



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DANIEL RODRIGUES OLIVEIRA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS PANEIS DA
ACIARIA DA SIDERÚRGICA SINOBRAS S.A.**

**MARABÁ
2013**

DANIEL RODRIGUES OLIVEIRA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS PANEIS DA
ACIARIA DA SIDERÚRGICA SINOBRAS S.A.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade Federal
do Pará. Orientador: Prof. M.Sc. Márcio
Corrêa de Carvalho.

MARABÁ
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Josineide Tavares, Marabá-PA)

Oliveira, Daniel Rodrigues.

Estudo do comportamento térmico das panelas da aciaria da siderúrgica Sinobras S.A. / Daniel Rodrigues Oliveira ; Orientador, Márcio Corrêa de Carvalho. – 2013.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais, 2013.

1. Engenharia de Materiais. 2. Controle da temperatura em panelas aciárias. 3. Forno. I. Título.

CDD - 22 ed.: 620.11

DANIEL RODRIGUES OLIVEIRA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS PAINÉLAS DA
ACIARIA DA SIDERÚRGICA SINOBRS S.A.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade Federal
do Pará. Orientador: Prof. M.Sc.Márcio
Corrêa de Carvalho.

Data de aprovação: de de 2013.

Conceito: _____

Banca examinadora:

_____ - Orientador
Prof. M.Sc. Márcio Corrêa de Carvalho / UFPA

_____ - Membro interno
Prof.a. M.Sc. Simone Patrícia Aranha da Paz / UFPA

_____ - Membro interno
Prof.Esp. Márcio Paulo de Artaújo Mafra / UFPA

Dedico à minha família e aos verdadeiros
“iromans” que trabalham diariamente pelo
progresso da nossa nação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, porque eu não seria nada sem Ele. Agradeço por Ele acreditar em mim mais do que eu mesmo, pelo seu infinito amor e tão grande misericórdia;

À minha família porque sem ela não seria possível eu realizar mais um sonho. Agradeço por todo apoio que me deram nos momentos de necessidade;

À equipe de colaboradores de Sinobras que trabalham na área de preparação de painéis e forno-painel, os quais recordo alguns nomes como Cleomar, "Torão", Antônio Flávio, Francisco, José Silva, Bruce Lee, entre outros que ajudaram sem nenhum impedimento no desenvolvimento deste trabalho;

Ao diretor industrial Gerson Ceslau Rusky que aprovou a idéia da realização deste trabalho, acreditou e deu total liberdade para o desenvolvimento do mesmo. Agradeço também ao engenheiro de processos Bruno Pinheiro que trabalhou intensamente no projeto, sem o qual não se poderia desenvolver parte do trabalho, e ao planejador Adilson por participar ativamente com sua grande experiência;

Aos colaboradores da Magnesita: Wagner, Rodrigo Sampaio, Raimundo Oliveira, Éder e Marcos Paulo que nunca se oporam ao projeto e sempre forneceram as informações que necessitávamos;

Ao orientador professor Márcio Correa que com sua grande experiência e sabedoria apontou os caminhos que eu deveria percorrer;

Aos meus amigos em especial Caio César e Leonardo Rodrigues, que tanto me ajudaram e a todos os meus amigos da FEMAT 2009 e agregados que caminharam juntos comigo nesta jornada que está se finalizando para se iniciar uma próxima.

"Aquele que tem os meus mandamentos e os guarda esse é o que me ama; e aquele que me ama será amado do meu Pai, e eu o amarei, e me manifestarei a ele"

Jesus Cristo (João 14-21)

"Nada que valha a pena na vida pode ser alcançado sem trabalho, que às vezes é enfadonho, vagaroso e monótono, e a Engenharia não é uma exceção."

Edward Shigley

RESUMO

O controle da temperatura dentro de uma aciaria é de primordial importância para a qualidade do aço produzido, para a produtividade e custo de produção. A falta de um controle preciso das temperaturas adequadas para as panelas pode acarretar problemas no processo. O objetivo do presente trabalho consistiu em se modelar matematicamente as panelas da Siderúrgica Sinobras S.A. e através de medições de temperatura na planta e simulação computacional se conhecer o comportamento térmico durante o ciclo operacional, como as etapas de panela cheia e vazia. A partir daí se procurou otimizar o processo no sentido de diminuir as perdas de energia calorífica das mesmas durante as etapas, seja de panela vazia ou cheia, garantindo assim um menor consumo de energia elétrica no Forno-panela, para reestabelecer a quantidade de energia calorífica do aço líquido. Outro objetivo foi a manutenção de temperaturas mais altas nas panelas vazias logo antes do vazamento. Através da modelagem matemática e das simulações computacionais se obteve a perdas de temperatura das panelas e assim foram propostas mudanças operacionais e físicas. Modificações foram simuladas computacionalmente a fim de se proporcionar a diminuição das perdas de calor e conseqüentemente proporcionar um maior acerto nas temperaturas do aço líquido, garantindo assim uma melhor qualidade no aço produzido.

Palavras-chave: Panela de aciaria; Simulação Computacional; Controle da temperatura em panelas; Ciclo operacional de panelas.

ABSTRACT

The temperature control at a steelmaking is of main importance to the quality of steel produced, for productivity and production cost. The lack of precise control of temperatures suitable to ladles can cause problems in the process. The aim of this work consisted of modeling mathematically the ladles of the integrated Steelmaking Sinobras S.A. and through temperature measures on plant and computer simulations to know the thermal behavior during heating and operational steps like as full and empty ladles. From there we tried to optimize the process in order to reduce the loss of heat energy during steps, ladle is empty or full, thus ensuring a lower power consumption in the Ladle-furnace, to reestablish the amount of heat energy liquid steel. Another objective was to maintain higher temperatures at the ladles before tapping. Through mathematical modeling and computer simulations we obtained the temperature loss of the ladles and so were proposed operational and physical changes. Modifications were computationally simulated in order to provide a reduction of heat losses and thus provide greater accuracy in the liquid steel temperatures, thus ensuring a better quality steel produced.

Keywords: Ladle; Computational Simulation; Control temperature on Ladles; Operational cycle of ladles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Produção de aço bruto nos anos de 2012 e 2013 até o mês de maio.	17
Figura 2.2 - Exportações brasileiras nos anos de 2012 e 2013 até o mês de maio.	17
Figura 2.3 - Importações brasileiras nos anos de 2012 e 2013 até o mês de maio.	18
Figura 2.4 - Desenho tridimensional de um FEA.	19
Figura 2.5 - Processos de fusão e refino do aço no FEA.	20
Figura 2.6 - Forno elétrico a arco utilizado na SINOBRAS.	21
Figura 2.7 - Representação esquemática de um Forno-Panela em funcionamento.	23
Figura 2.8 - Ciclo teórico de tratamento de aço comum no forno panela.	26
Figura 2.9 - Esquema de uma máquina de lingotamento contínuo.	27
Figura 2.10 - Representação esquemática das formas e dimensões típicas da seção transversal dos produtos comuns do processo de lingotamento contínuo.	28
Figura 2.11 - Transferência de calor por condução unidimensional.	30
Figura 2.12 - Transferência de calor por convecção unidimensional.	32
Figura 2.13 - Transferência de calor por radiação térmica.	33
Figura 2.14 - Esquema da transferência de calor através da escória.	34
Figura 2.15 - Comportamento térmico de um sistema aço líquido/panela: a) Efeito da temperatura de vazamento sobre o resfriamento do aço; b) Taxas de perda de calor do aço líquido para as paredes refratárias (parede e fundo) e através da escória.	36
Figura 2.16 - Esquema do Ciclo operacional das panelas da SINOBRAS.	37
Figura 2.17 - Exemplos de malhas de MDF aplicadas a um polígono regular (retângulo): (a) triangular estruturada e (b) retangular estruturada.	39
Figura 2.18 - Exemplos de malhas de MDF aplicadas a um polígono com geometria irregular: (a) triangular estruturada e (b) retangular estruturada.	39

Figura 2.19 - Exemplos de malhas de MEF não estruturadas: (a) triangular e (b) retangular.	40
Figura 3.1 – Pirômetro infravermelho usado para as medições.	42
Figura 3.2 – Fotos de uma panela mostrando os locais de medida de temperatura.....	43
Figura 3.3 – Representação do modelo para a panela vazia.	45
Figura 3.4 – Desenhos tridimensionais da panela: (a) sem tampa e (b) com tampa.....	49
Figura 3.5 – Malhas computacionais da panela. (a) panela normal sem tampa; (b) panela com isolante e sem tampa; (c) refratário de trabalho sem tampa; (d) refratário de trabalho com tampa.	50
.....	50
Figura 3.6 – Mudança operacional e alavanca de acionamento manual do damper.	52
.....	52
Figura 4.1 - Taxas de queda de temperatura durante as corridas no período entre o término da limpeza até a adição de areia de vedação para panelas tampadas e destampadas.....	54
Figura 4.2 - Taxas de queda de temperatura com as corridas entre a adição de areia e o vazamento para as condições de panelas destampadas, tampadas e as que foram colocadas sob a abobada.....	54
Figura 4.3 - Temperaturas das panelas antes do vazamento.	56
Figura 4.4 – Energia elétrica consumida no FP com as corridas.....	58
Figura 4.5 – Relação entre queda de temperatura do aço líquido entre FEA e FP e a temperatura da linha de escória antes do vazamento.	58
Figura 4.6 – Relação entre a energia gasta no FP e a queda de temperatura do aço líquido entre FEA/FP.	59
Figura 4.7 – Perfis de temperatura na região da linha de escória após 20 minutos: (a) destampada e (b) tampada.....	60
Figura 4.8 – Perfis de temperatura na região da linha de metal após 20 minutos: (a) destampada e (b) tampada.....	61
Figura 4.9 – Perfis de temperatura na região da linha de escória após 40 minutos: (a) destampada e (b) tampada.....	62

Figura 4.10 – Perfis de temperatura na região da linha de escória: (a) panela sem isolante e (b) panela com isolante.....	63
Figura 4.11 – Perfis de temperatura na região da linha de metal: (a) panela sem isolante e (b) panela com isolante.....	63
Figura 4.12 – Perfis de temperatura na região da linha de escória e metal para panela utilizando tijolo isolante térmico.	64
Figura 4.13 – Fluxo de calor pela carcaça metálica da panela normal.	65
Figura 4.14 – Fluxo de calor pela carcaça metálica pela panela com isolante térmico.	65
Figura 4.15 – Deformação da carcaça metálica da panela normal submetida à solicitações termo-mecânicas e foto de uma panela apresentado a deformação.....	66
Figura 4.16 – Deformação da carcaça metálica da panela com isolante submetida à solicitações termo-mecânicas.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Produção siderúrgica brasileira atualizada.....	16
Tabela 2.2 - Relação das técnicas mais difundidas para a realização do refino secundário e seus respectivos objetivos básicos.	22
Tabela 2.3 - Classificação do processo de lingotamento contínuo dos aços .	28
Tabela 3.1 – Propriedades importantes da panela	46
Tabela 3.2 – Propriedades dos isolantes térmicos selecionados.....	52
Tabela 4.1 - Levantamento das temperaturas durante o ciclo operacional.	53
Tabela 4.2 - Taxas-média de queda de temperatura das panelas.	55
Tabela 4.3 - Taxas-média total de queda de temperatura das panelas.	55
Tabela 4.4 – Temperaturas do aço líquido durante ciclo operacional	57
Tabela 4.5 - Valores de queda e taxa de queda de temperatura para as panelas sem tampa com temperatura inicial de aproximadamente 900°C.....	67
Tabela 4.6 - Valores de queda e taxa de queda de temperatura para as panelas com tampa com temperatura inicial aproximadamente igual a 900°C.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
°C/min.	Grau Celsius por minuto
1D	Uma dimensão
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
A	Área
ABR	Abril
FEA	Forno Elétrico à Arco
FP	Forno-panela
H	Coeficiente de transferência de calor
IABR	Instituto Aço Brasil
JAN	Janeiro
k	Condutividade térmica
K	Kelvin
kA	Kiloâmperes
kg/m ³	Kilograma por metro cúbico
kVA	Kilovolts-âmperes
LC	Lingotamento contínuo
m	Metro
m ² /s	Metro quadrado por segundo
MAI	Maio
MAR	Março
MDF	Método de Diferenças Finitas
MEF	Método de Elementos Finitos
mm	Milímetro
Mpa	Megapascal
R\$	Real (moeda monetária Brasileira)
S.A.	Sociedade Anônima
SINOBRAS	Siderúrgica Norte Brasil S.A.
T	Temperatura
T _s	Temperatura na superfície
US\$	Dólar (moeda monetária Americana)
v11	Volume 11
W	Watts
W/m°C	Watts por metro graus Celsius
W/m ²	Watts por metro quadrado
W/mK	Watts por metro x Kelvin
q_x	Fluxo de calor na direção x
Q _x	Taxa de Transferência de calor na direção x
T _∞	Temperatura ambiente
q_{rad}	Fluxo de calor radiativo
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
ε	Emissividade da superfície do material
α	Difusividade de calor

SUMÁRIO

1INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	Erro! Indicador não definido.
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1Objetivos Gerais	15
1.2.2Objetivos Específicos	15
2REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 A IMPORTÂNCIA DO AÇO NA ECONOMIA BRASILEIRA	16
2.2 O PROCESSO DE OBTENÇÃO DO AÇO EM UMA ACIARIA ELÉTRICA	18
2.2.1Refino Primário – Forno Elétrico a Arco	18
2.2.2Refino Secundário – Forno-Panela	21
2.2.3Lingotamento Contínuo	26
2.3 TRANSFERÊNCIAS DE CALOR	29
2.3.1Condução	30
2.3.2Convecção	31
2.3.3Radiação	32
2.4 PERDAS TÉRMICAS PELAS PANELAS	33
2.4.1Perdas através da escória	34
2.4.2Perdas através dos refratários	35
2.5 CICLO De PANELAS	37
2.6 MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	38
2.6.1Métodos Numéricos	38
2.6.2Simulação Computacional	40
3MATERIAIS E METODOLOGIA	42
3.1 DETERMINAÇÃO DAS PERDAS DE TEMPERATURA DAS PANELAS	42
3.2 DETERMINAÇÃO DAS PERDAS DE CALOR DO AÇO LÍQUIDO DURANTE O VAZAMENTO	43
3.3 MODELAMENTO MATEMÁTICO DA PANELA	44
3.3.1Condições de Contorno e Considerações Físicas	44
3.3.2Equações do Modelo Térmico	46
3.4 DESENVOLVIMENTO DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	48
3.5 MUDANÇAS PROPOSTAS	51
4RESULTADOS E DISCUSSÕES	53

4.1	RESULTADOS DAS MEDIDAS DE TEMPERATURA	53
4.2	ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA NO FORNO PANELA	57
4.3	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	59
4.4	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	67
5	CONCLUSÕES	70
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
7	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

O aço é de longe a liga metálica mais utilizada pelo ser humano devido a sua grande versatilidade e baixo custo. Ela é utilizada em uma ampla gama de aplicações desde pequenos objetos como alfinetes, até grandes estruturas como em pontes, navios e arranhacéis.

A fabricação de aço possui grande potencial de crescimento econômico e também social para uma nação, uma região, etc. A instalação de uma siderúrgica em uma região gera a criação de uma grande quantidade de ofertas de emprego e formação de mão-de-obra qualificada. Por outro lado há a necessidade de geração de várias indústrias de fornecimento de equipamentos ou componentes, serviços e insumos.

As indústrias siderúrgicas atualmente procuram a otimização dos processos com o intuito de diminuir custos e o consumo de energia envolvida nos processos produtivos. As panelas de aço utilizadas em aciaria para o transporte e metalurgia secundária precisam trabalhar em temperaturas adequadas para que não haja grandes perdas de energia calorífica no aço líquido e para que a mesma possua uma vida útil de seus refratários satisfatória.

Um controle de temperatura no ciclo operacional das panelas é de primordial importância para o acerto de temperatura do aço líquido com um menor consumo de energia elétrica no forno-panela e também para se diminuir as perdas caloríficas pelas panelas. As maiores perdas de calor se devem as etapas de panela vazia. Estas etapas consistem na limpeza, manutenção, adição de areia de vedação e tempo de espera até o vazamento.

A partir do modelamento matemático e simulação computacional pode-se obter a perda de temperatura das panelas com o tempo e a estratificação térmica em diferentes condições de serviço.

O objetivo deste trabalho é a de se realizar um estudo das condições térmicas das panelas da aciaria Sinobras S.A. através de coleta de dados na área, modelagem matemática e simulação computacional das panelas em operação a fim de se determinar as perdas de calor. Através dos resultados soluções são propostas a partir de simulações computacionais de transferência de calor pelas panelas e também mudanças operacionais que minimizem as perdas caloríficas, diminuindo consequentemente o gasto energético no forno-panela.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Através do presente trabalho demonstrar, que com a medição de temperaturas, modelamento matemático e o auxílio da simulação computacional se pode conhecer o comportamento térmico das panelas da aciaria SINOBRAS S.A. e através dos resultados, verificar condições para se reduzir as temperaturas de trabalho da aciaria.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais empregados na construção das panelas;
- Medir as temperaturas das panelas em vários pontos em diferentes etapas do processo;
- Medir as temperaturas do aço líquido dentro da panela no período entre vazamento e chegada da panela no forno-panela;
- Ajustar modelos matemáticos de transferência de calor para a panela da Sinobras através de dados obtidos na planta;
- Simular computacionalmente as panelas nas condições destampadas, tampadas e possíveis modificações durante as etapas e;
- Analisar os resultados obtidos nas simulações e propostas quanto a aplicabilidade e viabilidade para a aplicação prática.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A IMPORTÂNCIA DO AÇO NA ECONOMIA BRASILEIRA

Para onde quer que se olhe há a presença do aço. Seja no trabalho, em casa, no lazer, nos hospitais, obras públicas, etc, existem produtos fabricados em aço. A presença é tão constante que o aço muitas vezes se torna invisível. O aço é o produto de uma das indústrias mais importantes para o desenvolvimento da economia brasileira.

Este é um setor que está comprometido com o desenvolvimento do país. Comprometimento este revelado também nas ações em prol da sustentabilidade, baseada nos pilares econômico, social e ambiental. A indústria siderúrgica brasileira é uma das mais competitivas do mundo. Ela vem gerando mais de R\$ 45 bilhões em valor adicionado para o país, sendo responsável por um saldo comercial acima de US\$ 4 bilhões, o que significa aproximadamente 18% do total do país. As siderúrgicas têm empregado atualmente aproximadamente 110 mil pessoas [1].

A produção de aço bruto no Brasil em maio de 2013 foi de 3,0 milhões toneladas com uma alta de 5,5% quando comparada com o mesmo mês em maio de 2012. Com relação às vendas internas, o resultado de maio de 2013 foi de 2,0 milhões de toneladas de produtos, com um aumento de 3,4% em relação a maio de 2012. Já com relação às exportações, em maio de 2013 se atingiu 608 mil toneladas no valor de 508 milhões de dólares. Com esse resultado, as exportações em 2013 totalizaram 3,9 milhões de toneladas e 2,6 bilhões de dólares [1]. Na tabela 2.1 abaixo é mostrada uma preliminar da produção siderúrgica de junho de 2013 de acordo com os produtos fabricados:

Tabela 2.1 - Produção siderúrgica brasileira atualizada.

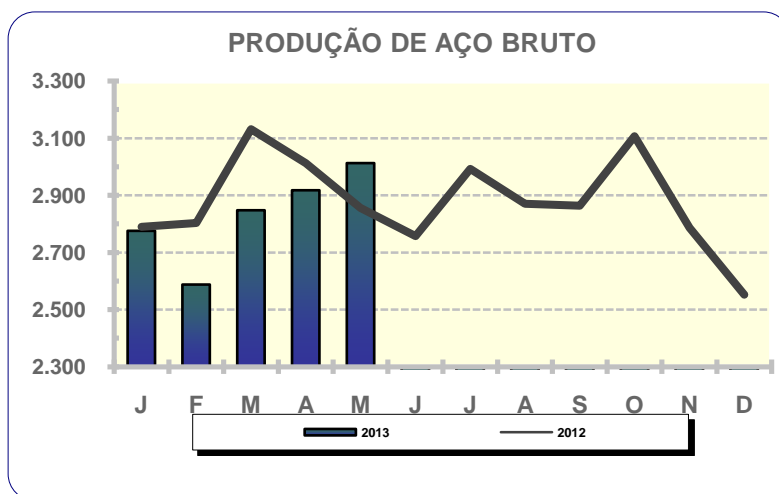
	JAN/MAI		13/12 (%)	MAR 2013	ABR 2013	MAIO		13/12 (%)	ÚLTIMOS 12 MESES
	2013(*)	2012				2013(*)	2012		
AÇO BRUTO	14.142,8	14.593,7	(3,1)	2.848,4	2.918,1	3.013,1	2.856,2	5,5	34.072,7
LAMINADOS	10.675,2	10.666,3	0,1	2.198,7	2.193,3	2.297,8	2.212,7	3,8	25.704,8
PLANOS	6.109,2	6.095,6	0,2	1.267,4	1.232,4	1.268,7	1.273,4	(0,4)	14.910,6
LONGOS	4.566,0	4.570,7	(0,1)	931,3	960,9	1.029,1	939,3	9,6	10.794,2
SEMI- ACABADOS P/VENDAS	2.373,4	3.258,0	(27,2)	546,9	459,8	442,1	584,4	(24,3)	6.253,6
PLACAS	1.950,2	2.738,0	(28,8)	431,6	386,8	346,0	479,5	(27,8)	5.224,6
LINGOTES, BLOCOS E TARUGOS	423,2	520,0	(18,6)	115,3	73,0	96,1	104,9	(8,4)	1.029,0

(*) - Dados preliminares.

Fonte: [1] IABR.

Na figura 2.1 é mostrado um gráfico comparativo entre as produções de aço bruto no ano de 2012 e o ano de 2013 até o mês de maio:

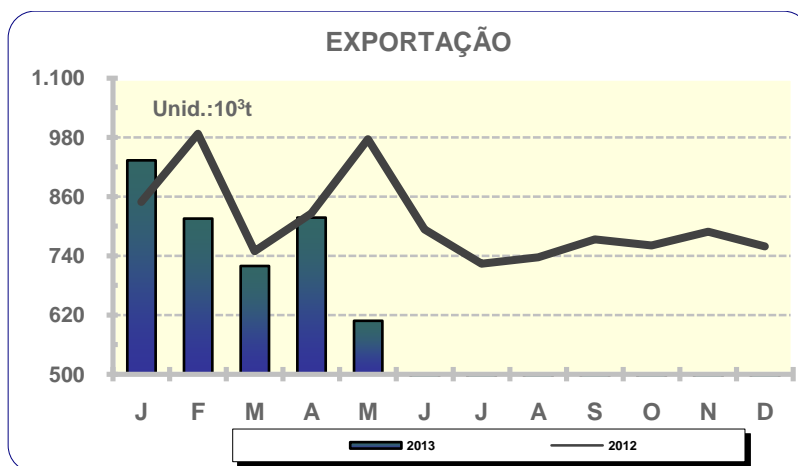
Figura 2.1 - Produção de aço bruto nos anos de 2012 e 2013 até o mês de maio.



Fonte: [1] IABR.

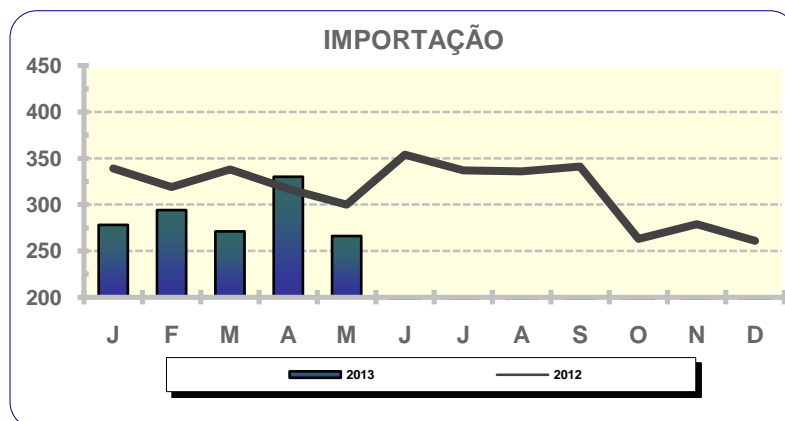
As figuras 2.2 e 2.3 mostram respectivamente um comparativo entre as importações e exportações realizadas pelo Brasil no ano de 2012 e o ano de 2013 até o mês de maio:

Figura 2.2 - Exportações brasileiras nos anos de 2012 e 2013 até o mês de maio.



Fonte: [1] IABR.

Figura 2.3 - Importações brasileiras nos anos de 2012 e 2013 até o mês de maio.



Fonte: [1]IABR.

2.2 O PROCESSO DE OBTENÇÃO DO AÇO EM UMA ACIARIA ELÉTRICA

O presente trabalho foi desenvolvido dentro de uma usina siderúrgica integrada, que portanto realiza as três etapas do processo produtivo: redução, refino e laminação [2]. Entretanto a área de concentração do trabalho foi a aciaria, que produz aço com a utilização de um forno elétrico a arco. Sendo assim, a revisão bibliográfica mostrará os equipamentos, os princípios de funcionamento e particularidades de uma aciaria elétrica limitando-se a fabricação do aço até o seu lingotamento. Os tópicos a seguir abordarão sobre as seguintes etapas do ciclo produtivo do aço:

- Refino Primário;
- Refino Secundário;
- Lingotamento do aço.

2.2.1 Refino Primário – Forno Elétrico a Arco

O objetivo do refino primário é a transformação do ferro-gusa ou ferro-esponja em aço através da redução do teor de carbono destes materiais [2]. Existem processos de elaboração do aço que utilizam a eletricidade como a principal fonte de energia necessária para fundir e refinar o aço. Em comparação com os conversores, os fornos elétricos a arco apresentam a vantagem de poderem fundir uma elevada quantidade de sucata, o que contribui de forma decisiva na reciclagem desta sucata. A participação dos fornos elétricos na produção mundial saltou de 19% em 1976 para 39% em 2000, e vêm crescendo em um ritmo superior a dos processos do tipo convertedor a oxigênio [2].

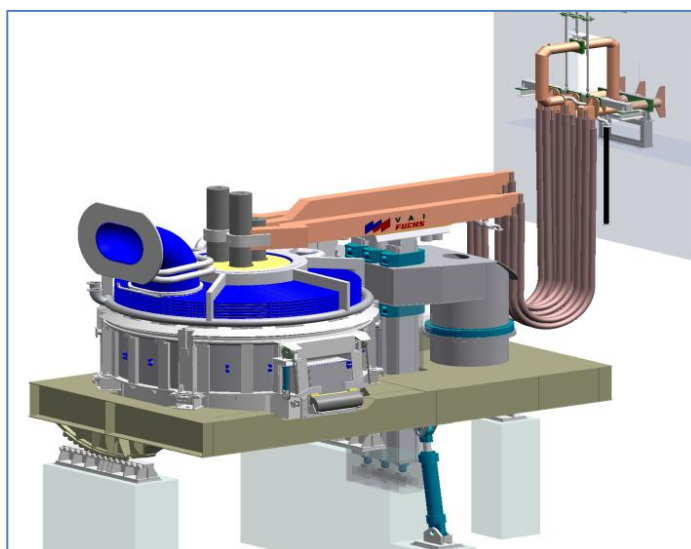
Muitos tipos de fornos empregando eletricidade como fonte de energia para o aquecimento do metal têm sido empregados. Porém, em termos de utilização, o forno elétrico a arco e o forno de indução são os mais comuns. O forno elétrico a arco é o equipamento mais versátil e eficiente para a produção de aço. Ele utiliza a energia liberada nos arcos voltáicos formados entre eletrodos de carbono e a sucata metálica quando o primeiro é submetido a um elevado valor de tensão e corrente elétrica. O arco voltáico é gerado pela passagem de corrente elétrica através do ar ionizado, que separa os dois pontos, os quais o arco é formado. A corrente elétrica também flui através da carga metálica, aquecendo a mesma devido a resistência elétrica da carga. Normalmente os fornos elétricos a arco que trabalham sob corrente alternada possuem três eletrodos, que são introduzidos através da abobada do forno [2].

Algumas das importantes características do forno elétrico a arco são [3]:

- Tem alta eficiência energética;
- Permite fabricar qualquer tipo de aço, em função do controle de aquecimento que é virtualmente independente de reações químicas;
- É um equipamento extremamente versátil, no que tange à carga, podendo trabalhar com até 100% de carga sólida;
- Permite operação intermitente e mudanças rápidas na produção em escalas desde dezenas até centenas de toneladas.

A figura 2.4 abaixo mostra um desenho tridimensional de um forno elétrico a arco de corrente alternada com todos os seus acessórios:

Figura 2.4 - Desenho tridimensional de um FEA.



Fonte: [4] Adaptado de MONTEIRO.

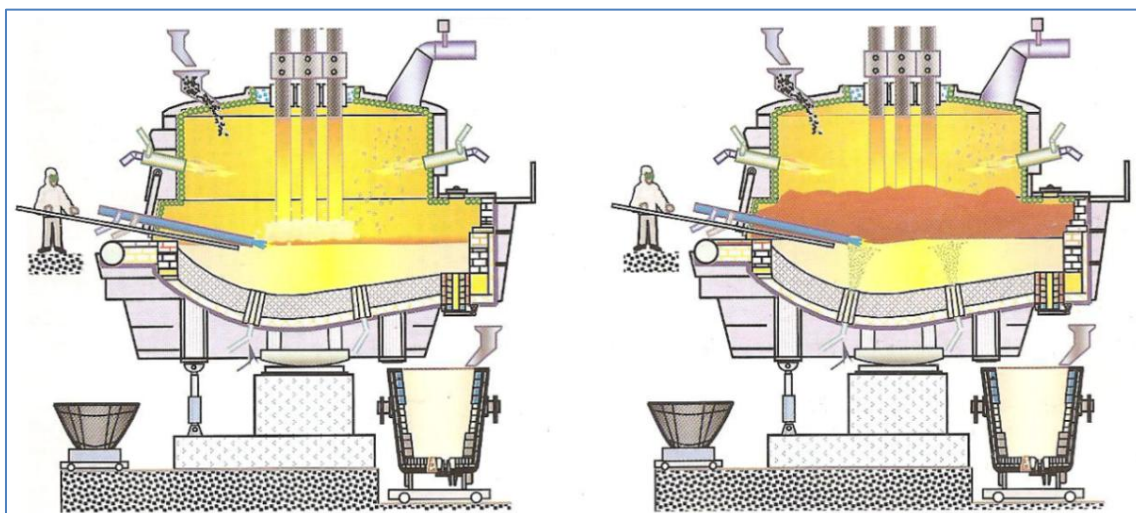
O refino primário se inicia com a fusão das matérias-primas, que inclui também sucata de aço, seguido de adições de elementos de liga por meio da energia liberada pelo arco elétrico estabelecido entre os eletrodos e a carga metálica, irradiando-se pela mesma, fundindo-a e mantendo o banho de metal líquido em temperaturas elevadas [5].

As principais operações desta etapa segundo John são [6]:

Carregamento: é feito o carregamento por intermédio de cestões cheios de sucata, ferro-gusa sólido e fundentes adequadamente distribuídos com o intuito de minimizar o impacto da carga sobre o revestimento do forno e facilitar a penetração dos eletrodos no início da fusão sem o risco de quebra dos mesmos. Também deve ser evitado a extrapolação da carga para que não haja impedimento no fechamento da abobada do forno.

Fusão: Nesta etapa é formada a carga líquida de aço com o objetivo de atingir um percentual de carbono predeterminado ao seu final e o ajuste da basicidade da escória de fusão. A fusão pode ser auxiliada pela injeção de oxigênio para se ter o aumento da energia química transferida à carga, e acelerar a fusão de cargas mais densas, o que resulta em um menor tempo para a fusão. A figura 2.5 mostra um esquema de um forno elétrico a arco em corte. No desenho à esquerda tem-se o fim da fusão e o desenho à direita o refino:

Figura 2.5 - Processos de fusão e refino do aço no FEA.



Fonte: [2] Adaptado de RIZZO.

Fase Oxidante: A fase oxidante se inicia com a injeção de oxigênio no banho metálico. Quando o banho está completamente fundido são retiradas amostras para

se fazer análise química dos teores de carbono, fósforo, manganês, cromo, etc. Nesta etapa é realizado a descarburização e a desfosforação.

No fim da fase oxidante, a escória deve ser removida ao máximo possível. A conclusão desta etapa se dá com o acerto da temperatura do banho e vazamento do aço para a panela refratária. A figura 2.6 abaixo mostra a foto do forno elétrico a arco utilizado na aciaria da SINOBRAS:

Figura 2.6 - Forno elétrico a arco utilizado na SINOBRAS.



Fonte: [7] Adaptado de Material de treinamento de Aciaria Elétrica.

2.2.2 Refino Secundário – Forno-Panela

Após o refino primário, o aço ainda não está pronto para uso. Ainda é necessário se ajustar a composição química para a produção do aço desejado, além de se ter de melhorar a limpidez e ajustar a temperatura do aço líquido para as fases posteriores como o lingotamento. Considera-se que os principais objetivos desta etapa são [2]:

- A redução do tempo de elaboração do aço, visando um aumento de produção, de produtividade e redução de custos da aciaria.
- Maior flexibilidade operacional ou de controle de sincronismo do forno de fusão até o lingotamento do aço.
- O controle da temperatura do aço líquido, o que se faz geralmente através de aquecimento.
- O ajuste da composição química do aço.
- Aumento de limpidez do aço.
- O controle da microestrutura e/ou macroestrutura das peças solidificadas.

O ajuste de composição química é realizado através da redução do teor de carbono para teores muito baixos, redução do teor de enxofre ou de fósforo dos aços. Logo em seguida é feita a adição de elementos de liga e através de determinados recursos se faz a mistura completa das adições realizadas. Elas precisam ser feitas com precisão a fim de se ter um alto rendimento das matérias-primas e atendimento de estreitas faixas de tolerâncias destes elementos. Existem processos que utilizam escória sintética ou outros tipos de escória quando se pretende fabricar aços especiais [2].

O termo limpidez do aço refere-se ao controle rigoroso da composição química e da quantidade de inclusões metálicas ou não metálicas presentes no aço após a sua solidificação e que prejudicam as propriedades mecânicas. A tabela 2.2 mostra os métodos mais difundidos em escala industrial para a realização do refino secundário:

Tabela 2.2 - Relação das técnicas mais difundidas para a realização do refino secundário e seus respectivos objetivos básicos.

Método	Objetivos
Injeção de gases inertes	<ul style="list-style-type: none"> - Homogeneização - Flutuação de inclusões - Dissolução das adições realizadas
Agitadores eletromagnéticos	<ul style="list-style-type: none"> - Homogeneização - Flutuação de inclusões - Dissolução das adições realizadas
Prática com escória sintética	<ul style="list-style-type: none"> - Captação/incorporação de inclusões - Dessulfuração - Desfosforação - Proteção do banho metálico evitando a absorção de gases da atmosfera e reduzindo a perda de calor
Adição de elementos de liga	<ul style="list-style-type: none"> - Acerto de composição química - Desoxidação
Injeção pneumática de compostos pulverizados de Ca (CaO, CaSi, CaC ₂ , etc.)	<ul style="list-style-type: none"> - Modificação da morfologia das inclusões - Dessulfuração
Injeção de arames recheados com compostos de Ca	<ul style="list-style-type: none"> - Modificação da morfologia das inclusões
Tratamento sob vácuo	<ul style="list-style-type: none"> - Remoção de H, N e C
Arco elétrico	<ul style="list-style-type: none"> - Aquecimento da corrida
Aquecimento químico com adição de Al ou Si	<ul style="list-style-type: none"> - Aquecimento da corrida
Refusão pgressiva de peças solidificadas	<ul style="list-style-type: none"> - Remoção de inclusões - Alteração de micro e macroestrutura das peças solidificadas

Fonte: [2] Adaptado de Rizzo 2005.

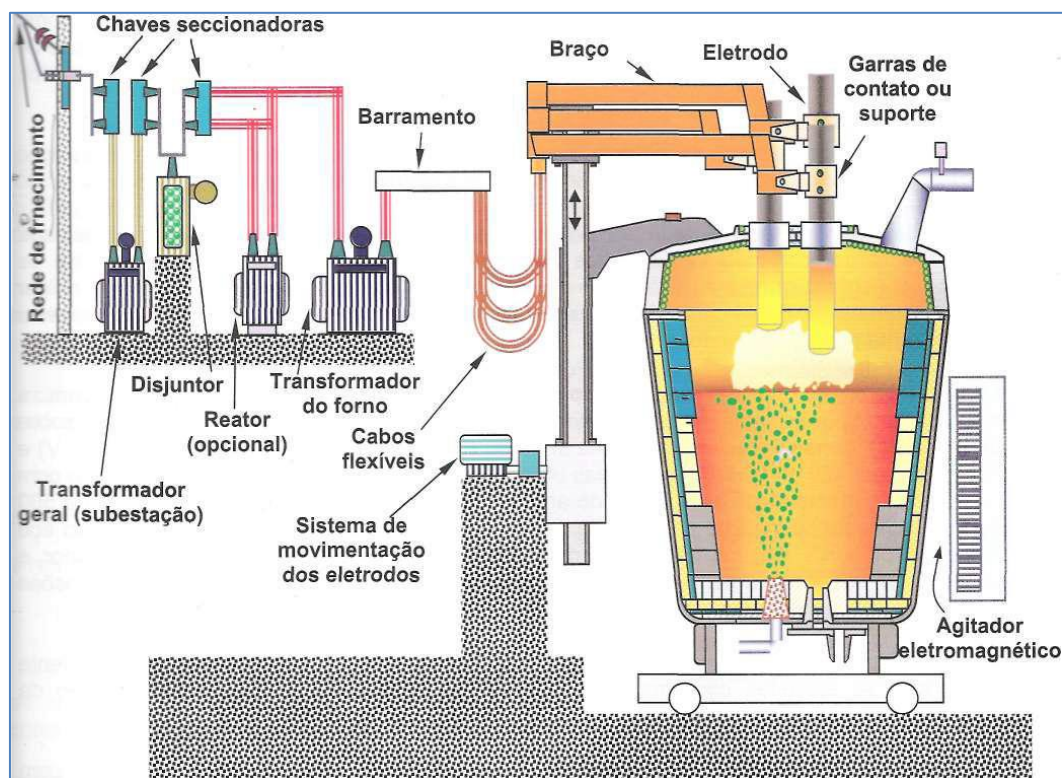
O aumento do grau de limpidez do aço pode ser realizado através da agitação do banho por borbulhamento de gás para a homogeneização de composição química e de temperatura, e que será mostrado com mais detalhes quando for descrito o funcionamento do forno-panela. Pode-se alterar a composição e a forma das inclusões visando a sua remoção do aço líquido ou pelo menos se ter controle de seus efeitos no aço sólido [2].

O refino secundário pode ser realizado pelos seguintes processos:

- Forno-panela;
- Aquecimento químico;
- Desgaseificação a vácuo;
- Refusão de peças solidificadas.

Como a aciaria em que foi feito o estudo apresenta refino secundário processado em forno-panela, iremos detalhar o funcionamento apenas deste tipo de equipamento. A figura 2.7 mostra um desenho esquemático em corte de um forno-panela em funcionamento do tipo corrente alternada com seus principais componentes do circuito de alimentação de energia:

Figura 2.7 - Representação esquemática de um Forno-Panela em funcionamento.



Fonte: [8] Adaptado de RIZZO.

No forno-panela, a própria panela é utilizada como reator para as operações do refino secundário, deixando livre o forno elétrico para uma próxima corrida. O forno-panela consiste basicamente de uma abobada metálica com quatro furos, sendo três para os eletrodos de grafite e um para adição de ligas e amostragem, um sistema elétrico cujo equipamento principal é um transformador e um sistema de transporte denominado trolley [9].

Os eletrodos usados no forno panela são semelhantes aos utilizados nos fornos elétricos a arco para refino primário. Quando desgastados, os mesmos são substituídos através de emendas realizadas utilizando “nipples”. Apresentam uma capacidade de condução de corrente elétrica maior do que os eletrodos do FEA a fim de se evitar a formação de arcos elétricos longos. Por isso, eles possuem menor diâmetro. São submetidos a menores esforços mecânicos, pois não entram em contato com partes sólidas como sucatas e, além disso, o desgaste por oxidação é menor, pois o ambiente do forno é redutor e não oxidante, como no caso do FEA [8].

A alimentação de energia elétrica consiste basicamente de um circuito elétrico com uma fonte que pode conter uma rede de distribuição, disjuntor, transformador, etc ligada a um ou mais condutores na outra extremidade, provocando curto-circuitos que geram e concentram energia suficiente para aquecer a carga metálica líquida. Se faz uma combinação de uma baixa tensão em torno de centenas de volts com uma elevada corrente, em torno de dezenas de kA [8].

Os sistemas elétricos de alimentação normalmente se constituem de sistema primário e sistema secundário. O sistema primário corresponde ao circuito de alta voltagem e ele possui os seguintes equipamentos:

Chave seccionadora – Ele interrompe o circuito sem carga;

Disjuntor – Sua função é proteger a rede de distribuição no caso de sobre-tensão devido a curtos circuitos entre os eletrodos e a carga;

Transformador geral – Sua função é reduzir a tensão e elevar a corrente da rede.

O sistema secundário corresponde ao circuito de baixa tensão formado por um segundo transformador, cabos flexíveis e condutores de corrente elétrica. A potência do transformador pode variar de 500 a 100.000 kVA dependendo da capacidade do forno [8].

A outra parte muito importante é a panela. Ela possui no seu fundo um plugue poroso que serve para a agitação do aço que pode ser realizado através de borbulhamento de gás inerte, este gás inerte pode ser o gás nitrogênio ou o gás

argônio. Vale ressaltar que estes gases não são utilizados ao mesmo tempo, mas normalmente se faz o borbulhamento, que é mais tecnicamente denominado de rinsamento, usando estes gases alternadamente, fazendo-se as trocas por meio de válvulas manuais ou automaticamente em sistemas automatizados. O gás argônio, entretanto é utilizado com menos frequência e, portanto em menor volume devido ao seu alto custo.

A inclusão é adsorvida à superfície da bolha de gás e o movimento ascendente é acelerado pela convecção forçada do aço líquido, isto é, a movimentação do líquido induzida pela própria injeção de gases inertes também permite obter uma maior homogeneidade de temperatura e composição química do banho metálico. Entretanto, a agitação faz com que haja uma perda de temperatura devido às trocas de calor com os gases inertes, o que leva a necessidade de se ter um maior superaquecimento do aço [2].

Existem outros sistemas que também utilizam um agitador eletromagnético. Este sistema possibilita manter aquecidos o aço e a escória em uma atmosfera redutora que é muito importante para a qualidade do aço [9].

O forno-panela realiza em sequência as seguintes operações:

- Desoxidação do aço líquido;
- Dessulfuração do aço líquido;
- Adição de elementos de liga;
- Correção da composição química de acordo com o aço desejado;
- Acerto da temperatura de liberação para as próximas etapas.

Após o vazamento do aço líquido na panela, ela é transportada até o forno panela ficando abaixo de sua abobada. Esta é abaixada e se inicia o processo de aquecimento através do arco elétrico formado entre os eletrodos e o banho. Adiciona-se às vezes uma quantidade de cal para se acertar o volume de escória e a sua viscosidade. A escória é responsável por diminuir as perdas térmicas do aço líquido pela superfície e também por captar as inclusões existentes. A etapa de aquecimento dura em torno de dez minutos [8].

Finalizada a etapa de aquecimento, é feita uma amostragem do aço para análise química e para se fazer o cálculo de correção de composição química. Em seguida começa a etapa do refino, com a adição de ferroligas e/ou metais puros além de desoxidantes e fluxantes. Aqui também se promove o aquecimento, porém

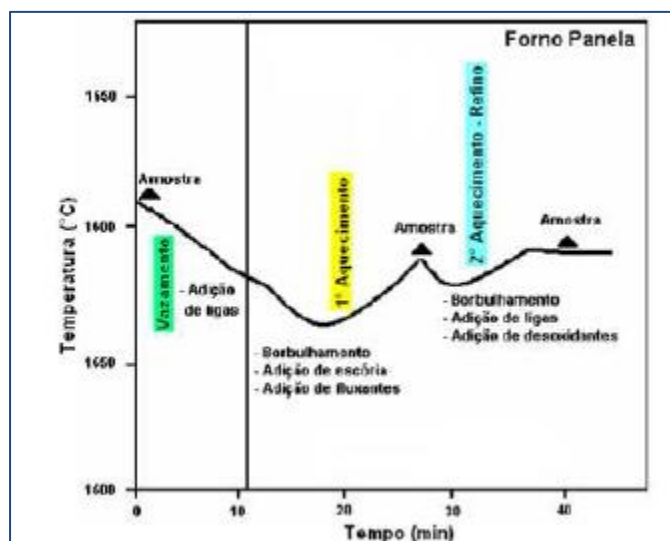
com uma taxa de aquecimento maior. As ligas adicionadas tem o objetivo de atingir a faixa de composição química desejada.

Durante todo o processo é realizado a rinsagem e se fazem medições de temperatura, tantas quantas forem necessárias. No forno-panela em estudo o padrão é que sejam feitos três medidas de temperatura, uma no início, outra no meio e a última no fim do processo, que é a temperatura de liberação.

Para finalizar o processo, uma amostra de aço é retirada, se retira a panela do forno panela, se adiciona palha de arroz como pó de cobertura e se libera a panela para o lingotamento contínuo.

A figura 2.8 representa o ciclo teórico de tratamento de um aço comum no forno panela cujo tempo total de produção é superior a 40 minutos.

Figura 2.8 - Ciclo teórico de tratamento de aço comum no forno panela.



Fonte: [8] Adaptado de RIZZO.

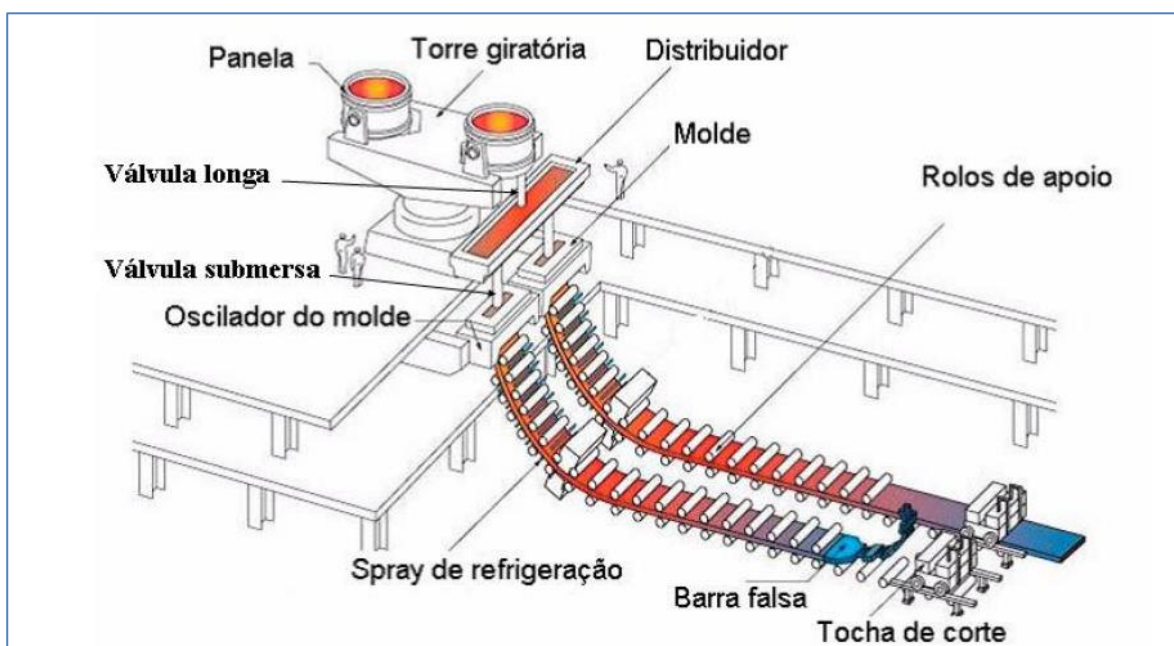
2.2.3 Lingotamento Contínuo

Os aços elaborados nos processos de refino primário e secundário das aciarias podem seguir três rotas básicas para a realização da sua solidificação:

- Solidificação em moldes para fabricação de peças (denominadas de peças fundidas);
- Lingotamento convencional para produção de lingotes;
- Lingotamento contínuo para produção de placas, blocos, tarugos ou pré-formas (blanks).

Aqui será descrito o lingotamento contínuo devido a aciaria em estudo usar este tipo de equipamento. O lingotamento contínuo é um processo de transferência de calor, no qual o metal líquido é transformado via solidificação em um produto semi-acabado. A figura 2.9 mostra uma representação esquemática de um equipamento de lingotamento contínuo de aço com os três sistemas metalúrgicos: panela, distribuidor e molde. Primeiramente uma panela faz a transferência do aço líquido para um distribuidor, que por sua vez se encarrega de alimentar o molde. A solidificação se inicia no molde com a formação de uma casca sólida. O resfriamento acontece em três etapas: primeiro em um molde de cobre ou liga de cobre refrigerado a água (resfriamento primário), após o resfriamento segue em conjuntos de sprays de água ou mistura de ar e água que possuem capacidades variáveis de extração de calor (resfriamento secundário) e por último no ar através da radiação (resfriamento terciário).

Figura 2.9 - Esquema de uma máquina de lingotamento contínuo.



Fonte: [10] MENDONÇA.

Uma forma de classificação do processo de lingotamento contínuo considera o tipo de produto final que é obtido a partir dos semi-produtos (semi-acabados) obtidos nas máquinas. Esta classificação e os produtos são apresentados respectivamente na tabela 2.3 e figura 2.10. Esta classificação é importante porque, normalmente, as tecnologias empregadas para cada grupo apresentam diferenças significativas, em função das dimensões da seção transversal, que afetam o tempo

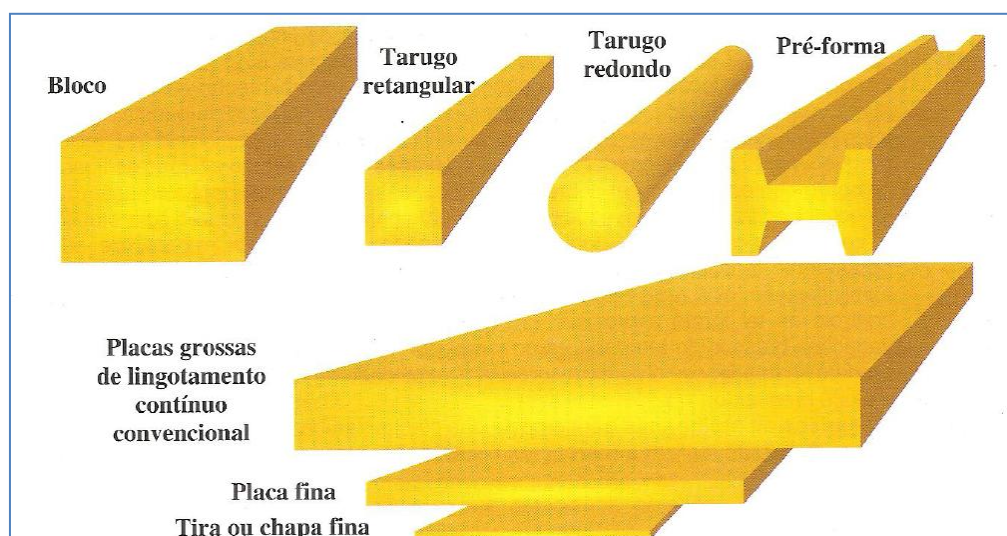
necessário para solidificação e a resistência ao dobramento dos produtos. Cerca de 40% da produção mundial de aços é transformada em produtos longos e o restante em produtos planos [2].

Tabela 2.3 - Classificação do processo de lingotamento contínuo dos aços

PRODUTO LAMINADO	MATÉRIA-PRIMA LINGOTADA
Produto plano	<ul style="list-style-type: none"> • Placa (slab) • Placafina (thin slab) • Tira ou chapa fina (strip)
Produto não plano ou longo	<ul style="list-style-type: none"> • Bloco (Bloom) • Tarugo (billet) • Pré-forma (blank)

Fonte: [2] Adaptado de RIZZO.

Figura 2.10 - Representação esquemática das formas e dimensões típicas da seção transversal dos produtos comuns do processo de lingotamento contínuo.



Fonte: [2] Adaptado de RIZZO.

O lingotamento contínuo pode produzir semiacabados de diferentes seções transversais. Usinas que produzem aços planos trabalham com lingotamento de placas, usualmente de aproximadamente 250 mm de espessura e larguras superiores a 1m. O processo de “thin slab casting” trabalha com placas na faixa de 80 mm a 100 mm de espessura e elimina a primeira etapa da laminação a quente. “Billets” ou tarugos quadrados e redondos são produzidos nas siderúrgicas que produzem produtos longos [3].

O lingotamento contínuo possui diversas vantagens em relação ao processo de lingotamento convencional, dentre as vantagens podemos citar [2]:

- Redução do tempo e etapas de lingotamento;
- Eliminação da bateria de lingoteiras maciças, cabeças quentes, pontes transportadoras e estripadores;
- Eliminação dos onerosos e poluidores fornos-poço;
- Obtenção de aços com qualidade estrutural melhor e mais constante, em função das taxas de resfriamento mais elevadas;
- Obtenção de acabamento superficial melhor e mais regular pela eliminação de defeitos como gotas frias, escamas e dobras, que ocorrem no lingotamento convencional e;
- Excelente rendimento com aproveitamento quase total do aço (acima de 98%), devido a continuidade do processo e consequente eliminação da técnica de corte da cabeça do lingote.

2.3 TRANSFERÊNCIAS DE CALOR

Transferência de calor ou transporte de energia faz parte das três áreas distintas que constituem o que se denomina Fenômenos de Transporte. Estas áreas são: transporte de energia (ou calor), transporte de massa e transporte de quantidade de movimento.

Primeiro podemos citar algumas aplicações importantes no estudo das transferências de calor na siderurgia [11]:

- Trocas térmicas entre gases e sólidos na sinterização e no alto-forno;
- Solidificação nas etapas do lingotamento contínuo, direto e indireto;
- Trocas térmicas entre gases e o aço nos fornos de reaquecimento e fornos-poço.

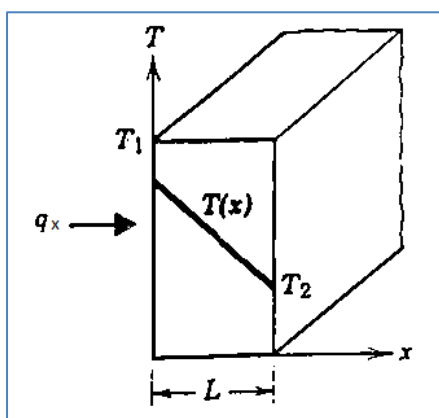
Podemos dizer que a transferência de calor é o movimento de energia provocado por uma diferença de temperatura. Isto quer dizer que quando houver uma diferença de temperatura em um meio, ou entre vários meios, haverá uma transferência de calor. Existem três formas de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

2.3.1 Condução

Neste tipo de transferência o calor é transferido devido às atividades atômicas e atividades moleculares. A condução pode ser considerada como a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as partículas menos energéticas, devido as interações das partículas [12].

A transferência de calor por condução ocorre quando há um meio, ao longo do qual existe um gradiente de temperatura. O gradiente de temperatura pode ser definido como uma variação de temperatura com a posição. A figura 2.11 ilustra a transferência de calor por condução em um meio sólido:

Figura 2.11 - Transferência de calor por condução unidimensional.



Fonte: [12] Adaptado de INCROPERA.

Pode se quantificar o processo de transferência de calor em termos de equação da taxa apropriada [12], que se for usada para quantificar a quantidade de energia transferida por unidade de tempo se denomina fluxo de calor. Para o caso da figura acima, na direção \$x\$, ele pode ser calculado pela equação de Fourier:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad [1]$$

Onde:

q_x : Fluxo de calor na direção \$x\$ (W/m²);

k : Condutividade térmica do material (W/mK);

$\frac{\partial T}{\partial x}$: Gradiente de temperatura na direção \$x\$ (K/m ou °C/m);

T : Temperatura (K ou °C)

x : Posição (m)

O sinal negativo na equação quer dizer que o calor se transfere do ponto de maior temperatura para o ponto de menor temperatura. A constante k , denominada condutividade térmica é uma propriedade física intrínseca ao material, ela varia com a temperatura e normalmente o valor de k é maior para materiais sólidos e mais baixos para os gases.

Se quisermos encontrar o calor que se transfere por unidade de área devemos calcular a taxa de transferência de calor. Ela é obtida multiplicando-se o fluxo de calor pela área perpendicular à direção de transferência de calor. Assim:

$$Q_x = A \cdot q_x = -A \cdot k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad [2]$$

Onde:

Q_x : Taxa de transferência de calor na direção x (W);

A : Área perpendicular à direção de transferência de calor (m^2).

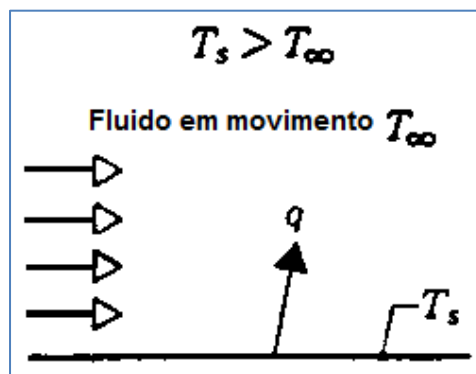
2.3.2 Convecção

A transferência de calor por convecção compreende dois mecanismos. Primeiro há a transferência de energia provocada pelo movimento molecular aleatório (difusão). Em segundo lugar, a energia também se transfere pelo movimento de massa, ou macroscópico, do fluido. O fluido pode ser tanto um líquido, quanto um gás.

O movimento do fluido acontece devido a capacidade de a qualquer momento um grande número de moléculas poderem se mover. Esse movimento, na presença de um gradiente de temperatura, provoca a transferência de calor. A transferência total de calor é formada então pela superposição do transporte de energia pelo movimento aleatório das moléculas ao transporte de energia devido ao movimento de massa do fluido. É chamado de convecção a essa energia acumulada e advecção o transporte devido ao movimento de massa do fluido [12].

A figura 2.12 mostra a transferência de calor por convecção a partir de uma superfície aquecida em contato com um fluido em movimento:

Figura 2.12 - Transferência de calor por convecção unidimensional.



Fonte: [12] Adaptado de INCROPERA.

A convecção depende das propriedades termofísicas do fluido em movimento, da sua velocidade e da geometria da superfície do sólido, assim como de suas características termofísicas [13]. A quantificação do fluxo convectivo é feita através da seguinte equação:

$$q_x = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad [3]$$

Onde:

q_x : Fluxo de calor entre a superfície do sólido e o fluido, na direção x (W/m^2);

h : Coeficiente de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{k}$ ou $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$);

T_s : Temperatura da superfície do sólido (K ou °C);

T_∞ : Temperatura do fluido em um ponto afastado da superfície do sólido (K ou °C).

Da mesma forma do que para a condução, para se encontrar a taxa de transferência de calor basta se multiplicar o valor de fluxo de calor pelo valor da área da seção transversal considerada ao eixo o qual o calor se transfere. Segundo GARCIA [13] se a superfície sólida aquecida estiver exposta ao ar ambiente sem uma fonte artificial de movimentação, o movimento do ar será produzido pelas diferenças de densidade nas imediações da superfície e a convecção é natural, enquanto no caso de movimentação induzida do ar a convecção é denominada forçada.

2.3.3 Radiação

Outro mecanismo de transporte é a radiação térmica. Neste mecanismo o calor é transferido sem a necessidade de um meio físico para a sua transferência, o calor é transportado por ondas eletromagnéticas, que também se denomina de fótons.

A transferência de calor por radiação ocorre na verdade de maneira mais eficiente sob o vácuo. O fluxo de calor por radiação é quantificado pela lei de Stefan-Boltzmann, e para situações de uma superfície mantida à uma temperatura T_s e sendo completamente coberto por um meio a uma temperatura T_0 , e como visto na figura 2.13, pode ser dado pela seguinte equação de acordo com [13]:

$$q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_s^4 - T_0^4) \quad [4]$$

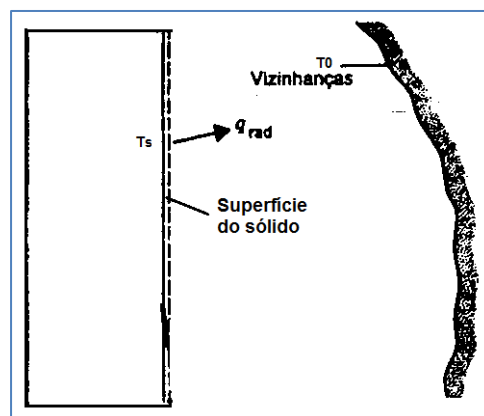
Onde:

q_{rad} : Fluxo de calor radiativo (W/m^2);

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$);

ε : Emissividade da superfície do material (adimensional);

Figura 2.13 - Transferência de calor por radiação térmica.



Fonte: [12] Adaptado de INCROPERA.

2.4 PERDAS TÉRMICAS PELAS PANELAS

É de primordial importância se conhecer as perdas térmicas pelas panelas para a otimização do processo. O aço líquido contido no seu interior deve satisfazer certas exigências durante as etapas do processo. Segundo Susaki [14] as perdas térmicas na panela podem ser divididas em:

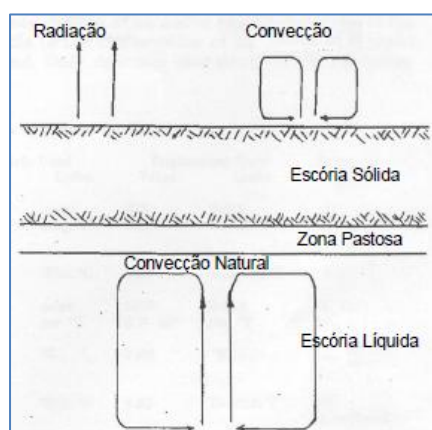
- Perdas através da superfície livre da escória (ou do aço);
- Perdas através da parede refratária e carcaça da panela;
- Acúmulo de calor na parede refratária da panela.

Segundo ainda Susaki [14] a quantidade total de calor perdido assim como a participação porcentual de cada um dos mecanismos é afetada por um grande número de variáveis.

2.4.1 Perdas através da escória

A pesquisa de Omotani et al [15] apud Rafael Bruch [9] descreveram que após o vazamento do aço na panela, é formada uma camada de escória na superfície do metal líquido. Esta é formada pela adição de cal durante o vazamento, que no caso da SINOBRAS é adicionado cal calítica. O calor é transferido rapidamente do topo da escória para a superfície e isto faz com que a superfície da escória se solidifique. Este processo continua até que o estado estacionário seja atingido e então o calor é conduzido através da camada de escória e transferido para o ambiente por convecção e radiação. A figura 2.14 abaixo mostra um esquema da transferência de calor pela escória:

Figura 2.14 - Esquema da transferência de calor através da escória.



Fonte: [15] OMOTANI et al.

Outro fato importante e que foi mostrado por Tetrault et al [16] é que a espessura da escória também influencia nas perdas térmicas do aço. Ele verificou em seus estudos que em um ciclo produtivo, painéis com uma fina camada de escória na sua superfície e outras com uma camada espessa possuíam uma diminuição na temperatura do aço líquido à uma mesma taxa de resfriamento nos primeiros dez minutos. Após este período, a taxa de queda de temperatura diminuiu mais para o caso com escória mais espessa.

O trabalho de Mundim et al [17] relatou também o efeito da espessura da escória nas perdas térmicas do aço líquido. Através de modelo matemático unidimensional transiente, os autores concluíram que a presença da camada de escória afeta decisivamente as perdas térmicas pela superfície do metal.

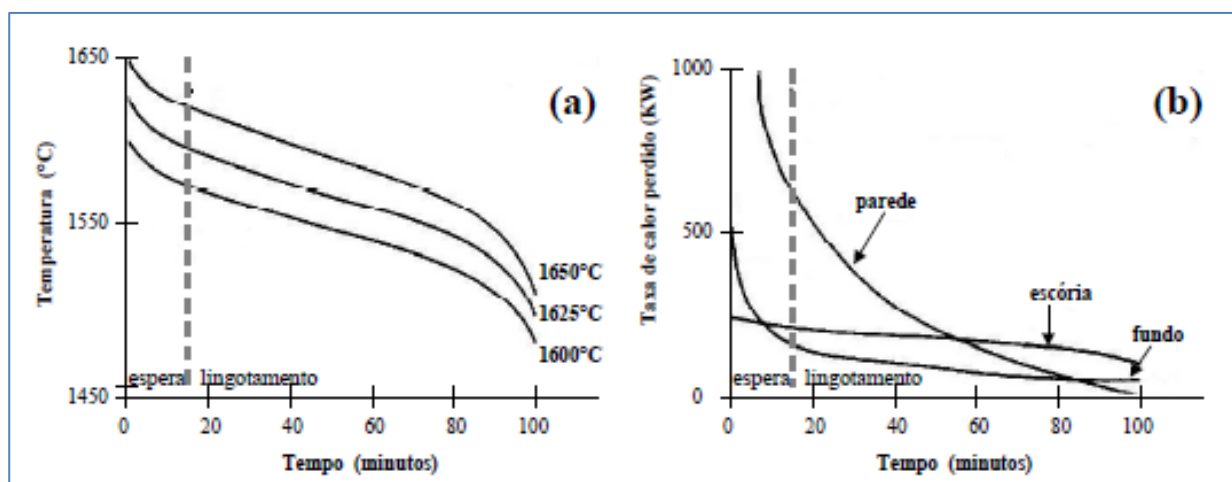
2.4.2 Perdas através dos refratários

Os materiais refratários utilizados nas panelas sejam tijolos, placas, etc, possuem um alto poder de retenção de calor devido aos seus elevados valores de calor específico e densidade. Para se obter o equilíbrio térmico entre os refratários e o aço líquido é necessário que haja uma troca de calor muito elevada. E isto acontece, porém à custa da redução de temperatura do aço líquido, e depende fortemente da quantidade de energia já contida na panela no momento do vazamento [18].

Segundo Omotani et al [15] até 80% do total das perdas térmicas na panela é conduzida para dentro do material refratário. Os autores chegaram a esta conclusão após análise das perdas térmicas calculadas por um modelo analítico para uma panela de 90 toneladas em um ciclo de pequena duração. É o que pode ser visto na figura 2.15(b). Eles verificaram também que existe um comportamento repetitivo da temperatura do aço líquido durante o ciclo estudado como pode se ver pela figura 2.15(a), sendo pouco alterado pela temperatura de vazamento. Há um rápido abaixamento da temperatura nos primeiros 10 minutos. Isto acontece por causa do contato do aço líquido com a face quente da panela à uma temperatura bem inferior a do aço líquido.

Quando os refratários aquecem com o contato com o aço há uma diminuição nas taxas de perda, o que faz com que a queda de temperatura assuma o comportamento próximo ao estacionário. Próximo ao final do lingotamento, as taxas de perda se mantêm, porém o volume de aço diminui fazendo com que a temperatura volte a cair abruptamente.

Figura 2.15 - Comportamento térmico de um sistema aço líquido/panela: a) Efeito da temperatura de vazamento sobre o resfriamento do aço; b) Taxas de perda de calor do aço líquido para as paredes refratárias (parede e fundo) e através da escória.



Fonte: [15] Adaptado de OMOTANI et Al..

As perdas térmicas para os refratários e conseqüentemente para a carcaça ocorrem devido à troca de calor por convecção. O calor é transferido para o interior dos refratários por condução em regime transiente. A equação da condução unidimensional térmica constante e sem taxa de transferência interna de calor é apresentada por Bejan [19]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} * \frac{\partial T}{\partial t} \quad [5]$$

Onde:

T : Temperatura do aço líquido (K ou °C);

x : Distância no eixo x (m);

α : Difusividade de calor (m²/s)

Como visto no início do capítulo, as perdas também se devem ao acúmulo de calor pelos refratários. De acordo com Tomazin et al. [20], a quantidade de calor que pode ser absorvida pelo refratário é definida pelo calor específico do material multiplicado pela sua massa. Assim, 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 [21], a maioria dos materiais refratários tem um calor específico que aumenta com a temperatura.

2.5 CICLO DE PANELAS

O ciclo de uma panela é uma sequência de operações que podem ser divididas em:

- Etapa de panelacheia;
- Etapa de panelavazia.

Na aciaria em estudo, são realizados os seguintes procedimentos:

Etapa de panela cheia:

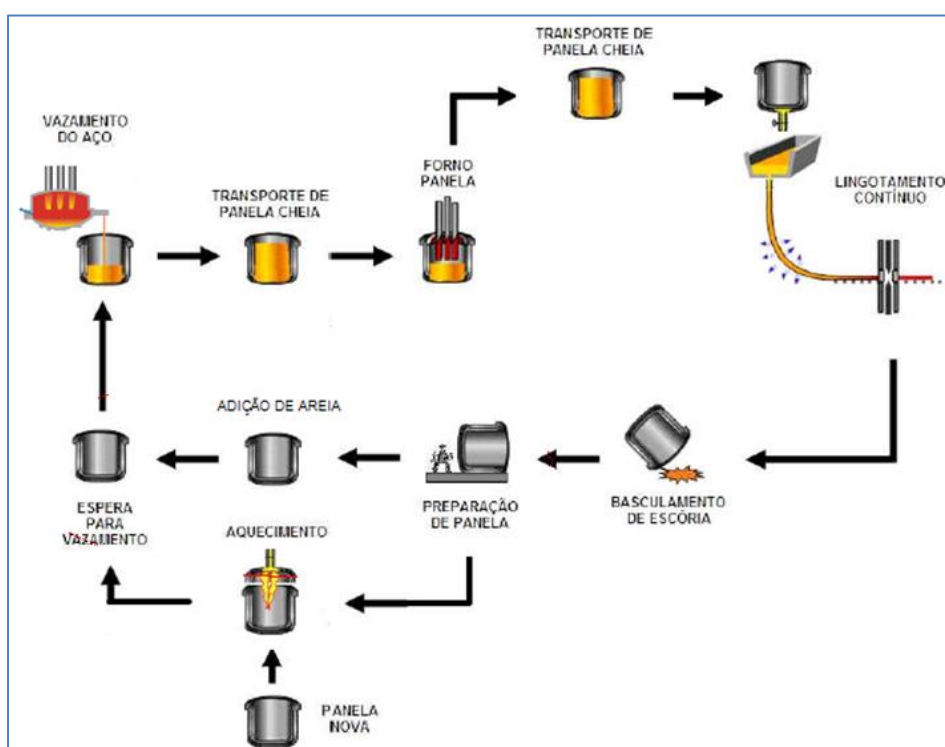
1. Vazamento do aço do FEA;
2. Forno-panela;
3. Lingotamento contínuo.

Etapa de panela vazia:

1. Retirada de escória na baía de escória;
2. Manutenção;
3. Adição de areia de vedação;
4. Espera para vazamento.

Vale ressaltar que para a etapa de panela vazia, entre os procedimentos “2” e “3” pode haver também um tempo de espera para a aciaria em questão. A figura 2.16 mostra um esquema do ciclo de panelas da aciaria da SINOBRAS:

Figura 2.16 - Esquema do Ciclo operacional das panelas da SINOBRAS.



Fonte: [18] Adaptado de LOPES.

2.6 MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A modelagem matemática é a forma de descrever matematicamente os fenômenos que acontecem ao nosso redor. Diversos problemas de engenharia podem ser descritos matematicamente na forma de equações diferenciais ordinárias e parciais. Segundo Hutton [22] a solução exata usualmente é fruto de um método de solução analítica encontrado através de métodos algébricos e diferenciais aplicados a geometrias e condições de contorno particulares. A aplicação generalizada dos métodos analíticos para diferentes geometrias e condições de contorno torna impraticável ou até mesmo impossível a obtenção de soluções analíticas exatas.

2.6.1 Métodos Numéricos

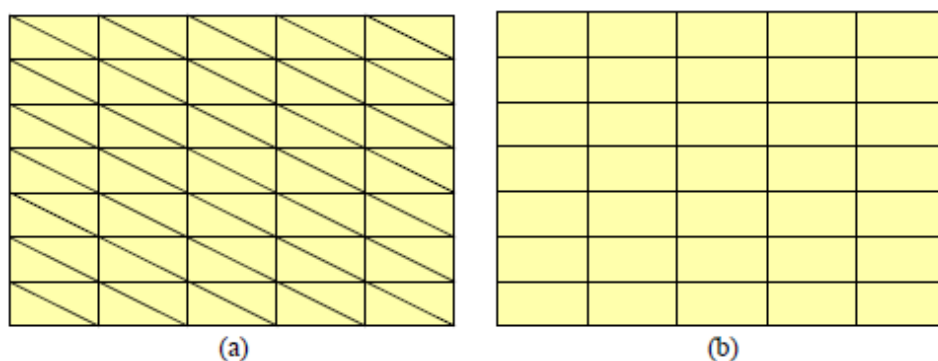
Existem dois métodos que são muito empregados no desenvolvimento de modelos matemáticos. Estes são : Método de Elementos Finitos (MEF) e o Método das Diferenças Finitas (MDF).

O Método de Elementos Finitos consiste em diferentes métodos numéricos que aproximam a solução de problemas de valor de fronteira descritos tanto por equações diferenciais ordinárias quanto por equações diferenciais parciais através da subdivisão da geometria do problema em elementos menores, estes elementos são chamados de elementos finitos, nos quais a aproximação da solução exata pode ser obtida por interpolação de uma solução aproximada. O MEF possui aplicações em todas as áreas da engenharia. Ela é aplicada na análise de tensões e deformações mecânicas, transferência de calor, na mecânica dos fluidos e reologia, eletromagnetismo, etc [23].

O Método de Diferenças Finitas consiste basicamente na imposição de uma malha de elementos de dimensões conhecidas ao corpo físico através do qual acontece algum fenômeno e na aplicação de equações que regem esse fenômeno em um elemento da rede aos vizinhos que o envolvem em pequenos intervalos finitos de tempo por exemplo [13]. No MDF são aplicadas aproximações nas derivadas das equações lineares que fornecem a solução em pontos (nós) discretos no interior do domínio do problema. No MEF, a solução das equações diferenciais governantes do problema físico pode ser resolvida por funções de aproximação que satisfazem condições descritas por equações integrais no domínio do problema [23].

Tanto no MEF como no MDF é feito uma discretização do domínio. A diferença é que no MEF as soluções são descritas por polinômios conhecidos por todo o domínio, enquanto que no MDF as soluções são descritas apenas nos nós da malha. Com relação a topologia de discretização do domínio, no MDF 2D geralmente empregam-se malhas de topologia triangular ou retangular estruturada, como pode ser observado na figura 2.17(a) e (b):

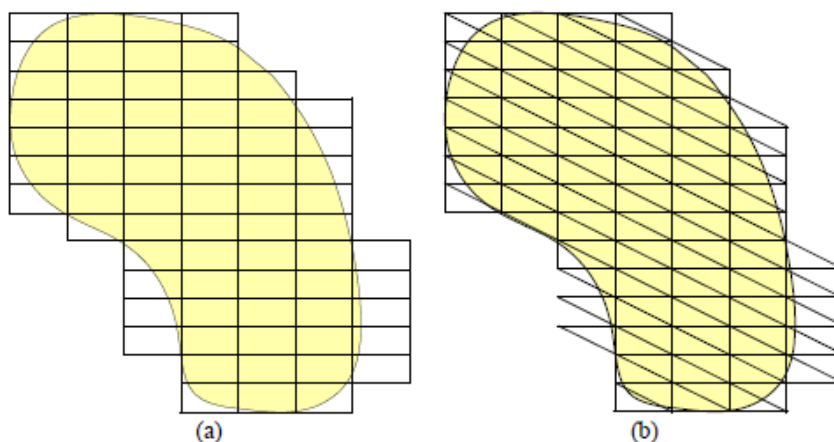
Figura 2.17 - Exemplos de malhas de MDF aplicadas a um polígono regular (retângulo): (a) triangular estruturada e (b) retangular estruturada.



Fonte: [24] Apostila de Elementos Finitos.

Quando se tem uma geometria complexa, a malha estruturada dificulta a descrição da geometria como pode ser observado na figura 2.18 (a) e (b), o que faz com que a aplicação do MDF nestes casos resulte em problemas numéricos de aproximação de fronteira.

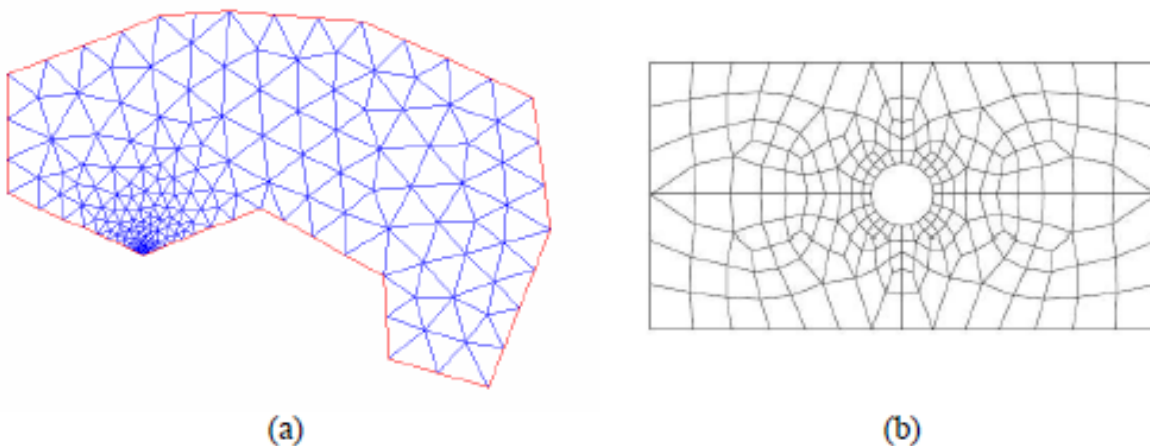
Figura 2.18 - Exemplos de malhas de MDF aplicadas a um polígono com geometria irregular: (a) triangular estruturada e (b) retangular estruturada.



Fonte: [24] Apostila de Elementos Finitos.

O MEF não requer topologia de malha estruturada e como usualmente emprega uma aproximação polinomial aos valores interiores aos elementos discretizados, pode utilizar para descrever com geometria 2D usando elementos triangulares ou retangulares não estruturados, isto é, com dimensões diferenciadas entre os elementos discretos como nos exemplos da figura 2.19 (a) e (b):

Figura 2.19 - Exemplos de malhas de MEF não estruturadas: (a) triangular e (b) retangular.



Fonte: [24] Apostila de Elementos Finitos.

2.6.2 Simulação Computacional

E. Wilson desenvolveu na década de 1960, um dos primeiros programas de computador de cálculo pelo MEF. Em 1965, a agência espacial norte-americana NASA financiou um projeto liderado por Dick MacNeal para desenvolver um programa de cálculo pelo MEF de uso geral. Este programa batizado de NASTRAN e incluía uma grande capacidade de manipulação de dados e permitia análise de tensão e deformação, cálculo de vigas, etc. após o término do projeto [22].

Na mesma época, John Swanson estava desenvolvendo um programa de MEF na Westinghouse para a análise de reatores nucleares. Em 1969, Swanson deixou a empresa para comercializar o programa ANSYS. Atualmente o programa é utilizado para solucionar problemas de estática; dinâmica, análises estruturais, transferência de calor, fluidodinâmicas, assim como problemas envolvendo acústica e eletromagnetismo. Em geral, a solução de um problema de elementos finitos pode ser dividida em três estágios [25]:

Pré-processamento: As principais etapas no pré-processamento são: (i) definir pontos/linhas/áreas/volumes, (ii) definir o tipo de elemento e as propriedades e geometria do material, e (iii) fazer as linhas de malha/áreas/ volumes como requerido. A quantidade de detalhes requeridos irá depender da dimensionalidade da análise, isto é, se irá ser 1D, 2D, aximétrico, e 3D.

Solução: Aqui, é necessário especificar as cargas (pontual ou pressão), restrições (translacional ou rotacional), e finalmente solucionar as equações que foram ajustadas.

Pós-processamento: Neste estágio, pode se desejar visualizar (i) listas de deslocamentos de nós, (ii) forças e momentos nos elementos, (iii) gráficos de deflexão, e (iv) diagramas de contorno de tensão ou mapas de temperatura.

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 DETERMINAÇÃO DAS PERDAS DE TEMPERATURA DAS PANEAS

Para se conhecer o comportamento térmico das painéis quando vazias, assim como, as perdas de temperatura se realizou medições de temperatura da carcaça e o interior das painéis. Estas medições foram realizadas nas seguintes etapas do processo: painél antes da limpeza, painél após limpeza, painél após adição de areia de vedação e painél antes do vazamento. Para as medições foi necessária a utilização de um pirômetro infravermelho com faixa de medições de 50°C-2200°C. A figura 3.1 mostra o pirômetro que foi utilizado para se efetuar as medições:

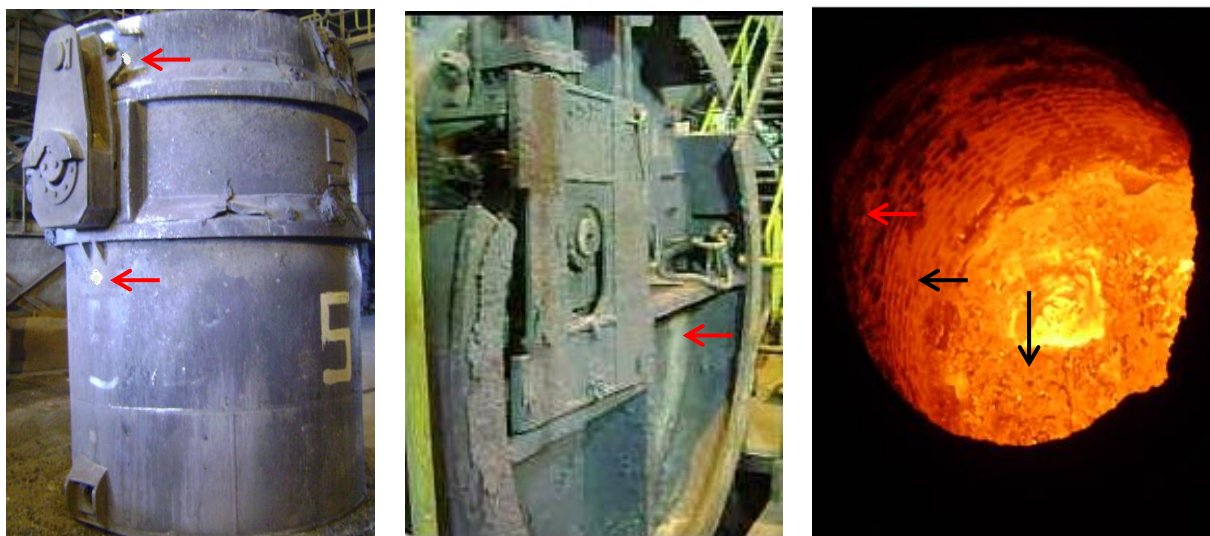
Figura 3.1 – Pirômetro infravermelho usado para as medições.



Fonte: [26] www.homis.com.br.

O pirômetro foi testado e ajustado de maneira que a emissividade ajustada para as medidas da carcaça foi de 0,96 e para as medidas na face quente 0,86. Como o pirômetro possui dois pontos de laser que convergem em um único ponto quando a unidade está a uma distância ideal com relaçao ao objeto medido, foram feitos testes de maneira que a distância ideal para se efetuar as medições era de 3 metros em relaçao ao alvo e que para distâncias maiores o erro era de até + 10 graus Celsius. Os pontos de medida na carcaça foram marcados em todas as painéis para padronização dos pontos de medida. A figura 3.2 mostra os pontos de retirada de temperatura adotados:

Figura 3.2 – Fotos de uma panela mostrando os locais de medida de temperatura.



Fonte: Autor.

Os valores medidos foram registrados em uma planilha de Excel. É importante destacar que as medições de temperatura foram realizadas com as panelas nas seguintes condições distintas:

- Com a utilização da tampa;
- Sem a utilização da tampa e;
- Com a utilização da tampa e da abobada do FP.

Esse acompanhamento foi feito em várias panelas durante o ciclo operacional a fim de se poderem comparar as temperaturas nas condições distintas. Foram feitas retiradas de temperatura em 65 corridas totalizando 1021 medições.

3.2 DETERMINAÇÃO DAS PERDAS DE CALOR DO AÇO LÍQUIDO DURANTE O VAZAMENTO

Como o principal objetivo do trabalho era diminuir as perdas caloríficas das panelas no período em que as mesmas se encontravam vazias, a fim de que elas se mantivessem mais quentes durante o vazamento, se fez uma análise da perda de temperatura do aço líquido existente entre o vazamento e a chegada da panela no forno-panela. O objetivo desta análise foi determinar se havia uma relação entre a temperatura dos refratários das panelas antes do vazamento e a perda de temperatura do aço líquido durante o tempo já mencionado.

Para se determinar as temperaturas foram utilizados os valores inseridos no Sistema de Gestão do processo de Produção da empresa e a partir daí montada

uma planilha de dados em Excel. Esta planilha é vista apenas em parte na tabela 4.1 em resultados e discussões.

3.3 MODELAMENTO MATEMÁTICO DA PANELA

O modelamento matemático consistiu em se ajustar modelos matemáticos simplificados de transferências de calor para as características da panela, quando a mesma se encontra vazia, para se obter o seu comportamento térmico.

3.3.1 Condições de Contorno e Considerações Físicas

Antes de se fazer o modelamento matemático foram feitas algumas considerações que foram as condições de contorno para a panela. As transferências de calor consideradas foram as seguintes:

- a) Condução de calor pelos refratários e chapa metálica;
- b) Convecção e radiação pela chapa metálica em contato com o ar ambiente;
- c) Convecção, radiação e reirradiação pelo interior da panela através da face quente.

Segundo Gupta et al [28] apud Lopes[18] os modelos podem ser agrupados em quatro grupos:

- Modelos térmicos baseados em equações de condução de calor no regime estacionário;
- Modelos térmicos baseados em equações de condução de calor em regime transiente;
- Modelos térmicos bi e tridimensionais resolvidos através de métodos CFD (fluidodinâmica computacional);
- Modelos térmicos baseados em equações empíricas.

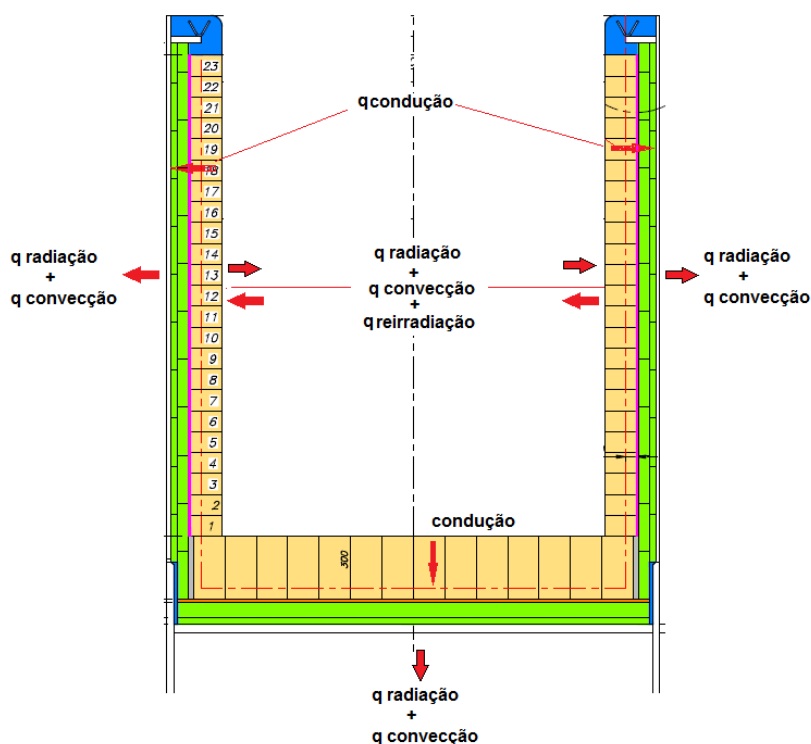
Para o trabalho se escolheu o modelo térmico baseado em equações de condução, convecção e radiação de calor no regime estacionário e unidimensional, já que esses cálculos seriam feitos analiticamente para o ajuste do modelo matemático e devido a simples implementação. Os resultados deste modelamento aplicando os dados medidos na planta são posteriormente comparados com os resultados das simulações computacionais em regime transiente a fim de validar o modelo. Segundo Fredman [29] apud Lopes [18] a aproximação unidimensional tem sido um método bastante aceito entre os pesquisadores.

As condições de contorno da panela consideradas foram as seguintes:

- A panela de aço foi considerada cilíndrica;
- As regiões de interseção entre o fundo da panela e a lateral não foram modeladas;
- As transferências de calor obedeceram a geometria cilíndrica nas paredes laterais e retangulares no fundo;
- A espessura dos refratários da panela foi considerada constante e com dimensões de refratários novos;
- Foi desconsiderada a influência da camada de escória “coating” que se forma pelas paredes e fundo da panela;
- Como já dito anteriormente foi considerado o fluxo de calor unidimensional, para se simplificar o modelo.

Uma representação do modelo é mostrada abaixo na figura 3.3:

Figura 3.3 – Representação do modelo para a panela vazia.



Fonte: Autor.

3.3.2 Equações do Modelo Térmico

Antes das equações do modelo térmico foram necessários os seguintes dados para a modelagem matemática e para os modelos numéricos, vistos na tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Propriedades importantes da panela .

Propriedade	Grandeza
Volume do ar (Var)	6,443 m ³
Coeficiente convectivo de transferência de calor chapa ambiente (ch-ar)	6,5 W/m ² °C
Temperatura ambiente (T_{∞})	50°C
Diâmetro interno da panela (Di)	1829 mm
Diâmetro externo da panela (De)	2353 mm
Altura da carcaça da panela (H)	2300 mm
Área exposta efetiva da carcaça (Aec)	18,21 m ²
Área efetiva da face quente (Afq)	14,15 m ²
Volume da carcaça de aço (Vc)	0,910 m ³
Volume de tijolo permanente (Vp)	1,998 m ³
Volume de tijolo de trabalho (Vt)	3,261 m ³
Densidade do aço a temp. ambiente	7850 kg/m ³
Espessura da carcaça	19 mm
Espessura de refratário permanente	83 mm

Fonte: Autor.

A seguir são descritos as equações de transferência de calor em regime estacionário do modelo térmico da panela vazia de acordo com [11] e [12]:

Taxa de transferência de calor por condução pela parede lateral:

$$Q_{parede} = \frac{T_{fq} - T_{ch}}{\frac{\ln \frac{R1}{Ri} + \ln \frac{R2}{R1} + \ln \frac{R3}{R2}}{2\pi L Kt} + \frac{\ln \frac{R2}{R1} + \ln \frac{R3}{R2}}{2\pi L Kp} + \frac{\ln \frac{R3}{R2}}{2\pi L Kc}} \quad [6]$$

Onde:

Q_{parede} = Taxa de transferência de calor pela parede lateral (W)

T_{fq} = Temperatura na face quente (°C)

T_{ch} = Temperatura na chapa metálica (°C)

Ri = Raio interno da panela (m)

$R1$ = Raio até a face fria do tijolo de trabalho (m)

$R2$ = Raio interno da carcaça metálica (m)

$R3$ = Raio externo da carcaça metálica (m)

L = Espessura (m)

Kt = Condutividade térmica do tijolo de trabalho (W/m°C)

Kp = Condutividade térmica do tijolo permanente (W/m°C)

Kc = Condutividade térmica da carcaça metálica (W/m°C)

Taxa de transferência de calor por condução pelo fundo da panela:

$$Q_{fundo} = \frac{T_{fq} - T_{ch}}{\frac{L_t}{Kt \cdot Af} + \frac{L_p}{Kp \cdot Af} + \frac{L_{ch}}{Kch \cdot Af}} \quad [7]$$

Onde:

Q_{fundo} = Taxa de transferência de calor pelo fundo (W)

L_t = Espessura do refratário de trabalho (m)

L_p = Espessura do refratário permanente (m)

L_{ch} = Espessura da carcaça metálica (m)

Taxa de transferência de calor por convecção e radiação pela chapa metálica:

a) Convecção:

$$Q_{ch_c} = h_{ch-ar} \cdot (T_{ch} - T_{\infty,e}) A_{ch} \quad [8]$$

Onde:

Q_{ch_c} = Taxa de transferência de calor pela carcaça (W)

h_{ch-ar} = Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²K)

$T_{\infty,e}$ = Temperatura ambiente externa a panela (°C)

A_{ch} = Área efetiva da carcaça (m²)

b) Radiação:

$$Q_{ch_r} = \frac{\sigma \cdot (T_{ch}^4 - T_{\infty,e}^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{ch}} + \frac{1}{\varepsilon_{ar}} - 1\right)} \quad [9]$$

Onde:

Q_{ch_r} = Taxa de transferência de calor pela carcaça (W)

σ = Constante de Stefan-Boltzman (5,67*10⁻⁸ W/m²K⁴)

ε_{ch} = Emissividade da chapa (0,80)

ε_{ar} = Emissividade do ar (1,00)

Transferência de calor pela face quente:

a) Convecção:

$$Q_{fq_c} = h_{r-ar} \cdot (T_{fq} - T_{\infty,i}) \cdot A_{int} \quad [10] \text{ e } h_{r-ar} = \frac{Nu \cdot Kar}{L} + \frac{Nu \cdot Kar}{\phi_{int da panela}} \quad [11]$$

Onde:

Q_{fq_c} = Taxa de transferência de calor pela face quente (W)

h_{r-ar} = Coeficiente de convecção entre o refratário e ar na panela (5,749 W/m²K)

$T_{\infty,i}$ = Temperatura ambiente dentro da panela (°C)

A_{int} = Área interna efetiva da face quente (m²)

Nu = Número de Nusselt (135,8)

Kar = Condutividade térmica do ar dentro da panela (0,0909 W/mK)

L = Altura efetiva da face quente (m)

$\phi_{int da panela}$ = Diâmetro interno da panela (1,829m)

b) Radiação:

Como estamos fazendo o cálculo para a panela vazia temos que levar em consideração que haverá a reirradiação no interior da panela pelas paredes, que diminuirá a perda calorífica. Portanto há três radiações presentes e que são mostrados respectivamente nas fórmulas (12), (13) e (14):

$$Qfqr = \frac{A_f \cdot \sigma \cdot (T_{fq}^4 - T_{\infty,e}^4)}{\frac{1-\varepsilon_r}{\varepsilon_r} + \frac{1}{F_{12}} + \left(\frac{1}{F_{1R}} - \frac{1}{F_{2R}} \right)} + 1 - \frac{\varepsilon_{ar}}{\varepsilon_{ar}} [12]$$

$$Qfq_{r'} = A_f \cdot \sigma \cdot \varepsilon_r \cdot (T_{fq}^4 - T_{\infty,e}^4) [13]$$

$$Qfq_{r''} = A_{int} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_r \cdot (T_{fq}^4 - T_{\infty,e}^4) [14]$$

Onde:

Qfq_r = Taxa de transferência de calor pelo fundo com reirradiação (W)

$Qfq_{r'}$ = Taxa de transferência de calor pelo fundo desconsiderando a reirradiação pelas paredes (W)

$Qfq_{r''}$ = Taxa de transferência de calor pelas paredes laterais (W).

A_f = Área do fundo da panela (m²)

F_{12} = Fator de vista

F_{1R} = Fator de vista

F_{2R} = Fator de vista

A fórmula abaixo resume a taxa de transferência por radiação pelo interior da panela:

$$Q_{radiação} = Qfq_r + Qfq_{r''} - Qfq_{r'} [15]$$

Podemos dizer então que taxa de transferência global pela panela vazia é a somatória das taxas de transferências de acordo com a equação (16) abaixo:

$$Q_{total} = Q_{condução_{ch}} + Q_{convecção_{ch}} + Q_{radiação_{ch}} + Q_{convecção_{fq}} + Q_{radiação_{fq}} [16]$$

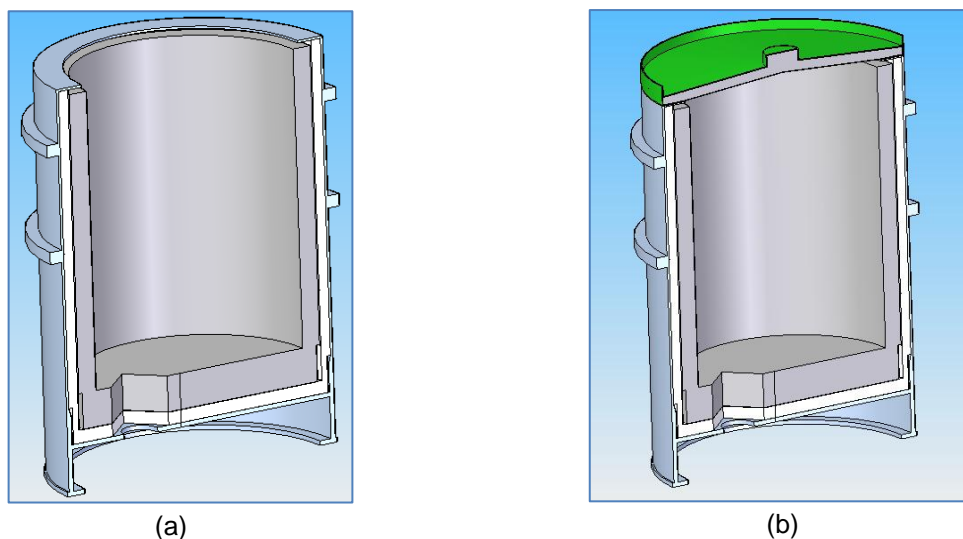
3.4 DESENVOLVIMENTO DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Um dos objetivos em se fazer as simulações computacionais é a de se determinar o perfil térmico das painéis, isto é, se reconhecer e visualizar o gradiente de temperatura pelos refratários, podendo se identificar desta forma os pontos de maior perda de calor e os de menor perda de calor. O outro objetivo foi determinar o comportamento mecânico das painéis quando submetidas às temperaturas de trabalho. Todos estes casos ditos acima, as exceções do último se referem às painéis sem a presença do aço líquido no seu interior, examinando-se apenas o seu

aquecimento e resfriamento durante o tempo. Para as simulações computacionais foram realizadas as seguintes etapas:

Primeiramente, os parâmetros geométricos, propriedades térmicas e mecânicas dos materiais foram levantados através de pesquisa e aquisição de propriedades com o fabricante e realização de medição das dimensões das placas. Após a etapa de aquisição de dados reais do projeto atual, foi desenhada através do software SolidEdge v18 a geometria da placa simplificada e também das tampas. A figura 3.4 (a) e (b) mostra respectivamente a geometria simplificada da placa em corte sem tampa e com tampa:

Figura 3.4 – Desenhos tridimensionais da placa: (a) sem tampa e (b) com tampa.



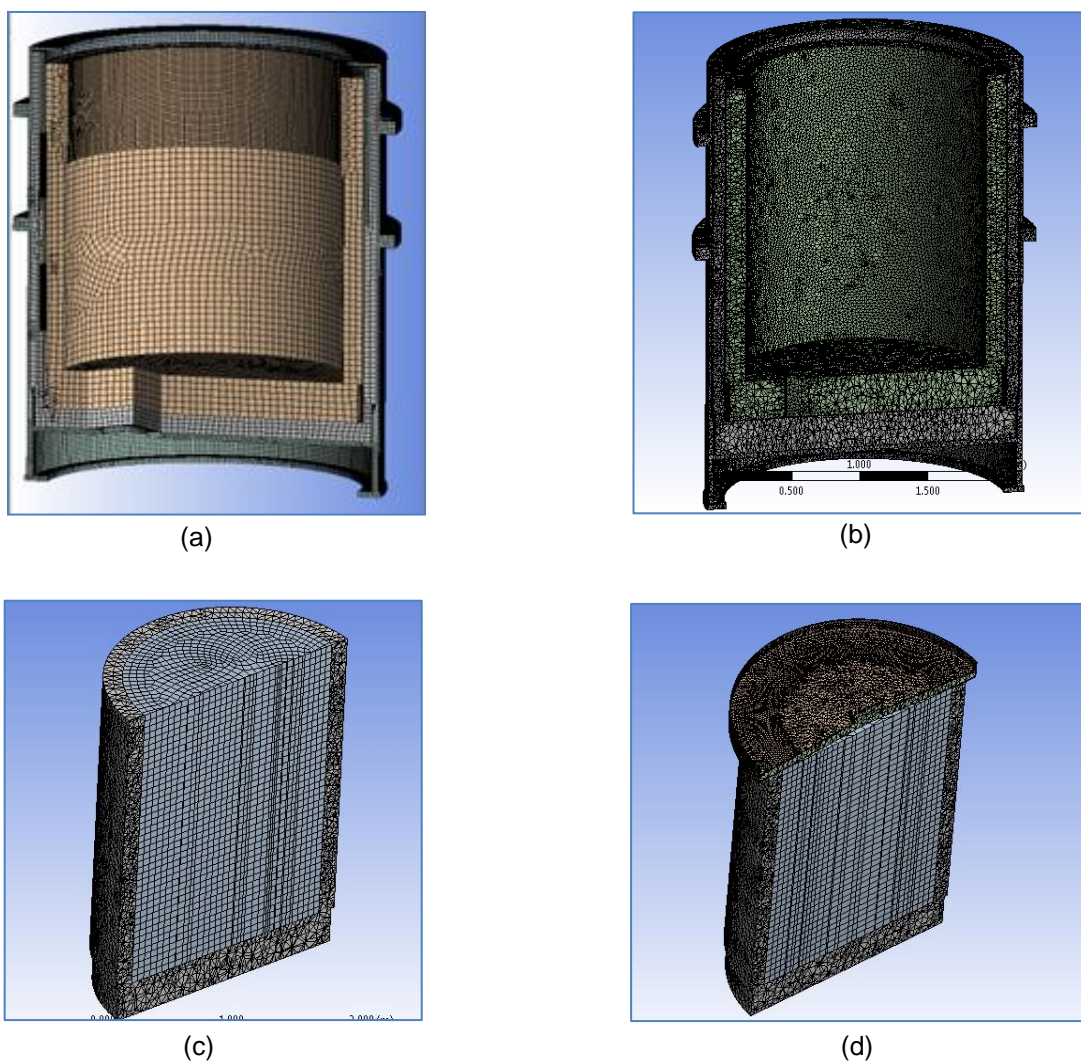
Fonte: Autor.

As discretizações foram feitas no programa Ansys Workbench v11 para a placa com tampa e sem tampa, com todos os seus refratários. Foram simuladas condições de aquecimento e resfriamento de acordo com os resultados dos cálculos obtidos com o modelo matemático e dados recolhidos na planta. As discretizações da placa completa sem tampa e com tampa foram feitas utilizando uma malha hexaédrica dominante refinada, com tamanho de elemento igual a $2,0E^{-2}$ m, física de referência CFD e respectivamente com 162924 e 138417 nós e 156659 e 123323 elementos.

As discretizações para as simulações de resfriamento levaram em conta somente o refratário de trabalho e o ar ambiente interno na placa. As malhas geradas foram do tipo tetraédrica com alta relevância e método automático. Para a placa sem tampa o número de nós foi igual a 75981 e elementos iguais a 181918.

Para a panela com tampa o número de nós foi igual a 82131 e elementos iguais a 207745. As malhas de elementos finitos são vistas na figura 3.5 (a), (b), (c) e (d).

Figura 3.5 – Malhas computacionais da panela. (a) panela normal sem tampa; (b) panela com isolante e sem tampa; (c) refratário de trabalho sem tampa; (d) refratário de trabalho com tampa.



Fonte: Autor.

Para estas malhas foram fornecidos os parâmetros de condições de contorno, propriedades termofísicas como: calor específico, densidade, coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica, coeficiente de convecção, emissividade, além de propriedades mecânicas da carcaça. Para a simulação de resfriamento utilizou-se dos valores de fluxo de calor calculados através das equações citadas no tópico modelamento matemático. Além disto, foram consideradas as seguintes condições de contorno:

- Temperatura do refratário de trabalho – 900°C
- Temperatura do ar dentro da panela – 800 °C
- Temperatura do ar-ambiente – 50 °C

As equações diferenciais de transferência de calor em regime transiente, que fazem parte do modelamento numérico da simulação, foram resolvidas através do “*solver*” de equações do programa, e as soluções plotadas através do pós-processador do programa, como será visto mais adiante em resultados e discussões.

3.5 MUDANÇAS PROPOSTAS

Segundo MINION [30] et al e ANDRADE [31] et al apud LOPES [18] para se ter a conservação de energia da panela é necessário que ela trabalhe o maior tempo possível e que é possível eliminar até mesmo o pré-aquecimento. Para a aciaria em estudo foram propostas mudanças operacionais e físicas para se otimizar o processo.

Verificou-se na planta que não havia um cuidado adequado com o tampamento das panelas. Por isto se propôs que as panelas vazias que necessitassem ficar em espera pelo vazamento permaneceriam tampadas logo após a limpeza e estas só deveriam ser destampadas e colocadas no carro de movimentação 10 minutos antes de realizar o vazamento, tempo estimado para se colocar panela no carro, adicionar areia de vedação e movimentar até o local de vazamento. Outra mudança proposta foi a subida da panela para o lingotamento já tampada e a manutenção desta, tampada até a sua descida do LC minimizando as perdas caloríficas.

Verificou-se que os movimentos da ponte rolante eram lentos e devido a isto o tampamento das panelas não era priorizado, e sim outros movimentos como o transporte de panela cheia para o LC ou apenas o movimento da ponte até o LC para o aguardo de retirada de panela vazia. As mudanças físicas propostas foram:

- A instalação de uma talha elétrica próximo ao FP para auxiliar no tampamento das panelas, deixando a ponte livre para os outros movimentos.
- Colocação de material isolante térmico nas panelas a fim de diminuir as perdas de energia pelos refratários e a temperatura na carcaça. O isolante proposto, pesquisado no mercado, foi de dois tipos: em forma de placa e em

forma de tijolo. A tabela 3.2 resume as principais características dos isolantes propostos. Os isolantes deveriam ser colocados entre a carcaça metálica e ostijolos permanentes. A aplicação dos dois tipos de isolamentos é simulada computacionalmente e os resultados são mostrados adiante em resultados e discussões.

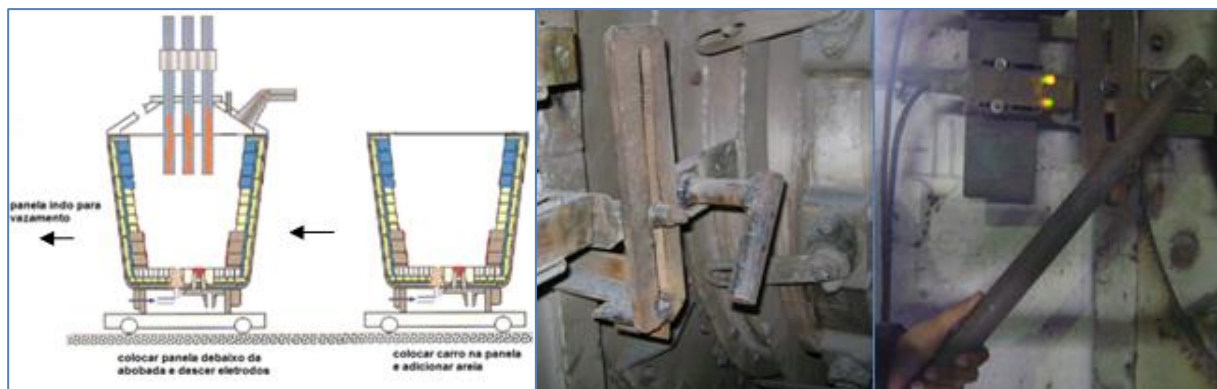
Tabela 3.2 – Propriedades dos isolantes térmicos selecionados.

Produto	Classificação e composição	Condutividade térmica (W/m°C)				Resistência à compressão (Mpa)	Temperatura máxima (°C)
		25°C	356°C	617°C	773°C		
Placa (Silplate 1308)	Isolante; alumina e sílica	0,153	0,159	0,182	0,209	7,84	1300
		300°C	700°C	1000°C			
Tijolo (Insulimol 1317)	Semi-Isolante; alumina e sílica	0,7	0,77	0,83		25	1300

Fonte: Adaptado de [32] Unifrax e [33] Ibar.

- O uso da abobada do FP como um meio de conservação de energia térmica. Para isto foi realizado testes com a panela vazia debaixo da abobada com os eletrodos abaixados para aproveitar o calor irradiado por eles. Para que o exaustor da abobada não roubasse o calor da panela, foi feito para os testes o fechamento do damper manualmente através de uma alavanca soldada no acionamento. A figura 3.6 mostra um esquema da mudança operacional e as fotos da alavanca que foi soldada para o acionamento manual do damper.

Figura 3.6 – Mudança operacional e alavanca de acionamento manual do damper.



Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DAS MEDIDAS DE TEMPERATURA

Os resultados das medidas de temperatura foram colocados em uma planilha que é apresentada na tabela 4.1 abaixo apenas em parte. Nesta tabela foram incluídas a data, o número da panela, o horário de medida, as temperaturas nos diversos pontos e a condição em que a panela se encontrava:

Tabela 4.1 - Levantamento das temperaturas durante o ciclo operacional.

Dia	Corrida	Pan.	Horário	Etapa	LE ext (°C)	LE int (°C)	Centro ext (°C)	Centro int (°C)	Fundo ext (°C)	Fundo int(°C)	Cond.
20/11/12	126930	4	08:27	antes da limpeza	280	870	328	995	268	1200	ST
20/11/12	126930	4	08:34	depois da limpeza	274	870	324	946	267	1170	ST
20/11/12	126930	4	08:56	após ad. Areia	270	786		860			ST
20/11/12	126930	4	09:10	antes do vazamento	270	730					ST
20/11/12	126931	1	09:13	antes da limpeza	290	907	360	1000	250	1101	ST
20/11/12	126931	1	09:17	depois da limpeza	290	895	360	987	250	1104	ST
20/11/12	126931	1	09:43	após ad. Areia	300	765	354	774			ST
20/11/12	126931	1	10:03	antes do vazamento	290	672					ST
20/11/12	126932	3	10:06	antes da limpeza	347	970	322	1050	307	1230	ST
20/11/12	126932	3	10:13	depois da limpeza	310	921	320	970	279	1200	ST
20/11/12	126932	3	10:45	após ad. Areia	322	780	330	817			ST
20/11/12	126932	3	10:50	antes do vazamento	320	760					ST

Fonte: Autor.

Pan. – Panela

LE ext – Linha de escória externa

LE int – Linha de escória interna

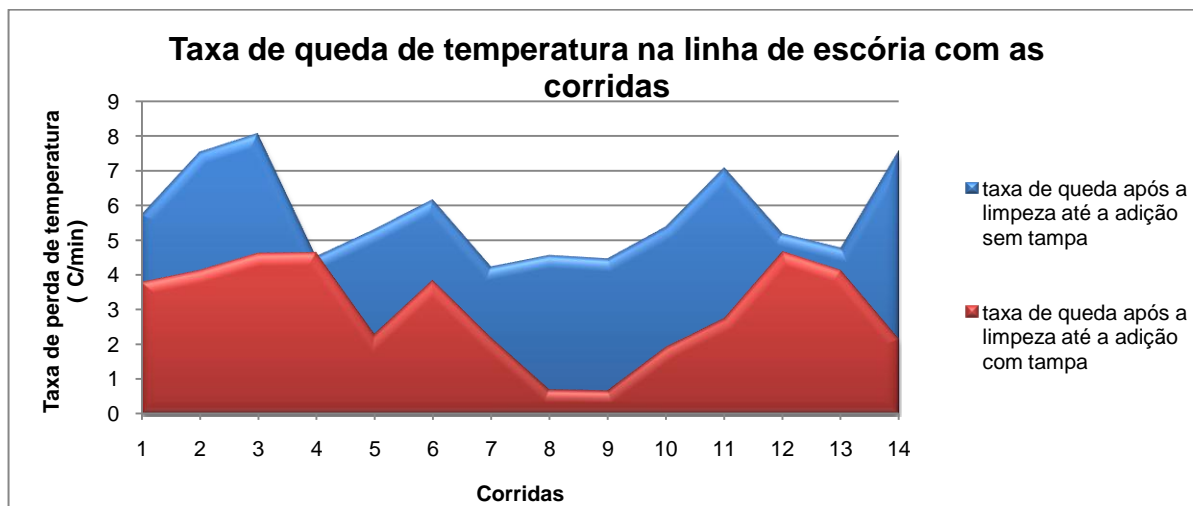
Cond. – Condição

ST – Sem tampa

A partir dos dados da planilha pode se retirar os valores de taxas de queda de temperatura com as panelas nas condições diversas e nas diferentes etapas. Levando em consideração as quedas de temperatura na linha de escória (LE), que é a região de maior perda de temperatura, durante o tempo em que a panela permanece em espera até a adição de areia de vedação, constatou-se que para as panelas que permaneceram destampadas durante este período, tiveram taxas de

queda de temperatura variando entre $4,24^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e $8,07^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Já as painelas que permaneceram tampadas tiveram taxas de queda de temperatura variando entre $0,68^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e $4,65^{\circ}\text{C}/\text{min}$. É o que está sendo mostrado no gráfico da figura 4.1:

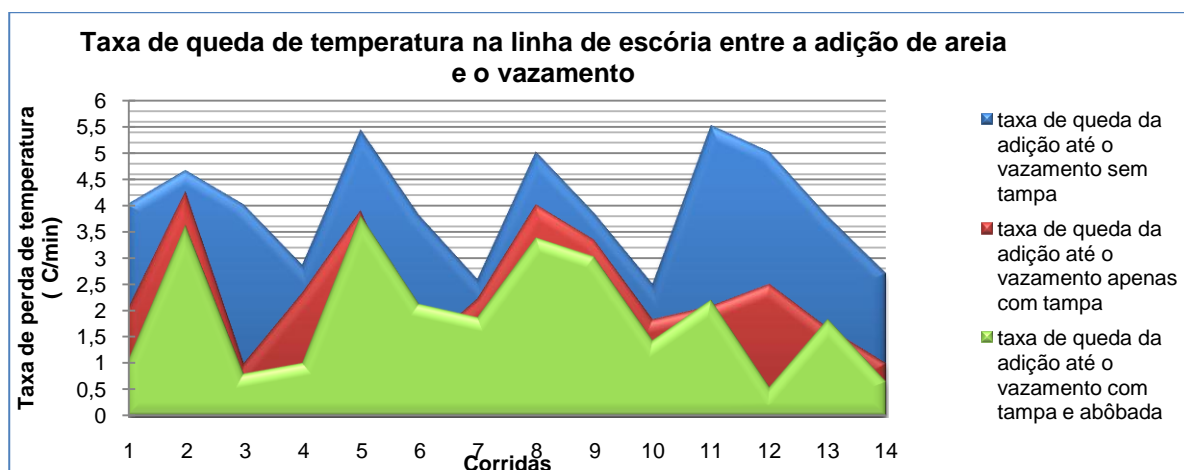
Figura 4.1 - Taxas de queda de temperatura durante as corridas no período entre o término da limpeza até a adição de areia de vedação para painelas tampadas e destampadas.



Fonte: Autor.

Para o período de tempo entre a adição de areia de vedação e o vazamento as painelas apresentaram os resultados de taxa de queda de temperatura vistos na figura 4.2, para as seguintes condições: em que a painela permaneceu destampada durante todas as etapas, as que permaneceram tampadas e as que foram colocadas abaixo da abobada do forno painela:

Figura 4.2 - Taxas de queda de temperatura com as corridas entre a adição de areia e o vazamento para as condições de painelas destampadas, tampadas e as que foram colocadas sob a abobada.



Fonte: Autor.

A grande dispersão observada nos gráficos das figuras 4.1 e 4.2 se devem as muitas variáveis do processo como temperatura inicial da panela, a presença de mais ou menos coating pelas paredes, condição de desgaste dos refratários e demora no tampamento das panelas durante os testes, fatos estes que não foram levados em consideração no trabalho.

A tabela 4.2 mostra em resumo os valores de taxa média de queda de temperatura na linha de escória encontrada para os períodos após a limpeza até a adição de areia de vedação e após a adição de areia de vedação até antes do vazamento para as condições distintas.

Tabela 4.2 - Taxas-média de queda de temperatura das panelas.

Período	Após a limpeza até a adição de areia de vedação		Após a adição de areia de vedação até antes do vazamento		
	Panela sem tampa	Panela com tampa	Panela sem tampa	Panela com tampa	Panela com tampa e abobada
Taxa média (°C/min)	5,23	2,77	3,75	2,38	1,94

Fonte: Autor.

Os valores médios demonstram que o período de perda calorífica se concentra no período após a limpeza até a adição de areia de vedação e que se a panela não for tampada ou se houver até mesmo a demora neste procedimento a panela perde em média 5,23°C/min. Se a panela porém, for logo tampada após a limpeza ela possuirá em média uma taxa de queda de temperatura de 2,77 °C/min. A tabela ainda demonstra o benefício de se utilizar a abobada do FP e do tampamento prévio na taxa de queda de temperatura no período da adição de areia até o vazamento.

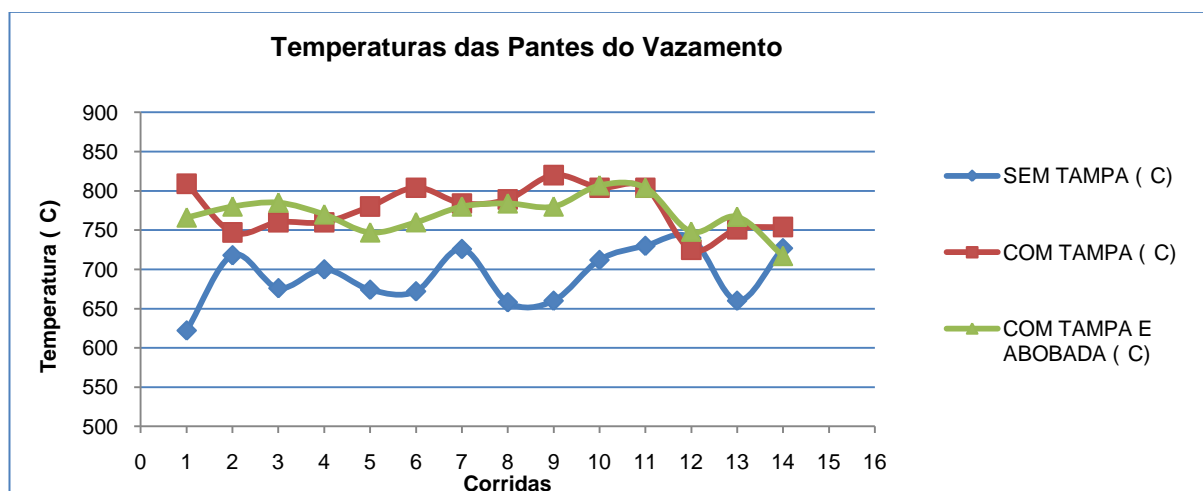
Tabela 4.3 - Taxas-média total de queda de temperatura das panelas.

Condição	Panela sem tampa	Panela com tampa	Panela com tampa e abobada
Taxa total média (°C/min)	4,46	2,45	2,02
Queda de temperatura total (°C)	176,29	104,85	97,57
Tempo total médio (min)	42	43	59

Fonte: Autor.

A partir das tabelas 4.2 e 4.3 pode se perceber a grande influência no uso da tampa e da abobada nas taxas de queda de temperatura das painéis durante as etapas de panela vazia. A tabela 4.3 demonstra em média que com o uso da abobada e da tampa em conjunto pode se reduzir a metade as perdas de temperatura até o vazamento. A desvantagem no uso da abobada é que ela só pode ser usada para tempos de panela vazia maiores. Por isto o tempo total médio para este caso apresentou-se com 59 minutos. Como um dos principais objetivos do trabalho era se diminuir a perda de temperatura para se obter uma panela mais quente no momento do vazamento, então a figura 4.3 abaixo mostra os resultados das medidas das temperaturas das painéis antes do vazamento para as três condições testadas:

Figura 4.3 - Temperaturas das painéis antes do vazamento.



Fonte: Autor.

Segundo Magnesita [34] e SI-PF-340-000 [35] a temperatura ideal e objetivada para os refratários antes do vazamento deve ser 800°C para as painéis em ciclo, para que não haja choques térmicos. Podemos perceber então, que para as painéis que não se teve o cuidado de tampar, as temperaturas internas foram bem abaixo do objetivado, variando entre 622 °C e 745°C, enquanto que as painéis que foram tampadas e colocadas sob a abobada do forno-panela obtiveram resultados semelhantes próximos do objetivado variando entre 732°C e 810°C.

Outro fato importante encontrado com as medidas de temperatura foi que em média as carcaças das painéis na região da linha de metal trabalham a uma temperatura de 346°C, e das amostras retiradas o valor mínimo de temperatura encontrada foi de 280°C e a máxima foi de 396°C.

4.2 RESULTADOS DAS PERDAS DE TEMPERATURA DO AÇO LÍQUIDO E ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA NO FORNO PANELA

Na tabela 4.4 abaixo estão contidas as temperaturas do aço líquido antes do vazamento e após sua chegada ao FP. Foram anotados os dados de 73 corridas para comparação com as temperaturas das panelas nestas mesmas corridas.

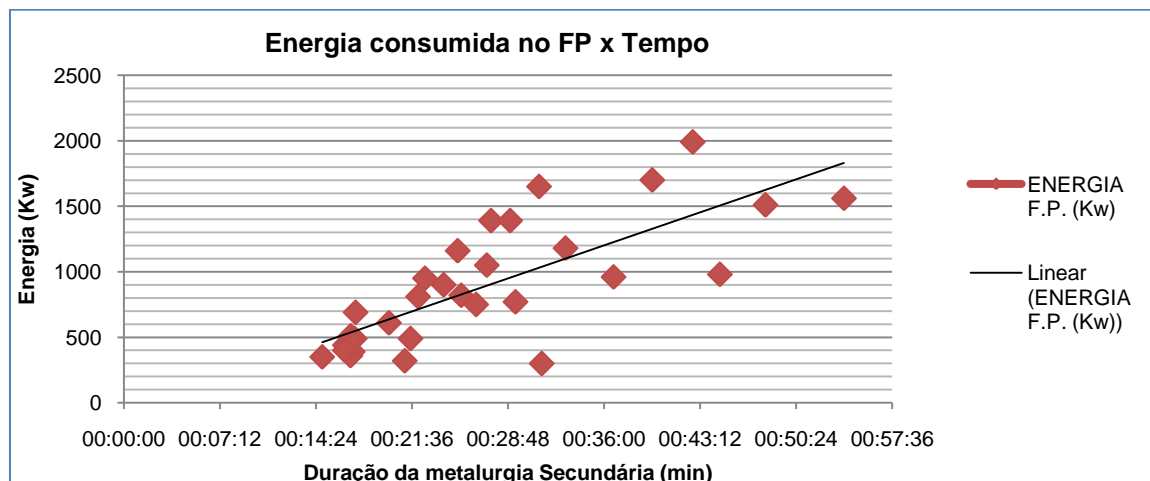
Tabela 4.4 – Temperaturas do aço líquido durante ciclo operacional .

Dia	Corrida	Etapa	Horário	Temperatura de vazamento (°C)	Temperatura chegada FP (°C)
20/11/2012	126930	Vazamento	06:17:11	1.679	
20/11/2012	126930	Chegada Panela	06:23:00		1.635
20/11/2012	126931	Vazamento	07:10:29	1.683	
20/11/2012	126931	Chegada Panela	07:16:00		1.604
20/11/2012	126932	Vazamento	08:09:00	1.677	
20/11/2012	126932	Chegada Panela	08:15:00		1.635
20/11/2012	126933	Vazamento	08:58:25	1.673	
20/11/2012	126933	Chegada Panela	09:07:00		1.612

Fonte: [27] Sistema de Gestão de Processos de Produção da SINOBRAS.

Procurou-se com os dados obtidos de temperatura do aço líquido e energia elétrica, verificar se havia relações entre a queda de temperatura do aço líquido com a temperatura da panela vazia e a energia elétrica consumida no FP. Primeiramente se verificou que a energia consumida no forno panela é diretamente proporcional ao tempo de metalurgia secundária. O gráfico da figura 4.4 abaixo mostra esta relação:

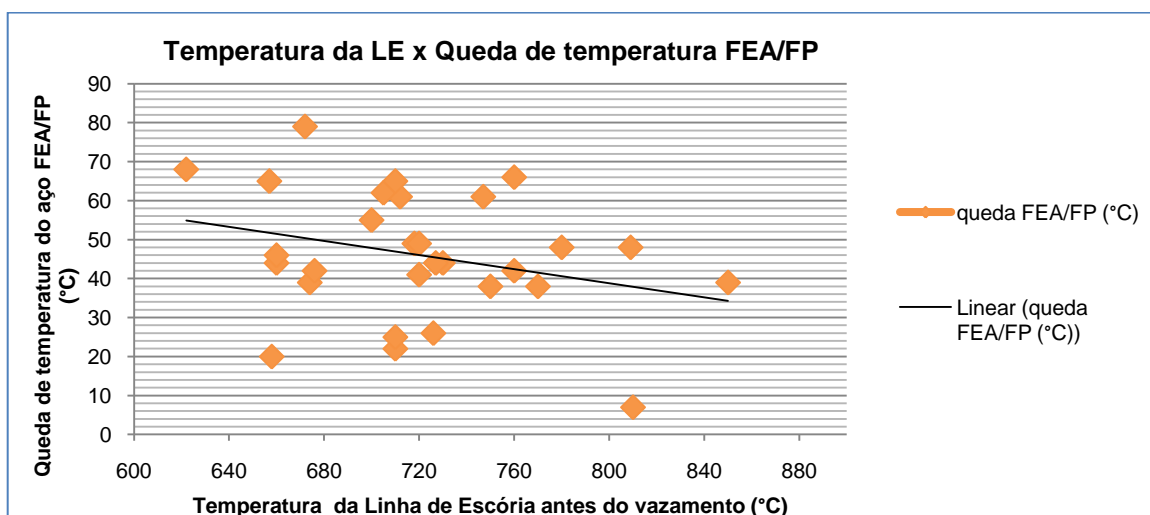
Figura 4.4 – Energia elétrica consumida no FP com as corridas.



Fonte: Autor.

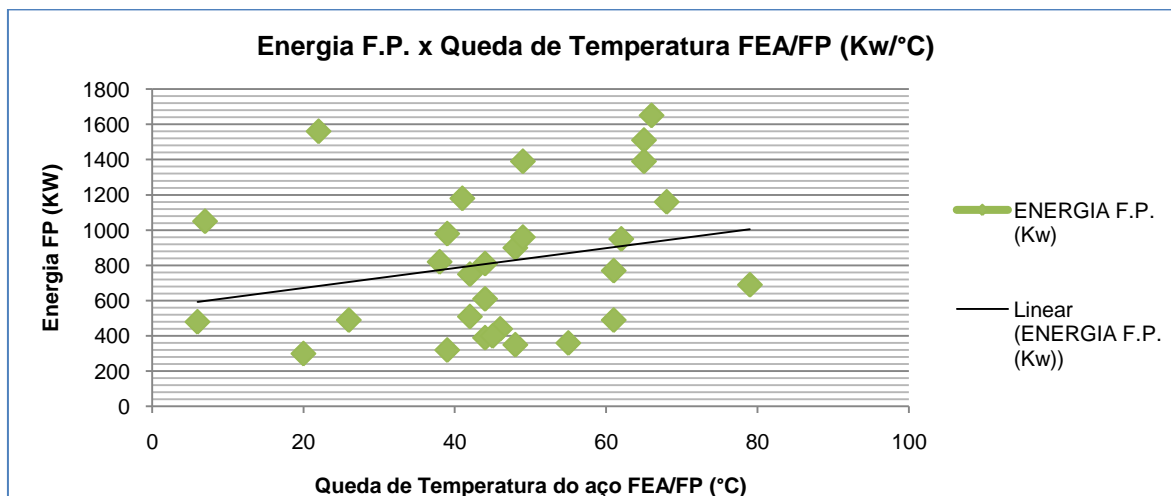
Quanto maior o tempo de metalurgia secundária maior a energia elétrica consumida e o tempo de metalurgia secundária dependem entre outros fatores da temperatura do aço líquido antes de entrar no forno-panela. Verificou-se a existência de uma relação entre a temperatura da linha de escória antes do vazamento e a queda de temperatura que acontece no aço líquido durante o tempo em que acontece o vazamento até o momento em que a panela chega ao forno-panela. O gráfico da figura 4.5 mostra que à medida que a temperatura da linha de escória na hora do vazamento é maior, há uma tendência de uma menor queda de temperatura sofrida no aço líquido e vice-versa. Pela regressão linear também vemos esta tendência.

Figura 4.5 – Relação entre queda de temperatura do aço líquido entre FEA e FP e a temperatura da linha de escória antes do vazamento.



Fonte: Autor.

Figura 4.6 – Relação entre a energia gasta no FP e a queda de temperatura do aço líquido entre FEA/FP.



Fonte: Autor.

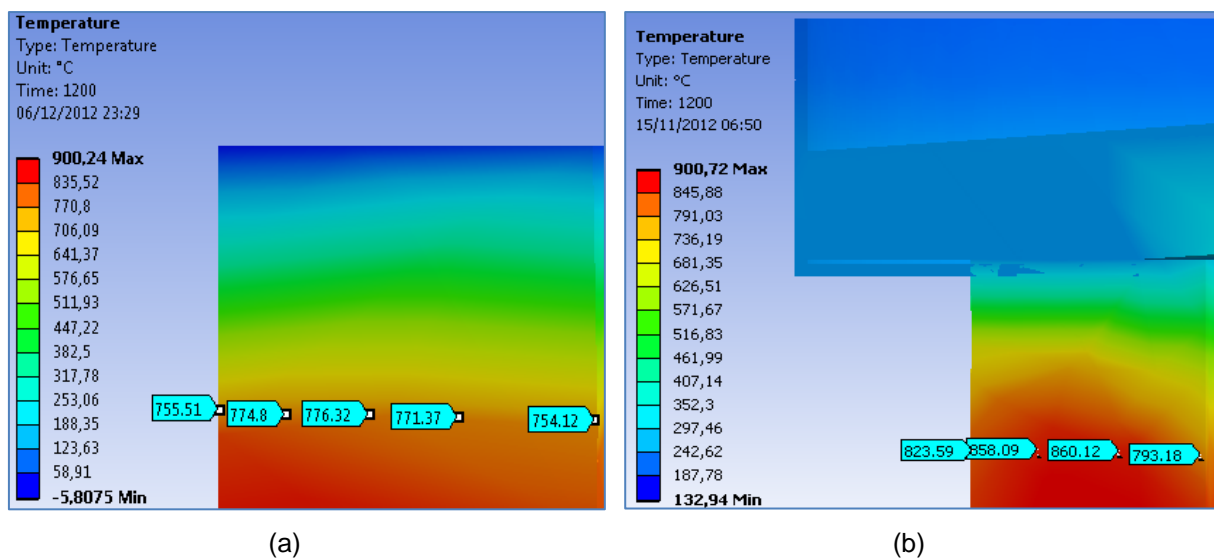
A energia elétrica gasta no forno-panela durante a metalurgia secundária também guardou uma relação com a queda de temperatura do aço líquido. Na figura 4.6 através da regressão linear vemos a tendência de se necessitar uma maior energia à medida que seja maior a queda de temperatura do aço líquido.

Com relação aos refratários segundo ANDRADE [31] deve-se evitar as quedas de temperatura para que não haja degradação dos mesmos, assim como a alternância das temperaturas que ocasionam fadigas térmicas. Ainda segundo ANDRADE [31], a operação do forno-panela que utiliza arco elétrico é agressiva à parede refratária pela irradiação do arco causando desgaste prematuro e quanto maior o tempo de forno ligado, maior será a taxa de aquecimento da escória e, como consequência, a sua agressividade sobre os refratários.

4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Os resultados das simulações de transferência de calor em regime transiente do resfriamento das painelas mostraram quais seriam os perfis de temperatura esperados para as painelas durante as etapas de painela vazia nas condições já estudadas, isto é, para painelas destampadas e tampadas. A figura 4.7 (a) e (b) mostram respectivamente o perfil de temperatura do refratário de trabalho, na região da linha de escória, resultante do resfriamento transiente das painelas nas condições destampada e tampada após 20 minutos:

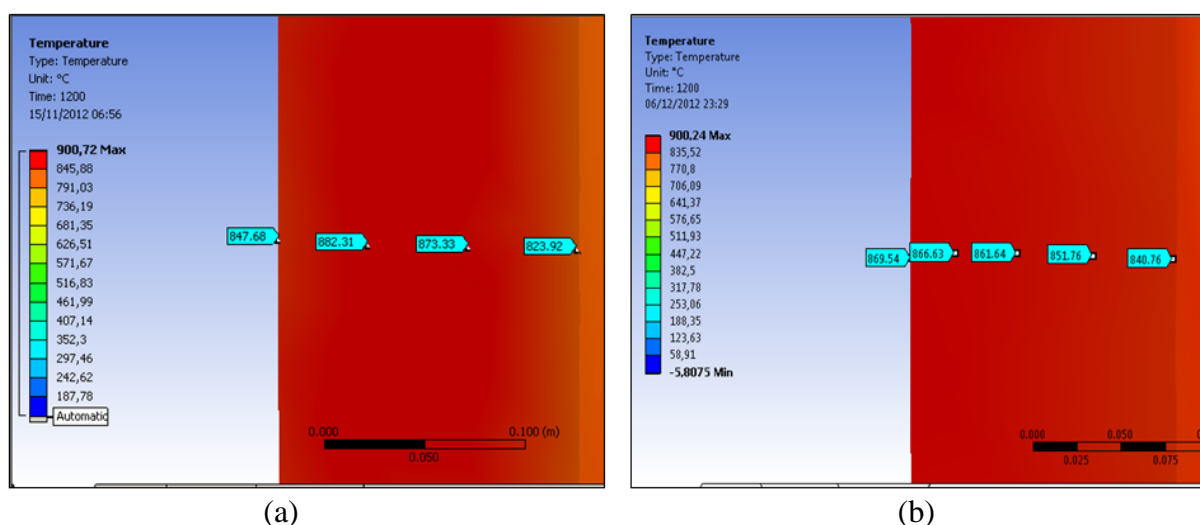
Figura 4.7 – Perfis de temperatura na região da linha de escória após 20 minutos: (a) destampada e (b) tampada.



Percebe-se que pela figura acima que em um tempo de 20 minutos, a panela que permaneceu destampada teve sua temperatura na face quente diminuída de 900°C para 754°C, enquanto que a panela que permaneceu tampada essa queda de temperatura foi de 900°C para 793°C, dando uma diferença de 39°C entre os dois resultados. Pode-se perceber que o perfil de temperatura da panela destampada foi mais linear do que para a panela tampada, fato facilmente percebido pelas temperaturas e pelo mapa de cores criado pelo programa. Na prática isto quer dizer que a panela tampada reteve uma maior energia calorífica interna em um mesmo período de tempo.

Agora para a região central do refratário de trabalho, o que costuma se denominar de região da linha de metal, o perfil resultante do resfriamento transiente após 20 minutos para a panela que permaneceu destampada e para a que permaneceu tampada foi respectivamente de acordo como mostrado na figura 4.8(a) e (b):

Figura 4.8 – Perfis de temperatura na região da linha de metal após 20 minutos: (a) destampada e (b) tampada.

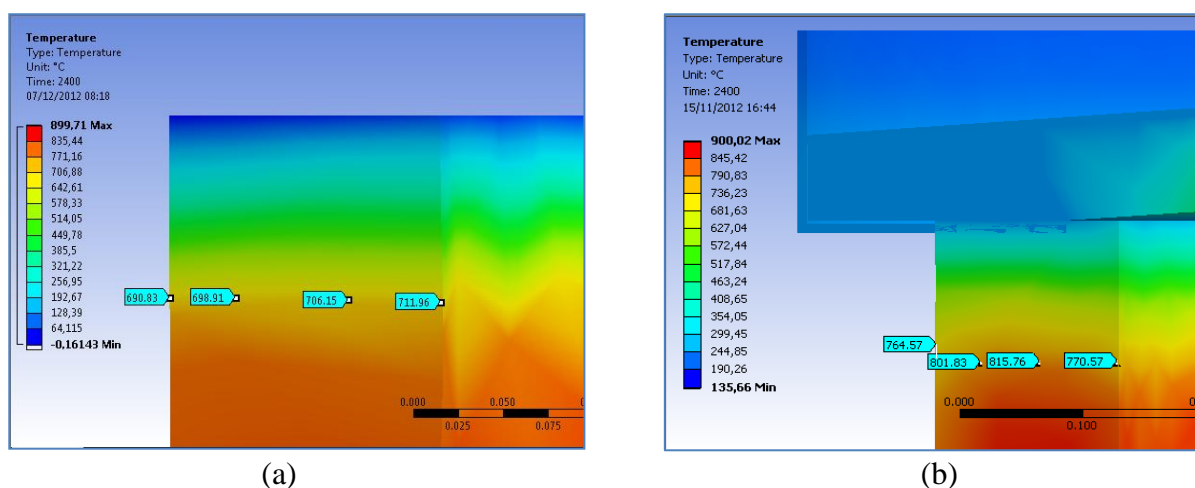


Fonte: Autor.

Os perfis encontrados nos dois casos na linha de metal foram semelhantes, isto quer dizer que as diferenças de temperatura não foram tão significativas nesta região. A face quente da panela que permaneceu destampada apresentou uma temperatura de 823,92°C, enquanto que a panela que permaneceu tampada uma temperatura de 840,76°C, dando uma diferença de aproximadamente 17°C. As temperaturas na face fria foram para a panela destampada e tampada respectivamente iguais à 847,68°C e 869,54 °C, dando uma diferença de aproximadamente 22°C. O tempo de 20 minutos é o tempo médio em que a panela vazia fica em espera até ser colocada no carro do forno-panela para adição de areia de vedação. Assim, verificamos que a região que perde mais temperatura é a região da linha de escória e que se a tampa for colocada logo quando possível, a linha de escória após 20 minutos ainda estará com uma temperatura próxima de 800°C, que é a desejada, enquanto que a destampada estará 50°C abaixo da temperatura desejada.

Fazendo a mesma simulação de resfriamento para um tempo de 40 minutos, que é aproximadamente o tempo médio entre o início da limpeza da panela até um pouco antes do vazamento, como já mostrado na tabela 4.3, se tem os perfis de temperatura para a condição destampada e tampada mostrados respectivamente pela figura 4.9 (a) e (b):

Figura 4.9 – Perfis de temperatura na região da linha de escória após 40 minutos: (a) destampada e (b) tampada.

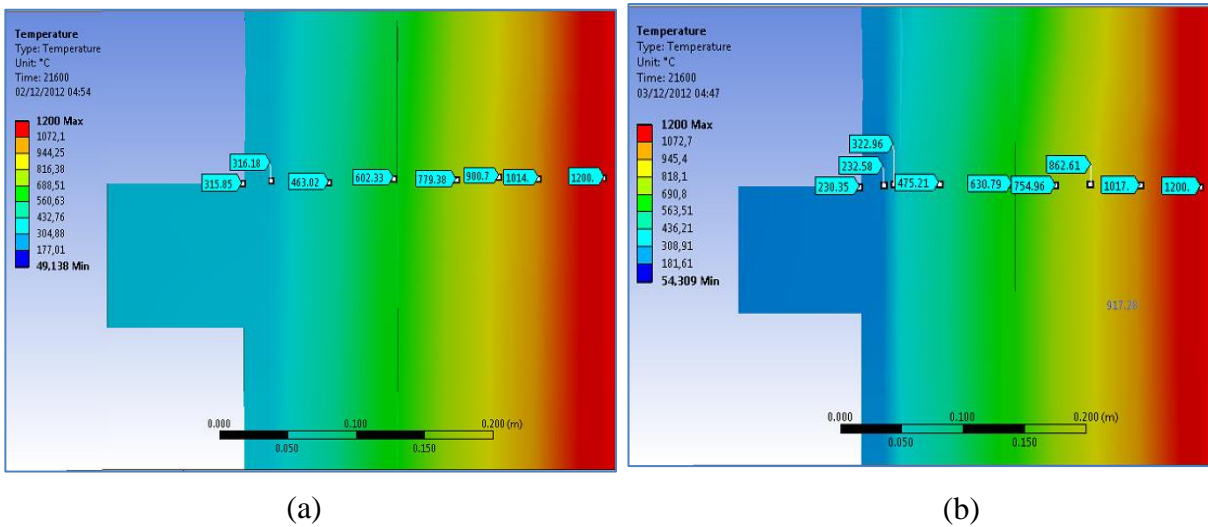


Fonte: Autor.

Após 40 minutos podemos ver que a panela que permanece destampada possuiu em sua face quente na linha de escória uma temperatura de 711,96°C, representando uma queda de temperatura de 188°C. Já a panela tampada obteve uma temperatura de 770,57°C, o que leva a uma queda de temperatura de 129,43°C. A face fria da panela destampada apresentou uma temperatura de 690,13°C, enquanto que a tampada 764,57°C. Pelo mapa de cores percebemos também que a panela destampada possui um perfil térmico mais linear do que o da panela tampada, o que comprova que a panela sendo tampada durante todo tempo de espera consegue manter uma maior energia calorífica interna.

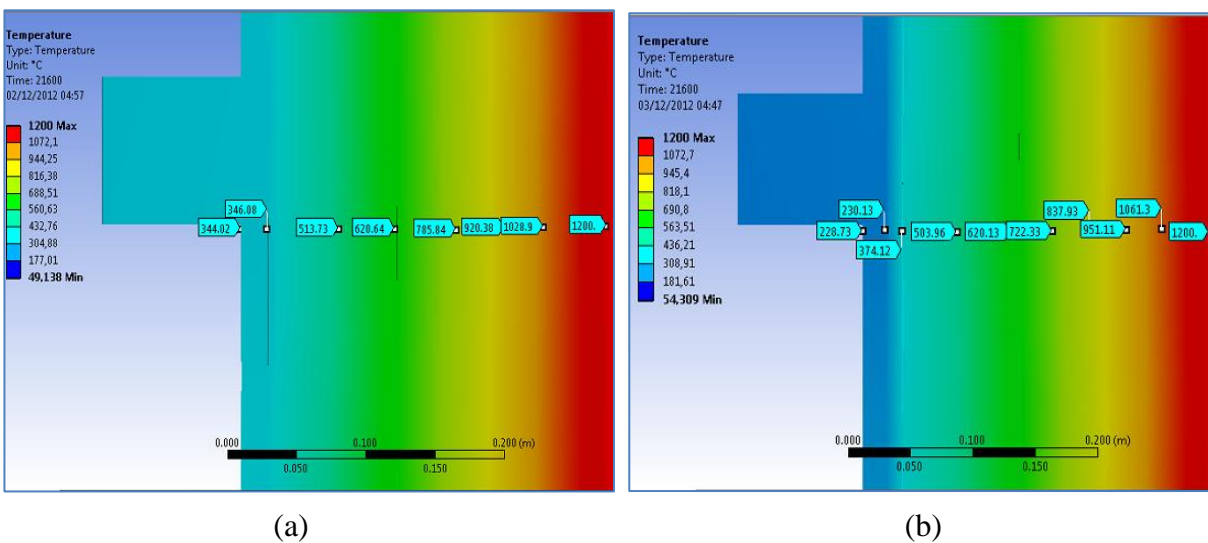
Os resultados das simulações computacionais do uso de isolante térmico se encontram nas figuras 4.10 (a) e (b) e 4.11(a) e (b). Foram realizadas comparações entre o uso da panela sem e com isolante térmico a fim de se comparar as temperaturas nas carcaças, os fluxos de calor e perfis térmicos resultantes. A figura 4.10 (a) mostra o perfil de temperatura na linha de escória com a panela sem isolante em uma simulação de aquecimento durante 21600s considerando que a face interna estivesse à uma temperatura constante de 1200°C. Assim, a carcaça metálica atingiu uma temperatura de 316°C, enquanto que a panela com isolante térmico do tipo placa, figura 4.10(b), atingiu uma temperatura de 230°C. A figura 4.11(a) mostra o perfil de temperatura na linha de metal para as mesmas condições anteriores para a panela sem isolamento. A temperatura na carcaça atingiu 344 °C. Já a panela com isolamento térmico obteve uma temperatura de 229°C aproximadamente como se pode ver na figura 4.11(b).

Figura 4.10 – Perfis de temperatura na região da linha de escória: (a) panela sem isolante e (b) panela com isolante.



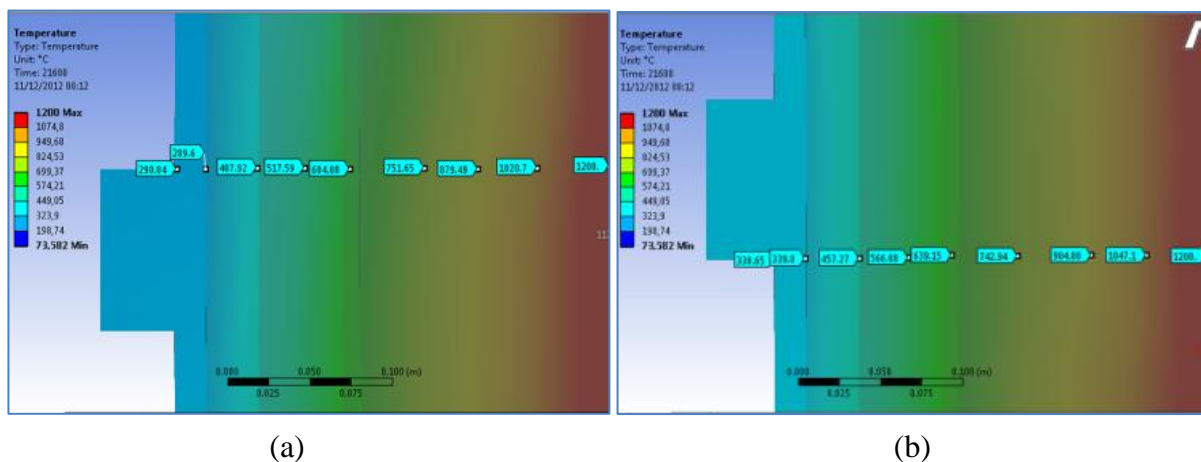
Fonte: Autor.

Figura 4.11 – Perfis de temperatura na região da linha de metal: (a) panela sem isolante e (b) panela com isolante.



Fonte: Autor.

Figura 4.12 – Perfis de temperatura na região da linha de escória e metal para panela utilizando tijolo isolante térmico.



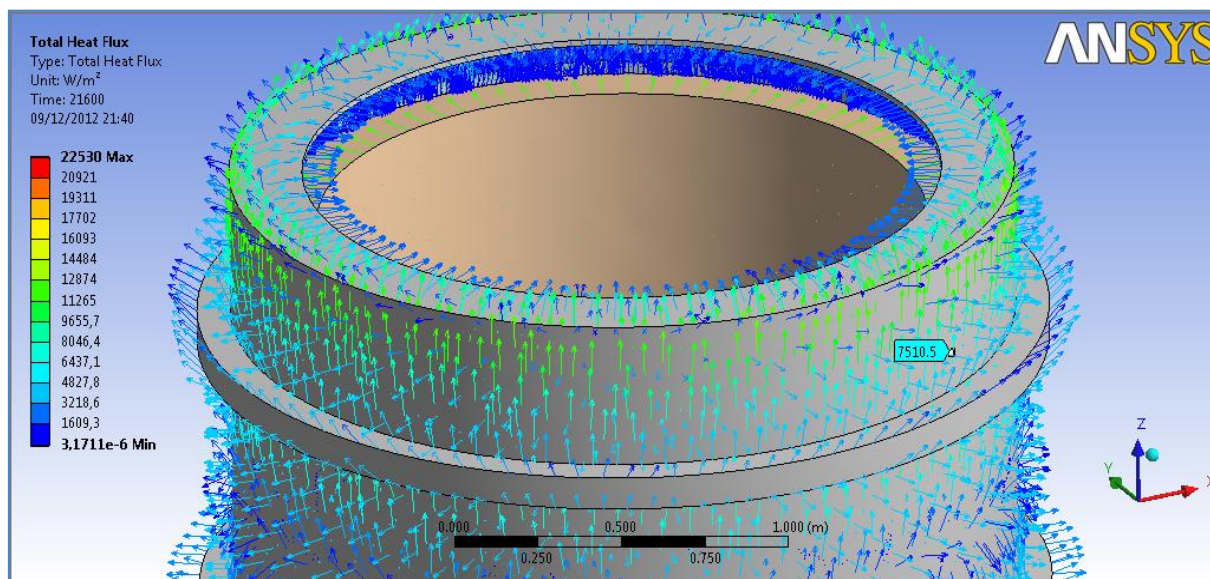
Fonte: Autor.

A figura 4.12 (a) e (b) mostram respectivamente os perfis de temperatura na linha de escória e metal encontrados para as mesmas condições anteriores, porém utilizando tijolo isolante. A temperatura encontrada na carcaça na linha de escória foi de 290°C e a temperatura encontrada na carcaça na linha de metal foi de 330°C. Segundo [35] a temperatura objetivada na carcaça metálica da panela deve ser de 280°C e no máximo de 350°C para painéis em ciclo. Como já mencionado a temperatura na carcaça chegou até 396°C quando vazia, o que nos leva a imaginar que no estado cheio pode atingir temperaturas maiores devido ao aço líquido em seu interior.

A figura 4.13 mostra o fluxo de calor através da carcaça metálica para as mesmas condições citadas em 4.10 (a) para a panela normal. A figura 4.14 demonstra o fluxo de calor existente na carcaça metálica que contém isolamento térmico. Observa-se que o fluxo de calor pela panela sem isolante é maior e menos uniforme do que aquela na panela com isolante e que os valores de fluxo de calor na linha de escória são de 7510 W/m² e 5008 W/m² para as painéis sem isolante e com isolante respectivamente.

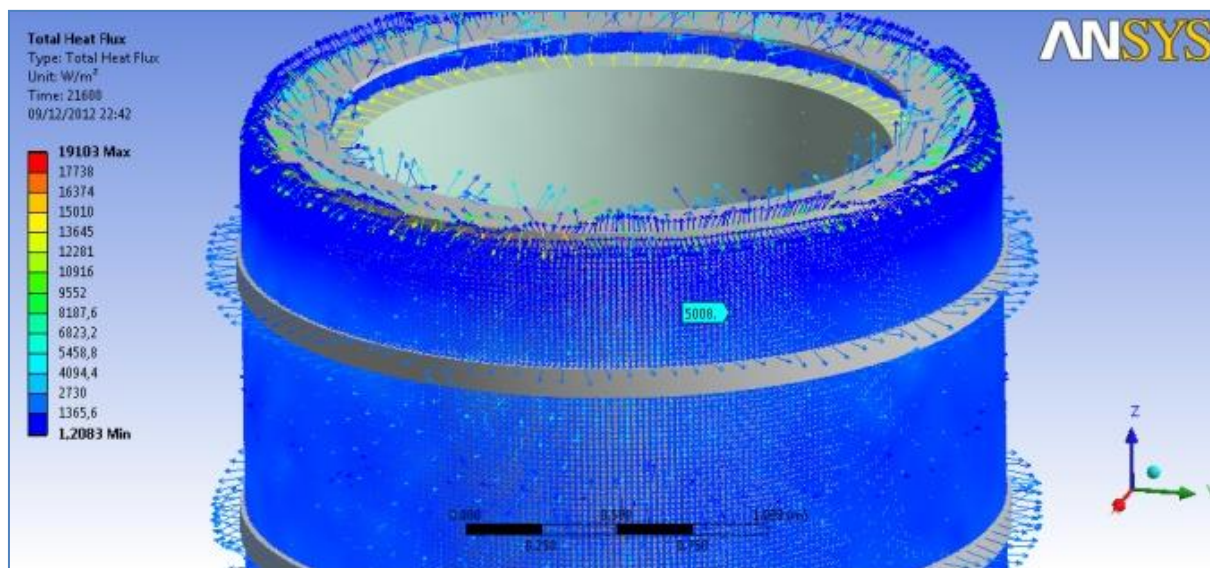
Como verificado, a carcaça da panela trabalha à uma temperatura bem superior a objetivada e isto pode afetá-la permanentemente. Foi feito uma simulação termo-mecânica a fim de se conhecer o comportamento da carcaça submetido a cargas mecânicas e térmicas fazendo uma comparação com a utilização de material isolante térmico.

Figura 4.13 – Fluxo de calor pela carcaça metálica da panela normal.



Fonte: Autor.

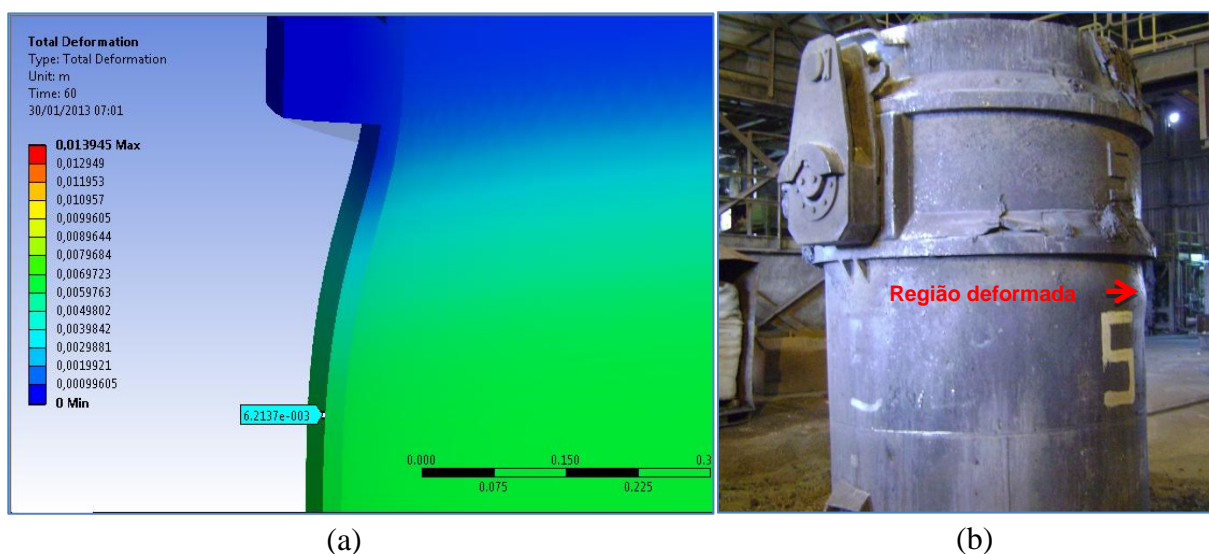
Figura 4.14 – Fluxo de calor pela carcaça metálica pela panela com isolante térmico.



Fonte: Autor.

A figura 4.15(a) mostra o resultado da simulação de uma panela sem isolamento térmico, submetida a carga dos pesos dos refratários e 40 toneladas de aço líquido em seu interior sendo apoiada pelos seus anéis de reforço, que é o normal de sua operação, e estando sua carcaça metálica à uma temperatura uniforme de 315°C. A figura 4.15(b) comprova na prática a simulação:

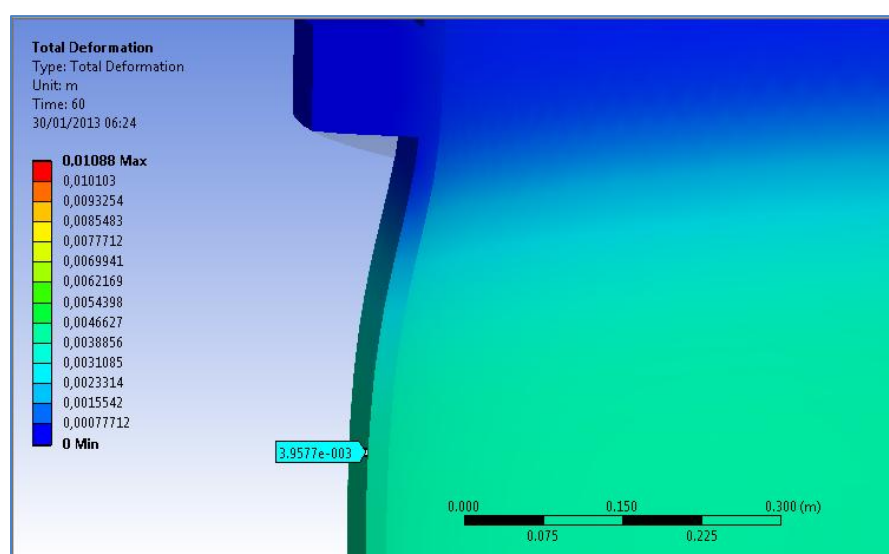
Figura 4.15 – Deformação da carcaça metálica da panela normal submetida à solicitações termo-mecânicas e foto de uma panela apresentado a deformação.



Fonte: Autor.

Através da figura 4.15(a) vemos que a carcaça se deforma na região logo abaixo do anel de reforço inferior, aonde se encontra a linha de metal, região como já comprovado apresenta maior temperatura. A panela nesta região apresentou uma deformação de 6,2 mm. A figura 4.16 mostra qual seria a deformação na carcaça sob as mesmas solicitações mecânicas referidas, porém utilizando isolante térmico.

Figura 4.16 – Deformação da carcaça metálica da panela com isolante submetida à solicitações termo-mecânicas.



Fonte: Autor.

A carcaça se encontrava com uma temperatura uniforme e igual a 250°C e a deformação encontrada na região da linha de metal no mesmo ponto do caso interior foi de 3,95mm.

4.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Mesmo utilizando cálculos de transferência de calor em regime estacionário através das equações já mostradas em materiais e métodos na aplicação das cargas térmicas para as simulações computacionais, os resultados obtidos foram próximos dos valores médios encontrados nas medições com pirômetro óptico, com um erro de aproximadamente 10°C.

Para a validação dos resultados, se verificaram a partir da planilha montada a partir das medições de temperatura, quais foram as quedas de temperatura e taxa de queda de temperatura para as painéis que estavam inicialmente a 900°C, destampadas e tampadas. A tabela 4.5 e 4.6 mostram os dados de corridas das painéis que foram tampadas e não tampadas para se comparar com os resultados obtidos nas simulações computacionais:

Tabela 4.5 - Valores de queda e taxa de queda de temperatura para as painéis sem tampa com temperatura inicial de aproximadamente 900°C.

Corrida	t0	tf	$\Delta t(\text{min})$	T0	Tf	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	Taxa de queda de temp.($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
126931	09:13	10:03	50	907	672	235	4,7
126933	10:51	11:30	39	910	712	198	5,67
126937	14:22	15:06	44	890	660	230	5,22
126954	08:37	09:10	33	890	718	172	5,21

Fonte: Autor.

t0 – Tempo inicial;

tf – Tempo final;

Δt – Variação de tempo (min)

T0 - Temperatura inicial;

Tf - Temperatura final;

ΔT – Queda de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Temp. – Temperatura.

Tabela 4.6 - Valores de queda e taxa de queda de temperatura para as painéis com tampa com temperatura inicial aproximadamente igual a 900°C.

Corrida	t0	tf	$\Delta t(\text{min})$	T0	Tf	$\Delta T(\text{C})$	Taxa de queda de temp. (C/min)	Obs.
126978	10:30	11:13	43	910	722	188	4,37	Demora ao tampar.
126982	11:16	11:55	39	910	720	190	4,87	Foi destampada antes do tempo.
127523	11:48	12:28	40	910	810	100	2,5	
127680	10:40	11:20	40	900	789	111	2,77	
127758	08:10	08:44	34	910	820	90	2,64	
130140	15:51	16:33	42	907	809	98	2,33	

Fonte: Autor.

t0 – Tempo inicial;

tf – Tempo final;

Δt – Variação de tempo (min)

T0 - Temperatura inicial;

Tf - Temperatura final;

ΔT – Queda de temperatura (C)

Fazendo uma comparação entre os valores obtidos nas simulações de resfriamento com valores reais das temperaturas visualizamos que para um tempo de 40 minutos a face quente da panela sem tampa, em sua região de linha de escória, apresentou uma queda de temperatura de 188°C na simulação computacional vista na figura 4.9(a), enquanto que as painéis na planta obtiveram uma queda de temperatura que variou entre 172°C e 235°C como exemplificado na tabela 4.4. Assim o valor encontrado pela solução computacional ficou dentro da faixa de temperaturas reais. Pode-se afirmar que resultados mais precisos podiam ser encontrados se houvesse uma maior precisão no posicionamento tanto da medição na prática com o pirômetro, quanto no resultado da simulação computacional, já que ambos são resultados pontuais. Agora levando em consideração a taxa de queda de temperatura, a simulação computacional apresentou um valor de 4,7°C/min, e a média dos valores reais de taxa foi de 4,46°C/min como já mostrado na tabela 4.3.

Na face quente da panela com tampa, se observou conforme figura 4.9(b), a região da linha de escória sofreu uma queda de temperatura de aproximadamente 129 °C, enquanto que as panelas na aciaria sofreram uma queda que variou entre 90°C e 188°C. Como observado na tabela 4.5, as corridas 126978 e 126982 apresentaram erros operacionais que levaram a uma maior diminuição da temperatura com o tempo. Assim, a queda de temperatura resultante da simulação ficou dentro da faixa de valores encontrados na prática, porém a taxa de queda de temperatura apresentou um valor de 3,2°C/min, enquanto que para as medições realizadas a média foi de 2,45°C/min de acordo com a tabela 4.3 e 2,56°C/min de acordo com a tabela 4.5.

A mesma observação feita para as panelas sem tampa pode se feita para as panelas que foram tampadas. Aqui vale destacar que a diferença existente nos valores de taxa de queda de temperatura também é influenciada por correntes convectivas dentro da panela, isto é, as panelas que são tampadas tendem a homogeneizar a temperatura da face quente, fato este que não foi simulado computacionalmente.

5 CONCLUSÕES

Os testes realizados com as panelas trabalhando utilizando e não utilizando tampa e usando a abobada do forno-panela mostraram as diferenças de taxas de quedas de temperatura nas condições distintas. O uso da tampa faz com que a taxa de queda de temperatura diminua em média 47% nas perdas até a etapa de adição de areia de vedação e em média 45% até antes do vazamento. Entretanto na aciaria em estudo a utilização da ponte rolante para tampar a panela é um processo lento, demorando em média 10 minutos para efetuar processo. Para que se obtivesse bons resultados foi necessário então mudanças operacionais no intuito de otimizar a logística das tampas e aumentar o período em que as panelas permanecessem tampadas. Assim, foi proposta a instalação de uma talha elétrica próxima ao forno-panela com o intuito de se tampar as panelas sem o uso da ponte rolante. O uso da abobada ajuda na diminuição da queda de temperatura no interior da panela, mas desde que a panela tenha sido previamente tampada, e não se deve esquecer que é necessário haver o fechamento do damper e que este deve ser automatizado. Com o uso da tampa e abobada a taxa de queda de temperatura diminui em média 55%. O uso conjunto das duas práticas só se mostra eficiente se não houver demora nos procedimentos e se o FEA estiver operando com carga sólida.

Concluiu-se que é de primordial importância a utilização da tampa a maior quantidade de tempo possível, pois os resultados dos testes mostraram que todas as panelas destampadas chegaram com temperaturas significativamente inferiores a ideal e aquelas que demoraram a ser tampadas obtiveram também grandes perdas de temperatura. Com relação aos refratários da panela, para que não haja choque térmico se verificou que de acordo com normas internas da empresa que a temperatura ideal dos refratários de trabalho antes do vazamento deve ficar em torno de 800°C.

A queda de temperatura do aço líquido existente no período entre o vazamento e a chegada da panela no forno-panela é influenciada pela temperatura interna da panela antes do vazamento, sendo as duas inversamente proporcionais. Conseqüentemente a queda de temperatura do aço líquido influencia na energia elétrica consumida no forno-panela sendo também inversamente proporcionais.

Os resultados das simulações computacionais foram condizentes e aproximados dos dados colhidos na planta, e mostraram o perfil de temperatura esperado com ou sem a utilização da tampa.

Porém os resultados com a utilização da tampa não foram tão aproximados. Os resultados poderiam ser mais exatos se fossem considerado as correntes convectivas que tender a homogeneizar a temperatura da panela quando tampada, o que poderia ser melhor comprovado através de simulação fluidodinâmica.

Concluiu-se que com a colocação de materiais isolantes térmicos se evita consideravelmente a perda de calor pelos refratários, o que foi evidenciado pelos valores e distribuição de fluxo de calor pela carcaça metálica, mantendo assim uma maior energia térmica dentro da panela por mais tempo. Vale ressaltar também que através das medições de temperatura e simulações se descobriu que as carcaças das panelas estavam trabalhando acima do limite de temperatura tolerado e que a região com maior aquecimento se encontra abaixo do segundo anel de reforço. Demonstrou-se também que as solicitações termo-mecânicas são a principal causa da deformação permanente das chapas nesta região, e que com a instalação de isolante térmico este efeito seria atenuado, evitando a futura inutilização das panelas.

Portanto o trabalho foi de grande valia, pois conseguiu quantificar as perdas térmicas e conscientizar os envolvidos a importância deste controle no processo produtivo. Podemos concluir que os esforços para a manutenção de uma maior temperatura no interior das panelas ajudam na diminuição das perdas caloríficas do aço líquido e conseqüentemente no consumo de energia elétrica consumida no forno-panela, assim como também aumenta a vida útil dos refratários das panelas sujeitas a choques térmicos e irradiações dos arcos voltaicos durante a metalurgia secundária.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Mudar a geometria da tampa das painéis e estudar os efeitos da mudança;
- Fazer o levantamento da curva de aquecimento das painéis com a utilização de termopares instalados nos refratários;
- Dar continuidade no estudo das perdas térmicas medindo a influência dos tijolos isolantes térmicos; Ampliar o estudo do comportamento térmico das painéis até o lingotamento contínuo a fim de se aumentar o acerto de temperatura do aço líquido para o distribuidor;
- Aprimorar as simulações computacionais realizadas neste trabalho, levando em consideração as correntes convectivas no aço líquido para o caso de painéis cheios e as correntes convectivas do ar no interior das painéis vazias;
- Realizar a automatização no fechamento do dampers do exaustor da abóbada do forno-painéis.

7 REFERÊNCIAS

- [1] Site do Instituto Aço Brasil. Disponível em:
<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/instituto/marca.asp> - acessado em:
05/07/2013 às 10h00min.
- [2] RIZZO, M.S. **Introdução aos Processos Siderúrgicos**, São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p.18, 71, 89, 95-96, 99, 107, 111, 2005.
- [3] SILVA, A.L.V da C. **Aços e Ligas Especiais**, São Paulo, Editora Blücher, 3ed .
revista, p. 491-492, 507, 2010.
- [4] MONTEIRO, V.A. **Curso - Manutenção Mecânica Aplicada ao FEA**, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2009.
- [5] 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.
- [6] JOHN, A.L. **Melhorias no Desempenho dos Injetores Supersônicos em Operação em um Forno Elétrico a Arco**. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- [7] Siderúrgica Norte Brasil S.A. **Material de treinamento técnico - Treinamento de Aciaria Elétrica**, 2012.
- [8] RIZZO, E.M.S. **Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços**, São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 18, 21-22, 25, 2006.
- [9] BRUCH, R. **Estudo das Perdas Térmicas de Panelas entre o Vazamento no Forno Elétrico à Arco e o Transporte para o Forno-Panela**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia) Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da UFRGS, Porto Alegre, 2012.
- [10] MENDONÇA, A. de F.G. **Relatório de iniciação à pesquisa**, Escola de Engenharia da UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, 2004.
- [11] SESHADRI, V.; TAVARES, R.P.; SILVA, C.A.; SILVA, I.A. **Fenômenos de Transporte: Fundamentos e aplicações nas Engenharias Metalúrgica e de Materiais**, São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 17-18, 328-333, 417-452 e 467-481, 2010.
- [12] INCROPERA, F.P., DE WITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, Rio de Janeiro, LTC, 5ed, p. 8-9, 11, 60 e 70-73, 2003.
- [13] GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**, São Paulo, Editora da Unicamp, 2ed, p. 121-122, 2007.

- [14] SUSAKI, K.; VIANA, J.F.; BARBOSA, W.F. **Controle de Temperatura nos Processos de Refino Primário, Refino Secundário e Lingotamento Contínuo de Aços: Uma Abordagem Prática**, Curso integrante do 43º Seminário de Aciaria – Internacional, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, Belo Horizonte, p. 36, 2012.
- [15] OMOTANI, M. J.; et al. **Ladle Temperature Control During Continuous Casting**. Iron & Steelmaker, p.29-35, October 1983.
- [16] TETRAULT, C.; et al. **CFD Analysis of Thermal Behavior of Refractory in Steel Ladle Cycling**. AISTech 2004 Proceedings, Volume I, 2004.
- [17] MUNDIM, M.A.; et al. **Análise Térmica da Panela de Aço**. In: Anais do 40º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 1985.
- [18] LOPES, H.L.P. **Modelo para previsão da condição térmica de painéis de aciaria**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, Belo Horizonte, 2007.
- [19] BEJAN, A. **Transferência de Calor**. Ed. Edgar Blücher, São Paulo, p. 540, 1996.
- [20] TOMAZIN, E.; UPTON, E.A. **The Effect of Ladle Refractories and Practices on Steel Temperature Control**. Iron & Steelmaker, p. 28-34, 1986.
- [21] RAJÃO, C.T. **Perdas Térmicas em Painéis de Aço** – Resfriamento do Metal. In: Seminário COAÇO – COREF, Rio de Janeiro, 1989.
- [22] HUTTON, D. **Fundamentals of Finite Element Analysis**, Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [23] NORRIE, D.H.; VRIES, G. de, **The Finite Element Method, Fundamentals and Applications**, New York: Academic Press, 1973.
- [24] SHIGUE. Apostila sobre – **Método dos Elementos Finitos**, pag. 2-3, 2008.
- [25] STOLARSKI, T.; NAKASONE, Y.; YOSHIMOTO, S. **ENGINEERING ANALYSIS WITH ANSYS SOFTWARE**, Oxford, Elsevier Butterworth-Heinemann, 1ed., p. 37-38, 2006.
- [26] Site da Homis Ltda. Disponível em: <http://www.homis.com.br> - acessado em 25/06/2012 às 11h00min.
- [27] Sistema de Gestão de Processos de Produção da SINOBRAS. Site interno da empresa. Disponível em: <http://www.GPP.SINOBRAS.com.br>. Acessado em 26/01/2013 às 08h20min.
- [28] GUPTA, N.; CHANDRA,S. **Temperature prediction for controlling casting superheat temperature**. ISIJ International, Vol. 44, p.1517-1526, 2004.

- [29] FREDMAN, T.P. **Heat Transfer in Steelmaking Ladle Refractories and Steel Temperature**. Scandinavian Journal of Metallurgy, Volume 29, p. 232-258, 2000.
- [30] MINION, R.L.; LECKIE, C.F. **Steel temperature control in the ladle in a high productivity BOF shop**. Proceeding of 69th Steelmaking Conference, AIME, Washington, 1986.
- [31] ANDRADE, H.L. et al. **O sistema de tampa de panela articulada da Stelco – Uma tecnologia de alta eficiência energética**. Anais do 31^o Seminário de fusão, refino e solidificação dos metais, Vitória, 2000.
- [32] Site da Unifrax Brasil Ltda. Disponível em:
<http://www.unifrax.com.br/pdf/Silplate%201308.pdf>. Acessado em 11/01/2012 às 19h51min.
- [33] Site da Ibar. Disponível em:
<http://www.ibar.com.br/produtos/conformados/tijolos-isolantes.html>. Acessado em 07/12/2012 às 14h00min.
- [34] ÁVILA, T.A. Material de treinamento técnico – **Refratários para Forno-Panela**, Magnesita Refratários S.A.. 2010.
- [35] Siderúrgica Norte Brasil S.A.. **Padrão de Fabricação de Aço FP – SI 1020 – A (SI-PF-340-000-0 Aço SI – 1020)**, 2009.