

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

ESTUDO DAS PERDAS TÉRMICAS DE PANEIAS ENTRE O VAZAMENTO NO
FORNO ELÉTRICO À ARCO E O TRANSPORTE PARA O FORNO-PANELA

Rafael Bruch

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Modalidade Profissional,
Especialidade Siderurgia

Porto Alegre
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

ESTUDO DAS PERDAS TÉRMICAS DE PANEIAS ENTRE O VAZAMENTO NO
FORNO ELÉTRICO À ARCO E O TRANSPORTE PARA O FORNO-PANELA

Rafael Bruch
Engenheiro Metalúrgico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Dr. Ing. Antonio Cezar Faria Vilela

Banca Examinadora:

Dr. Luis Augusto Colembergue Klujso

Dr. Leonardo Barboza Trindade

Dr. Wagner Bielefeldt

Prof. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, 04 de maio de 2012.

Dedico este trabalho aos meus pais, Erhard e Eunice,
pela honra e encorajamento de sempre seguir em
frente. A Patrícia Bergesch por sempre estar ao meu
lado acreditando na minha capacidade e me apoiando
nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Concluir uma pós-graduação foi uma meta, um projeto pessoal. Qualquer projeto pessoal significativo não é possível sem a ajuda e inspiração de outras de pessoas.

Gostaria de agradecer primeiramente ao Professor Dr. Ing. Antônio Cezar Faria Vilela, pessoa que aprendi a admirar desde a minha época de graduação pela seriedade, dedicação e sinceridade com que conduziu sua orientação.

À Gerdau Riograndense, pela oportunidade de crescimento e pelo investimento na minha capacitação técnica. Ao engenheiro metalúrgico e gestor Tiago Alliatti Beleza por proporcionar e me apoiar na execução deste projeto na Aciaria da Gerdau Riograndense.

Aos colegas e engenheiros da Aciaria da Gerdau Riograndense pelo apoio, estímulo, amizade e troca de experiências técnicas e crescimento humano.

Aos mestres da Universidade Federal do Rio Grande do Sul por transmitir seus ensinamentos e conhecimentos e por dedicarem tempo aos seus alunos.

À minha amada namorada e melhor amiga Patrícia Bergesch, maior incentivadora, pelo carinho, amor e compreensão.

Muito obrigado a todos que de uma forma ou de outra colaboraram para a execução deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	03
2.1 CICLO BÁSICO DE PRODUÇÃO DE AÇO EM UMA ACIARIA ELÉTRICA.....	03
2.1.1 Forno elétrico à arco (FEA) – Refino Primário.....	03
2.1.2 Forno-Panela – Refino Secundário.....	05
2.1.3 Lingotamento do aço.....	11
2.2 IMPORTÂNCIA DO CONTROLE DA TEMPERATURA DO AÇO EM ACIARIAS.....	13
2.2.1 Solidificação.....	14
2.2.2 Segregação.....	15
2.2.3 Limpidez do aço.....	18
2.2.4 Defeitos de forma, internos e superficiais.....	19
2.2.5 Solidificação do aço na passagem da válvula - “Freezing”.....	21
2.2.6 Perfuração da pele solidificada do tarugo – “Break-out”.....	22
2.3 CICLO DE PANELAS.....	22
2.4 PERDAS TÉRMICAS NA PANELA.....	24
2.4.1 Espessura da escória.....	25
2.4.2 Tampa de panela.....	30
2.4.3 Perdas para o revestimento refratário.....	32
2.4.3.1 Tipos de materiais refratários.....	34
2.4.3.2 Influência da espessura do refratário.....	35
2.5 MATERIAIS ISOLANTES.....	38
2.6 ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA E FATOR ISOLANTE DA ESCÓRIA.....	41

2.7 ÍNDICE DE ENCHARQUE DE PANELAS.....	43
2.8 PRÉ-AQUECIMENTO DE PANELAS.....	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 LAYOUT DA ACIARIA.....	48
3.2 CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DAS PANELAS.....	50
3.3 METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DOS DADOS E DAS PERDAS TÉRMICAS.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1 PERDAS DE TEMPERATURA DOS REFRATÁRIOS DA LINHA DE ESCÓRIA DE PANELAS.....	62
4.2 COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS DE PANELAS COM E SEM REVESTIMENTO ISOLANTE.....	65
5 CONCLUSÕES.....	69
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Injeção de oxigênio pela porta de trabalho do forno elétrico à arco com a utilização de manipulador.....	05
Figura 2 - Esquema de uma estação de forno-panela.....	06
Figura 3 – Ciclo teórico de tratamento de aço comum no forno-panela.....	08
Figura 4 – Desenho esquemático de uma estrutura de solidificação típica contendo a zona coquilhada, zona colunar e equiaxial.....	14
Figura 5 – Desenho esquemático da frente de solidificação.....	16
Figura 6 – Influência da temperatura do aço na estrutura de solidificação.....	17
Figura 7 – Representação esquemática da influência da temperatura de lingotamento no índice de macroinclusões.....	19
Figura 8 – Variação da espessura da zona colunar com a temperatura de lingotamento para diversos teores de carbono.....	20
Figura 9 – Relação entre a temperatura e a viscosidade para metais líquidos.....	21
Figura 10 – Desenho esquemático do ciclo de painelas em uma aciaria contendo desgaseificador à vácuo.....	24
Figura 11 – Desenho esquemático do processo de transferência de calor através da escória.....	25
Figura 12 – Variação da temperatura do aço líquido ao longo do tempo para duas condições de espessura de escória.....	26
Figura 13 – Relação entre as perdas térmicas pela escória medidas utilizando termografia e as taxas de resfriamento do aço líquido.....	26
Figura 14 – Taxas calculadas de perdas térmicas pela escória após o vazamento na panela.....	27
Figura 15 – Influência da espessura da camada de escória sobre a evolução da temperatura do aço na panela.....	28
Figura 16 – Influência da utilização de tampa na panela (180t) sobre a evolução da temperatura do aço para diferentes condições de espessura de escória.....	29
Figura 17 – Eficiência da tampa de panela no controle da temperatura do jato.....	32

Figura 18 – Efeito do tipo e espessura do revestimento refratário sobre a evolução da temperatura do aço em uma panela de 180t.....	35
Figura 19 – Temperatura média na camada de 50mm mais próxima a área de contato do aço.....	36
Figura 20 – Energia armazenada nas camadas refratárias.....	37
Figura 21 – Variação da temperatura do aço líquido em panelas com diferentes desgastes.....	38
Figura 22 – Influência da utilização de isolamento cerâmico entre o revestimento permanente e a carcaça da panela sobre a evolução da temperatura do aço na panela.....	39
Figura 23 – Evolução da temperatura na face fria do refratário após o pré-aquecimento em panelas com e sem isolante térmico.....	40
Figura 24 – Evolução da temperatura na face quente do refratário após o pré-aquecimento em panelas com e sem isolante térmico.....	40
Figura 25 – Correntes convectivas durante o esvaziamento da panela para duas espessuras de escória.....	42
Figura 26 – Comparação dos perfis térmicos no interior das camadas refratárias de panelas com baixo tempo sem aço e panelas frias pré-aquecidas.....	44
Figura 27 – Índice de Encharque das panelas durante a espera para o vazamento..	45
Figura 28 – Comportamento da temperatura do aço e do revestimento refratário durante o período de espera para diferentes condições de pré-aquecimento.....	46
Figura 29 – Layout esquematizado da aciaria estudada destacando a localização das pontes rolantes e os aquecedores de panela.....	49
Figura 30 – Foto da panela com tampa na plataforma de lingotamento.....	50
Figura 31 – Foto do interior da panela sem os revestimentos refratários.....	50
Figura 32 – Desenho esquemático demonstrando a disposição e as dimensões das camadas refratárias da parede da panela.....	51
Figura 33 – Disposição do revestimento de trabalho na parede e no fundo da panela.....	52
Figura 34 – Disposição e identificação dos tijolos refratários da linha de escória da panela.....	52

Figura 35 – Descrição dos tipos de revestimento refratários da parede da panela destacando o revestimento isolante.....	53
Figura 36 – a) Montagem das placas isolantes na parede da panela. b) Placas isolantes montadas na panela e as tijoletas do revestimento permanente montada sobre o isolante.....	54
Figura 37 – Ilustração e dados técnicos das placas isolantes utilizadas.....	55
Figura 38 – Interior de uma panela em operação mostrando os três pontos das medidas de temperatura interna das panelas.....	56
Figura 39 – Localização dos três pontos de medição de temperatura na região da linha de escória da parede externa das panelas.....	57
Figura 40 – Histograma comparativo entre os fornos do tempo da panela aguardando o início do vazamento.....	59
Figura 41 – Histograma comparativo do tempo de transporte da panela até o forno-panela após o vazamento de aço.....	60
Figura 42 – Gráfico comparativo da perda de temperatura entre os dois fornos-panela.....	61
Figura 43 – Gráfico relacionando a perda de temperatura e o tempo de transporte da panela até o forno-panela.....	61
Figura 44 – Gráfico da perda de temperatura do refratário com relação ao tempo de espera do início do vazamento de aço.....	62
Figura 45 – Gráfico de contorno relacionando a perda de temperatura com as variáveis temperatura da panela e tempo de espera até o início do vazamento.....	63
Figura 46 – Gráfico correlacionando o consumo de energia elétrica no forno-panela com a perda de temperatura da panela.....	64
Figura 47 – Perda da temperatura dos refratários da linha de escória de panela em função do tempo de panela sem aço.....	65
Figura 48 – Temperatura da parede externa das panelas medidas na chegada no fosso de vazamento.....	67
Figura 49 – Temperatura da parede externa das panelas medidas no final do lingotamento da panela.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Perdas térmicas típicas em tratamento em panelas.....	11
Tabela 2 – Propriedades termofísicas de materiais refratários e do aço líquido.....	34
Tabela 3 – Especificação técnica dos revestimentos refratários das panelas da aciaria estudada.....	51
Tabela 4 – Comparação das temperaturas mínimas e máximas da parede externa das panelas.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

Símbolo	Descrição
°C	Graus centígrados
°C/min	Graus centígrados por minuto
C	Calor específico do aço líquido
Cm	Centímetros
Exp	Exponencial
ΔE	Diferença de espessura
FEA	Forno elétrico a arco
kJ	Quilo Joule
FP	Forno-panela
kWh/t	Quilowatt hora por tonelada
kW/m ²	Quilowatt por metro quadrado
K	Condutibilidade térmica
K	Kelvin
kg	Quilograma
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
J	Joule
LC	Lingotamento contínuo
MW	Megawatt
m ²	Metro quadrado
m/s ²	Metro por segundo ao quadrado
mm	Milímetros
min	Minutos
T	Temperatura em Kelvin
t	Tonelada

VD	Vacuum Degassing
VOD	Vacuum Oxygen Decaburization
W/s	Watt por segundo
W/m.k	Watt por metro Kelvin
%	Percentual

RESUMO

A busca de melhoria de produtos siderúrgicos leva uma atenção especial para a área de aciarias. A introdução da metalurgia da panela, e portanto no refino secundário, contribuiu fundamentalmente para o aumento da qualidade do aço produzido. Um dos efeitos foi o aumento do tempo de residência do aço na panela, o que obrigou a utilização de materiais refratários de melhor qualidade. O controle da temperatura do aço líquido ao longo do processo de produção é de fundamental importância para se atingir os requisitos de qualidade e produtividade exigidos atualmente. Com o desenvolvimento de tecnologias siderúrgicas e a busca pela eficiência energética, torna-se necessário o conhecimento e redução das perdas térmicas do aço durante todo o ciclo produtivo. Neste trabalho foram estudadas, em uma aciaria elétrica a arco, as correlações entre as perdas térmicas das panelas através do conhecimento dos tempos de espera e do tempo de transporte das panelas do forno elétrico a arco até o forno-panela, além de comparar a temperatura do revestimento refratário de panelas com e sem isolante refratário. Melhorias no ciclo de panelas foram propostas visando diminuir as perdas térmicas das panelas, otimizar o ciclo de panelas e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia elétrica do forno-panela, diminuindo os custos envolvidos durante o processo de fabricação do aço. Os resultados apresentaram significância estatística entre o consumo de energia elétrica do forno-panela e as perdas térmicas das panelas. Através dos resultados obtidos observou-se que a minimização do tempo de espera da panela antes de iniciar o vazamento e a diminuição do tempo de transporte da panela até o forno-panela são fundamentais para diminuir as perdas térmicas nas panelas.

Palavras-chave

Aciaria elétrica, aço, refino secundário, perdas térmicas, consumo de energia elétrica.

ABSTRACT

The search for improved steel products takes special attention to the meltshops. The introduction of ladle metallurgy, and therefore the secondary refining, contributed essentially to increase the quality of steel produced. One effect was to increase the residence time of the steel in the ladle, forcing the use of refractory materials of better quality. Temperature control of liquid steel during the process is of fundamental importance for achieving the requirements of quality and productivity currently required. With the development of technologies and the reach of energetic efficiency, it becomes necessary to reduce the thermal losses during the steel production cycle. In this study the correlations between the thermal losses in the ladles through the knowledge of waiting times and transport times of the ladles to the of the electric arc furnace to the ladle furnace were determined as well as a comparison between temperatures of ladle refractory lining with and without refractory insulation. Improvements in the ladle cycle were proposed to reduce the thermal losses in the ladles and to optimize the ladle cycle and, consequently, to reduce the electric energy in the ladle furnace, reducing the costs involved during the manufacturing process of steel. The results showed statistical significance between the energy consumption in the ladle furnace and heat losses in the ladles. The results obtained showed that minimizing the waiting time of the ladle before the tap and reducing transportation time of the ladle to the ladle furnace are essential to reduce the heat losses in the ladles.

Key words

Meltshop, steel, ladle refining, thermal losses, consumption of electric energy.

1. INTRODUÇÃO

Devido à demanda por produção, a partir dos anos 70, houve uma motivação da substituição do lingotamento convencional pelo lingotamento contínuo dos aços, cujo principal objetivo foi aumentar o rendimento metálico e, conseqüentemente, reduzir as perdas metálicas durante o processo. Segundo Ünal (2006), o processo de fabricação de aço desenvolveu-se muito nas últimas décadas e o aumento no controle de qualidade dos mesmos fez com que mudanças tecnológicas ocorressem na base da fabricação do aço, ou seja, no refino primário, etapa que ocorre em uma aciaria elétrica no forno elétrico. A introdução da metalurgia da panela e, portanto, do refino secundário, contribuiu fundamentalmente para o aumento da qualidade do aço produzido. Um dos efeitos foi o aumento do tempo de residência na panela, o que obrigou a utilização de materiais refratários de melhor qualidade. Com o objetivo de reduzir as perdas térmicas do aço durante todo o processo, tornou-se necessário a elevação da temperatura de vazamento do forno para a panela. Desta forma, para garantir a qualidade dos aços, os fatores que afetam o controle da temperatura devem ser investigados e entendidos de maneira que se possam atingir os níveis de qualidade adequada ao material fabricado. Nos dias de hoje, com o objetivo de reduzir as perdas térmicas das panelas torna-se necessário que o ciclo, movimentação, aquecimento e secagem, de panelas de aciaria sejam cada vez mais otimizados, mas, para isso, é fundamental que se entendam as perdas térmicas das panelas.

A análise de transferência térmica em equipamentos que possuem revestimentos refratários nas condições estacionárias e transientes é importante para profunda análise térmica em processos pirometalúrgicos, como por exemplo, a siderurgia. A teoria da transferência de calor é conhecida muito bem tornando possível prever as condições térmicas sob várias circunstâncias com uma exatidão aceitável quando são conhecidas as propriedades térmicas, além da convectividade e calor radiante do material.

Este trabalho tem como objetivo geral identificar melhorias no ciclo de panelas dolomíticas utilizadas em uma aciaria elétrica a partir de análise das perdas térmicas. O conhecimento dos tempos de espera das panelas e do tempo de transporte das

panelas do forno elétrico a arco até o forno-panela são essenciais para determinação e entendimento da perda térmica em uma aciaria.

São objetivos específicos deste trabalho determinar o tempo de espera da panela antes de receber o aço líquido do forno elétrico à arco, determinar o tempo de transporte da panela com aço líquido até o forno-panela, determinar, nos tempos citados anteriormente, as perdas térmicas bem como realizar a comparação de temperaturas do revestimento refratário de panelas com e sem isolante refratário.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLO BÁSICO DE PRODUÇÃO DE AÇO EM UMA ACIARIA ELÉTRICA

O ciclo básico de produção do aço de uma aciaria elétrica será apresentado resumidamente com o objetivo de inserir o leitor no cenário dos processos utilizados nesse tipo de aciaria. Para maiores detalhes sobre o tema, recomendam-se os seguintes autores: Chevrand (2001), Urquiza (1995), Araújo (1997), e Turkdogan (1996).

O tópico seguinte descreve a importância do controle da temperatura do aço ao longo do processo de produção de uma aciaria elétrica. Por último, são apresentadas as principais variáveis citadas na literatura que afetam as perdas térmicas na panela e a importância de seus controles dentro do processo.

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

Refino Primário: são realizadas as operações de fusão, acerto da composição química do aço sob condições oxidantes, adições de elementos de liga (ferroligas) e ajuste da temperatura de vazamento.

Refino Secundário: acerto da composição química sob condições redutoras e ajuste da temperatura de lingotamento.

Lingotamento do aço: processo pelo qual o aço fundido é solidificado em um produto semi-acabado.

2.1.1 FORNO ELÉTRICO A ARCO (FEA) – REFINO PRIMÁRIO

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

Segundo Silva (2005), 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, as quais foram abordadas por John (2011), são:

Carregamento: é feito por intermédio de cestões cheios de sucata, ferro-gusa sólido e fundentes criteriosamente distribuídos 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 química transferida à carga e acelerar a fusão de cargas mais densas, resultando numa diminuição do tempo de fusão.

Fase Oxidante: inicia-se com a injeção 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 descarburagem e a desfosforagem. Ao fim do período oxidante, a escória deve ser removida ao máximo possível, principalmente quando houver a possibilidade de reversão do fósforo para o banho na fase redutora que normalmente se segue. A conclusão desta etapa se dá com o acerto da temperatura do banho e vazamento do aço para a panela refratária. A injeção de oxigênio nos fornos elétricos é necessária para que ocorram alguns fenômenos, como por exemplo, a oxidação de alguns elementos químicos da sucata, formação de escória espumante, associada à adição de carbono pela carga ou por injetores, além de contribuir no aproveitamento energético das reações que ocorrem de maneira exotérmica. O mecanismo de injeção de oxigênio em um forno elétrico pode ser realizado de diversas maneiras, inclusive de maneira manual, com manipuladores por tubos consumíveis (Figura 1) ou, com de lanças supersônicas refrigeradas a água, ou ainda através de injetoras posicionadas nas laterais do forno.



Figura 1 - Injeção de oxigênio pela porta de trabalho do forno elétrico à arco com a utilização de manipulador. Fonte: Gerdau Riograndense

2.1.2 FORNO-PANELA – REFINO SECUNDÁRIO

O Refino Secundário é uma etapa de ajuste de composição química e temperatura do aço. Nesta etapa são realizadas operações de injeção de gases inertes para homogeneização do banho, ajustes térmicos da corrida, operações de vácuo para retirada de gases em solução no banho metálico e adições de correção da composição química da corrida. As operações envolvidas durante o processo do refino secundário são realizadas em diferentes equipamentos: utiliza-se um forno-panela e, no caso de aços especiais, um desgaseificador a vácuo tipo VD, e, dependendo da qualidade do aço a ser fabricado utiliza-se também o VOD, sendo estes últimos não explorado neste trabalho.

O refino secundário do aço pode ser realizado através de processos de aquecimento por reações químicas ou através da utilização de energia elétrica, como é o caso do forno-panela. No Brasil, o forno-panela é o equipamento mais utilizado para a realização deste processo.

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 consiste basicamente por uma abóbada metálica com quatro furos, sendo três para os eletrodos de grafita e um para adição de ligas e amostragem, um sistema elétrico cujo equipamento principal é um transformador e um sistema de transporte denominado *trolley*. No fundo da panela existe um sistema de agitação do aço que pode ser realizado através de borbulhamento de gás inerte, onde comumente se utiliza um plugue 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. A Figura 2 é uma representação esquemática do sistema do forno-panela.

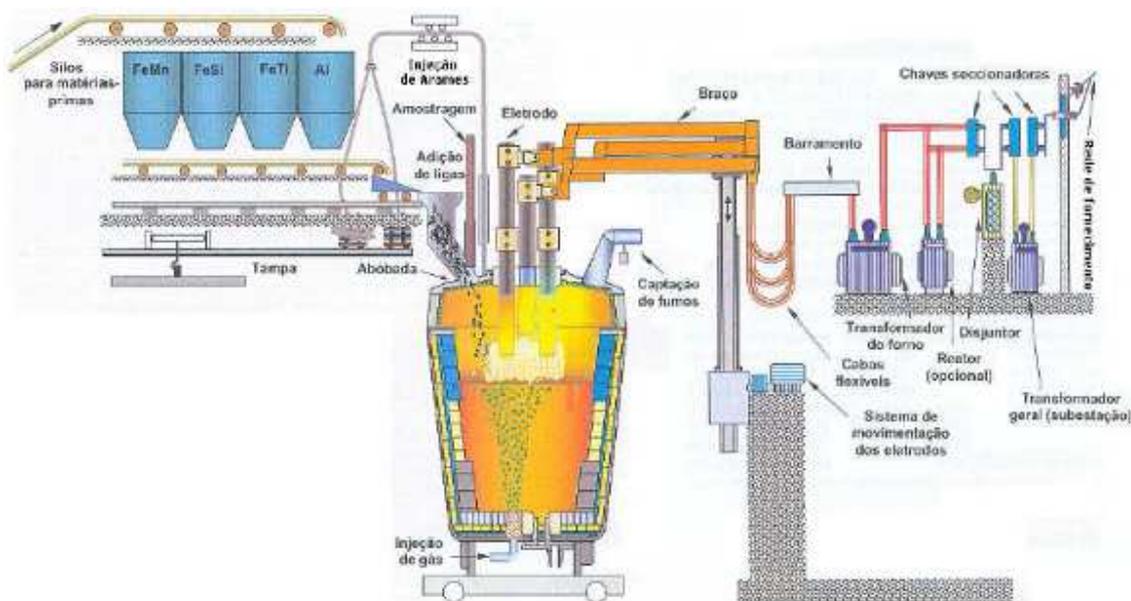


Figura 2 – Esquema de uma estação de forno-panela. Fonte: Rizzo 2006

As principais operações realizadas no forno-panela são:

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

À exceção do enxofre e oxigênio, todos os elementos químicos são liberados pelo forno elétrico com um valor um pouco abaixo da faixa da composição química

objetivada do aço. Para isso, grande parte das ligas utilizadas no acerto da composição química é adicionada no forno elétrico durante o vazamento do aço para a panela. Deste modo, apenas o acerto refinado é feito no forno-panela.

Finalizado o vazamento de aço do forno elétrico para a panela, uma ponte rolante, por exemplo, transporta a panela com o aço ao *trolley* do forno-panela. Este se desloca para abaixo da abóbada a qual é baixada, iniciando o processo de aquecimento através do arco elétrico formado entre eletrodos e banho. No início do aquecimento, às vezes é necessário adicionar cal para adequar o volume de escória na panela, impedindo a exposição do arco elétrico e promovendo a troca térmica. A escória é também responsável por diminuir as perdas térmicas do aço e captar as inclusões existentes. A etapa de aquecimento dura aproximadamente dez minutos, dependendo do tipo do aço a ser produzido. Entretanto, nos primeiros minutos, caso a panela não esteja totalmente encharcada termicamente e havendo grandes adições de massa de cal, a taxa de aquecimento do aço é mais baixa (Rizzo 2006).

Como o aquecimento do aço no forno-panela ocorre de cima para baixo, o aço em contato com a escória tende a ficar com uma temperatura mais elevada. Assim, durante todo o processo do forno-panela, um gás de agitação (argônio ou nitrogênio) é injetado através de plugues porosos localizados na base da panela, com o objetivo de homogeneizar a temperatura do aço e evitar um desgaste excessivo do refratário na linha de escória. Para se evitar riscos de transbordamentos e superaquecimento da abóbada, no forno-panela procura-se operar com borda livre na faixa de 200 mm.

Finalizada a etapa de aquecimento, é realizada uma amostragem do aço para cálculo de correção da composição química do aço. Inicia-se então a etapa de refino, com a adição de ferrosliga e/ou metais puros além de desoxidantes e fluxantes. Nesta etapa, o tempo de aquecimento depende da temperatura objetivada de liberação do aço para o lingotamento contínuo. As ligas adicionadas têm o objetivo de atingir a faixa de análise química requerida. O argônio, injetado pelo fundo da panela durante toda a elaboração do refino do aço, visa flotar as inclusões para a escória e homogeneizar a temperatura e a composição química do aço. Durante todo o processo, várias medições de temperatura são realizadas. No entanto, para realização destas medições, é

necessário subir os eletrodos, abrir uma portinhola e descer a lança de medição, gerando aproximadamente um minuto de forno desligado.

Para concluir o processo, uma amostra de aço é retirada e a panela é liberada para o lingotamento contínuo. A figura 3 representa o ciclo teórico de tratamento de um aço comum no forno-panela cujo tempo total de produção é superior a 40 minutos.

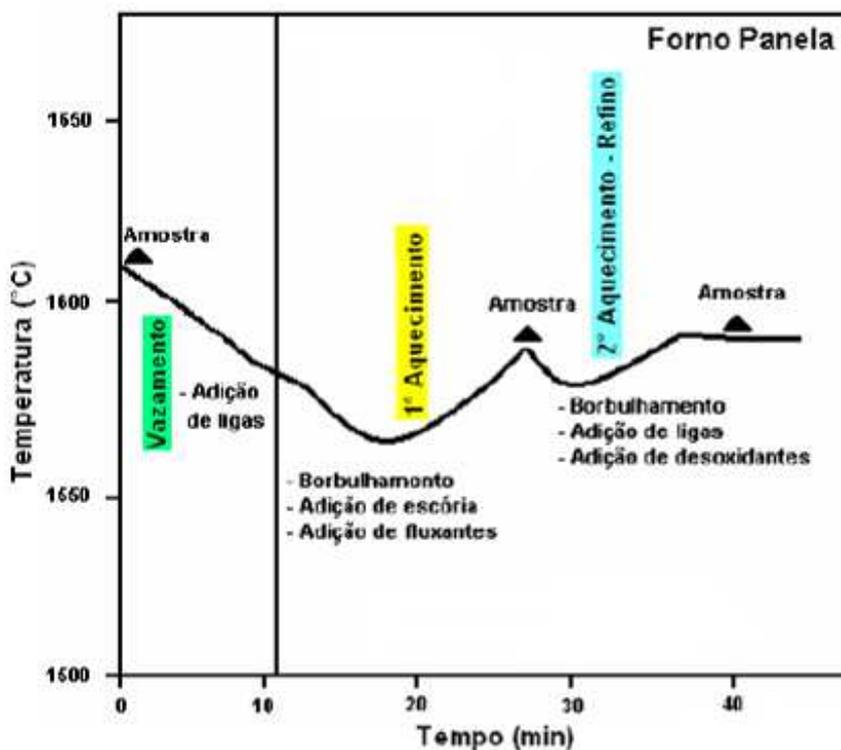


Figura 3 – Ciclo teórico de tratamento de aço comum no forno-panela. Fonte: Rizzo (2006)

O grande diferencial do forno-panela reside na facilidade de elevação e manutenção da temperatura do metal líquido. Entretanto, como o aquecimento é feito pela transmissão de calor do arco elétrico para a escória e desta para a superfície do banho metálico, este fato limita a taxa de aquecimento do aço à capacidade de renovação do mesmo na superfície. Desta forma, o controle da agitação causada pela injeção de argônio ou nitrogênio é de grande importância, pois uma agitação excessiva poderá provocar a exposição do aço à atmosfera, ocasionando forte oxidação do banho e deterioração da qualidade do aço. Por outro lado, uma agitação insuficiente pode

ocasionar desgaste do refratário na linha de escória, havendo risco de furar a panela e vazarem o aço líquido. Por isto as taxas de aquecimento alcançam em média 3,5 a 5,0 °C/min, podendo chegar, em alguns casos, a 6,0°C/min.

A variação da taxa de aquecimento está ligada também à variação da potência elétrica utilizada. A alteração desta potência é realizada alterando-se a tensão no secundário do transformador. No forno-panela, existem *taps* de potência que podem ser utilizados de acordo com a potência desejada. A seleção de um *tap* implica na eliminação ou inclusão de enrolamentos da bobina do primário do transformador, mudando a razão do mesmo. Desta forma, obtém-se uma menor ou maior tensão no secundário. Assim, quanto menor o *tap*, maior a potência no secundário e maior a taxa de aquecimento do forno-panela (Ribeiro, Quintão, & Cruz 2005).

A energia elétrica consumida durante o processo do forno-panela é produto da potência ativa pelo tempo de forno ligado nesta potência. Já a energia perdida durante o tratamento do forno-panela é constituída de três componentes principais: perdas térmicas para a abóbada e eletrodos, perdas por transferência de calor na panela e perdas térmicas para escória, ligas e fundentes.

As perdas por radiação na superfície do banho dependem da temperatura da escória e do estado térmico da abóbada e eletrodos. Já as perdas térmicas por transferência de calor na panela podem ser divididas em dois grupos: perdas por convecção e perdas por condução. Um outro fator que deve ser levado em consideração na determinação das perdas térmicas na panela é o estado térmico da mesma, que é definido como índice de encharque da panela que será visto posteriormente.

As perdas térmicas para escória, ligas e fundentes podem ser agrupadas em: energia gasta na fusão e aquecimento da escória existente e fundentes adicionados, energia gasta na fusão e aquecimento das ligas, e energia de dissolução, podendo ser endotérmica ou exotérmica.

Como o cálculo das perdas do processo do forno-panela é de difícil implementação devido ao mapeamento de todas as contribuições existentes para o balanço térmico, é comum optar-se por um balanço térmico global, que leva em conta as seguintes variáveis:

- qualidade do aço (composição química do aço);
- massa de aço (kg);
- tempo previsto para o tratamento (minutos);
- temperatura inicial do aço (°C);
- temperatura objetivada do aço (°C);
- massa das ligas adicionadas (kg);
- espessura da escória (cm);
- estado térmico da panela;
- vida da panela;
- estado térmico da abóbada.

No entanto, este balanço global apresenta erros, pois depende das condições da escória e do tempo decorrido entre dois tratamentos no forno-panela. Um balanço térmico global foi apresentado por Unal (2006).

Segundo *Szekely et al.* (1988), para se analisar as perdas ocorridas durante o processo de tratamento do aço no forno-panela, devem-se considerar os seguintes itens:

- Perda térmica do aço com o meio ambiente, principalmente com a parede da panela, enquanto o aço líquido estiver na panela.
- Perda por radiação com a superfície enquanto houver agitação do aço através da injeção de gases.
- Energia adicionada ao banho através do uso do arco elétrico.

Das perdas citadas, apenas a perda devido à agitação do banho não tinha sido considerada no cálculo do balanço térmico global. De acordo com *Szekely et al.* (1988), durante o processo de agitação do banho, a perda térmica pode ser maior, caso haja distúrbios causados na escória. Assim, um valor preciso desta perda é muito difícil de ser definido. No entanto, a tabela 1, desenvolvida por *Szekely et al.* (1988), mostra valores típicos das perdas para alguns tratamentos em panela.

Tabela 1 – Perdas térmicas típicas em tratamento em panelas. Fonte: Szekely et al. 1988)

Tratamento	Valor
Espera, sem agitação na panela	1°C/min
Borbulhamento de gases	2°C/min

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, ou diretamente para a estação de lingotamento do aço.

2.1.3 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.

Durante o último quarto do século XX, o método tradicional de converter aço líquido em sólido mudou drasticamente (INTERNACIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1986). O método tradicional, conhecido como lingotamento convencional, consiste do vazamento do aço da panela direta ou indiretamente, em moldes individuais, onde eram mantidos até sua completa solidificação no formato de lingotes. A explicação para sua intensa aplicação se deve à simplicidade da operação e a um mínimo controle da temperatura de lingotamento.

A concepção inicial do projeto de lingotar continuamente o metal surgiu na metade do século XIX, concebida por G.E Sellers (1840), J.Laing (1843) e Henry Bessemer (1846), que somente puderam aplicá-la no lingotamento de metais não ferrosos, com baixo ponto de fusão. O aço ainda era um desafio, pois as temperaturas de trabalho eram altas e o material de baixa condutividade térmica. A patente sobre

lingotamento contínuo de aço de Bessemer é de 1846 (INTERNACIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1986).

R.M Daelen, em 1887, propôs a possibilidade de solidificar o aço usando água de resfriamento no molde, abrindo o topo e sua base. Ele visualizou um processo em que um jato de aço líquido era lançado verticalmente dentro de um molde aberto e passava por sistema de resfriamento. Em 1933 Siegfried Junghans patenteou um sistema de oscilação do molde, fazendo com que o processo fosse utilizado em larga escala. Somente após a Segunda Guerra Mundial, uma planta piloto iniciou a produção contínua de aço; a primeira máquina construída foi uma máquina vertical instalada na Inglaterra em 1946, para produção de tarugos. A partir daí, uma série de outras máquinas iniciaram a produção, e cada uma delas apresentava inovações que impulsionavam cada vez mais o processo, tornando-o mais atraente e competitivo em relação ao processo convencional (INTERNACIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 1986).

No Brasil, o processo de lingotamento contínuo foi introduzido pela Companhia Riograndense em 1960, com uma máquina de tarugos de dois veios, seguida pela siderúrgica Dedini, em 1968, com máquina de tarugos de três veios (Valadares e Bezerra, 2002).

Logo, o lingotamento contínuo, que é a última etapa do processo de fabricação do aço na aciaria, possui como característica básica a solidificação contínua do aço líquido num molde com o formato de seção mais próximo e adequado ao processo de conformação mecânica que vai gerar o produto acabado final. A continuidade do processo é obtida pelo sequenciamento de corridas (panelas) 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, blocos, placas ou pré-formas.

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 das 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.

Apesar das vantagens supracitadas, o lingotamento convencional é ainda utilizado atualmente em usinas que produzem aços especiais, ou semi-acabados para a produção de produtos planos.

2.2 IMPORTÂNCIA DO CONTROLE DA TEMPERATURA DO AÇO EM ACIARIAS

A substituição do lingotamento convencional para o lingotamento contínuo cresceu substancialmente a partir dos anos 70, segundo Reis e Chevrant (1998). Isso foi motivado inicialmente pela necessidade de aumentar o rendimento metálico, ou seja, reduzir as perdas do processo. Ainda segundo os autores, a exigência de controle de tempo, temperatura e composição química fizeram com que houvessem desenvolvimentos também na metalurgia primária e secundária. A temperatura influi nas reações químicas que ocorrem entre o aço líquido e a escória e, principalmente, com os materiais refratários. Os fenômenos físicos relacionados ao escoamento do aço também são influenciados pela temperatura (Ferreira, 2000). Para garantir a qualidade dos aços o controle da temperatura é fundamental.

2.2.1 SOLIDIFICAÇÃO

O conteúdo deste tópico é uma breve compilação do assunto, sendo que maiores detalhes podem ser encontrados em Ohno (1988) e Matos et al. (1983).

Em uma aciaria a temperatura exerce grande influência na solidificação do aço dentro do molde do lingotamento contínuo. Devido ao grande gradiente térmico, assim que o aço entra no molde, forma-se uma zona coquilhada constituída de dendritas finas próximas da superfície. Então uma zona colunar é formada, onde as dendritas crescem quase que perpendicularmente à superfície da peça lingotada. Uma terceira zona é, então, formada na região central da seção lingotada. Nesta região, as dendritas estão aleatoriamente orientadas ou distribuídas em grãos equiaxiais.

A estrutura de solidificação, que compreende as três zonas descritas acima, pode ser visualizada pela figura 4. Esta estrutura influencia significativamente a qualidade do produto lingotado, sendo a estrutura colunar bastante sensível à formação de defeitos e a macrosegregações (Szekeres, 2005).

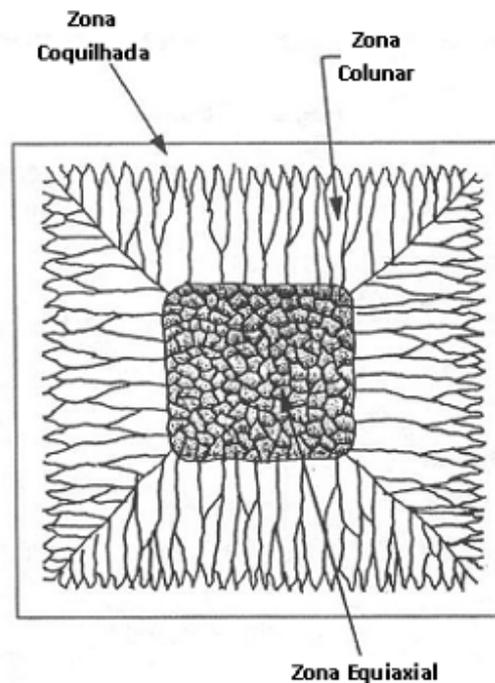


Figura 4 - Desenho esquemático de uma estrutura de solidificação típica contendo a zona coquilhada, zona colunar e equiaxial. Fonte: Szekeres (2005)

Como apontam Brimacombe *et al* (1978), o controle do superaquecimento do aço líquido é vital para se atingir uma estrutura predominantemente equiaxial e boa qualidade interna. Segundo Perkins *et al* (1986), quando existem grandes gradientes de temperatura logo após a frente de solidificação, a zona colunar se desenvolve. Ainda segundo os mesmos autores, uma forte correlação entre a temperatura do distribuidor e o tamanho da zona equiaxial foi confirmada em trabalhos subsequentes.

2.2.2 SEGREGAÇÃO

Algumas impurezas comportam-se de maneira diferente, conforme o estado em que se encontra o metal (sólido ou líquido). Certas impurezas são menos solúveis no estado sólido que no estado líquido.

No caso de uma impureza ser menos solúvel no estado sólido, estas vão acompanhando o metal líquido remanescente à medida que a solidificação se processa, indo acumular-se na última seção solidificada. A concentração de impurezas constitui o fenômeno conhecido como segregação.

A segregação pode ser minimizada pelo rigoroso controle da composição química e/ou da velocidade de resfriamento. Devido à limitação de solubilidade de elementos de liga no aço, durante o resfriamento e solidificação, estes são segregados para a porção líquida ainda não solidificada. Este efeito está esquematizado na Figura 5, segundo Szekeres (2005).

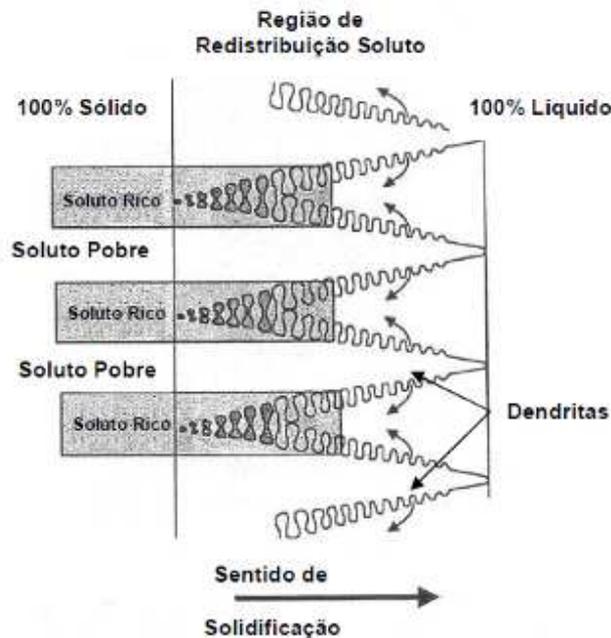


Figura 5 - Desenho esquemático da frente de solidificação. Fonte: Szekeres (2005)

A macrosegregação está relacionada com o aumento da zona colunar provocada por elevados superaquecimentos do aço no distribuidor. Segundo Perkins *et al* (1986), foi evidenciada a correlação entre o tamanho da zona equiaxial e a segregação de enxofre e manganês. Afirmam ainda que o superaquecimento tenha efeito direto na segregação. Em estudo para avaliar as variáveis de processo que influenciam na estrutura de produtos solidificados, Brimacombe (1978) discute o efeito do superaquecimento na estrutura de solidificação e na segregação de carbono. Este efeito é ilustrado na figura 6.

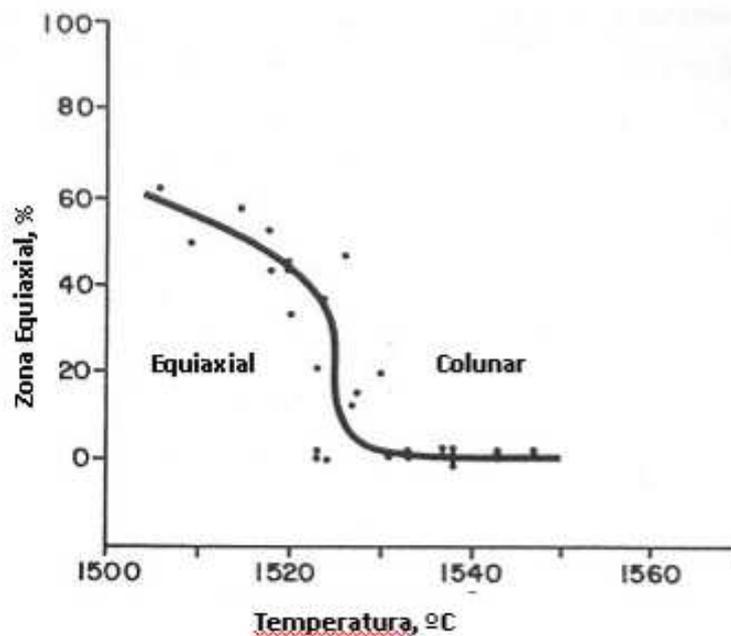


Figura 6 - Influência da temperatura do aço na estrutura de solidificação. Fonte: Brimacombe (1978).

A microsegregação se deve ao enriquecimento interdendritico e está sempre presente no produto solidificado, quando se considera aços comerciais.

Ainda segundo Matos *et al* (1983), a segregação de elementos como carbono, fósforo, enxofre e manganês ocorre em micro e macro escalas durante o processo de solidificação. Conforme a figura 5, a microsegregação é a presença de uma fase rica em soluto entre as dendritas provocando uma queda na resistência do material, tendo como consequência o aparecimento de trincas. Por outro lado, a macrosegregação é uma fase não uniforme e tende ser maior no meio do tarugo. Como consequência, têm-se a não uniformidade nas propriedades mecânicas e porosidades superficiais.

Como observado, o controle da temperatura é fundamental para uma melhora na qualidade do produto final.

2.2.3 LIMPIDEZ DO AÇO

Matos et al (1983) apontam que o nível de limpidez do aço é um parâmetro de qualidade que indica as características de desempenho e processamento do material, a qual inclui sua temperatura de processamento. O índice de limpidez é caracterizado pela presença de fases não metálicas na matriz da estrutura do aço, como por exemplo: óxidos, sulfetos e oxissulfetos, os quais são denominados inclusões.

A geração e eliminação das inclusões do aço líquido ocorrem desde o princípio do processo de fabricação do aço e se estendem até o processo de solidificação dentro do molde. As inclusões são inicialmente geradas no refino primário, podendo ser transferidas à panela durante o vazamento através da passagem de escória. Na panela e no distribuidor, as inclusões são geradas devido à exposição do aço, promovendo a reoxidação, pela erosão dos refratários, pelas contaminações das adições. O controle da limpidez do aço passa pelo controle de passagem de escória do forno para a panela, pela eliminação da reoxidação, pela disponibilidade do tempo de processamento para possibilitar a flotação das inclusões (livre ou forçada com injeção de gás inerte), alterações na composição química e viscosidade da escória, utilização de modificadores de fluxo no distribuidor, entre outros controles. Maiores detalhes sobre o assunto podem ser encontrados em Bielefeldt (2009).

Como mostra a figura 7, existe uma grande influência da temperatura de lingotamento dos aços na limpidez dos mesmos. O aumento do índice de inclusões em baixas temperaturas é devido ao incremento de viscosidade do aço, o que dificulta a flotação das inclusões. Já em altas temperaturas, se deve ao aumento da cinética das reações com refratários. Percebe-se que existe uma temperatura adequada para o lingotamento do aço com índices de inclusões aceitáveis em termos de qualidade do produto.

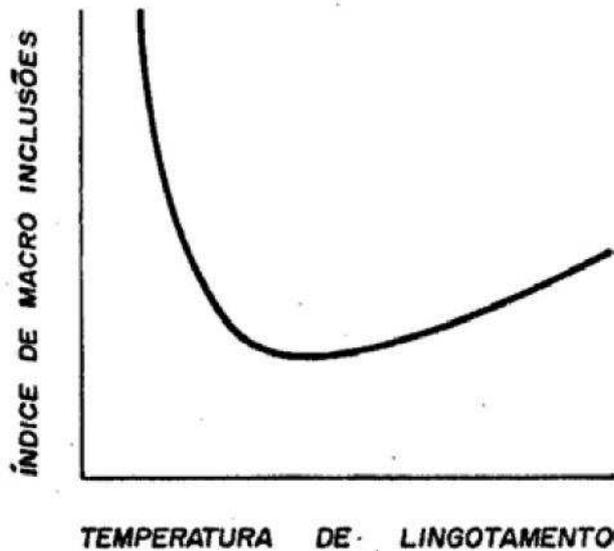


Figura 7 – Representação esquemática da influência da temperatura de lingotamento no índice de macroinclusões. Fonte: Matos *et al* (1983)

Segundo Guzela (1985), baixas temperaturas de lingotamento incrementam o índice de inclusões devido à formação de uma zona pastosa na parte inferior de lingotes produzidos pelo método convencional. São também bem conhecidos os problemas relacionados com a obstrução das válvulas do lingotamento contínuo, particularmente em aços de baixo teor de carbono acalmados ao alumínio. Perkins *et al* (1986) relatam que temperaturas de lingotamento mais elevadas são praticadas para reduzir a ocorrência de obstrução de válvulas. O controle da temperatura do distribuidor ajuda na manutenção de uma janela suficiente para lingotamento de aços acalmados ao alumínio. Trindade (2002) observou que o uso de agitadores eletromagnéticos reduz a segregação no aço, além de contribuir para remoção de inclusões.

2.2.4 DEFEITOS DE FORMA, INTERNOS E SUPERFICIAIS

A deformação da seção é um dos principais problemas do lingotamento de tarugos e blocos pequenos. Tanto a diferença entre as diagonais (romboidade) quanto a convexidade são normalmente defeitos não reconcionáveis, levando ao sucateamento das peças nas quais se apresentam. Entre diversos outros fatores, a

temperatura de lingotamento contribui para o aparecimento de romboidade e convexidade em tarugos de lingotamento contínuo, como descrito por Brimacombe *et al* (1978). Finardi *et al* (1981) também relatam a influência da temperatura de lingotamento no aparecimento de defeitos de forma em tarugos.

Defeitos na matéria-prima para as laminações geralmente causam problemas nos produtos laminados. Trincas internas mais severas podem abrir durante a laminação, gerando sucata e parada do laminador. Mesmo que detectados previamente, estes defeitos requerem acondicionamento ou sucateamento, levando a perda de produtividade e rendimento. Diversos trabalhos (Brimacombe *et al* (1977), Brimacombe *et al* (1978) e Konishi *et al* (2002), Fernandes (2005)) encontrados na literatura discutem os fatores que afetam a formação de defeitos internos e superficiais em produtos do lingotamento contínuo. Nestes estudos, é geralmente um consenso que a alta temperatura de lingotamento é um dos fatores responsáveis pelo aparecimento de diversos tipos de trincas internas e superficiais, como relata Brimacombe *et al* (1977).

As trincas internas a meio raio são favorecidas ou suprimidas dependendo da estrutura do produto solidificado. Altas temperaturas de lingotamento favorecem a formação da zona colunar, como pode ser visto na figura 8.

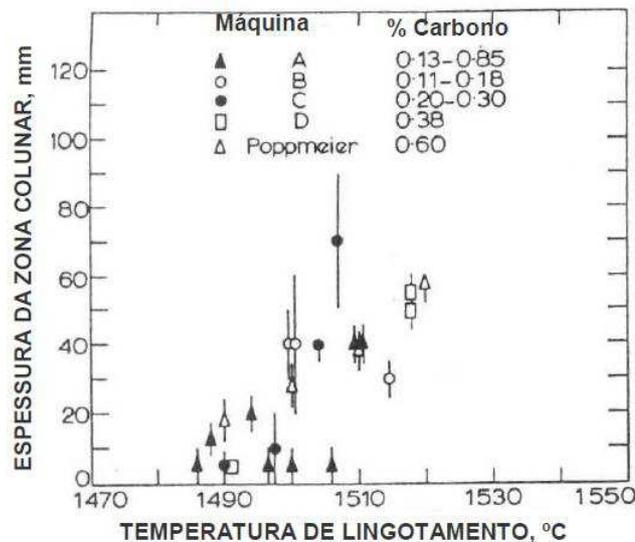


Figura 8 – Variação da espessura da zona colunar com a temperatura de lingotamento para diversos teores de carbono. Fonte: Brimacombe *et al* (1977)

Trincas a meio raio se formam muito mais facilmente entre as dendritas da zona colunar, que crescem perpendicularmente às tensões existentes, do que na zona de grãos equiaxiais.

2.2.5 SOLIDIFICAÇÃO DO AÇO NA PASSAGEM DA VÁLVULA – “FREEZING”

Segundo Matos *et al* (1983), a viscosidade dos metais cai exponencialmente com a temperatura, como pode ser visualizado na figura 9

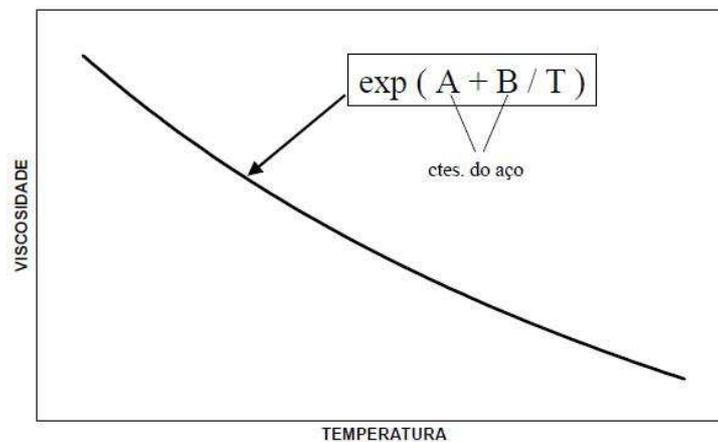


Figura 9 – Relação entre a temperatura e a viscosidade para metais líquidos. Fonte:
Matos *et al* (1983)

O aço líquido dentro do distribuidor deve ter uma viscosidade adequada o suficiente para permitir a transferência para o molde sem que ocorra a solidificação do aço na passagem das válvulas, fenômeno conhecido de “freezing”. Este fenômeno geralmente ocorre no início do lingotamento e pode ter como causas: temperatura do aço baixa, aquecimento inadequado do distribuidor, tempo de abertura da válvula muito longo. Este fenômeno ocorre unicamente pela baixa temperatura do aço dentro do distribuidor e isso pode ser causado pelas excessivas perdas térmicas dentro do distribuidor devido a ausência de pós, por exemplo, ou então pela queda progressiva da temperatura de saída da panela.

2.2.6 PERFURAÇÃO DA PELE SOLIDIFICADA DO TARUGO – “BREAK-OUT”

A pele solidificada pode ser rompida após a saída do molde, ocorrendo o derramamento da coluna de aço líquido do interior do tarugo, ocasionando a parada do veio. Este fenômeno é chamado de “break-out” ou perfuração e tem sua incidência aumentada por temperaturas de lingotamento elevadas, devido a redução da espessura de pele solidificada. Segundo Irving (1993), a redução da velocidade de lingotamento em temperaturas elevadas aumenta o tempo de permanência de aço no interior do molde, aumentando, conseqüentemente, a espessura da pele solidificada, reduzindo as chances deste problema ocorrer.

Tanto o “freezing” quanto o “break-out” causam a perda do veio, o que pode significar a parada da máquina ou o aumento do tempo de lingotamento, diminuindo a produtividade e prejudicando a qualidade do aço que resta ser lingotado, pois o mesmo é realizado em condições fora do ideal. Além do atraso de produção devido ao tempo para realizar a substituição do distribuidor ou aquecimento do mesmo, perde-se seqüência das corridas, ocorre um aumento do consumo de material refratário, sucateamento do aço que fica no interior do distribuidor, retorno de aço para o reaquecimento no forno-panela ou no forno elétrico, além de implicar na maior exposição aos riscos de segurança operacional.

2.3 CICLO DE PANELAS

Segundo Lopes (2006), o ciclo de uma panela de aciaria é composto por uma seqüência de operações que podem ser agrupadas em duas etapas. A primeira consiste no período em que a panela contém o aço líquido (panela cheia). A segunda se refere ao período em que a panela permanece vazia, aguardando o vazamento da próxima corrida. Os períodos de vazamento do aço para a panela e de lingotamento são compostos de ambas as etapas descritas acima. Este ciclo típico está esquematizado na figura 10.

Neste trabalho, adotou-se 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 panela e termina quando o aço é totalmente transferido para o distribuidor no lingotamento contínuo.

Compreende as seguintes etapas:

- Vazamento do aço do FEA;
- Forno-panela;
- Desgaseificação a vácuo (por exemplo: para aços especiais);
- Lingotamento contínuo.

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

- Tempos de transporte sem aço;
- Tempo de manutenção refratária;
- Tempo de aquecimento;
- Tempo de espera para vazamento.

Como condição para o aquecimento, as panelas podem ser classificadas como novas ou do ciclo de operação. As panelas novas se caracterizam por estarem frias devido à montagem total ou parcial do material refratário. Estas panelas precisam ser aquecidas de maneiras diferentes antes de entrarem para o ciclo do aço. Já as panelas que estão no ciclo não estão frias devido ao recente contato com o aço líquido, necessitando ou não, dependendo do tempo do processo, ser aquecidas antes de entrarem novamente no ciclo de operação.

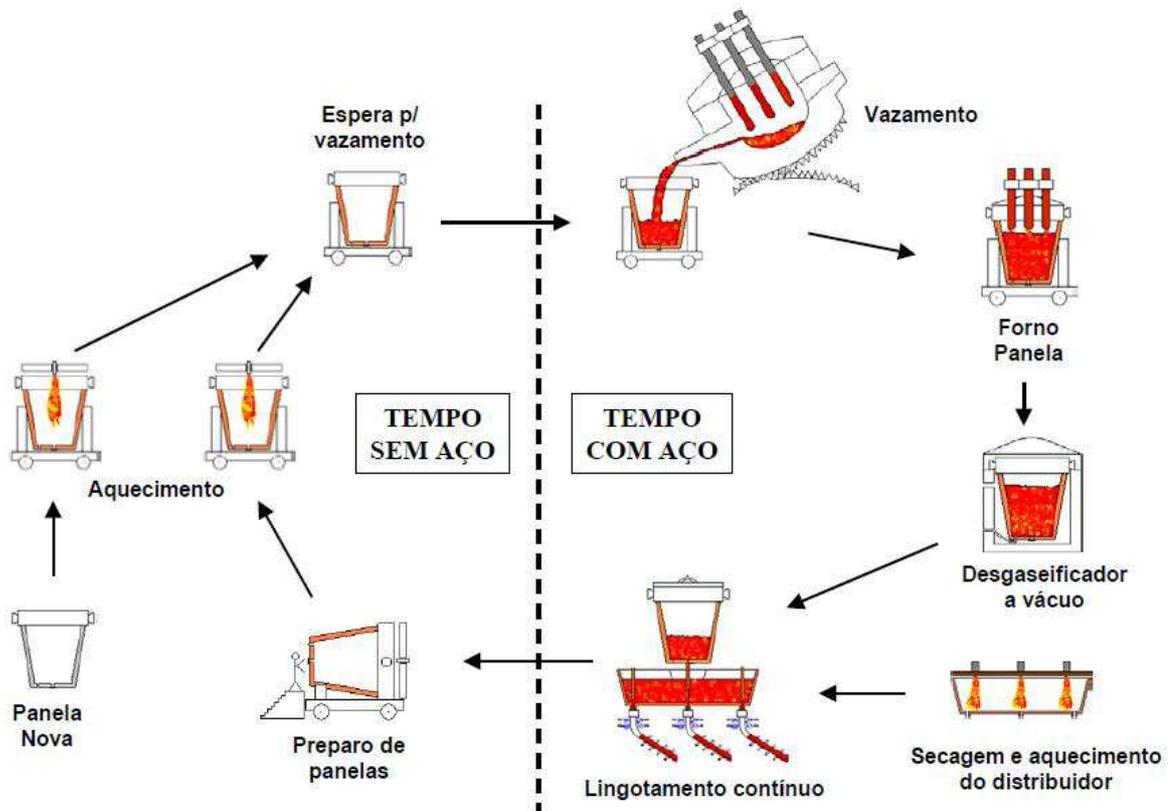


Figura 10 – Desenho esquemático do ciclo de painelas em uma aciaria contendo degaseificador à vácuo. Fonte: Ferreira (2000).

2.4 PERDAS TÉRMICAS NA PANELA

A escória proporciona uma camada isolante na superfície do aço líquido, prevenindo perdas por radiação direta do aço, além de proteger contra reoxidação.

Como descrito por Omotani *et al* (1983), imediatamente após o vazamento do aço na painela, existe uma camada de escória líquida cobrindo o metal. Como o calor é transferido mais rápido do topo da escória para a atmosfera que o calor possa ser suprido da escória e/ou aço existente abaixo, o topo da escória começa a se solidificar. Este processo, representado esquematicamente pela figura 11, continua até que o estado estacionário seja atingido. Então, o calor é conduzido através da camada de escória e transferido para o ambiente por radiação e convecção.

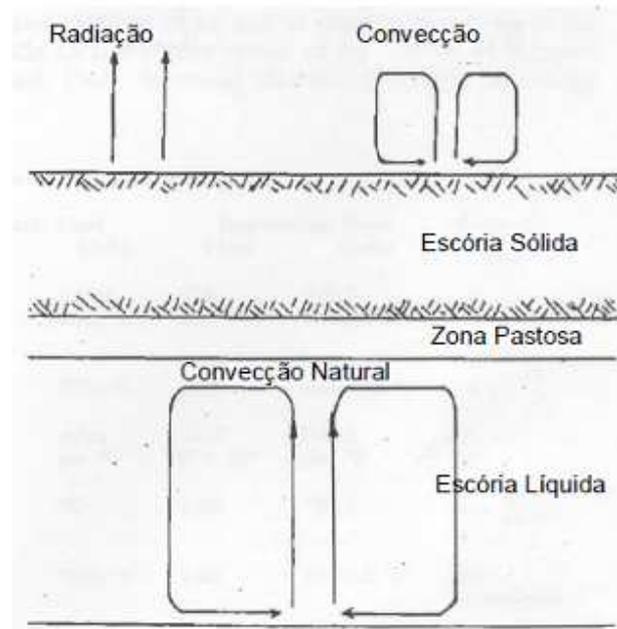


Figura 11 – Desenho esquemático do processo de transferência de calor através da escória. Fonte: Omotani *et al* (1983)

Otomani *et al.* (1983) demonstraram que com o contato do aço líquido com as paredes do refratárias da panela promovem uma perda térmica muito elevada. Essas perdas elevadas são percebidas principalmente durante o transporte da panela até o forno-panela. Outra perda significativa durante este transporte ocorre pelo topo da panela e, por isso, é recomendável a constituição rápida de uma camada de escória. Devido a todas estas perdas, principalmente para as camadas refratárias, existe uma queda muito grande de temperatura do aço desde o vazamento até a chegada no forno-panela.

2.4.1 ESPESSURA DA ESCÓRIA

Tetrault *et al* (2004) investigaram o efeito da espessura de escória nas perdas térmicas do aço. Através de modelo termofluidodinâmico, os autores compararam um ciclo de produção com uma camada fina de escória e outro com uma camada espessa de escória. Como mostra a figura 12, a temperatura do aço líquido cai a uma mesma taxa nos primeiros dez minutos para ambos os casos (camada fina e camada espessa

de escória). Após este período, a taxa de queda de temperatura diminui para o caso com escória mais espessa.

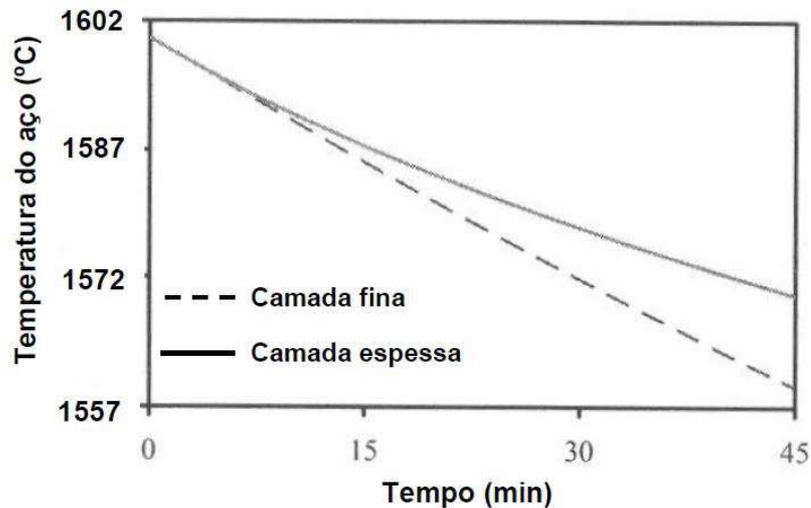


Figura 12 – Variação da temperatura do aço líquido ao longo do tempo para duas condições de espessura de escória. Fonte: Tetrault *et al* (2004)

Experimentalmente, Barber *et al.* (1995) quantificaram as perdas através da escória a partir da temperatura média da cobertura do aço com a técnica de termografia. Essas perdas foram relacionadas com as taxas de resfriamento do aço calculadas a partir das medidas realizadas com termopares de imersão. Com isso, estabeleceu-se uma relação entre a perda térmica pelo topo da panela com as taxas de resfriamento do aço líquido, conforme a figura 13.

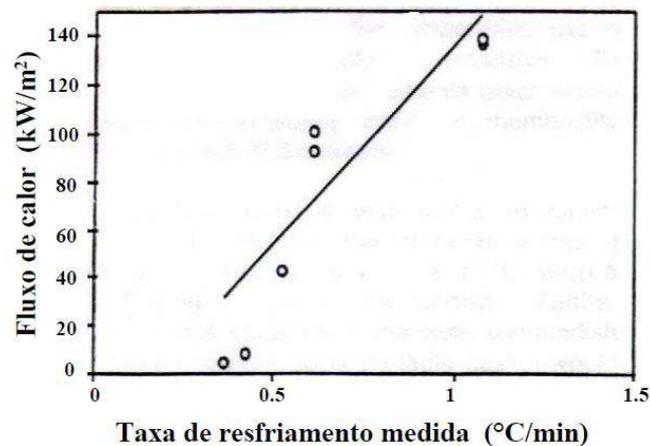


Figura 13 – Relação entre as perdas térmicas pela escória medidas utilizando termografia e as taxas de resfriamento do aço líquido. Fonte: Barber *et al* (1995)

Estas perdas térmicas pelo topo, conforme descrito anteriormente, estão relacionadas com a espessura de escória que existe sobre o aço, utilização de tampa sobre a panela, utilização de pós de cobertura, entre outros fatores.

Novamente Barber *et al* (1995) quantificaram as perdas térmicas utilizando um modelo térmico para as perdas pelo topo em função da altura da escória. A figura 14 mostra a alteração nas perdas térmicas após o vazamento considerando 50 e 75 mm de espessura de escória que atingem o equilíbrio de 125 kW/m² e 96 kW/m², respectivamente.

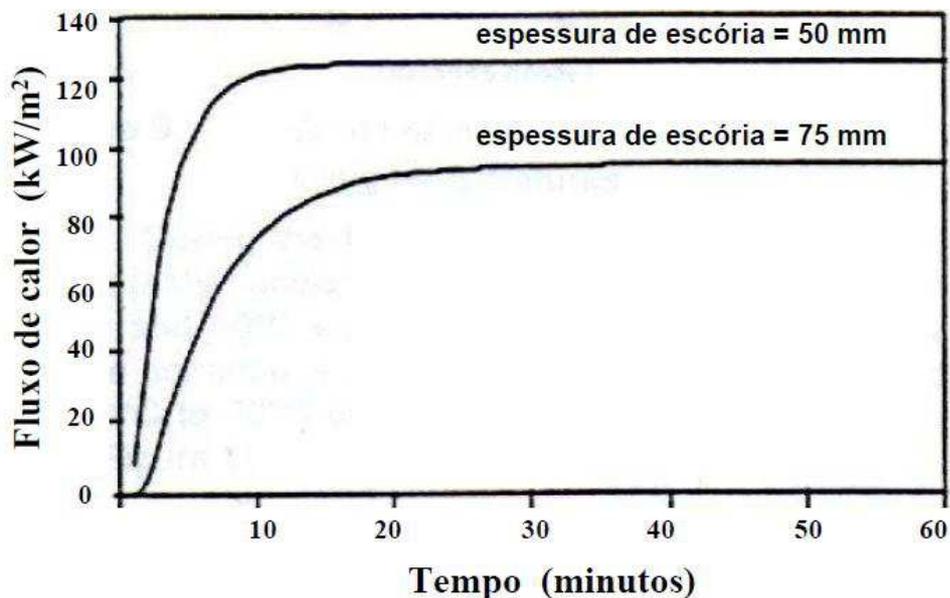


Figura 14 – Taxas calculadas de perdas térmicas pela escória após o vazamento na panela. Fonte: Barber *et al* (1995)

Mundim *et al* (1986) também estudaram o efeito da espessura da escória nas perdas térmicas do aço líquido. Através de um modelo matemático unidimensional transiente, os autores relataram que a presença da camada de escória afeta decisivamente as perdas térmicas pela superfície do metal. Como pode ser visto na Figura 15, uma espessura de 50 mm seria suficiente para reduzir as perdas em aproximadamente 50%.

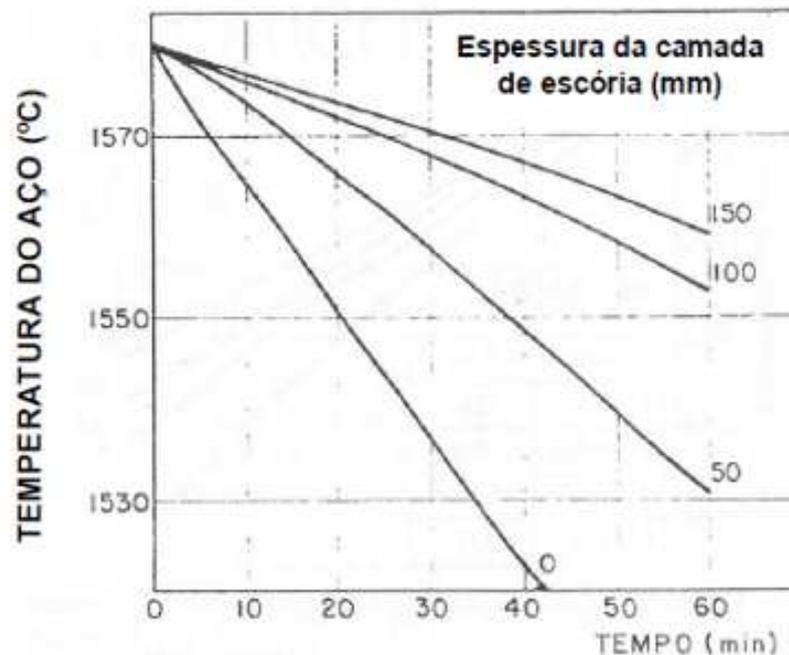


Figura 15 – Influência da espessura da camada de escória sobre a evolução da temperatura do aço na panela. Fonte: Mundim *et al* (1986)

Segundo Gupta *et al* (2004), apesar da maior estratificação térmica do banho apresentada quando se trabalha com camadas espessas de escória, a perda de calor através do topo é mínima e a temperatura média do banho não cai significativamente. Porém, uma camada fina de escória resulta em uma apreciável perda de calor pelo topo e, conseqüentemente, uma queda acentuada da temperatura média do banho.

Gupta *et al* (2004), encontraram diferenças na queda de temperatura do aço de até 40°C durante o lingotamento, quando se comparava panelas com diferentes camadas de escória.

Mundim *et al* (1986) estudaram ainda o efeito conjunto da camada de escória e da utilização de tampa na panela. Verificou-se que a utilização isolada da tampa apresenta eficiência superior a uma camada de escória de 150 mm. Porém, o melhor resultado (menor queda de temperatura do aço) foi obtido com a utilização conjunta da tampa e de uma camada de escória de 100 mm, como mostra a figura 16.

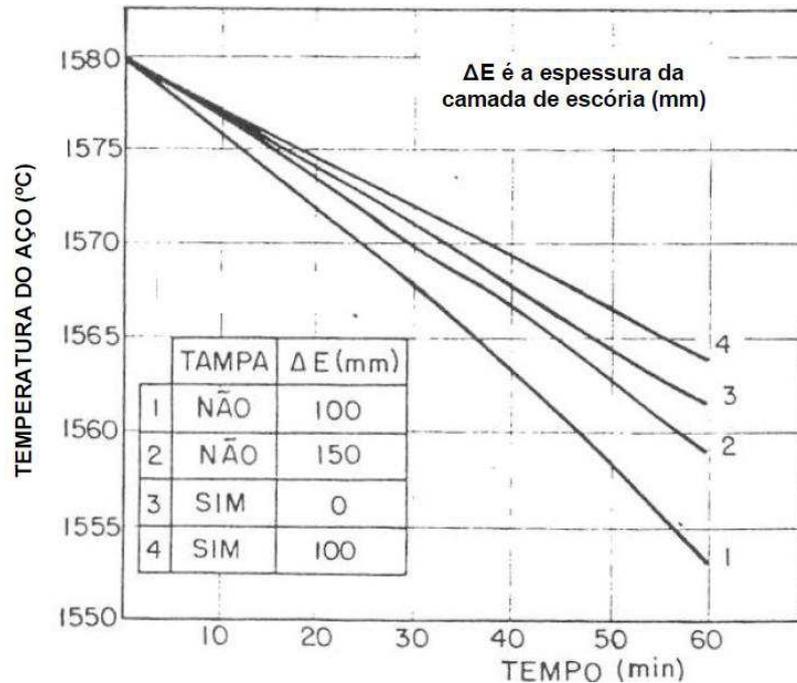


Figura 16 – Influência da utilização de tampa na panela (180t) sobre a evolução da temperatura do aço para diferentes condições de espessura de escória. Fonte: Mundim *et al* (1996)

Apesar de vários resultados comprovados, devido à dificuldade de utilização, manutenção e devido aos investimentos necessários associados à implantação de um sistema de tampas de panela, diversas empresas optam por outras alternativas. Neste sentido, Hlinka *et al* (1985) concluem que uma camada suficiente de escória elimina a necessidade do uso de tampa durante o período com aço. Os mesmos resultados foram relatados por Tomazin *et al* (1986).

Omotani *et al* (1983) propõem a utilização da equação 1, obtida através de análise dimensional e similaridade térmica, para calcular a taxa de transferência de calor do metal para a escória. Como apresentado na figura 17, segundo Omotani *et al* (1983), a transferência de calor do metal para a escória pode ser vista como um processo de convecção natural ocorrendo em uma camada de escória líquida, relativamente fina.

$$q_e = 0,083 \cdot A_e \cdot K_e \cdot (T_m - T_e)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{g \cdot \beta_e}{\nu_e \cdot \alpha_e} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

q_e : taxa de transferência de calor do metal para a escória (W/s);

A_e : área de contato metal/escória, (m²);

K_e : condutividade térmica da escória, (W/m·K);

T_m : temperatura do metal no banho, (K);

T_e : temperatura líquidus da escória, (K);

g : aceleração da gravidade, (m/s²);

β_e : coeficiente de expansão térmica da escória, (K⁻¹);

ν_e : viscosidade cinemática da escória, (m²/s);

α_e : difusividade térmica da escória, (m²/s).

De acordo com a equação 1, a taxa de transferência de calor do metal para a escória não é dependente da espessura da escória. Segundo Omotani *et al* (1983), este comportamento é esperado para camadas de escórias espessas, que excedam 100 ou 120mm. Camadas finas de escória são menos isolantes e apresentam uma taxa de transferência de calor maior do que a dada pela equação 1.

2.4.2 TAMPA DE PANELA

Minion *et al* (1986) avaliaram a influência do uso de tampas durante todo o ciclo da panela e constataram que a temperatura da face quente da panela fica uniformemente distribuída, apresentando uma diferença entre a temperatura mais alta e a mais baixa de no máximo 30 °C. Gastón *et al* (1996) também ressaltam a importância do uso de tampas na redução das perdas por radiação e dos gradientes térmicos, que podem levar o revestimento refratário a uma falha termomecânica denominada *spalling*.

Ainda de acordo com Minion *et al* (1986), a temperatura da interface entre o revestimento de trabalho e o revestimento permanente permanece estável durante o

ciclo da panela, independente da panela conter ou não aço. Isto foi constatado para as nove primeiras corridas de um refratário aluminoso (70% alumina). Também constataram que o comportamento da temperatura da interface depende do tempo de ciclo da panela e do tipo de revestimento refratário. Para revestimentos mais densos e de maior condutividade térmica (cromo-magnésiano), foi observada uma elevação na temperatura da interface ao longo da campanha da panela.

Minion *et al* (1986) e Andrade *et al* (2000) compararam duas práticas diferentes de panela. Uma sem o uso de tampa durante o ciclo e com pré-aquecimento e outra com o uso de tampa e sem pré-aquecimento. Os autores concluíram que a prática com tampa mostra melhores resultados no que diz respeito à conservação de energia, mesmo sem o pré-aquecimento entre os ciclos. Segundo os autores, é possível eliminar a prática de pré-aquecimento da panela entre as corridas, reduzindo o tempo de ciclo e, conseqüentemente, o número de panelas em operação.

Tomazin *et al* (1986) ressaltam a importância do uso de tampas de panela, principalmente no período de lingotamento e durante o período sem aço. Os autores relatam uma diminuição de aproximadamente 7°C na queda de temperatura do aço em uma corrida subsequente a outra com utilização de tampa durante o tempo sem aço. Hlinka *et al* (1985) reportam o mesmo ganho na temperatura do aço quando se compara panelas com e sem tampa.

Segundo Tomazin *et al* (1986), uma camada suficiente de escória dispensa o uso de tampas durante os períodos de transporte (tempo com aço). Através de modelagem matemática, Hlinka *et al* (1985) concluem que a tampa de panela teria o mesmo efeito que uma camada de escória de aproximadamente 150 milímetros. Esta equivalência pode ser vista na figura 17.

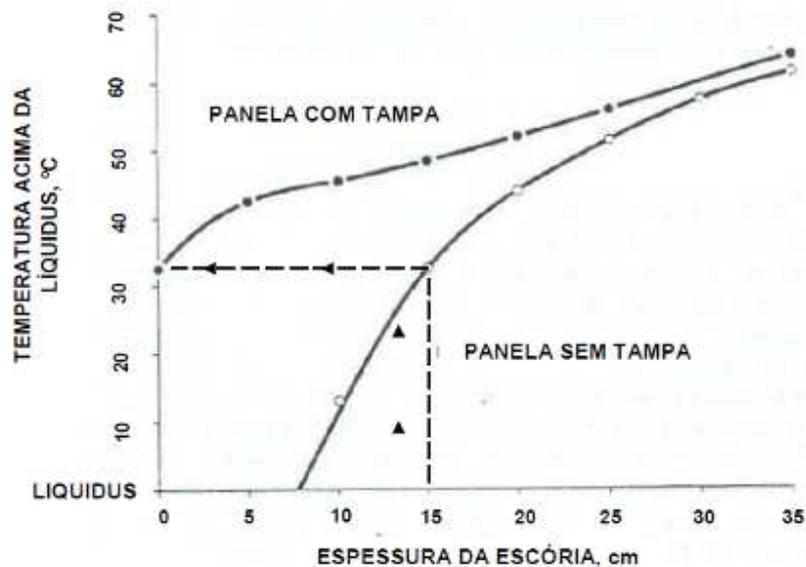


Figura 17 – Eficiência da tampa de panela no controle da temperatura do jato. Fonte: Hlinka *et al* (1985)

Andrade *et al* (2000) discutem a implantação e utilização de tampas fixas em panelas de aço. Tal sistema possibilita que as panelas mantenham-se cobertas em quase todo o tempo de ciclo e, especialmente, enquanto estão vazias. Somente durante as etapas de vazamento do aço, de metalurgia secundária e limpeza de borda ou linha de escória, as panelas permanecem sem a tampa. Os autores citam diversos benefícios atrelados ao uso do sistema de tampa fixa em panelas de aciaria.

2.4.3 PERDAS PARA O REVESTIMENTO REFRAATÁRIO

No trabalho apresentado por Omotani *et al* (1983), fica evidente a importante participação do revestimento refratário nas perdas térmicas do aço líquido na panela. Os autores concluem o seguinte: “O potencial de conservação de energia e redução na queda de temperatura está relacionada com a energia retornada ao sistema pelo ciclo anterior na forma de refratários aquecidos. Se esta reciclagem de energia é maximizada, a necessidade de pré-aquecimento é reduzida e ambos, temperatura e energia, são conservados. Isto pode ser obtido de duas formas. Primeiro, um rápido retorno da panela ao ciclo reduz a perda de calor pela face quente dos refratários. A

segunda possibilidade é a utilização de tampa durante o lingotamento e durante o período em que a panela permanece vazia.”

Segundo os autores, pelo menos 70% de toda energia perdida pelo aço é transferida para os refratários da panela e os demais 30% são perdidos através da camada de escória. Com base nisto, os autores defendem a seleção adequada dos materiais refratários.

As perdas térmicas do aço líquido para os refratários ocorrem devido à troca de calor por convecção. Esse calor migra para o interior dos refratários por condução de forma transiente e sua equação de forma unidimensional em regime cartesiano é apresentada por Bejan (1996) na equação 2 dependente do tempo e da difusibilidade térmica do material, a qual é definida pela equação 3.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Equação 2}$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C} [m^2 / s] \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

k = condutividade térmica [J/(s·m·°C)]

ρ = densidade [kg/m³]

C = calor específico [J / (kg·°C)]

Como apontado por Tomazin *et al.* (1986), a quantidade de calor que pode ser absorvida pelo refratário é definida pelo calor específico do material multiplicado pela sua massa. Desta forma, os elevados valores de calor específico e densidade proporcionam aos materiais refratários um elevado poder de absorção de calor. Para os refratários, o calor específico varia em função da composição química e da temperatura. Segundo Rajão *et al.* (1989), a maioria dos materiais refratários tem um calor específico que aumenta com a temperatura.

O tipo de refratário utilizado em painéis de aciaria é um dos fatores primordiais no controle das perdas térmicas do aço, visto que as suas propriedades determinam a passagem e armazenagem maior ou menor de calor em suas camadas.

Segundo INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE (1986): “A necessidade de produzir aços de alta qualidade e transferir o tratamento metalúrgico para a panela resultou em maiores solicitações das camadas refratárias como resultado de uma escória mais agressiva, longos tempos de permanência do aço na panela e ao uso de aquecimento por arco elétrico. A principal consequência disso foi a crescente utilização de materiais refratários básicos visto que resistem mais ao ataque da escória e são mais estáveis quimicamente. Em muitos casos, essa solução necessitou desenvolvimentos no gerenciamento das painéis e a adoção de práticas que levam em conta as necessidades dos refratários básicos (especialmente do ponto de vista térmico).”

2.4.3.1 TIPOS DE MATERIAIS REFRAATÓRIOS

Algumas das propriedades termofísicas do aço e de alguns materiais refratários são apresentados por Omotani *et al.* (1983), como mostra a Tabela 2. Como pode ser observado, os refratários de alta alumina (80% Al_2O_3) tem uma condutividade térmica significativamente maior que os dolomíticos. O mesmo é apontado por Tomazin *et al.* (1986). Não se notam grandes variações no calor específico quando se comparam refratários aluminosos e dolomíticos.

Tabela 2 – Propriedades termofísicas de materiais refratários e do aço líquido.

Fonte: Omotani *et al.* (1983).

Material	Propriedades	Valor	Unidade
Aço Líquido	Densidade	7080	kg/m ³
	Calor específico	754	J/kg °C
Refratário Dolomítico	Densidade	2100	kg/m ³
	Condutividade térmica	1,05	W/m °C
	Calor específico	1005	J/kg °C
Aluminoso (50% Al_2O_3)	Densidade	2400	kg/m ³
	Condutividade térmica	1,26	W/m °C
	Calor específico	1005	J/kg °C
Alta Alumina (>80% Al_2O_3)	Densidade	2800	kg/m ³
	Condutividade térmica	2,51	W/m °C
	Calor específico	1047	J/kg °C

2.4.3.2 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO REFRATÁRIO

O contato do aço líquido com o material refratário provoca o seu desgaste, o qual é função de uma gama de variáveis as quais não são objeto de estudo neste trabalho. Porém, o efeito da espessura do material refratário de painéis frente às perdas térmicas no processo foi objeto de estudo de alguns autores. Muitos destes estudos apresentam contradições uma vez que as perdas térmicas também dependem da panela estar ou não no ciclo.

Tomazin *et al.* (1986) comentam: “o desgaste dos refratários afetam as perdas térmicas de duas formas. Paredes finas conduzem mais calor para a chapa externa e armazenam menor calor.” Por um lado o desgaste aumenta as perdas térmicas do aço devido à maior passagem de calor pela parede refratária e por outro lado o desgaste reduz as perdas devido à menor quantidade de calor necessária para “encharcar” termicamente a panela.

Através de um modelo matemático unidimensional, Mundim *et al.* (1985) avaliaram a influência da espessura da parede refratária sobre as perdas térmicas. Os resultados são mostrados na figura 18. Nota-se que à medida que a espessura da parede refratária diminui, as perdas térmicas e a queda de temperatura do aço aumentam.

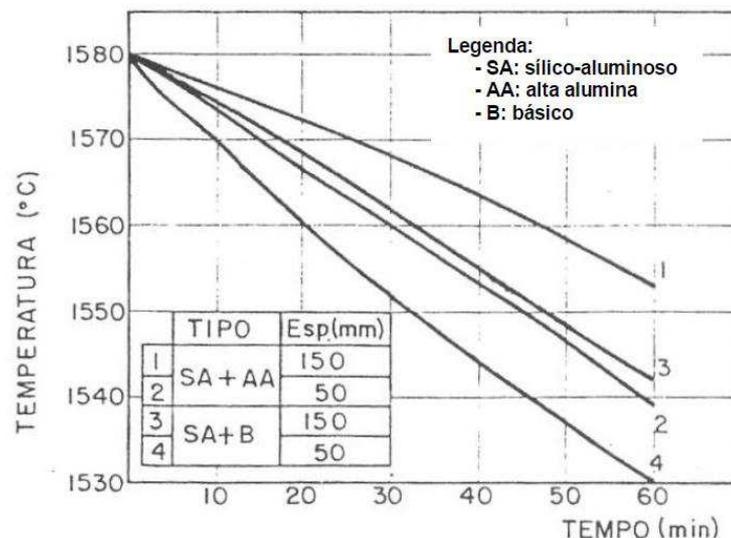


Figura 18 – Efeito do tipo e espessura do revestimento refratário sobre a evolução da temperatura do aço em uma panela de 180t. Fonte: Mundim *et al.* (1986).

Em outros estudos utilizando modelação numérica, os mesmos autores citados anteriormente comparam as perdas térmicas do aço líquido em panelas com e sem desgaste. Concluíram que as perdas são maiores em panelas desgastadas quando as mesmas estão no ciclo e menores quando as panelas estão retornando ao ciclo (estão inicialmente frias e necessitam ser aquecidas). Além disso, verificaram que a diferença entre as perdas para os dois casos é maior, quanto maior for o tempo com aço devido ao tempo de encharque e perfil estacionário de extração de calor.

Ferreira *et al.* (2004), utilizando simulação numérica de escoamento e transferência de calor (CFD), também avaliaram a influência do desgaste de panelas sobre as perdas térmicas do aço líquido. Simulando uma panela velha com 80 mm de desgaste em relação à nova, os autores concluíram que as perdas térmicas do aço líquido para os refratários são maiores na panela velha nos primeiros 15 minutos de contato. Após este período, a situação se reverte, e a perda é maior na panela nova. Este comportamento se deve ao maior potencial de perda pela parede lateral apresentado pela panela velha. Este potencial de perda é função do histórico térmico da panela. O resultado pode ser visualizado através da figura 19.

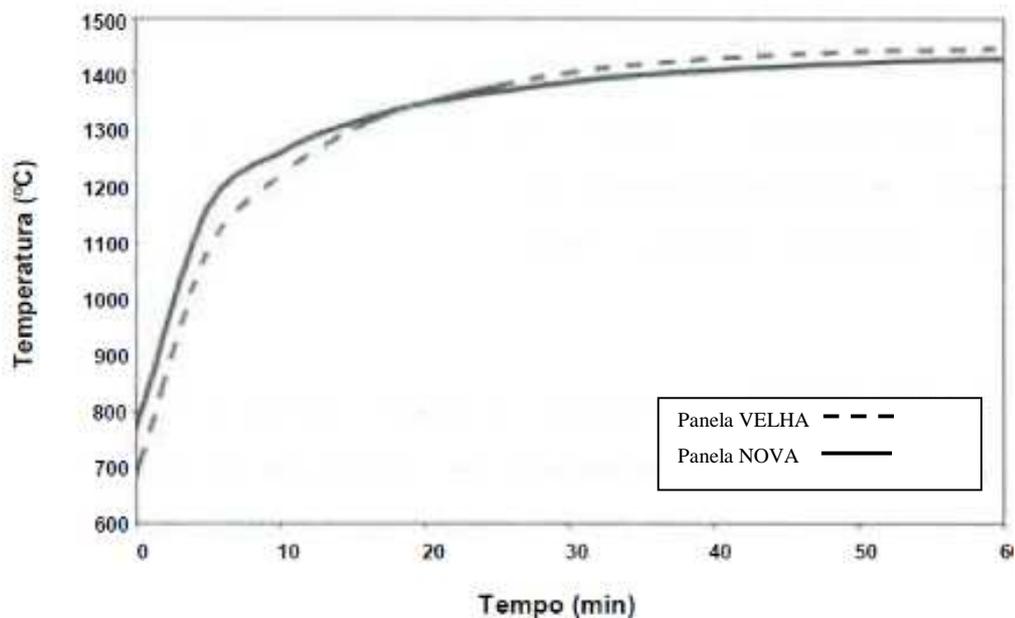


Figura 19 – Temperatura média na camada de 50mm mais próxima a área de contato do aço. Fonte: Ferreira *et al.* (2004).

Ferreira *et al.* (2004) observaram ainda que a panela nova armazena uma quantidade de energia 50% maior que a panela desgastada, devido à sua maior massa e que a partir da terceira corrida, as panelas atingem um estado termicamente estável. A partir deste ponto, as panelas podem ser consideradas encharcadas. A figura 20 ilustra os resultados. Para todas as situações simuladas foi considerado um mesmo histórico térmico para as panelas.

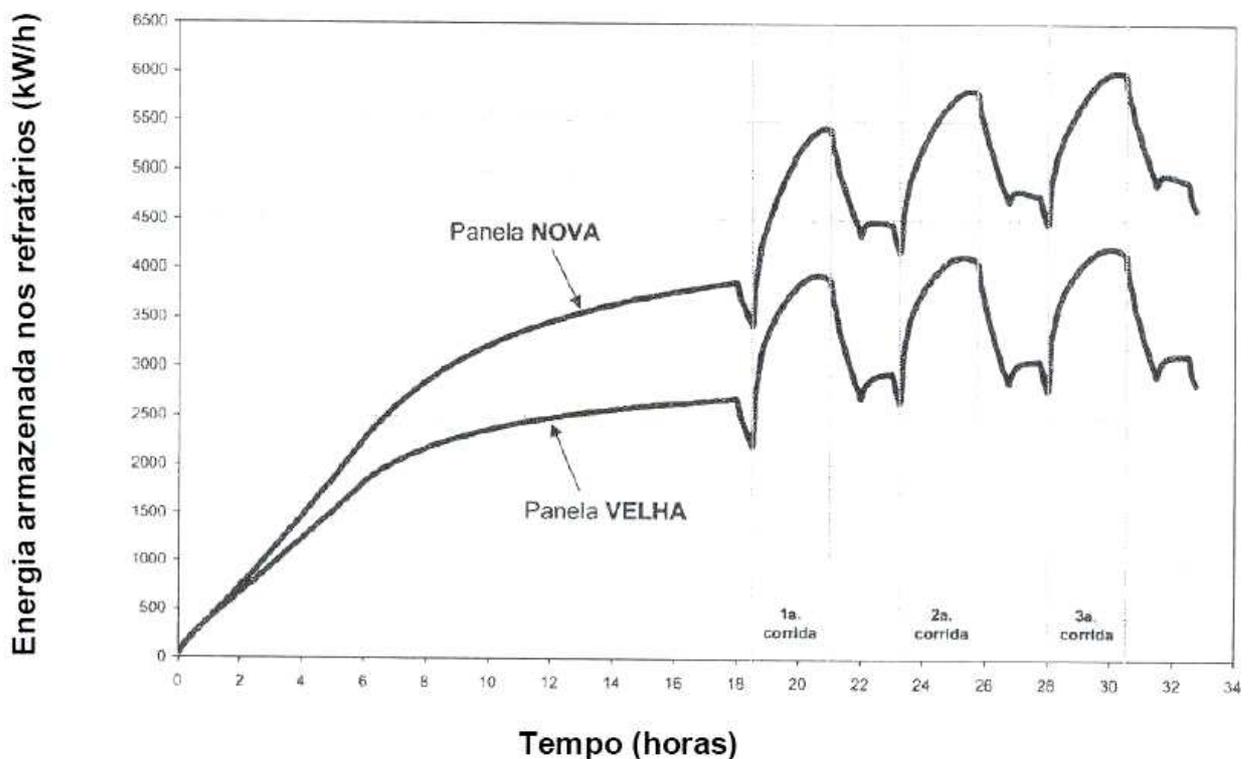


Figura 20 – Energia armazenada nas camadas refratárias. Fonte: Ferreira *et al.* (2004)

De maneira similar, Austin *et al.* (1992) concluiriam que o desgaste tem uma relação não linear com as perdas térmicas, conforme observa-se na figura 21. Também avaliaram que as perdas térmicas de uma panela com desgaste de 50 mm é praticamente igual as perdas de uma panela considerada nova. Enquanto que para uma panela com desgaste de 100 mm, as perdas acentuam-se rapidamente, aumentando a taxa de resfriamento do aço.

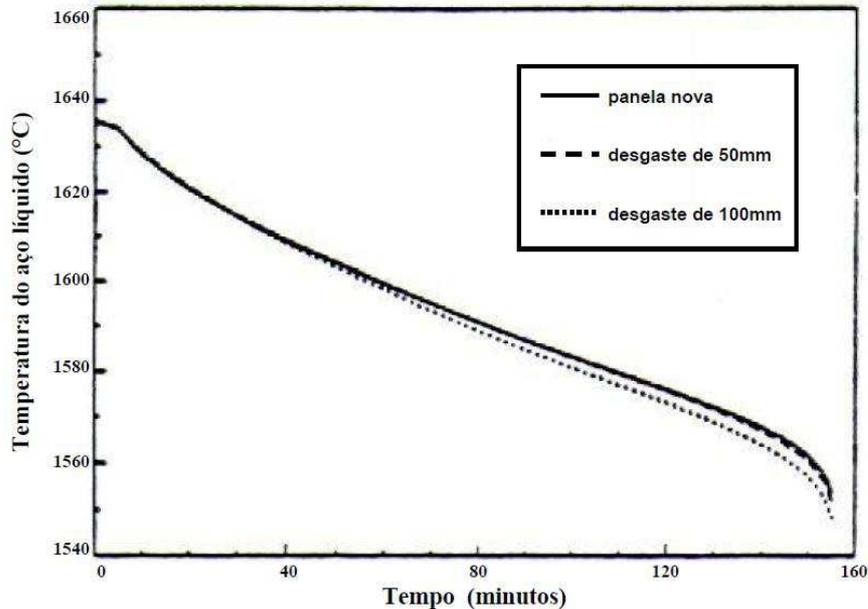


Figura 21 – Variação da temperatura do aço líquido em painéis com diferentes desgastes. Fonte: Austin (1992).

2.5 MATERIAIS ISOLANTES

Mundim *et al.* (1985) estudaram a utilização de uma camada de 25 mm de manta refratária para isolamento entre o revestimento permanente e a carcaça da panela. Os resultados, apresentados na figura 22, mostram que as variações das perdas térmicas e da temperatura do aço são praticamente nulas quando comparadas com as perdas térmicas em painéis sem material isolante (figura 23). Segundo os autores, a utilização de materiais isolantes entre a carcaça e o revestimento permanente não afetam as perdas térmicas. Por outro lado, a temperatura externa da carcaça da panela é reduzida em até 200°C.

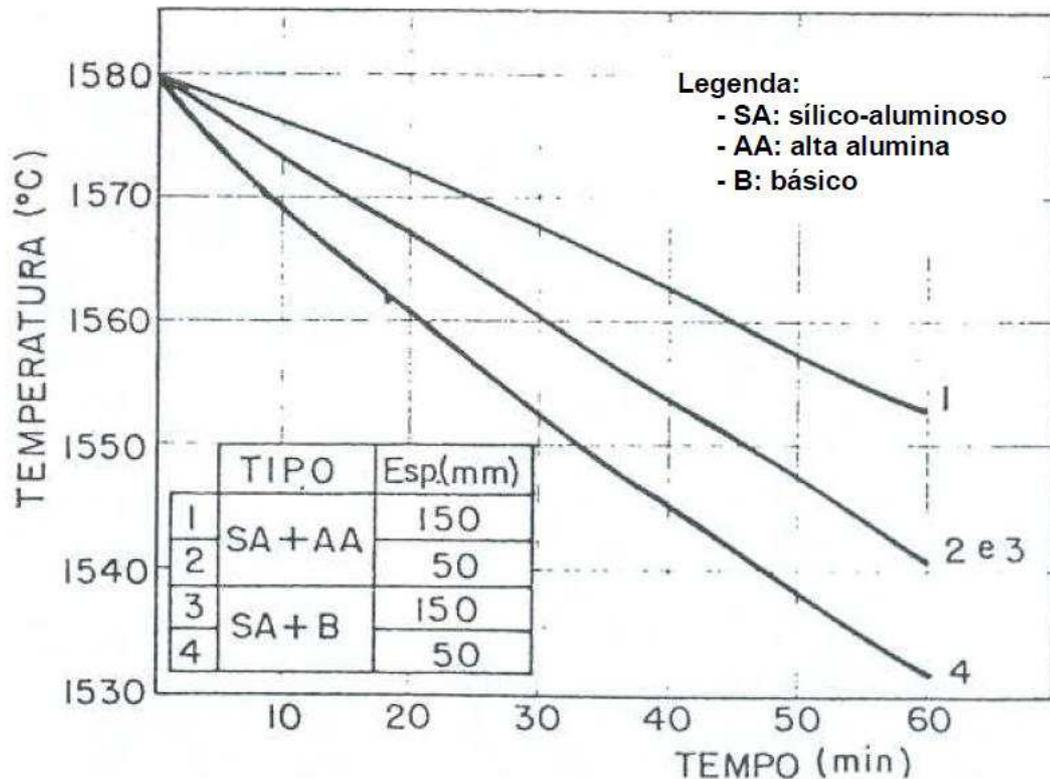


Figura 22 – Influência da utilização de isolamento cerâmico entre o revestimento permanente e a carcaça da panela sobre a evolução da temperatura do aço na panela.

Fonte: Mundim *et al.* (1986).

Através de um modelo unidimensional transiente, aplicado a um programa que resolve numericamente as equações de transferência de calor pelo método explícito de diferenças finitas, Mucciardi *et al.* (1987) avaliaram o uso de materiais isolantes em panelas de aço. As figuras 23 e 24 mostram, respectivamente, a evolução da temperatura nas faces fria e quente do revestimento refratário após o pré-aquecimento, comparando casos com e sem material isolante térmico na panela.

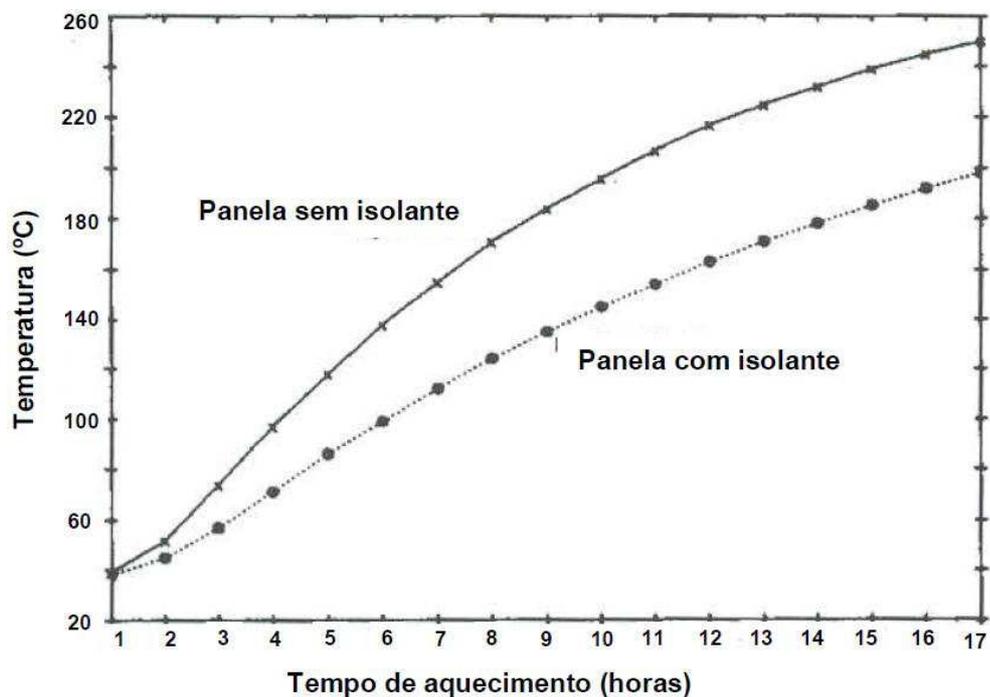


Figura 23 – Evolução da temperatura na face fria do refratário após o pré-aquecimento em painéis com e sem isolante térmico. Fonte: Mucciardi *et al.* (1987).

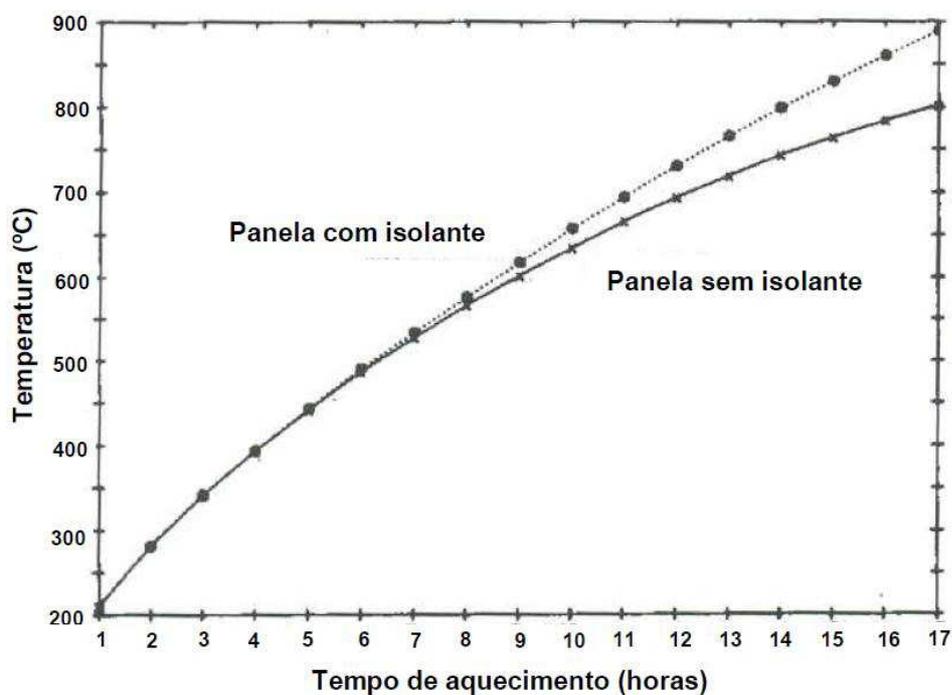


Figura 24 – Evolução da temperatura na face quente do refratário após o pré-aquecimento em painéis com e sem isolante térmico. Fonte: Mucciardi *et al.* (1987).

Como pode ser observado na figura 23, a temperatura da face fria sobe mais rápido e a um valor superior, para o caso da panela sem isolante. Isto mostra que as perdas para o ambiente foram maiores para o caso da panela sem isolante. Temperaturas mais elevadas na face quente foram obtidas para o caso da panela com material isolante (figura 24). Este fato, a partir de oito horas de aquecimento, sugere a criação de práticas de aquecimento diferenciadas, especialmente em relação ao tempo, para painéis com e sem isolamento.

Em um outro trabalho, Mucciardi e Grandillo (1991) concluíram que os materiais isolantes têm um efeito pequeno sobre as perdas térmicas do aço líquido para as paredes refratárias, razões as quais não foram abordados neste trabalho.

Somente em 1995, Barber *et al.*(1995) encontraram resultados favoráveis ao desempenho dos materiais isolantes. A simulação realizada pelos autores contemplava a utilização de uma camada isolante entre os tijolos de proteção e a chapa e analisaram a influência dessa configuração sobre a temperatura do aço líquido. Constataram uma redução de aproximadamente 80°C na temperatura da chapa, a qual foi confirmada através de experimentos. Quanto ao efeito sobre a temperatura do aço, foi calculada uma redução acima de 20°C nas perdas térmicas, obtendo melhores valores durante o experimento.

2.6 ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA E FATOR ISOLANTE DA ESCÓRIA

Para controlar a temperatura do aço líquido durante o processo e durante o lingotamento contínuo, é necessário ter o entendimento com os fenômenos relacionados ao escoamento do aço dentro da panela, conforme comentam Grip *et al* (1999): *“a comparação entre as temperaturas medidas e calculadas pelos modelos térmicos indicam que o conhecimento das perdas térmicas não é suficiente para dar uma boa previsão da temperatura do aço. A temperatura do aço que sai da panela é também influenciada pelos escoamentos dentro da mesma.”*

Fredman (2000) desenvolveu um método para estudar sistemas aço líquido-refratários por meio de modelamento físico em acrílico, usando água aquecida. O

método permite a análise de fenômenos de transferência de calor e momento em conjunto. Através desse modelo físico foi possível visualizar o mecanismo de convecção esquematizado na figura 25 para espessuras de escórias diferentes.

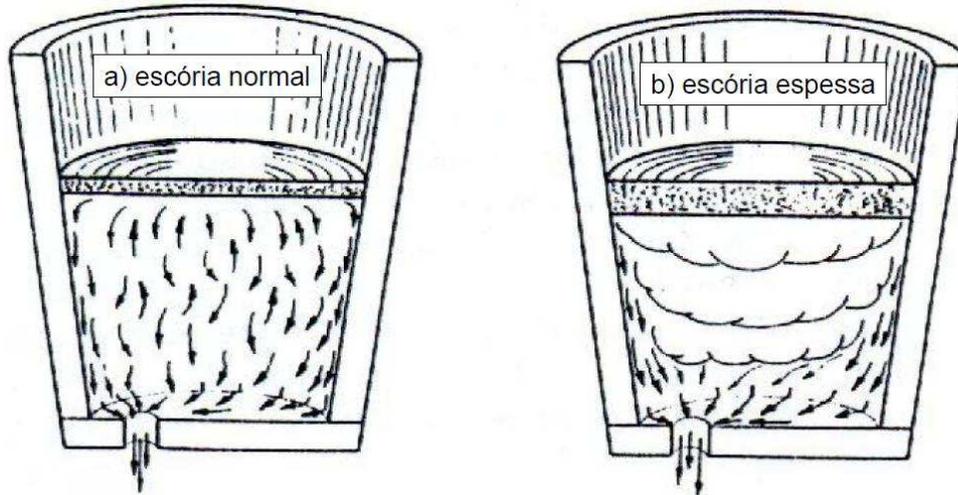


Figura 25 – Correntes convectivas durante o esvaziamento da panela para duas espessuras de escória. Fonte: Fredman (2000)

Os autores estudaram a estratificação térmica em panelas durante o lingotamento. Foram encontradas diferenças marcantes entre o comportamento de panelas com uma camada espessa e uma camada fina de escória. Quando a escória é espessa, ela atua como um isolante térmico que faz com que o aço estratificado termicamente permaneça sobreaquecido em relação ao restante do aço da panela. Esse aço sobreaquecido garante a manutenção da temperatura dentro do distribuidor como o decorrer do lingotamento, efeito acentuado no final do processo. Assim, uma escória de espessura normal ocasiona a mistura na panela fazendo com que a temperatura de saída da panela caia com o decorrer do esvaziamento. Já com a escória espessa, o comportamento da temperatura do aço na saída da panela é mais constante, conforme concluído pelos autores.

A temperatura em um distribuidor abastecido por uma panela com uma camada espessa de escória apresentou um comportamento praticamente constante. Além disso, segundo os autores, foi observado que a estratificação térmica age como um alimentador de material aquecido. Desta forma, o aço quente vindo do seio do banho se mistura ao aço frio que desce pelas paredes da panela. Os autores relatam ainda que

este efeito é mais pronunciado durante períodos longos de lingotamento e é atribuído ao fator isolante da camada espessa de escória.

Rogler *et al.* (2004) estudaram o efeito da estratificação térmica no comportamento do fluxo de gás/líquido, bem como no tempo para se atingir uma mistura completa em painéis de aço. Os autores utilizaram um tanque de acrílico suportado por um esqueleto de aço e água para simular o aço. Os experimentos foram conduzidos tanto isotermicamente quanto não-isotermicamente. Com base nos testes não-isotérmicos de agitação forçada, os autores concluem que a presença de gradientes de temperatura elevados (40°C) entre o topo e no fundo do tanque podem alterar completamente o padrão de fluxo, quando comparado com a condição isotérmica. Nestas condições, os autores mostram que o tempo de agitação para se atingir uma mistura completa é afetado pela presença de estratificação térmica, e sugerem a utilização de mais de um ponto de injeção de gás inerte para reduzir este tempo.

Outra importância do fator isolante da escória, além da redução das perdas térmicas é a de favorecer a estratificação da panela durante o lingotamento contínuo. As perdas através da escória reduzem a temperatura do aço na parte superior da panela, aumentando a densidade de aço e o conseqüente fluxo descendente desse volume. Com isso, quanto maior for a isolamento térmica da parte superior da panela, seja ela realizada pela escória ou utilização de tampa, maior será a estratificação térmica.

2.7 ÍNDICE DE ENCHARQUE DE PANNELAS

É bastante comum em aciarias a utilização do tempo em que a panela fica sem aço para indicar o seu estado térmico. Este método pode levar a conclusões errôneas, pois não reflete o verdadeiro estado de encharque da panela, principalmente quando se realiza algum aquecimento durante o tempo sem aço, fato que comprova a preocupação em trabalhar-se com um Índice de Encharque.

Tomazin *et al.* (1986) estudaram o efeito dos refratários de panela e das práticas no controle da temperatura do aço, utilizando um modelo bidimensional transiente. Na figura 26 são mostrados três perfis de temperatura das camadas refratárias para três

condições diferentes. Como pode ser observado, o perfil de temperaturas da panela fria pré-aquecida, mesmo apresentando uma temperatura da face quente bastante similar a uma panela no ciclo, possui menor energia armazenada nas demais camadas do revestimento refratário.

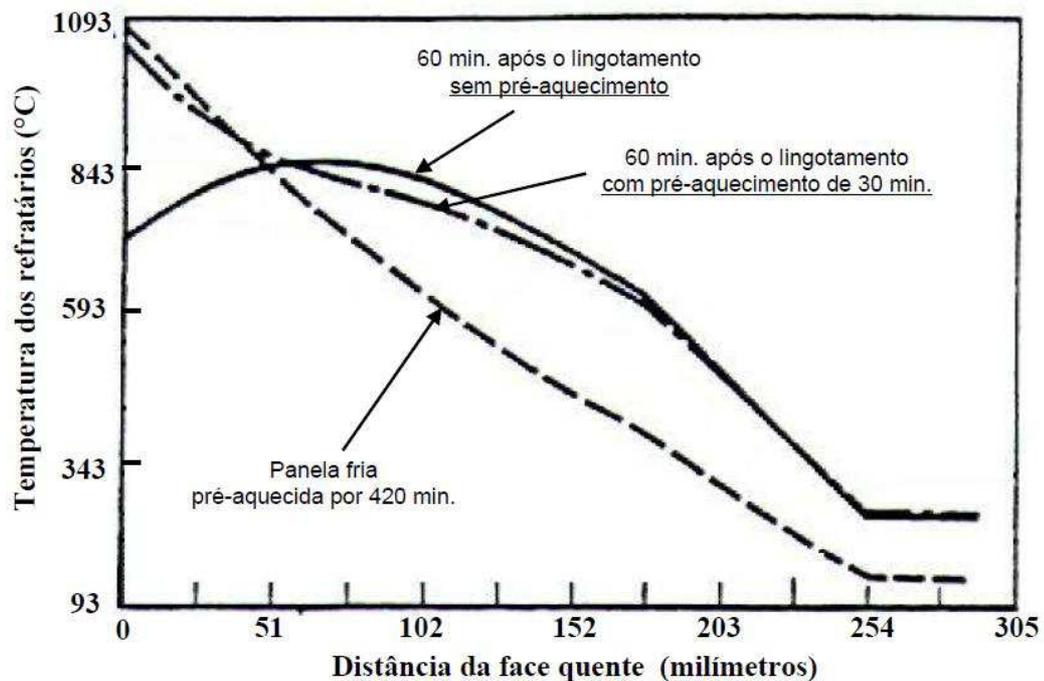


Figura 26 – Comparação dos perfis térmicos no interior das camadas refratárias de panelas com baixo tempo sem aço e panelas frias pré-aquecidas. Fonte: Tomazin *et al.* (1986).

Ferreira *et al.* (1999 e 2002) sugerem avaliar o índice de encharque do refratário calculando a quantidade de energia armazenada nas camadas refratárias ou converter esta energia armazenada em um decréscimo na temperatura do aço. Quanto maior for a energia armazenada, melhor é o estado térmico da panela e menor a queda de temperatura do aço líquido.

Com o objetivo de desenvolver um método sem contato com a medição do calor contido nos refratários, Rutqvist *et al.* (1990) utilizaram um pirômetro ótico para medir a temperatura e a taxa de resfriamento da face quente da panela antes do vazamento. Os autores concluem que é possível classificar termicamente as panelas. Este trabalho foi defendido por Grip (1994).

Na figura 27 Ferreira (2000) observou, para 55 toneladas de aço, a queda do índice de encharque da panela com o aumento do tempo de espera da mesma aguardando o início do vazamento aço.

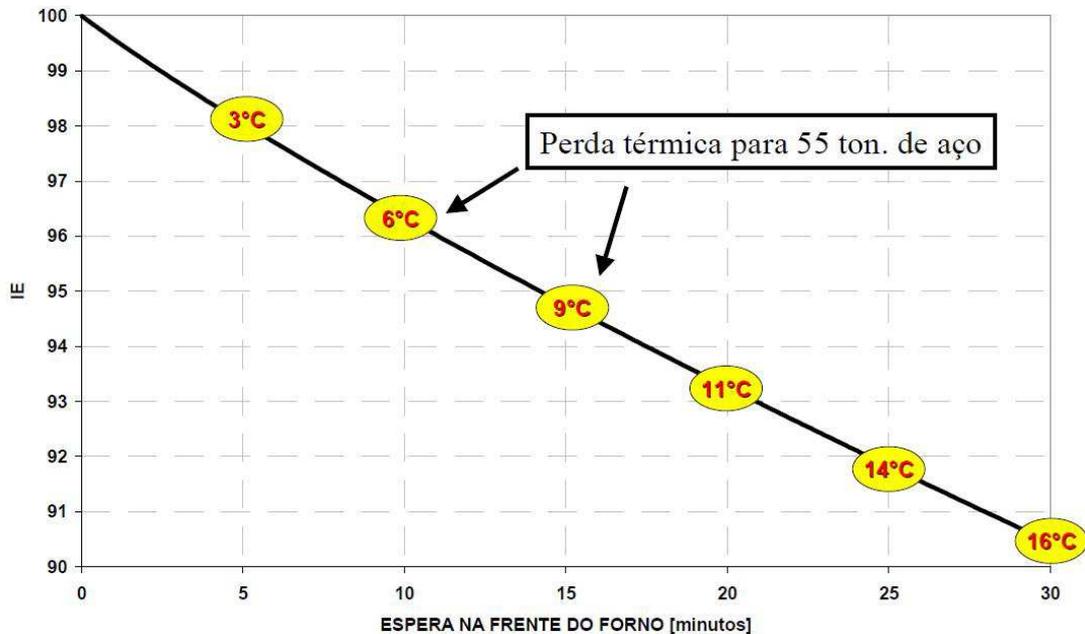


Figura 27 – Índice de Encharque das panelas durante a espera para o vazamento.

Fonte: Ferreira (2000).

2.8 PRÉ-AQUECIMENTO DE PANELAS

Christ *et al.* (1998) discutem os efeitos do aquecimento de panelas de aço. Os autores ressaltam a relevância da condição térmica dos revestimentos refratários no controle da temperatura do aço e discutem a importância da etapa de aquecimento de panelas no desempenho dos tijolos refratários. Conforme citam os autores, os revestimentos refratários, principalmente aqueles utilizados na linha de escória das panelas de aço, apresentam elevados teores de carbono. O carbono, além de conferir resistência ao tijolo, promove sua impermeabilização, dificultando o ataque da escória. Durante o aquecimento das panelas, ocorre a oxidação do carbono devido às altas temperaturas dos gases da queima e à presença de oxigênio. A oxidação do carbono leva a um decréscimo da resistência mecânica do material, podendo causar uma redução sensível na vida útil dos refratários de trabalho.

Através de modelamento da transferência de calor transiente em três dimensões, Tetrault *et al.* (2004) compararam o comportamento da temperatura do aço e do revestimento refratário durante os períodos de tratamento e espera com panela cheia para três diferentes condições de pré-aquecimento. Os resultados são apresentados na figura 28 (a e b). Nota-se que maiores temperaturas de chama, durante a etapa de pré-aquecimento, implicam em temperaturas mais altas do refratário e, conseqüentemente, do aço líquido após o vazamento.

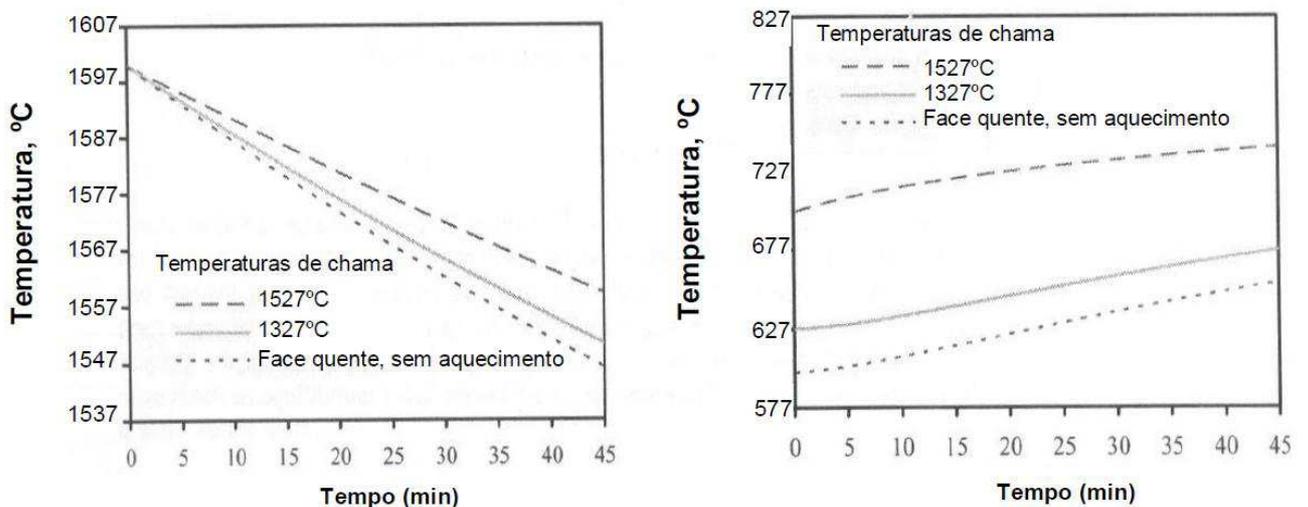


Figura 28 – Comportamento da temperatura do aço (a) e do revestimento refratário (b) durante o período de espera para diferentes condições de pré-aquecimento. Fonte: Tetrault *et al.* (2004).

Perkins *et al.* (1986), também consideram que um pré-aquecimento efetivo do revestimento refratário da panela pode reduzir sensivelmente a temperatura de vazamento necessária de um convertedor. Os autores, através de modelamento matemático e testes na planta, estudaram diversas condições de pré-aquecimento das panelas refratárias. Ao final deste estudo, foi possível a definição de regras de pré-aquecimento para as panelas. Da mesma forma, Omotani *et al.* (1983) também defendem que o pré-aquecimento resulta em uma significativa redução na queda de temperatura do aço na panela.

Belisário *et al.* (1989) modelaram o ciclo de operação de uma panela de aço. O modelo proposto pelos autores foi dividido em duas partes. A primeira refere-se ao modelo de combustão dos gases para a secagem e aquecimento dos refratários da panela. Na segunda, o modelo descreve termicamente as etapas de vazamento do aço na panela, transporte de panela cheia e etapas de metalurgia secundária e lingotamento contínuo. Com base nos testes realizados com o modelo, os autores sugerem a otimização da potência dos aquecedores através do enriquecimento do ar de combustão com oxigênio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LAYOUT DA ACIARIA

O layout esquematizado da aciaria estudada e a localização das pontes rolantes são mostradas na figura 29.

A aciaria estudada apresenta dois fornos elétricos de capacidade de 25 toneladas cada, denominados Forno 2 e Forno 3; dois Fornos-Panela (FP 2 e FP 3) e duas Máquinas de Lingotamento Contínuo com dois veios cada (LC 2 e LC 3).

A aciaria possui doze painéis, dos quais seis estão em serviço, sendo três para cada forno com uma quarta panela no aquecimento. A quarta panela entra em operação se houver necessidade, como por exemplo: substituição do plugue, placas, válvula inferior e superior do mecanismo de válvula gaveta, bem como a realização de reparação refratária nas sedes de válvula ou plugue.

Cada forno elétrico a arco possui em sua região um fosso de vazamento, local onde a panela é colocada em um *trolley*, o qual é posicionado para debaixo do forno elétrico momentos antes do início do vazamento do aço que está sendo produzindo no forno elétrico. Depois de concluído o vazamento do aço para a panela, o *trolley* é recuado para sua posição original e a panela com aço líquido é engatada pela ponte rolante e transportada até o forno-panela.

A ponte rolante 1 realiza operações de transporte de painéis para o fosso de vazamento do forno elétrico 2, transporte de painéis do fosso de vazamento para o forno-panela 2, bem como o transporte da panela do forno-panela 2 para o LC 2. Ao contrário da ponte rolante 3, que realiza as mesmas operações, porém para a região do forno elétrico 3, forno-panela 3 e LC 3. Por outro lado, a ponte rolante 2, localizada entre as pontes rolantes 1 e 3, realiza as movimentações das painéis após concluído o lingotamento do aço, transportando-as para região de limpeza (baia LC 2/3) e aquecedores das painéis. Os aquecedores de painéis 1 e 3 recebem painéis que estão em operação na região do forno elétrico 2, já os aquecedores 5 e 6, as painéis que estão em operação na região do forno elétrico 3.

Nos horários em que não há operador de ponte rolante disponível, a ponte rolante 3 é parada e todos os transportes de painéis e demais operações são realizadas com as pontes rolantes 1 e 2. Nessas situações, as painéis são enviadas com antecedência média de 12 minutos para o *trolley* do fosso de vazamento.

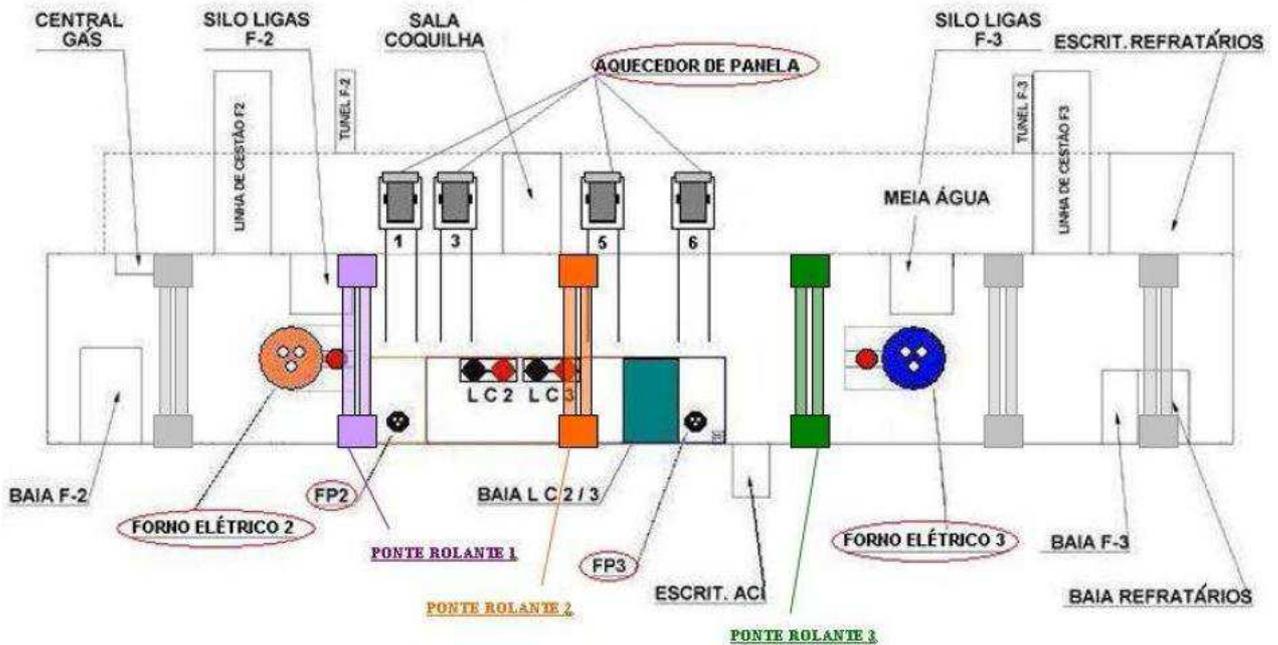


Figura 29 – Layout esquematizado da aciaria estudada destacando a localização das pontes rolantes e os aquecedores de painel. Fonte: GERDAU S.A.

Visualmente, realiza-se a inspeção do refratário da panela logo após o término da corrida no lingotamento contínuo, onde se realiza a limpeza com oxigênio na sede de plugue e na sede da válvula gaveta, limpeza do mecanismo de válvula gaveta, inspeção visual do desgaste do refratário da linha de escória, linha de metal e fundo da panela. Neste momento, também se realiza o teste de chama no plugue de injeção de gases.

3.2 CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DAS PANELAS

As panelas da aciaria estudada têm capacidade para 23 toneladas de aço, fabricadas em aço carbono, cilíndricas, com diâmetro externo de 2038,1 mm, diâmetro interno de 2000 mm e altura total de 2420,8 mm. As figuras 30 e 31 mostram fotografias das panelas da aciaria estudada.



Figura 30 - Foto da panela com tampa na plataforma de lingotamento. Fonte: GERDAU S.A.



Figura 31 - Foto do interior da panela sem os revestimentos refratários. Fonte: GERDAU S.A.

As dimensões e outros detalhes da montagem dos refratários da panela podem ser vistos na figura 32, onde as fiadas de tijolos de número 14, 15, 16 e 17 representam os refratários da região da linha de escória.

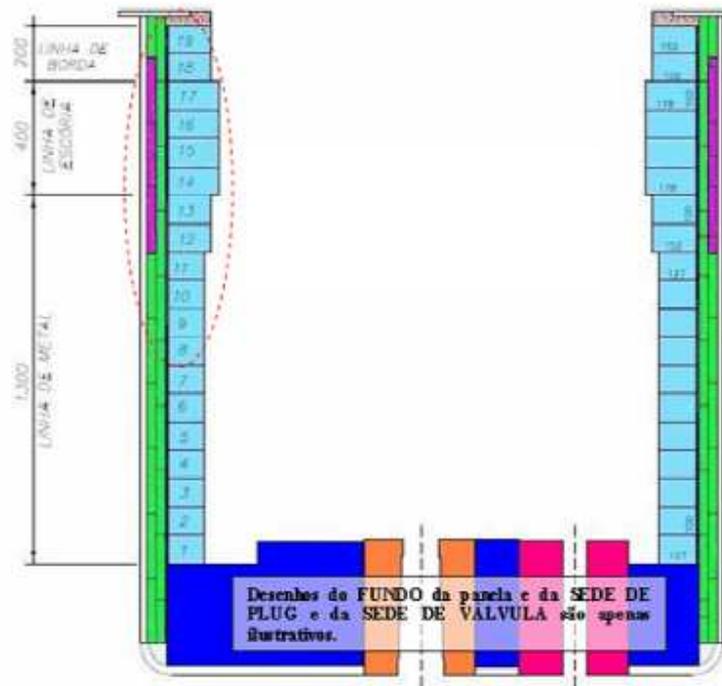


Figura 32 – Desenho esquemático demonstrando a disposição e as dimensões das camadas refratárias da parede da panela. Fonte: GERDAU S.A.

As especificações técnicas dos materiais refratários da parede da panela são mostradas na tabela 3.

Tabela 3 – Especificação técnica dos revestimentos refratários das painéis da aciaria estudada. Fonte: GERDAU S.A.

Item	Denominação	Material	Composição Química
1	Chapa metálica	Aço	Fe-C
2	Revestimento Permanente A	Tijolo de Magnesita sinterizada	MgO (85,0/95,0%)
3	Revestimento permanente B	Tijolo refratário Aluminoso	Al ₂ O ₃ (60,0/80,0%)
4	Massa de Back Fill	Massa Resinada Básica	MgO (min. 80,0%)
5	Revestimento de Trabalho	Tijolo Refratário a Base de dolomita sinterizada, quimicamente ligado e piche impregnado	CaO (45,0/60,0%) MgO(40,0/50%)

A figura 33 mostra a disposição do revestimento de trabalho na parede e no fundo da panela, destacando a maior espessura dos refratários na linha de escória da panela. E a figura 34 mostra a disposição das camadas de tijolos da linha de escória.



Figura 33 – Disposição do revestimento de trabalho na parede no fundo da panela.

Fonte: GERDAU S.A.

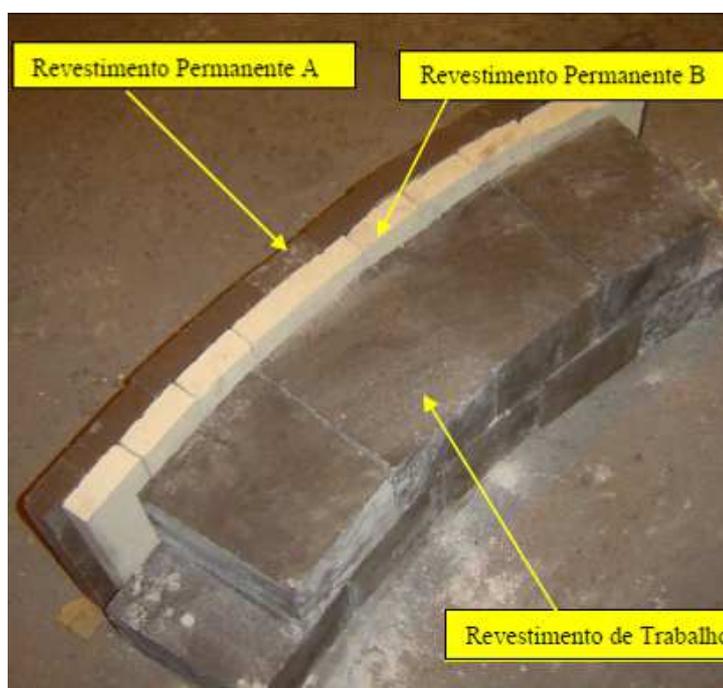


Figura 34 – Disposição e identificação dos tijolos refratários da linha de escória da panela. Fonte: GERDAU S.A.

Também foi acompanhada uma panela desde a primeira corrida até o final da campanha. A panela acompanhada foi uma panela de teste na qual se colocou, entre o revestimento permanente e a chapa metálica, uma camada de revestimento isolante na forma de placas de 416x101x10 mm. A disposição das placas isolantes na panela está mostrada na figura 35.



Figura 35 – Descrição dos tipos de revestimento refratários da parede da panela destacando o revestimento isolante. Fonte: GERDAU S.A.

A figura 36 mostra os detalhes da montagem das placas isolantes na chapa metálica da parede da panela, e também a disposição dos refratários permanentes sobre as placas isolantes.

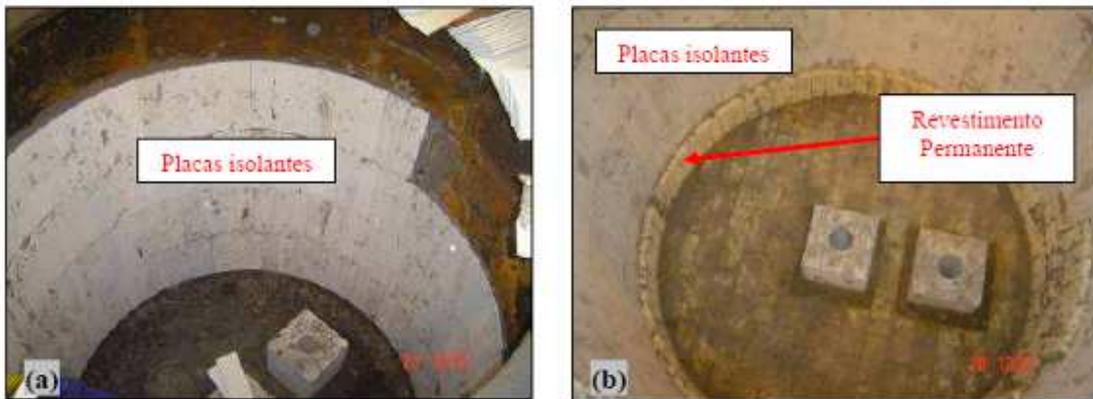


Figura 36 – a) Montagem das placas isolantes na parede da panela. b) Placas isolantes montadas na panela e as tijoletas do revestimento permanente montada sobre o isolante. Fonte: GERDAU S.A.

As placas isolantes testadas são compostas basicamente de alumina e sílica, constituindo-se em produto isolante estrutural, de alta resistência e baixa condutividade térmica, desenvolvidas especialmente para aplicações de revestimentos de back up e para equipamentos de transporte e/ou tratamento metalúrgico de metal líquido. As placas apresentam excelente estabilidade química, resistindo ao ataque da maioria dos ácidos e agentes corrosivos. A figura 37 mostra o formato da placa isolante e os dados técnicos da mesma.



Propriedades Físicas Típicas

<i>Cor</i>	<i>Verde</i>
<i>Classe de Temperatura</i>	<i>1 300 °C</i>
<i>Composição Básica</i>	<i>Alumina e Silica</i>
<i>Densidade</i>	<i>750 à 850 kg/m³</i>

Condutividade Térmica x Temperatura Média

<i>Temperatura de Ensaio (°C)</i>	<i>Condutividade (W / m . °K)</i>
<i>25</i>	<i>0,153</i>
<i>356</i>	<i>0,159</i>
<i>617</i>	<i>0,182</i>
<i>773</i>	<i>0,209</i>

Figura 37 – Ilustração e dados técnicos das placas isolantes utilizadas. Fonte: GERDAU S.A.

3.3 METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DOS DADOS E DAS PERDAS TÉRMICAS

As temperaturas do revestimento refratário da panela foram medidas utilizando-se um pirômetro ótico para altas temperaturas (marca MINOLTA/LAND, modelo CYCLOPS 33), sendo a emissividade utilizada para os refratários dolomíticos de 0,65. Já para as temperaturas da chapa metálica da panela foi utilizado um pirômetro ótico para baixas temperaturas (marca MINOLTA/LAND, modelo CYCLOPS 52), sendo a emissividade utilizada de 0,85. As emissividades utilizadas foram aquelas fornecidas pelos manuais que acompanham os respectivos pirômetros. O pirômetro ótico é um

instrumento de fácil manuseio e sua operação baseia-se no fato de que a energia de radiação emitida por um corpo quente é uma função da temperatura e pode ser expressa pela lei de Stefan-Boltzmann ($W = kT^4$, onde W é igual à energia radiante emitida de um corpo negro por unidade de área; k é igual à constante de Stefan-Boltzmann e T é igual à temperatura absoluta). Após a calibração dos pirômetros, o erro admissível de medição foi de $\pm 10^\circ\text{C}$.

As perdas de temperatura foram calculadas e comparadas estatisticamente, utilizando o software de cálculo estatístico Minitab 15, através da diferença de temperatura do revestimento refratário das panelas considerando o tempo de espera para o vazamento do aço, a diferença da temperatura do aço entre o vazamento até a chegada da panela no forno-panela, bem como a situação da temperatura na face interna das panelas, com medições realizadas em três pontos próximos de uma mesma região na linha de escória da panela, tanto as medidas da face interna quanto da face externa, conforme figuras 38 e 39.

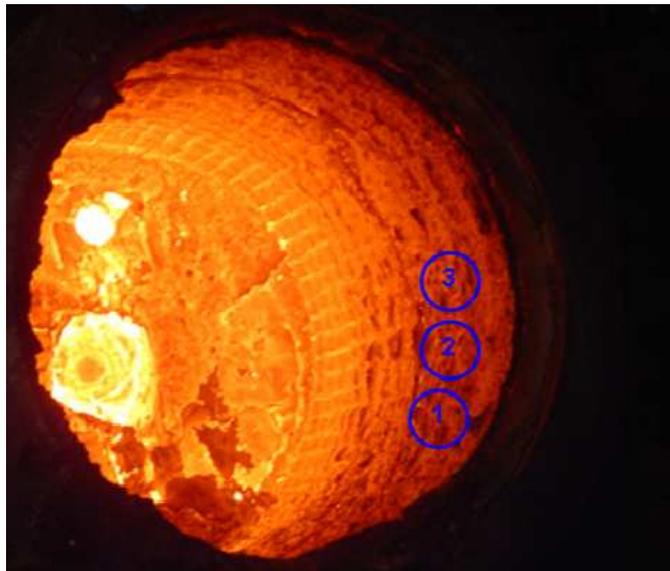


Figura 38 – Interior de uma panela em operação mostrando os três pontos das medidas de temperatura interna das panelas. FONTE: GERDAU S.A



Figura 39 – Localização dos três pontos de medição de temperatura da região da linha de escória da parede externa das painelas. FONTE: GERDAU S.A

As medições de temperatura do aço foram realizadas em dois momentos: antes do vazamento do aço do forno elétrico e, após a colocação da panela e deslocamento do *trolley* para abaixo da abóbada na estação do forno-panela. Todas as medidas de temperatura do aço foram realizadas com termopares de imersão descartáveis (marca Heraeus Electro-Nite)

As perdas térmicas foram calculadas através da compensação de temperatura ao aço mediante utilização de energia elétrica no forno-panela. Para estes cálculos foram utilizados o fator de potência (kWh/t.min) e a taxa de aquecimento do forno-panela ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) em estudo.

As medições do tempo da panela aguardando o recebimento de aço é o tempo total desde a chegada da panela no fosso de vazamento até o início do processo de vazamento do aço líquido. O tempo de transporte da panela até o forno-panela consiste no tempo total de transporte desde o fim do processo de vazamento do aço do FEA até a colocação da panela no *trolley* do forno-panela. Todas as medições de tempo foram realizadas com um cronômetro digital, com precisão de uma casa decimal.

As temperaturas externas da panela (chapa metálica) foram medidas no momento logo após o final do lingotamento da panela na torre de LC; depois na chegada da panela no trole de manutenção e, finalmente, na chegada da panela no fosso de vazamento. Foram medidas as temperaturas internas (refratários) e externas (chapa metálica) das panelas com e sem isolante térmico. As temperaturas dos refratários da linha de escória foram medidas instantes antes do vazamento.

As panelas que passaram pela etapa de aquecimento no *trolley* não foram consideradas, pois o foco deste trabalho foi o resfriamento das panelas que permanecem sem nenhum ganho de energia durante o tempo sem aço. O objetivo desse acompanhamento foi analisar a influência das placas isolantes térmicas nas perdas de temperatura dos refratários da linha de escória das panelas durante o tempo em que estas permanecem sem aço. Também foram comparadas as diferenças de temperatura da parede externa (chapa metálica) entre as panelas com e sem o revestimento isolante.

A coleta de dados na aciaria ocorreu por um período de sessenta dias, foram coletados dados de noventa corridas, sendo quarenta e cinco para cada forno. As panelas das quais foram coletados os dados foram escolhidas aleatoriamente, ou seja, foram acompanhadas panelas com diferentes espessuras na linha de escória, diferentes tempos de panela cheia, diferentes tempos de processamento no FP. Porém, os dados analisados são para a mesma qualidade de aço fabricado e mesma temperatura de vazamento no forno elétrico, aproximadamente 1650°C. Porém, qualquer modificação na receita de ferroligas adicionadas durante o vazamento do aço ou alterações de 5°C na temperatura de vazamento, o dado fora excluído. Não foram analisadas panelas que não estavam no ciclo ou que estavam paradas. Após a análise e exclusão de dados que não estavam de acordo com os critérios deste estudo, foi realizada a análise dos dados válidos, comparando as perdas de temperatura do revestimento refratário da panela e do aço e tempos de espera relacionados a cada forno-panela existente na aciaria estudada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 40 mostra que o tempo médio de espera da panela até o início do vazamento de aço no forno elétrico 2 foi de, aproximadamente, 6,0 minutos enquanto que no forno elétrico 3 foi de 7,6 minutos. Após o vazamento do aço, outro ponto observado foi o tempo médio de transporte da panela até o forno-panela. Conforme a figura 41, o tempo médio de transporte da panela até o forno-panela 3 foi de aproximadamente 5,0 minutos, enquanto que o tempo médio de transporte da panela até o forno-panela 2 foi de 2,14 minutos. Esta diferença é explicada pelo layout desfavorável, ou seja, a distância do fosso de vazamento do forno elétrico 3 até o forno-panela 3 é, aproximadamente, duas vezes a distância do fosso de vazamento do forno elétrico 2 até o forno-panela 2. Além disso, quando não há ponte rolante disponível, as panelas ficam no fosso de vazamento aguardando para serem transportadas.

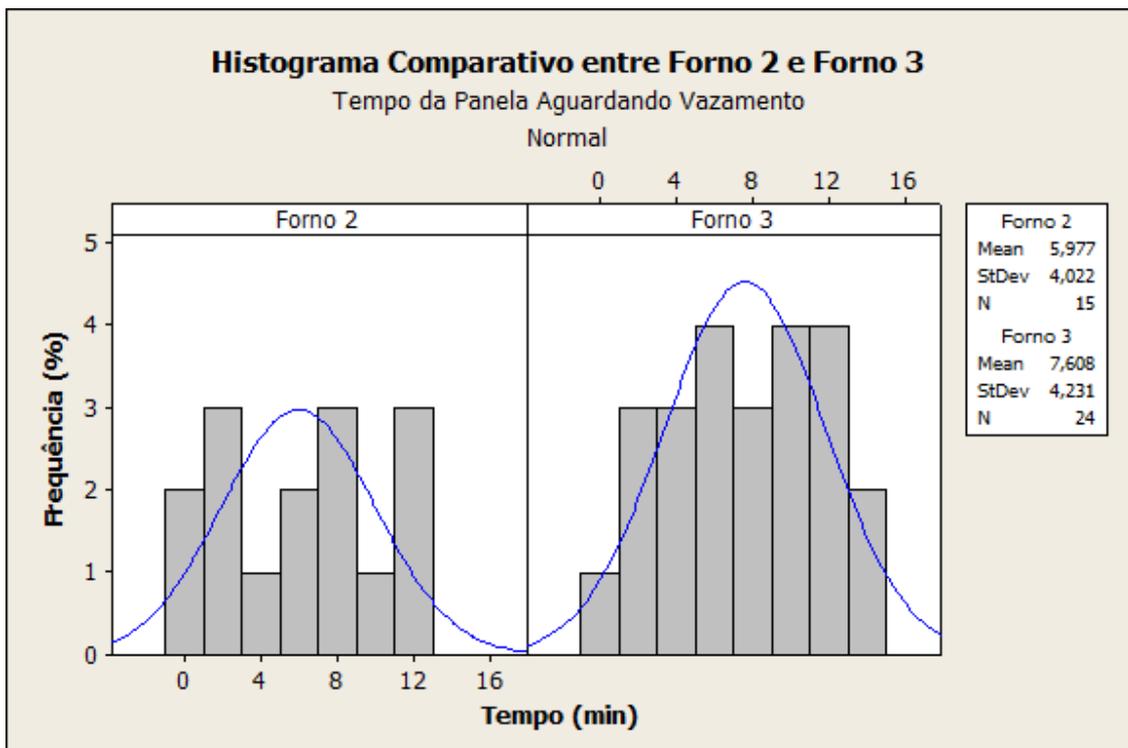


Figura 40 – Histograma comparativo entre os dois fornos do tempo da panela aguardando o início do vazamento.

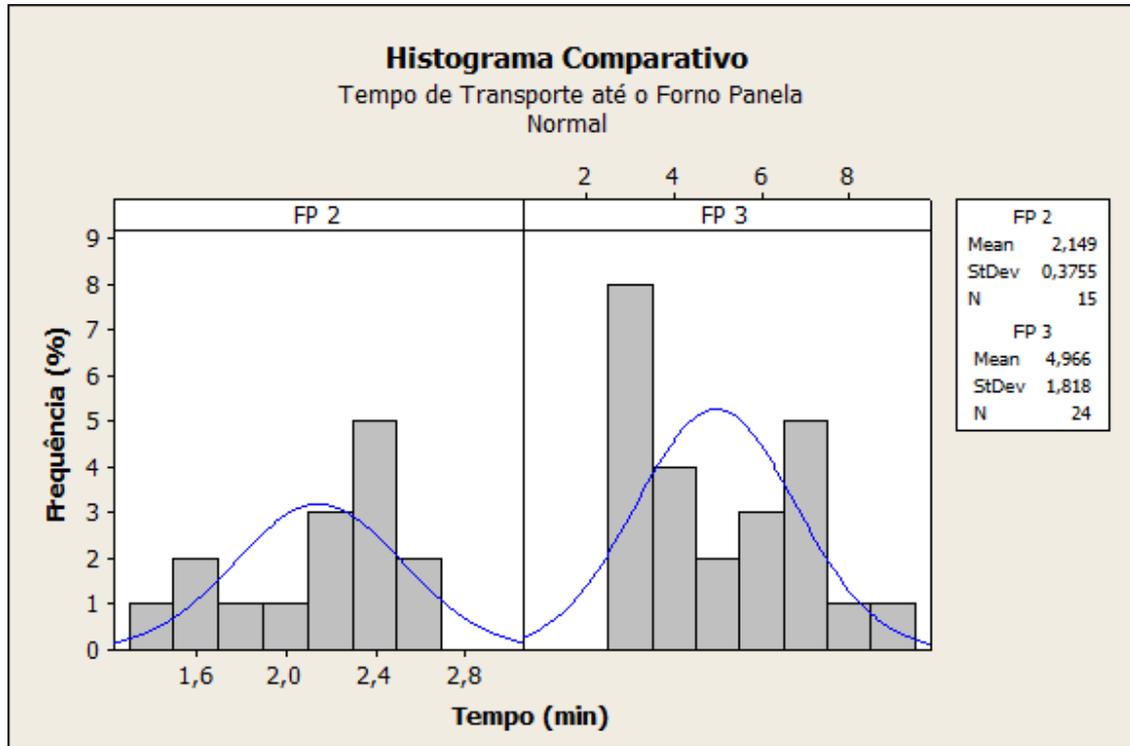


Figura 41 – Histograma comparativo do tempo de transporte da panela até o forno-panela após o vazamento de aço.

Como consequência, observou-se que a perda de temperatura dos eventos ocorridos no forno-panela 3 foi 21,6°C maior que a perda de temperatura do forno-panela 2, conforme demonstra a figura 42. Utilizando o fator de potência e a taxa de aquecimento do forno-panela da aciaria em estudo, esta diferença de temperatura corresponde a uma perda térmica de 13kWh, a qual deve ser compensado ao aço de forma elétrica, fato que é explicado pela diferença do tempo de transporte da panela após o vazamento até o forno-panela e, pelo tempo de espera da panela aguardando o início do vazamento no FEA. Observou-se que a perda de temperatura de ambos os fornos-panela está diretamente relacionada ao tempo de transporte da panela até os fornos-panela, como demonstra a figura 43. Observando a inclinação da curva da figura 43, percebe-se que a perda de temperatura e, conseqüentemente, a perda térmica dos dois fornos-panela é similar. Nesta análise se observou que há uma grande dispersão dos dados, caracterizando a aleatoriedade das medidas e a variação que pode ocorrer em processos industriais.

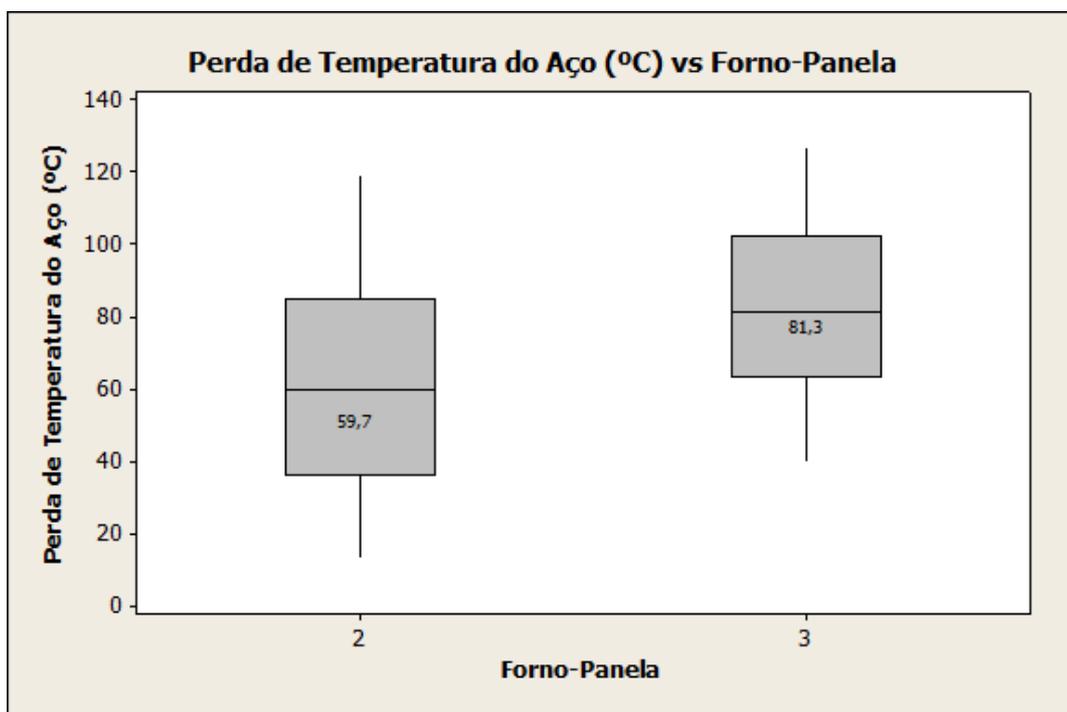


Figura 42 – Gráfico comparativo da perda de temperatura entre os dois fornos-panela.

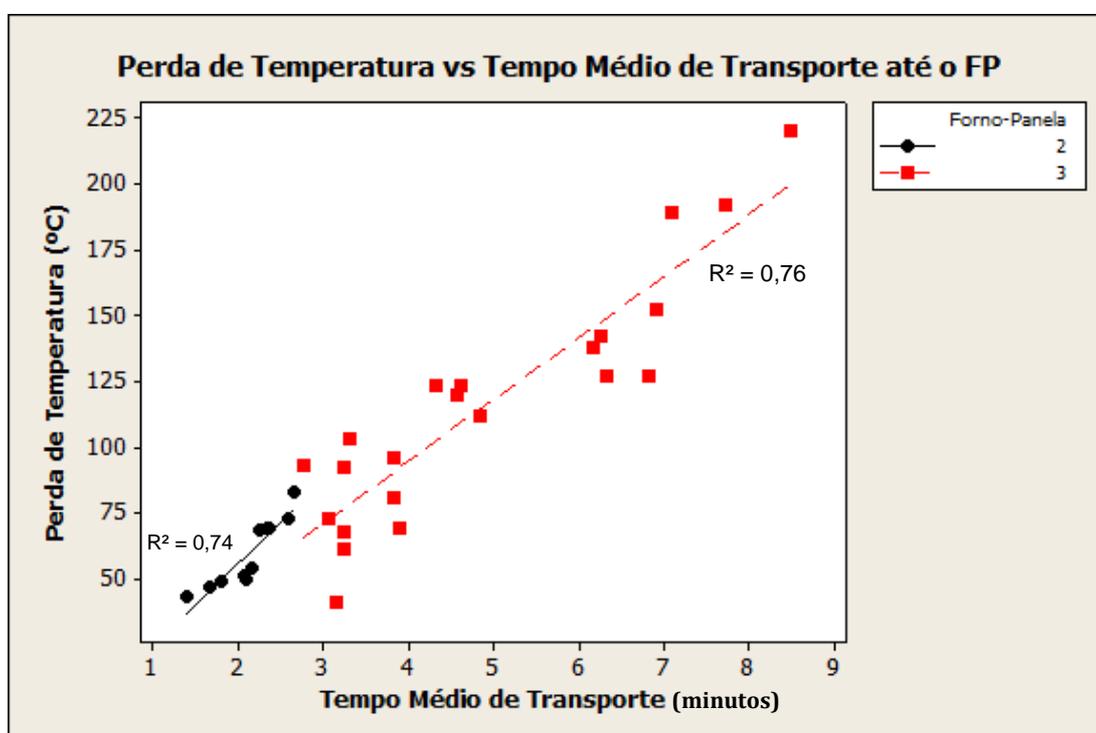


Figura 43 – Gráfico relacionando a perda de temperatura do aço e o tempo de transporte da panela até o forno-panela.

4.1 PERDAS DE TEMPERATURA DOS REFRAATÓRIOS DA LINHA DE ESCÓRIA DE PANEAS

A figura 44 mostra o resultado da perda de temperatura dos refratários da linha de escória das panelas em função do tempo de espera entre a chegada da panela no trolley de vazamento e o início do vazamento. Conforme Tomazin *et al.* (1986), quanto maior for o tempo de espera de panela vazia, maior foi a perda de temperatura da parede refratária na região da linha de escória. Os resultados mostraram que, para um tempo médio de espera de 10 minutos, a perda média de temperatura da parede refratária foi de 144°C e, de acordo com a linha de tendência dos dados da figura 44, observou-se grande dispersão nos dados obtidos, fato que é explicado pela vida útil da panela, condição de encharque da panela e espessura da parede refratária, conforme Tomazin *et al.* (1986). Com esta perda de temperatura que ocorre nos refratários da panela, se torna necessário, conforme Rutqvist *et al.* (1990), a compensação energética no forno-panela através do fornecimento de energia elétrica entre o arco e o banho metálico.

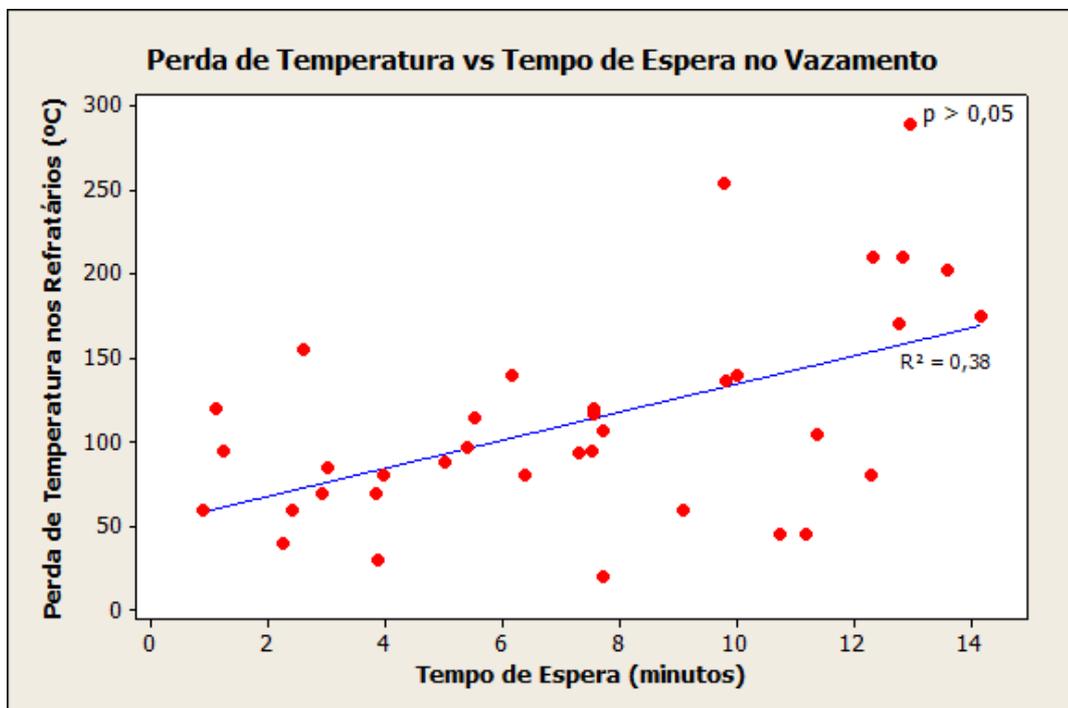


Figura 44 – Gráfico da perda de temperatura do refratário com relação ao tempo de espera do início do vazamento de aço.

A figura 45 mostra a correlação da perda de temperatura da panela em função do tempo de espera da mesma até o início do vazamento do aço do forno elétrico e a temperatura de chegada da panela no fosso, condição a qual é determinada pela passagem ou não da panela pelos aquecedores. Ferreira (2000) salienta que o tempo que compreende o final do aquecimento até o instante do vazamento do aço na panela é de crucial importância para a redução das perdas térmicas do aço, uma vez que a energia contida no revestimento refratário passa a ser perdida rapidamente para o ambiente. De acordo com as condições de chegada da panela e o tempo que a mesma fica esperando o início do vazamento, ocorrem diferenças nas perdas de temperatura. Apesar de não ter sido encontrado significância estatística entre as variáveis supracitadas, $p\text{-value} > 0,05$, observa-se uma certa tendência para uma perda de temperatura superior a 100°C , após 6 minutos da panela aguardar o início do vazamento do aço e, com temperatura média da face interna superior a 775°C . De acordo com os dados analisados, a temperatura da parede interna da panela não possui influência significativa para minimizar as perdas de temperaturas.

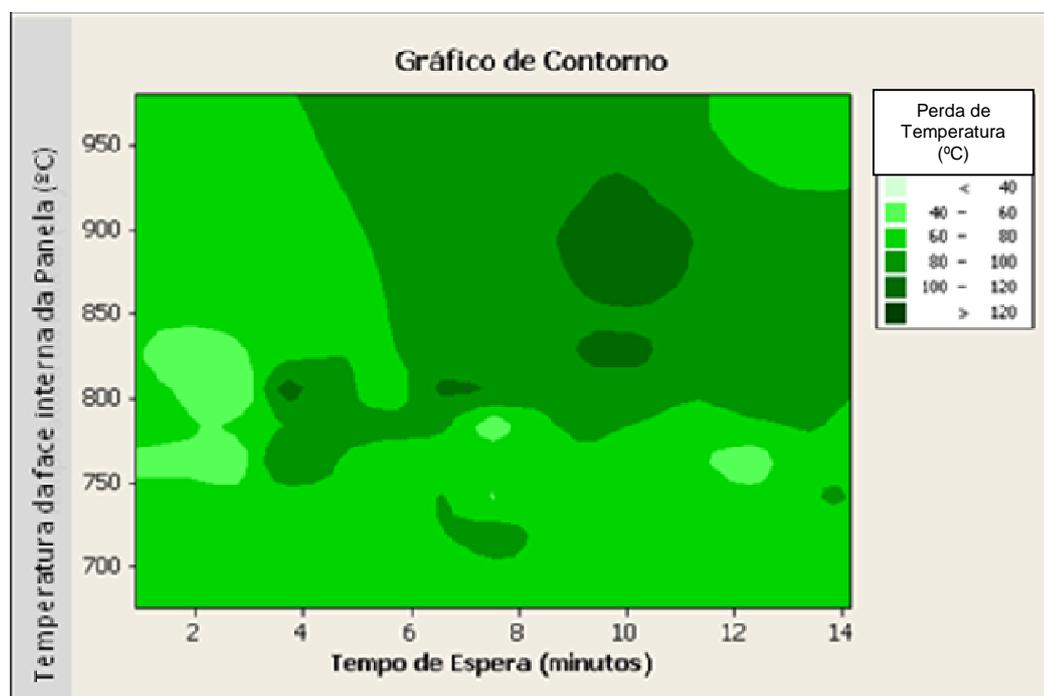


Figura 45 – Gráfico de contorno relacionando a perda de temperatura com as variáveis temperatura da panela e tempo de espera até o início do vazamento.

A figura 46 demonstra a análise da correlação entre o consumo de energia elétrica e a perda térmica, para ambos os fornos-panela onde se verificou que, com o aumento da perda térmica do revestimento refratário da panela, ocorre uma compensação, ou seja, um aumento do consumo de energia elétrica no forno-panela.

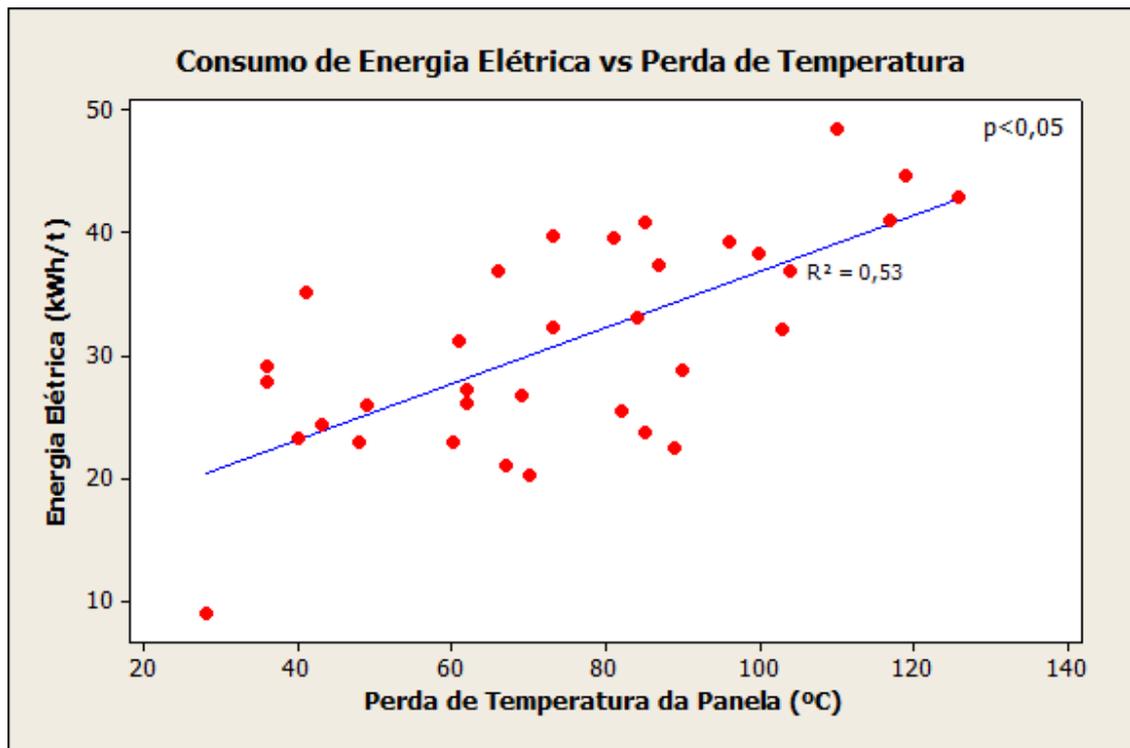


Figura 46 – Gráfico correlacionando o consumo de energia elétrica no forno-panela com a perda térmica.

As paredes refratárias perdem e ganham temperatura (energia). A entrada de energia pode ser pelo aquecedor ou pelo aço líquido, ocorrendo pela parede interna da panela. Já as perdas podem ser tanto pela parede interna quanto pela parede externa. As perdas térmicas pelas paredes internas ocorrem quando a panela está sem aço líquido pelos três mecanismos de perda de calor: radiação, condução e convecção. A figura 46 apresenta uma não linearidade dos dados, demonstrando que se pode melhorar a estabilidade do processo na aciaria estudada.

4.2 COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS DE PANELAS COM E SEM REVESTIMENTO ISOLANTE

A perda de temperatura dos refratários da linha de escória das panelas em função do tempo de espera entre chegada da panela no trole de manutenção até o vazamento é mostrada na figura 47, comparando-se as perdas da panela convencional com as perdas da panela com revestimento isolante.

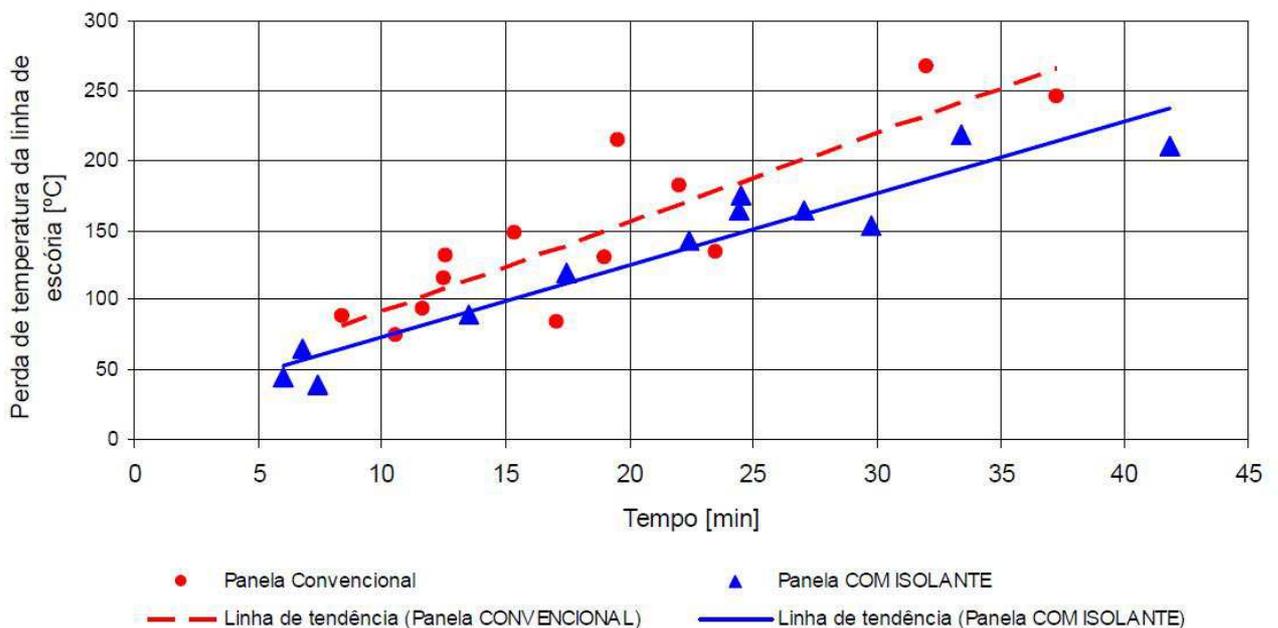


Figura 47 – Perda da temperatura dos refratários da linha de escória de panela em função do tempo de panela sem aço.

Os resultados mostraram que os refratários da superfície interna da panela com isolante tendem a resfriar menos que os refratários da panela convencional, considerando-se os mesmos ciclos térmicos entre elas. Isso pode ser explicado pela maior resistência térmica proporcionada pela inclusão da camada de placas isolantes, contribuindo então para um menor fluxo de calor por condução entre as paredes refratárias. As temperaturas da parede externa das duas panelas comparadas são mostradas nas figuras 48 e 49.

Assumindo que toda a diferença de temperatura do revestimento refratário foi incorporada a temperatura do banho e, considerando uma panela sem isolante térmico

e com temperatura na face interna de 334°C e outra panela com isolante térmico com temperatura de 301°C na face interna, há uma diferença na perda térmica do aço líquido que, em 21 toneladas, representa uma perda térmica de 150 kWh na panela sem isolante térmico e um aumento no tempo de operação no forno-panela de 3 minutos. Esta perda térmica é calculada utilizando a equação 4 considerando uma massa de 21 toneladas de aço e o calor específico do aço líquido (0,78 kJ/kg°C).

$$Q = m C \Delta T \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

Q – calor contido nas camadas refratárias (kJ);

m – massa de aço (kg);

C – Calor específico do aço líquido (kJ/kg°C)

ΔT – Diferença de temperatura

As considerações adotadas na utilização da equação 4 são:

- O aço líquido constitui-se num sistema fechado;
- Não existe produção de trabalho;
- O aço líquido é uma substância incompressível;
- Não existe variação de energia cinética nem potencial no sistema;
- O calor específico do aço líquido independe da temperatura.

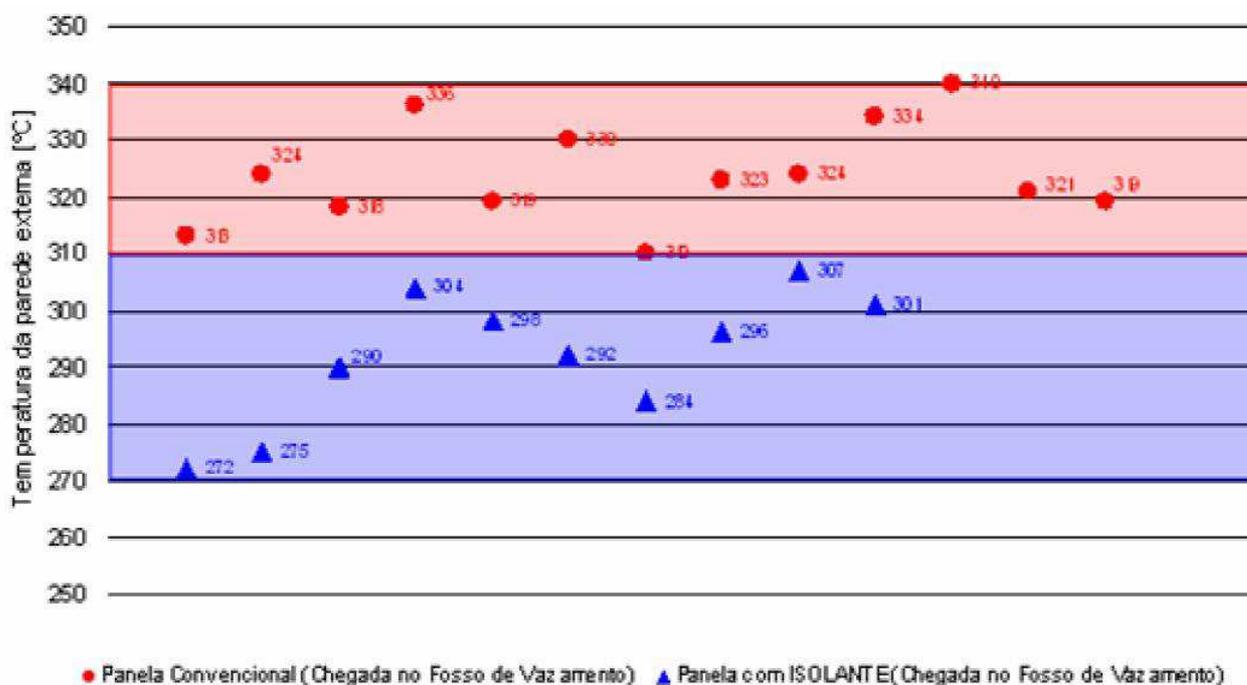


Figura 48 – Temperatura da parede externa das placas medidas na chegada ao fosso de vazamento.

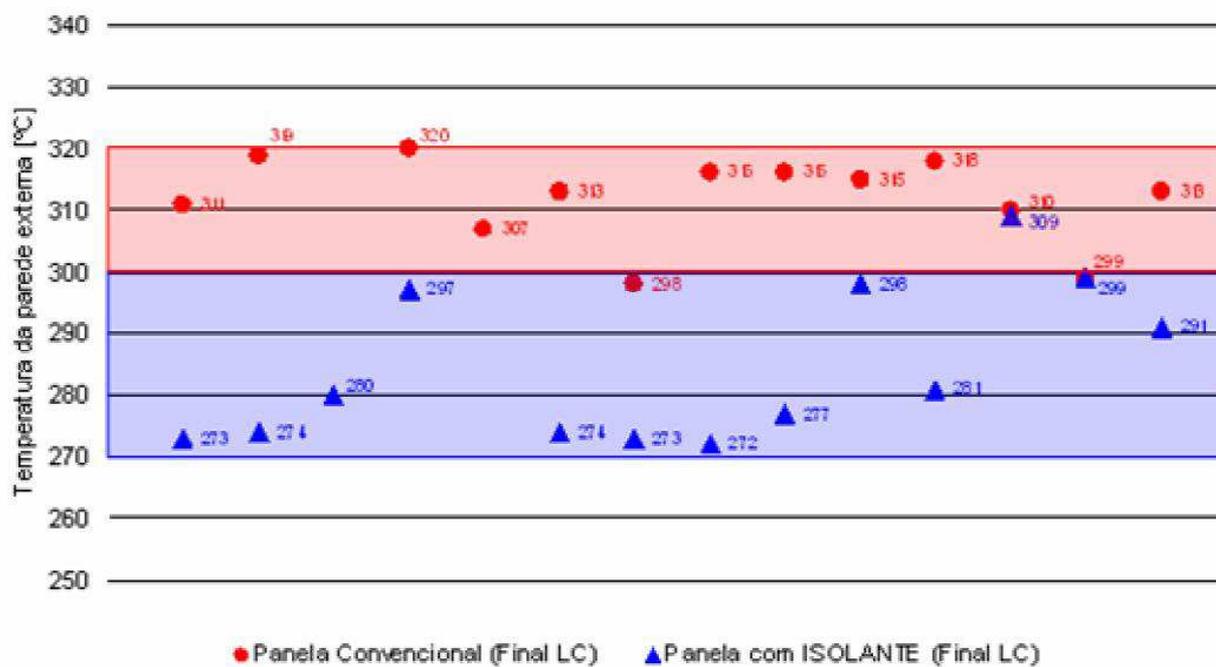


Figura 49 – Temperatura da parede externa das placas medidas no final do lingotamento da placa.

A tabela 4 mostra as temperaturas mínimas e máximas de cada etapa, considerando os dois tipos de revestimento.

Tabela 4 – Comparação das temperaturas mínimas e máximas da parede externa das painéis.

Etapa	Temperatura da parede externa (°C)			
	Painel com isolante		Painel sem isolante	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Final do lingotamento	272	299	298	320
Chegada no fosso de vazamento	272	307	310	340

Nota-se na tabela 4 que as diferenças de temperatura da chapa metálica da painél foram consideravelmente menores na painél com revestimento isolante para as etapas avaliadas, o que comprova a eficácia de seu uso para diminuição das perdas térmicas das painéis.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos em uma planta de aciaria elétrica industrial, as seguintes conclusões podem ser citadas:

- Com o layout desfavorável entre o fosso de vazamento do forno elétrico 3 e o forno-panela 3 o tempo médio de transporte foi de 5 minutos sendo, aproximadamente, 3 minutos superior ao tempo médio de transporte do fosso de vazamento do forno elétrico 2 até o forno-panela 2.

- Pode-se afirmar que o valor do consumo de energia elétrica no forno-panela está diretamente associado com o valor da perda térmica da panela ($p\text{-value} < 0,05$). A perda de temperatura que ocorre no forno-panela 3 é 21,6°C (13 kWh) maior quando comparada com a perda térmica do forno-panela 2, necessitando de um consumo energético maior no forno-panela 3 para suprir a diferença de temperatura.

- O tempo médio da panela aguardando o início do vazamento no forno 2 foi 1,7 minutos menor quando comparado ao tempo de espera do vazamento do forno 3. Sob o ponto de vista de minimizar as perdas térmicas das panelas durante o tempo sem aço, as operações que sujeitam a panela ao resfriamento neste tempo devem ser efetuadas no menor tempo possível e são diretamente impactadas pela disponibilidade de transporte das panelas pela equipe das pontes rolantes. O tempo em que a panela fica no fosso de vazamento do forno elétrico aguardando o início do vazamento do aço é variável de acordo com a logística do ciclo das panelas da Aciaria. Neste momento, a perda de calor por irradiação é muito alta o que explica a necessidade de minimização deste tempo da panela sem aço.

- Com relação a comparação de temperaturas de panelas com e sem revestimento isolante os resultados comprovaram a eficácia do uso do revestimento isolante térmico, pois os refratários da superfície interna da panela com isolante resfriaram menos que os refratários da panela convencional, ocasionando uma redução nas perdas térmicas de 150kWh. A utilização de revestimento isolante também foi eficaz na diminuição da temperatura da carcaça externa, fato que pode diminuir as deformações mecânicas na parte externa das panelas.

Na busca cada vez mais ostensiva na melhor eficiência energética e na maior competitividade no mercado siderúrgico, torna-se necessária a redução das perdas térmicas nas panelas da aciaria em que foi realizado o estudo. Para isso, ajustes nos procedimentos operacionais relacionados à logística do ciclo de panelas, redução do tempo de espera das panelas aguardando o início do vazamento e redução das perdas de temperatura das panelas, avaliação do uso de materiais isolantes e diminuição da variabilidade do processo devem ser realizados objetivando redução do consumo de energia elétrica no forno-panela.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se a seguir alguns trabalhos que podem ser desenvolvidos a partir deste:

- Avaliar as perdas térmicas, com o auxílio de termopares, da linha de metal e do fundo da panela, para obter-se o perfil térmico completo.
- Utilização da técnica da termografia para obtenção de uma maior área de temperaturas medidas ao mesmo tempo, tanto da parede interna quanto da chapa metálica externa;
- Teste de outros tipos de materiais isolantes no revestimento de panelas para avaliar a influência nas perdas térmicas e na redução do consumo de energia;
- Implantação de um sistema de supervisão das temperaturas do processo de aquecimento e de resfriamento das panelas durante o ciclo das panelas, para obter um maior controle das temperaturas e, conseqüentemente, um maior controle sobre a temperatura do aço líquido no lingotamento.
- Utilização de um modelo matemático para calcular o estado térmico das panelas e a temperatura do aço líquido em tempo real de produção
- Estudo do tracking das panelas de forma a determinar o real estado térmico das mesmas.
- Avaliar, entre os dois fornos desta aciaria, a qualidade do produto produzido em função das diferentes perdas térmicas

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, H. L. *O Sistema de Tampa de panela Articulada da Stelco – Uma Tecnologia de Alta Eficiência Energética*. In: Anais do 31º Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Vitória, 2000.
- ARAUJO, L. A. *Manual de Siderurgia vol.1*, São Paulo, Arte e Ciência , 1997.
- AUSTIN, P. R.; O´ROURKE, S. L.; HE, Q.L.; REZ, A. J. *Thermal Modelling of Steel ladles*. *Steelmaking Conference Proceedings*, p.317-323, 1992.
- BARBER, B.; ZORYK, A.; WALKER, K. D. *Process Model for the Determination of Liquid Steel Temperatures in the Ladle and Tundish*. *Process Technology Conference*, vol.14, Orlando, Florida, 1995.
- BEJAN, A. *Transferência de Calor*. Ed. Edgar Blücher, São Paulo, p.540, 1996.
- BELISÁRIO, P. L.; CIACCIA, P. P. M.; CAPRIGLIONE, P. S.; JESUS, A. B.; SILVA Jr., T. C. *Modelo Matemático para a Simulação do Ciclo Térmico de uma Panela de Aciaria da COSIPA*. Seminário COAÇO-COREF, Rio de Janeiro, p.693-711, 1989.
- BIELEFELDT, W. V. *Tratamento de Inclusões Não-Metálicas com Cálcio nos Aços SAE 1141 e SAE 8620*. Porto Alegre: UFRGS, 2009
- BRIMACOMBE, J., K., SORIMACHI, K., *Crack Formation in the Continuous Casting of Steel*. *Metallurgical Transactions*, v. 8B, 1977.
- BRIMACOMBE, J., K., SORIMACHI, K. *Formation of Longitudinal, Midface Cracks in the Continuously-Cast Slabs*. *Metallurgical Transactions*, v. 10B, 1978.
- CHEVRAND, L. J. S. *Aciaria Elétrica*. São Paulo: ABM, 2001
- CHRIST, F. S. *Melhoria no Aquecimento de Painéis em uma Aciaria Elétrica*. Porto Alegre: UFRGS, 2000
- FERNANDES, P. C. *Otimização dos Parâmetros de Lingotamento Contínuo para Minimizar Ocorrência de Trincas Superficiais no Aço DIN-20MnCr5 Mod*. Porto Alegre: UFRGS, 2005
- FERREIRA, N. F.; SILVA, L. R. M; STROHAECKER, T. R.; VILELA, A. C. F.; BAS, J. *Análise de fatores operacionais de panela da Aciaria da Gerdau Aços Finos Piratini Utilizando um Modelo Matemático*. In: Anais do 12º Seminário de Aciaria do IAS, 1999.
- FERREIRA, N.F. *Controle da Temperatura do Aço líquido em uma Aciaria Elétrica*. Porto Alegre: UFRGS, 2000..

- FERREIRA, N. F., et al. *Influência do Desgaste de Painéis sobre as perdas Térmicas do Aço Líquido*. In: Anais do 35º Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Salvador, 2004
- FERREIRA, N. F.; HENRIQUES, B. R.; SEVERO, D. S. *O Modelo Matemático das Painéis da CST*. In: Anais do 33º Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Santos, 2002.
- FREDMAN, T. P. *Heat Transfer in Steelmaking Ladle Refractories and Steel Temperature*. Scandinavian Journal of Metallurgy, v. 29, p.232-258, 2000.
- GASTÓN, A.; MEDINA, M. *Thermal Modeling of Casting Ladles: High-Alumina, Dolomite, Magnesite and Magnesia-Graphite Refractories*. Iron and Steelmaker, n.23, p.29-35, 1996.
- GRIP, C. E. *Determination of Thermal Stratification and Emptying Flow in Ladles by Continuous Temperature Measurement and Tracer Addition*. ISIJ International, v. 36, p. S211-S214, 1994.
- GRIP, C. E.; JONSSON, K. O.; ERIKSSON, S.; JONSSON, L.; JONSSON, P.; PAN, Y. *Theoretical and Practical Study of Thermal Stratification and Drainage in Ladles of Different Geometry*, p.101-117, 1999.
- GUPTA, N., CHANDRA, S. *Temperature Prediction for Controlling Casting Superheat Temperature*. ISIJ International, v.44, p.1517-1526, 2004.
- GUZELA, D. N. *Modelo Matemático para determinação da Queda de Temperatura do Aço no Vazamento de Corridas em Convertedores LD*. In: Seminário COAÇO – COREF, São Paulo, 1985.
- HLINKA, J. W.; CRAMB, A. W.; BRIGHT, D. H. *A Model for Predicting the Thermal History of a Ladle of Steel*. Steelmaking Conference, v. 68, Detroit, Michigan, USA,, p.14-17, 1985.
- INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. *The Electric Arc Furnace* – 1986. Bélgica, 1986
- IRVING, W. R. *Continuous Casting of Steel*. Cambridge: The University Press, p.207, 1993.
- JOHN, A. L. *Melhorias no Desempenho dos Injetores Supersônicos em Operação em um Forno Elétrico a Arco*. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- MATOS, M., CARVALHO, J. L. R., ETRUSCO, G., ANDRADE, S. L., RAMOS, H. N. O. *Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido*. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1983.

- OHNO, A. *Solidificação dos Metais*. São Paulo: Livraria Ciência e Tecnologia, p.185, 1988.
- MUCCIARDI, F.; GRANDILLO, A. *Optimizing Ladle Cycling Strategies*. Steelmaking Conference Proceedings, p.757-760, 1991.
- MUCCIARDI, F.; GRANDILLO, A. *Thermal Cycling of Ladles at Stelco McMaster Works*. *Iron and Steel Engineer*, p.24-30, 1987.
- MINION, R. L.; LECKIE, C. F. *Steel Temperature Control in the Ladle in a High Productivity BOF shop*. Steelmaking Conference Proceedings, AIME, Washington, p.335-342, 1986.
- MUNDIM, M. J.; CASTRO, J. C. V.; ZIVIANI, M. *Análise Térmica da Panela de Aço*. 40th Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, p.407-411, 1986.
- OMOTANI, M. A.; HEASLIP, L. J.; McLEAN, A. *Ladle Temperature Control During Continuous Casting*. *Iron & Steelmaker*, p.29-35, 1983.
- PERKINS, A.; ROBERTSON, T; SMITH, D. *Improvements to Liquid Steel Temperature Control In The Ladle And Tundish*. Scaninject IV, Lulea – Suécia, p.10:1-10:29, 1986.
- RAJÃO, C. T. *Perdas Térmicas em Painéis de Aço – Resfriamento do Metal*. In: Seminário COAÇO – COREF, Rio de Janeiro, 1989.
- REIS, G. O. N.; CHEVRAND, L. *Curso de Lingotamento Contínuo de Blocos e Tarugos*. 2.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, p.196, 1998.
- RIZZO, E. M. S. *Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços*. ABM, São Paulo, 2006.
- RIBEIRO, D. B., H. A. Quintão, & C. A. Cruz (2005). *Refino Secundário dos Aços*. ABM, São Paulo, 2005.
- RUTQVIST, S.; BERGMAN, D.; OLIKA, B. *Determination of Ladle Lining Heat Content With Radiation Thermometer*. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, n.19, p.146-152, 1990.
- SILVA M. J. S. *Redução do Consumo Específico de Eletrodos de Grafita nos Fornos Elétricos à Arco da Aciaria da Gerdau Riograndense*. Porto Alegre: UFRGS, 2005.
- SZEKELY, J.; LEE, R. G. *The effect of Slag Thickness on Heat Loss from Ladles Holding Molten Steel*. *Transactions of Metallurgical Society of AIME*, v. 242, p. 961-965, 1968.
- SZEKELY, J., G. Carlsson, & L. Helle. *Ladle Metallurgy* (1st ed.). Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg London Paris Tokyo, 1988.

SZEKELY, J.; EVANS, W. *Radiative Heat Loss From the Surface of Molten Steel Held in a Ladle*. Transactions of Metallurgical Society of AIME, v. 245, p. 1149-1159, 1968.

SZEKERES, E. S. *Strand Solidification: Part I – Shell Development*. Brimacombe Continuous Casting Course, v. II, 2005.

TETRAULT, C., et al. *CFD Analysis of Thermal Behavior of Refractory in Steel Ladle Cycling*. AISTech 2004 Proceedings, v. I, 2004.

TOMAZIN, C. E.; UPTON E. A. *The Effect of Ladle Refractories and Practices on Steel Temperature Control*. Iron & Steelmaker, p.28-34, 1986.

TRINDADE, L. B. *Modelo Matemático de um Agitador Eletromagnético*. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

TURKDOGAN, E. T. *Fundamentals of Steelmaking*. The Institute of Materials, Londres, 1996.

ÜNAL, Ç. *Steady State Heat Transfer of Ladle Furnace During Steel Production Process*. Journal of Iron and Steel Research, International, v. 13, n. 3, p. 18-20, 2006.

URQUIZA, J.A. *Hornos de Arco para Fusion de Acero – Teoría, cálculo y aplicaciones*. Madrid: McGraw-Hill, 1995.