Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

ANÁLISE DO FLUXO TÉRMICO NA SOLA DE PANELAS DE ACIARIA

Autor: Irllaya Nayara Lima Gabriel

Orientador: Prof. Ph.D. Carlos Antônio da Silva (DEMET/UFOP)

Ouro Preto/MG
Novembro de 2022

Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Análise do fluxo térmico na sola de panelas de aciaria

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico

Ouro Preto/MG
Novembro de 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G118a Gabriel, Irllaya Nayara Lima.
Análise do fluxo térmico na sola de panelas de aciaria. [manuscrito] / Irllaya Nayara Lima Gabriel. - 2022.
47 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio da Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Usinas metalúrgicas - Aciaria. 2. Engenharia metalúrgica - Sola de Panela. 3. Aço - Tratamento térmico - Ciclo Térmico. 4. Aço - Tratamento térmico - Perda Térmica. I. Silva, Carlos Antônio da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 669.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALURGICA E DE MATERIAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Irllaya Nayara Lima Gabriel

Análise do fluxo térmico na sola de panelas de aciaria

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Aprovada em 03 de novembro de 2022

Membros da banca

PhD - Carlos Antonio da Silva - Orientador (DEMET/EM Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc - Johne Jesus Mol Peixoto - (DEMET/EM Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc - Claudio Batista Vieira - (DEMET/EM Universidade Federal de Ouro Preto)

Carlos Antonio da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/11/2022

Documento assinado eletronicamente por **Carlos Antonio da Silva**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/11/2022, às 14:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0422504** e o código CRC **4C3C5ED2**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591561 - www.ufop.br

Análise do fluxo térmico na sola de panelas de aciaria

RESUMO

A compreensão e controle do ciclo térmico de uma panela é fundamental na aciaria. As principais perdas térmicas do aço contido na panela são devidas a: 1- condução de calor do banho metálico para o revestimento refratário da panela lateral e do fundo (sola); 2- convecção e radiação de calor da camada de escória para atmosfera. Após o basculamento do convertedor na panela de aço, o controle de temperatura e tempo de residência do aço na panela são itens críticos de controle, visando a melhor qualidade do processo e maior economia de energia. Este trabalho busca avaliar o fluxo térmico na sola da panela, bem como a acumulação de calor (entalpia) em diferentes pontos do ciclo da panela. A temperatura, espessura da camada de refratário, propriedades físico-químicas dos refratários, características de convecção e temperaturas iniciais dos processos foram parâmetros considerados no estudo. Partindo-se das medições de temperatura da carcaça e da face quente do refratário, realizadas em campo em conjunto com os dados dos fornecedores dos refratários e dados técnicos disponíveis na literatura determinou-se, por meio de um modelo matemático unidimensional, o fluxo térmico através das camadas de refratário, bem como o perfil de temperaturas em cada etapa de seu ciclo operacional possibilitando a estimativa do Índice de Encharque. Os dados sugerem que a operação normal é alcançada quando o Índice de Encharque alcança o valor médio de 1000 MJ/m^2. Este Índice de Encharque, para o caso das panelas analisadas, não é alcançado ao final do primeiro ciclo de aquecimento, mas se aproxima do valor médio quando a panela retorna do LC. O modelo proposto pode ser melhorado e usado como ferramenta na otimização de parâmetros operacionais.

Palavras chave: Aciaria, Panela, Perda Térmica, Sola de Panela, Ciclo Térmico.

SUMÁRIO

RESUMO V

1 INTRODUÇÃO 1

2 OBJETIVOS 2

2.1 Objetivo Geral 2

2.2 Objetivos Específicos 2

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3

3.1 O Processo Siderúrgico 3

3.2 Processo de Obtenção do Aço Líquido 3

3.2.1 Refino primário 4

3.2.2 Refino secundário 5

3.2.3 Lingotamento 5

3.3 Ciclo da Panela de Aço de Aciaria 5

3.4 Perdas Térmicas na Panela 8

3.4.1 Perdas térmicas pela escória 8

3.4.2 Perdas térmicas para os refratários 8

3.5 Materiais Refratários 10

3.6 Índice de Encharque 12

4 MATERIAIS E MÉTODOS 14

4.1 Medição Termográfica 14

4.2 Refratários da Panela 16

4.3 Tratamento das Imagens 16

4.4 Fluxo Térmico da Panela 18

4.5 Acumulação de calor no refratário - Encharque 22

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 24

5.1 Resultado das Medições Termográficas 24

5.2 Índice de Encharque das panelas 32

6 CONCLUSÕES 36

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 37

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 38

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Etapas do processo de produção do aço em uma aciaria LD 4
Figura 3-2: Configuração esquemática de uma panela de aço 6
Figura 3-3: Ciclo de panela em uma aciaria 7
Figura 3-4: Comparação do perfil de temperatura do revestimento refratário para uma panela com um ciclo rápido e uma panela nova aquecida 12
Figura 3-5: Comportamento do índice de encharque das panelas durante o resfriamento após o final do lingotamento contínuo seguido de aquecimentos de 1, 1,5 e 2 horas 13
Figura 4-1: Câmera termográfica utilizada para medição de temperatura de sola e carcaça de panela de aciaria 14
Figura 4-2: Imagem termográfica da válvula de vazamento de uma panela de aciaria na (a) carcaça após aquecedor e (b) na sola após aquecedor 15
Figura 4-3: Imagem termográfica da válvula de vazamento de uma panela de aciaria na (a) carcaça após lingotamento e (b) na sola após lingotamento 15
Figura 4-4: Corte esquemático da sola da panela de aço 16
Figura 4-5: Distribuição dos refratários na sola da panela 17
Figura 4-6: Tratamento da imagem de medição da sola da panela de aço 18Cor
Figura 4-7: Tratamento da imagem de medição da carcaça da panela de aço 18
Figura 4-8: Esquema de condução de calor no material 19
Figura 4-9: Composição refratária da sola da panela 20
Figura 4-10: Esquema do fluxo de calor entre camadas 21
Figura 4-11: Perfil linear (assumido) de uma camada de refratário 23
Figura 5-1: Fluxo térmico da panela 30 após o lingotamento da 1ª até a 10ª corrida 27
Figura 5-2: Fluxo térmico da panela 35 após lingotamento da 1ª até a 9ª corrida 28
Figura 5-3: Fluxo térmico da panela 41 após lingotamento da 1ª até a 10ª corrida 28
Figura 5-4: Fluxo térmico da panela 47 após lingotamento da 1ª até a 10ª corrida 29
Figura 5-5: Perfil térmico da panela 30 após aquecedor na 01 corrida 29
Figura 5-6: Perfil térmico da panela 30 após aquecedor na 01 corrida segundo modelo simulador da área 30
Figura 5-7: Perfil térmico da panela 47 após lingotamento na 07 corrida 31

Figura 5-8: Perfil térmico da panela 47 após lingotamento na 07 corrida segundo modelo simulador da área.....32
Figura 5-9: Entalpia (MJ/m^2) dos refratários da panela 30 33
Figura 5-10: Entalpia (MJ/m^2) dos refratários da panela 35 34
Figura 5-11: Entalpia (MJ/m^2) dos refratários da panela 41 34
Figura 5-12: Entalpia (MJ/m^2) dos refratários da panela 47 35

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Propriedades termofísicas de materiais refratários e do aço líquido _____ 9
Tabela 4-1: Propriedades dos refratários das panelas de aço em estudo _____ 20
Tabela 5-1: Levantamento das temperaturas das panelas 30, 35, 41 e 47 durante ciclo _____ 25
Tabela 5-2: Levantamento das temperaturas das panelas 30, 35, 41 e 47 durante ciclo _____ 27
Tabela 5-3: Temperatura média dos refratários da panela 30 após a primeira corrida _____ 30
Tabela 5-4: Temperatura média dos refratários da panela 47 após a 07 corrida _____ 31
Tabela 5-5: Propriedades termoquímicos dos refratários _____33

1 INTRODUÇÃO

O mundo em constante evolução busca produtos de qualidade cada vez melhores atrelados a produções mais econômicas e limpas e isso também se faz presente na siderurgia. Empresas buscam otimizar seus processos realizando melhorias em diversas áreas afim de se manterem competitivas no mercado, entregando produtos da mais alta qualidade pelo melhor custo. Para tanto, um fator fundamental é o controle da temperatura do aço e as perdas térmicas que o mesmo sofrerá durante seu ciclo de fabricação, logo, é possível entender o porquê o controle da temperatura do aço líquido é de suma importância para atingir os objetivos de aumento de competitividade focando na otimização dos processos.

Duarte (2014, p. 298), ao descrever as principais perdas térmicas do aço na panela, afirma:

> As principais perdas térmicas do aço contido na panela são devidas a: 1- acumulação ou armazenamento de calor no revestimento refratário; 2- condução de calor do banho metálico para o revestimento refratário da panela lateral e do fundo (sola); 3- convecção e radiação de calor da camada de escória para atmosfera.

Segundo Lopes, (2007, p.01), "As perdas térmicas através do refratário são influenciadas por suas propriedades físicas e por sua dimensão, além do seu perfil de temperaturas momentos antes do vazamento. Este perfil de temperaturas é decorrente de todo o histórico da panela até o vazamento".

Neste trabalho, será realizado um estudo das perdas térmicas para a sola da panela de aço de aciaria a partir do entendimento do fluxo térmico das panelas com base na coleta de dados na área, considerando panelas com até 10 corridas de ciclo de vida bem como o histórico do refratário durante o mesmo período utilizando-se de equações de transferência de calor pelas solas das panelas, identificando também a taxa de acumulação de calor nos refratários da panela, entre a estação de reaquecimento e o final de lingotamento. Os resultados a serem apresentados no trabalho serão úteis para melhoria do processo podendo ser o caminho para novos processos de controle térmico, ajudando no entendimento de atuais problemas como as não aberturas e quebra de sequência da área.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é mensurar e compreender o fluxo térmico da sola até a carcaça da panela de aciaria e determinar a entalpia do revestimento.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema que será sempre apresentada em um formato comparativo junto aos resultados e discussão;
- Identificar as propriedades térmicas dos materiais empregados na construção da sola da panela;
- Determinar o fluxo térmico através da sola da panela;
- Determinar a taxa de acumulação de calor nos refratários da panela, entre a estação de reaquecimento e o final de lingotamento;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A obtenção do ferro metálico veio a ocorrer quando, no período neolítico (7000 a.C. até 2500 a.C.), o carvão usado nas fogueiras protetoras das cavernas habitacionais reduziu o solo de minério de ferro a ferro primário, que, posteriormente, foi elaborado e conformado. Por ser abundante e suas ligas possuírem propriedades adaptáveis a quase todas as condições requeridas, logo o ferro tornou o metal mais empregado apresentando desde então, processos de produção de aço em constante evolução a fim de produzir os melhores materiais com a melhor qualidade e menor custo (MACHADO, SOBRINHO e ARRIVABENE, 2003).

O processo de fabricação do aço líquido inicia-se com a etapa de redução nos altos-fornos, produzindo o ferro-gusa. Este por sua vez abastece a aciaria onde receberá tratamentos físico-químicos específicos para cada tipo de aço desejado, até que se tenha a composição e temperatura correta para a etapa final, o vazamento nos distribuidores do lingotamento.

A panela de aço recebe o aço logo após o seu tratamento no refino primário. Neste primeiro momento, a panela recebe o aço e, juntamente, algumas primeiras adições para tratamento do banho. Ali então começa o tratamento que terá sequência no refino secundário até que a mesma chegue ao lingotamento. Portanto, para que o processo seja bem realizado é importante o conhecimento e entendimento do comportamento térmico do aço dentro da panela e as perdas térmicas sofridas durante o processo de tratamento.

3.1 O Processo Siderúrgico

Atualmente as usinas siderúrgicas atuais podem ser divididas em dois grandes grupos: usinas integradas e usinas semi-integradas. Usina integrada é aquela cujo aço é obtido a partir de ferro primário, que é transformado em ferro na própria usina pelos altos-fornos. O ferro-gusa produzido nos altos-fornos é transformado em aço através da operação de conversão. Já na usina semi-integrada, o aço é obtido a partir de ferro secundário, isto é, a matéria-prima é sucata de aço, não havendo necessidade da etapa de redução do minério de ferro (MOURÃO, 2007).

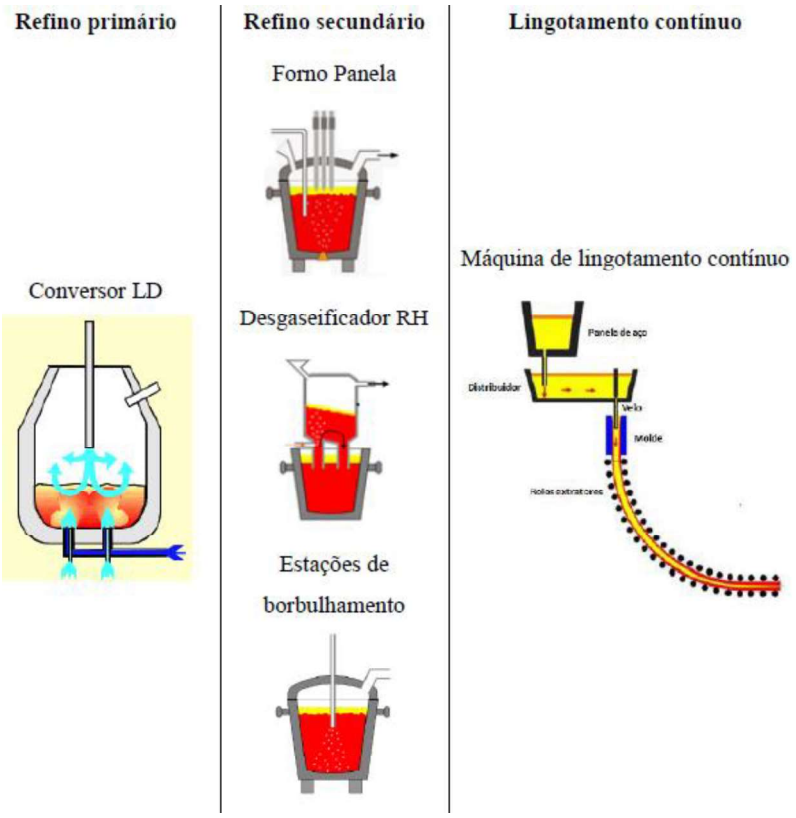
3.2 Processo de Obtenção do Aço Líquido

Em 1856, Henry Bessemer além de inventar o conceito de conversão do gusa em aço usando oxigênio do ar, também concebeu o processo de lingotamento contínuo do aço (MOURÃO, YOKOJI e MALYNOWSKYI, 2007).

O ferro-gusa é gerado no alto-forno após um processo de fusão redutora de minérios de ferro em presença de carvão vegetal ou coque, os quais sofrem transformações devido ao contato com gases provenientes da combustão do carbono com o oxigênio soprado pelas ventaneiras a temperaturas altíssimas.

Na aciaria em estudo, a rota de fabricação do aço compreende Alto-forno, Conversor a Oxigênio, Refino Secundário e Lingotamento, Figura 3-1.

Figura 3-1: Etapas do processo de produção do aço em uma aciaria LD



Fonte: (CAVALCANTI, 2019)

3.2.1 Refino primário

No refino primário, inicialmente o convertedor é carregado com a sucata sólida (sucatas de aço e ferro e gusa líquido) e depois levado à posição vertical para o assentamento de carga. Em seguida, é novamente inclinado d iniciado o carregamento do gusa líquido. Depois do carregamento, o conversor é novamente colocado na posição vertical, a lança é baixada, injetando-se o oxigênio a alta velocidade, e o sopro é iniciado e as adições de cal e fundentes são realizadas. Após o sopro de oxigênio, o conversor é basculado para a posição horizontal

para a coleta de amostras para análise. Com o término do processo, o aço é vazado em uma panela, através do bico do conversor para continuidade do processo de tratamento do aço (MOURÃO, YOKOJI e MALYNOWSKYI, 2007).

3.2.2 Refino secundário

Para Mourão, Yokoji e Malynowskyi (2007, p.189), "Refino secundário significa eliminação de impurezas, no caso da fabricação de aços, as impurezas principais são o oxigênio (O), o enxofre (S), o nitrogênio (N), o hidrogênio (H) e o fósforo (P)". Nesta etapa de tratamento, além dos padrões químicos é também observada a temperatura mínima para a etapa do lingotamento. O tipo de aço a ser produzido ajuda na escolha do equipamento mais indicado para tratamento daquele aço. Como equipamentos pode-se citar o forno panela, o desgaseificador RH e estação de borbulhamento de gases inertes. Após a etapa de refino secundário o aço segue para o lingotamento.

3.2.3 Lingotamento

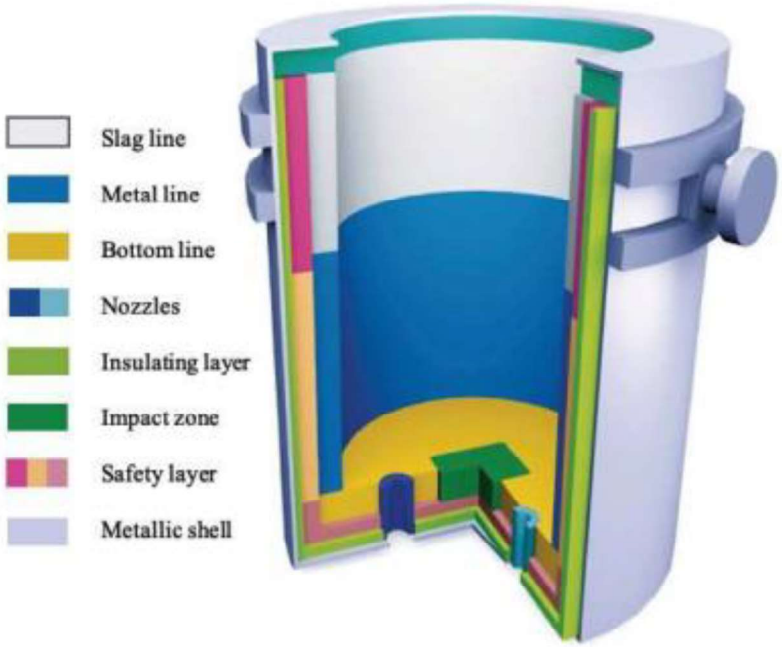
O último estágio em aciaria onde se trabalha com o metal ainda no estado líquido é processo de lingotamento contínuo do aço e suas ligas. No lingotamento, o aço se solidifica conforme desejável, de tal maneira que possa ser utilizado nas etapas seguintes da cadeia produtiva (MOURÃO, YOKOJI e MALYNOWSKYI, 2007).

O aço chega do refino secundário com a composição química e temperatura de vazamento desejadas, assim, o mesmo é transferido pelo fundo da panela até um distribuidor, de onde é vazado até os moldes de lingotamento. Esta etapa consiste em solidificar o aço líquido de forma contínua em um molde de forma mais próxima do produto final.

3.3 Ciclo da Panela de Aço de Aciaria

Mourão, Yokoji e Malynowskyi (2007, p.190) explicam que "A panela é fabricada de aço, com revestimento interno de material refratário, o que lhe permite suportar as altas temperaturas do aço líquido (de 1550ºC a 1650ºC na maior parte das vezes)". Em resumo, as panelas são compostas de uma carcaça metálica cilíndrica coberta por uma camada isolante, tijolos refratários, placas, mantas ou ainda papel isolante (ANDRADE, 2009). Esquematicamente, a panela é composta da seguinte forma, Figura 3-2:

Figura 3-2: Configuração esquemática de uma panela de aço

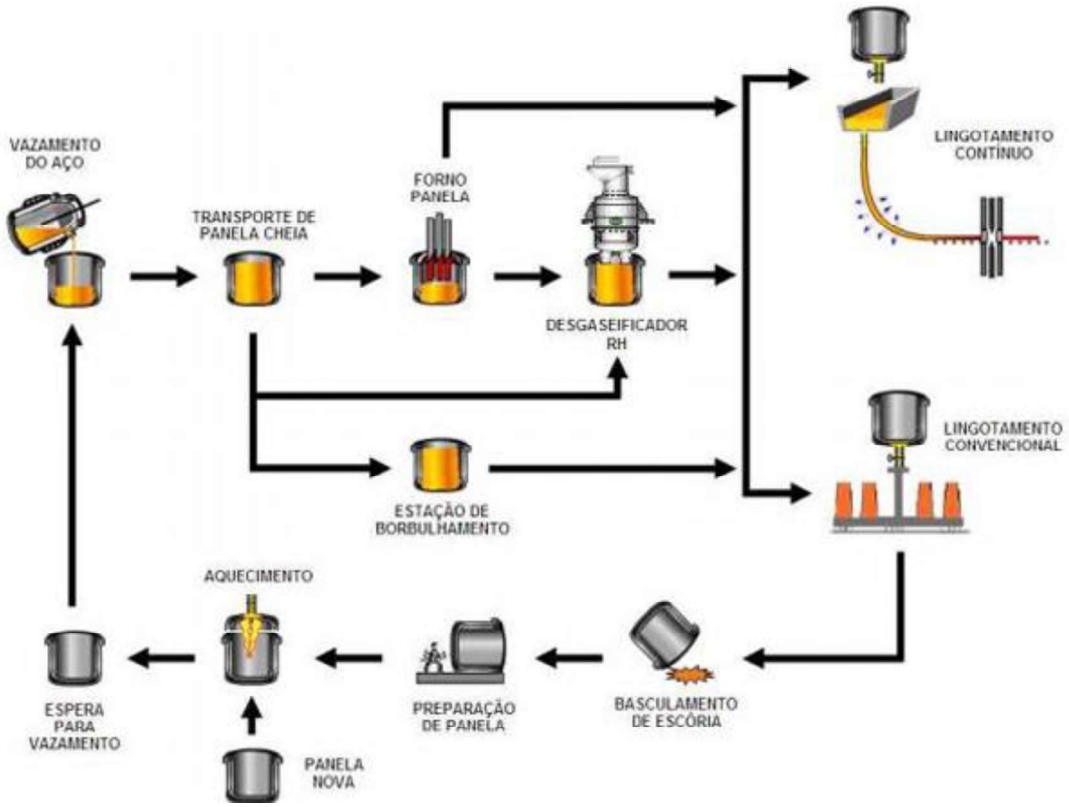


Fonte: (SANTOS, M.F., *et al.,* 2019)

A panela recebe o aço após o processamento do aço no equipamento de fabricação do aço bruto. Além de transportar o aço líquido para o equipamento seguinte, no roteiro de processamento, a panela também é local de tratamento, onde ocorrem as primeiras reações das operações de refino secundário (MOURÃO, YOKOJI e MALYNOWSKYI, 2007). Logo, é de extrema importância o controle de temperatura do aço ao longo do tempo que o mesmo reside na panela. Ao longo do processo da aciaria, a panela sofre perdas térmicas. Seu ciclo dentro da aciaria pode ser dividido em duas etapas (FERREIRA, 2000) e pode ser observado na Figura 3-3:

- Panela cheia – contém aço líquido. Compreende o momento onde a panela recebe o aço vazado do refino primário até o momento em que é vazada no distribuidor do lingotamento.
- Panela vazia – aguardando operação. Compreende o intervalo em que a panela, após o lingotamento, se encontra em manutenção, aquecimento, aguardando o vazamento da próxima corrida e durante transporte da panela sem aço.

Figura 3-3: Ciclo de panela em uma aciaria



Fonte: (FERREIRA, 2000)

O ciclo da panela inicia-se com uma panela nova, que ainda não teve contato com o aço líquido. Essa panela nova é encaminhada para o aquecimento, que varia em tempo e temperatura conforme a prática operacional da empresa. Após atingir os parâmetros pré estipulados de aquecimento, a panela é liberada dos aquecedores para o vazamento. O vazamento ocorre após o aço receber seu primeiro tratamento no convertedor através de lança de oxigênio e adição de ferro-ligas. Uma vez vazado, o aço entra em contato com as paredes e sola da panela, realizando uma troca de calor entre o fluido e os refratários. Após o vazamento, a panela segue para a etapa do refino secundário, onde o aço é finalizado com as adições das ligas específicas de cada produto também respeitando a particularidade do controle térmico. Finalizado o refino secundário, o aço é encaminhado para o lingotamento. No lingotamento a panela é posicionada nas torres para que a válvula se encaixe ao distribuidor e possibilite o vazamento nos moldes específicos.

Após o processo a panela vazia e com escória é basculada e encaminhada para a inspeção e/ou manutenção. Neste processo a panela é inspecionada, e quando necessário, realizada a troca de peças (válvula gaveta, plugue) e limpezas como limpeza de borda, por exemplo.

Quanto mais a panela aguarda na área tanto para manutenção quanto para o vazamento da próxima corrida, maior é a troca de calor gerada entre a panela e o ambiente.

3.4 Perdas Térmicas na Panela

Ter conhecimento e controle das perdas térmicas da panela de aço durante seu ciclo é de extrema importância para a otimização do processo. Segundo Santos (2018), para o problema de transferência de calor, tanto a propriedade de transporte de energia térmica e de difusão do calor, quanto as propriedades termodinâmicas de representação do equilíbrio térmico, são importantes. São elas: condutividade térmica, densidade e calor específico. Nas próximas seções, também é discutido brevemente sobre a emissividade dos materiais envolvidos nas análises, já que esse parâmetro apresenta grande importância para o problema térmico em alta temperatura. As perdas térmicas na panela podem ser divididas em (SUSAKI, 2012):

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

3.4.1 Perdas térmicas pela escória

A escória tem um importante papel de isolante térmico entre o aço e o ambiente durante o processo de tratamento do aço uma vez que a troca de calor com o meio é realizada através da radiação e convecção por conta da superfície exposta. Parâmetros como a composição e espessura da camada da escória, adoção de tampa e etapa do processo influenciam nas perdas térmicas do aço pelo topo da panela através da escória.

3.4.2 Perdas térmicas para os refratários

"O tipo de refratário utilizado em panelas de aciaria é um dos fatores primordiais sobre as perdas térmicas do aço visto que as suas propriedades determinam a passagem e armazenagem maior ou menor de calor em duas camadas" (FERREIRA, 2000, p. 17). Os elevados valores de calor específico e de densidade (Tabela 3-1) garantem aos materiais refratários um alto poder de retenção de calor, sendo parâmetro importante de avaliação no momento da escolha do material a ser empregado. Assim, o equilíbrio térmico entre as paredes refratárias e o aço líquido vazado nas panelas exige uma troca de calor muito

elevada. Esse calor é fornecido pelo aço às custas de reduções na temperatura do banho e depende fortemente da quantidade de energia já contida na panela no momento do vazamento. Omotani (*et al*., 1983) afirma que "Até 80% do total das perdas térmicas na panela é dirigido para o refratário e os demais 20% são perdidos através da camada de escória".

Tabela 3-1: Propriedades termofísicas de materiais refratários e do aço líquido

Material	Propriedade	Valor	Unidade
Aço líquido	Densidade	7080	kg/m^3
	Calor específico	754	J/kg·ºC
Refratário dolomítico	Densidade	2100	kg/m^3
	Condutividade térmica	1,05	W/m·ºC
	Calor específico	1005	J/kg·ºC
Aluminoso (50% Al_2O_3)	Densidade	2400	kg/m^3
	Condutividade térmica	1,26	W/m·ºC
	Calor específico	1005	J/kg·ºC
Alta alumina (>80% Al_2O_3)	Densidade	2900	kg/m^3
	Condutividade térmica	2,51	W/m·ºC
	Calor específico	1047	J/kg·ºC

Fonte: (OMOTANI, 1983)

As perdas térmicas para os refratários e carcaça acontecem por convecção. Esse calor migra para o interior dos refratários por condução em regime transiente (FERREIRA, 2000). A equação da condução unidimensional de calor em coordenadas cartesianas para o regime transitório, condutibilidade térmica constante e sem taxa de geração interna de calor é apresentada por BEJAN (1996, *apoud* FERREIRA, 2000) na equação:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Onde:

T = Temperatura (ºC)

x = Distância no eixo x (m)

α = Difusidade de calor (m^2/s)

A equação de condução de calor dependente do tempo contém uma grandeza α, que é a difusibilidade térmica, definida pela equação:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C}$$

Onde:

k = Condutibilidade térmica (W/m ºC)

ρ = Densidade (kg/m³)

C – Calor específico (J/kg ºC)

3.5 Materiais Refratários

Os refratários da panela são fundamentais para o processo de refino secundário tanto químico quanto termicamente, visto que suas características podem interferir significativamente produto (SANTOS, 2018). Materiais refratários de má qualidade ou mal empregados para o processo causam afastamento precoce de panelas devido vários possíveis problemas como região degradada, corrosão, desgaste prematuro e elevado, queda de material refratário, inclusões e outros. Para a aplicação correta do refratário é necessário entender o processo da empresa e os produtos que serão tratados nas panelas para realizar o melhor planejamento possível de revestimento.

Mourão, Yokoji e Malynowskyi (2007, p.190), ao descreverem os refratários de panela, informam:

> "Usualmente o revestimento refratário da panela é composto de tijolos ou concreto de alumina (Al_2O_3), magnésia (MgO), magnésia impregnada com o carbono (MgO-C) ou dolomita (MgO+CaO); estes óxidos são chamados óxidos estáveis. O refratário para revestimento de Panelas, nas quais serão realizadas as operações de refino secundário, deve apresentar um baixo teor de óxidos não-estáveis, como sílica (SiO_2), o óxido de ferro (FeO), o óxido de manganês (MnO) e o óxido de cromo (Cr_3O_4), que podem dificultar o refino pela contaminação do aço líquido com o oxigênio"

Como os processos de refino variam, há também outros tipos de refratários que podem ser utilizados como por exemplo refratários à base de sílica ou cromita.

Santos (2018) divide os revestimentos de panelas em camada permanentes e isolantes e camada de trabalho. A camada permanente, também chamada de camada de segurança, está localizada entre a camada de trabalho e a carcaça. Sua principal função é isolar as partes metálicas das temperaturas elevadas de processamento do aço no interior da panela. Além disso, espera-se que ela proteja a carcaça caso haja infiltração de metal líquido ou escória,

nos casos em que há falhas na camada de trabalho. Sua espessura e material utilizado são definidos de acordo com as necessidades, que são típicas de cada aciaria.

Na camada permanente, temos:

- Zona densa: no geral, são refratários à base de alumina e sílica. A principal função é minimizar a infiltração do aço ou escória líquida caso essa camada seja atingida e quando possível reduzir a transferência de calos para a carcaça;
- Zona porosa: produto de baixíssima condutividade térmica e densidade (alta porosidade) é aplicado entre a carcaça metálica e a camada permanente. Funciona como uma barreira térmica evitando a propagação da onda de calor para as regiões externas (carcaça metálica).

A camada de trabalho é a região do revestimento da panela que está em contato direto com o aço líquido e a escória durante o refino secundário. Grande parte do desempenho da panela está relacionado e depende das características do material utilizado nessa camada. Diferentemente da camada permanente, em cada região da camada de trabalho é aplicado um material distinto para atender as diversas solicitações de corrosão e desgaste provocados pela reação com o aço líquido e a escória.

Na camada de trabalho, temos:

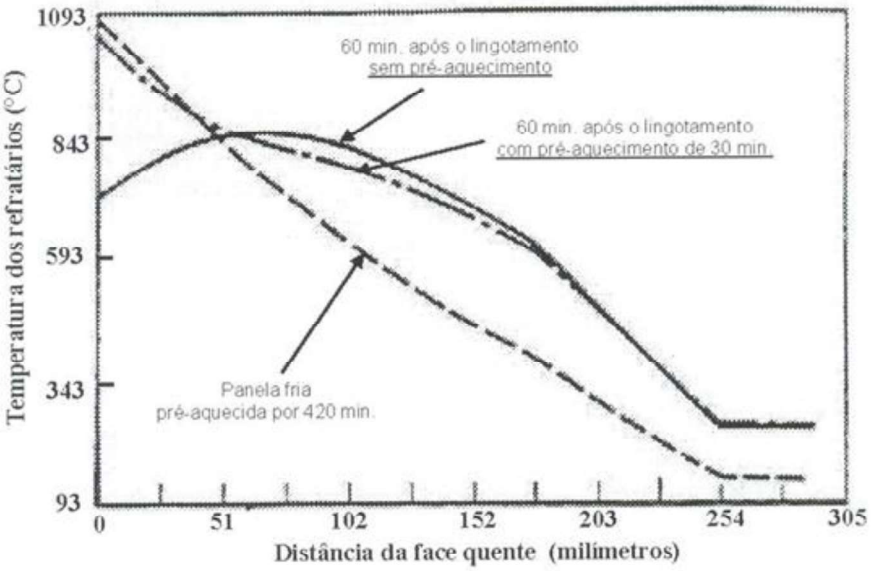
- Sola: na região inferior da panela, as solicitações mecânicas são as maiores possíveis, pois tais materiais devem suportar a pressão ferrostática da coluna de aço na capacidade máxima da panela. Os refratários utilizados para este fim apresentam composições bastante similares aos utilizados na linha de metal e a matriz cerâmica majoritária está relacionada aos tipos de alo produzido e as exigências de composição em cada aciaria;
- Linha de metal: é a região do revestimento de trabalho menos susceptível aos desgastes durante o ciclo da panela. Sua espessura normalmente não varia como ocorre nas outras regiões da panela que estão sob solicitações mais severas;
- Linha de escória: região que compreende a linha de refratários da camada de trabalho localizada no topo da panela, acima da linha de metal. São os materiais que estão submetidos a maior corrosão, pois durante o processamento do aço ficam em contato direto com a escória presente na superfície do aço líquido.

3.6 Índice de Encharque

As maiores perdas térmicas do aço líquido na panela ocorrem para o material refratário das panelas. Sendo assim, faz-se necessário trabalhar com um Índice de Encharque (IE) que represente, ainda que qualitativamente, o estado térmico das mesmas a fim de prever as taxas de resfriamento do aço líquido (FERREIRA, 2000).

Tomazin, *et al.,* (1986, *apud* FERREIRA, 2002) estudaram o efeito dos refratários de panela e das práticas no controle da temperatura do aço, utilizando um modelo bidimensional transiente. Na Figura 3-4 são mostrados três perfis de temperatura das camadas refratárias para três condições diferentes. Como pode ser observado, o perfil de temperaturas da panela fria pré-aquecida, mesmo apresentando uma temperatura da face quente bastante similar a uma panela no ciclo, possui menor energia armazenada nas demais camadas do revestimento refratário.

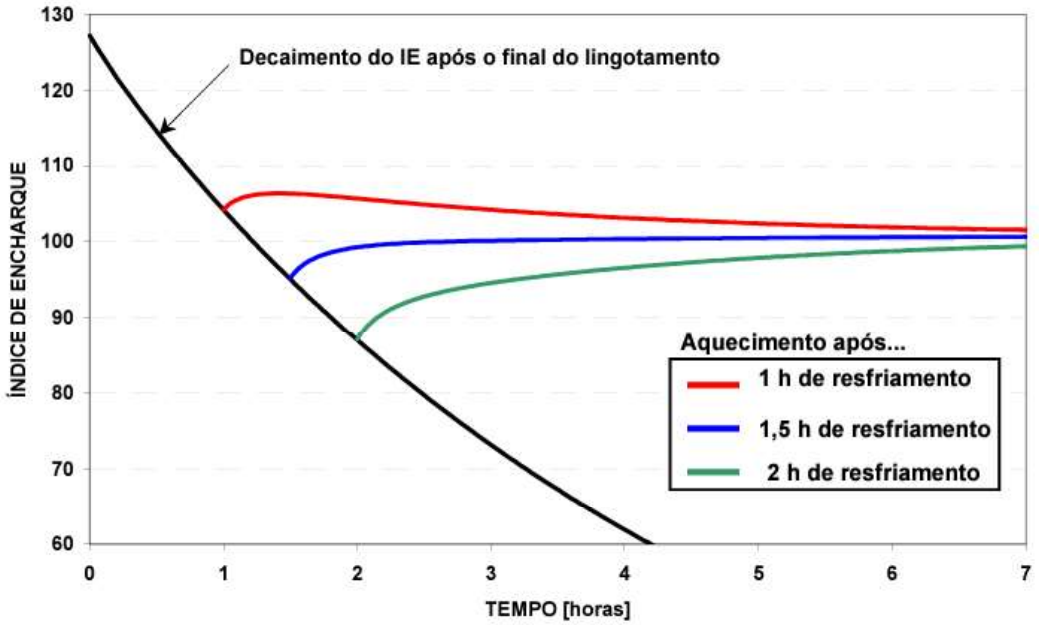
Figura 3-4: Comparação do perfil de temperatura do revestimento refratário para uma panela com um ciclo rápido e uma panela nova aquecida



Fonte: (FERREIRA, 2002)

É necessário definir um índice de encharque mínimo para o vazamento para o cálculo da relação entre o tempo de resfriamento e de aquecimento das panelas. Esse valor deve ser alto o suficiente para que as perdas térmicas sejam pequenas, principalmente nas etapas de desgaseificação e lingotamento contínuo, mas também não muito altas que não permitam o seu alcance na prática da aciaria (FERREIRA, 2000). A Figura 3-5 retrata alguns cenários.

Figura 3-5: Comportamento do índice de encharque das panelas durante o resfriamento após o final do lingotamento contínuo seguido de aquecimentos de 1, 1,5 e 2 horas



Fonte: (FERREIRA, 2002)

A compreensão da composição, função e ciclo de uma panela de aciaria e o entendimento e conhecimento dos refratários e suas propriedades termoquímicas são de suma importância para o dia a dia de uma usina siderúrgica. Uma vez conhecidos e identificados os parâmetros acima discutidos, é possível realizar determinar o fluxo térmico entre a sola e a carcaça da panela de aciaria bem como, também, determinar a taxa de acumulação de calor nos refratários da panela, entre a estação de reaquecimento e o final de lingotamento, que é objetivo deste trabalho. Os resultados aqui discutidos poderão apresentar oportunidades de melhoria, resultando em uma otimização futura do processo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho envolve o cálculo do comportamento térmico das panelas, a partir de dados obtidos através das medições termográficas das panelas da aciaria no momento em que a mesma se encontra vazia após o aquecimento e vazia após lingotamento. Uma vez identificado o fluxo térmico, foi calculado a taxa de acumulação de calor nos refratários da panela, entre a estação de reaquecimento e o final de lingotamento.

4.1 Medição Termográfica

Para compreender o comportamento térmico das panelas quando vazias bem como as perdas térmicas sofridas no processo, foi realizado a medição termográfica da sola da panela e da carcaça da mesma com foco entre o centro e a válvula de vazamento. As medições foram realizadas em panelas novas, da 1ª até a 10ª corrida, após aquecimento e após lingotamento. Esta restrição quanto à vida das panelas foi feita de modo a garantir que a espessura do refratário de trabalho permanecesse próxima daquela do projeto. Além deste ponto os cálculos precisam incorporar a alteração em espessura devido ao desgaste.

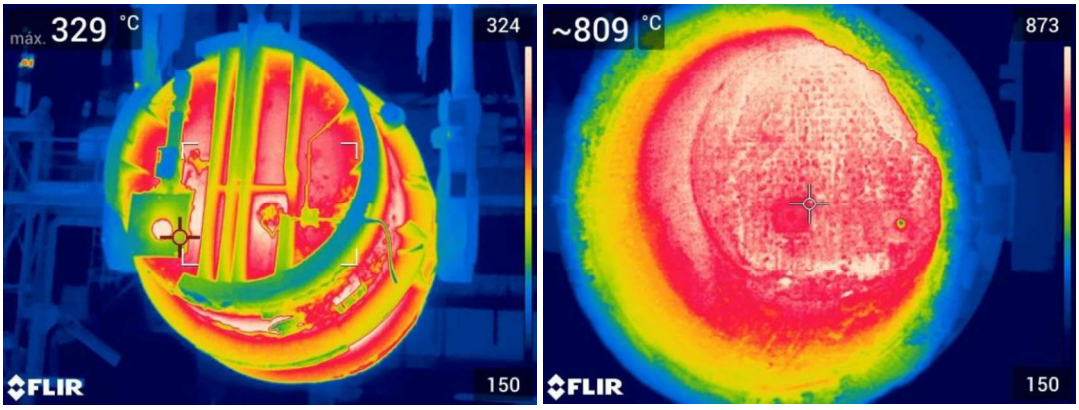
Para a medição foi utilizado uma câmera termográfica FLIR E75 modelo E75 1.2, com faixa de medições de -10ºC à 1300ºC. A Figura 4-1 mostra o modelo da câmera utilizada:

Figura 4-1: Câmera termográfica utilizada para medição de temperatura de sola e carcaça de panela de aciaria

Fonte: (TELEDYNE FLIR, 2022)

A câmera termográfica foi ajustada para medições na gama de 200ºC até 1300ºC, captando e informando as temperaturas do ponto central e do ponto mais quente da tela. Como ponto de referência, foi utilizado a válvula de vazamento das panelas e a sede do plugue, de forma a alinhar o centro da panela na imagem. Exemplos de imagens termográficas estão mostradas nas Figuras 4-2 e 4-3.

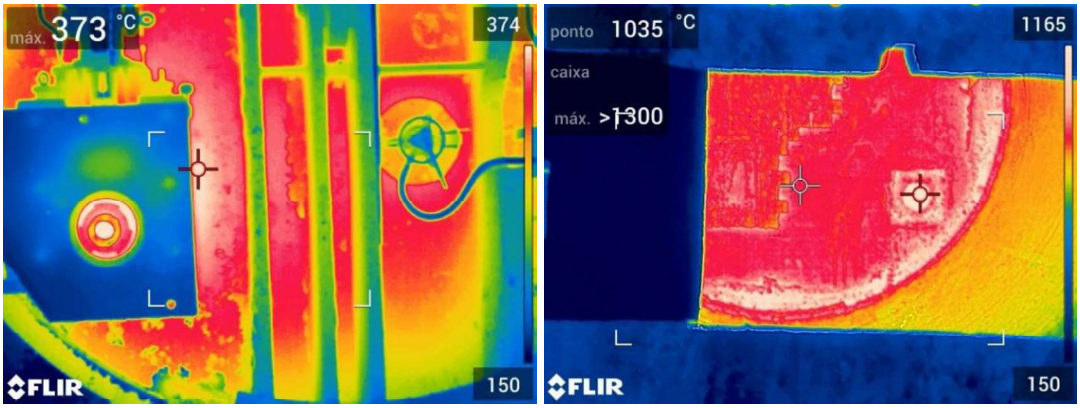
Figura 4-2: Imagem termográfica da válvula de vazamento de uma panela de aciaria na (a) carcaça após aquecedor e (b) na sola após aquecedor



(a) (b)

Fonte: Autor

Figura 4-3: Imagem termográfica da válvula de vazamento de uma panela de aciaria na (a) carcaça após lingotamento e (b) na sola após lingotamento



(a) (b)

Fonte: Autor

Todos os valores medidos foram repassados para uma planilha de Excel destacando o número da panela, qual a corrida e as devidas medições após aquecimento e lingotamento tanto da sola quanto da carcaça. Os dados se referem a 10 panelas, utilizadas durante os meses de junho, julho, agosto e setembro, totalizando aproximadamente 700 medições. Por

questões como erro no referencial de marcação, erro da escala da câmera termográfica e perda das medições de forma sequente de panelas, algumas medições foram desconsideradas.

4.2 Refratários da Panela

Neste trabalho foi desconsiderado as perdas térmicas pelas paredes laterais das panelas, considerando-se apenas as perdas térmicas através da sola da panela para os refratários, para o meio e da carcaça com o meio. A Figura 4-4 detalha o refratário de interesse ao presente trabalho.

Figura 4-4: Corte esquemático da sola da panela de aço

Fonte: Autor

Serão objetos de estudo, os seguintes materiais refratários junto a carcaça da panela:

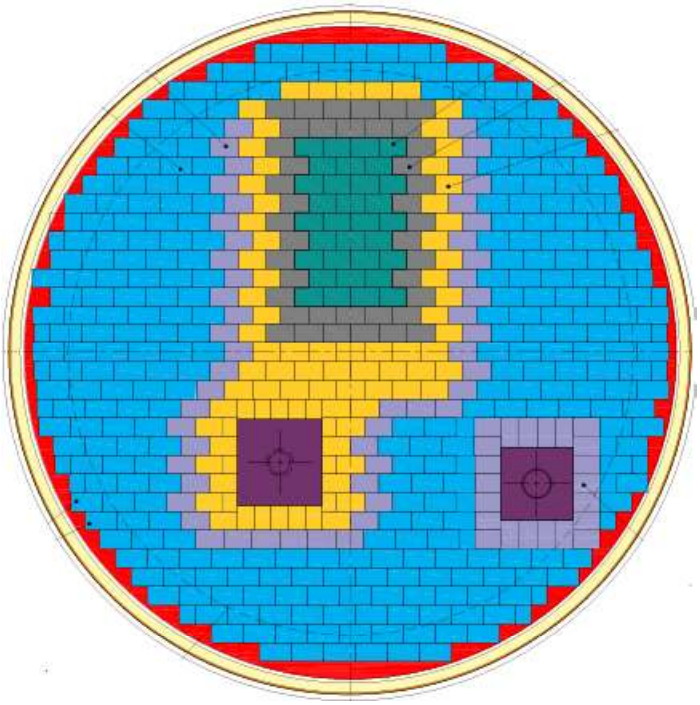
- GKOR-AMC-B3: Tijolo refratário de trabalho;
- STAMPMAG-FC: Massa refratária;
- ALUKOR-70: Tijolo refratário permanente – 1ª camada;
- SIAL-45-N: Tijolo refratário permanente – 2º camada;
- SILPLATE 1311 – Isolante térmico;
- Carcaça Metálica (Aço).

4.3 Tratamento das Imagens

O tratamento das imagens foi realizado por meio do programa da própria máquina, o Thermal Studio Starter. Cada imagem coletada foi aberta no programa e então foi realizada

uma conferência da medição com o lançamento. Para a conferência foi selecionada a região de aplicação do refratário GKOR-AMC-B3 na sola da panela (próximo a válvula gaveta), como pode ser observado na Figura 4-4 e na Figura 4-5:

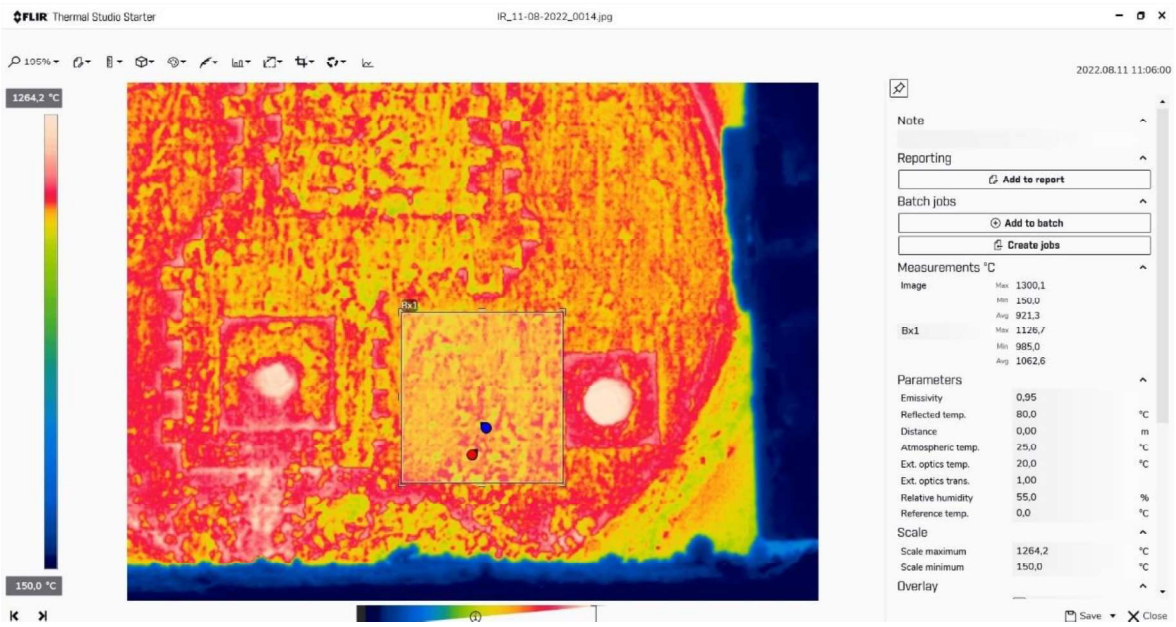
Figura 4-5: Distribuição dos refratários na sola da panela



Fonte: Autor

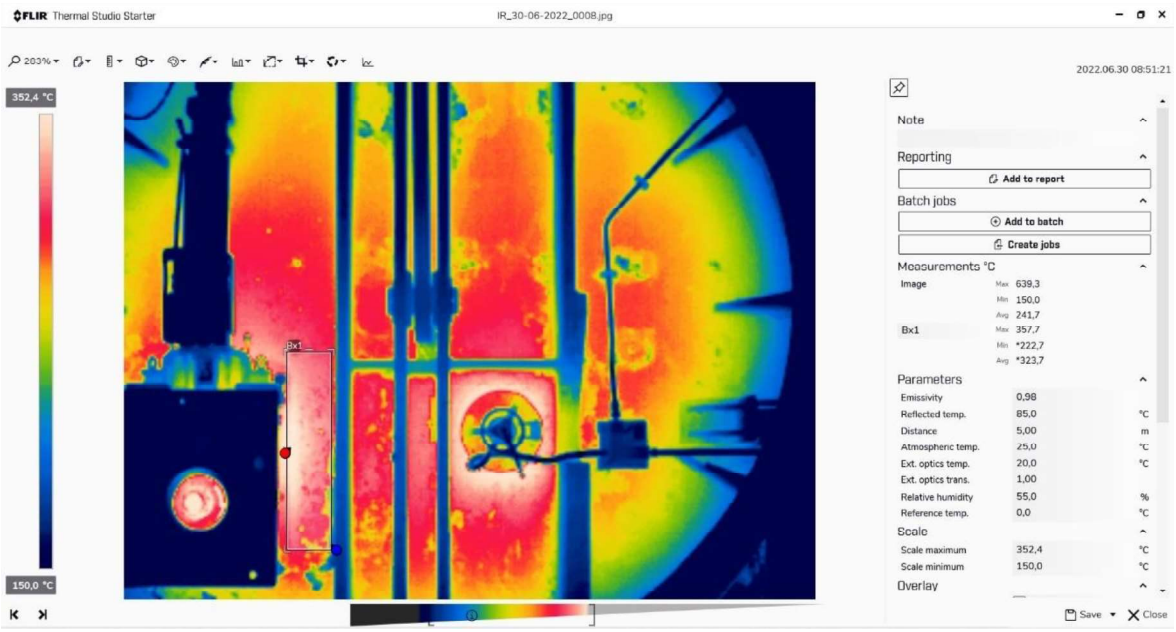
Uma vez definido o limite de medição, a conferência e tratamento das imagens foram realizadas tanto nas medições de sola quanto nas medições das carcaças, conforme Figura 4-6 e Figura 4-7. Para os cálculos, foi utilizado o valor de AVG, que é o valor médio de temperatura na região selecionada.

Figura 4-6: Tratamento da imagem de medição da sola da panela de aço



Fonte: Autor

Figura 4-7: Tratamento da imagem de medição da carcaça da panela de aço



Fonte: Autor

4.4 Fluxo Térmico da Panela

A panela em estudo possui quatro camadas, de refratários e massa refratária até então, chegar à carcaça. Existem quatro fatores que afetam a taxa com quem o calor é conduzido dentro de um material. São elas, Figura 4-8:

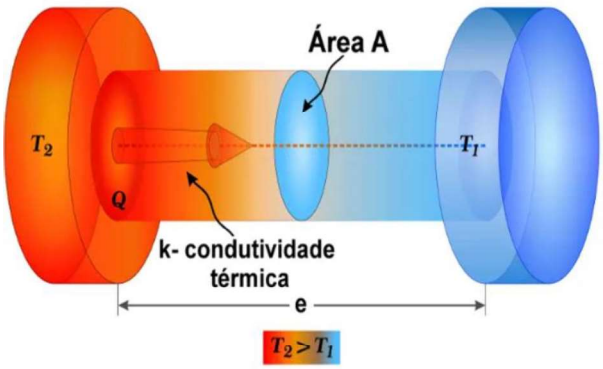
k = Condutividade térmica;

ΔT = Diferença de temperatura;

A = Área transversal;

d= Espessura do material

Figura 4-5: Esquema de condução de calor no material

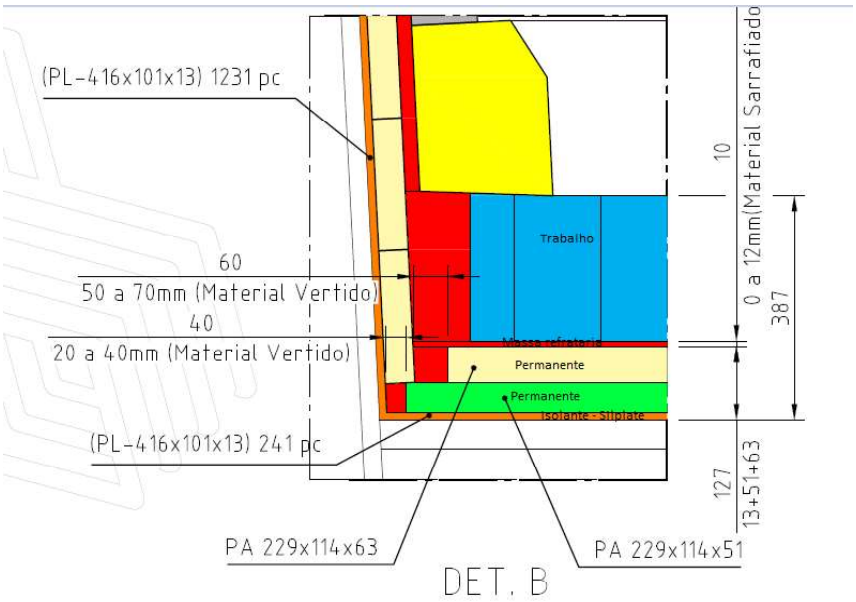


Fonte: (HELERBROCK, 2022)

As panelas em estudo possuem as seguintes camadas na composição da sola, Figura 4-6:

- Refratário de Trabalho (GKOR-AMC-B3): Tijolo refratário de alumina-carbono. Propriedades químicas: 90,0% Al_2O_3; 6,5% C; 6,0% MgO e 1,7% SiO_2.
- Massa Refratária (STAMPMAG-FC): Massa refratária de magnésia sinterizada. Propriedades químicas: 91,8% MgO; 2,2% SiO_2; 1,4% Al_2O_3; 1,1% MnO, 0,5% CaO e 0,5% Cr_2O_3.
- Refratário Permanente (ALUKOR 70): Tijolo refratário aluminoso. Propriedades químicas: 67,1% Al_2O_3; 26,3% de SiO_2; 4,3% TiO_2; 1,7% Fe_2O_3 e 0,2% Na_2O + K_2O.
- Refratário Permanente (SIAL 45): Tijolo refratário aluminoso. Propriedades químicas: 47,5% Al_2O_3; 47,4% de SiO_2; 2,5% TiO_2; 1,3% Fe_2O_3 e 0,4% Na_2O + K_2O.
- Isolante Silplate: Placa isolante. Composição básica: alumina e sílica.
- Carcaça Metálica (Aço).

Figura 4-6: Composição refratária da sola da panela



Fonte: Autor

O estudo leva em consideração as propriedades do aço e dos refratários, listadas na Tabela 4-1. Os dados de condutividade térmica foram fornecidos pelo fornecedor dos refratários e foram obtidos por meio de testes de qualidade realizados na própria empresa. Para a carcaça metálica da panela, utilizou-se a condutividade térmica do aço constante igual a 52 w/(m°K), fornecida por Gupta et al (2004).

Tabela 4-1: Propriedades dos refratários das panelas de aço em estudo

Refratário	**Espessura (mm)**	**Condutividade Térmica (W/m./ºC)**	**Calor Específico (J/kg.ºC)**	**Densidade (kg/m³)**
GKOR-AMC-B3	229	5,5	1047	3200
STAMPMAG FC	12	1,5	1342	2720
ALUKOR 70	63	1,46	1005	2560
SIAL 45	51	1,26	1005	2320
SILPLATE 1311	13	0,18	1070	800
CARCAÇA	41	52	552	7800

Fonte: Autor

Utilizando a Lei de Fourier, o fluxo de calor pelo fundo da panela em estudo é:

$$Q_{fundo} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_R}{\lambda_R} + \frac{L_M}{\lambda_M} + \frac{L_I}{\lambda_I} + \frac{L_B}{\lambda_B} + \frac{L_C}{\lambda_C} + \frac{L_D}{\lambda_D}}$$

Onde:

Q_{fundo} = Fluxo de calor pelo fundo (W/m²);

T_1 = Temperatura da superfície da sola da panela;

T_2 = Temperatura da superfície externa da carcaça da panela;

L_R = Espessura do refratário GKOR-AMC-B3;

λ_R = Condutividade térmica do refratário GKOR-AMC-B3;

L_M = Espessura da massa refratária STAMPMAG-FC;

λ_M = Condutividade térmica da massa refratária STAMPMAG-FC;

L_I = Espessura do refratário ALUKOR 70;

λ_I = Condutividade térmica do refratário ALUKOR 70;

L_B = Espessura do refratário SIAL 45;

λ_B = Condutividade térmica do refratário SIAL 45;

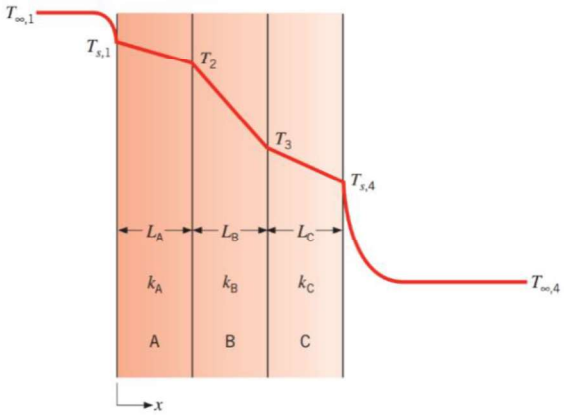
L_C = Espessura do SILPLATE 1311;

λ_C = Condutividade térmica do SILPLATE 1311

L_D = Espessura da carcaça de aço;

λ_D = Condutividade térmica da carcaça de aço.

Figura 4-7: Esquema do fluxo de calor entre camadas



Fonte: (INCROPERA, *et al.,* 2007)

4.5 Acumulação de calor no refratário - Encharque

A acumulação de calor nos refratários da panela, entre dois pontos de um ciclo, é a diferença entre as entalpias médias do refratário, medidas nestes pontos. Simbolizando por $d\,H_R$, entalpia de uma fatia de refratário, de espessura dx, no ponto x, a qual é função de temperatura do refratário no ponto, se tem:

$$H_x = \left\{ H_{298}(J/kg) + \int_{298}^{T} C_P(J/K.kg) * dT(K) \right\} A(m^2) * \; dx(m) * \; \rho\,(kg/m^3)$$

Onde:

H_{298} = é a Entalpia do refratário na temperatura de referência, 298K, (J/kg);

Cp = é o calor específico do refratário, $(J/K.kg)$.

ρ = é a densidade do refratário, (kg/m^3)

A = é a área da face do refratário, (m^2)

Quando o perfil de temperatura no refratário é linear, conforme figura 4-11, e o calor específico é constante, a expressão anterior fica:

$$d\,H_R = \{H_{298} + C_P(T - \; 298)\}\,A \;\; \rho\,dx$$

E como:

$$T = \; T_o + \frac{x}{\delta}\,(T_\delta - T_o)$$

vem que a entalpia desta peça de refratário é:

$$H_R = \int_{o}^{\delta} \{H_{298} + C_P(T - \; 298)\}\,A \;\; \rho\,dx$$

$$H_R = \int_{o}^{\delta} \left\{H_{298} + C_P(T_o + \frac{x}{\delta}\,(T_\delta - T_o) - \; 298)\right\}\,A \;\; \rho\,dx$$

$$H_R = A\,\rho\,\delta\,\left\{H_{298} + C_P\,\left[\frac{T_\delta + T_o}{2} - 298\right]\right\}$$

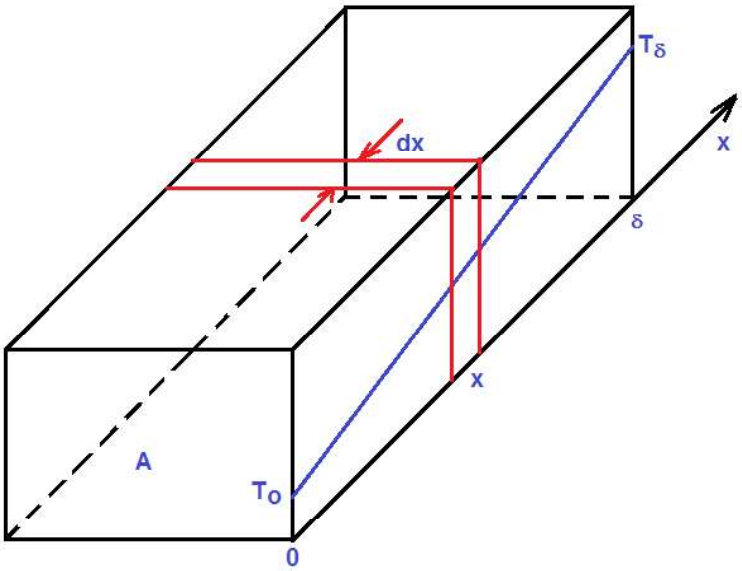
Resulta que a acumulação de calor entre dois pontos do ciclo, i e i + 1 é dada por:

$$\Delta H_R = A\,\delta\,\rho\,C_P\,(T_{i+1} - T_i)$$

Onde T_{i+1} e T_i são as temperaturas médias no refratário em questão.

Nota-se que, T_δ e T_o são calculados em cada ponto do ciclo: $\frac{T_\delta + T_o}{2}$ é temperatura média de cada refratário específico, em cada ponto do ciclo.

Figura 4-11: Perfil linear (assumido) de uma camada de refratário



Fonte: Autor

A somatória das parcelas como estas, considerando todas as camadas de refratários e a carcaça metálica, fornece uma estimativa do encharque da panela. É sabido que à medida que a panela progride em seu ciclo de vida, o encharque aumenta. Uma panela com um bom nível de encharque resulta no sucesso de aberturas durante o lingotamento, evitando problemas como repanelamento, não aberturas e quebra de sequência, eventos que são particularmente onerosos. Os dados aqui apresentados poderão conduzir, de forma eficaz, trabalhos no sentido do aumento da produtividade de aciarias.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capitulo são apresentados os resultados das simulações realizadas com os parâmetros críticos que influem no comportamento térmico do revestimento refratário de panelas de aciaria, buscando-se fazer uma análise dos principais aspectos e impactos na operação. Foi investigada a influência, no perfil de temperaturas do refratário, do tempo de aquecimento de panelas novas ou fora do ciclo. Também foi avaliada a evolução térmica conforme o número de ciclos operacionais da panela.

5.1 Resultado das Medições Termográficas

Os resultados das medições termográficas foram colocados em uma planilha que é apresentada na Tabela 5-1 apenas em parte. Nesta tabela foram incluídos o número da panela, a corrida e as temperaturas nos diversos pontos:

Tabela 5-1: Levantamento das temperaturas das panelas 30, 35, 41 e 47 durante ciclo

Panela	Vida	Corrida	Temperatura de sola após aquecedor (ºC)	Temperatura de carcaça após aquecedor (ºC)	Temperatura de sola após lingotamento (ºC)	Temperatura de carcaça após lingotamento (ºC)
30	1	1129838	785	173	938	179
30	2	2129781	922	204	985	189
30	3	2129785	787	236	1032	212
30	4	1129845			1102	245
30	5	1129862			1047	262
30	6	2129806			1055	274
30	7	2129812			1062	277
30	8	1129874	960	300	1069	282
30	9	2129835			1073	295
30	10	2129839			1081	327
35	1	2130759	756	167	990	194
35	2	2130766			1002	236
35	3	2130772			969	278

35	4	2130778	894	253	1037	270
35	5	2130782			1054	284
35	6	2130789			1020	276
35	7	2130809	889	268	926	281
35	8	2130815			1025	285
35	9	2130824			954	273
41	1	1130427	720	167	1009	242
41	2	1130434			955	297
41	3	2130421			950	313
41	4	1130443	936	306	943	318
41	5	1130447			993	322
41	6	2130434			1016	328
41	7	2130436			990	322
41	8	2130442			1026	337
41	9	2130447			983	324
41	10	2130451			993	
47	1	2129906	777	168	917	183
47	2	2129911			1083	253
47	3	2129919			1124	263
47	4	2129921			960	267
47	5	2129924	928	303	987	316
47	6	2129933			1082	345
47	7	2129939			1036	278
47	8	2129950	900	236	973	246
47	9	2129955			988	254

Fonte: Autor

Os campos em branco nas colunas dos aquecedores indicam que a panela não voltou ao aquecedor. Após conferência nos berços de preparação de panela a mesma seguiu para uma nova corrida sem a necessidade de aquecedores.

A partir dos dados da planilha, foram calculados os valores do fluxo térmico no fundo das panelas, nas condições diversas e nas diferentes etapas, empregando a equação descrita na metodologia, conforme Tabela 5-2:

$$Q_{fundo} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_R}{\lambda_R} + \frac{L_M}{\lambda_M} + \frac{L_I}{\lambda_I} + \frac{L_B}{\lambda_B} + \frac{L_C}{\lambda_C} + \frac{L_D}{\lambda_D}}$$

Tabela 5-2: Levantamento das temperaturas das panelas 30, 35, 41 e 47 durante ciclo

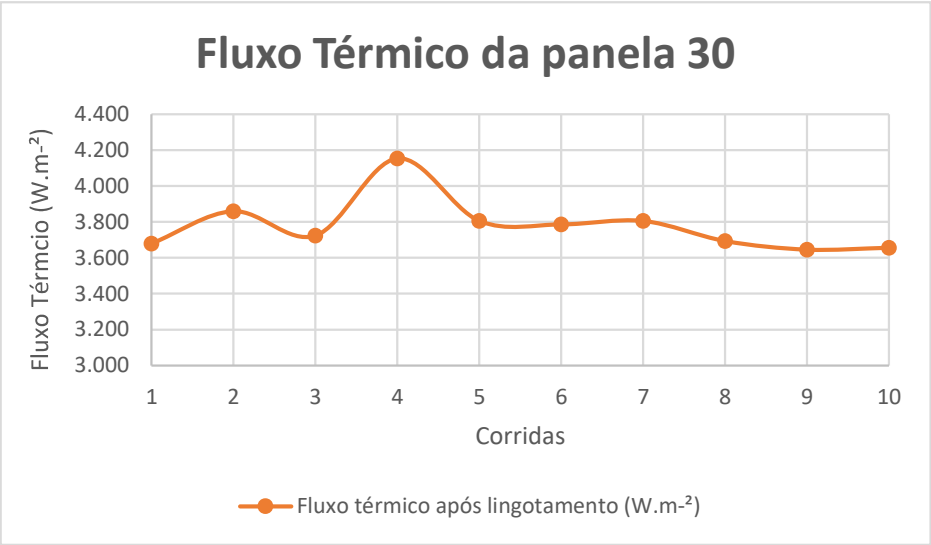
Panela	Vida	Corrida	Fluxo dos aquecedores (W/m-²)	Fluxo dos lingotamentos (W/m-²)
30	1	1129838	2966,29	3679,57
30	2	2129781	3480,81	3858,95
30	3	2129785	2671,21	3723,20
30	4	1129845		4154,67
30	5	1129862		3805,62
30	6	2129806		3786,23
30	7	2129812		3805,62
30	8	1129874	3319,63	3694,12
30	9	2129835		3645,64
30	10	2129839		3655,33
35	1	2130759	2855,43	3858,95
35	2	2130766		3713,51
35	3	2130772		3306,28
35	4	2130778	3107,52	3718,36
35	5	2130782		3732,90
35	6	2130809	3010,56	3606,85
35	7	2130815		3126,91
35	8	2130815		3587,46
35	9	2130824		3301,44
41	1	1130427	2680,90	3718,36
41	2	1130434		3189,93

41	3	2130421		3088,13
41	4	1130443	3054,19	3029,95
41	5	1130447		3252,96
41	6	2130434		3335,37
41	7	2130436		3238,41
41	8	2130442		3340,22
41	9	2130447		3194,78
41	10	2130451		3325,67
47	1	2129906	2952,38	3558,38
47	2	2129911		4111,04
47	3	2129919		4174,06
47	4	2129921		3359,61
47	5	2129924	3029,95	3252,96
47	6	2129933		3572,92
47	7	2129939		3674,73
47	8	2129950	3219,02	3524,44
47	9	2129955		3558,38

Fonte: Autor

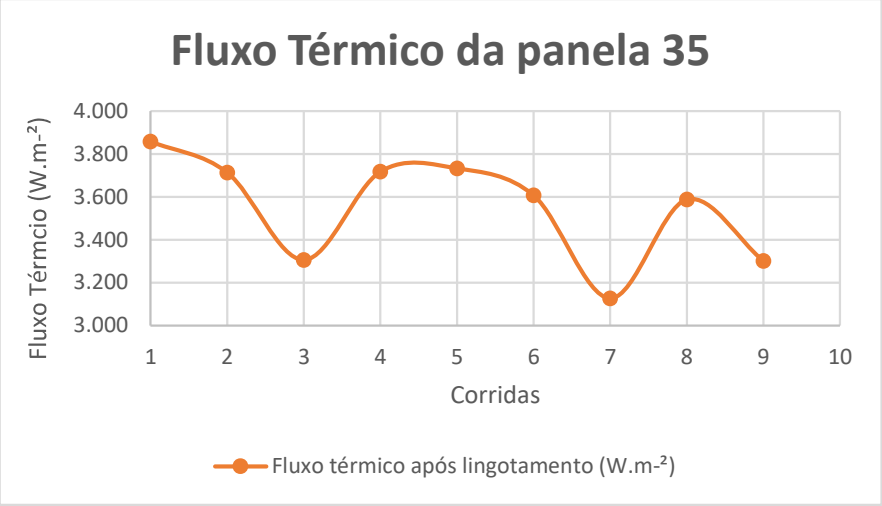
Os gráficos esboçados nas Figuras 5-1 a 5-4 foram esboçados conforme dados da Tabela 5-2.

Figura 5-1: Fluxo térmico da panela 30 após o lingotamento da 1ª até a 10ª corrida



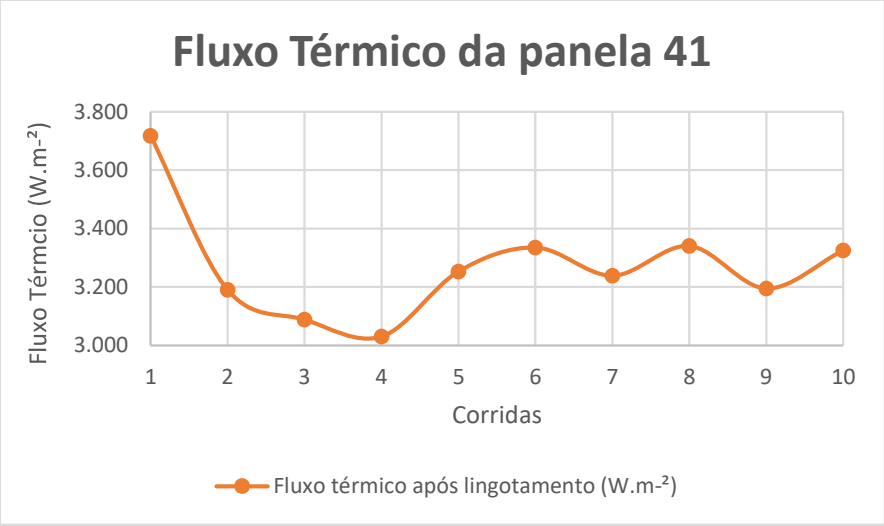
Fonte: Autor

Figura 5-2: Fluxo térmico da panela 35 após lingotamento da 1ª até a 9ª corrida



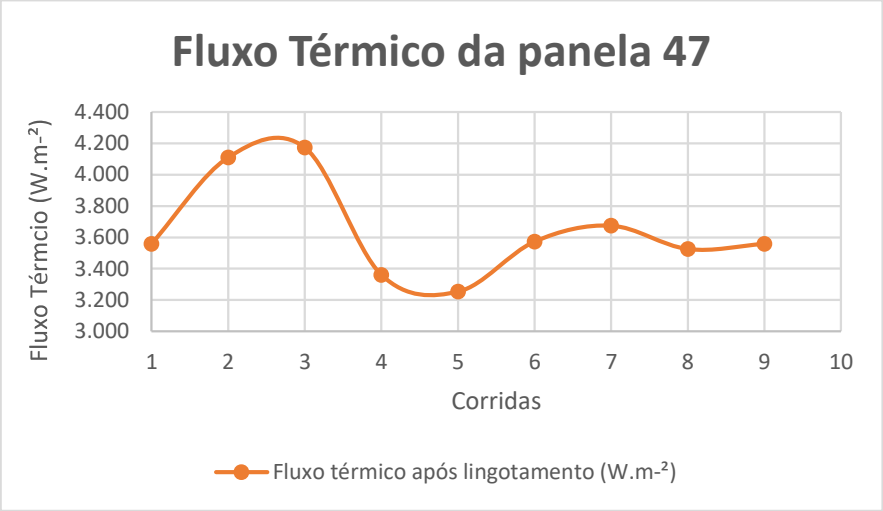
Fonte: Autor

Figura 5-3: Fluxo térmico da panela 41 após lingotamento da 1ª até a 10ª corrida



Fonte: Autor

Figura 5-4: Fluxo térmico da panela 47 após lingotamento da 1ª até a 9ª corrida



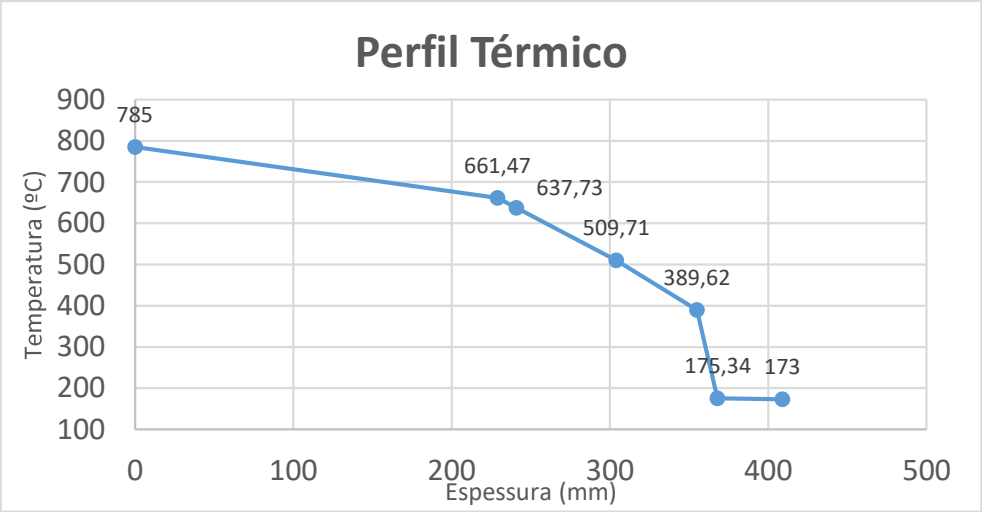
Fonte: Autor

Da mesma forma podem ser inferidos os perfis de temperatura, a partir da mesma equação e analisando camada por camada, por exemplo,

$$Q_{fundo} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_R}{\lambda_R} + \frac{L_M}{\lambda_M} + \frac{L_I}{\lambda_I} + \frac{L_B}{\lambda_B} + \frac{L_C}{\lambda_C} + \frac{L_D}{\lambda_D}} = \frac{T_i - T_{i+1}}{\frac{L_i}{\lambda_i}}$$

Onde T_{i+1} é a temperatura intermediária, a calcular. Como exemplo, a Figura 5-5, mostra o perfil térmico entre camadas da panela 30, 1ª etapa do ciclo, após o aquecedor:

Figura 5-5: Perfil térmico da panela 30 após aquecedor na 01 corrida



Fonte: Autor

Onde:

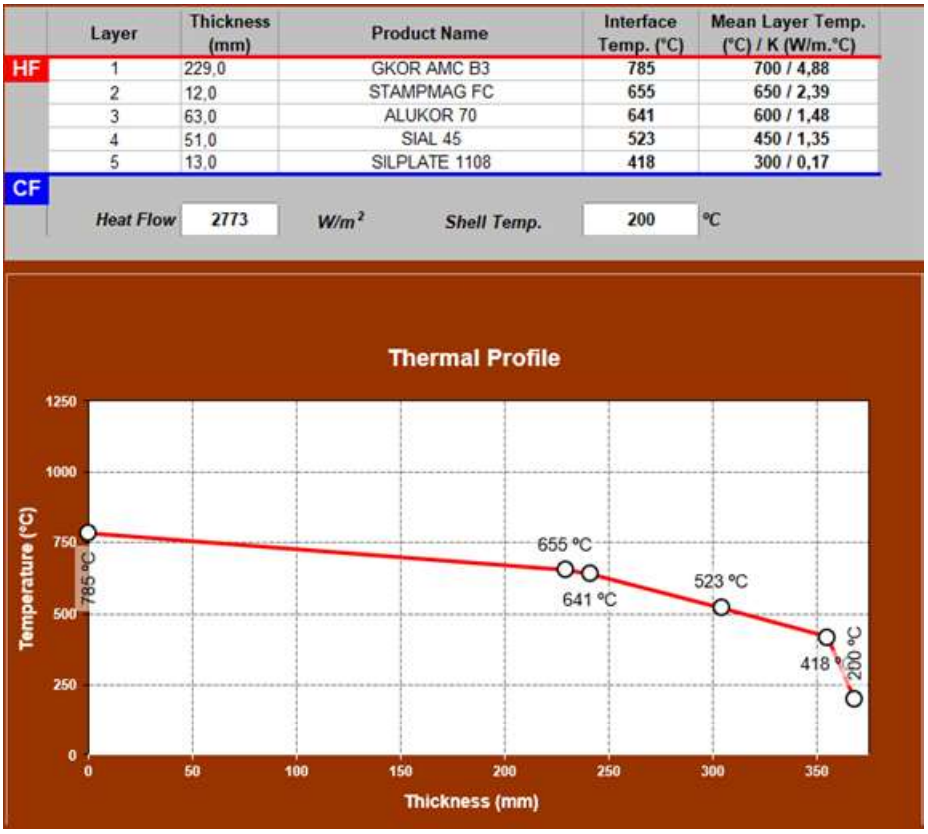
Tabela 5-3: Temperatura média dos refratários da panela 30 após a primeira corrida

Refratário	Tmed (ºC)
GKOR-AMC-B3	723,23
STAMPMAG-FC	649,60
ALUKOR 70	573,72
SIAL 45	449,66
SILPLATE 1108	282,48
CARCAÇA	174,17

Fonte: Autor

Comparando com os dados gerados através do sistema de simulação térmica dos refratários do fornecedor do material, tem-se:

Figura 5-6: Perfil térmico da panela 30 após aquecedor na 01 corrida segundo modelo simulador da área



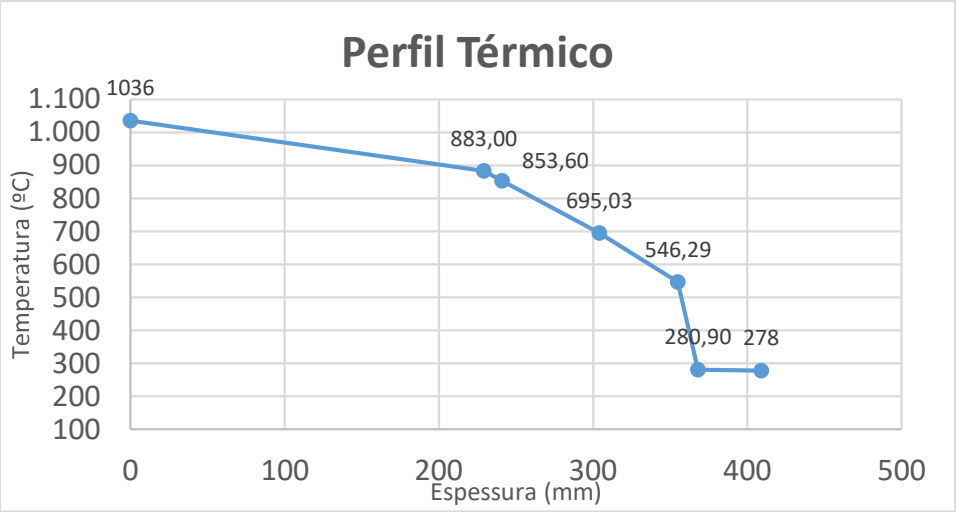
	Layer	Thickness (mm)	Product Name	Interface Temp. (ºC)	Mean Layer Temp. (ºC) / K (W/m.ºC)
HF	1	229,0	GKOR AMC B3	785	700 / 4,88
	2	12,0	STAMPMAG FC	655	650 / 2,39
	3	63,0	ALUKOR 70	641	600 / 1,48
	4	51,0	SIAL 45	523	450 / 1,35
	5	13,0	SILPLATE 1108	418	300 / 0,17
CF					

Heat Flow 2773 W/m² Shell Temp. 200 ºC

Fonte: Autor

É possível perceber que os valores de fluxo térmico calculados pelos dois programas estão em acordo. O mesmo cenário também foi observado para as panelas que retornam do lingotamento, conforme demonstrado na Figura 5-7 com a panela 47, 07 no ciclo de vida:

Figura 5-7: Perfil térmico da panela 47 após lingotamento na 07 corrida



Fonte: Autor

Onde:

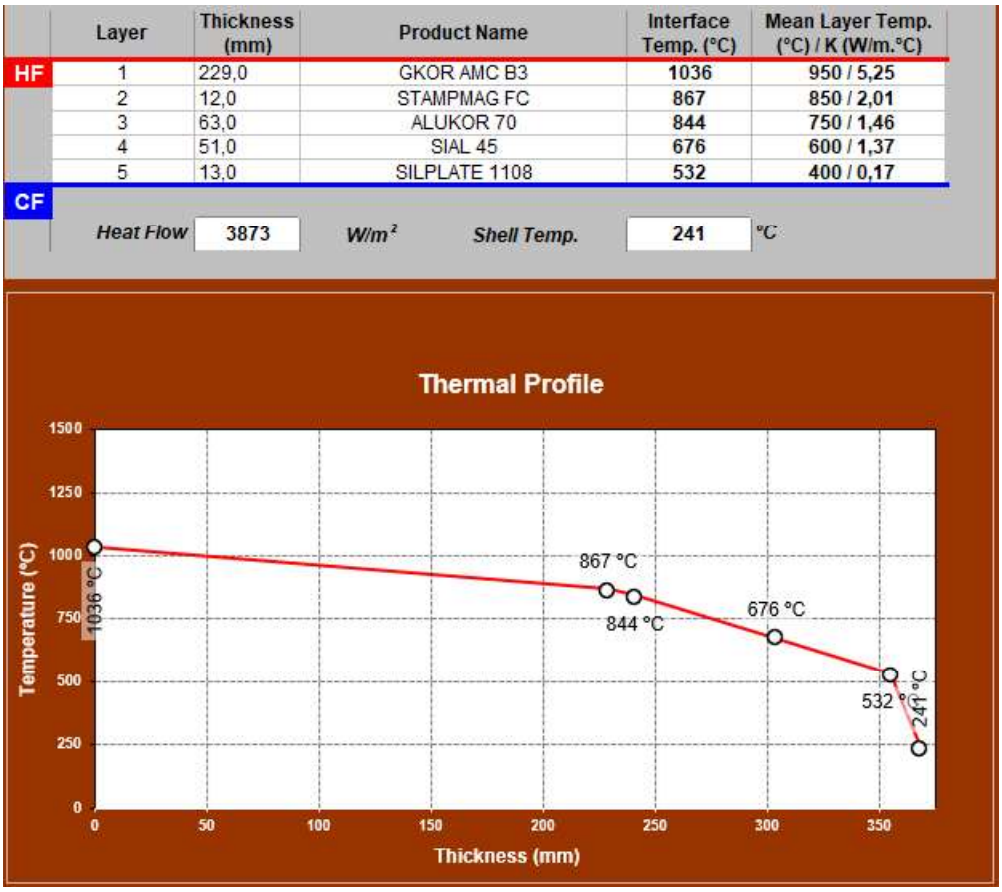
Tabela 5-4: Temperatura média dos refratários da panela 47 após 07 corrida

Refratário	Tmed (ºC)
GKOR-AMC-B3	959,50
STAMPMAG-FC	868,30
ALUKOR 70	774,32
SIAL 45	620,66
SILPLATE 1108	413,60
CARCAÇA	279,45

Fonte: Autor

Comparando com os dados gerados através do sistema de simulação térmica dos refratários do fornecedor do material, é possível observar o mesmo acordo nos valores do fluxo térmico:

Figura 5-8: Perfil térmico da panela 47 após lingotamento na 07 corrida segundo modelo simulador da área



	Layer	Thickness (mm)	Product Name	Interface Temp. (°C)	Mean Layer Temp. (°C) / K (W/m.°C)
HF	1	229,0	GKOR AMC B3	1036	950 / 5,25
	2	12,0	STAMPMAG FC	867	850 / 2,01
	3	63,0	ALUKOR 70	844	750 / 1,46
	4	51,0	SIAL 45	676	600 / 1,37
	5	13,0	SILPLATE 1108	532	400 / 0,17
CF					

Heat Flow 3873 W/m² Shell Temp. 241 °C

Fonte: Autor

5.2 Índice de Encharque das panelas

Como citado na metodologia, a acumulação de entalpia em cada camada, entre dois pontos sucessivos no ciclo de vida, é dada por:

$$\Delta H_R = A\,\delta\,\rho\,C_P\,(T_{i+1} - T_i)$$

Onde T_{i+1} e T_i são valores de temperatura média na camada, nos pontos em sucessão. Dados termofísicos são mostrados na Tabela 5-5:

Tabela 5-5: Propriedades termoquímicos dos refratários

Refratário	Espessura	Condutividade Térmica (W/m.ºC)	Calor Específico (J/kg.ºC)	Densidade (kg/m³)	Área (m²)
GKORAMC-B3	229	5,5	1047	3200	1
STAMPMAGFC	12	1,5	1342	2720	1
ALUKOR 70	63	1,5	1005	2560	1
SIAL 45	51	1,26	1005	2320	1
SILPLATE 1108	13	0,18	1070	800	1
CARCAÇA	41	52	552	7800	1

Fonte: Autor

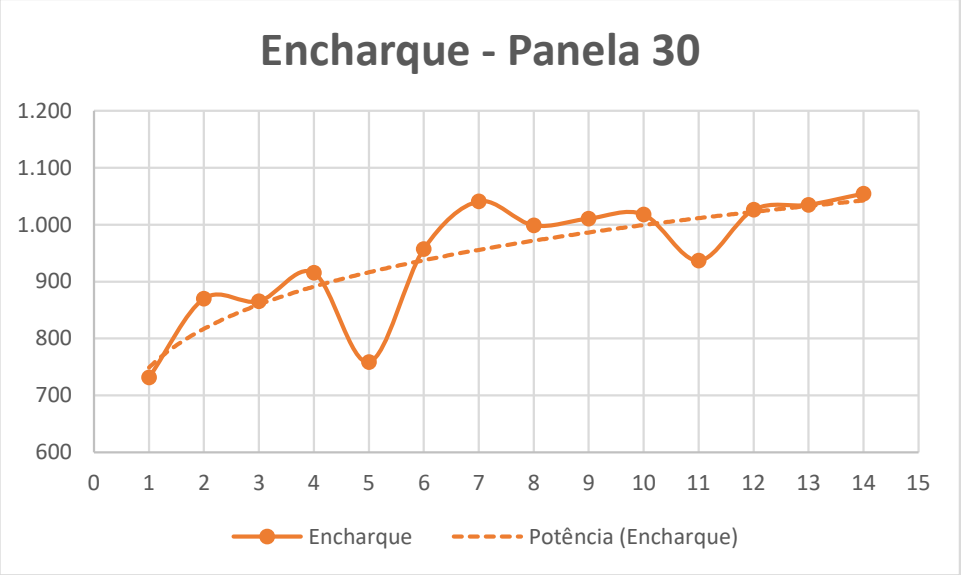
Portanto, este cálculo fornece uma variação, que pode ser positiva ou negativa, indicando se o refratário está sendo encharcado.

O índice global de encharque pode ser estimado como o "calor acumulado" nos refratários, a somatória incluindo todas as camadas

$$H_R = \sum A\,\rho\,\delta\left\{H_{298} + C_P\left[\frac{T_\delta + T_o}{2} - 298\right]\right\}$$

Logo, para a panela 30, tem-se os valores da Figura 5-8, que sugerem que o encharque não se completou até o 8º ponto do ciclo de vida.

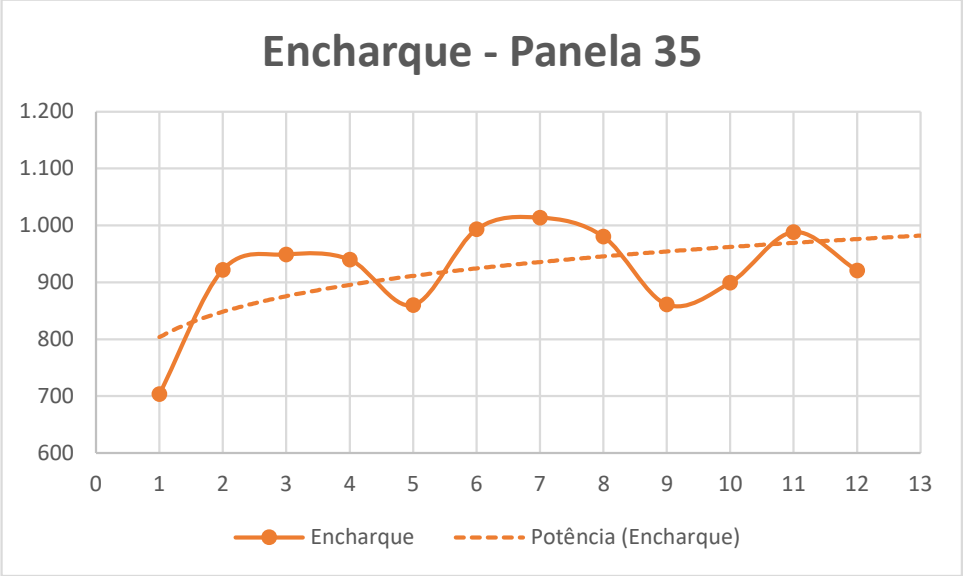
Figura 5-9: Entalpia (MJ/m^2) dos refratários da panela 30



Fonte: Autor

Para a panela 35, tem-se os valores da Figura 5-10:

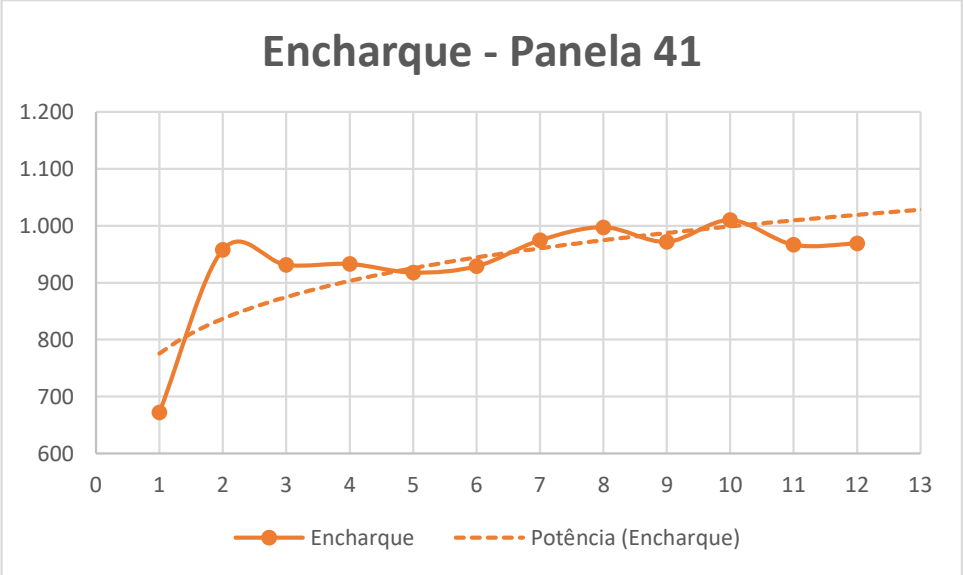
Figura 5-10: Entalpia (MJ/m^2) dos refratários da panela 35



Fonte: Autor

Para a panela 41, os valores de encharque são mostrados na Figura 5-11:

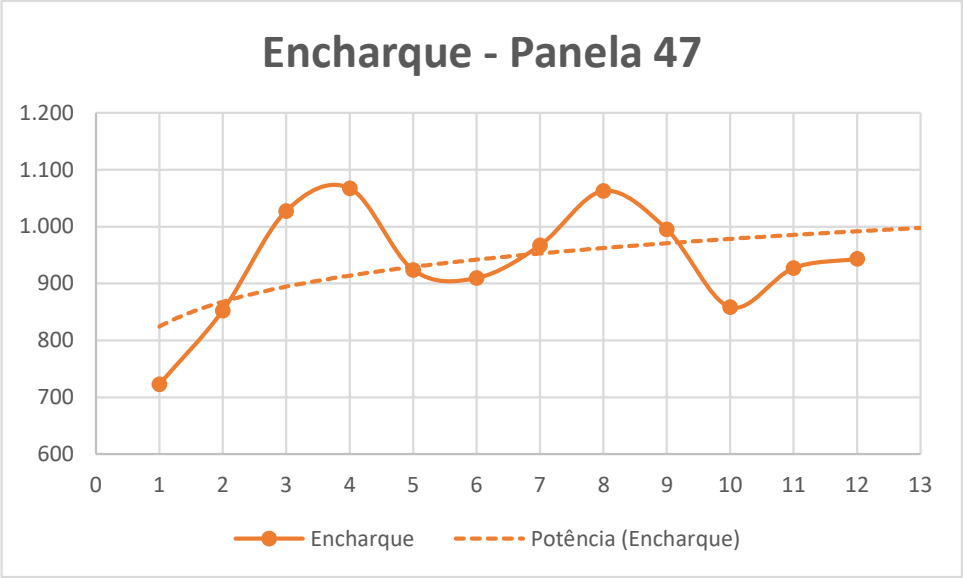
Figura 5-11: Entalpia (MJ/m^2) dos refratários da panela 41



Fonte: Autor

Para a panela 30, tem-se os valores da Figura 5-12:

Figura 5-12: Entalpia (MJ/m^2) dos refratários da panela 47



Fonte: Autor

Em todos os casos, panelas 30, 35, 41 e 47, o encharque parece ter sido alcançado para um valor médios de 1000 MW/m^2, o que deve corresponder à condição normal de operação da panela.

6 CONCLUSÕES

Partindo-se das medições de temperatura da carcaça e da face quente do refratário, realizadas em campo, das propriedades termofísicas dos materiais (dados dos fornecedores dos refratários) e dados técnicos disponíveis na literatura, determinou-se, por meio de um modelo matemático unidimensional, o fluxo térmico através das camadas de refratário, bem como o perfil de temperaturas (em uma região específica do fundo da panela), em cada etapa de seu ciclo operacional. Estas medições e cálculos permitiram estimar um Índice de Encharque, definido como a entalpia média das camadas de refratário.

Os dados sugerem que a operação normal é alcançada quando o Índice de Encharque alcança o valor médio de 1000 MJ/m^2. Este Índice de Encharque, para o caso das panelas analisadas, não é alcançado ao final do primeiro ciclo de aquecimento, mas se aproxima do valor médio quando a panela retorna do LC.

A metodologia proposta pode ser melhorada e usada como ferramenta na otimização de parâmetros operacionais. O modelo permite obter informações sobre a condição térmica das panelas, possibilitando aos engenheiros de desenvolvimento conduzir de forma eficaz trabalhos experimentais no sentido de aumento de produtividade das aciarias.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos, são apresentadas as seguintes sugestões para continuidade dos trabalhos:

- Realizar um modelamento matemático que faça a simulação transiente do ciclo térmico da panela;
- Implantar o cálculo da condição das panelas em tempo real de produção, permitindo uma gestão mais eficiente das panelas;
- Estudar a simplificação que considera as etapas de vazamento e lingotamento como etapas de panela 100% cheia, permitindo avaliar a influência do tempo de lingotamento.
- Estender as medições de modo a incluir pontos do ciclo de vida nos quais o desgaste dos refratários é significativo, de forma a avaliar o efeito da espessura do refratário de desgaste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANTES, L. F. M.; MARTINS, R. G.; RIBEIRO, V. A. P.; WIERMANN, A.; FERREIRA, W. R. Modelagem Matemática do Processo de Secagem e Aquecimento de Panelas de Aço. **Tecnol. Metal. Mater. Miner**, v. 8, n. 3, p. 160-167, 2001.

CAVALCANTE, E. S. **Determinação de Parâmetros de Transferência de Calor para o Modelos Transiente do Ciclo das Panelas de uma Aciaria**. 2019. (83f). Dissertação. Mestrado em Engenharia Química - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2019.

CHRIST, F. S. **Melhorias no Aquecimento de Panelas de Aço de uma Aciaria Elétrica.** 2001. (77f). Dissertação. Mestrado em Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2001.

DUARTE, I. D. **Modelamento Matemático das Perdas Térmicas em Panelas de Aciaria.** 2015. (104f). Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2015.

DUARTE, I. D. Modelamento Matemático das Perdas Térmicas em Panelas de Aciaria**.** In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. **45º Seminário de Aciaria – Internacional**, 2014, Porto Alegre, Brasil. São Paulo: ABM; 2014, p. 297 – 308.

FERREIRA, N. F. **Controle da Temperatura do Aço Líquido em uma Aciaria Elétrica.** 2000. (141f). Tese. Doutorado em Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2000.

GUPTA, N., CHANDRA, S. **Temperature Prediction for Controlling Casting Superheat Temperature.** ISIJ International, Volume 44, p.1517-1526, June 2004.

HELERBROCK, R. Condução térmica. **Brasil Escola.** Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/conducao-termica.htm>. Acesso em: 05 de jun. de 2022.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 6ª edição. Tradução e revisão técnica Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 645p.

LOPES, H. L. P. **Modelo para Previsão da Condição Térmica de Panelas de Aciaria.** 2007. (112f). Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil. 2007.

MACHADO, M. L. P.; SOBRINHO, V. P. F. M.; ARRIVABENE, L. F. **Siderurgia Para Não Siderurgistas.** Vitória, 2003. 128p.

MOURÃO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYI, A. **Introdução à Siderurgia.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 428p.

OLIVEIRA, D. R. **Estudo do Comportamento Térmico das Panelas da Aciaria da Siderúrgica Sinobras S.A.** 2013. (78f). Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Marabá, PA, Brasil, 2013.

OMOTANI, M. A.; HEASLIP, L. J.; MCLEAN, A. Ladle Temperature Control During Continuous Casting. **Iron & Steelmaker,** v. 10, p. 29-35, 1983.

SANTOS, M. F., MOREIRA, H. M.; CAMPOS, M. G. G. C-free Refractory for Reducing the Steel Ladle Energy Consumption: Numerical Analysis and In-situ Measurements. Saint-Goban Performance Ceramics & Refractories. **UNITERC Proceedings.** 2019. Disponível em: <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/pt/soluções-refratárias/fabricação-de-aço/concha-de-aço>. Acesso em: 03 de jun. de 2022.

SILVA, C. A.; SILVA, I. A.; CASTRO, L. F. A. **TERMODINÂMICA METALÚRGICA: Balanços de Energia, Soluções e Equilíbrio Químico em Sistemas Metalúrgicos.** São Paulo: Edgar Blucher, 2018. 722p.

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. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. **43º Seminário de Aciaria – Internacional**, 2012, Belo Horizonte, Brasil. São Paulo: ABM; 2012 p. 36 – 58.