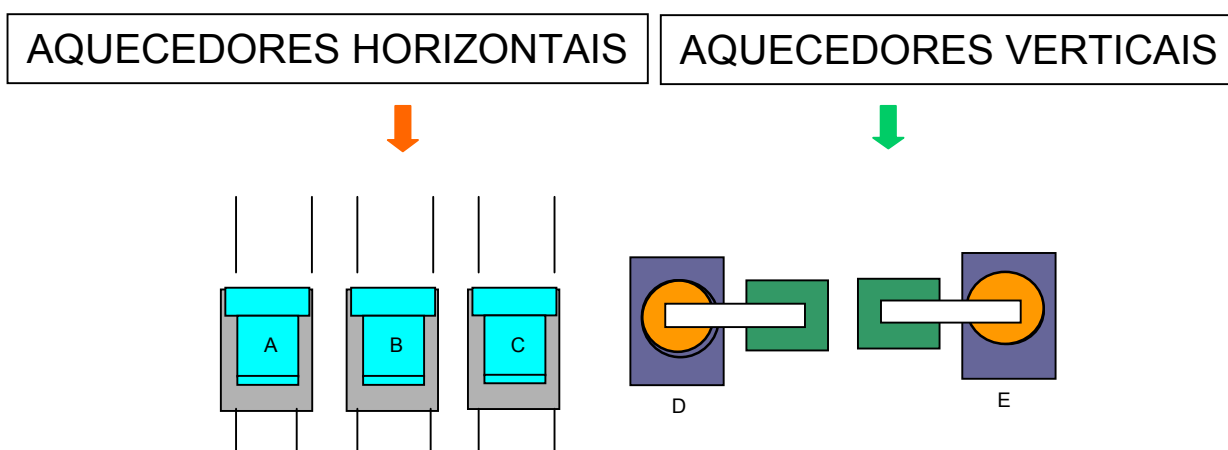


Figura 27 – Vista Superior dos aquecedores de painéis da aciaria.

A rotina de manuseio das painéis em operação estabelece que ao final de cada lingotamento, a painel volta para a área de manutenção para ser inspecionada e preparada para o próximo vazamento. A manutenção sempre é realizada com a painel deitada sobre as plataformas dos aquecedores horizontais. Terminada a manutenção, o aquecimento da painel pode ocorrer de duas formas: (1) imediatamente aquecida nestes aquecedores ou (2) transferida para o carro de vazamento e aquecida no aquecedor vertical na frente do forno. Devido a estas duas possibilidades de aquecimento, surgiram as seguintes questões: Existem diferenças de aquecimento entre os aquecedores? Qual a melhor prática sob o ponto de vista de diminuir as diferenças (variabilidade) do encharque das painéis nos vazamentos?

Para responder estas questões foram realizados ensaios de aquecimento com painéis instrumentadas através da instalação de termopares no interior das camadas refratárias e a utilização da técnica da termografia.

Uma forma prática de avaliar comparativamente a eficiência de aquecedores é através da medição do aumento da temperatura interna do revestimento refratário durante o aquecimento. A quantidade de energia absorvida, calculada pela temperatura média do

refratário, é um bom indicador da eficiência de um aquecedor. Outra característica importante de se avaliar nos aquecedores é a homogeneidade das temperaturas da face interna da parede. Diferenças muito grandes de temperatura na parede do refratário podem ocasionar queda de parte da parede em contato com o aço por choque térmico ou a formação de cascão. A capacidade do aquecedor vertical de executar a função de secagem foi também avaliada através de ensaios com painéis instrumentados.

### 3.1.2 Painéis Utilizadas e Instrumentação

As painéis da aciaria estudada tinham capacidade para 50 t de aço, fabricadas em aço carbono ou aço inoxidável, cilíndricas com diâmetro externo de 2600 mm e altura total de 4273 mm. As dimensões e outros detalhes da montagem da parede podem ser vistos na Figura 28.

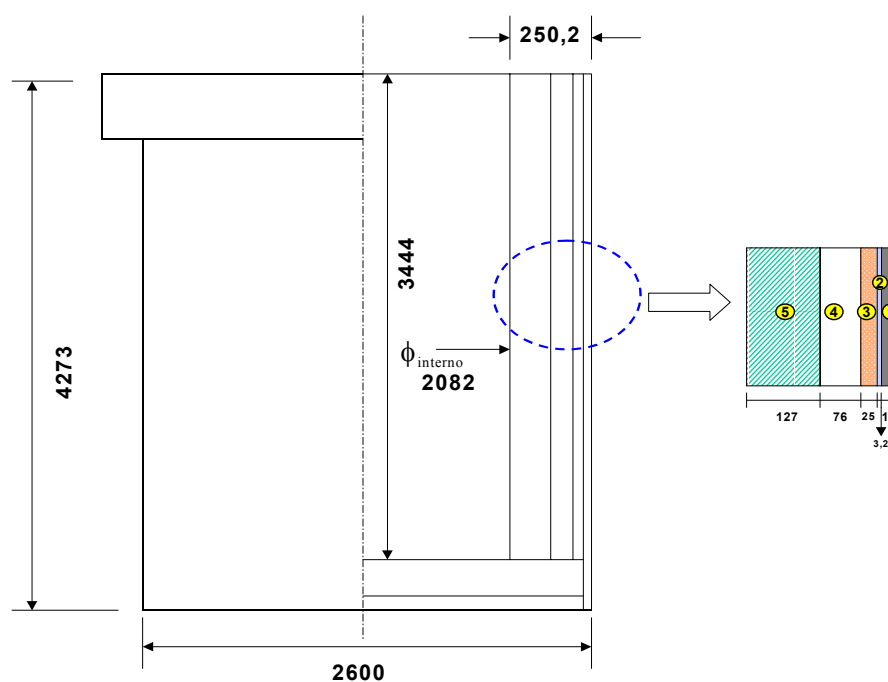


Figura 28 – Desenho esquemático da parede e detalhe da disposição do refratário.

Tabela 2 – Especificações Técnicas dos materiais da Parede da Painel.

ÍTEM	DENOMINAÇÃO	MATERIAL	COMPOSIÇÃO QUÍMICA
1	Chapa metálica	Aço	Fe - C
2	Isolante	Papel Fibra Cerâmica	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (47%) + SiO <sub>2</sub> (53%)
3	Revestimento de Segurança	Aluminoso	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (61%) + SiO <sub>2</sub> (33%)
4	Revestimento Permanente	Aluminoso	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (70%) + SiO <sub>2</sub> (25%)
5	Revestimento de Trabalho	Dolomítico	CaO (59%) + MgO (38%)

A definição do número de termopares bem como de suas posições foi de ordem prática e visou atender tanto a parte de segurança de operação da panela quanto a parte qualitativa que é de se saber a temperatura de pelo menos um ponto de cada camada refratária. Assim a disposição dos termopares foi radial, a partir da chapa de aço externa, com a profundidade máxima chegando um pouco além da metade da espessura da parede.

Três panelas foram instrumentadas utilizando-se termopares do tipo K posicionados, conforme mostrado na Figura 29 a meia altura da coluna de aço. As temperaturas foram medidas utilizando-se um termômetro digital marca MINIPA modelo MT-520 e posteriormente um registrador digital marca EUROTHERM CHESSELL modelo 4100G durante as etapas de secagem e aquecimento das panelas em ambos os aquecedores horizontal e vertical. Foram comparadas as temperaturas das camadas refratárias calculadas a partir da média das temperaturas T1, T2 e T3.

Duas outras panelas foram instrumentadas com termopares fixados na parede interna, dispostos conforme mostrado na Figura 30, especificamente para a avaliação da curva de secagem. Foram comparadas as temperaturas da parede calculadas a partir da média das temperaturas T5, T6 e T7 para um ensaio e somente um ponto T4 para o outro. Consta na Tabela 3 a designação dos ensaios realizados com secagem e aquecimento de panela e os respectivos aquecedores utilizados.

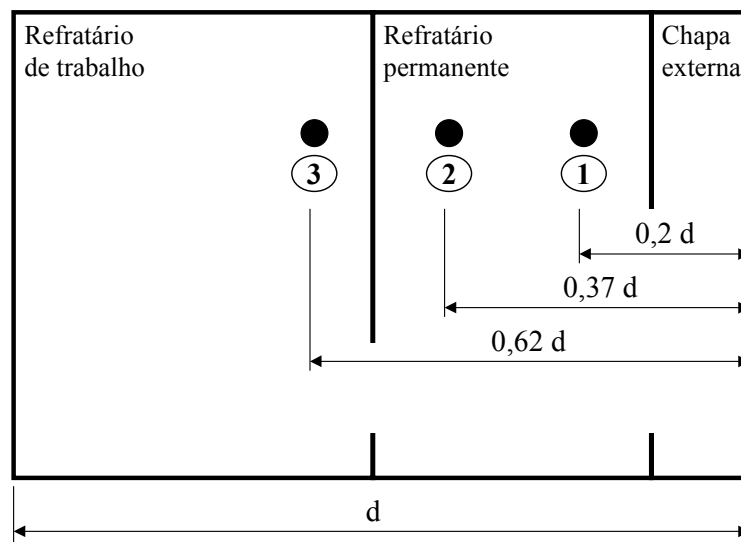


Figura 29 - Detalhe do posicionamento dos termopares nas camadas refratárias da panela.

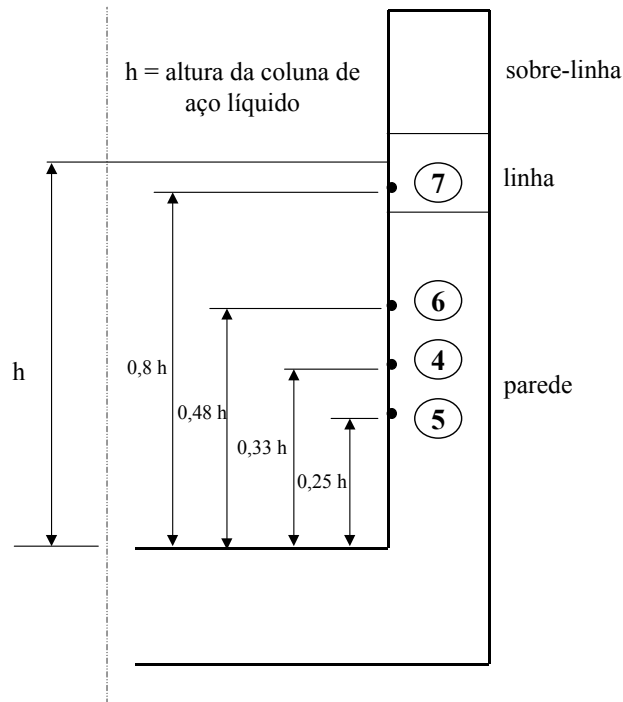


Figura 30 - Detalhe do posicionamento dos termopares na parede refratária da panela

### 3.1.3 Ensaios

Todos os ensaios foram realizados em painelas que tiveram os refratários de trabalho da parede totalmente trocados, o que é convencionalmente chamado de **panela nova**. O material refratário dolomítico utilizado é muito higroscópico necessitando ser secado, através de uma curva de aquecimento lento que estabelece a temperatura ideal da superfície do tijolo durante todo o processo de secagem. Após a secagem, a panela vai para a montagem final e posteriormente recebe o pré-aquecimento.

#### 3.1.3.1 Ensaio para Obtenção e Avaliação da Curva de Secagem

O objetivo do primeiro ensaio de secagem denominado SEC-VERT\_1 foi medir a temperatura da parede interna exposta a uma condição de chama **sem adição de ar auxiliar**.

O ensaio de secagem foi realizado com o aquecedor programado para executar a rampa de aquecimento dado pela curva de secagem com o ar auxiliar na posição fechada. Desta forma, o controle da temperatura dos gases depende somente da injeção de combustível definida pelo ajuste automático do controlador. O ensaio consistiu basicamente em colocar a panela instrumentada para aquecer no aquecedor vertical. Os sinais monitorados da parede e da chama foram adquiridos a cada 15min. sendo armazenados em planilhas de dados. A duração do ensaio foi de 2h30min. Posteriormente, os dados foram plotados em um gráfico de temperatura versus tempo juntamente com a curva padrão de secagem.



No segundo ensaio de secagem, denominado SEC-VERT\_2, foram medidas temperaturas em mais pontos na parede interna com o objetivo de se avaliar a influência da chama **com 20% de ar auxiliar**. A localização dos termopares T5 e T6 foi definida de forma que a altura média destes ficasse aproximadamente a mesma altura do termopar T4, do ensaio anterior, permitindo assim estabelecer uma comparação. Um mal contato elétrico no cabo de compensação do ponto T7 impossibilitou a aquisição das temperaturas na fase inicial do ensaio.

A forma de execução dos ensaios de secagem é bastante simples e intuitiva, de modo que será descrita de forma bem sucinta abaixo:

- ✓ Posicionar a panela na plataforma do aquecedor;
- ✓ Conectar os terminais dos termopares ao equipamento de medição;
- ✓ Iniciar o aquecimento com aquecedor ajustado com as especificações próprias de cada ensaio;
- ✓ Anotar as temperaturas registradas de início da operação;
- ✓ Ler as temperaturas a cada 15min .

Os dados adquiridos foram armazenados em arquivos do tipo planilhas eletrônicas ( Microsoft Excel ).

### 3.1.3.2 Ensaio Comparativos dos Aquecedores Verticais e Horizontais

A avaliação da eficiência de aquecimento entre os aquecedores horizontal e vertical foi realizada através de três ensaios. O primeiro ensaio, no aquecedor horizontal, determinou a curva da temperatura da parede através da média das temperaturas nos pontos T1, T2 e T3. Neste teste um quarto ponto foi instalado a uma profundidade de 180 mm da parede externa sem entretanto ser utilizada sua temperatura no cálculo da temperatura média da parede. No segundo teste, o mesmo procedimento foi utilizado no aquecedor vertical, aplicando-se a curva padrão de aquecimento para painéis novos. A constatação de uma considerável diferença de aquecimento levou a realização de um terceiro ensaio, sobre o aquecedor vertical, visando melhorar sua eficiência. O critério para a duração dos ensaios foi o de se atingir o regime estacionário de transferência de calor onde a energia que entra pela face quente da parede refratária é igual à que sai para o ambiente pela face externa.

Esses ensaios seguiram a mesma metodologia dos ensaios de secagem, diferindo somente a localização dos pontos de medição que neste caso estão no interior do refratário.

A Tabela 3 apresenta os ensaios realizados. O prefixo no nome identifica a operação realizada em cada ensaio: assim, por exemplo, as iniciais **AQ** significam que o teste realizado foi de pré-aquecimento e teve como objetivo avaliar a eficiência do aquecedor, enquanto que os testes denominados com **SEC** tiveram o objetivo de avaliar a capacidade do aquecedor de realizar a curva de secagem programada. Todos os pré-aquecimentos duraram o tempo necessário para ser atingido o regime estacionário.

Definição de termos:

**Curva de secagem** é uma reta com uma taxa de elevação da temperatura da parede em graus por minutos normalmente especificada pelo fabricante do material refratário. A curva de secagem utilizada nos testes estabelecia uma taxa de 2°C/min até atingir a temperatura máxima de 650°C em 5 horas.

**Curva de aquecimento** é uma curva semelhante a curva de secagem porém com uma taxa de elevação da temperatura mais alta e, após ser atingido a temperatura máxima, o aquecimento é mantido por um tempo determinado. A taxa utilizada nos ensaios foi de 8°C/min. durante as primeiras duas horas até atingir os 1000 °C e o tempo total de operação foi de 12 horas.

**Temperatura de chama** é a temperatura dos gases produzidos na combustão dos dois tipos de combustíveis utilizados pelos aquecedores.

**Ar auxiliar** é a quantidade de ar adicional injetada junto com a mistura padrão de ar e combustível do queimador com o objetivo de diminuir a temperatura de chama da operação de secagem. A quantidade de ar auxiliar é expressa em porcentagem de ar auxiliar.

Tabela 3 – Dados dos Ensaio Realizados.

ENSAIO	AQUECEDOR	PONTOS DE MEDIDAÇÃO	DURAÇÃO (horas)	OBJETIVO
<b>AQUECIMENTO</b>				
AQ-HORIZ_1	Horizontal	T1 T2 T3	11,6	Avaliação
AQ-VERT_1	Vertical	T1 T2 T3	13,4	Avaliação
AQ-VERT_2	Vertical	T1 T2 T3	12,4	Melhoria
<b>SECAGEM</b>				
SEC-VERT_1	Vertical	T4	2,5	Avaliação
SEC-VERT_2	Vertical	T5 T6 T7	5,0	Melhoria

### 3.1.3.3 Ensaio de Homogeneidade de Aquecimento

Foram realizadas termografias em duas panelas aquecidas durante 6 horas nos dois tipos de aquecedores. As termografias foram tomadas de topo objetivando medir as temperaturas das paredes refratárias (lateral e fundo) das panelas conforme mostra a Figura 31. Utilizou-se o termógrafo TH3100 da Nec ajustado para a emissividade de 0,85 e as termografias foram analisadas em um software fornecido juntamente com o equipamento.

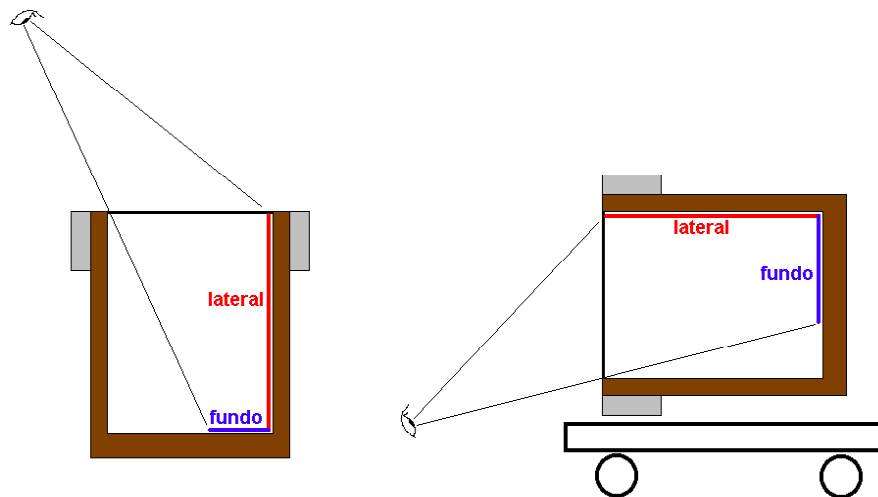


Figura 31 - Tomadas termográficas nos aquecedores de panela.

### 3.1.3.4 Ensaio de Descarbonetação

Os tijolos refratários utilizados na linha de escória das panelas apresentam teores elevados de carbono. Esse carbono, além de dar resistência ao tijolo, promove a impermeabilização ao ataque da escória. Durante o aquecimento da panela, devido a exposição às altas temperaturas, os gases ricos em oxigênio, resultantes da combustão com excesso de ar, reagem com o carbono da superfície eliminando-o sob a forma de CO e CO<sub>2</sub>. Este processo, migrando para camadas mais internas do refratário durante todo o aquecimento, altera a estrutura física do material refratário. Isto causa um decréscimo na resistência mecânica desta camada que é eliminado pelo aço líquido na primeira campanha. Assim, a descarbonetação causa uma redução sensível na vida útil dos refratários de trabalho obrigando a saída de panelas aquecidas do ciclo e a entrada de panelas fora do ciclo, representando uma maior dificuldade de controle da temperatura do aço e a elevação dos custos de produção.

Para avaliar o efeito da descarbonetação do refratário nos dois tipos de aquecedores foram colocados tijolos dentro de panelas aquecidas no aquecedor horizontal (a óleo) e no vertical (gás GLP) e mantidos durante uma hora. Foram utilizadas seis amostras em cada ensaio. Os tijolos foram cortados ao meio para possibilitar a medição da camada

descarbonetada. A espessura da camada afetada foi estabelecida visualmente e medida com uma régua graduada em milímetros. A camada descarbonetada considerada foi a média das medidas realizadas.

## 3.2 OTIMIZAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DOS AQUECEDORES

### 3.2.1 Acompanhamento da Situação de Movimentação das Painelas

Primeiramente, é importante apresentar uma descrição do arranjo físico dos equipamentos da área de manutenção e aquecimento de painela, pois isto determina em muito a forma de operação das painelas em circulação de uma aciaria. Vale lembrar que a movimentação de painelas em aciarias em geral, é realizada por pontes rolantes.

#### 3.2.1.1 Layout de Aciaria

O diagrama esquemático da Figura 32 apresenta a disposição geral dos equipamentos e áreas de processo da aciaria estudada.

As duas áreas destacadas no diagrama, indicam uma divisão física entre as áreas de produção do aço (**Setor B**) e as áreas de manutenção e aquecimento de painelas (**Setor A**). Esta mesma divisão também pode ser estendida para a divisão do ciclo da painela entre os *tempo com aço* e *tempo sem aço*, respectivamente. Todas estas operações ocorrem nas áreas que estão sob a nave da aciaria compreendida entre os eixos C e D. Existem duas pontes rolantes, que se deslocam ao longo destes eixos, disponíveis para o atendimento de todas as demandas da produção e de todas as operações de transporte de painela. A divisão de tarefas entre as pontes fica definida, praticamente, pela divisão das áreas demarcadas no layout. Assim, a ponte rolante CD1 atende o setor A, a área compreendida entre forno elétrico e o setor dos refratários (onde são realizadas as manutenções e aquecimentos de painela), e a ponte CD2 atende o setor B, a área que vai do forno até a torre do Lingotamento Contínuo (área de processo propriamente dita).

### DIAGRAMA SIMPLIFICADO DA ACIARIA PESQUISADA

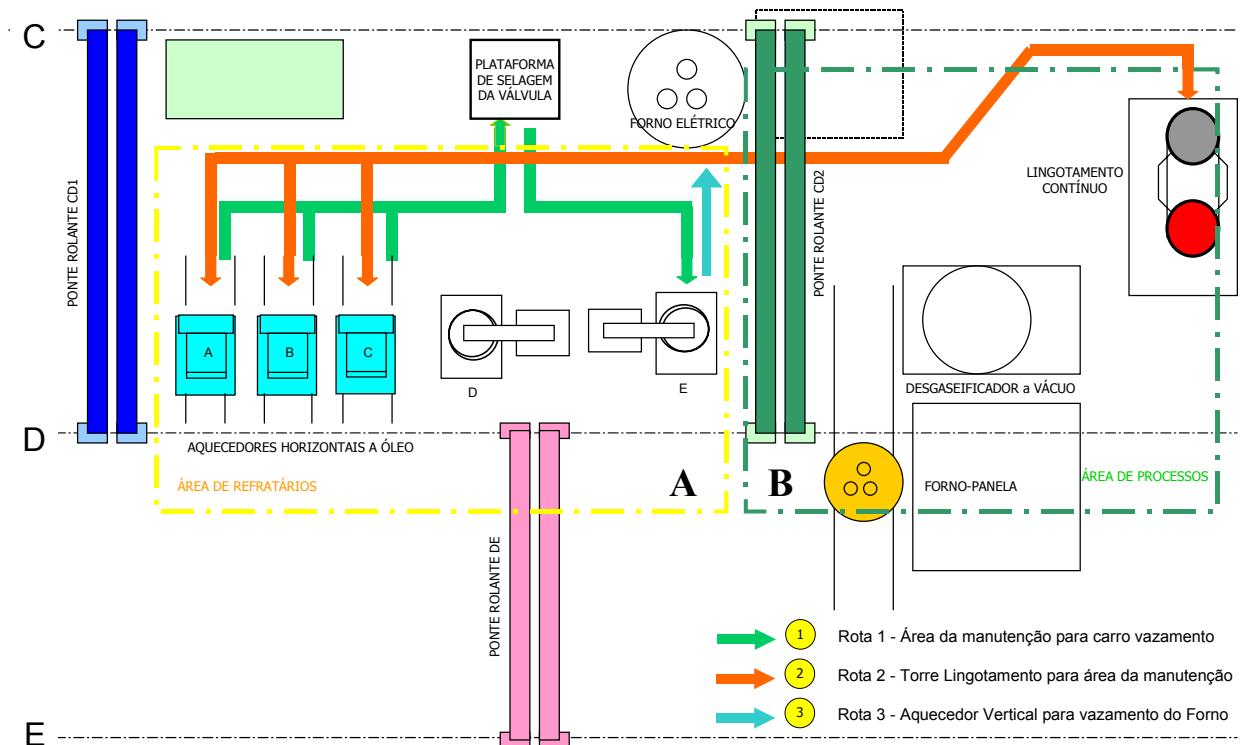


Figura 32 – Layout de uma aciaria. Operações de transporte de painéis.

#### 3.2.1.2 Observação da Situação de Movimentação das Painéis

Durante três dias foram cronometrados os tempos e movimentos das painéis e das pontes rolantes, acompanhando-se todas as atividades realizadas. Na Tabela 4 estão relacionadas e identificadas todas as operações realizadas com a painela e com as pontes. Uma breve descrição de cada operação é apresentada a seguir:

**Operações realizadas com a painela durante o *tempo sem aço*:**

**E1 - Tempo de espera para transporte da torre para a manutenção:** intervalo de tempo entre o fim do lingotamento e o início do transporte da painela para a manutenção.

**T1 - Transporte para a área de manutenção:** esta operação é realizada pela ponte rolante CD2. Primeiramente, a painela é levada para a área de rejeito de escória, é basculada e então é transferida para a área de manutenção segundo a Rota 2 do diagrama da Figura 32.

**MAN - Manutenção:** a painela passa geralmente por uma inspeção visual, limpeza do plug e da válvula gaveta, e periodicamente é medido o desgaste do plug e a espessura do refratário. Devido a sua natureza diversa, é difícil prever o tempo de duração desta atividade.

**E2 - Tempo de espera para transferência para o carro de vazamento:** é o intervalo de tempo entre o fim da manutenção e o início do transporte para o carro de vazamento.

Tabela 4 – Operações realizadas com a panela e ponte rolante.

TABELA DAS OPERAÇÕES COM PONTE	
CÓDIGO	DESCRIÇÃO
<b>T1</b>	Transporte da torre para a área de manutenção
<b>T2</b>	Transporte da manutenção para o carro de vazamento
<b>T3</b>	Carregamento do forno elétrico
<b>T4</b>	Transporte do desgaseificador a vácuo (VD) para a torre do lingotamento
<b>T5</b>	Transporte do Forno Panela para o desgaseificador a vácuo (VD)
<b>E1</b>	Tempo de espera para transporte na torre
<b>E2</b>	Tempo de espera para transporte da manutenção para o carro de vazamento
<b>E3</b>	Tempo de espera para vazamento
<b>MAN</b>	Manutenção
<b>AH</b>	Aquecimento no aquecedor horizontal
<b>AV</b>	Aquecimento no aquecedor vertical

**AH** - *Aquecimento no aquecedor horizontal*: para evitar que a panela fique resfriando enquanto não é possível a transferência para o carro de vazamento, a orientação é a de colocar a panela em aquecimento no próprio aquecedor horizontal sobre o qual foi realizada a manutenção.

**T2** - *Transporte para o carro de vazamento incluindo selagem da válvula de fundo da panela*: a selagem da válvula tem a função de isolar a gaveta do contato com o aço durante o processo, evitando o seu bloqueio. A selagem consiste em preencher o canal de passagem do aço com areia e por isso, a selagem só pode ser executada com a panela na posição vertical. O transporte é realizado pela ponte CD1 e está representado pela Rota 1 na Figura 32.

**AV** - *Aquecimento no aquecedor vertical*: é o aquecimento realizado pelo aquecedor vertical E localizado na frente do forno, com a panela no carro de vazamento. Pela sua posição, a panela pode ser mantida em aquecimento até minutos antes do vazamento.

**E3** - *Tempo de espera para vazamento*: é o tempo que a panela fica na frente do forno aguardando o vazamento. Nesta situação, a panela está com a temperatura da parede interna alta e sem tampa pronta para receber o aço líquido. A perda de energia por radiação é muito grande.

Resumidamente, listam-se abaixo as atividades de cada ponte por ordem de **prioridade**:

### Ponte Rolante *CD1*:

**T3** - *Carregamento do forno elétrico com sucata através de cestões*: normalmente são necessários três cestões para completar a carga de uma corrida.

**T2** - *Transporte da panela da manutenção para o carro de vazamento* (nesta operação também está incluída a selagem da válvula): é a mesma operação descrita para a panela, com o código T2.

- *Outros movimentos com panelas e materiais pela área.*

### Ponte Rolante *CD2*:

**T4** - *Transporte da panela do desgaseificador a vácuo (VD) para a torre do lingotamento.*

**T5** - *Transporte da panela do Forno-Panela para o desgaseificador a vácuo (VD).*

**T1** - *Transporte da panela da torre do lingotamento para o setor de panelas*: operação já descrita para o caso da panela.

#### 3.2.1.3 Metodologia do Acompanhamento

Ficou definido que seriam preenchidas planilhas para cada ponte rolante e panela em operação durante a campanha de coleta de dados. Assim, foram elaboradas três folhas de operação específicas, uma para a ponte rolante CD1, outra para a CD2 e uma terceira para as panelas. Nas folhas, foram relacionadas todas as atividades possíveis de cada equipamento com divisões de colunas para anotação de início e fim de cada operação realizada. Nas operações das pontes rolantes com panelas, o número da panela era anotado ao lado dos eventos de início e fim para facilitar o cruzamento de informações na fase de tabulação.

Primeiramente, os dados levantados foram tabulados em planilhas do Excel para permitir a análise dos dados. Com esta análise pôde-se ter informações reais de como a rotina é realizada, que critérios são adotados, e como os recursos são utilizados. A partir disso, buscou-se identificar que fatores impediam a colocação da panela em aquecimento logo após a manutenção e qual a melhor rotina a ser adotada durante o tempo sem aço.

### 3.2.2 **Implantação de Melhorias**

Os resultados das análises levaram a uma propostas de melhorias no arranjo físico da plataforma de selagem da válvula de fundo da panela. Durante a instalação do novo local da plataforma, os dados operacionais mais significativos continuaram a ser monitorados de

maneira a registrar a situação real antes da mudança. Estes dados serviram de base para a avaliação das melhorias obtidas após a mudança.

O acompanhamento foi iniciado dois meses antes e continuou nos três meses subsequentes a mudança. Os dados operacionais necessários para a avaliação estavam disponibilizados pelo sistema supervisor de processo da aciaria sob forma de banco de dados. A compilação das variáveis em planilhas permitiu a obtenção dos resultados ao fim de cada mês.

Os itens de controle monitorados foram os seguintes:

- ✓ Percentual de corridas aquecidas no aquecedor vertical;
- ✓ Tempo médio de aquecimento por corrida;
- ✓ Tempo de espera na frente do forno.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios serão apresentados e analisados nesta seção, fazendo-se um discussão dos aspectos que cercam cada estudo desenvolvido, direcionados para o controle e manutenção da condição térmica da panela.

### 4.1 AVALIAÇÃO E MELHORIA DOS AQUECEDORES DE PANELA

Esta seção contém a análise dos resultados dos ensaios realizados para a avaliação dos aquecedores descritos no capítulo anterior. Sendo assim, na primeira parte é apresentada a avaliação do aquecedor vertical na operação de secagem; na segunda, os resultados da comparação dos aquecimentos à óleo e a gás GLP; na terceira, a verificação da homogeneidade destes aquecimentos e por último, a descarbonetação sofrida pelo refratário.

#### 4.1.1 Ensaio para Obtenção e Avaliação da Curva de Secagem com o Aquecedor Vertical

##### Ensaio SEC-VERT\_1

A Figura 33 mostra as curvas de aquecimento obtidas para a parede interna (T4) e para a temperatura de chama em comparação com a temperatura objetivada. Observa-se próximo dos 80 minutos do aquecimento que houve uma interrupção de 15 minutos perfeitamente identificado pela queda brusca das temperaturas. Nota-se que as temperaturas foram muito superiores a temperatura objetivada durante toda a secagem indicando que a regulagem do aquecedor não estava apropriada.

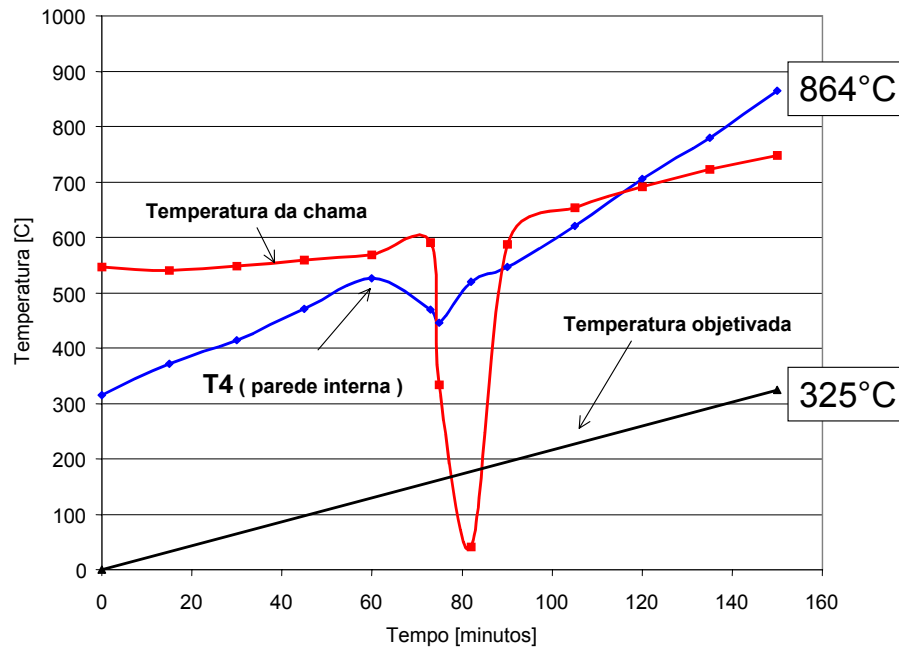


Figura 33 – Temperaturas da parede interna e de chama durante o teste de secagem para a condição de chama sem ar auxiliar. (ensaio SEC-VERT-1)

Pode-se observar alguns resultados da análise das curvas:

- As temperaturas da parede e de chama sobem muito rapidamente no início, atingindo 315°C e 547°C respectivamente. Inicialmente é observada uma diferença de 300°C entre a temperatura da parede e a objetivada, aumentando esta diferença para 539°C ao fim da secagem. Neste ponto, a temperatura da parede atingiu 864°C o que é totalmente incompatível com a temperatura de secagem recomendada pelo fabricante do material refratário. Nota-se também que, após os primeiros 70 min, a diferença entre a temperatura de chama e a temperatura objetivada estabiliza-se por volta de 430°C, mantendo-se assim até o fim da secagem. A partir dos 120 minutos, a temperatura da parede, que era mais baixa no início, ultrapassa a da chama indicando claramente que não existe controle da temperatura de secagem somente pela chama do queimador. A Figura 34 mostra as linhas de ajuste do tipo linear para as curvas da chama e da parede interna juntamente com a curva de secagem. Apesar das diferenças de temperatura mencionadas acima, a declividade da curva de chama se aproxima bastante da objetivada verificada pela diferença aproximadamente constante destas duas temperaturas ao longo da secagem.
- Finalmente, os resultados mostram que o aquecedor vertical, regulado na condição de chama **sem ar auxiliar**, não reproduz a curva de secagem programada. A realização de um novo ensaio, com previsão de 5 horas, que é a duração padrão

recomendada, e a injeção de 20% de ar auxiliar na combustão, precisou ser avaliado.

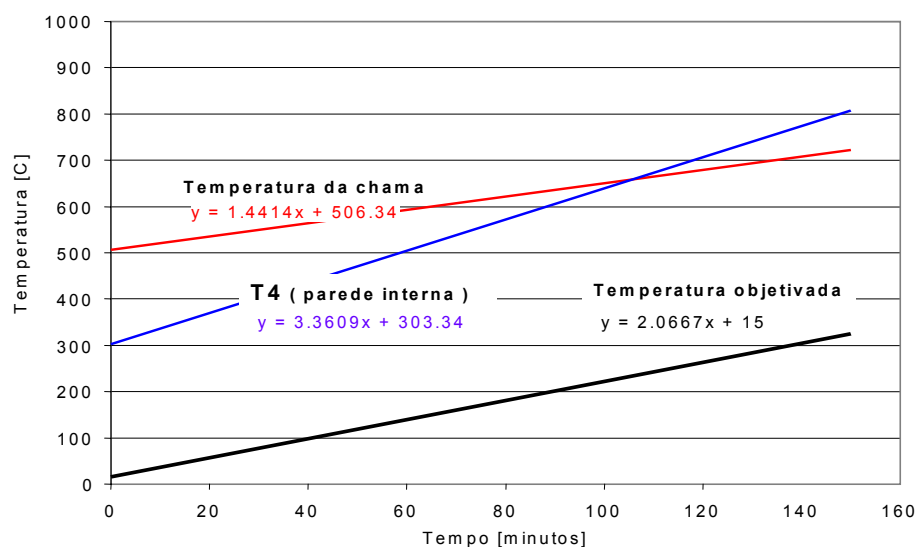


Figura 34 – Ajuste linear das curvas de temperaturas de parede e de chama para a condição de chama **sem ar auxiliar** (SEC-VERT\_1).

### Ensaio SEC-VERT\_2

O teste teve duração de 5 horas, e as temperaturas obtidas para os pontos T5, T6 e T7 estão na Figura 35.

- Pelas curvas dos três pontos medidos fica evidente que a chama produz um gradiente de temperaturas ao longo da parede interna. A temperatura máxima é atingida próxima a altura média da coluna de aço, correspondendo ao ponto T6, diminuindo progressivamente, para cima e para baixo, a medida que se afasta deste ponto.
- Observam-se diferenças consideráveis de temperatura entre os pontos de medição, particularmente entre os pontos T5 e T6 o que leva a concluir que a secagem da parede não é homogênea. As diferenças máximas de temperatura em relação a objetivada ocorrem no final da secagem, sendo de  $-181^{\circ}\text{C}$  para o ponto T5, de  $+163^{\circ}\text{C}$  e de  $+79^{\circ}\text{C}$  para T6 e T7, respectivamente, com 255 minutos de secagem.

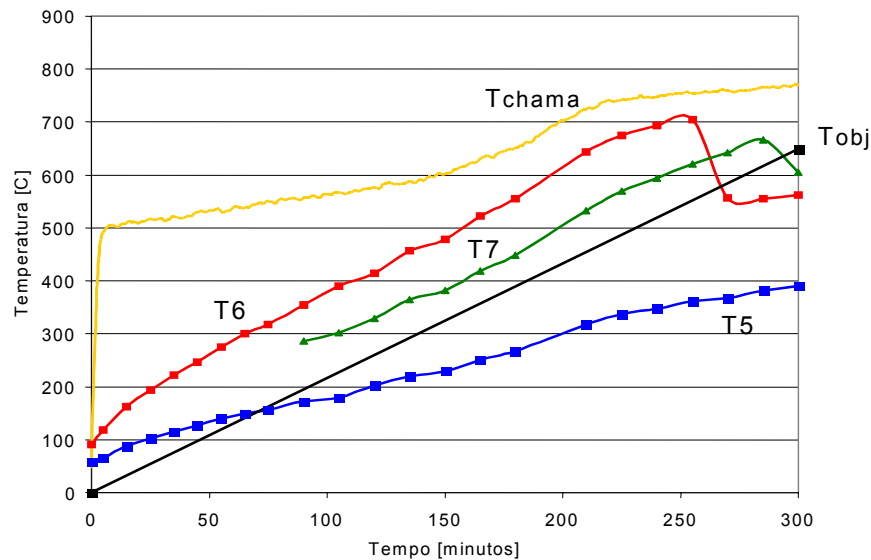


Figura 35 – Temperaturas da parede interna da panela para um ensaio de secagem regulado para 20% de ar auxiliar.

- O efeito da injeção de **20% de ar auxiliar** na combustão foi a redução na temperatura de chama em torno de 90°C (12%) em relação a temperatura da chama **sem ar auxiliar**. Este resultado demonstra que existe a possibilidade de ajustar a temperatura de chama através da regulação do controlador para diferentes condições de operação. Uma influência ainda maior se observou na temperatura média da parede. A Figura 36 mostra que a média das temperaturas da parede dos pontos T5 e T6, calculada por um ajuste linear, indicam a possibilidade de subdividir em três o tempo da secagem, para os quais regulagens bem definidas podem reproduzir a curva de secagem objetivada. A condição de chama com 20% de ar auxiliar mostrou-se adequada para a última etapa, a partir dos 150 minutos até o fim da secagem. A média das diferenças de temperatura foi de 28°C, diferença de 12%, considerado aceitável para uma operação desta natureza. Para os intervalos 0-75 min. e 75-150min., o aumento da vazão de ar auxiliar precisaria ser determinado.

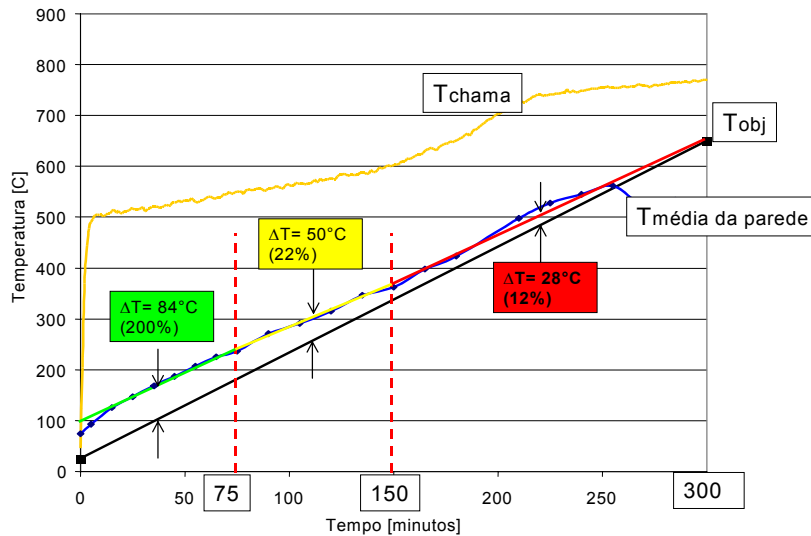


Figura 36 – Temperaturas médias da parede para a secagem com 20% de ar auxiliar (SECVERT\_2).

- Para uma comparação definitiva das duas condições experimentadas, na Figura 37 estão plotadas as duas curvas mais significativas para a avaliação da mudança da condição de operação do aquecedor. Pode-se observar consideráveis diferenças na temperatura da parede em decorrência da alteração da condição de chama. No intervalo de 75 a 150 minutos, a média das diferenças de temperaturas de parede obtidas nos ensaios foi de  $385^{\circ}\text{C}$ , significando uma redução de 57% na temperatura do segundo em relação a do primeiro ensaio.

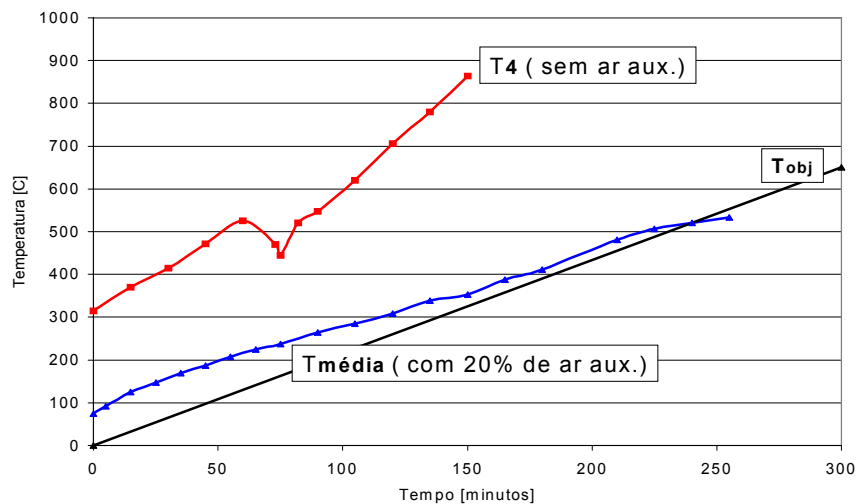


Figura 37 – Comparativo das curvas de temperatura média da parede para os dois ensaios em relação a curva padrão.

#### 4.1.2 Ensaios Comparativos dos Aquecedores Verticais e Horizontais

##### Ensaio AQ-HORIZ 1

O resultado do primeiro ensaio no aquecedor horizontal é mostrado na Figura 38 onde se pode verificar que após 12 horas é praticamente atingido o estado estacionário para o ponto T1 mais distante da fonte de calor, o que é confirmado pelos resultados divulgados por AUSTIN et al (1992) e TOMAZIN et al (1986) em seus trabalhos sobre aquecimento de painéis.

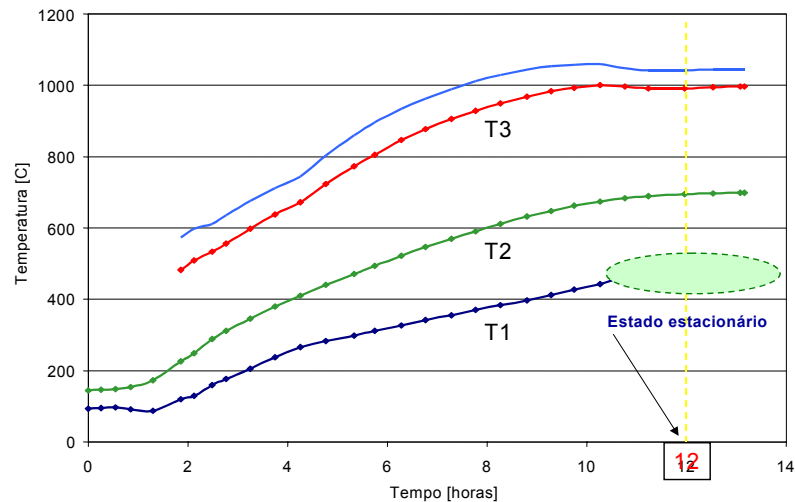


Figura 38 – Temperaturas das camadas refratárias do pré aquecimento no aquecedor horizontal.

Outra forma de visualizar este ponto é plotar as temperaturas internas do refratário para vários tempos de aquecimento até atingir o regime estacionário. A Figura 39 ilustra este instante.

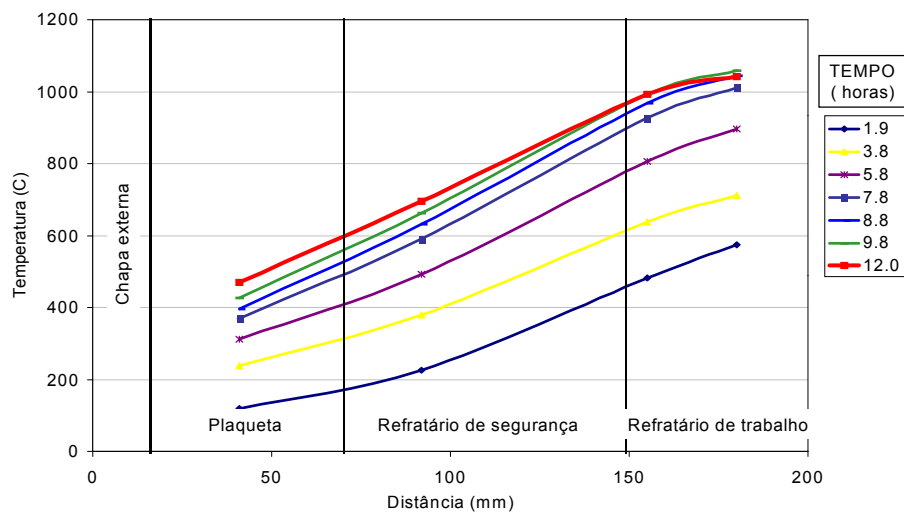


Figura 39 – Evolução do perfil térmico da parede durante o ensaio AQ-HORIZ\_1.

### Ensaio AQ-VERT\_1

Utilizando o mesmo procedimento do primeiro experimento, os resultados deste teste, juntamente com a curva da temperatura média do primeiro ensaio, são visualizados na Figura 40.

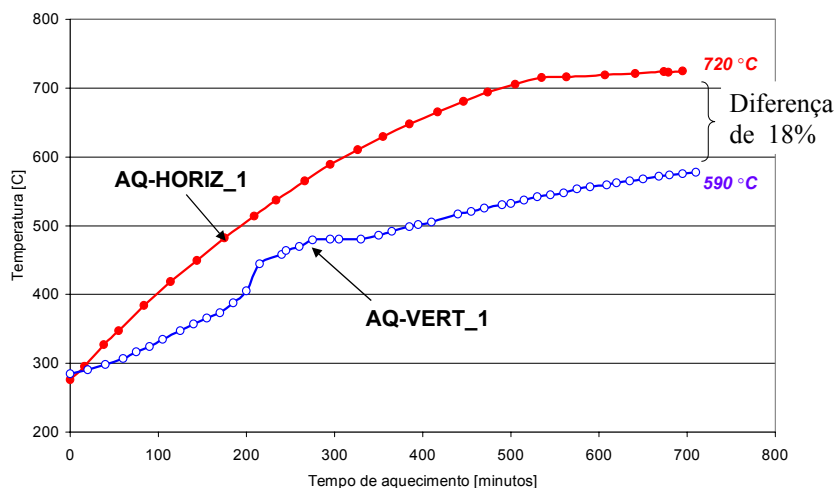


Figura 40 – Temperaturas médias da parede refratária das placas aquecidas nos dois tipos de aquecedores, com as temperaturas médias finais ( estados estacionários ).

A temperatura média final do refratário estabilizou em 590 °C, uma temperatura 130 °C inferior àquela obtida no aquecedor horizontal. Esta diferença de 18% representa uma quantidade de energia dentro do refratário que pode ser expressa pela seguinte equação:

$$E = m C_p \Delta T \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

E = energia contida no material refratário [J];

M = massa total de material refratário [kg];

C<sub>p</sub> = calor específico médio dos refratários [J / kg°C];

ΔT = diferença entre as temperaturas médias dos refratários das duas placas [°C].

Considerando a densidade média dos refratários de 2800 kg/m<sup>3</sup> e o calor específico igual a 1000 J/kg°C, a diferença de temperatura de 130°C representa o montante energético de 8,5 GJ [2,4 MWh]. Esta diferença expressa distintos estados térmicos de placa na hora do vazamento e que conseqüentemente afetarão de forma diferente as perdas térmicas do aço na placa. O resultado desta variabilidade manifesta-se pelo maior descontrole da temperatura do aço durante as etapas seguintes.

### Ensaio AQ-VERT\_2

A menor potência do aquecedor vertical, verificada pela menor temperatura média do refratário, pode ser corrigida pela alteração da curva de aquecimento. Para tanto, adotando-se recomendação de SAHA et al (1991) para a temperatura máxima da parede no aquecimento de painéis dolomíticos, realizou-se um novo ensaio no aquecedor com uma curva em que a temperatura final foi modificada de 1000°C para 1100°C. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 41 em conjunto com os resultados dos dois ensaios anteriores. A temperatura média estabilizou em 685°C no final do aquecimento quando o regime estacionário foi atingido após 12,5 horas. A diferença, que anteriormente era de 18%, reduziu-se para 5%, um valor considerado aceitável.

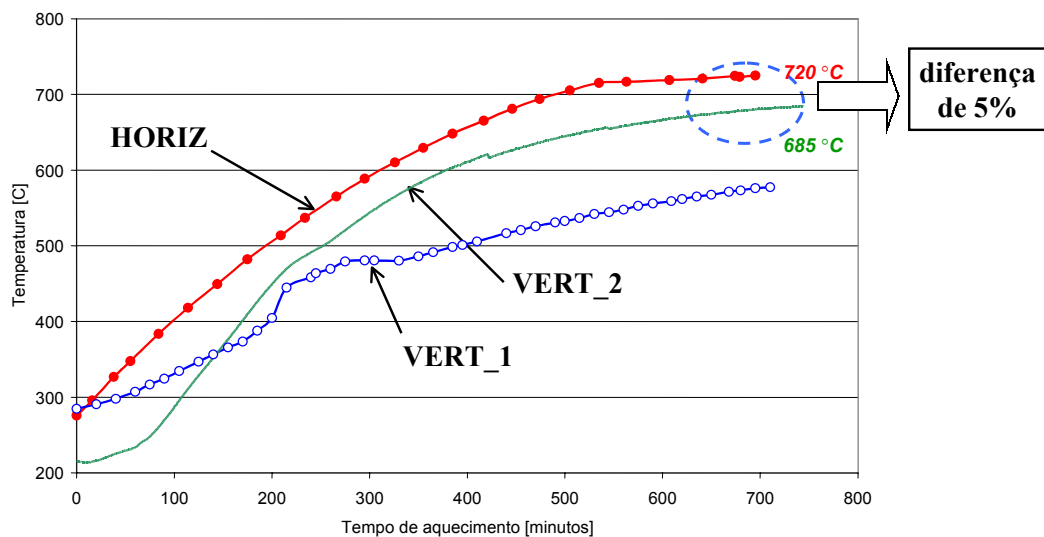


Figura 41 – Temperaturas médias do refratário de painéis aquecidos nos dois tipos de aquecedores para diferentes curvas de aquecimento.

#### 4.1.3 Ensaio de Homogeneidade de Aquecimento

As termografias das paredes refratárias internas das painéis após 6 horas de aquecimento em ambos os aquecedores são mostradas na Figura 42. A painél aquecida no aquecedor horizontal apresentou um aquecimento homogêneo com uma temperatura superficial média de 985 °C. Já a painél aquecida no vertical, apesar da boa homogeneidade, apresentou uma temperatura média de 699 °C. A diferença de 286 °C comprova a deficiência no aquecimento do aquecedor vertical em relação ao horizontal.



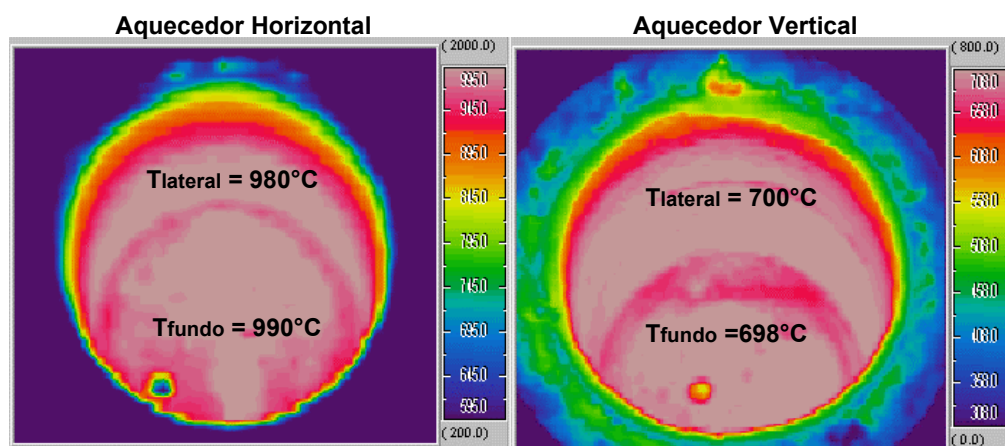


Figura 42 - Termografias das panelas aquecidas nos diferentes aquecedores com as temperaturas médias das paredes lateral e fundo da panela.

#### 4.1.4 Ensaio de Descarbonetação

O resultado comparativo entre os dois modelos de aquecedor de panelas é mostrado na Tabela 5. Percebe-se que o aquecedor a óleo é três vezes mais agressivo ao material refratário que o aquecedor a gás GLP. Este maior ataque é justificado pela injeção de ar comprimido e oxigênio que são necessários para possibilitar a queima do óleo. Essas adições tornam o ambiente de queima muito oxidante. Nos aquecedores a gás GLP a mistura é mais homogênea pois ocorre somente a adição de ar soprado. Um bom controle da relação estequiométrica reduz o ambiente oxidante dentro da panela durante a queima reduzindo a camada descarbonetada nesse tipo de aquecedor.

Tabela 5 – Espessura média descarbonetada dos tijolos refratários nos diferentes aquecedores.

TIPO DE AQUECEDOR	CAMADA DESCARBONETADA [mm]
HORIZONTAL	6,5
VERTICAL	2,3

## 4.2 OTIMIZAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DOS AQUECEDORES

As atividades desenvolvidas, durante o tempo sem aço de uma panela do ciclo, são próprias e características de cada tipo particular de aciaria. Assim, dependem fundamentalmente do arranjo físico dos equipamentos e das pontes rolantes disponíveis. Os resultados da análise sobre os dados levantados são válidos especificamente para a aciaria

estudada, não sendo aconselhável a sua aplicação imediata a outros casos. Acredita-se sim, que a metodologia possa servir como um guia para análises deste tipo de problema.

#### 4.2.1 Acompanhamento da Situação de Movimentação das Painelas

##### Análise dos dados

Sob o ponto de vista de minimizar as perdas térmicas da panela, as operações que sujeitam-na ao resfriamento, durante o tempo sem aço, devem se efetuar no menor tempo possível. Para que isso aconteça, o ideal é que os transportes de um ponto a outro, realizado pelas pontes rolantes, ocorram logo após o fim de cada etapa.

Os tempos envolvidos em cada atividade realizadas pelas pontes rolantes, por ordem de prioridade, podem ser resumidas nas tabelas abaixo. Os códigos correspondem àqueles da Tabela 4 do capítulo anterior.

##### *Ponte rolante CD1*

Tabela 6 – Tempos mínimo, máximo, médio para as operações da ponte CD1.

CÓDIGO da OPERAÇÃO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	Desvio Padrão
T3	5	18	11	3
T2	4	14	7	5

T2: Transporte da manutenção para o carro de vazamento;  
T3: Carregamento do forno elétrico

##### *Ponte rolante CD2*

Tabela 7 - Tempos mínimo, máximo, médio para as operações da ponte CD2.

CÓDIGO da OPERAÇÃO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	Desvio Padrão
T4	4	14	9	3
T5	4	11	6	3
T1	8	11	9	2

T1: Transporte da torre para a área de manutenção;  
T4: Transporte do desgaseificador a vácuo (VD) para a torre do lingotamento;  
T5: Transporte do Forno Painela para o desgaseificador a vácuo (VD)

##### Resultados da análise

O cruzamento dos dados possibilitou a identificação dos fatores que impedem as pontes rolantes de realizem o transporte ao final de cada evento. Uma breve análise de cada operação é apresentada a seguir:

**E1 - *Aguardando transporte na torre do lingotamento;***

A operação de transporte da panela da torre do lingotamento para a manutenção (T1) é a terceira na ordem de prioridades da ponte CD2, conforme apresentado na Tabela 7. Seguindo as prioridades, a ponte CD2 primeiro transporta a panela do vaso desgaseificador VD para a torre do lingotamento (operação T4) quando faltam aproximadamente 10 min. para o fim do aço da panela no lingotamento e logo após transfere a panela do forno-panela (FP) para o VD (operação T5). Contabilizando os tempos médios para estas duas operações, pode-se verificar que é possível a ponte iniciar o transporte da panela da torre para o setor de panelas poucos minutos após o fim da corrida. O tempo médio de espera observado é de 8 min o que condiz com a afirmação acima.

**T1 - *Transporte para a área de manutenção;***

O tempo desta operação depende do caminho a ser percorrido não estar obstruído pela ponte CD1, o que ocorre cada vez que esta carrega o forno F2. Devido a isso, o tempo envolvido nesta operação pode chegar a 15 minutos. Os tempos de transporte oscilaram entre 8 e 11 min, considerado normal.

**MAN - *Manutenção: inspeção, serviços de preparação para vazamento;***

A duração desta atividade é de difícil previsão pois depende muito do estado da panela. Como exemplo, verificou-se um tempo padrão de 40min para uma troca de plug poroso, enquanto que, para uma revisão da válvula gaveta, este tempo é de aproximadamente 20 min.

**E2 - *Aguardando transferência para o carro de vazamento;***

Este tempo de espera ocorre sempre que a ponte CD1 está finalizando um carregamento do forno. Ele pode chegar a 10 min.

**T2 - *Transporte para o carro de vazamento incluindo selagem da válvula de fundo;***

O transporte da panela da manutenção para o carro de vazamento é a segunda prioridade da ponte CD1. A ponte gasta, em média, 7 minutos nesta operação, oscilando entre 4 e 14 minutos. Esta tarefa pode ser realizada no intervalo entre o primeiro e o segundo cestão ou logo após o terceiro. Dependerá, fundamentalmente, da hora do término da manutenção. O intervalo de tempo entre o segundo e o terceiro carregamento não permite realizar esta operação, devido a forma atual desta operação. A ponte CD1 gasta 11 min., em média, com

cada carregamento do forno. Verificou-se que 5 min. é um tempo suficiente para executar esta operação. O tempo maior deve-se a sistemática da ponte içar os cestões muito tempo antes da hora de abertura do forno.

O carregamento do forno num tempo padrão de 5 min. viabilizaria a transferência da panela em qualquer um dos intervalos de tempo entre cestões.

**AH** - *Aquecimento no aquecedor horizontal;*

Para evitar que a panela fique resfriando enquanto não é possível a transferência para o carro de vazamento, o pessoal é orientado a colocar a panela em aquecimento no próprio aquecedor horizontal sobre o qual foi realizada a manutenção. Sob o ponto de vista do encharque térmico, a desvantagem deste aquecimento comparado àquele do aquecedor vertical é o de que este deverá ser interrompido para o transporte para o carro de vazamento ocasionando um resfriamento rápido da parede interna durante esta operação.

**AV** - *Aquecimento no aquecedor vertical;*

Por ser realizado no próprio carro de vazamento se trata do aquecimento mais eficaz pois possibilita manter a panela aquecendo até momentos antes do vazamento.

**E3** - *Tempo de espera para vazamento;*

Este é o tempo que a panela fica em frente ao forno aguardando a hora de vazamento, imediatamente após o fim do aquecimento. Este tempo depende diretamente da operação das pontes e também da forma de operação do forno elétrico. Por exemplo, se a panela chegar no carro de vazamento entre o primeiro e o segundo cestão portanto, bem antes do vazamento, ela é invariavelmente posta para aquecer e mantida assim até a hora do vazamento. O tempo de espera, nessa situação, varia entre 03 e 09 minutos, média de 5 min., dependendo do turno. Porém, quando a panela chega após o terceiro cestão decorrente das limitações mencionadas na análise da operação **T2** acima, isto é, vinda do aquecedor horizontal e muito próxima da hora de vazamento, na maior parte das vezes, não é posta para aquecer. Soma-se a isto o tempo de transporte para o carro de vazamento e ter-se-á tempos de espera entre 20 e 28 minutos, com média de 24 minutos.

Assim, pode-se agrupar estas atividades em dois intervalos bem distintos durante do tempo sem aço de uma panela do ciclo:

Tempo Indisponível para aquecimento: intervalo de tempo compreendido entre o fim do lingotamento e o fim da manutenção. Estão dentro deste período as operações **E1**, **T1** e **MAN**. Nesta fase o transporte da panela é realizado pela ponte rolante CD2. Verificou-se que

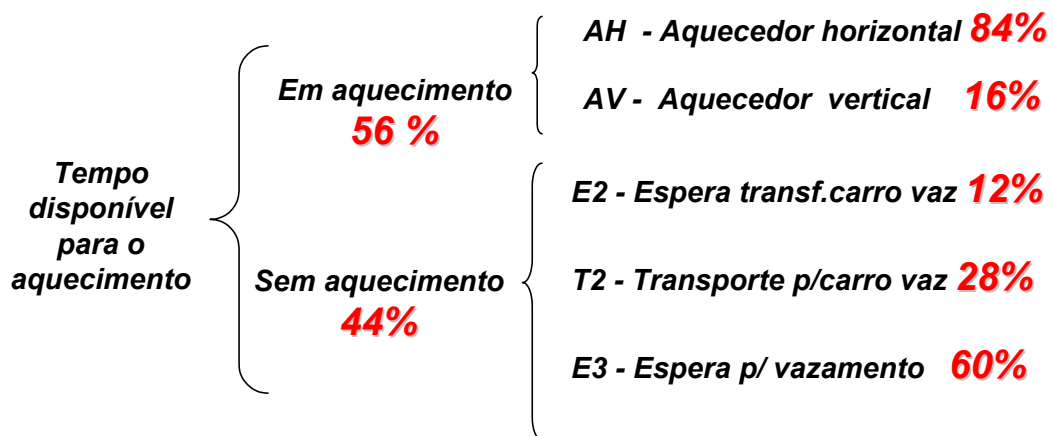
a ponte atende perfeitamente as necessidades de transporte da panela para a área de manutenção.

Tempo Disponível para aquecimento: intervalo de tempo a partir do fim da manutenção até o vazamento. Fazem parte deste período as operações **E2**, **T2**, **AH**, **AV** e **E3**. A Figura 43 mostra a situação atual da distribuição percentual do tempo disponível para aquecimento entre as operações desta etapa. Do tempo disponível para o aquecimento, somente 56% é utilizado para este fim, sendo que em 84% deste tempo o aquecimento é realizado nos aquecedores horizontais. Este percentual elevado de utilização do aquecedor horizontal decorre do fato da ponte CD1 não estar geralmente disponível para o transporte ao final da manutenção, em decorrência da sua ocupação com a atividade prioritária **T3**, conforme as razões já apresentadas na descrição da operação **T2** acima

---

### SITUAÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO DAS PANELAS

---




---

Figura 43 - Situação atual do tempo disponível para o aquecimento das panelas do ciclo.

Do tempo sem aquecimento, 60% é perdido com a espera da panela na frente do forno para o vazamento. Este percentual corresponde a um tempo médio de 15 minutos de resfriamento, calculado pela média dos tempos de espera de todas as corridas, independentemente de onde ocorreu o aquecimento, lembrando que: para a panela que sai do aquecedor horizontal este tempo médio é de 24 minutos e para a panela que sai do aquecedor vertical é de 5 minutos. Fica clara a vantagem da transferência da panela para o aquecedor vertical ao término da manutenção. Aqui novamente, o resultado decorre diretamente da indisponibilidade da ponte conforme explicado na descrição da operação E3.

Fica evidente que a indisponibilidade da ponte rolante reduz a possibilidade de aumentar o tempo de aquecimento das panelas em operação por não permitir a imediata transferência da panela para o aquecedor na frente do forno, para o qual o tempo médio de espera para o vazamento é consideravelmente menor.

Aumentar o fator de utilização do aquecedor da frente do forno significa melhorar o estado térmico da panela pois neste caso viu-se que é possível manter mais tempo a panela em aquecimento antes do vazamento.

### Melhorias propostas

Para resolver a indisponibilidade de ponte rolante para o transporte de panela, existia um projeto para a mudança do local da estação de selagem da válvula de fundo da panela. Este projeto, conhecido como *Mudança de ala*, consistia em transferir a estação de selagem da nave CD para a nave DE. Com a mudança, o transporte da panela deixaria de ser feito pela ponte CD1 e passaria a ser realizado pela ponte DE da área de lingotamento convencional. Esta ponte ficou ociosa a partir da entrada em operação do lingotamento contínuo. Atualmente muito pouco utilizada, a ponte DE possibilitaria a selagem da válvula e a transferência para o aquecedor vertical assim que estivesse finalizada a manutenção.

Com a implantação deste projeto, os seguintes resultados são esperados:

- *Diminuir o tempo de espera para o vazamento;*
- *Aumentar o tempo médio de aquecimento por corrida;*
- *Aumentar o fator de utilização do aquecedor da frente do forno.*

A mudança de ala possibilita que ao final da manutenção as panelas sejam seladas e levadas imediatamente para o carro de vazamento permitindo que o aquecimento passe a ser realizado integralmente no aquecedor vertical E. Desta forma, o tempo médio de espera será reduzido de 15 para 5 minutos.

Esta redução de 10 minutos de resfriamento da panela representa a conservação de 82 kWh de energia dentro das camadas refratárias o que corresponde a uma diferença de temperatura de 8,5°C numa massa de 55 t de aço líquido. Toda esta economia de energia representa uma redução de custos de energia, refratário e eletrodo na etapa do forno-panela, que de outro modo seriam necessários utilizar para elevar a temperatura do aço.

#### 4.2.2 Implantação das Melhorias

Durante a instalação do novo local da plataforma de selagem da válvula, os dados operacionais mais significativos continuaram a ser monitorados de maneira a registrar a situação real antes da mudança. Estes dados serviram de base para a avaliação das melhorias obtidas após a mudança de ala.

##### *Acompanhamento da Implantação das Melhorias na Movimentação de Painelas*

A Tabela 8 apresenta os itens de controle monitorados.

ÍTEM DE CONTROLE DAS MELHORIAS

Ítems de controle	AVALIAÇÃO	TREINAMENTO		LAYOUT		
		1º MÊS	2º MÊS	1º MÊS	2º MÊS	3º MÊS
<i>% corridas aquecidas no aquecedor vertical</i>	<b>34</b>	<b>81</b>	<b>91</b>	<b>95</b>	<b>95</b>	<b>92</b>
<i>Tempo médio de aquecimento por corrida [minutos]</i>	<b>30</b>	<b>28</b>	<b>32</b>	<b>52</b>	<b>61</b>	<b>47</b>
<i>Tempo de espera na frente do forno [minutos]</i>	<b>15</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>6</b>

Tabela 8 – Resultados Comparativos da implantação das melhorias.

Pode ser observado uma melhora geral dos índices nos dois primeiros meses anteriores a mudança. Atribui-se a isto, à divulgação do projeto para o pessoal da área incluindo um treinamento sobre os benefícios da mudança, importância da utilização do aquecedor da frente do forno e procedimentos operacionais passíveis de utilização independentemente da mudança de ala.

Vê-se um índice muito bom de utilização do aquecedor da frente do forno, em torno de 95%. O índice de utilização é o percentual das corridas que aqueceram no aquecedor vertical, mesmo que tenha sido aquecido antes no aquecedor horizontal. O impacto deste aumento pode ser constatado no tempo de espera para vazamento que caiu dos 15 min anterior para aproximadamente 6 min. Este índice não representa o aumento do fator de utilização propriamente dito pois esse reflete o percentual do tempo de aquecimento utilizado no aquecedor da frente do forno em relação ao tempo total de aquecimento da panela. Conforme

dito acima, nenhuma possibilidade de maior tempo de aquecimento no aquecedor vertical se teve antes da mudança e isto está evidente nos resultados do primeiro e segundo mês anteriores a mudança expressados por 28 min e 32 min, respectivamente. Na verdade, isso só ocorreu após a implantação da mudança, constatado pelo aumento do tempo de aquecimento médio de 50 min já no primeiro mês após a mudança.



## 5 CONCLUSÕES

Tendo como proposta inicial a redução da variabilidade e o aumento do estado térmico da panela antes do vazamento, o objetivo do trabalho foi identificar os problemas, avaliar os fatores operacionais mais importantes e estabelecer os critérios que possibilitassem a minimização de seus efeitos sobre as perdas térmicas do aço. O desenvolvimento do trabalho seguiu por duas linhas: avaliação e melhoria da eficiência dos dois tipos de aquecedores e a otimização da utilização dos aquecedores de panelas.

Os resultados obtidos dos ensaios e levantamentos realizados possibilitam concluir que:

### **Avaliação e Melhoria dos Aquecedores de Panela**

- A curva de secagem obtida no primeiro ensaio mostrou que o aquecedor vertical, sem a injeção de ar auxiliar, não reproduz a curva especificada para a secagem do refratário. A nova regulagem da secagem, com injeção de 20% de ar auxiliar na combustão, reduziu a temperatura da parede em 57% em relação àquelas do primeiro ensaio, estabilizando numa temperatura média 28°C acima da temperatura objetivada. O recurso de programação do ar auxiliar existente no aquecedor vertical possibilita a regulagem do sistema de combustão para diferentes condições de operação.
- Uma diferença de 18% a mais na energia contida no refratário da panela aquecida no aquecedor horizontal mostrou uma variação excessiva entre os aquecimento dos dois tipos de aquecedores utilizados. A melhoria do aquecedor vertical foi conseguida com a alteração da temperatura final da curva de aquecimento, de 1000°C para 1100°C, reduzindo a diferença para 5%.
- As termografias demonstraram que existe homogeneidade de aquecimento das paredes e fundo das panelas nos dois aquecedores.

### **Otimização da Utilização dos Aquecedores**

Os resultados mostraram que a principal causa que impedia o aumento do tempo de aquecimento da panela antes do vazamento era a indisponibilidade da ponte rolante para o transporte da panela para o aquecedor.

A mudança de local da plataforma de selagem e a utilização da ponte rolante DE juntamente com a aplicação dos critérios de permanência do aquecimento da panela até momentos antes do vazamento, resultaram melhorias significativas como:

- Redução do tempo médio de espera da panela resfriando na frente do forno de 15 minutos para 6 minutos, confirmando a previsão de ganhos potenciais realizada sobre a situação anterior.
- Aumento do tempo de aquecimento por corrida dos anteriores 30 minutos para uma média de 50 minutos.
- Índice de utilização do aquecedor vertical em mais de 95% das corridas.

Estes indicadores comprovam que as medidas adotadas contribuíram para reduzir a variabilidade do estado térmico da panela no vazamento e conseqüentemente o controle sobre as perdas térmicas do aço no lingotamento.

Finalmente, é importante enfatizar que estas soluções se aplicam e são particulares as condições de processo da aciaria pesquisada.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se para futuros trabalhos a partir dessa dissertação os seguintes tópicos:

- ✓ Avaliar o rendimento térmico dos aquecedores e propor soluções tecnológicas para aumentar os rendimentos, tais como: recuperação do calor dos gases da combustão, selagem da tampa da panela com a borda e redução da poluição por meio de mistura combustível oxi-óleo.
- ✓ Implantação de um sistema de supervisão do processo de aquecimento e de resfriamento das panelas durante o ciclo de panela para viabilizar as regras dos padrões de aquecimento.
- ✓ Desenvolver ensaios para avaliação da descarbonetação do refratário com novas taxas de aquecimento e temperaturas finais mais altas
- ✓ Estudo com observação dos tempos de processo com a finalidade de determinar uma metodologia que possa estabelecer os critérios para a racionalização do número de panelas em operação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARMOUR, CHARLES W, JOHNSON, KENNETH A., WINN, ROBERT, PAVLACK, TERRY T. *Advantages Of Oxi-fuel Combustion Technology: Heating 400 ton Ladles At Northwestern Steel And Wire*. 52<sup>nd</sup> Electric Furnace Conference, Nashville, TN, USA 13-16 nov. 1994.
- AUSTIN, P. R.; CAMPLIN, J. M. ;HERBERTSON, J.; TAGGART, I. J. *Mathematical Modelling of Thermal Stratification and Drainage of Steel Ladles*. ISIJ International, v.32, 1992, n.2, p.196-202.
- BANDEIRA, RAUL C., LOSADA, JOSÉ CARLOS H. *Queimadores Horizontais Oxi- óleo Para Aquecimento De Painéis De Aciaria*. Contribuição Técnica à ABM para ser apresentada no Seminário sobre Aciaria – COAÇO – COREF, dezembro 1986.
- BATTLES, DONALD D. *New Technology For Ladle Heating And Drying*. 39<sup>th</sup> Electric Furnace Conference, Houston, Texas, USA, 8 – 11 december 1981.
- BRADASCHIA, CLOVIS. *Siderurgia Para Não Siderurgistas*. 1.ed,. Volume 1, ABM 1986.
- CHEN, WANG *Analysis And Improvements Of The Thermal Performance Of Ladle Heater*. China Steel Technical Report, nr. 6, 1992, pp. 117-123.
- CHRIST, F. S.; FERREIRA, N. F.; BELEZA, T. A.; VILELA, A. C. F. e BAS, J., *Melhoria dos Aquecedores de Painel da GERDAU – Aços Finos Piratini*, In: XXX Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais da ABM, Belo Horizonte, maio de 1999, p. 159-166.
- DURANCE, D., PICKES, C. A., McCREA, J. *Microwave Preheating Of High Alumina Steelmaking Ladle Refractories*. Process Technology Conference, vol. 14, Ladle Processing: Metallurgy and Operation, Orlando, Florida, USA 12-15 nov. 1995.
- FERREIRA, N. F., *Controle Da Temperatura Do Aço Líquido Em Uma Aciaria Elétrica*. Porto Alegre: 2000. Tese de Doutorado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- FERREIRA, N. F.; CHRIST, F. S.; WOLLMANN, A. M.; STROHAECKER, T. R.; VILELA, A. C. F.; BAS, J., *Estudos Térmicos na Aciaria da Aços Finos Piratini*, In: Jornadas SAM '98 – IBEROMET V, Rosário – Argentina, setembro de 1998.
- FRUEHAN, R. J. *The Making, Shaping and Treating of Steel*. 11<sup>th</sup> Edition Steelmaking and Refining Volume, Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998.
- HENSLER, JAMES M.; BATES, WILLIAM J.; RANKIN, ERROL R.; CIGNETTI, NICOLAS P. *Operational Testing Of An Electric Ladle Preheater At Copperweld Steel Company*. 45<sup>th</sup> Electric Furnace Conference, vol. 45, Chicago, Illinois, USA. 8-11 dec. 1987.
- HLINKA, J. W.; MILLER, T. W. *Temperature Loss in Liquid Steel-Refractory Systems*. Iron and Steel Engineer, Agosto de 1970, p.123-133.
- HLINKA, J.W.; CRAMB, A.W.; BRIGHT, D.H. *A model for Predicting the Thermal History of a Ladle of Steel*. Steelmaking Conference, vol. 68, Detroit, Michigan, USA, abril de 1985, p. 14-17.

- KOPSER, G.; KREM, B. Z. *New Ladle Preheat Practice*. 39<sup>th</sup> Electric Furnace Conference, Houston, Texas, USA, 8-11 de dezembro de 1981, p. 39-43.
- MINION, RICHARD L.; LECKIE, CRAIG F. *Steel Temperature Control In The Ladle In A High Productivity BOF Shop*. Proceeding of 69<sup>th</sup> Steelmaking Conference, AIME, Washington, 1986.
- MORROW, GARY D.; RUSSEL, ROBERT O. *Thermal Modeling In Melt Shop Applications: Theory And Practice*. 86<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Ceramic Society, Pittsburgh, PA. 1 de maio de 1984, (n° 23-R-84).
- OMOTANI, M. A.; HEASLIP, L. J.; McLEAN, A. *Ladle Temperature Control During Continuous Casting*. I&SM, 1983, p. 29-35.
- PERKINS, A.; ROBERTSON, T.; SMITH, D. *Improvements To Liquid Steel Temperature Control In The Ladle And Tundish*. Scaninject IV, junho de 1986, Lulea - Suécia, p.10:1-10:29.
- REES, C.; POOTS, G.; SMALL, V.J. *Thermal Rhythms in Composite Ladle Walls*. Applied Scientific Research 44, 1987, p. 111-137.
- SAHA, J.K.; AJMANI, S.K.; CHATTERJEE, A. *Mathematical Model for Determining Preheating Schedule of Dolomite Ladles in Melt Shops*. I&SM, 1991, vol.18 n°6, p. 417-422
- SCHMUCKER, T. J. WARD; ZELSON, L. S. *Oxi-fuel Ladle Preheating*. Electric Furnace Conference, vol. 46, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. 6-9 dec 1988.
- SZEKELY, J.; EVANS, W. *Radiative Heat Loss From the Surface of Molten Steel Held in a Ladle*. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, vol.245, junho de 1969, p.1149-1159.
- THORILDSSON, S. *Preheating of Ladles*. Scandinavian Journal of Metallurgy 2, 1973, p. 277-281.
- TOMAZIN, C.E.; UPTON E. A. *The effect of ladle refractories and practices on steel temperature control*. I&SM, junho-1986, p.28-34.
- VATAVUK, PAULO. *Influência Dos Tempos De Espera De Uma Panela Sobre As Perdas Térmicas Do Aço Líquido*. Contribuição Técnica a ser apresentada no Seminário de Aciaria, Refratários e Fornos Elétricos em dezembro de 1989, Rio de Janeiro / RJ.