

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**VOLMIR WITECK JUNIOR**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA TEMPERATURA DO FERRO  
FUNDIDO CINZENTO DURANTE O TRANSPORTE NA PANELA DE  
TRANSFERÊNCIA**

**PATO BRANCO**

**2023**

**VOLMIR WITECK JUNIOR**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA TEMPERATURA DO FERRO  
FUNDIDO CINZENTO DURANTE O TRANSPORTE NA PANELA DE  
TRANSFERÊNCIA**

**Study of the temperature termal behavior of grey cast iron during transport in  
the transfer ladle**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 15/06/2023 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco (UTFPR-PB).

Orientador: Prof. Bruno Bellini Medeiros.

**PATO BRANCO**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**VOLMIR WITECK JUNIOR**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA TEMPERATURA DO FERRO  
FUNDIDO CINZENTO DURANTE O TRANSPORTE NA PAINELA DE  
TRANSFERÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15 / junho / 2023

---

Bruno Bellini Medeiros  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Joviano Janjar Casarin  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Silvana Patricia Verona  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PATO BRANCO**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente aos meus pais Volmir e Luciane e a Amanda Rafain que nunca desistiram de me apoiar em todos os momentos e que me incentivaram no período de caminhada onde ninguém mais acreditava.

A todos os membros de projetos que passei e agregaram aprendizados práticos na minha vida e me prepararam principalmente para o trabalho em equipe.

A todos os meus amigos que tive o prazer de conhecer durante o curso, em especial aos que fizeram parte da minha turma de início e aos que fui criando laços nessa reta final de graduação.

Por fim, porém não menos importante, a todos os professores que estiveram juntos nessa caminhada em especial aos professores Bruno Bellini, Marcio Nakaura e Fabio Lima que tiveram um papel de destaque nessa conquista.

## RESUMO

A fundição é um processo metalúrgico de fabricação que permite a produção em alta escala de materiais e produtos semiacabados no ramo da metalurgia, com o avanço da tecnologia em nosso dia a dia esse processo está se tornando cada vez mais preciso e com um relativo baixo custo de produção. O presente trabalho avaliou as perdas térmicas do ferro fundido cinzento durante o processo de transferência do forno canal até o forno vazador. Esta análise permitiu relacionar a baixa eficiência térmica do isolamento da panela de transferência com o alto consumo de energia elétrica pelo forno, ocasionando um elevado custo de produção. O procedimento experimental foi realizado através da metodologia Seis Sigma. Os resultados experimentais com as melhorias foram: redução de 34,5% na perda térmica do ferro fundido durante todo o processo, redução de 14,5% no consumo de energia elétrica no forno de espera. Os resultados experimentais obtidos estão em acordo com os valores encontrados na literatura

**Palavras-chave:** transferência de calor; eficiência energética; qualidade; fundição; ferro fundido.

## ABSTRACT

Casting is a metallurgical manufacturing process that allows the high scale production of materials and semi-finished products in the metallurgy, with the advancement of technology in our daily lives this process is becoming increasingly accurate and with a relatively low production cost. The present study evaluated the thermal losses of gray cast iron during the transfer process from the channel furnace to the pouring furnace. This analysis allowed to relate the low thermal efficiency of the transfer ladle insulation with the high consumption of electric energy by the furnace, causing a high production cost. The experimental procedure was performed using the Six Sigma methodology. The experimental results with the improvements were: reduction of 34.5% in the thermal loss of the cast iron during the whole process, reduction of 14.5% in the electric energy consumption in the holding furnace. The experimental results obtained are in agreement with the values found in the literature

**Keywords:** heat transference; quality; casting; iron cast.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Faixa aproximada de quantidade de carbono e silício nas ligas ferrosas.....	16
Figura 2 - Microestrutura do ferro cinzento: (a) estrutura da grafita e (b) matriz perlítica.....	17
Figura 3 - Diagrama duplo de Fe-C para ferros fundidos.....	18
Figura 4 - Forno de indução tipo canal.....	19
Figura 5 - Movimento do metal dentro do forno canal.....	20
Figura 6 - Condução através de um sólido estacionário.....	21
Figura 7 - Convecção de uma superfície para um fluido em movimento.....	22
Figura 8 - Transferência de calor por radiação térmica.....	23
Figura 9 - Mecanismos de perda de calor durante o processo de vazamento de metal.....	24
Figura 10 - Método DMAIC.....	25
Figura 11 - Fluxograma geral do trabalho.....	28
Figura 12 - Ciclo da panela e momentos de medição.....	30
Figura 13 - Momentos de medição do metal no interior da panela. (a) Temperatura inicial; (b) Temperatura final.....	31
Figura 14 - Pontos de tomada de temperatura. (a) Carcaça; (b) Refratário da panela.....	31
Figura 15 - Termopar tipo K.....	32
Figura 16 - <i>Data logger</i> .....	32
Figura 17 - Pirômetro digital portátil.....	33
Figura 18 - Pirômetro portátil.....	33
Figura 19 - Termopar tipo S com tubo de proteção de papelão.....	34
Figura 20 - Modelamento da panela de transferência de metal.....	35
Figura 21 - Região considerada no modelamento térmico.....	36
Figura 22 - Variáveis de processo.....	43
Figura 23 - Caminho percorrido pelas panelas durante a transferência de metal.....	45
Figura 24 - Esboço do projeto de inclusão de material isolante na panela.....	46
Figura 25 - Áreas de fuga de calor pela tampa da panela.....	47
Figura 26 - Árvore de amostragem do DOE.....	48
Figura 27 - Fechamento com manta da panela de transferência. (a) manta na transferência; (b) manta na espera.....	49
Figura 28 - Taxas de resfriamento do metal durante as corridas observadas nas panelas 1 e 2.....	53
Figura 29 - Dispersão dos pontos de temperatura final do metal atual com a temperatura final do metal predita.....	55
Figura 30 - Perfil de predição da temperatura final.....	57
Figura 31 - Previsão da taxa resfriamento do metal.....	57
Figura 32 - Taxa de resfriamento do metal durante as corridas do DOE.....	62
Figura 33 - Taxa de resfriamento do metal nos tratamentos executados do DOE.....	63
Figura 34 - Perfil de predição para o melhor tratamento observado.....	65
Figura 35 - Temperatura do refratário em função do tempo de espera.....	66
Figura 36 - Taxa de resfriamento do metal durante as corridas de validação dos dados.....	68

<b>Figura 37 – Dispersão dos pontos de temperatura final atual com a temperatura final predita.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 38 - Perfil de predição sobre a temperatura final e taxa de resfriamento do metal.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 39 - Fugas térmicas da panela durante a validação de dados. ....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 40 - Tabela de cálculos de panela cheia.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 41 - Tabela de cálculos de panela vazia. ....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 42 - Tabela de cálculos teóricos de panela cheia com melhorias propostas.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 43 - Tabela de cálculos de panela vazia com melhorias propostas.....</b>	<b>80</b>



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões da panela de transporte e algumas propriedades físicas de interesse. ....	37
Tabela 2 - Variáveis de processo e matriz de decisão. ....	44
Tabela 3 - Propriedade da manta de fibra cerâmica. ....	49
Tabela 4 - Dados de medição no processo atual. ....	51
Tabela 5 - Dados médios observados durante a coleta de dados. ....	54
Tabela 6 - Estimativa da influência das variáveis medidas. ....	55
Tabela 7 - Cálculos teóricos do processo atual. ....	58
Tabela 8 - Propriedade mecânica da placa de fibra cerâmica. ....	60
Tabela 9 - Cálculos teóricos de transferência de calor com as melhorias propostas. ....	60
Tabela 10 - Dados coletados das melhorias testadas em fábrica. ....	61
Tabela 11 - Resumo dos dados obtidos durante os tratamentos realizados no DOE. ....	64
Tabela 12 - Dados de validação dos resultados. ....	67
Tabela 13 - Valores médios durante a validação de dados. ....	69
Tabela 14 - Consumo de energia no forno canal atual em dias produtivos. ....	73
Tabela 15 - Consumo de energia no forno canal com as melhorias. ....	73

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>14</b>
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Ferro fundido</b>	<b>15</b>
2.1.1	Ferro fundido cinzento	16
<u>2.1.1.1</u>	<u>Solidificação do ferro fundido cinzento</u>	<u>17</u>
<u>2.1.1.2</u>	<u>Importância do controle da temperatura no ferro fundido cinzento</u>	<u>18</u>
<i>2.1.1.2.1</i>	<i>Superaquecimento</i>	<i>18</i>
<i>2.1.1.2.2</i>	<i>Temperatura de vazamento</i>	<i>18</i>
<b>2.2</b>	<b>Forno Canal</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Transferência de calor</b>	<b>20</b>
2.3.1	Condução	20
2.3.2	Convecção	21
2.3.3	Radiação	22
<b>2.4</b>	<b>Perdas térmicas pelas painelas</b>	<b>23</b>
2.4.1	Perda térmica do ferro fundido na painela de transferência	24
<b>2.5</b>	<b>Metodologia Seis Sigma</b>	<b>24</b>
2.5.1	<i>Define</i> (definir)	25
2.5.2	<i>Measure</i> (medir)	26
2.5.3	Analyze (analisar)	26
2.5.4	<i>Improve</i> (melhorar)	26
<u>2.5.4.1</u>	<u>Planejamento de experimentos</u>	<u>26</u>
<i>2.5.4.1.1</i>	<i>Design of Experiments (DOE)</i>	<i>26</i>
2.5.5	<i>Control</i> (controlar)	27
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>28</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia de obtenção dos resultados</b>	<b>29</b>
3.1.1	Determinação das perdas de temperatura das painelas	29
3.1.2	Instrumentos utilizados para medição da temperatura	31
<b>3.2</b>	<b>Modelamento matemático da painela de transferência</b>	<b>34</b>
3.2.1	Considerações físicas	35

3.2.2	Condições de contorno.....	36
3.2.3	Equações do modelo térmico .....	37
<b>3.3</b>	<b>Metodologia de análise dos dados obtidos .....</b>	<b>42</b>
3.3.1	Metodologia Seis Sigma .....	42
<u>3.3.1.1</u>	<u><i>Define</i> (definir).....</u>	<u>42</u>
<u>3.3.1.2</u>	<u><i>Measure</i> (medir).....</u>	<u>43</u>
<u>3.3.1.3</u>	<u><i>Analyze</i> (analisar).....</u>	<u>45</u>
<u>3.3.1.4</u>	<u><i>Improve</i> (melhorar).....</u>	<u>45</u>
<u>3.3.1.5</u>	<u><i>Control</i> (controlar).....</u>	<u>50</u>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>51</b>
4.1	Resultados dos dados de temperatura no processo atual (medir)..	51
4.2	Resultados dos cálculos teóricos (analisar).....	58
4.3	Resultados com melhorias propostas (melhorar) .....	61
4.4	Validação dos resultados .....	67
4.5	Energia elétrica consumida no forno canal .....	72
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE A – Cálculos teóricos.....</b>	<b>78</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

A indústria metalúrgica de fundição é uma realidade em vários locais do mundo, seu processo de fabricação permite que seja atendido um grande volume de produção de materiais fundidos, com alta qualidade e com um preço muito competitivo se comparado a outros processos metalúrgicos de fabricação (CALLISTER, 2019).

O ferro fundido cinzento é uma liga metálica que corresponde a 45% da produção mundial de fundição. Seu principal atrativo, comparado a outras ligas metálicas é sua alta capacidade de absorver vibrações, excelente usinabilidade e preço competitivo (RIPOSAN, I, et al., 2012).

O aumento da qualidade dos produtos se deve ao controle químico dos elementos de liga, a limpeza das escorias geradas durante o aquecimento e ao controle de temperatura do metal durante todo o processo, evitando o superaquecimento nos fornos de indução e o aquecimento abaixo do necessário durante o vazamento do metal aos moldes de areia. Já a redução do custo de produção se deve a redução do consumo da energia necessária para manter o metal aquecido e redução da perda de carga térmica durante o transporte na panela de transferência de metal (FERREIRA, 2000).

### **1.1 Justificativa**

Uma temperatura muito elevada do ferro fundido no forno de espera promove um maior custo energético para manutenção da temperatura e pode ocasionar problemas na qualidade do produto, como queima dos elementos de liga e alteração da estrutura formada durante a solidificação.

Temperaturas demasiadamente baixas também podem ocasionar problemas na fundição, uma temperatura mais baixa dificulta a formação de escoria e conseqüentemente altera a composição química do metal, outro problema se deve na solidificação a frio do metal, como este chega ao forno vazador em uma temperatura aquém do mínimo necessário, a solidificação pode acontecer antes mesmo do metal líquido preencher toda a forma do molde, resultando em problemas de solda a fria.

Essa análise permitirá reduzir a temperatura de manutenção do metal no forno de espera e manter as temperaturas mínimas exigidas no forno vazador para solidificação dos materiais.

## **1.2 Objetivos**

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar as perdas térmicas durante o transporte de ferro fundido cinzento, utilizando uma panela de transferência para identificar soluções para reduzir as perdas energéticas em uma indústria de fundição no ramo metalmeccânico.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos esperam ser alcançados:

- Identificar e equacionar as perdas térmicas;
- Estudar formas de reduzir essas perdas térmicas;
- Propor uma alternativa viável que melhore a eficiência energética nesse processo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo contemplará uma breve apresentação teórica de métodos e partes importantes sobre o descontrole da temperatura do metal e suas consequências, que servirão como base para o melhor entendimento do trabalho proposto.

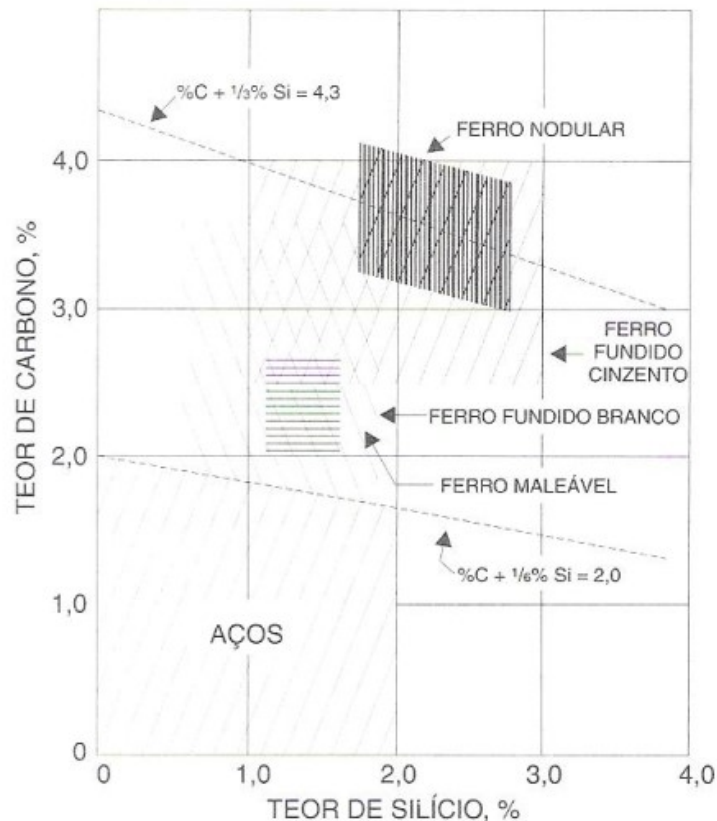
### 2.1 Ferro fundido

Pode ser considerado como ferro fundido, ligas que contêm ferro (Fe), carbono (C) e silício (Si) cujos teores de C são geralmente acima de 2,0%. Suas propriedades variam significativamente de acordo com a proporção de C e Si, adição de elementos de liga metálicos e não metálicos e variando seu processo de fabricação. (SERBINO, 2005).

Segundo Chiaverini (1988), a composição química é um dos principais fatores para determinar a microestrutura dos ferros fundidos, os elementos que mais influenciam na estrutura são o carbono e o silício, o carbono determina a quantidade de grafita que se pode formar e o silício é essencialmente elemento grafitizante, favorecendo a decomposição do carboneto de ferro. O manganês (Mn), sempre presente, tem efeito oposto ao do silício, isto é, estabiliza a cementita e, assim, contrabalança de certo modo, a ação grafitizante do silício; o fosforo (P) é um elemento estabilizador relativamente forte do carboneto de ferro, sua principal ação é na estrutura do material, porque forma com o ferro e o carbono um composto de natureza eutética – carboneto de ferro e fosfeto de ferro – de aparência branca e perfurada, chamada de steadita.

Na figura 1, é possível observar uma relação entre o teor de Carbono e Silício com a determinação do tipo de liga ferrosa que irá se originar.

**Figura 1 - Faixa aproximada de quantidade de carbono e silício nas ligas ferrosas.**



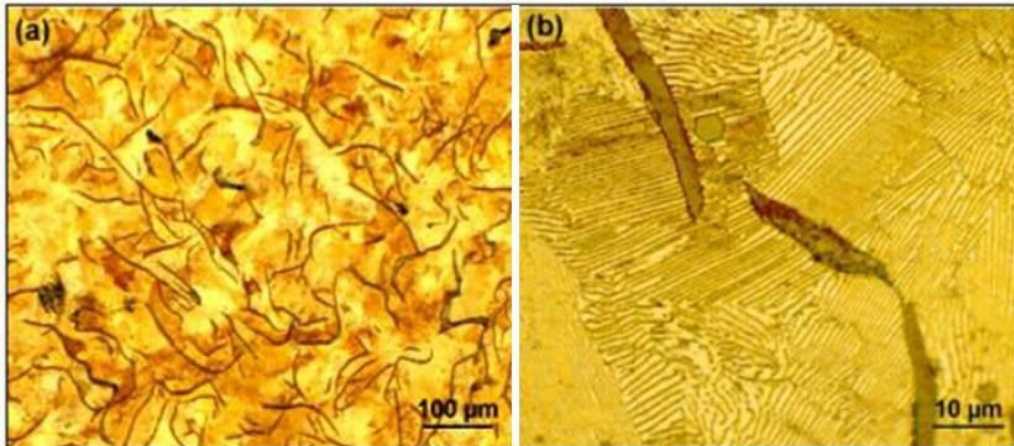
Fonte: Adaptado de Chiaverini (1988).

### 2.1.1 Ferro fundido cinzento

O ferro fundido cinzento é o mais comum dentre as classificações de ferros fundidos, sua elevada usinabilidade, alta fluidez na fundição, facilidade de fabricação, capacidade de absorver impactos vibracionais e o seu baixo custo tornam seu processo de fabricação relativamente simples e barato se comparado a outros materiais (CALLISTER, 2019).

Segundo Pereira (2012), existe uma correlação íntima entre as propriedades do ferro fundido e a sua estrutura, que no caso do ferro fundido cinzento é mais estreita e mais complexa, devido à presença de carbono livre na forma de grafita e a forma, distribuição e dimensões que os veios de grafita apresentam. Portanto pode-se prever as propriedades dos ferros fundidos cinzentos em função de sua composição química, principalmente teores de carbono e silício e da espessura da peça. A figura 2 representa a microestrutura do ferro cinzento na forma de estrutura de grafita (a) e sua matriz perlítica (b).

Figura 2 - Microestrutura do ferro cinzento: (a) estrutura da grafita e (b) matriz perlítica.



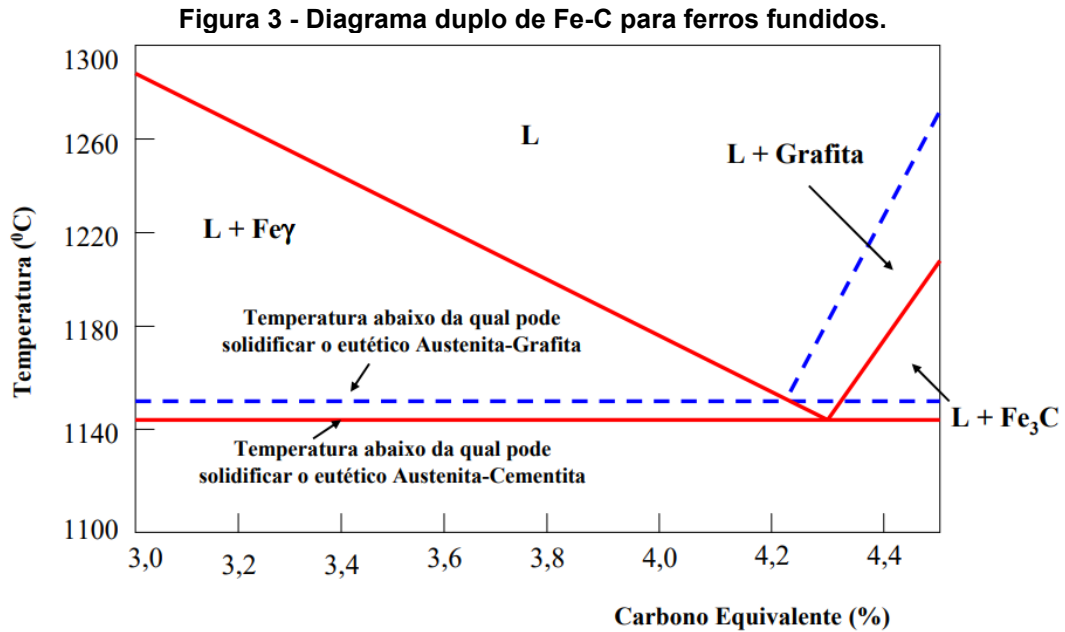
Fonte: Pereira (2012, p64)

#### 2.1.1.1 Solidificação do ferro fundido cinzento

A solidificação é um processo termicamente ativado, sendo indispensável ocorrer um super-resfriamento em relação à temperatura de equilíbrio, para que os primeiros núcleos comecem a se formar. (SOUZA SANTOS; CASTELLO BRANCO, 1989).

Para obtenção de ferros fundidos cinzentos, a solidificação deve ocorrer pelo sistema eutético estável, para ocorrer nucleação e crescimento da grafita. Para isso é necessário que o super resfriamento do líquido eutético situe-se a temperaturas superiores à do início de formação do eutético metaestável, evitando assim a formação de carbonetos (PIESKE, 1985). A figura 3 ilustra o diagrama duplo de Fe-C para ferros fundidos.





Fonte: Adaptado de Garcia (2001).

#### 2.1.1.2 Importância do controle da temperatura no ferro fundido cinzento

A seguir serão apresentadas as características que tem maior importância no controle da temperatura do ferro fundido cinzento.

##### 2.1.1.2.1 *Superaquecimento*

O superaquecimento pode gerar a redução do número de núcleos para a solidificação do ferro fundido cinzento, essa diminuição no grau de nucleação prejudica a obtenção de um ferro fundido de alta qualidade, a oxidação excessiva no banho metálico, queima dos elementos de liga e demasiado desgaste do material refratário. O superaquecimento usual do ferro fundido cinzento é observado em fornos elétricos a temperaturas entre 1460°C e 1510°C (ABM, 1973).

##### 2.1.1.2.2 *Temperatura de vazamento*

A temperatura de vazamento é uma importante variável, temperaturas de vazamentos altas em podem ocasionar defeitos de moldagem, como a penetração de metal no molde de areia e microchupagens. Já temperaturas demasiadamente baixas podem produzir defeitos de coquilhamento (ferro fundido branco) em seções finas, soldas frias (regiões finas) e o aparecimento de gases (ABM, 1973).

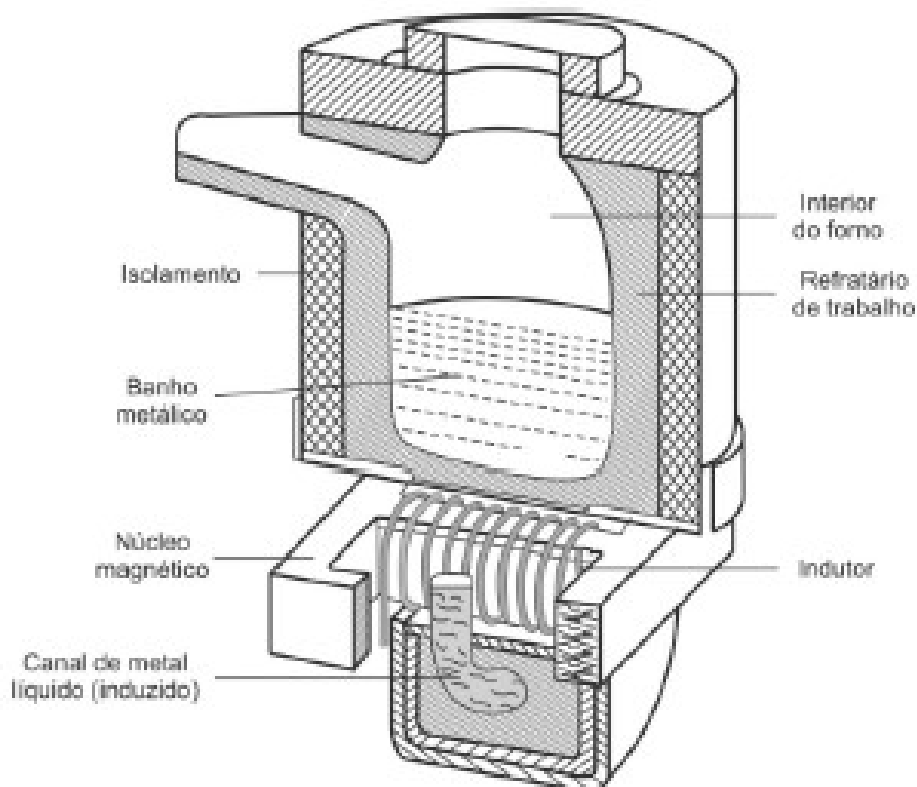
## 2.2 Forno Canal

Segundo Stefanescu (2017), o forno canal é um compartimento de espera onde é armazenado o metal fundido, devido sua construção permitir um carregamento e esvaziamento simultâneo, e devido a sua eficiência térmica e elétrica favorável.

O funcionamento do forno canal consiste em um recipiente refratário que possui um centro de aço magnético onde uma bobina de cobre é enrolada, nesse processo um campo eletromagnético é induzido por uma corrente alternada (TÂMEGA, 2017).

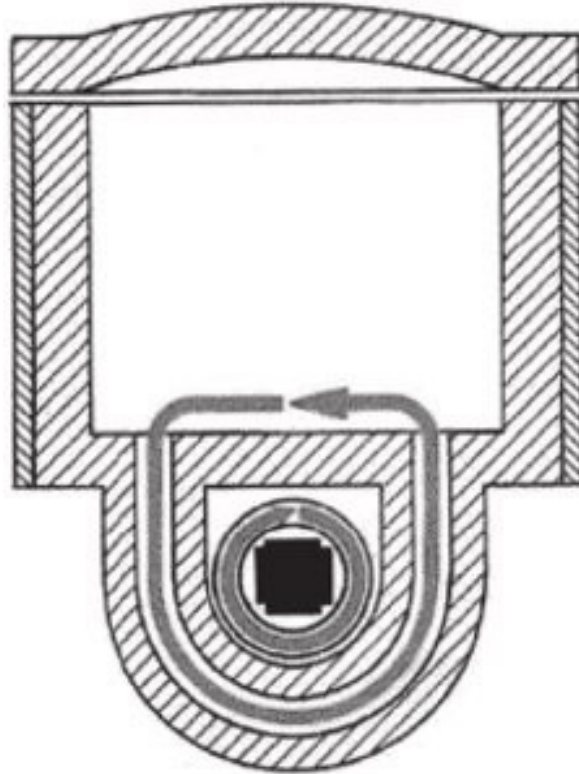
A figura 4 ilustra uma vista em corte de um forno canal e a figura 5 ilustra o movimento do metal líquido no seu interior.

Figura 4 - Forno de indução tipo canal.



Fonte: Tâmega (2017, p-28).

**Figura 5 - Movimento do metal dentro do forno canal.**



**Fonte: Tâmega (2017, p-28).**

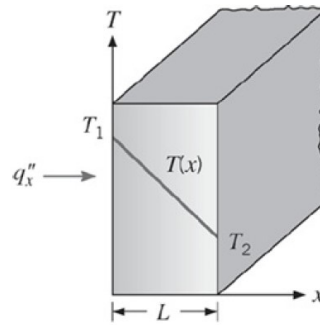
## **2.3 Transferência de calor**

O processo de transferência de calor pode ocorrer de três modos distintos. São eles: condução, convecção e irradiação térmica. Todos os modos garantem a transferência de energia na forma de calor da fonte quente para a fonte fria e possuem como exigência básica a existência de uma diferença de temperatura para sua ocorrência (ÇENGEL, 2003).

### **2.3.1 Condução**

Quando há a existência de um gradiente de temperatura em um meio estacionário, podendo ser sólido ou líquido, utiliza-se do termo condução para se referir à transferência de calor que ocorrerá através do meio (INCROPERA et al., 2013). A figura 6 ilustra a transferência de calor por condução através de um meio sólido.

**Figura 6 - Condução através de um sólido estacionário.**



Fonte: Incropera et al (2013, p-40).

A quantificação do processo de transferência de calor pode ser definida através de equações de taxa apropriadas, quando usadas para quantificar a energia transferida em função do tempo é denominado fluxo de calor (INCROPERA et al., 2013). Na equação [1] é descrita a equação de Fourier:

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

Onde:

$q_x$ : Fluxo de calor na direção x (W/m<sup>2</sup>);

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

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

$T$ : Temperatura (K);

$x$ : Posição (m)

### 2.3.2 Convecção

O mecanismo de convecção é responsável por se referir à troca térmica que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento, quando estes encontram-se sob diferentes temperaturas (INCROPERA et al., 2013). A figura 7 ilustra a transferência de calor por convecção.

Figura 7 - Convecção de uma superfície para um fluido em movimento.



Fonte: Incropera et al. (2013, p-38).

A convecção pode ser classificada conforme a natureza do escoamento do fluido, quando este é causado por meios externos, é chamado de convecção forçada, quando o escoamento se dá apenas pela diferença de temperatura e de densidade nas imediações da superfície, é chamado de convecção natural. (INCROPERA et al., 2013).

A quantificação do fluxo de calor por convecção é calculada através da equação [2]:

$$q_x = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad [2]$$

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 ( $W/m^2K$ );

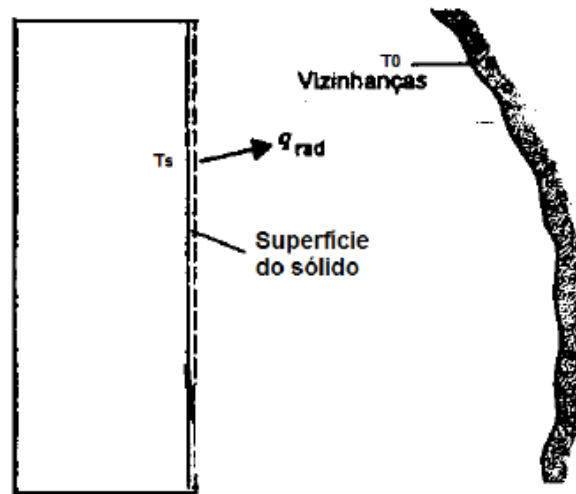
$T_s$ : Temperatura da superfície do sólido (K);

$T_\infty$ : Temperatura do fluido em um ponto da superfície do sólido (K).

### 2.3.3 Radiação

Por fim, tem-se a radiação térmica (figura 8). O terceiro modo de transferência de calor ocorre através da emissão de energia na forma de ondas eletromagnéticas por superfícies com temperatura não nula. Dessa forma, mesmo que não exista um meio que interponha duas superfícies a diferentes temperaturas, ocorrerá transferência de calor líquida por radiação (INCROPERA et al., 2013).

Figura 8 - Transferência de calor por radiação térmica.



Fonte: Adaptado de INCROPERA (2013).

A equação que quantifica o fluxo de calor irradiado é mostrada na equação [3]:

$$q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_s^4 - T_0^4) \quad [3]$$

Onde:

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

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

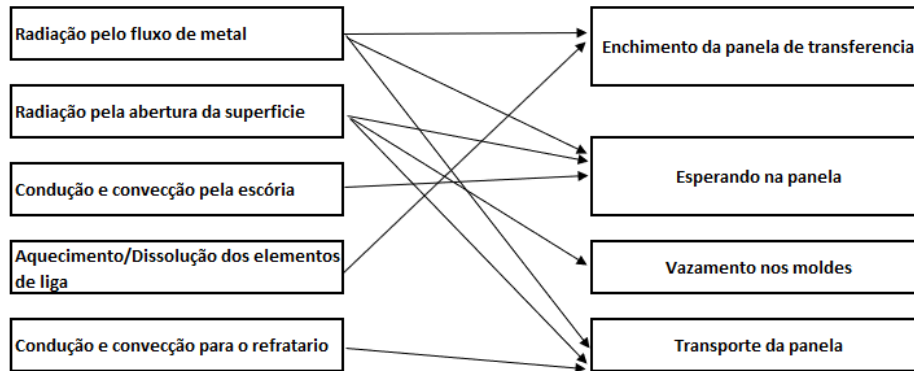
$\varepsilon$ : Emissividade da superfície do material (adimensional).

#### 2.4 Perdas térmicas pelas painelas

Segundo (BISWAS et al, 2011), existem diversos métodos de transferência de calor durante o processo de vazamento e solidificação do metal fundido, como por exemplo, perda de calor por radiação na abertura da painela de transferência durante o enchimento pelo forno canal, perda de calor por radiação no topo do metal líquido, perda de calor por condução do metal líquido para o refratário, entre outros.

Esses vários mecanismos podem ocorrer durante diferentes etapas do processo, desde o enchimento até o vazamento nos moldes de areia. A figura 9 é uma representação dos mecanismos de perda de calor durante todo o processo de vazamento do metal no caso de uma aciaria, que se assemelha ao estudo de caso desenvolvido neste trabalho (BISWAS et al, 2011).

**Figura 9 - Mecanismos de perda de calor durante o processo de vazamento de metal.**



Fonte: Adaptado de Biswas (2011).

#### 2.4.1 Perda térmica do ferro fundido na panela de transferência

Segundo (BISWAS et al, 2011), nessa etapa do processo as perdas térmicas na panela de transferência ocorrem por condução e convecção do metal derretido para a escória, por radiação pela abertura no topo da panela e por condução e convecção do metal derretido para o refratário e a carcaça de aço, sendo essa última uma das principais perdas observadas durante todo o processo, devido a sua grande área de contato entre os materiais.

Os materiais refratários têm alta capacidade de absorção de calor, por conta dos elevados valores de calor específico e densidade, com isso as perdas para a camada refratária na panela de transferência pode chegar até 80% das perdas térmicas totais, visto que para atingir o equilíbrio térmico entre o metal líquido e o refratário há uma alta taxa de troca de calor (Omotani et al., 1983).

Segundo (Gaston et al. 2008), no caso de ausência de tampa na panela de transferência no ciclo com metal líquido em seu interior e no ciclo de panela vazia aguardando enchimento, as perdas térmicas por radiação e convecção de calor do metal para a atmosfera são significativas.

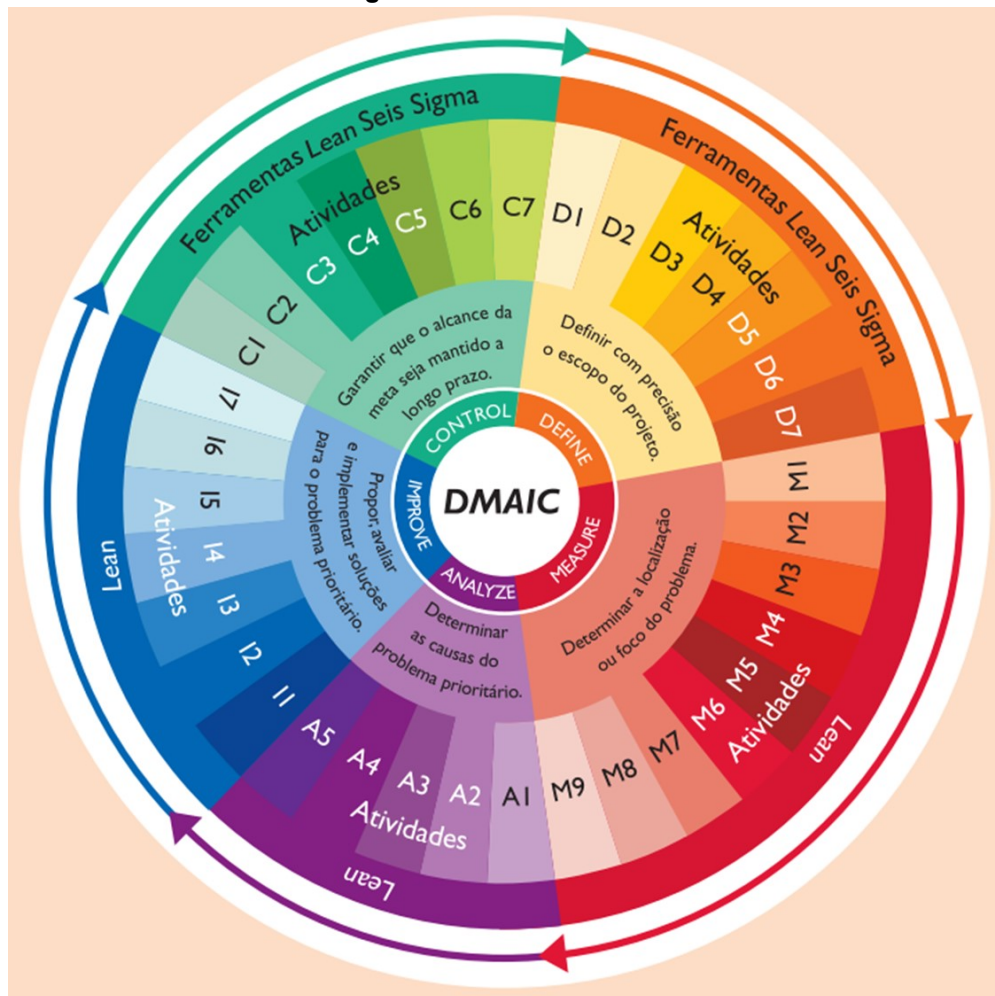
#### 2.5 Metodologia Seis Sigma

A ferramenta Seis Sigma propõe uma redução da variação dentro dos processos, ou seja, para cada resposta “y” existe outros elementos ( $x_1, x_2, x_3...$ ) que terão impacto no resultado (HARRY; SCHOROEDER, 2000). Dessa forma, identificar

os elementos “x” que tem impacto significativo na resposta “y” é de suma importância para o presente estudo.

Segundo WERKEMA (2012), o método DMAIC (figura 10) é o mais utilizado para implementar o Seis Sigma, sendo que existe um relacionamento da metodologia atual com o ciclo PDCA. O método consiste em 5 etapas: *Define* (definir); *Measure* (medir); *Analyze* (analisar); *Improve* (melhorar); e *Control* (controlar).

Figura 10 - Método DMAIC



Fonte: Werkema (2012).

### 2.5.1 Define (definir)

Segundo WERKEMA (2012), a primeira etapa do DMAIC consiste em descrever o problema, definir a meta que deverá ser alcançada e qual projeto será utilizado para resolução do problema.

Nesta etapa as seguintes questões devem ser respondidas:

- Qual é o problema abordado no projeto?



- Qual a meta a ser atingida?
- Qual é o processo relacionado ao problema?
- Qual é o impacto econômico do projeto?
- Quais são os clientes/consumidores afetados pelo problema?

### 2.5.2 *Measure* (medir)

A segunda etapa do DMAIC é definir as características que devem ser monitoradas no projeto, de que forma esses dados serão obtidos e por fim, quais as especificações do projeto (WERKEMA, 2012).

Nesta etapa duas questões devem ser respondidas:

- Quais resultados devem ser medidos para obtenção de dados uteis a focalização do problema?
- Quais são os focos prioritários do problema?

### 2.5.3 *Analyze* (analisar)

Segundo WERKEMA (2012), nessa etapa são analisados os dados obtidos da etapa anterior e determinadas as causas de maior influência para o baixo desempenho do processo.

### 2.5.4 *Improve* (melhorar)

Segundo WERKEMA (2012), a quarta etapa do DMAIC é a melhora, nessa etapa são geradas ideias com soluções potenciais para eliminar as causas fundamentais dos problemas detectados na etapa anterior, estas soluções devem ser testadas a fim de verificar se podem ser implementadas em larga escala.

#### 2.5.4.1 Planejamento de experimentos

A seguir será abordado qual o planejamento de experimento será utilizado na etapa de melhoria.

##### 2.5.4.1.1 *Design of Experiments* (DOE)

O DOE é um procedimento altamente eficiente para planejamento de experimentos, de modo que os dados obtidos possam ser analisados e gerar

conclusões validas e objetivas. Sua estrutura é organizada de maneira que seja possível determinar a relação entre os fatores que mais afetam o processo e verificar a relação da combinação entre dois ou mais fatores (Sonam, R, et al. 2014).

Os principais benefícios do DOE são listados a seguir:

- Permite realizar a manipulação de variáveis independentes e verificar a causa e efeito no processo;
- Permite controlar as variáveis independentes e eliminar variáveis indesejáveis e externas;
- Devido a maior restrição de condições e de contorno, permite replicar o experimento, gerando maior confiança nos resultados.

#### 2.5.5 *Control* (controlar)

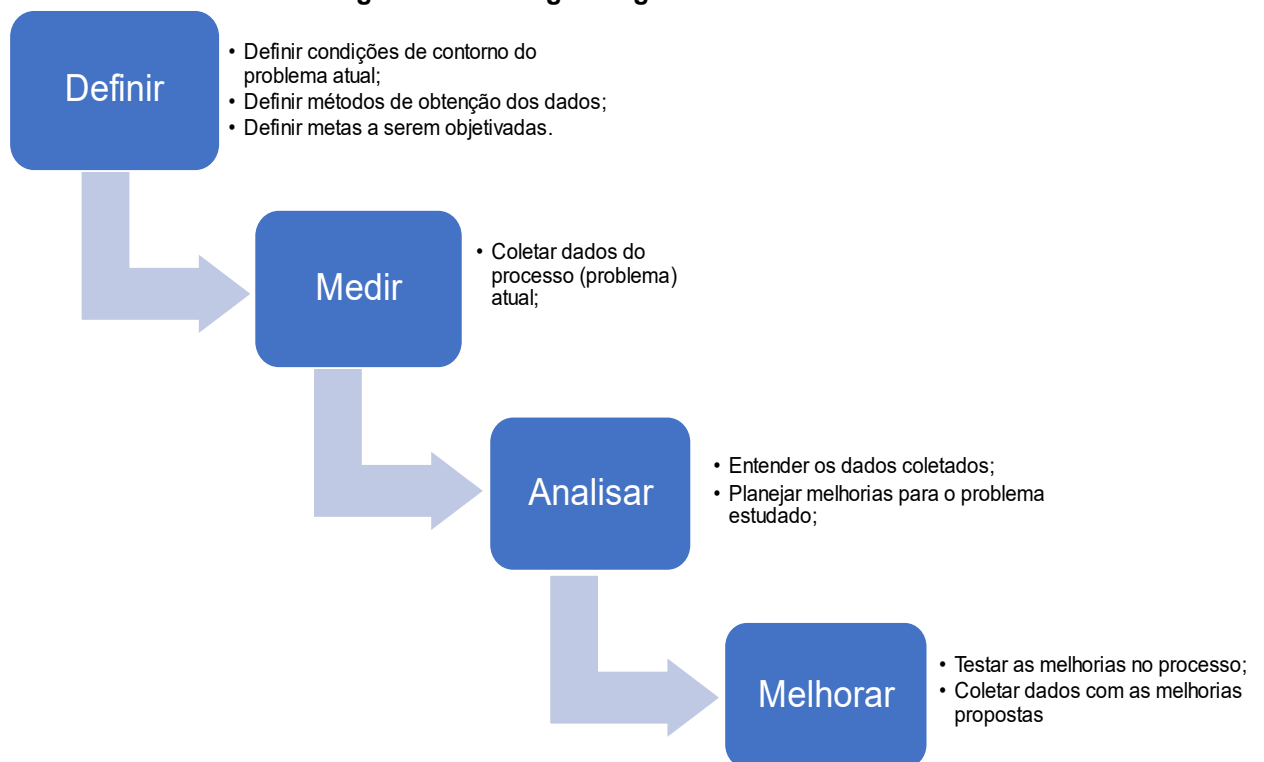
A quinta e última etapa do DMAIC consiste em aplicar as soluções encontradas na etapa anterior em larga escala, padronizar as alterações de processo e a definição de um plano de ação corretivas, caso surjam alterações ou problemas no processo (WERKEMA, 2012).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Dentro da análise do controle de temperatura do ferro fundido durante o transporte do forno canal até o forno vazador, existem operações que tornam complexo e de certa forma imprevisível o comportamento da temperatura do metal fundido durante o processo de transferência, como por exemplo o tempo de transporte e de enchimento da panela de transferência, a temperatura de enchimento do forno canal para a panela de transferência, composição química da carga fundida, entre outros. Para o desenvolvimento desse trabalho foi desconsiderado o tempo de enchimento da panela e as variações da composição química do metal fundido, variando somente a perda de calor durante o processo de transferência.

O presente trabalho divide-se em duas partes: metodologia de obtenção dos resultados e metodologia de análise dos resultados obtidos. A figura 11 ilustra o fluxograma geral do trabalho. Todas as análises realizadas e materiais utilizados são de propriedade da empresa do ramo metalmeccânico e realizados em sua fábrica.

**Figura 11 - Fluxograma geral do trabalho.**



Fonte: Autoria própria (2023).

### **3.1 Metodologia de obtenção dos resultados**

#### **3.1.1 Determinação das perdas de temperatura das painéis**

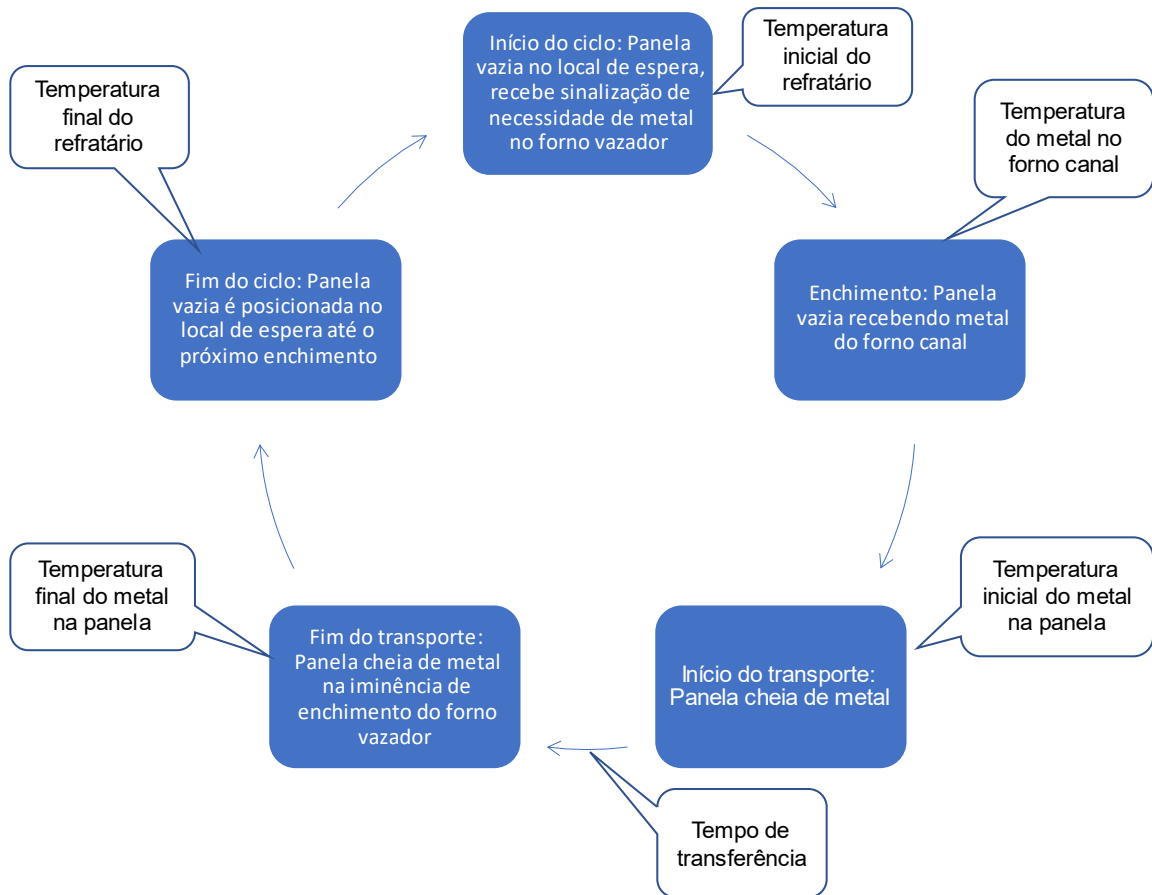
Para a determinação das perdas de temperatura durante o ciclo da panela cheia de metal líquido e conhecer o comportamento térmico das painéis nos períodos de espera sem metal, foram realizadas medições de temperatura do refratário no interior das painéis, no metal líquido no interior da panela e em sua carcaça externa.

As tomadas de temperatura do metal líquido no interior da panela foram realizadas nos seguintes momentos de processo: panela cheia no momento de início do transporte e panela cheia no momento de início da transferência para o forno vazador.

Para as tomadas de temperatura no interior das painéis, foram realizadas medições nos momentos em que a panela se encontrava vazia e posicionada em seu local de espera, aguardando um novo ciclo de transferência de metal.

Por fim, as tomadas de temperatura da carcaça da panela foram realizadas nos seguintes momentos de processo: panela cheia e quando posicionada no local de espera e sem metal. A figura 12 ilustra o ciclo de uma corrida e os momentos de medição no ciclo.

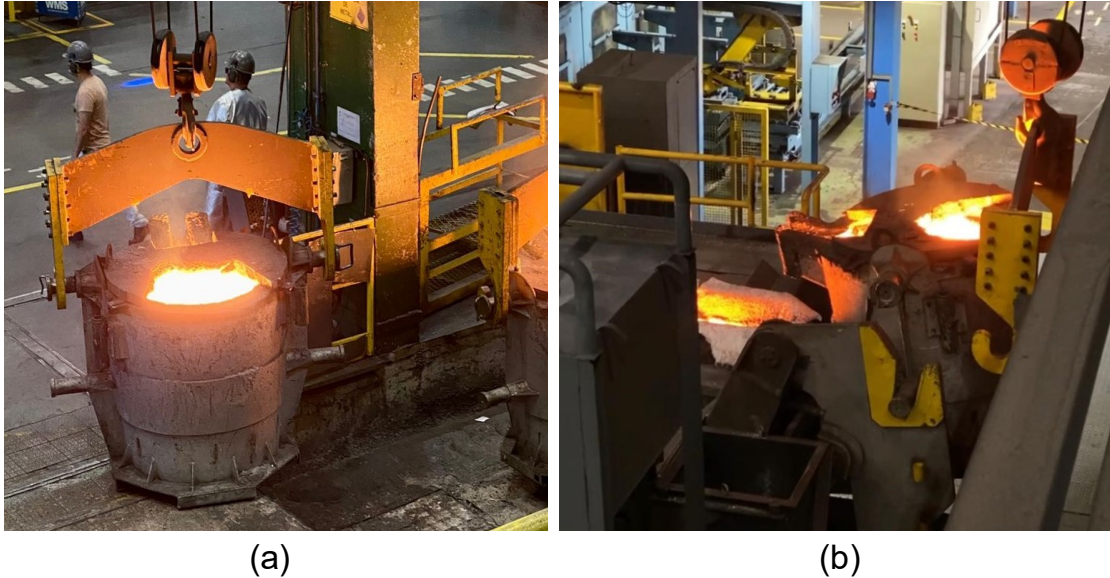
**Figura 12 - Ciclo da panela e momentos de medição.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

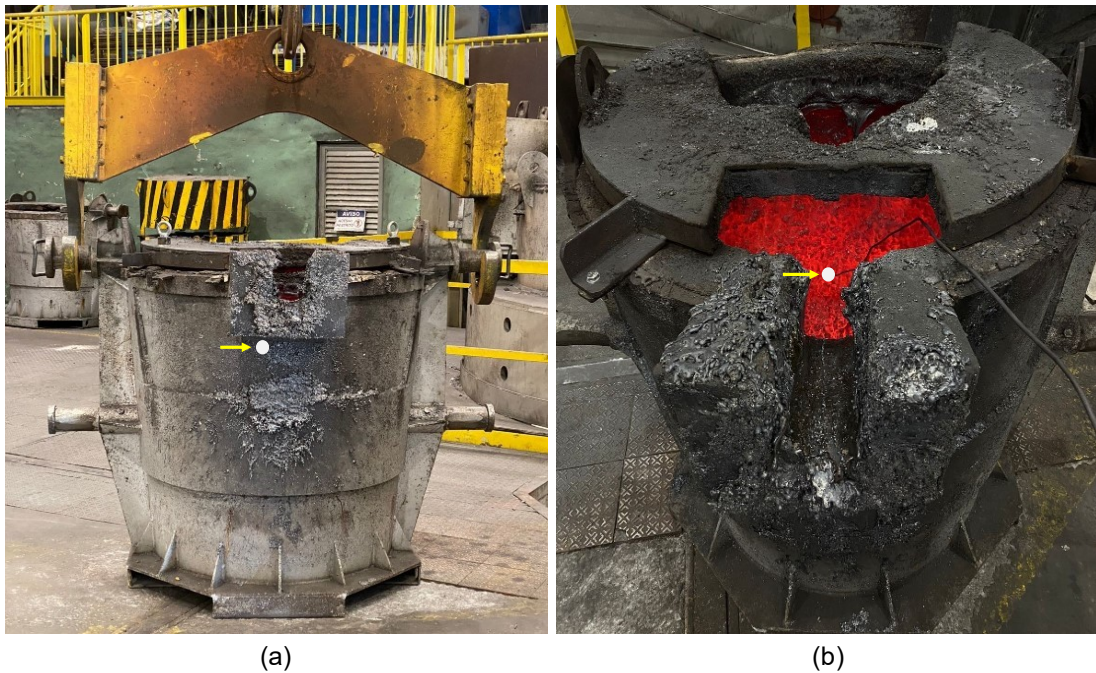
Os pontos de medida do interior da panela e da carcaça externa, bem como a distância de medida foram mantidos padronizados em todas as medições. A figura 13 ilustra os momentos de medição inicial (a) e final (b) do metal dentro da panela e a figura 14 ilustra os pontos de tomada de temperatura da carcaça da panela (a) e o local de tomada de temperatura do refratário (b).

**Figura 13 - Momentos de medição do metal no interior da panela. (a) Temperatura inicial; (b) Temperatura final.**



Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 14 - Pontos de tomada de temperatura. (a) Carcaça; (b) Refratário da panela.**



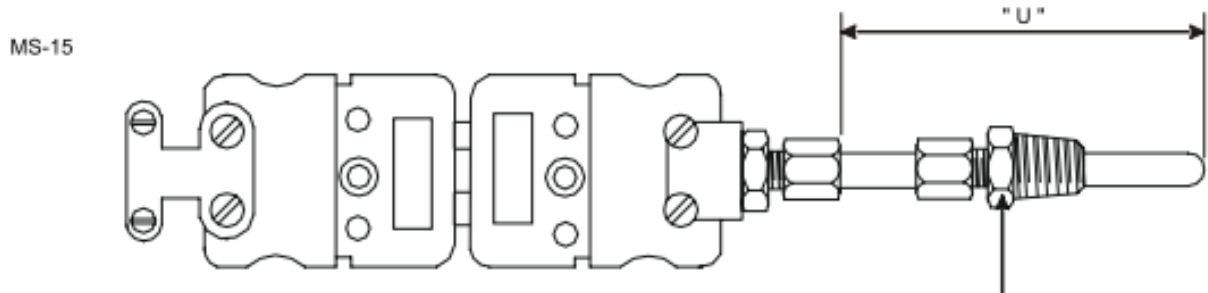
Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.1.2 Instrumentos utilizados para medição da temperatura

Para a medição no interior da panela, foi utilizado um termopar tipo K fabricado pela empresa Ecil. Esse termopar é resistente a oxidação, tem uma faixa de utilização de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $1260^{\circ}\text{C}$  e tem um erro de  $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ . Em conjunto com esse termopar, foi utilizado um *data logger* industrial da empresa Novus, esse *data logger* foi calibrado

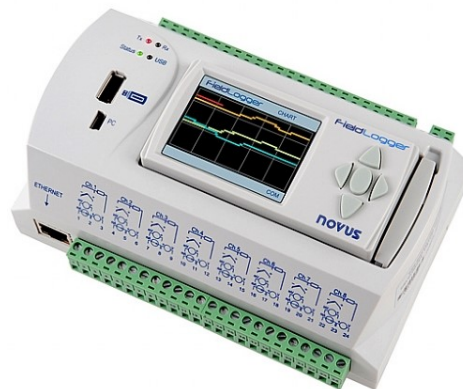
para o termopar escolhido e feito o acompanhamento contínuo da temperatura durante os momentos de panela vazia e em espera. As figuras 15 e 16 ilustram o termopar tipo k e o *data logger*, respectivamente.

**Figura 15 - Termopar tipo K**



Fonte: [www.ecil.com.br](http://www.ecil.com.br) (2023).

**Figura 16 - Data logger**



Fonte: [www.novus.com.br](http://www.novus.com.br) (2023).

Para obter as temperaturas externa da carcaça, foi utilizado um pirômetro digital portátil, com faixa de medições de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $550^{\circ}\text{C}$  e um erro de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , da empresa Homis. A emissividade do pirômetro infravermelho foi ajustada para 0,95 e foi realizado a calibração antes do início dos testes. A figura 17 ilustra o pirômetro infravermelho utilizado.

**Figura 17 - Pirômetro digital portátil.**



Fonte: [www.homis.com.br](http://www.homis.com.br) (2023).

Por fim, os valores medidos do metal líquido no interior da panela foram obtidos através de um pirômetro portátil e um termopar de imersão do tipo S com tubo de proteção de papelão, ambos os produtos da empresa Italterm. O pirômetro portátil e o termopar contêm faixas de utilização de 600°C a 1700°C, o termopar é um sensor descartável e contém um erro de medição de  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ . As figuras 18 e 19 ilustram o pirômetro portátil e o termopar tipo S com proteção de tubo de papelão, respectivamente.

**Figura 18 - Pirômetro portátil.**



Fonte: [www.italterm.com](http://www.italterm.com) (2023).



**Figura 19 - Termopar tipo S com tubo de proteção de papelão.**



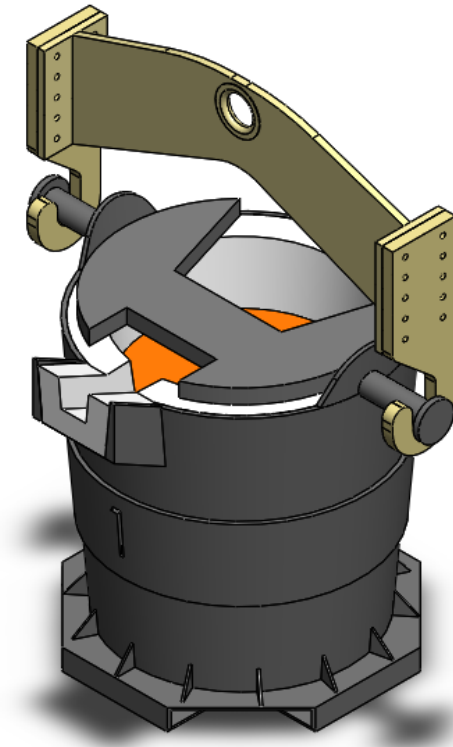
Fonte: [www.italterm.com](http://www.italterm.com) (2023).

### **3.2 Modelamento matemático da panela de transferência**

As panelas de transferência têm como principal função o transporte do metal do forno canal até o forno vazador, sua capacidade útil é de 2,5 toneladas. Sua estrutura consiste em uma carcaça de aço carbono, responsável pela sustentação estrutural da panela, uma camada de massa refratária, responsável por suportar as altas temperaturas do ferro líquido, sem alterar suas propriedades físicas e químicas, e por fim uma tampa de aço carbono com revestimento de massa refratária. Todas as panelas existentes na fábrica são idênticas entre si e no momento da realização dos testes em fábrica, possuíam a mesma vida útil do refratário e dimensões.

Foi realizado o modelamento da panela de transferência, utilizando as dimensões da panela utilizada no atual processo, através do *software* Solidworks com intuito de visualizar adequadamente o objeto de estudo (figura 20).

**Figura 20 - Modelamento da panela de transferência de metal.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

A geometria da tampa da panela contém duas áreas de abertura, a área localizada na parte traseira é responsável pela entrada de metal do forno canal para a panela, já a área localizada na parte frontal é responsável pelo vazamento do metal no forno vazador. A área de proteção da tampa em relação a área superior da panela corresponde a 46,96% do total.

### 3.2.1 Considerações físicas

Para conhecer o comportamento térmico da panela, foram ajustados modelos matemáticos simplificados de transferência de calor conforme as características da panela, nos momentos em que ela estava cheia de metal e vazia. As transferências de calor consideradas foram as seguintes:

- Condução de calor pelo refratário e carcaça da panela;
- Convecção e radiação pela chapa metálica e o ar ambiente;
- Convecção e radiação pelo interior da panela, pela face quente do refratário;
- Convecção e radiação do metal quente pela superfície superior da panela.

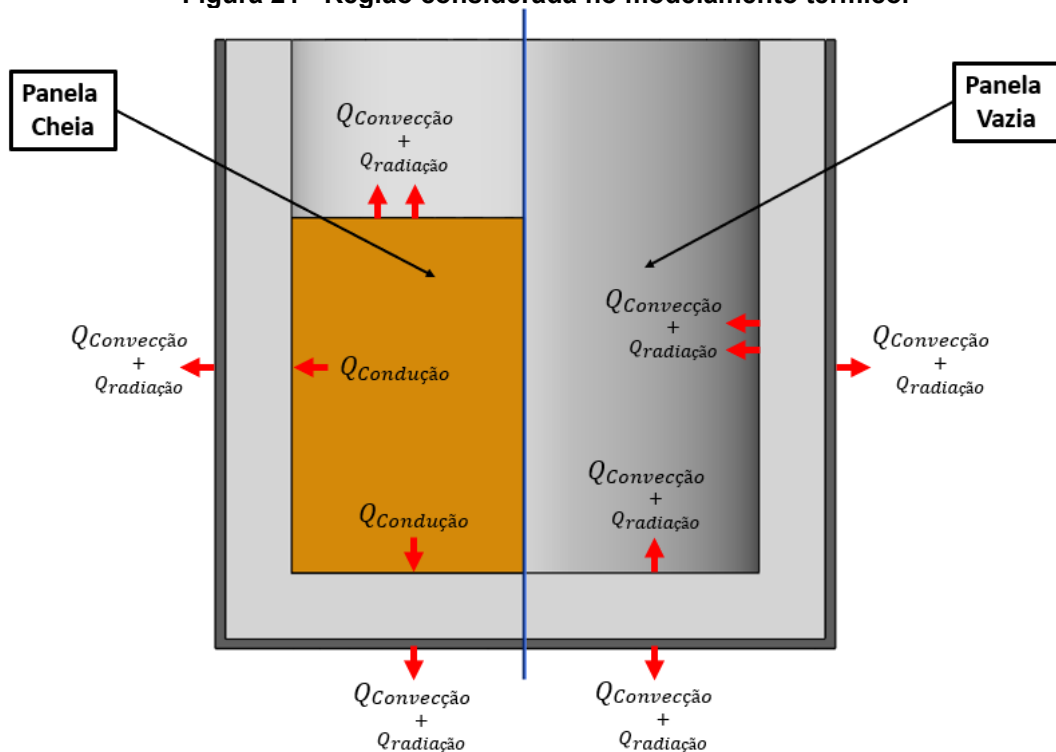
O modelo térmico escolhido para o trabalho foi desenvolvido utilizando as equações de condução, convecção e radiação em regime estacionário e unidimensional.

### 3.2.2 Condições de contorno

As condições de contorno da panela de transferência utilizadas para os cálculos foram os seguintes:

- O formato da panela foi considerado cilíndrico (figura 21);
- A espessura do refratário foi considerada constante e com dimensão de refratário novo;
- Para simplificar os cálculos, a interseção do fundo da panela com a parede lateral não foi modelada;
- Foi desconsiderada a camada de escória formada na parede lateral e fundo da panela, pois é realizado a limpeza da panela diariamente;
- A transferência de calor pelo fundo da panela foi considerada retangular e cilíndrica pela parede lateral.

Figura 21 - Região considerada no modelamento térmico.



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.2.3 Equações do modelo térmico

Para o cálculo das transferências de calor durante o ciclo das painéis de transferência, foram necessários os seguintes dados para a modelagem matemática, vistos na tabela 1:

**Tabela 1 - Dimensões da painél de transporte e algumas propriedades físicas de interesse.**

Propriedade	Grandeza
Coefficiente de convecção da chapa metálica para o ambiente (h ch-ar)	6,5 W/m <sup>2</sup> K
Temperatura ambiente (T <sup>∞</sup> )	308 K
Diâmetro interno da painél (Di)	920 mm
Diâmetro externo da painél (De)	1220 mm
Altura da painél (H)	1200 mm
Área exposta efetiva da carcaça (Aec)	4,79 m <sup>2</sup>
Área efetiva da face quente (Afq)	1,99 m <sup>2</sup>
Volume da carcaça (Vc)	0,15 m <sup>3</sup>
Volume do refratário (Vr)	0,56 m <sup>3</sup>
Densidade do ferro fundido cinzento	6.880 kg/m <sup>3</sup>
Espessura da carcaça	19,05 mm
Espessura do refratário	130 mm

Fonte: Autoria própria (2023).

As equações de transferência de calor em regime estacionário utilizadas no modelo térmico das painéis, no ciclo de painél cheia de metal, são descritas a seguir:

**Taxa de transferência de calor por condução pela parede lateral do refratário:**

$$q_{parede,pc} = \frac{T_{fq} - T_{ch}}{\frac{\ln \frac{R_1}{R_i}}{2\pi L K_r} + \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi L K_c}} \quad [4]$$

Onde:

$q_{parede,pc}$  = Taxa de transferência de calor pela parede lateral [W];

$T_{fq}$  = Temperatura na face quente [K];

$T_{ch}$  = Temperatura na chapa metálica [K];

$R_1$  = Raio até a face interna do refratário [m];

$R_2$  = Raio externo da carcaça [m];

$R_i$  = Raio interno do refratário [m];

$L$  = Espessura [m];

$K_r$  = Coeficiente de condutividade térmica do refratário [W/mK];

$K_c$  = Coeficiente de condutividade térmica da chapa metálica [W/mK]

**Taxa de transferência de calor por condução pelo fundo do refratário:**

$$q_{fundo,pc} = \frac{T_{fq} - T_{ch}}{\frac{L_r}{Af \cdot K_r} + \frac{L_{ch}}{Af \cdot K_c}} \quad [5]$$

Onde:

$q_{fundo,pc}$  = Taxa de transferência de calor pelo fundo da panela [W];

$T_{fq}$  = Temperatura na face quente [K];

$T_{ch}$  = Temperatura na chapa metálica [K];

$L_r$  = Espessura do refratário [m];

$L_{ch}$  = Espessura da chapa metálica [m];

$K_r$  = Coeficiente de condutividade térmica do refratário [W/mK];

$K_c$  = Coeficiente de condutividade térmica da chapa metálica [W/mK];

$Af$  = Área do fundo da carcaça

**Taxa de transferência de calor pela superfície superior da panela:**

**a) Convecção:**

$$q_{superior,c} = h_{m-ar} \cdot (T_m - T_{\infty,i}) \cdot A_{sup} \quad [6]$$

$$h_{m-ar} = \frac{Nu \cdot K_{ar}}{H_m} + \frac{Nu \cdot K_{ar}}{\phi_i} \quad [7]$$

Onde:

$q_{superior}$  = Taxa de transferência de calor pela superfície superior da panela [W];

$T_m$  = Temperatura do metal [K];

$T_{\infty,i}$  = Temperatura ambiente interna [K];

$A_{sup}$  = Área do metal na superfície superior [m<sup>2</sup>];

$h_{m-ar}$  = Coeficiente de convecção do metal para o ar no interior da panela [W/m<sup>2</sup>K];

$H_m$  = Altura do metal na panela [m];

$K_{ar}$  = Coeficiente de condutividade térmica do ar dentro da panela [W/mK];

$\phi_i$  = Diâmetro interno da panela [m];

$Nu$  = Número de Nusselt.

### b) Radiação

$$q_{superior,r} = \sigma \cdot \varepsilon_m \cdot A_{sup} \cdot (T_m^4 - T_{\infty,i}^4) \quad [8]$$

Onde:

$q_{superior}$  = Taxa de transferência de calor pela superfície superior da panela [W];

$T_m$  = Temperatura do metal [K];

$A_{sup}$  = Área do metal na superfície superior [m<sup>2</sup>];

$\varepsilon_m$  = Emissividade do metal na panela [0,28];

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ ) [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>];

### Taxa de transferência de calor pela chapa metálica da panela:

#### a) Convecção:

$$q_{ch,c-pc} = h_{ch-ar} \cdot (T_{ch} - T_{\infty}) \cdot A_{ec} \quad [9]$$

Onde:

$q_{ch,c}$  = Taxa de transferência de calor pela chapa metálica da panela [W];

$T_{ch}$  = Temperatura da chapa metálica [K];

#### b) Radiação

$$q_{ch,r-pc} = \frac{\sigma \cdot (T_{ch}^4 - T_{\infty}^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{ch}} + \frac{1}{\varepsilon_{ar}} - 1\right)} \quad [10]$$

Onde:

$q_{ch,r}$  = Taxa de transferência de calor pela chapa metálica da panela [W];

$T_{ch}$  = Temperatura da chapa metálica [K];

$\varepsilon_{ar}$  = Emissividade do ar (1,00);

$\varepsilon_m$  = Emissividade da chapa metálica (0,95);

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ ) [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>];

Para o modelo térmico das panelas no ciclo de panela vazia, as equações de transferência de calor em regime estacionário utilizadas são descritas a seguir:

**Taxa de transferência de calor pela face quente do refratário da panela:**

**a) Convecção:**

$$q_{fq,c-pv} = h_{r-ar} \cdot (T_{fq} - T_{\infty,i}) \cdot A_{sup} \quad [11]$$

$$h_{r-ar} = \frac{Nu \cdot Kar}{H_r} + \frac{Nu \cdot Kar}{\phi_i} \quad [12]$$

Onde:

$q_{fq,c-pv}$  = Taxa de transferência de calor pela face quente da panela vazia [W];

$T_{fq}$  = Temperatura da face quente do refratário [K];

$T_{\infty,i}$  = Temperatura ambiente interna [K];

$A_{sup}$  = Área do metal na superfície superior [m<sup>2</sup>];

$H_r$  = Altura efetiva da face quente do refratário [m];

$Kar$  = Coeficiente de condutividade térmica do ar dentro da panela [W/mK];

$\phi_i$  = Diâmetro interno da panela [m];

$h_{r-ar}$  = Coeficiente convectivo do refratário para o ar [W/m<sup>2</sup>K];

$Nu$  = Número de Nusselt.

**b) Radiação**

$$q_{fq,r-pv} = \phi_i \cdot \epsilon_r \cdot A_{fq} \cdot (T_m^4 - T_{\infty}^4) \quad [13]$$

Onde:

$q_{fq,r-pv}$  = Taxa de transferência de calor pela face quente da panela vazia [W];

$T_r$  = Temperatura do metal [K];

$A_{fq}$  = Área do metal na superfície superior [m<sup>2</sup>];

$\epsilon_r$  = Emissividade do refratário [0,95];

$Kar$  = Coeficiente de condutividade térmica do ar dentro da panela [W/mK];

$\phi_i$  = Diâmetro interno da panela [m]

**Taxa de transferência de calor por condução pela parede lateral do refratário:**

$$q_{parede,pv} = \frac{T_{fq} - T_{ch}}{\frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{2\pi L K_r} + \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi L K_c}} \quad [14]$$

Onde:

$q_{parede,pv}$  = Taxa de transferência de calor pela parede lateral da panela vazia [W];

$T_{fq}$  = Temperatura na face quente [K];

$T_{ch}$  = Temperatura na chapa metálica [K];

$R1$  = Raio até a face interna do refratário [m];

$R2$  = Raio externo da carcaça [m];

$Ri$  = Raio interno do refratário [m];

$L$  = Espessura [m];

$Kr$  = Coeficiente de condutividade térmica do refratário [W/mK];

$Kc$  = Coeficiente de condutividade térmica da chapa metálica [W/mK]

**Taxa de transferência de calor por condução pelo fundo do refratário:**

$$q_{fundo,pv} = \frac{T_{fq} - T_{ch}}{\frac{L_r}{Af \cdot Kr} + \frac{L_{ch}}{Af \cdot Kc}} \quad [15]$$

Onde:

$q_{fundo,pv}$  = Taxa de transferência de calor pelo fundo da panela vazia [W];

$T_{fq}$  = Temperatura na face quente [K];

$T_{ch}$  = Temperatura na chapa metálica [K];

$L_r$  = Espessura do refratário [m];

$L_{ch}$  = Espessura da chapa metálica [m];

$Kr$  = Coeficiente de condutividade térmica do refratário [W/mK];

$Kc$  = Coeficiente de condutividade térmica da chapa metálica [W/mK]

**Taxa de transferência de calor pela chapa metálica da panela:**

**a) Convecção:**

$$q_{ch,c-pv} = h_{ch-ar} \cdot (T_{ch} - T_{\infty}) \cdot A_{ec} \quad [16]$$

Onde:

$q_{ch,c-pv}$  = Taxa de transferência de calor pela chapa metálica da panela [W];

$T_{ch}$  = Temperatura da chapa metálica [K];



## b) Radiação

$$q_{ch,r-pv} = \frac{\sigma \cdot (T_{ch}^4 - T_{\infty}^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{ch}} + \frac{1}{\varepsilon_{ar}} - 1\right)} \quad [17]$$

Onde:

$q_{ch,r-pv}$  = Taxa de transferência de calor pela chapa metálica da panela [W];

$T_{ch}$  = Temperatura da chapa metálica [K];

$\varepsilon_{ar}$  = Emissividade do ar (1,00);

$\varepsilon_m$  = Emissividade da chapa metálica (0,95);

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ ) [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>];

A fórmula abaixo é a taxa de transferência de calor global para a panela, no momento de panela cheia e panela vazia:

$$q_{total} = q_{parede,pc} + q_{fundo,pc} + q_{superior,c} + q_{superior,r} + q_{ch,c-pc} + q_{ch,r-pc} + q_{parede,pv} + q_{fundo,pv} + q_{fq,c-pv} + q_{fq,r-pv} + q_{ch,c-pv} + q_{ch,r-pv} \quad [18]$$

Onde:

$pv$  = Panela vazia;

$pc$  = Panela cheia.

## 3.3 Metodologia de análise dos dados obtidos

### 3.3.1 Metodologia Seis Sigma

Os dados obtidos durante as etapas do DMAIC foram analisados com o auxílio do *software* estatístico JMP. As análises realizadas através dos dados obtidos durante os testes, serão mostrados na seção 4

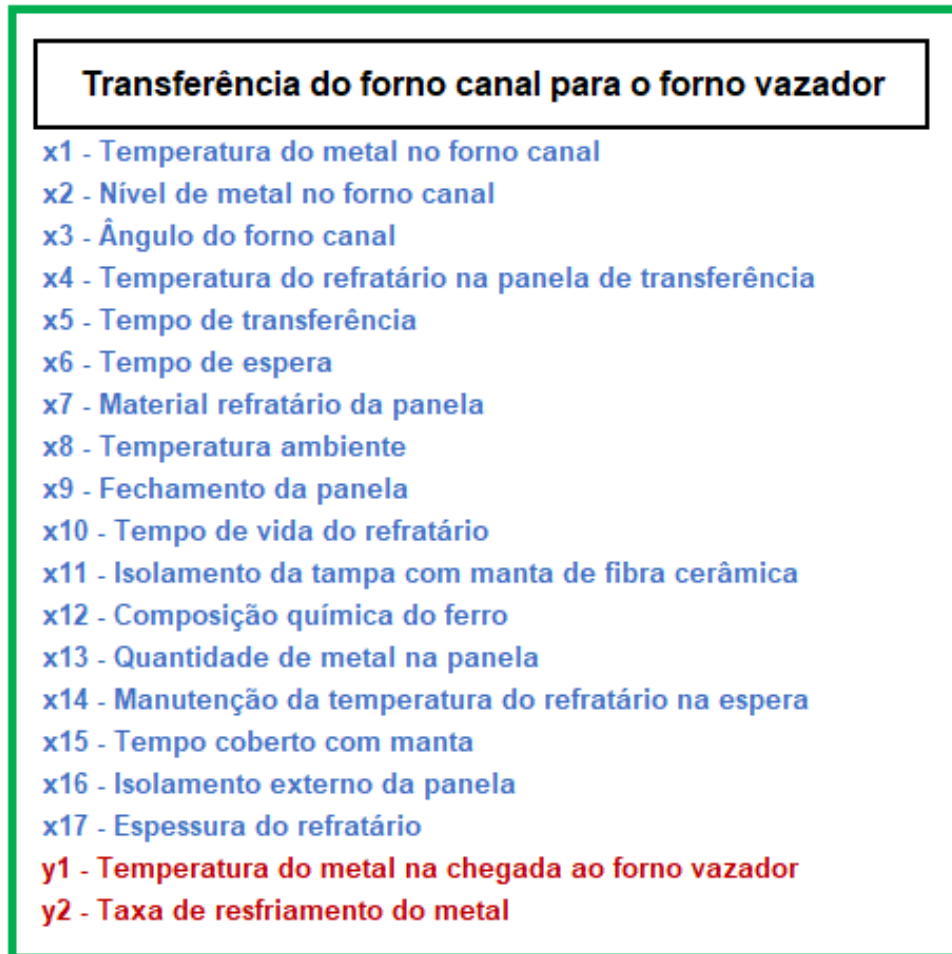
#### 3.3.1.1 Define (definir)

Para esse estudo, o problema em questão é verificar a perda térmica que ocorre durante o processo de transferência de metal e a meta desse projeto é reduzir essa perda e conseqüentemente reduzir a temperatura de manutenção do metal no forno canal.

### 3.3.1.2 Measure (medir)

Nessa etapa foram definidos os principais fatores de relevância “x” no determinado processo e quais as respostas “y” que desejamos obter. A figura 22 ilustra as variáveis “x” e “y” listadas para o processo de transferência de metal.

Figura 22 - Variáveis de processo.



Fonte: Autoria própria (2023).

Após determinar as variáveis do processo, foi realizado uma seleção de quais poderiam ser medidas, controladas, fixadas e monitoradas. A tabela 2 demonstra as variáveis de processo listadas, qual o nível de controle e qual a tomada de decisão para a coleta de dados.

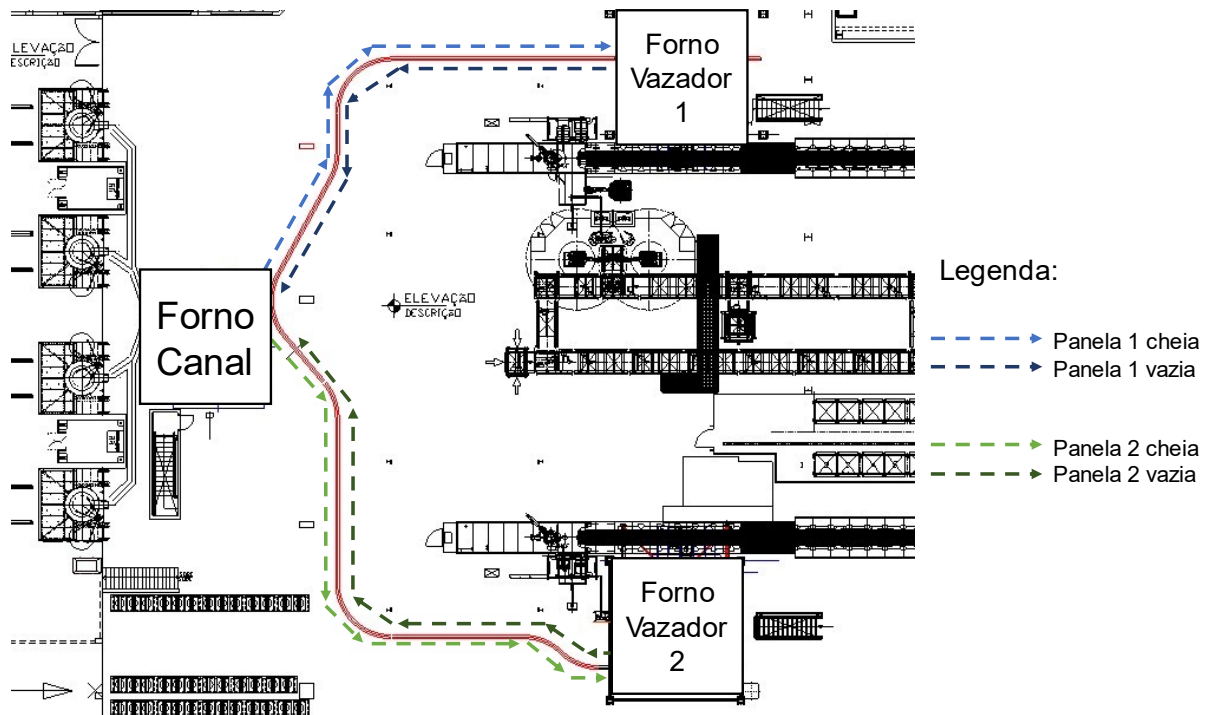
**Tabela 2 - Variáveis de processo e matriz de decisão.**

Fonte de variação / Variável	Habilidade de controle	Decisão
Temperatura do metal no forno canal	Baixa	Monitorar
Nível de metal no forno canal	Baixa	Ignorar
Ângulo de inclinação do forno canal	Baixa	Ignorar
Temperatura do refratário na panela de transferência	Baixa	Monitorar
Tempo de transferência	Baixa	Monitorar
Tempo de espera	Baixa	Monitorar
Material do refratário da panela	Alta	Ignorar
Temperatura ambiente	Baixa	Fixar
Fechamento da panela de transferência	Baixa	Controlar
Isolamento da boca da panela com manta	Alta	Controlar
Tempo de vida do refratário	Baixa	Fixar
Composição química do ferro fundido	Alta	Fixar
Quantidade de metal na panela	Alta	Controlar
Manutenção da temperatura do refratário na espera	Alta	Ignorar
Tempo coberto com manta	Alta	Controlar
Espessura do refratário	Alta	Fixar
Isolamento externo da panela	Baixa	Ignorar

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Foram realizados testes em fábrica com o objetivo de coletar dados do processo atual e foram acompanhadas 50 corridas das duas linhas de produção existentes na fábrica, as variáveis cuja tomada de decisão foi de “Monitorar” foram o alvo do experimento. A figura 23 ilustra o caminho percorrido por cada panela.

**Figura 23 - Caminho percorrido pelas placas durante a transferência de metal.**



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.3.1.3 Analyze (analisar)

Os dados obtidos em fábrica foram utilizados para o cálculo das transferências de calor listadas na seção 3.2, o objetivo desse cálculo foi correlacionar as perdas térmicas teóricas com as observadas empiricamente e calcular a redução da queda de temperatura com possíveis melhorias no projeto.

As informações coletadas foram processadas e analisadas no JMP, foi realizado uma regressão linear de múltiplas variáveis, com o objetivo de quantificar estatisticamente quais as variáveis com maior impacto nas respostas alvo.

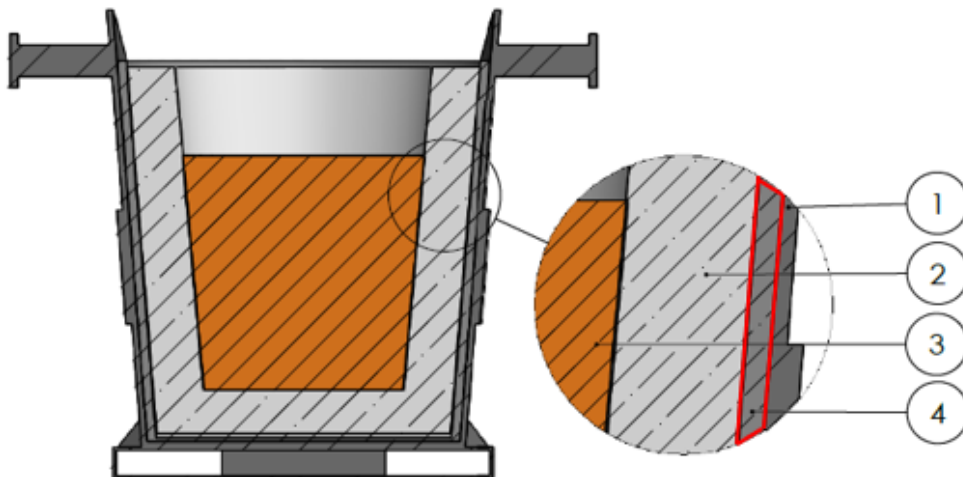
### 3.3.1.4 Improve (melhorar)

O experimento realizado nessa etapa foi o DOE, as variáveis listadas como “controlar” na tabela 2 foram as variáveis alvo dessa etapa. O objetivo do experimento era de entender qual a relevância das melhorias testadas, em diferentes tempos e etapas do processo. Os testes foram concentrados na placa que alimenta o forno vazador 2, pois nesse forno são produzidos itens com maiores temperaturas de vazamento (1430 °C) e pelo tempo de transferência maior.

As melhorias para o projeto foram concentradas em conservar a energia absorvida pelo refratário durante as corridas e melhorar o isolamento da superfície superior da panela. Para isso foram sugeridas as seguintes alterações físicas:

- Adicionar uma camada de material isolante entre a camada externa do refratário e a camada interna da carcaça da panela, para auxiliar na redução da taxa de transferência de calor por condução do refratário para a carcaça (figura 24);
- Melhorar a eficiência da tampa da panela, para auxiliar na redução da taxa de transferência de calor por convecção e radiação (figura 25), da superfície superior do metal líquido durante a fase de panela cheia e da face quente do refratário durante a fase de panela vazia;
- diminuir o volume de metal líquido transferido por corrida e dessa forma reduzir o tempo da panela em espera sem metal, isso pode ser feito aumentando-se a espessura do refratário na panela ou diminuindo a quantidade de metal a ser vazado dentro da panela.

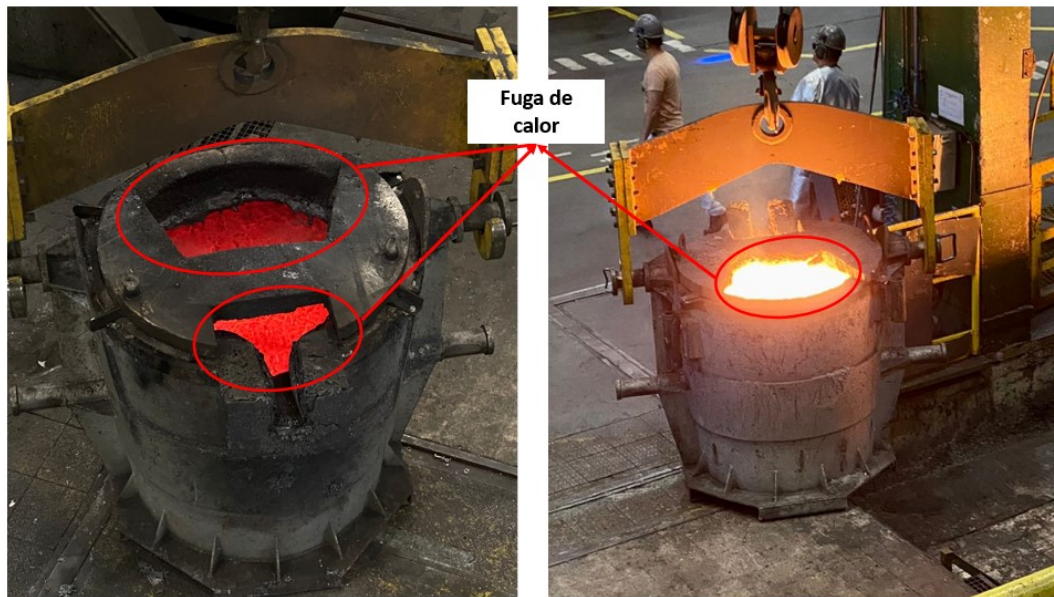
**Figura 24 – Esboço do projeto de inclusão de material isolante na panela.**



Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA
1	Carcaça panela
2	Refratario
3	Ferro
4	Material super isolante

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Figura 25 - Áreas de fuga de calor pela tampa da panela.

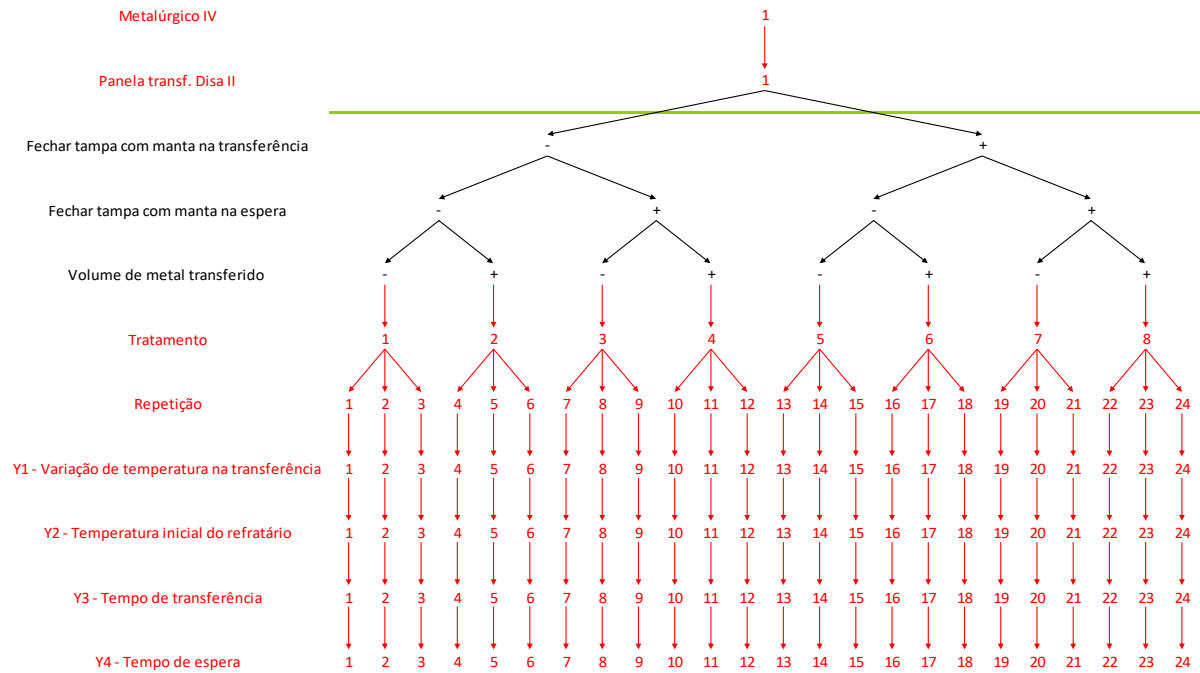


Fonte: Autoria própria (2023).

A inclusão de uma camada de material isolante e o aumento na espessura do refratário não foram alterações possíveis de serem feitas no momento dos testes, ambas as panelas estavam com o refratário novo, impossibilitando a alteração. O teste com menor volume de metal transferido foi com a espessura atual do refratário e controlado pelo peso de carregamento

A figura 26 ilustra a árvore de amostragem DOE, o sinal de + representa o aumento/inclusão da variável testada e o sinal de - representa a diminuição/ausência da variável testada.

**Figura 26 - Árvore de amostragem do DOE.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Para esse experimento foram acompanhadas 24 corridas, com 8 tratamentos distintos e 3 repetições para cada tratamento, as corridas foram realizadas com ordem aleatória dos tratamentos.

As variáveis acompanhadas foram:

- Fechar tampa com manta na transferência: Simular o fechamento de uma tampa na superfície superior da panela, quando a panela estava cheia de metal;
- Fechar tampa com manta na espera: Simular o fechamento de uma tampa na superfície superior da panela, quando a panela estava vazia e aguardando em espera pela próxima corrida;
- Volume de metal transferido: Diminuir ou aumentar o volume de metal transferido impacta na frequência de corridas em uma hora, diminuindo o tempo de espera sem metal na panela. Para esse experimento foi realizado testes com o peso atual da panela (2500 kg) e com peso reduzido (2000 kg).

A manta utilizada para cobrir a tampa da panela é composta por fibras de cerâmica flexíveis, longas e entrelaçadas. A tabela 3 resume as principais

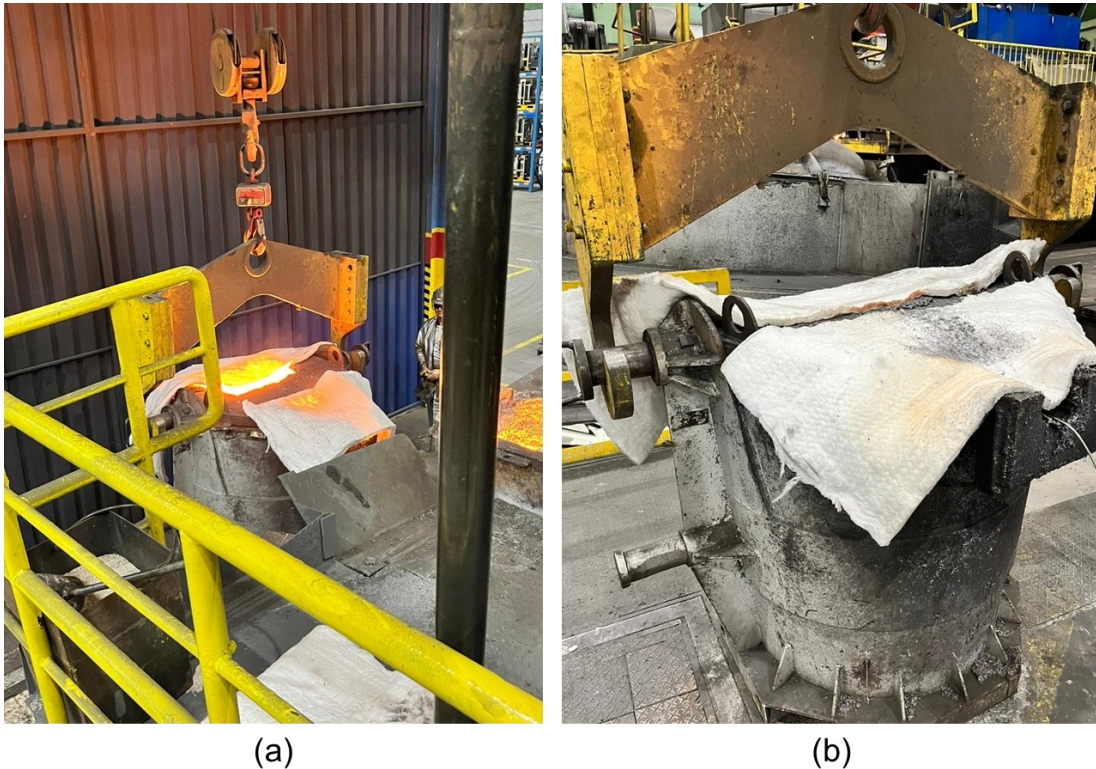
características da manta utilizada e os momentos do processo em que foram utilizadas as mantas nos testes são vistos na figura 27 (a) e (b).

**Tabela 3 - Propriedade da manta de fibra cerâmica.**

Produto	Composição química	Condutividade térmica [W/mK]			Temperatura máxima [°C]
		923 K	1145 K	1367 K	
Manta de fibra cerâmica Max Wool HPS	Alumina e sílica	0,20	0,31	0,45	1260

Fonte: Adaptado catálogo Ibar (2023).

**Figura 27 - Fechamento com manta da panela de transferência. (a) manta na transferência; (b) manta na espera.**



Fonte: Autoria própria (2023).

Após o período de testes em fábrica, os dados coletados foram analisados e processados no JMP, com o objetivo de correlacionar os cálculos obtidos na literatura com os dados observados empiricamente no experimento.



Por fim, a última fase dessa etapa foi a de validação dos dados, foram acompanhadas 10 corridas sequenciais, com as melhorias sugeridas dos testes de DOE (adição de manta de fibra cerâmica durante toda a etapa da transferência de metal). Nessa fase os dados coletados foram novamente analisados e processados no JMP e comparados com os dados calculados de forma teórica.

#### 3.3.1.5 Control (controlar)

A última etapa no presente projeto consiste na solução definitiva de uma nova tampa de fechamento da panela, que atenda aos requisitos de processo, diminuição da temperatura de banho de metal no forno canal e registro em norma interna pela empresa das alterações mecânicas e de processo na atividade de transferência de metal.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados dos dados de temperatura no processo atual (medir)

Os resultados obtidos das medições de temperatura foram adicionados em uma planilha do Excel. A tabela 4 apresenta uma parte dos dados provenientes da etapa de medição da seção 3.3.2:

Tabela 4 - Dados de medição no processo atual.

(Continua)

Identificação da panela	Número da corrida	Refratário inicial [°C]	Forno canal [°C]	Panela inicial [°C]	Tempo de transferência [min]	Panela final [°C]	Refratário final [°C]
2	25	633	1494	1468	3,60	1444	822
2	24	523	1499	1465	3,37	1446	812
2	23	577	1498	1468	4,58	1443	826
2	22	499	1500	1473	3,70	1447	794
2	21	688	1506	1479	3,97	1454	884
2	20	641	1498	1473	3,70	1447	886
2	19	650	1497	1472	3,50	1446	872
2	18	665	1494	1467	3,67	1449	852
2	17	608	1492	1460	4,16	1435	868
2	16	528	1486	1464	3,10	1440	861
2	15	514	1495	1468	3,35	1433	853
2	14	481	1495	1460	3,67	1434	834
2	13	812	1498	1455	4,00	1435	878
2	12	724	1492	1457	4,97	1433	840
2	11	558	1492	1460	4,33	1426	823
2	10	550	1494	1458	3,20	1431	846
2	9	675	1486	1455	3,50	1431	811
2	8	652	1505	1472	3,67	1453	853
2	7	677	1494	1485	3,50	1455	863
2	6	799	1494	1481	3,83	1454	868
2	5	497	1492	1477	2,92	1450	801
2	4	485	1505	1467	3,72	1445	741
2	3	641	1501	1473	3,57	1450	780
2	2	543	1504	1471	3,17	1436	800
2	1	625	1504	1464	5,37	1440	838
1	25	697	1494	1464	2,84	1452	881
1	24	833	1498	1478	2,91	1466	933
1	23	791	1499	1471	2,88	1458	921
1	22	851	1504	1474	2,68	1465	915
1	21	745	1504	1474	2,22	1461	919
1	20	848	1504	1483	2,73	1468	887
1	19	831	1504	1483	2,40	1468	909
1	18	662	1504	1475	2,57	1456	903

Tabela 4 - Dados de medição no processo atual.

(Conclusão)

Identificação da panela	Número da corrida	Refratário inicial [°C]	Forno canal [°C]	Panela inicial [°C]	Tempo de transferência [min]	Panela final [°C]	Refratário final [°C]
1	17	544	1500	1473	2,53	1449	867
1	16	754	1505	1480	2,42	1466	890
1	15	653	1492	1474	2,23	1449	859
1	14	508	1492	1468	2,95	1431	835
1	13	738	1501	1476	2,57	1463	886
1	12	805	1501	1478	3,07	1462	902
1	11	839	1497	1485	2,45	1470	882
1	10	692	1497	1482	2,40	1467	879
1	9	580	1497	1473	2,53	1454	872
1	8	867	1512	1488	2,62	1472	895
1	7	558	1512	1479	2,88	1454	867
1	6	545	1500	1459	2,77	1439	909
1	5	685	1500	1476	2,23	1455	874
1	4	631	1500	1468	2,72	1448	847
1	3	645	1500	1470	2,75	1455	859
1	2	508	1500	1469	2,72	1445	793
1	1	645	1500	1475	2,67	1452	821

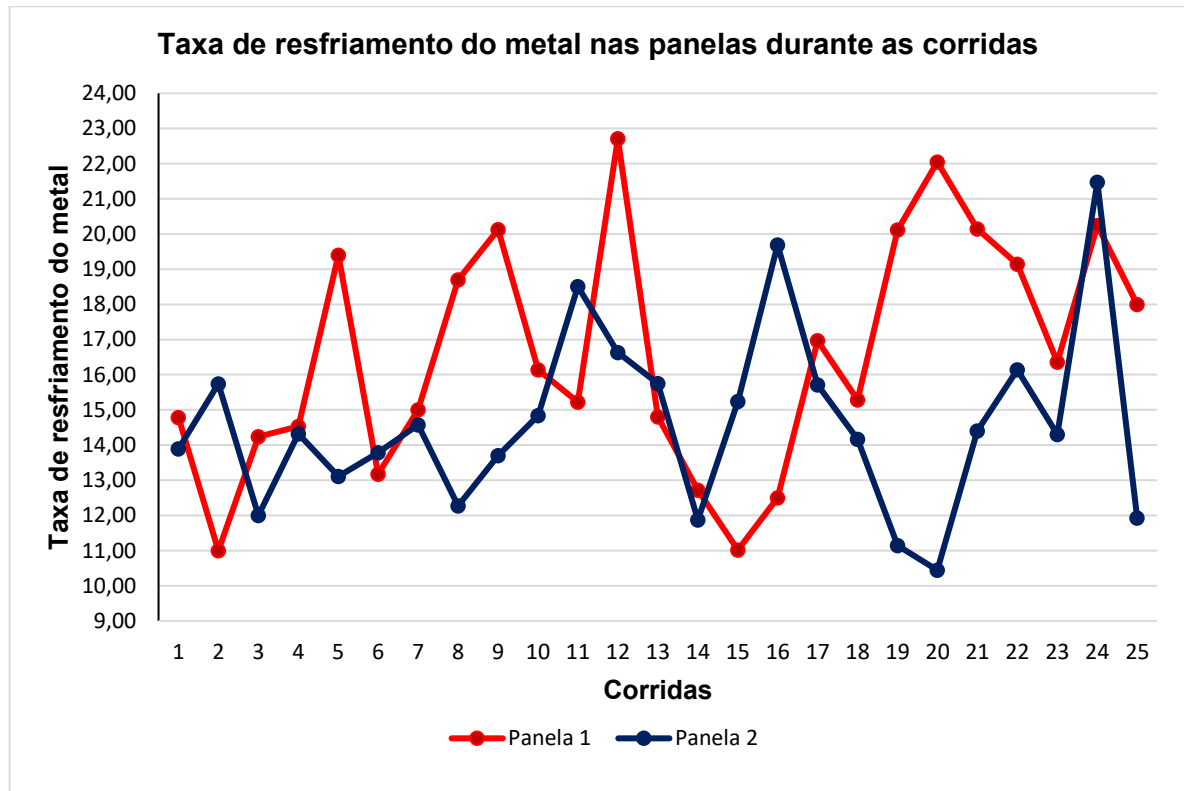
Fonte: Autoria própria (2023).

Iniciando a análise com base nos dados obtidos na tabela 4, os valores de temperatura final do metal na panela de transferência são altamente influenciados pelo tempo de transferência da corrida, dessa forma, optou-se por utilizar a taxa de resfriamento para minimizar a influência do tempo em corridas cujo transporte foi realizado acima do tempo normal. A equação [21] demonstra como foi obtida a taxa de resfriamento.

$$\text{Taxa de resfriamento} = \frac{[\text{Forno canal} - \text{Panela final}]}{\text{Tempo de transferência}} \quad [21]$$

Os valores da taxa de resfriamento tiveram variação entre 10,44 °C/min e 22,71°C/min durante as 50 corridas observadas. O gráfico abaixo, mostrado na figura 28, ilustra as taxas de resfriamento durante as corridas:

Figura 28 - Taxas de resfriamento do metal durante as corridas observadas nas painelas 1 e 2.



Fonte: Autoria própria (2023).

As diferenças entre as taxas de resfriamento do metal nas corridas durante a transferência, observadas na figura 28, podem estar relacionadas as variáveis de processo que serão comentadas neste trabalho, como a temperatura inicial do refratário e a temperatura do metal no forno canal.

Um resumo dos valores médios dos demais dados coletados é mostrado na tabela 5:

Tabela 5 - Dados médios observados durante a coleta de dados.

F	Panela 1	Panela 2
Temperatura inicial do refratário [°C]	698	610
Temperatura do metal no forno canal [°C]	1501	1497
Temperatura final do metal na panela [°C]	1457	1442
Tempo de transferência [min]	2,70	3,53
Taxa de resfriamento [°C/min]	16,6	14,6
Queda de temperatura entre as medições do forno canal e na panela final [°C]	44	55

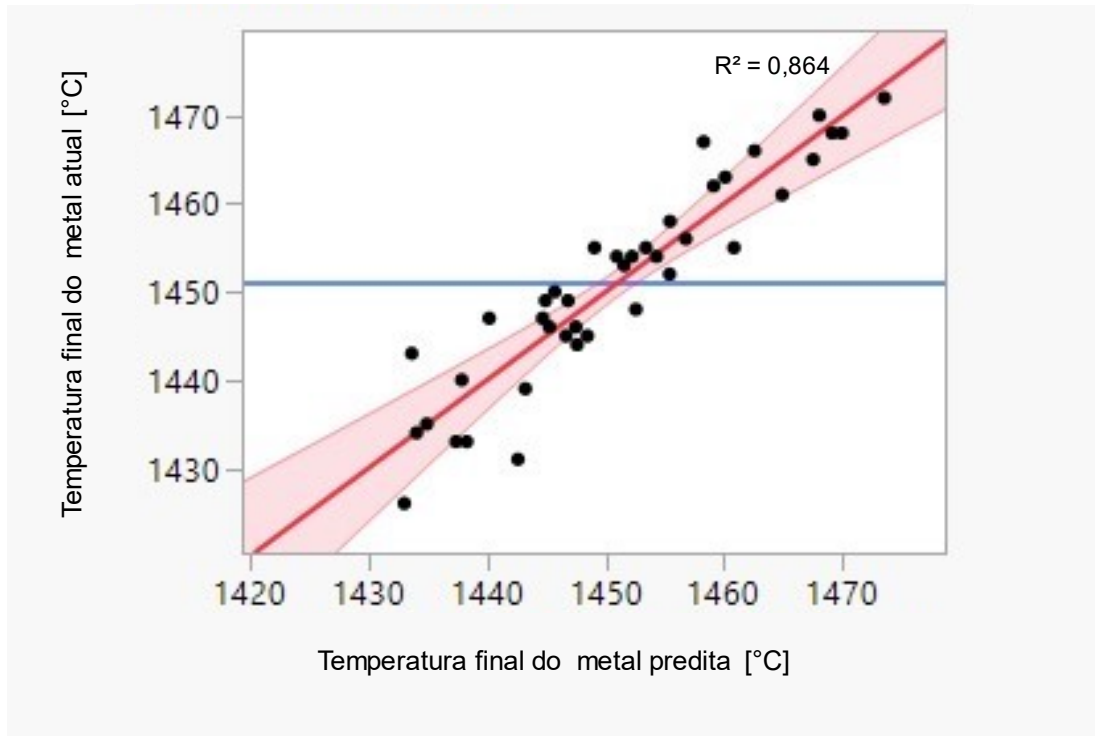
Fonte: Autoria própria (2023).

Os valores observados na tabela 5 permitem realizar as seguintes análises:

- A taxa de resfriamento é maior na panela 1, entretanto a queda de temperatura total é maior na panela 2. Essa maior queda se pode estar associada a um maior tempo de transferência e uma menor temperatura inicial do refratário;
- A temperatura inicial do refratário é menor na panela 2, isso pode ser explicado pelo maior tempo em espera sem metal, conseqüentemente uma maior troca de calor entre o ambiente e o interior da panela;

Para uma análise mais aprofundada das variáveis medidas e da sua influência na temperatura final do metal e na taxa de resfriamento, foi utilizado o *software* JMP e realizado uma regressão linear de múltiplas variáveis. A partir das variáveis medidas, o software calculou a temperatura final do metal predita e qual a influência de cada parâmetro na sua determinação. A figura 29 ilustra o gráfico de dispersão dos pontos de temperatura final atual e da temperatura final predita.

**Figura 29 - Dispersão dos pontos de temperatura final do metal atual com a temperatura final do metal predita.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

O ajuste linear da linha de tendência ficou com um  $R^2$  de 0,864 para a dispersão dos dados de temperatura final do metal, indicando que a resposta predita pela linearização dos dados tem um bom nível de confiabilidade com a resposta exata. A tabela 6 representa a estimativa da influência das variáveis medidas na temperatura final do metal.

**Tabela 6 - Estimativa da influência das variáveis medidas.**

<b>Variáveis medidas</b>	<b>Efeito</b>	<b>Probabilidade &gt; [t]</b>
Temperatura inicial do refratário	0,0732	<,0001*
Tempo de transferência	-10,3262	<,0001*
Temperatura do forno canal	0,5137	0,0057*
Temperatura final do refratário	-0,0673	0,0318*
Panela utilizada	4,5628	0,1719

**Fonte: Autoria própria (2023).**

A partir da tabela 6 é possível realizar as seguintes análises:

- A temperatura inicial do refratário e a temperatura do forno canal tem efeitos diretamente proporcionais na temperatura final do metal, já o tempo de transferência e a temperatura final do refratário representam efeitos inversamente proporcionais na temperatura final do metal;
- A temperatura inicial do refratário e o tempo de transferência tem probabilidade de ter influência na temperatura final do metal superior a 99,99%, considerando a distribuição T-Student, já a temperatura do forno canal, a temperatura final do refratário e a panela utilizada tem probabilidades de influência de 99,43%, 96,82% e 82,81%, respectivamente.

Como a temperatura final do refratário é uma variável de consequência, ou seja, não é possível exercer um controle, já que ela é dependente da temperatura inicial do refratário, optou-se pela retirada da mesma, dessa forma a equação global da temperatura final do metal é apresentada na equação [22]:

$$T_{metal,f} = 608,0720 + 0,0619 * T_{ref,i} + 0,5510 * T_{canal} - 9,6683 * t_{transf} + 4,9611 * Panela \text{ [22]}$$

Onde:

$T_{metal,f}$  = Temperatura final do metal [°C];

$T_{ref,i}$  = Temperatura do refratário inicial [°C];

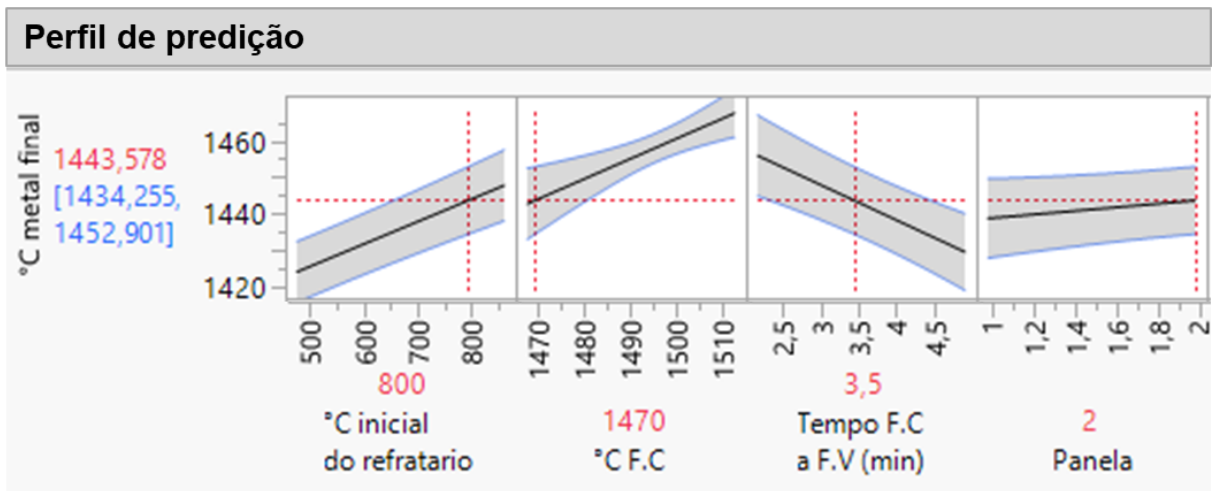
$T_{canal}$  = Temperatura do forno canal [°C];

$t_{transf}$  = Tempo de transferência [min];

$Panela$  = Panela utilizada.

Utilizando o recurso de perfil de predição, o *software* permite a manipulação dos valores das variáveis e demonstra a influência na temperatura final do metal, objetivo do uso dessa ferramenta é garantir que a temperatura final do metal esteja acima da temperatura necessária no forno vazador, alterando os valores para as principais variáveis de influência. A figura 30 demonstra os gráficos do perfil de predição da temperatura final.

Figura 30 - Perfil de predição da temperatura final.

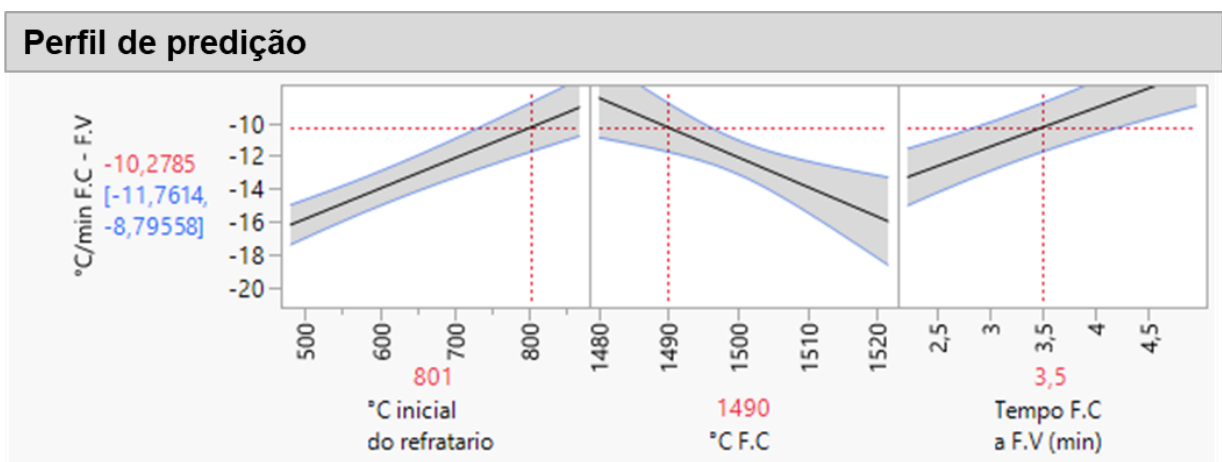


Fonte: Autoria própria (2023).

Avaliando os gráficos da figura 29, fixando o tempo de transferência pela média dos valores obtidos, se considerarmos a temperatura inicial do refratário em 800°C, é possível reduzir a temperatura do forno canal para 1470°C e entregar uma temperatura final aproximada de 1443,6 ±9,3°C.

Ao avaliar a taxa de resfriamento do metal durante a transferência, o perfil de predição mostra que ela é inversamente proporcional a temperatura inicial do refratário e diretamente proporcional a temperatura do metal no forno canal, ou seja, nas condições de processo atual, quanto menor a temperatura inicial do refratário e maior a temperatura do forno canal, maior a taxa de resfriamento do metal. A figura 31 ilustra os gráficos da previsão da taxa de resfriamento do metal.

Figura 31 - Previsão da taxa resfriamento do metal.



Fonte: Autoria própria (2023).



Com base na análise dos dados de processo atual, podemos tomar como objetivo os seguintes fatores:

- Garantir a temperatura inicial do refratário para valores acima de 800°C;
- Reduzir para 1470°C a temperatura do forno canal.

#### 4.2 Resultados dos cálculos teóricos (analisar)

Os cálculos das taxas de transferência de calor no ciclo de panela vazia e de panela cheia, com base nas equações demonstradas na seção 3.2, foi executado com o auxílio do software Excel.

Os valores obtidos na panela 2 durante a coleta de dados do processo atual foram comparados com os valores calculados de forma teórica, com objetivo de ter uma correlação entre teoria e prática. A tabela 7 demonstra os valores calculados da taxa de transferência de calor.

**Tabela 7 - Cálculos teóricos do processo atual.**

<b>Taxas de transferência de calor</b>	<b>Grandeza</b>
$q_{parede,pc}$	4,61 [kW]
$q_{fundo,pc}$	7,33 [kW]
$q_{superior,c}$	16,03 [kW]
$q_{superior,r}$	87,54 [kW]
$q_{ch,c-pc}$	7,38 [kW]
$q_{ch,r-pc}$	24,12 [kW]
<b><math>q_{total,pc}</math></b>	<b>147,01 [kW]</b>
$q_{parede,pv}$	2,20 [kW]
$q_{fundo,pv}$	3,48 [kW]
$q_{fq,c-pv}$	8,48 [kW]
$q_{fq,r-pv}$	87,97 [kW]
$q_{ch,c-pv}$	7,38 [kW]
$q_{ch,r-pv}$	20,44 [kW]
<b><math>q_{total,pv}</math></b>	<b>129,94 [kW]</b>
<b><math>q_{total}</math></b>	<b>276,95 [kW]</b>

Fonte: Autoria própria (2023).

Os valores apresentados na tabela 7 permitem realizar as seguintes análises:

- A tampa pode ter influência direta na taxa de transferência de calor, tanto pela superfície superior da panela cheia e pela parede quente do refratário no ciclo de panela vazia. A soma desses valores representa 72,2% do total da taxa de transferência de calor, durante o ciclo completo da panela;
- A taxa de transferência de calor na etapa de panela cheia representa 53,08% da soma total.

Para converter esses valores de transferência de calor em temperatura do metal dentro da panela, foram utilizadas as equações [23], [24] e [25]:

$$q_{total} [W] = \frac{Q_{calor} [J]}{t [s]} \quad [23]$$

$$Q_{calor} = m \cdot c \cdot \Delta T \quad [24]$$

$$\Delta T = \frac{q_{total} \cdot t}{m \cdot c} \quad [25]$$

Onde:

$Q_{calor}$  = Quantidade de calor [J];

$m$  = Massa de metal na panela [kg];

$c$  = Calor específico do ferro fundido cinzento [J/kgK];

$t$  = Tempo de transferência [s];

$\Delta T$  = Diferença de temperatura [K];

$q_{total}$  = Taxa de transferência de calor total [W].

A diferença de temperatura calculada, para os valores de taxa de transferência de calor e tempo obtidos através dos dados de fábrica, ambos para a panela 2, resultou em um valor de 51,70°C. Quando observada a taxa de resfriamento do metal, o valor calculado é de 13,9°C/min.

Os valores representam 94,6% quando comparado aos dados obtidos empiricamente (14,7 °C/min), isso demonstra que a equação teórica está retornando um valor confiável para utilizar como base para os cálculos das melhorias propostas.

Para o cálculo teórico das melhorias propostas, foram consideradas as seguintes alterações:

- Adição de placas isolantes, de 25,4 mm de espessura, entre a camada do refratário e da carcaça da panela;
- Fechamento total da superfície superior da panela.

As melhorias sugeridas têm como objetivo reduzir a transferência de calor por condução pela parede lateral e fundo do refratário e reduzir a transferência de calor por convecção e radiação pela superfície exposta do metal e na parede quente do refratário no ciclo de panela vazia. As propriedades da placa isolante são demonstradas na tabela 8 e os valores obtidos através dos cálculos teóricos são apresentados na tabela 9:

**Tabela 8 - Propriedade mecânica da placa de fibra cerâmica.**

Produto	Composição química	Condutividade térmica [W/mK]			Temperatura máxima [°C]
		923 K	1145 K	1367 K	
Placa Silplate 1308	Alumina e sílica	0,11	0,12	0,15	1340

Fonte: Adaptado de Unifrax (2023).

**Tabela 9 - Cálculos teóricos de transferência de calor com as melhorias propostas.**

Taxas de transferência de calor	Grandeza
$Q_{parede,pc}$	0,56 [kW]
$Q_{fundo,pc}$	3,00 [kW]
$Q_{superior,c}$	0,85 [kW]
$Q_{superior,r}$	14,71 [kW]
$Q_{ch,c-pc}$	7,10 [kW]
$Q_{ch,r-pc}$	18,97 [kW]
<b><math>Q_{total,pc}</math></b>	<b>45,19 [kW]</b>
$Q_{parede,pv}$	0,28 [kW]
$Q_{fundo,pv}$	1,59 [kW]
$Q_{fq,c-pv}$	3,12 [kW]
$Q_{fq,r-pv}$	48,62 [kW]
$Q_{ch,c-pv}$	7,10 [kW]
$Q_{ch,r-pv}$	18,97 [kW]
<b><math>Q_{total,pv}</math></b>	<b>79,68 [kW]</b>
<b><math>Q_{total}</math></b>	<b>124,88 [kW]</b>

Fonte: Autoria própria (2023).

Utilizando a equação [23] para o cálculo da taxa de transferência de calor e posteriormente a equação [25] para transformar a taxa de transferência de calor total para a queda de temperatura total do ciclo, os valores encontrados são de 23,1°C de queda de temperatura no ciclo e de 6,2°C/min para a taxa de resfriamento do metal.

Os valores apresentados representam uma redução de 55,7% quando comparados aos valores teóricos sem a adição de melhorias.

### 4.3 Resultados com melhorias propostas (melhorar)

Os resultados obtidos através do DOE executado foram adicionados em uma planilha do Excel. A tabela 10 apresenta os dados provenientes da etapa de melhorias da seção 3.3.4:

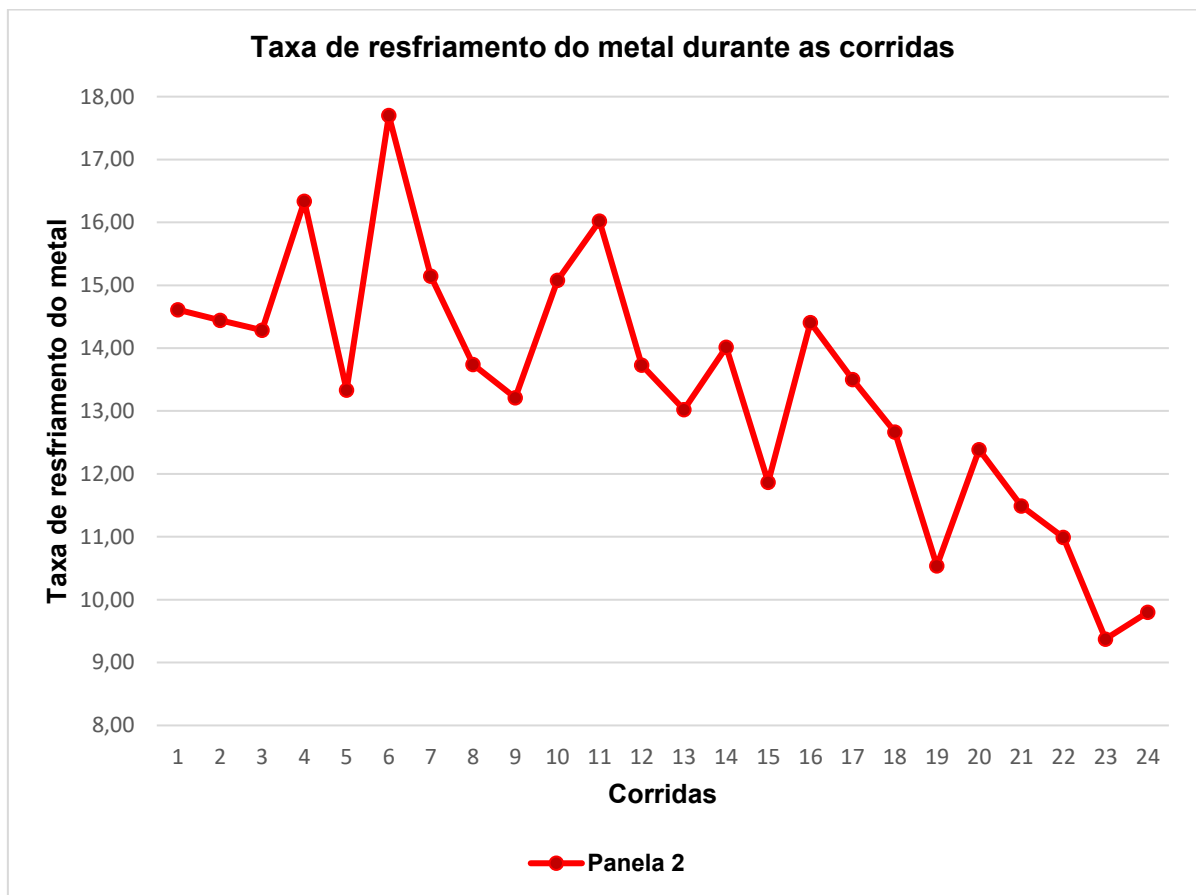
**Tabela 10 - Dados coletados das melhorias testadas em fábrica.**

Identificação da panela	Número da corrida	Refratário inicial [°C]	Forno canal [°C]	Panela inicial [°C]	Tempo de transferência [min]	Panela final [°C]	Refratário final [°C]
2	24	878	1495	1476	4,18	1454	1046
2	23	863	1490	1469	4,80	1445	1016
2	22	637	1492	1467	4,55	1442	1003
2	21	840	1495	1465	4,70	1441	970
2	20	757	1502	1473	4,68	1444	958
2	19	540	1491	1470	4,93	1439	908
2	18	595	1496	1463	4,82	1435	856
2	17	879	1499	1471	4,00	1445	930
2	16	625	1502	1465	4,23	1441	894
2	15	850	1494	1470	4,55	1440	952
2	14	733	1494	1457	5,07	1423	874
2	13	840	1492	1461	4,30	1436	971
2	12	838	1497	1471	3,35	1451	910
2	11	820	1493	1469	3,18	1442	897
2	10	710	1492	1466	3,12	1445	910
2	9	761	1487	1442	5,45	1415	820
2	8	829	1487	1450	4,37	1427	893
2	7	760	1495	1445	5,22	1416	843
2	6	554	1503	1477	3,33	1444	787
2	5	609	1493	1477	3,15	1451	871
2	4	580	1493	1464	3,18	1444	785
2	3	640	1493	1457	3,85	1438	795
2	2	811	1495	1464	3,60	1443	820
2	1	763	1495	1457	3,22	1448	840

Fonte: Autoria própria (2023).

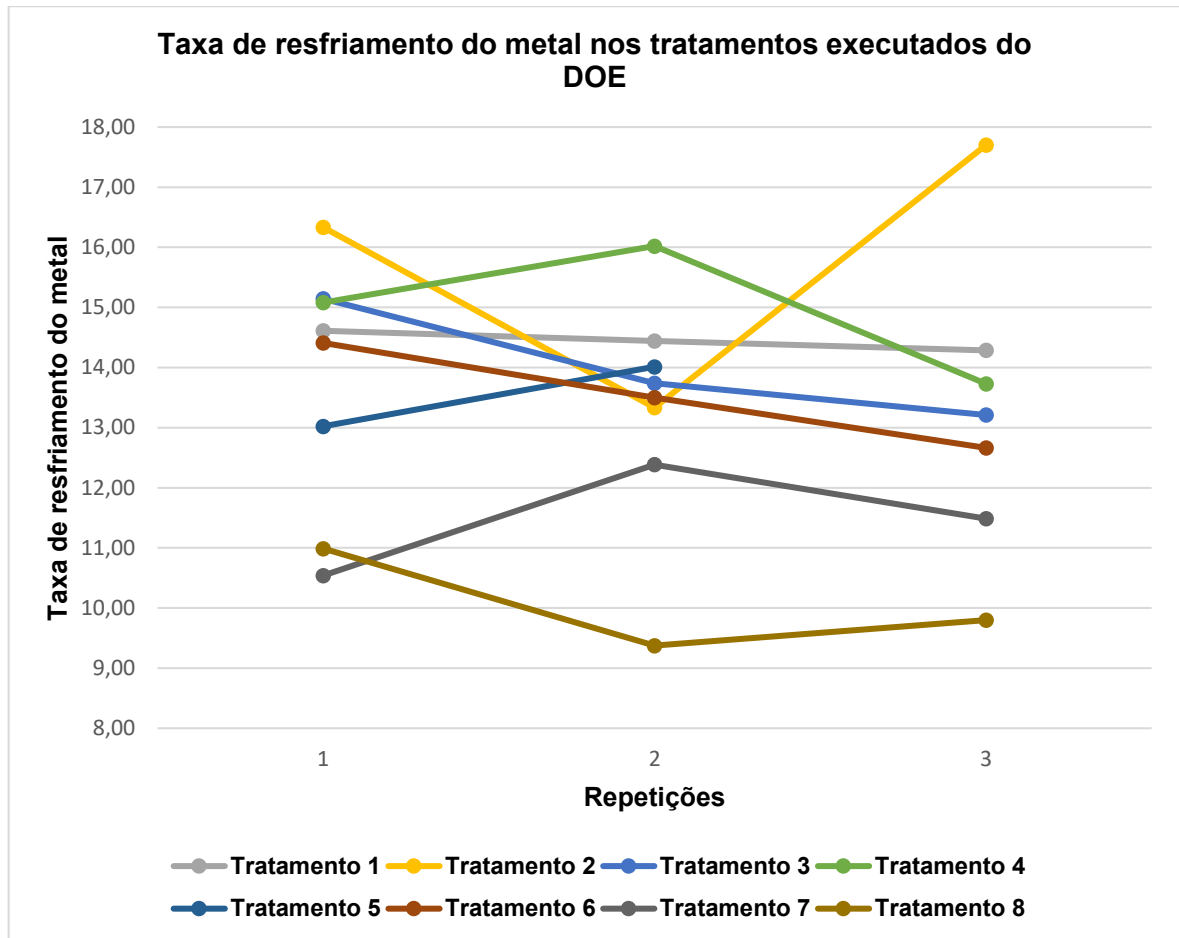
Analisando os dados obtidos, os valores da taxa de resfriamento tiveram variação entre 9,38°C/min e 17,77°C/min durante as 24 corridas observadas. Os gráficos abaixo, mostrados nas figuras 32 e 33, ilustram as taxas de resfriamento durante as 24 corridas e a taxa de resfriamento do metal para cada tratamento executado no DOE, respectivamente.

**Figura 32 - Taxa de resfriamento do metal durante as corridas do DOE.**



Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 33 - Taxa de resfriamento do metal nos tratamentos executados do DOE.**



Fonte: Autoria própria (2023).

Um resumo dos valores da taxa de resfriamento médios de cada tratamento realizado é mostrado na tabela 11.

**Tabela 11 - Resumo dos dados obtidos durante os tratamentos realizados no DOE.**

<b>Tratamento</b>	<b>Alterações</b>	<b>Taxa de resfriamento [°C/min]</b>
<b>1</b>	Sem manta na transferência	14,4
	Sem manta na espera	
	Volume de metal – 2000 kg	
<b>2</b>	Sem manta na transferência	15,8
	Sem manta na espera	
	Volume de metal – 2500 kg	
<b>3</b>	Sem manta na transferência	14,0
	Com manta na espera	
	Volume de metal – 2000 kg	
<b>4</b>	Sem manta na transferência	14,9
	Com manta na espera	
	Volume de metal – 2500 kg	
<b>5</b>	Com manta na transferência	13,0
	Sem manta na espera	
	Volume de metal – 2000 kg	
<b>6</b>	Com manta na transferência	13,5
	Sem manta na espera	
	Volume de metal – 2500 kg	
<b>7</b>	Com manta na transferência	11,5
	Com manta na espera	
	Volume de metal – 2000 kg	
<b>8</b>	Com manta na transferência	10,1
	Com manta na espera	
	Volume de metal – 2500 kg	

**Fonte: Autoria própria (2023).**

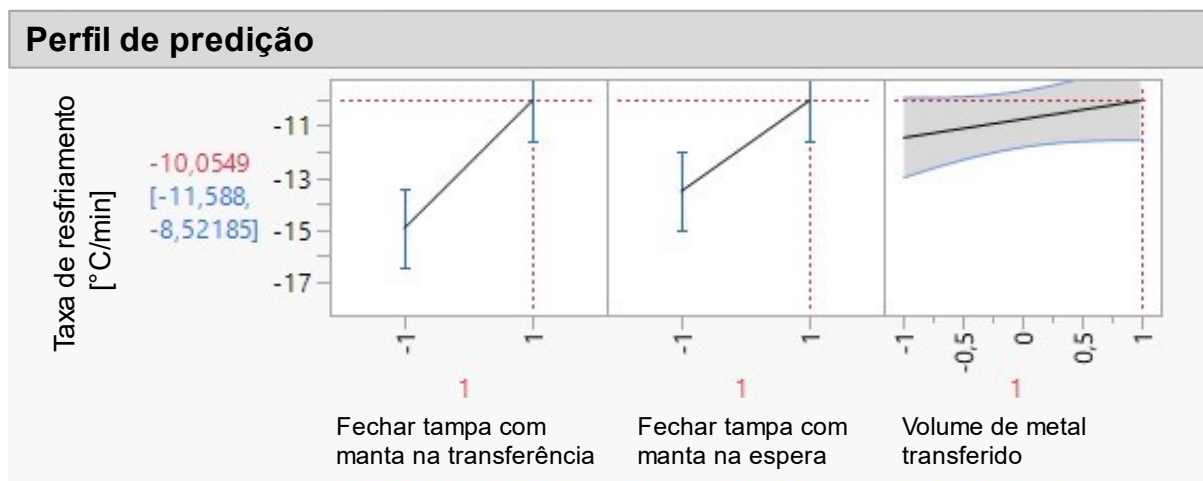
Observando os dados da tabela 11, pode-se realizar as seguintes análises:

- Carregar um volume menor de metal apresentou uma menor taxa de resfriamento em 3 dos 4 tratamentos, porém as menores taxas foram observadas com volume de metal maior;
- Fechar a tampa com manta somente na espera, não apresentou resultados favoráveis a redução da taxa de resfriamento no experimento, porém quando fechado com manta também na transferência, a adição da manta na espera resultou em menores taxas de resfriamento do metal;

- Fechar a tampa com manta durante a transferência apresentou resultados menores de taxa de resfriamento;
- Fechar a tampa com manta durante todo o ciclo apresentou as menores taxas de resfriamento do metal.

Por fim, foi novamente analisado os dados no JMP e utilizado o recurso de perfil de predição para a taxa de resfriamento do metal. Foi fixado o tratamento em que se utiliza o fechamento com manta durante a transferência, durante a espera e com volume de metal de 2500 kg. A figura 34 demonstra os gráficos do perfil de predição para a taxa de resfriamento.

Figura 34 - Perfil de predição para o melhor tratamento observado.



Fonte: Autoria própria (2023).

Analisando o perfil de predição, com a adição de manta durante a transferência de metal, na espera e com 2500 kg de metal transferido por ciclo, a taxa de resfriamento do metal ficaria em  $10,1 \pm 1,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , uma redução de 32,1% quando comparado a taxa de resfriamento do metal nas condições atuais.

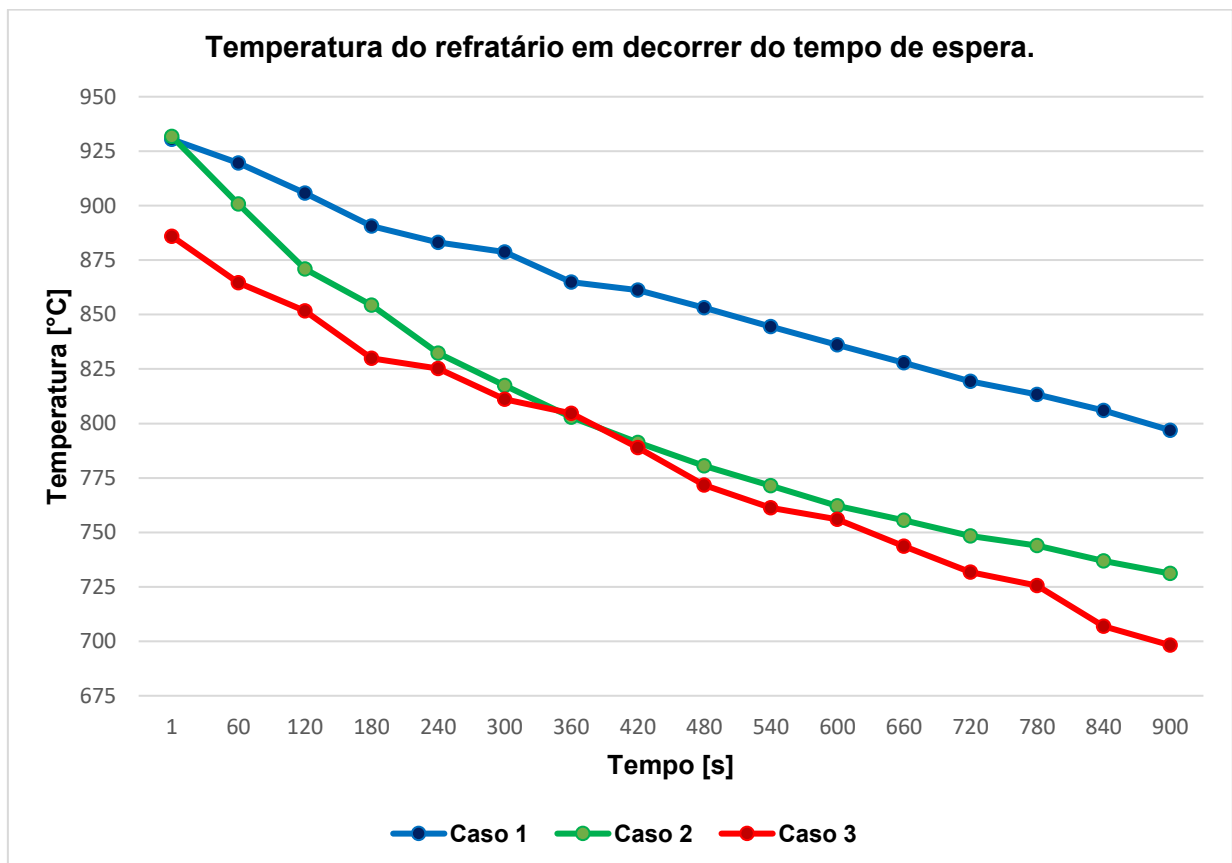
Outro benefício da adição de manta durante o ciclo de transferência é observado na temperatura do refratário, pode-se observar que durante os tratamentos em que houve a adição da manta em algum momento do ciclo, a temperatura final e inicial do refratário foi maior do que quando comparado aos tratamentos sem adição da manta.



Quando utilizada no momento de espera da panela, a manta reduziu a área total exposta sobre a superfície superior, reduzindo as transferências de calor por radiação térmica e convecção da parede quente do refratário. Ao utilizar no ciclo de panela cheia, a manta reduziu a transferência de calor pela superfície de metal, aumentando a temperatura da face quente do refratário durante o ciclo de panela cheia. Por fim, nos tratamentos em que se utilizava a manta durante 100% do tempo, houve ambos os benefícios mencionados acima.

Na figura 35 é demonstrado 3 casos observados durante a etapa do DOE, no caso 1 a manta foi utilizada durante todo o ciclo de panela, no caso 2 a manta foi utilizada somente na transferência e no caso 3 não houve a utilização da manta, todos os casos foram registrados durante o mesmo período do dia.

**Figura 35 - Temperatura do refratário em função do tempo de espera.**



Fonte: Autoria própria (2023).

É possível realizar as seguintes análises através da figura 35:

- Sem utilizar a manta durante a transferência, a temperatura inicial e final do refratário são menores quando comparadas aos casos com utilização de manta, a taxa de queda de temperatura do refratário é de 12,5°C/min;

- Quando utilizada no momento de transferência, a manta resultou em um aumento na temperatura inicial e final, porém a taxa de queda de temperatura do refratário foi de 13,4°C/min;
- Quanto utilizada durante 100% do tempo, a temperatura inicial e final do refratário são maiores e a taxa de queda de temperatura do refratário é menor quando comparadas aos demais casos, a taxa de queda de temperatura do refratário foi de 8,9°C/min;

A próxima etapa de validação dos dados terá como foco e objetivo a redução da temperatura do metal no forno canal para 1470°C e a inclusão da manta de fibra cerâmica durante todo o ciclo de transferência de metal.

#### 4.4 Validação dos resultados

Os dados demonstrados nessa sessão, ainda são da etapa de melhorias, da sessão 3.3.4, foram acompanhadas 10 corridas, com a temperatura do forno canal objetivada em 1470°C e com o acréscimo da manta de fibra cerâmica na superfície superior da tampa da panela, durante todo o ciclo de transferência. A tabela 12 apresenta os dados provenientes da validação dos resultados.

Tabela 12 - Dados de validação dos resultados.

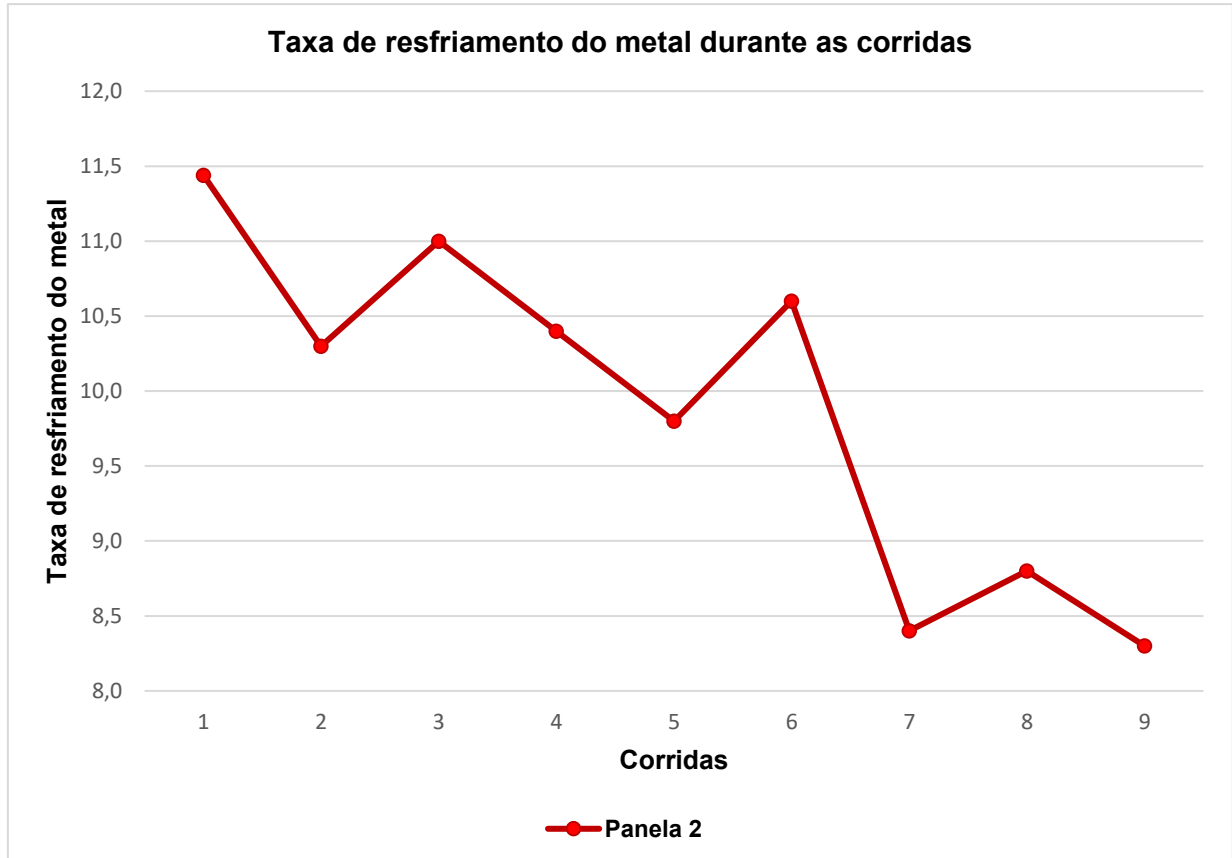
Identificação da panela	Número da corrida	Refratário inicial [°C]	Forno canal [°C]	Panela inicial [°C]	Tempo de transferência [min]	Panela final [°C]	Refratário final [°C]
2	10	863	1462	1442	4,72	1423	1003
2	9	894	1466	1433	5,12	1421	983
2	8	830	1458	1440	4,28	1422	966
2	7	786	1467	1448	3,87	1426	955
2	6	864	1472	1456	3,68	1436	974
2	5	829	1469	1447	4,15	1426	971
2	4	747	1473	1447	4,00	1429	942
2	3	729	1461	1437	4,37	1416	931
2	2	675	1472	1450	4,28	1423	882
2	1*	485	1481	1448	4,25	1417	856

Fonte: Autoria própria (2023).

\* A primeira corrida do dia teve seus dados influenciados por conta de problemas internos, dessa forma optou-se por não considerar essa corrida no experimento.

De acordo com os dados obtidos, as taxas de resfriamento do metal tiveram valores entre 8,2°C/min e 11,4°C/min durante as 9 corridas observadas. O gráfico representado na figura 36 ilustra as taxas de resfriamento obtidas durante as corridas.

**Figura 36 - Taxa de resfriamento do metal durante as corridas de validação dos dados.**



Fonte: Autoria própria (2023).

A diferença entre as taxas de resfriamento com o decorrer das corridas, observadas no gráfico da figura 36, pode estar relacionada ao aumento da energia absorvida pelo refratário (índice de encharque) no decorrer das corridas, na medida em que mais corridas são realizadas, maior a energia absorvida internamente no refratário e maiores as temperaturas iniciais e finais deste.

A tabela 13 mostra os valores médios observados durante a validação dos dados:

Tabela 13 - Valores médios durante a validação de dados.

Dados	Panela 2
Temperatura inicial do refratário [°C]	802
Temperatura final do refratário [°C]	956
Temperatura do metal no forno canal [°C]	1467
Temperatura final do metal na panela [°C]	1425
Tempo de transferência [min]	4,3
Taxa de resfriamento [°C/min]	9,9

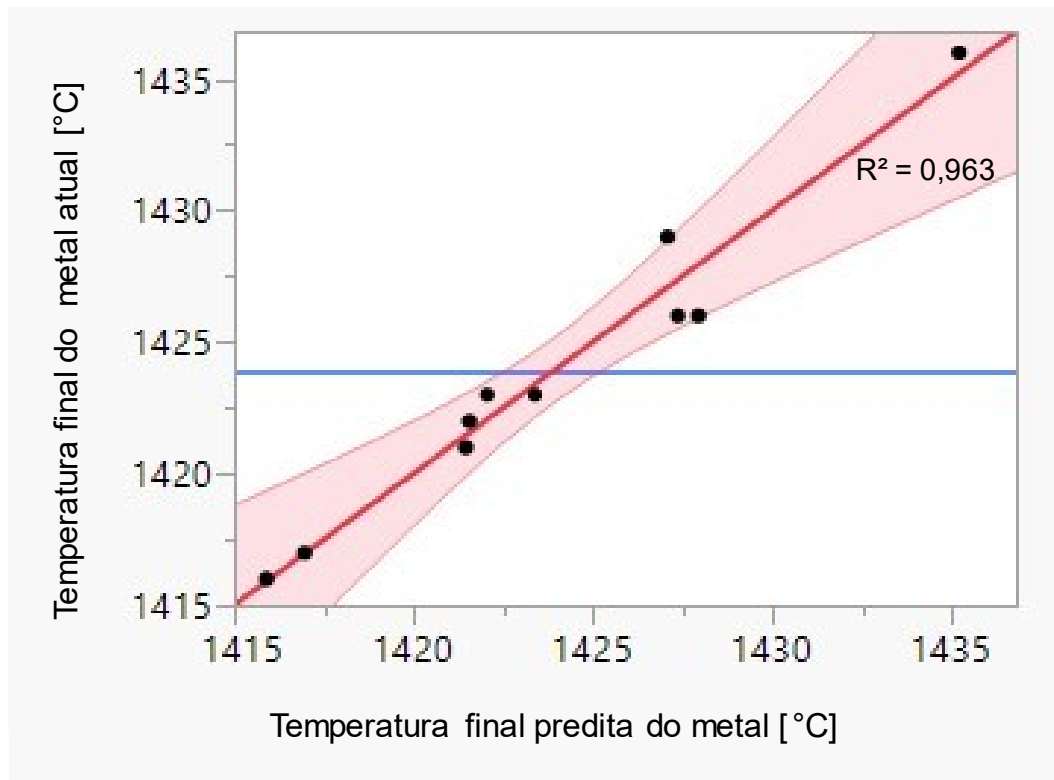
Fonte: Autoria própria (2023).

Diante dos dados da tabela 13, pode-se realizar as seguintes análises:

- A temperatura média inicial do refratário ficou acima dos 800°C objetivos, sendo as últimas 5 corridas com média de 845°C;
- A temperatura média final do refratário ficou em 956°C, indicando que há uma maior quantidade de calor retido no interior da panela, quando comparado as temperaturas finais do refratário antes das melhorias;
- O tempo de transferência médio subiu 0,8 minuto por conta da ação de retirar e colocar a manta para enchimento da panela pelo forno canal;
- A taxa de resfriamento média do metal foi de 9,9°C/min, sendo as 3 últimas corridas observadas com valores médios de 8,5°C/min;
- A temperatura final do metal na panela foi afetada pelo acréscimo de tempo de transferência.

Ao analisar os dados obtidos no JMP, observa-se uma boa correlação entre as temperaturas finais do metal calculadas com as coletadas empiricamente, indicando que a resposta predita tem um bom nível de confiabilidade. A figura 37 ilustra a dispersão dos pontos de temperatura final atual com a temperatura final predita.

Figura 37 – Dispersão dos pontos de temperatura final atual com a temperatura final predita.



Fonte: Autoria própria (2023).

A equação global da temperatura final na etapa de validação dos dados é mostrada na equação [26]:

$$T_{metal,f} = 620,6587 + 0,0419 * T_{ref,i} + 0,5496 * T_{canal} - 9,0742 * t_{transf} \quad [26]$$

Onde:

$T_{metal,f}$  = Temperatura final do metal [°C];

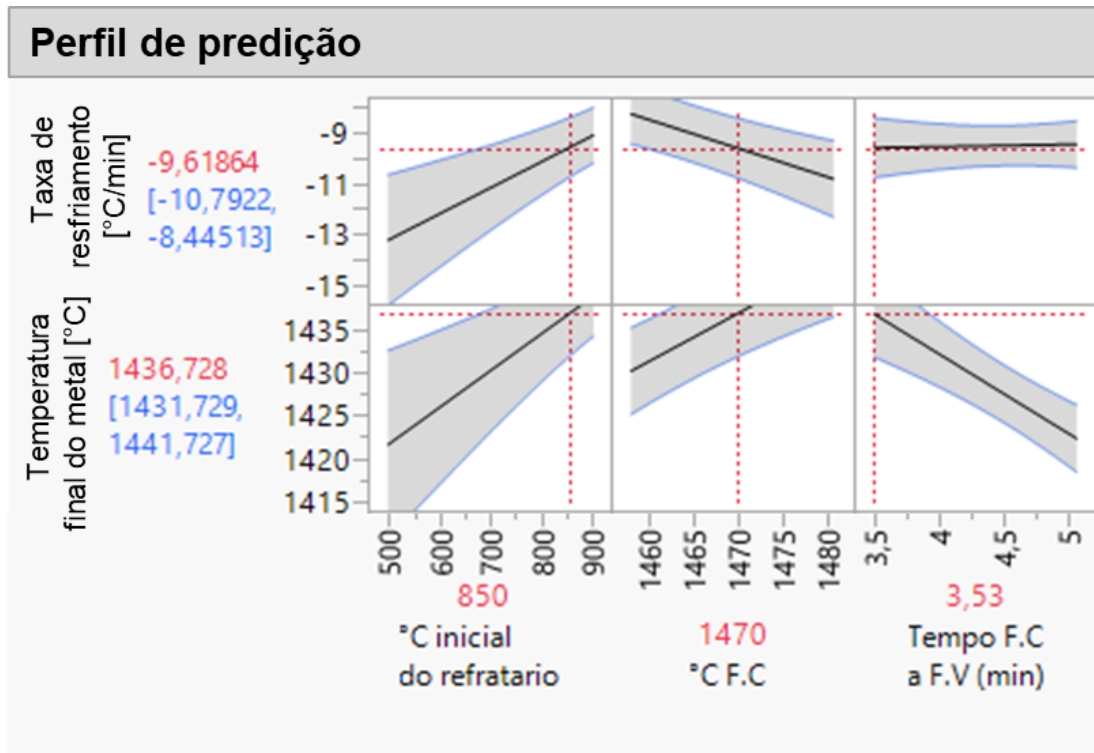
$T_{ref,i}$  = Temperatura do refratário inicial [°C];

$T_{canal}$  = Temperatura do forno canal [°C];

$t_{transf}$  = Tempo de transferência [min].

Por último foi utilizada a ferramenta de perfil de predição, com o objetivo de prever as temperaturas e taxas de resfriamento do metal, com base nos dados obtidos na validação. A figura 38 ilustra o perfil de predição da temperatura e taxa de resfriamento do metal.

Figura 38 - Perfil de predição sobre a temperatura final e taxa de resfriamento do metal.



Fonte: Autoria própria (2023).

Analisando a figura 38, o resultado previsto para temperatura final do metal é de  $1436,7 \pm 5,0^{\circ}\text{C}$ , para a taxa de resfriamento do metal, o valor previsto é de  $9,6 \pm 1,2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , ambas as respostas para uma temperatura inicial do refratário de  $850^{\circ}\text{C}$ , temperatura do forno canal em  $1470^{\circ}\text{C}$  e tempo de transferência de 3,53 minutos.

Realizando a comparação entre os valores obtidos nas equações teóricas e nos dados empíricos coletados na validação, pode-se observar que há uma diferença de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$  entre os dados teóricos e a melhor corrida acompanhada. Essa diferença pode ser explicada pela ausência da camada de material isolante nos testes de validação, pela baixa eficiência da manta de fibra cerâmica na cobertura das áreas expostas pela tampa da panela e pela espessura menor utilizada. A figura 39 ilustra as fugas térmicas existentes na panela com as melhorias.

Figura 39 - Fugas térmicas da panela durante a validação de dados.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.5 Energia elétrica consumida no forno canal

O consumo de energia elétrica pelo forno canal está associado a três principais fatores:

- Quantidade de metal no forno canal;
- Temperatura de banho do metal;
- Ineficiência térmica do forno.

No presente estudo, a redução da perda térmica do metal na panela de transferência, gera uma redução da temperatura de banho do metal, reduzindo a potência necessária no forno para aquecimento e manutenção dessa temperatura. O forno canal funciona 24 horas por dia, 7 dias na semana, reduzir a média de potência horária necessária traz uma economia de energia elétrica anual e uma redução da emissão de gases de efeito estufa. O *software* responsável pelo acompanhamento e

gerenciamento da energia consumida pelos fornos na fábrica é de propriedade da empresa.

A tabela 14 demonstra os dados de consumo de potência no forno canal.

**Tabela 14 – Consumo de energia no forno canal atual em dias produtivos.**

<b>Dados</b>	<b>Consumo médio [MWh]</b>
Horário	0,7197
Diário	17,272
<b>Anual</b>	<b>4.387,09</b>

**Fonte: Autoria própria.**

Durante o dia de validação de dados, foi acompanhado o consumo de energia elétrica no forno canal, com o objetivo de monitorar a potência necessária no forno com a redução da temperatura de banho do metal. A tabela 15 mostra o consumo diário após as melhorias implementadas na panela.

**Tabela 15 - Consumo de energia no forno canal com as melhorias.**

<b>Dados</b>	<b>Consumo médio [MWh]</b>
Horário	0,6198
Diário	15,523
<b>Anual*</b>	<b>3.942,84</b>

**Fonte: Autoria própria.**

\* Considerando os dados do dia de validação de dados.

Houve uma redução de 14,5% no consumo de energia elétrica após as melhorias implantadas na panela, isso representa 99,9 kWh.



## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou as perdas térmicas durante o processo de transferência do ferro fundido do forno canal para o forno vazador. Observou-se que a ineficiência de isolamento da panela de transferência resulta em uma temperatura de banho de metal elevada no forno canal, fato esse que está diretamente associado a um maior consumo de energia elétrica para manutenção dessa temperatura.

Diante disso, tomou-se como principal objetivo realizar um estudo, dentro de uma empresa de fundição, que fosse capaz de produzir ganhos energéticos expressivos. Observou-se a oportunidade de melhorar o isolamento térmico da panela de transferência, reduzindo a queda de temperatura do metal durante o transporte e possibilitando a redução da temperatura de banho metálico no forno canal.

Os testes realizados mostraram as diferenças nas taxas de resfriamento do metal em condições distintas. O uso da manta de fibra cerâmica para cobrir a área exposta na superfície superior da panela, resultou em uma queda de 32,2% na taxa de resfriamento do metal. Entretanto a colocação da manta sobre a superfície da tampa atual da panela aumenta em 0,8 minuto o tempo de transferência no processo atual. Para que se obtenha os resultados calculados, é necessário a confecção de uma nova tampa para as panelas, de forma que seja coberto totalmente a área da superfície superior da panela e que não acrescente tempo ao processo de transferência.

A inclusão de uma camada de material isolante entre o refratário e a carcaça permitirá que se atinja maiores temperaturas iniciais do refratário, resultando em uma maior redução da transferência de calor entre o metal e o refratário.

A atual perda térmica nas panelas de transferência pode ser reduzida em até 58%, reduzindo a temperatura de banho do metal no forno canal e reduzindo os custos de energia elétrica anual e as emissões de gases de efeito estufa, além de conscientizar todos os envolvidos sobre a importância do controle de temperatura no processo produtivo.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Dar continuidade ao estudo das perdas térmicas na panela de transferência, medindo a influência do material e espessura do refratário;
- Dar continuidade ao estudo das perdas térmicas na panela de transferência, alterando o material isolante e espessura;
- Mudar a geometria da panela, a fim de permitir um enchimento com uma menor área de abertura exposta a temperatura ambiente;
- Estudar as perdas térmicas durante o enchimento da panela.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABM. **Produção Brasileira de Peças Fundidas**. Metalurgia (ABM), 1973. vol. 29, p.827-829

BISWAS, S. e LEKAKH, S. **Reducing tap Temperatures to Minimize Energy Use in Melting**. Conference Paper. Rolla, MO: 2011. p. 4-7.

CALLISTER, William D J. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Abordagem Integrada**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019.

ÇENGEL, Yunus A. **Heat Transfer: A Practical Approach**. 2ª ed. University of Nevada. Reno: McGraw-Hill, 2003.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6ªed. São Paulo: ABM, 1988.

GARCIA, A **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**. Campinas –SP: Editora da UNICAMP, 2001, 399p.

GASTON, A; et al. **Thermal analysis of a continuous casting tundish by an integrated fem code**. Latin American Applied Research; 2008. p.259-266.

ECIL. Ecil, 2023. **Termopares Ecil**. Disponível em: <https://ecil.com.br/pirometria-2/termopares/>. Acessado em 31/03/2023 as 16h20min.

HOMIS. Homis, 2023. **Instrumentos e equipamentos industriais de teste e medição**. Disponível em: <https://www.homis.com.br/termometros/pirometro-digital-portatil-507-homis>. Acessado em 31/03/2023 as 16h15min.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

ITALTERM. Italterm, 2023. **Medição de temperatura**. Disponível em: <https://italterm.com/pt/categoria-produto/ferrosos/medicao-de-temperatura/>. Acessado em 31/03/2023 as 16h25min.

NOVUS. Novus, 2023. **Data logger industrial multicanais fieldlogger**. Disponível em: <https://www.novus.com.br/pt/produto/data-loggers/fieldlogger>. Acessado em 31/03/2023 as 15h30min.

NUTEC IBAR. Nutec Ibar, 2023. **Mantas de fibra cerâmica**. Disponível em: [https://www.nutecibar.com.br/mantas\\_de\\_fibra\\_ceramica.shtml](https://www.nutecibar.com.br/mantas_de_fibra_ceramica.shtml). Acessado em 03/04/2023 as 17h00min.

PEREIRA, Leonardo Rodrigues. **Efeitos da adição de Nióbio no desempenho de ferros fundidos de alto cromo utilizados no bombeamento de polpa na mineração**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia: 2012.

PIESKE, A.; CHAVES, L. M. e REIMER, J. F. **Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade**. Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville – SC, n.4, 1985.

RAHMANI, K. e THOMSON, V. **A ladle heat loss model for daily production**. Article. Quebec, Canada: 2017. p. 5-10.

RIPOSAN, I.; CHISAMERA, M. e STAN, S. **Enhanced Quality in electric Melt Grey Cast Irons**. Article. POLITEHNICA University of Bucharest, Materials Science and Engineering Faculty. Bucharest, RO: 2012. p. 2-13.

SERBINO, E. M. **Um estudo dos mecanismos de desgaste em discos de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, São Paulo, p. 51, mar. 2005.

SOUZA, SANTOS, A. B; CASTELO BRANCO, C. H. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. 3ª ed. São Paulo: IPT, 1989.

STEFANESCU, D. M.: **Cast Iron Melting Furnaces**. ASM International, p.121-145, 2017.

UNIFRAX. Unifrax, 2023. **Structural Insulating Board**. Disponível em: <https://www.unifrax.com/product/fiberfrax-silplate-1308-structural-insulating-board/>. Acessado em 03/04/2023 as 16h00min.

WERKEMA, Cristina, **Criando a Cultura Lean Seis Sigma**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

WERKEMA, Cristina, **Ferramentas Estatísticas Básicas do Lean Seis Sigma Integradas ao PDCA e DMAIC**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

## **APÊNDICE A – Cálculos teóricos**

**Figura 40 - Tabela de cálculos de panela cheia.**

Condução pelo refratário		Convecção e radiação pela superfície superior			Convecção e radiação pela chapa metálica						
<b>Qparede (kW)</b>	<b>4,61</b>	<b>Qfundo (kW)</b>	<b>7,33</b>	<b>Qrad (kW)</b>	<b>87,54</b>	<b>Qcfq (kW)</b>	<b>16,03</b>	<b>Qconv (kW)</b>	<b>7,38</b>	<b>Qrad (kW)</b>	<b>24,12</b>
Tfq	1744	Tfq	1744	c	5,7E-08	hm-ar	30,74	Hch	6,5	c	6E-08
Tch	565	Tch	565	Emet	0,28	T <sup>∞,i</sup>	1273	Tc	545	Ech	0,95
Ri	0,46	Lr	0,13	Tm	1744	Ai	0,66	T <sup>∞</sup>	308	Ear	1
R1	0,59	Lch	0,02	T <sup>∞,i</sup>	973	Nu	135,8	Aec	4,79	Tc	565
R2	0,61	Af	0,66	Asup	0,66	Kar	0,09			T <sup>∞</sup>	303
L1	0,13	Kr	1,22			Hm	0,7			Aec	4,79
L2	0,02	Kc	45			Øint	0,92				
Kr	1,22					Tm	1744				
Kc	45										

Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 41 - Tabela de cálculos de panela vazia.**

Condução pela parede quente		Convecção e radiação pela chapa metálica			Convecção e radiação pela parede quente						
<b>Qparede (kW)</b>	<b>2,20</b>	<b>Qfundo (kW)</b>	<b>3,48</b>	<b>Qconv (kW)</b>	<b>7,38</b>	<b>Qrad (kW)</b>	<b>20,44</b>	<b>Qcfq (kW)</b>	<b>8,48</b>	<b>Qrfq (kW)</b>	<b>87,97</b>
Tfq	1109	Tfq	1109	Hch	6,5	c	5,7E-08	hr-ar	30,7	c	5,7E-08
Tch	545	Tch	545	Tch	545	Ech	0,95	T <sup>∞,i</sup>	925	Eref	0,75
Ri	0,46	Lr	0,13	T <sup>∞</sup>	308	Ear	1	Ai	1,99	Ear	1
R1	0,59	Lch	0,02	Ach	4,8	Tch	545	Nu	136	Tf	1109
R2	0,61	Af	0,66			T <sup>∞</sup>	308	Kar	0,09	T <sup>∞,i</sup>	925
L1	0,13	Kr	1,22			Ach	4,79	Hm	0,7	Ai	1,99
L2	0,02	Kc	45					Øint	0,92	Af	0,66
Kr	1,22							Tfq	1109		
Kc	45										

Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 42 - Tabela de cálculos teóricos de panela cheia com melhorias propostas.**

Condução pelo refratário				Convecção e radiação pela superfície superior				Convecção e radiação pela chapa metálica			
<b>Qparede (kW)</b>	<b>0,56</b>	<b>Qfundo (kW)</b>	<b>3,00</b>	<b>Qrad (kW)</b>	<b>14,71</b>	<b>Qcfq (kW)</b>	<b>0,85</b>	<b>Qconv (kW)</b>	<b>7,10</b>	<b>Qrad (kW)</b>	<b>18,97</b>
Tfq	1717	Tfq	1717	c	5,7E-08	hr-ar	17,08	Hch	6,5	c	6E-08
Tch	536	Tch	536	Emet	0,28	T <sup>∞,i</sup>	1643	Tc	536	Ech	0,95
Ri	0,46	Lr	0,11	Tm	1717	Ai	0,66	T <sup>∞</sup>	308	Ear	1
R1	0,566	Lch	0,02	T <sup>∞,i</sup>	1643	Nu	135,8	Ach	4,79	Tc	536
R2	0,59	Li	0,03	Asup	0,66	Kar	0,05			T <sup>∞</sup>	308
R3	0,61	Af	0,66			Hm	0,7			Ach	4,79
L1	0,11	Kr	1,22			Øint	0,92				
L2	0,025	Kc	45			Tm	1717				
L3	0,019	Ki	0,15								
Kr	1,22										
Kc	45										
Ki	0,15										

Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 43 - Tabela de cálculos de panela vazia com melhorias propostas.**

Condução pela parede quente				Convecção e radiação pela chapa metálica				Convecção e radiação pela parede quente			
<b>Qparede (kW)</b>	<b>0,28</b>	<b>Qfundo (kW)</b>	<b>1,59</b>	<b>Qconv (kW)</b>	<b>7,10</b>	<b>Qrad (kW)</b>	<b>18,97</b>	<b>Qfqc (kW)</b>	<b>3,12</b>	<b>Qrfq (kW)</b>	<b>48,62</b>
Tfq	1219	Tfq	1219	Hch	6,5	c	5,7E-08	hr-ar	30,7	c	5,7E-08
Tch	536	Tch	536	Tc	536	Ech	0,95	T <sup>∞,i</sup>	1153	Eref	0,75
Ri	0,46	Lr	0,11	T <sup>∞</sup>	308	Ear	1	Ai	1,99	Ear	1
R1	0,58	Lch	0,02	Ach	4,8	Tc	536	Nu	136	Tf	1219
R2	0,59	Li	0,03			T <sup>∞</sup>	308	Kar	0,09	T <sup>∞,i</sup>	1153
R3	0,61	Af	0,66			Ach	4,79	Hm	0,7	Ach	1,99
L1	0,11							Øint	0,92	Af	0,66
L2	0,03							Tfq	1219		
L3	0,02										
Kr	1,22										
Kc	45										
Ki	0,13										

Fonte: Autoria própria (2023).