



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDERSON DOS REIS PEREIRA

**INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DA ESCÓRIA DO FORNO PANELA E SEUS  
IMPACTOS EM AÇOS FABRICADOS EM UMA SIDERÚRGICA SEMI-INTEGRADA**

Recife

2024

ANDERSON DOS REIS PEREIRA

**INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DA ESCÓRIA DO FORNO PANELA E SEUS  
IMPACTOS EM AÇOS FABRICADOS EM UMA SIDERÚRGICA SEMI-INTEGRADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Oscar Olímpio de Araújo Filho

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Pereira, Anderson dos Reis.

Influência da alteração da escória do forno panela e seus impactos em aços fabricados em uma siderúrgica semi-integrada / Anderson Dos Reis Pereira. - Recife, 2024.

93f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2024.

Orientação: Oscar Olímpio de Araújo Filho Recife.

Inclui referências.

1. Aciaria; 2. Forno panela; 3. Escória; 4. Peso vazado; 5. Canal de vazamento; 6. Areia do canal. I. Araújo Filho, Oscar Olímpio de. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pelas graças que tem me proporcionado.

À minha amada esposa Jéssica que é companheira de profissão e de vida, pelo apoio e parceria.

Agradeço aos meus pais por serem os meus maiores incentivadores e por serem inspiração de garra e determinação.

Aos colegas de trabalho pela ajuda no desenvolvimento do trabalho e pelo compartilhamento dessa jornada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho por aceitar o desafio de desenvolver esse trabalho junto comigo e por me ajudar a vencer mais essa etapa.

Aos professores Prof. Dr. Maurício David Martins das Neves, Prof. Dr. Edval Gonçalves de Araújo e Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira, pelas valiosas contribuições ao trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco, ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPE e ao INTM - Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais, além das instituições de fomento CNPq, CAPES e FACEPE, por serem facilitadoras do desenvolvimento tecnológico e intelectual em Pernambuco e no Brasil.

## RESUMO

A melhoria dos processos industriais em busca de mais produtividade é primordial para as usinas siderúrgicas que buscam se destacar em um mercado cada vez mais competitivo e global. É nesse cenário que, em uma siderúrgica semi-integrada que fabrica aços carbono a partir de sucata ferrosa para a confecção de vergalhões para a indústria de construção civil, arames, pequenos perfis e pregos, foi alterada a escória do forno panela, visando um aumento na produtividade do processo. Com o objetivo de reduzir o acúmulo de escória agregada nas paredes e fundo das panelas e, conseqüentemente, aumentar o peso vazado de aço, foram feitas alterações na composição química da areia de vedação do canal do forno elétrico a arco (FEA). Tais alterações modificaram diversas características da escória do forno panela, como composição química, viscosidade, temperatura liquidus e partição fase sólida e líquida, por exemplo. O presente estudo apresenta de forma concisa as etapas de análise do processo, avaliação de hipóteses, teste após alteração da areia do canal do FEA e análise dos resultados. Após as melhorias implementadas, houve um aumento de 4,7% do peso vazado, que está diretamente relacionado com o aumento da produtividade da aciaria em questão. Além disso, houve uma melhoria significativa em diversos outros parâmetros do processo, como a abertura livre do canal do FEA, abertura livre da panela e redução do tempo de interrupção por baixas temperaturas na panela.

**Palavras-chave:** aciaria; forno panela; escória; peso vazado; canal de vazamento; areia do canal

## ABSTRACT

The improvement of industrial processes in search of greater productivity is essential for steel mills that strive to stand out in an increasingly competitive and global market. It is in this scenario that changes were made to the ladle furnace slag in a semi-integrated steel mill that produces carbon steel from ferrous scrap for the manufacture of rebars, wire rods, small profiles, and nails, aiming to increase the productivity of the process. In order to reduce the accumulation of slag adhered to the walls and bottom of the ladles, and consequently increase the tapping weight of steel, improvements were made to the chemical composition of the filler sand of the electric arc furnace (EAF). These changes altered several characteristics of the ladle furnace slag, such as chemical composition, viscosity, liquidus temperature, solid and liquid phase, for example. This study presents, in a concise manner, the process analysis, hypothesis evaluation, testing after the modification of the eccentric bottom tapping (EBT) filler sand, and analysis of the results. After the implemented improvements, there was a 4.7% increase in tapping weight, which is directly related with the increased productivity of the meltshop. Furthermore, there was a significant improvement in various other process parameters, such as the EBT free opening rate, ladle free opening rate, and reduction in the power-off due to low temperatures in the ladle.

**Keywords:** meltshop; ladle furnace; slag; tapping weight; eccentric bottom tapping; filler sand

## LISTA DE FIGURAS

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 1 –  | Forno com vazamento do tipo EBT (A) e tipo bica (B)   | 20 |
| Figura 2 –  | Detalhamento do enchimento do canal do FEA com areia refratária de vedação  | 20 |
| Figura 3 –  | Representação do tap-to-tap   | 21 |
| Figura 4 –  | Funções do forno panela   | 23 |
| Figura 5 –  | Etapas da operação do forno panela em relação à temperatura e tempo   | 24 |
| Figura 6 –  | Principais equipamentos presentes em um forno panela  | 25 |
| Figura 7 –  | Ciclo de operação de panelas em uma aciaria elétrica  | 29 |
| Figura 8 –  | Panela sem acúmulo de escória no fundo (a) e panela com acúmulo de escória no fundo (b)   | 30 |
| Figura 9 –  | Diagrama de fase simplificado do sistema CaO-MgO  | 31 |
| Figura 10 – | Representação do método das perpendiculares em um diagrama ternário   | 32 |
| Figura 11 – | Corte isotérmico no diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO <sub>2</sub>   | 32 |
| Figura 12 – | Representação do triângulo CaO - MgO - 3CaO.SiO <sub>2</sub> no diagrama ternário CaO-MgO-SiO <sub>2</sub>                        | 33 |
| Figura 13 – | Representação do triângulo 3CaO.SiO <sub>2</sub> - 2CaO.SiO <sub>2</sub> - MgO no diagrama ternário CaO-MgO-SiO <sub>2</sub>      | 34 |
| Figura 14 – | Representação do triângulo 3CaO.MgO.2SiO <sub>2</sub> - 2CaO.SiO <sub>2</sub> - MgO no diagrama ternário CaO-MgO-SiO <sub>2</sub> | 35 |
| Figura 15 – | Modelo de um tetraedro representando um diagrama quaternário  | 36 |
| Figura 16 – | Diagrama pseudo-ternário CaO-SiO <sub>2</sub> -MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> para 10% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 37 |
| Figura 17 – | Diagrama pseudo-ternário CaO-SiO <sub>2</sub> -MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> para 20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 37 |
| Figura 18 – | Temperatura de fusão de diversos materiais  | 38 |
| Figura 19 – | Design refratário da panela e posição do plug poroso e válvula gaveta   | 40 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 20 – | Refratários típicos em um sistema de válvula gaveta   | 40 |
| Figura 21 – | Montagem de plug poroso no fundo de uma panela  | 41 |
| Figura 22 – | Mecanismos de desgaste de material refratário em contato com escória de aciaria   | 42 |
| Figura 23 – | Preparação de amostra de escória para análise em EDXRF  | 44 |
| Figura 24 – | Principais compostos que formam a escória do forno panela   | 45 |
| Figura 25 – | Solubilidade do MgO para escórias duplamente saturadas em CaO e MgO a 1600°C  | 51 |
| Figura 26 – | Balanço de massa da escória do forno panela   | 56 |
| Figura 27 – | Representação da escória pré-teste (ponto laranja) no corte isotérmico do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO <sub>2</sub>   | 57 |
| Figura 28 – | Representação do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO <sub>2</sub> -CaF <sub>2</sub> a 1600°C   | 58 |
| Figura 29 – | Representação da escória pré-teste (ponto laranja) e região de interesse da escória (sombreado preto) no corte isotérmico do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO <sub>2</sub>  | 60 |
| Figura 30 – | Representação da escória pré-teste (ponto laranja) e escória com alteração da adição de cales (ponto roxo) no corte isotérmico do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO <sub>2</sub>                                   | 63 |
| Figura 31 – | Comparação de diagramas quaternários de escórias com 0% de MgO  | 64 |
| Figura 32 – | Comparação de diagramas quaternários de escórias com 5% de MgO  | 65 |
| Figura 33 – | Comparação de diagramas quaternários de escórias com 10% de MgO   | 65 |
| Figura 34 – | Comparação de diagramas quaternários de escórias com 15% de MgO   | 66 |
| Figura 35 – | Representação da escória pré-teste (ponto laranja) e escórias com alteração da areia de vedação do canal do FEA (pontos verde, azul e preto) no corte isotérmico do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO <sub>2</sub> | 68 |



|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 36 – | Representação da escória pré-teste (ponto laranja) e escória de teste (ponto verde) no corte isotérmico do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO <sub>2</sub> | 74 |
| Figura 37 – | Solubilidade do CaO e MgO em função do teor de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> em escórias CaO-MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> a 1600°C      | 75 |
| Figura 38 – | Comparação entre o acúmulo de escória nas panelas entre o período de seis meses anteriores (esquerda) e os seis meses posteriores ao início dos testes (direita) | 82 |

## LISTA DE QUADROS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Quadro 1 – | Composição típica de escórias de forno panela em aços acalmados ao silício  | 26 |
| Quadro 2 – | Óxidos presentes na escória de aciaria e suas origens   | 27 |
| Quadro 3 – | Composição química típica de tijolos dolomíticos  | 39 |
| Quadro 4 – | Detalhes de modelos matemáticos para estimar a viscosidade de escórias  | 49 |
| Quadro 5 – | Avaliação das fontes de óxidos presentes na escória do forno panela quanto à composição química e quantidade adicionada | 62 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Gráfico 1 –  | Percentual de MgO na escória pré-teste e na escória de teste  | 72 |
| Gráfico 2 –  | Basicidade binária na escória pré-teste e na escória de teste   | 72 |
| Gráfico 3 –  | Comparação da viscosidade em relação a fração sólida da escória pré-teste e escória de teste para uma fração sólida entre 0 e 60%                               | 77 |
| Gráfico 4 –  | Comparação da viscosidade em relação a fração sólida da escória pré-teste e escória de teste para uma fração sólida entre 0 e 30%                               | 78 |
| Gráfico 5 –  | Comparação dos valores de peso vazado entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes                                    | 81 |
| Gráfico 6 –  | Comparação entre o consumo de refratário de panela em percentual de kg/t entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes | 83 |
| Gráfico 7 –  | Comparação da vida útil média das panelas entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes                                | 83 |
| Gráfico 8 –  | Comparação da vida das sedes de plug entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes                                     | 84 |
| Gráfico 9 –  | Comparação da quantidade de troca média de sedes de plug entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes                 | 85 |
| Gráfico 10 – | Comparação entre os valores de abertura livre do canal do FEA entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes            | 86 |

## LISTA DE TABELAS

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabela 1 –  | Composição química das amostras de escória do forno panela  | 54 |
| Tabela 2 –  | Composição química das amostras de escória do FEA   | 55 |
| Tabela 3 –  | Composição química dos principais constituintes da escória do forno panela  | 56 |
| Tabela 4 –  | Composição química de diversas areias de vedação do canal do FEA  | 67 |
| Tabela 5 –  | Comparação do %MgO, %Saturação de MgO e o delta entre a saturação e o %MgO entre escórias de forno panela com o uso de diversas areias de vedação do canal do FEA | 69 |
| Tabela 6 –  | Composição química das escórias do forno panela durante o teste   | 70 |
| Tabela 7 –  | Composição química das escórias pré-teste e teste   | 71 |
| Tabela 8 –  | Cálculo da viscosidade das escórias pré-teste e teste utilizando quatro modelos matemáticos de estimativa da viscosidade  | 75 |
| Tabela 9 –  | Cálculo da temperatura liquidus das escórias pré-teste e de teste utilizando modelo matemático de Mills, Yuan e Jones   | 79 |
| Tabela 10 – | Comparação do %MgO e %Saturação de MgO entre a escória de pré-teste e a escória de teste  | 80 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|     |                                 |
|-----|---------------------------------|
| AC  | <i>Alternating Current</i>      |
| DRI | <i>Direct reduced iron</i>      |
| EAF | <i>Electric arc furnace</i>     |
| EBT | <i>Eccentric bottom tapping</i> |
| FEA | Forno elétrico a arco           |
| FP  | Forno panela                    |

## SUMÁRIO

|                |  |           |
|----------------|--|-----------|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO</b>  | <b>15</b> |
| <b>2</b>       | <b>OBJETIVOS</b>   | <b>16</b> |
| 2.1            | OBJETIVO GERAL   | 16        |
| 2.2            | OBJETIVOS ESPECÍFICOS  | 16        |
| <b>3</b>       | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>   | <b>17</b> |
| 3.1            | O PROCESSO SIDERÚRGICO   | 17        |
| <b>3.1.1</b>   | <b>Ciclo de operação de um forno elétrico a arco</b>                     | <b>18</b> |
| 3.1.1.1        | Preparação da carga e carregamento                                       | 18        |
| 3.1.1.2        | Fusão da carga metálica  | 18        |
| 3.1.1.3        | Refino oxidante  | 19        |
| 3.1.1.4        | Vazamento  | 19        |
| <b>3.1.2</b>   | <b>Conceitos de produtividade em aciarias elétricas</b>                  | <b>21</b> |
| 3.2            | OPERAÇÃO DE REFINO SECUNDÁRIO  | 21        |
| <b>3.2.1</b>   | <b>Equipamentos em um Forno Panela</b>                                   | <b>24</b> |
| <b>3.2.2</b>   | <b>Escória de Forno Panela</b>   | <b>25</b> |
| 3.2.2.1        | Basicidade   | 27        |
| 3.3            | CICLO DE OPERAÇÃO DAS PANELAS  | 28        |
| 3.4            | DIAGRAMA DE FASES  | 30        |
| <b>3.4.1</b>   | <b>Triângulos de compatibilidade de interesse para refino secundário</b> | <b>33</b> |
| <b>3.4.2</b>   | <b>Diagramas quaternários</b>  | <b>35</b> |
| 3.5            | REFRATÁRIOS  | 38        |
| <b>3.5.1</b>   | <b>Refratários para panela</b>   | <b>39</b> |
| 3.5.1.1        | Design de refratário de panela   | 39        |
| <b>3.5.2</b>   | <b>Mecanismos de desgaste de refratários</b>                             | <b>41</b> |
| <b>3.5.2.1</b> | <b>Corrosão Química</b>  | <b>42</b> |
| <b>4</b>       | <b>METODOLOGIA</b>   | <b>43</b> |
| 4.1            | ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA DO FORNO PANELA                 | 43        |
| <b>4.1.1</b>   | <b>Preparação das amostras</b>   | <b>43</b> |
| <b>4.1.2</b>   | <b>Análise das amostras</b>  | <b>44</b> |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.1.3     | <b>Caracterização da escória do forno panela</b>   | <b>44</b> |
| 4.1.4     | <b>Análise dos compostos formadores da escória do forno panela</b>   | <b>45</b> |
| 4.2       | PROPOSIÇÃO DA ALTERAÇÃO DA ESCÓRIA DE FORNO PANELA   | 46        |
| 4.2.1     | <b>Definição da escória objetivo</b>   | <b>46</b> |
| 4.2.2     | <b>Definição de propostas para alteração da composição química da escória do forno panela</b>                | <b>46</b> |
| 4.2.3     | <b>Seleção de proposta para alteração da composição química da escória do forno panela</b>                   | <b>47</b> |
| 4.3       | TESTE DA NOVA AREIA DE VEDAÇÃO DO CANAL DO FEA   | 47        |
| 4.3.1     | <b>Análise dos resultados do teste</b>   | <b>47</b> |
| 4.3.1.1   | Estimativa da viscosidade da escória do forno panela   | 47        |
| 4.3.1.1.1 | Comparação da viscosidade entre as escórias do forno panela (processo pré-teste x processo teste)            | 50        |
| 4.3.1.2   | Estimativa da temperatura <i>liquidus</i> das escórias do forno panela (processo pré-teste x processo teste) | 50        |
| 4.3.1.3   | Saturação de MgO   | 51        |
| 4.4       | <b>Avaliação de outros resultados práticos no longo prazo</b>  | <b>52</b> |
| 5         | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>   | <b>54</b> |
| 5.1       | CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE FORNO PANELA  | 54        |
| 5.1.1     | <b>Análise da composição química da escória do forno panela</b>  | <b>54</b> |
| 5.1.1.1   | Análise da composição química dos principais constituintes da escória do forno panela                        | 54        |
| 5.1.2     | <b>Diagrama ternário de fases da escória de forno panela pré-teste</b>                                       | <b>56</b> |
| 5.2       | PROPOSIÇÃO DA ALTERAÇÃO DA ESCÓRIA DO FORNO PANELA   | 58        |
| 5.2.1     | <b>Definição da escória objetivo</b>   | <b>59</b> |
| 5.2.1.1   | Região de interesse no diagrama ternário de fases  | 59        |
| 5.2.2     | <b>Análise da influência dos óxidos e fluxantes na temperatura liquidus da escória do forno panela</b>       | <b>60</b> |
| 5.2.3     | <b>Propostas de alteração da escória do forno panela</b>   | <b>61</b> |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 5.2.3.1   | Proposta 1: Alteração da quantidade de cales   | 62 |
| 5.2.3.2   | Proposta 2: Alteração da quantidade de fluorita  | 66 |
| 5.2.3.3   | Proposta 3: Alteração de MgO para ajuste da temperatura liquidus da escória do forno panela                    | 64 |
| 5.2.3.3.1 | Alteração da areia de vedação do canal do FEA  | 67 |
| 5.3       | <b>ALTERAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA DO FORNO PANELA</b>  | 69 |
| 5.3.1     | <b>Alteração da composição química da areia de vedação do canal do FEA</b>                                     | 70 |
| 5.4       | TESTE DA NOVA AREIA DE VEDAÇÃO DO CANAL DO FEA   | 70 |
| 5.4.1     | <b>Comparação da composição química entre as escórias do forno panela</b>                                      | 71 |
| 5.4.2     | <b>Avaliação de partição líquida e sólida no diagrama ternário</b>   | 73 |
| 5.4.3     | <b>Comparação da viscosidade entre as escórias do forno panela</b>   | 75 |
| 5.4.4     | <b>Comparação da temperatura liquidus entre as escórias do forno panela</b>                                    | 79 |
| 5.4.5     | <b>Análise do desgaste refratário potencial entre a escória pré-teste e a escória de teste do forno panela</b> | 79 |
| 5.4.5.1   | Análise da saturação de MgO  | 80 |
| 5.5       | OUTROS RESULTADOS PRÁTICOS   | 80 |
| 5.5.1     | <b>Peso vazado</b>   | 81 |
| 5.5.2     | <b>Desgaste refratário</b>   | 82 |
| 5.5.3     | <b>Abertura livre do canal do FEA</b>  | 85 |
| 5.5.4     | <b>Outros resultados práticos observados</b>   | 86 |
| 6         | <b>CONCLUSÕES</b>  | 87 |
| 7         | <b>TRABALHOS FUTUROS</b>   | 89 |
|           | <b>REFERÊNCIAS</b>   | 90 |



## 1 INTRODUÇÃO

Presente em todos os âmbitos da sociedade moderna, o aço é, por conta do seu relativo baixo custo e alta versatilidade, um dos materiais mais utilizados do mundo. Com a crescente demanda por aço, o aumento da produtividade e a redução dos custos de processamento são essenciais para a sobrevivência em um mercado cada vez mais global e competitivo.

Os principais parâmetros para avaliar a produtividade de uma aciaria elétrica são o peso vazado e o tempo total de uma corrida, que inclui tanto o tempo de forno em operação quanto o tempo em que o forno está parado devido a interrupções operacionais. O peso vazado refere-se à quantidade de aço que é produzida em cada corrida. Portanto, um aumento no peso vazado acarreta diretamente no aumento da produtividade de uma aciaria.

O aumento do peso vazado pode ser feito através de grandes investimentos, que vão desde o aumento do volume das painéis até modificações nas estruturas físicas dos equipamentos e galpões das aciarias, ou através de melhorias de processos. Modificações nos materiais refratários da panela, melhorias na escória do forno panela e aumento do rendimento metálico podem ser realizados para aumentar o peso vazado e, conseqüentemente, a produtividade de uma aciaria de forma mais rápida, sem que haja a necessidade investimentos em grande escala.

Ao longo do tempo de vida útil de uma panela, pode haver a ocorrência de acúmulo de escória em suas paredes e fundo. Esse acúmulo resulta em uma diminuição do volume útil disponível e, portanto, uma redução do peso vazado e produtividade da aciaria.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo principal o aumento da produtividade de uma aciaria elétrica que apresenta grande acúmulo de escória no fundo das painéis ao longo de seu processo, por meio da análise e adequação da escória do forno panela. Para tal, objetiva-se calcular, analisar e comparar as principais características de escórias de forno panela com diferentes composições químicas e seus impactos práticos no processo, por meio de testes práticos em escala industrial.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Aumentar a produtividade de uma aciaria elétrica por meio do aumento do peso vazado de aço por corrida em função da redução do acúmulo de escória no fundo e paredes das panelas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a composição química da escória do forno panela, bem como dos seus principais componentes;
- Avaliar a escória do forno panela quanto à partição líquida e sólida, utilizando o diagrama ternário apropriado;
- Propor alterações na composição química da escória do forno panela visando atingir o objetivo geral;
- Calcular e comparar a temperatura liquidus e viscosidade da escória pré-teste e de teste baseando-se em modelos matemáticos;
- Testar em operação a escória de forno panela com composição química modificada;
- Analisar resultados práticos obtidos em função das alterações realizadas no processo.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 O PROCESSO SIDERÚRGICO

O aço é uma liga de ferro-carbono, com teor de carbono variando de 0,008% a 2,0%, que apresenta em pequenas quantidades em sua composição química elementos como o silício, manganês, fósforo e enxofre, sendo um dos materiais mais utilizados na indústria (SILVA, 2011), e empregado na fabricação de peças, dispositivos e instalações. Ele conserva a forma depois de moldado, tem boa resistência ao desgaste, bom limite de resistência à deformação e, dentre os materiais, é relativamente barato e pode ser fabricado com facilidade nas usinas siderúrgicas (PINTO JÚNIOR *et al.*, 2018).

De acordo com o Instituto Aço Brasil, o Brasil é o maior produtor de aço da América Latina com uma produção de 34,1 milhões de toneladas de aço em 2022. Na comparação internacional, a indústria brasileira do aço foi responsável por 1,8% da produção mundial, mantendo-se na 9ª colocação no ranking mundial de produtores de aço. Já no ranking da América Latina, o Brasil se manteve na 1ª posição, com 54,1% da produção de aço da região (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2024).

Mourão *et al.* (2007) afirma que as usinas siderúrgicas atuais podem ser divididas em dois grandes grupos: usinas integradas e usinas semi-integradas. Usina integrada é aquela cujo aço é obtido a partir do ferro primário, isto é, a matéria-prima é o minério de ferro, que é transformado em ferro gusa na própria usina, nos alto-fornos. O produto dos alto-fornos, chamado ferro gusa, é transformado em aço através da operação de conversão. Uma usina semi-integrada é aquela cujo aço é obtido a partir de ferro secundário, isto é, a matéria-prima é sucata de aço, não havendo necessidade da etapa de redução do minério de ferro. A sucata é transformada novamente em aço comercial, ao ser utilizada em fornos elétricos à arco.

Ainda conforme Mourão *et al.* (2007), o aço produzido no FEA oferece várias vantagens a serem consideradas, como por exemplo:

- Maior quantidade de sucata pode ser reciclada em FEA;
- A emissão de CO<sub>2</sub> é cerca de quatro vezes menor;
- Quantidades elevadas de DRI e outros substitutos de sucata somente podem ser consumidos no FEA;
- O custo de produção do aço é, em geral, menor.

### 3.1.1 Ciclo de operação de um forno elétrico a arco

De acordo com Silva (2011), a operação do forno elétrico a arco compreende as seguintes fases:

- Preparação da carga metálica e carregamento;
- Fusão da carga metálica;
- Refino oxidante;
- Vazamento.

#### 3.1.1.1 Preparação da carga e carregamento

A carga do forno elétrico a arco é composta de sucata e, em pequenas quantidades, ferro gusa e ferro esponja. Normalmente, a sucata a ser carregada é cuidadosamente separada e armazenada, sendo reunida em grupos por famílias de aço, de modo que, ao ser empregada, possa-se prever com segurança a composição química a ser obtida (SILVA; MEI, 1988).

Um dos aspectos que facilita o trabalho com a sucata advém do fato de que, em geral, ela é magnética e com isso, por meio de eletroímãs operados em pontes rolantes ou em outros equipamentos de movimentação, pode-se facilitar o manuseio e, por conseguinte, o transporte e reutilização deste material ferroso (PINTO JÚNIOR *et al.*, 2018).

#### 3.1.1.2 Fusão da carga metálica

O forno elétrico à arco é em princípio uma máquina de fundir sucata e outros materiais metálicos, como o ferro gusa, transformando-os em aço líquido (MADIAS, 2014). Para tal, o FEA utiliza as altas temperaturas do arco elétrico juntamente com a chama dos queimadores para derreter a sucata em seu entorno. A energia para o processo de fusão da carga metálica é advinda de fonte elétrica (em torno de 70%) e química (em torno de 30%) (FIGUEIRA, 2007). A energia elétrica é transferida para a carga metálica pelo arco elétrico formado entre a ponta dos eletrodos de grafite (três em fornos AC) e a sucata. Durante a etapa de fusão da carga metálica, são usados, ainda, queimadores a gás natural, como fonte de energia química, para auxiliar no processo de derretimento e queda da sucata, como descrito por Mourão *et al.* (2007).

Após o derretimento quase completo da carga metálica em aço líquido, inicia-se a etapa de refino oxidante no FEA.

### 3.1.1.3 Refino oxidante

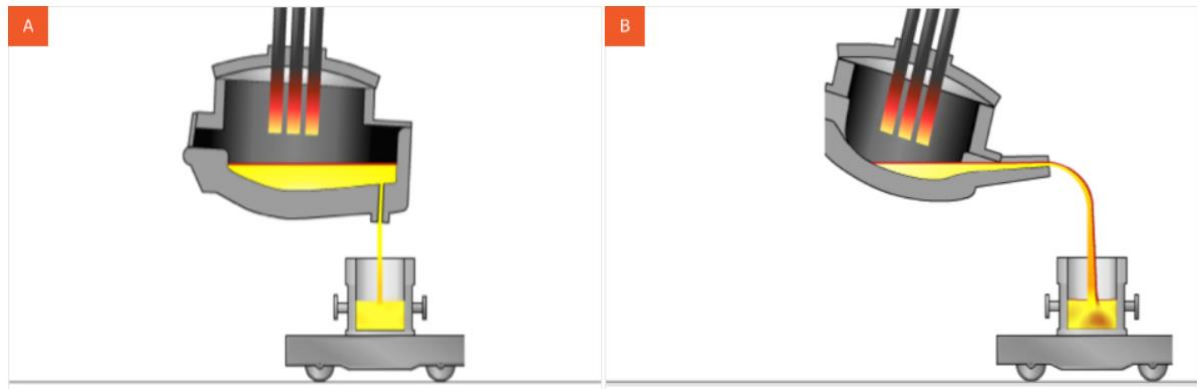
O refino oxidante ou primário corresponde à etapa na qual realiza-se o aquecimento do aço até as temperaturas de vazamento. Nessa etapa, tem-se o uso intenso de oxigênio que é injetado através de injetores supersônicos ou pelo manipulador de lanças. O uso intenso de oxigênio no aço líquido provoca reações químicas de oxidação nos elementos presentes no aço, como por exemplo: manganês, silício, cromo, alumínio, carbono e ferro. Essas reações químicas que acontecem no FEA são, em geral, exotérmicas e auxiliam no processo de aquecimento do aço (PRETORIUS *et al.*, 2001).

Os óxidos formados no processo de oxidação do aço líquido durante a injeção de oxigênio, juntamente com os agentes formadores de escória (cal calcítica e cal dolomítica), ganga de ferro esponja, MgO dos refratários e a escória remanescente das corridas anteriores são os principais compostos formadores da escória do FEA. A escória é, portanto, uma solução não metálica formada pelos óxidos gerados ou adicionados no FEA. A escória do FEA possui um papel importantíssimo na desfosforação do aço, na eficiência elétrica do FEA e no desgaste refratário (MADIAS, 2014).

### 3.1.1.4 Vazamento

Conforme descrito por Fruehan (1998), após o ajuste da composição química e o aquecimento do aço até uma temperatura adequada, inicia-se a etapa de vazamento. Essa etapa consiste na transferência do aço líquido do FEA para uma panela. O sistema atualmente mais utilizado é o EBT (*Eccentric bottom tapping*) onde o aço é vazado através de um canal de vazamento feito de material refratário pelo fundo do forno (Figura 1, A). Outro sistema utilizado é o de bica de vazamento, onde o aço é transferido pela parte de cima do FEA (Figura 1, B). A vantagem do sistema EBT se dá, principalmente, pelo controle da passagem de escória do FEA para o forno panela, evitando custos com adição extra de ligas e desoxidantes (BOKAN, 2013).

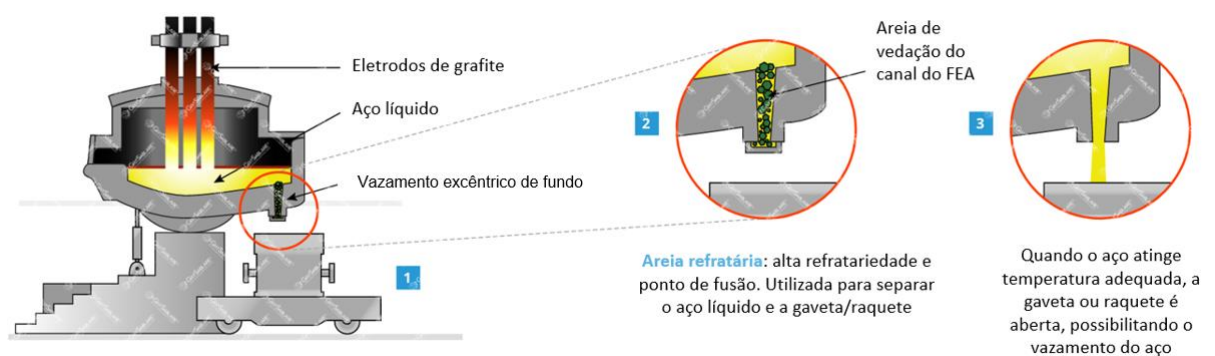
Figura 1 – Forno com vazamento do tipo EBT (A) e tipo bica (B)



Fonte: Daehan Steel (2023)

Conforme descrito por Bokan (2013), após o final de cada corrida, com o aço vazado do FEA para a panela, o canal de vazamento é preenchido por uma areia refratária que serve como tamponamento e separação entre o aço e a gaveta ou raquete, que é um dispositivo que serve como mecanismo de abertura e fechamento. Para se iniciar o vazamento, abre-se a raquete ou gaveta permitindo que a areia do canal de vedação do FEA escoe para dentro da panela, dando passagem para o escoamento do aço. Após o final do vazamento, a gaveta ou raquete é fechada, o canal preenchido com a areia de vedação do FEA e o ciclo se inicia novamente (FRUEHAN, 1998). Um esboço simplificado dessa etapa do processo pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Detalhamento do enchimento do canal do FEA com areia refratária de vedação



Fonte: Gritsablare (2023)

O recipiente chamado de panela é o responsável por receber o aço líquido que escoou do FEA durante o vazamento. A panela é uma carcaça metálica revestida por

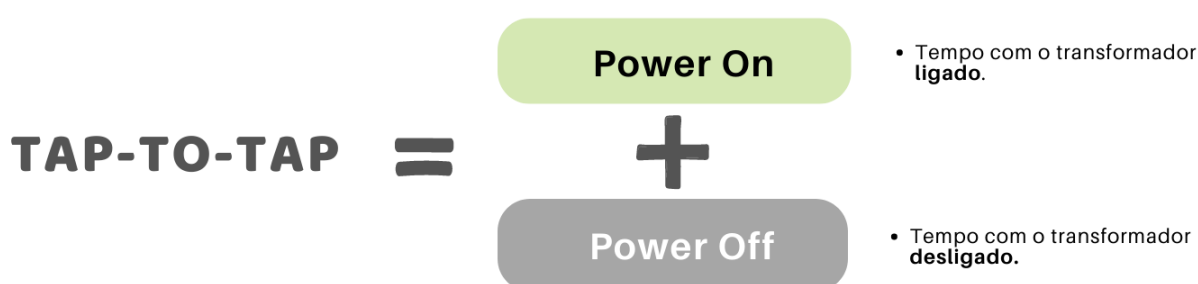
material refratário (FRUEHAN, 1998). Para se posicionar para o vazamento, a panela é colocada em um carro transportador e deslocada para baixo do FEA. Após o vazamento, o carro transportador, com a panela cheia de aço líquido, é transportado para o forno panela e se inicia o processo de refino secundário (BOKAN, 2013).

### 3.1.2 Conceitos de produtividade em aciarias elétricas

Ao contrário de outros processos industriais que operam em linha de produção, a produção de aço em uma aciaria elétrica acontece por bateladas, também chamadas de corridas. Dessa forma, após cada batelada é necessário realizar um novo set-up, visando abastecer a matéria prima e preparar o equipamento para o novo ciclo (FIGUEIRA, 2007).

O termo em inglês para vazamento é *tapping*, e por este motivo, o tempo total de uma corrida se chama *tap-to-tap* ou seja, o tempo entre os vazamentos. Uma corrida normalmente dura entre 40 e 60 minutos (MADIAS, 2014). O *tap-to-tap* (Figura 3) é ainda a soma do tempo do *Power On* (tempo com o transformador ligado) e *Power Off* (tempo com o transformador desligado). A produção total vazada em uma corrida no FEA é chamada de peso vazado, sendo calculada em toneladas de aço (RIEDINGER; OPFERMANN; VOGEL, 2008).

Figura 3 – Representação do tap-to-tap



Fonte: Autor (2023)

## 3.2 OPERAÇÃO DE REFINO SECUNDÁRIO

Após a etapa de vazamento do aço do FEA para a panela, inicia-se a etapa de refino secundário. Segundo González *et al.* (2021), o refino secundário é conhecido

pelo conjunto de operações e processos visando transformar o aço líquido advindo do FEA em um material com composição química ajustada e preparado para o processo de solidificação subsequente. Mourão *et al.* (2007) classifica esse processo, ainda, como toda etapa de refino que não é realizada no equipamento de fabricação do aço bruto (FEA ou conversor a oxigênio). Os equipamentos para realização das etapas de refino secundário, em especial os fornos panela para aciarias elétricas, surgiram como forma de reduzir os elevados tempos de refino que diminuía a produtividade. Uma aciaria pode aumentar sua produtividade de 10 a 20% com a introdução de um forno panela (RIBEIRO *et al.*, 2000).

Além dos aspectos de produtividade, os fornos panela atualmente são peças fundamentais para garantir a qualidade dos aços fabricados, com o objetivo principal de garantir três principais parâmetros (BROOKS E SUBAGYO, 2002):

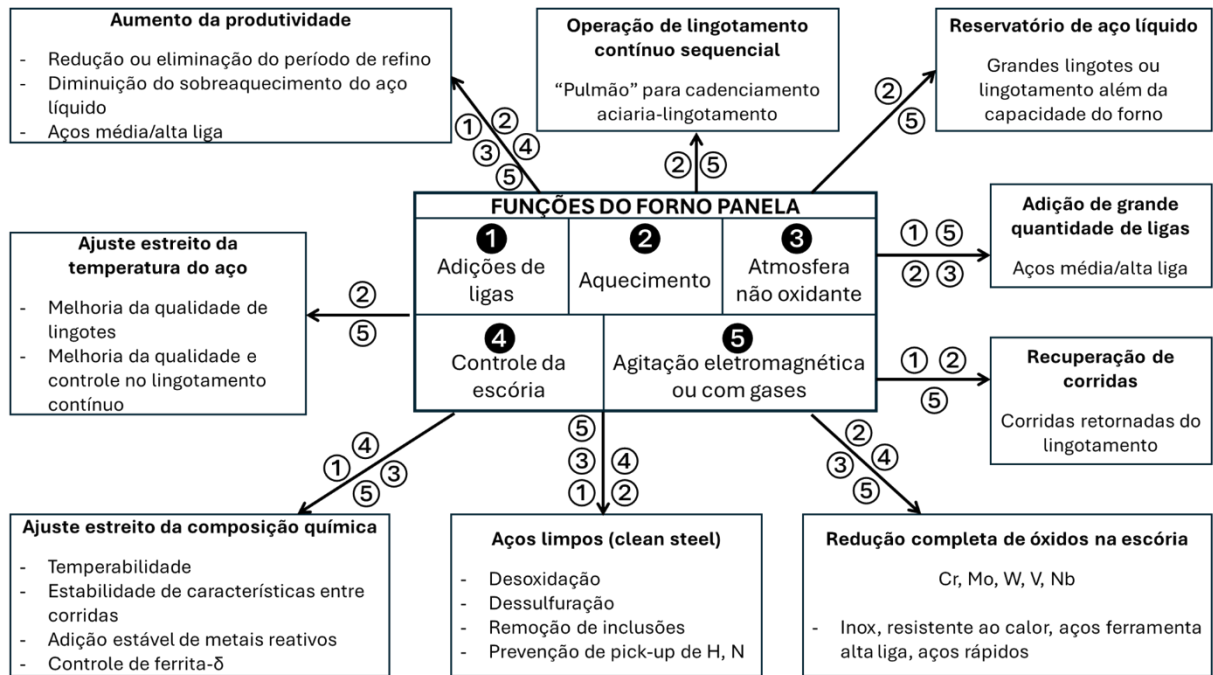
- Temperatura (adequada e homogênea);
- Composição química (homogênea e teores finais adequados de C, Mn, Si, S, P e outros elementos);
- Inclusões (quantidade, tamanho, morfologia e composição química).

Além desses principais parâmetros, os fornos panelas são responsáveis, ainda, conforme visto na Figura 4 em detalhe, segundo Ribeiro *et al.* (2000) por:

- Desoxidação;
- Dessulfuração;
- Servir como “pulmão” entre o FEA e o Lingotamento Contínuo, e em situações de emergência, possibilitar a retenção de aço líquidos por algumas horas.



Figura 4 – Funções do forno panela



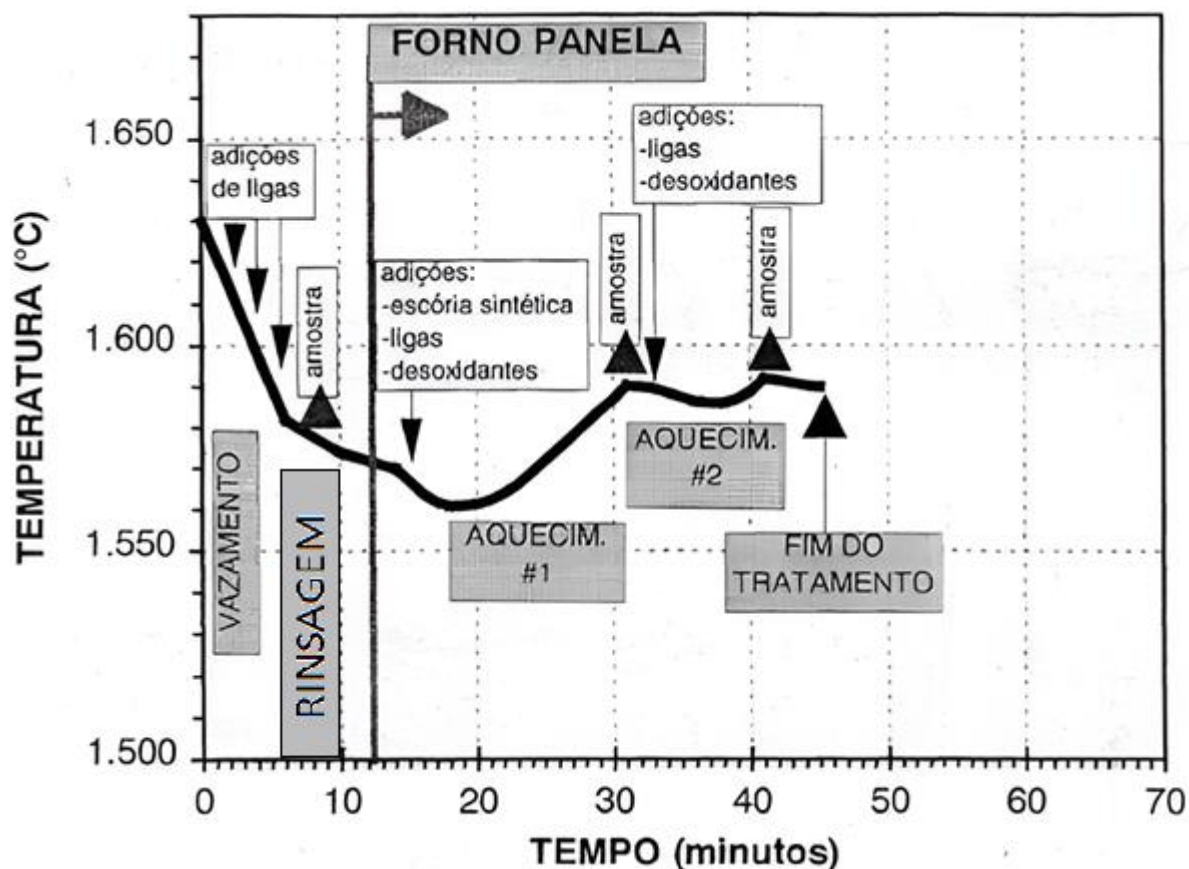
Fonte: Adaptado de Ribeiro *et al.* (2000)

O processo de tratamento dos aços durante a etapa de refino secundário em fornos panela possui as seguintes etapas (GERDAU, 2012b):

- Adição de ligas durante o vazamento;
- Formação de escória do forno panela;
- Retirada de amostra de aço e temperatura;
- Aquecimento do aço;
- Desoxidação;
- Ajuste da composição química e temperatura dos aços;
- Dessulfuração (caso necessário);
- Liberação para o processo do Lingotamento Contínuo.

Na Figura 5, é possível observar as etapas de operação do forno panela em relação ao tempo de operação e a respectiva temperatura do aço.

Figura 5 – Etapas da operação do forno panela em relação à temperatura e tempo



Fonte: Adaptado de Ribeiro *et al.* (2000)

O refino secundário é primordialmente um refino redutor, ou seja, um processo de desoxidação. Esse processo de desoxidação do aço é, em geral, realizado através do uso de Ferro-Manganês, Ferro-Silício, Silício-Manganês ou Alumínio como elementos principais de desoxidação. Os aços desoxidados com uso de silício ou silício-manganês geralmente são denominados aços “acalmados” ao silício (Fruehan, 1998).

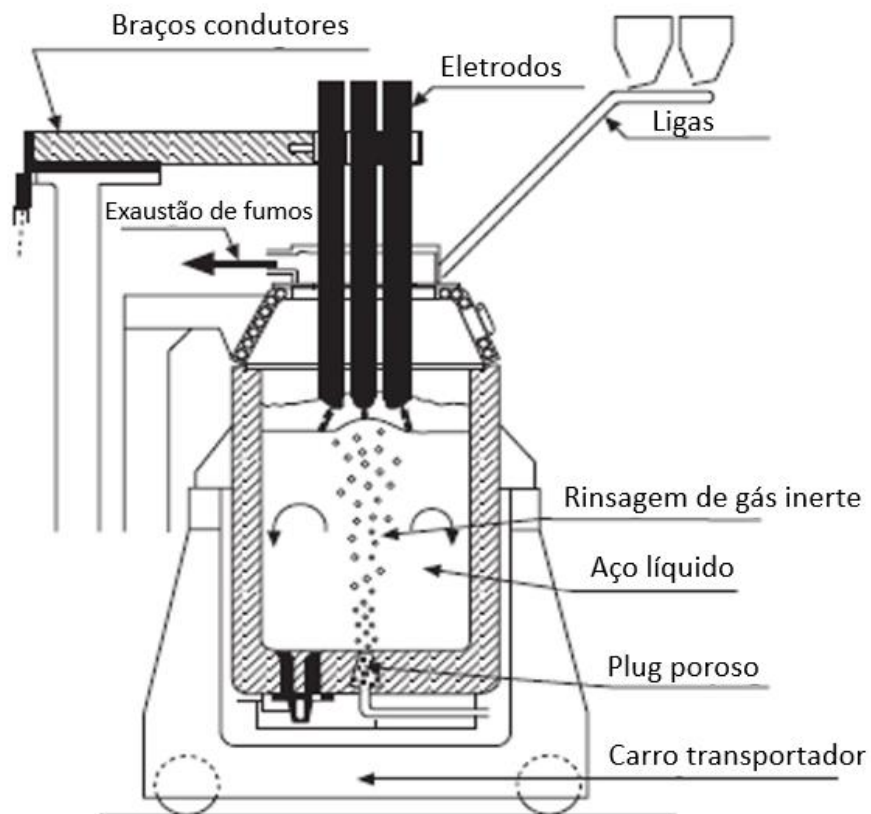
### 3.2.1 Equipamentos em um Forno Panela

De acordo com Mourão *et al.* (2007), por proporcionar versatilidade e o relativo baixo investimento, os fornos panela são os equipamentos mais utilizados para o refino secundário de aços no mundo. Os principais equipamentos presentes em um chamado forno panela podem ser vistos na Figura 6, e estão descritos abaixo:

- Transformador;
- Circuitos elétricos;

- Braços condutores para suporte dos eletrodos de grafite;
- Eletrodos de grafite;
- Abóbada;
- Sistemas de rinsagem ou injeção de gás inerte pelo fundo da panela;
- Sistema de adição automática de ligas (opcional, adição pode ser manual);
- Equipamento para retirada de amostras de aço e medição de temperatura;
- Carro transportador de panela.

Figura 6 – Principais equipamentos presentes em um forno panela



Fonte: Adaptado de Fruehan (1998)

### 3.2.2 Escória de Forno Panela

As escórias são os produtos fundidos formados pelos fluxantes e pela oxidação das impurezas nos metais. Devido a sua menor densidade, fusibilidade, e atividade química, as escórias provêm os meios para separação das impurezas dos metais e remoção do aço fabricado. As escórias servem, ainda, como proteção contra a

oxidação, incorporação de hidrogênio e nitrogênio do ar, controle da qualidade dos aços fabricados, entre outros (FRUEHAN, 1998).

Conforme descrito por Ribeiro *et al.* (2000), os principais objetivos das escórias de refino secundário são:

- Proteção do aço líquido contra incorporação de oxigênio, hidrogênio e/ou nitrogênio da atmosfera;
- Minimizar as perdas térmicas, atuando como isolante térmico;
- Captação de inclusões não-metálicas;
- Dessulfuração;
- Reduzir a exposição do arco elétrico, aumentando sua eficiência e reduzindo o desgaste refratário.

A composição química das escórias do forno panela é um fator extremamente importante, visto que a mesma influencia diretamente em todas as principais características das escórias, além de estar diretamente correlacionada com o nível de desgaste refratário das panelas (Gerdau, 2012b).

Uma composição típica de escórias de forno panela em aços acalmados ao silício pode ser vista no Quadro 1.

Quadro 1 – Composição típica de escórias de forno panela em aços acalmados ao silício

| <b>Tipo de Escória</b> | <b>FeO<br/>(% peso)</b> | <b>SiO<sub>2</sub><br/>(% peso)</b> | <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><br/>(% peso)</b> | <b>CaO<br/>(% peso)</b> | <b>MgO<br/>(% peso)</b> | <b>MnO<br/>(% peso)</b> |
|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Acalmada ao Silício    | 1 - 2                   | 20 - 30                             | 5 - 10  | 45 - 55                 | 5 - 7                   | 0,5 - 1,5               |

Fonte: Adaptado de Behera (2015)

Já no Quadro 2, adaptado de Pretorius (1996), é possível verificar as principais origens dos óxidos presentes nas escórias de aciarias.

Quadro 2 – Óxidos presentes na escória de aciaria e suas origens

| Óxidos                         | Práticas mais usadas           | Origem  |
|--------------------------------|--------------------------------|---|
| CaO                            | Adicionado                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cal (98% CaO).</li> <li>- Dolomita (<math>\approx 58\%</math> CaO e <math>39\%</math> MgO).</li> <li>- Cálcio-Aluminatos (<math>\approx 45\%</math> CaO e <math>53\%</math> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).</li> <li>- Refratários dolomíticos.</li> </ul>   |
| MgO                            | Adicionado                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dolomita (<math>\approx 58\%</math> CaO e <math>39\%</math> MgO).</li> <li>- Magnesia (<math>&gt; 92\%</math> MgO).</li> <li>- Refratários magnesianos e dolomíticos.</li> </ul>   |
| SiO <sub>2</sub>               | Do processo ou da carga        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxidação do Si na carga (<math>Si + O_2 = SiO_2</math>).</li> <li>- Desoxidação do aço (<math>2O + Si = SiO_2</math>).</li> <li>- Areia e terra.</li> <li>- Refratários silico-aluminosos.</li> </ul>  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Do processo ou adicionado (FP) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxidação da carga (<math>2Al + 3/2O_2 = Al_2O_3</math>).</li> <li>- Desoxidação do aço (<math>3O + 2Al = Al_2O_3</math>).</li> <li>- Escória sintética Cálcio-Aluminatos (<math>\approx 45\%</math> CaO e <math>53\%</math> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).</li> <li>- Escória sintética Bauxita (<math>&gt; 80\%</math> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).</li> <li>- Refratários (Alta alumina).</li> </ul> |
| CaF <sub>2</sub>               | Adicionado na panela           | - Conteúdo de Fluorita entre 80 e 90%. O restante composto principalmente de SiO <sub>2</sub> e CaCO <sub>3</sub> .   |
| FeO                            | Processo no FEA                | - Carga ( $2Fe + O_2 = 2FeO$ ).   |
| MnO                            | Processo no FEA                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Carga (<math>2Mn + O_2 = 2MnO</math>).</li> <li>- Desoxidação do aço (<math>Mn + O = MnO</math>).</li> </ul>   |

Fonte: Adaptado de Pretorius (1996)

### 3.2.2.1 Basicidade

A basicidade da escória é definida pela relação entre os óxidos ácidos e básicos presentes na escória. A basicidade é, então, utilizada para simplificar a avaliação do quão adequada é uma escória em relação ao refratário presente na panela (Math, 2012).

Pretorius e Carlisle (1998) descrevem, ainda, a basicidade como o balanço entre os óxidos refratários e óxidos fluxantes na forma de razão. A basicidade binária ou B<sub>2</sub> é a mais utilizada e corresponde à fração entre %CaO e %SiO<sub>2</sub> na escória. As

relações utilizadas para representar a razão entre os óxidos refratários e os óxidos fluxantes podem ser vistas nas equações abaixo:

$$B_2 = \frac{CaO}{SiO_2} \quad 1$$

$$B_3 = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3} \quad 2$$

$$B_4 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \quad 3$$

$$B_5 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3 + CaF_2} \quad 4$$

### 3.3 CICLO DE OPERAÇÃO DAS PANELAS

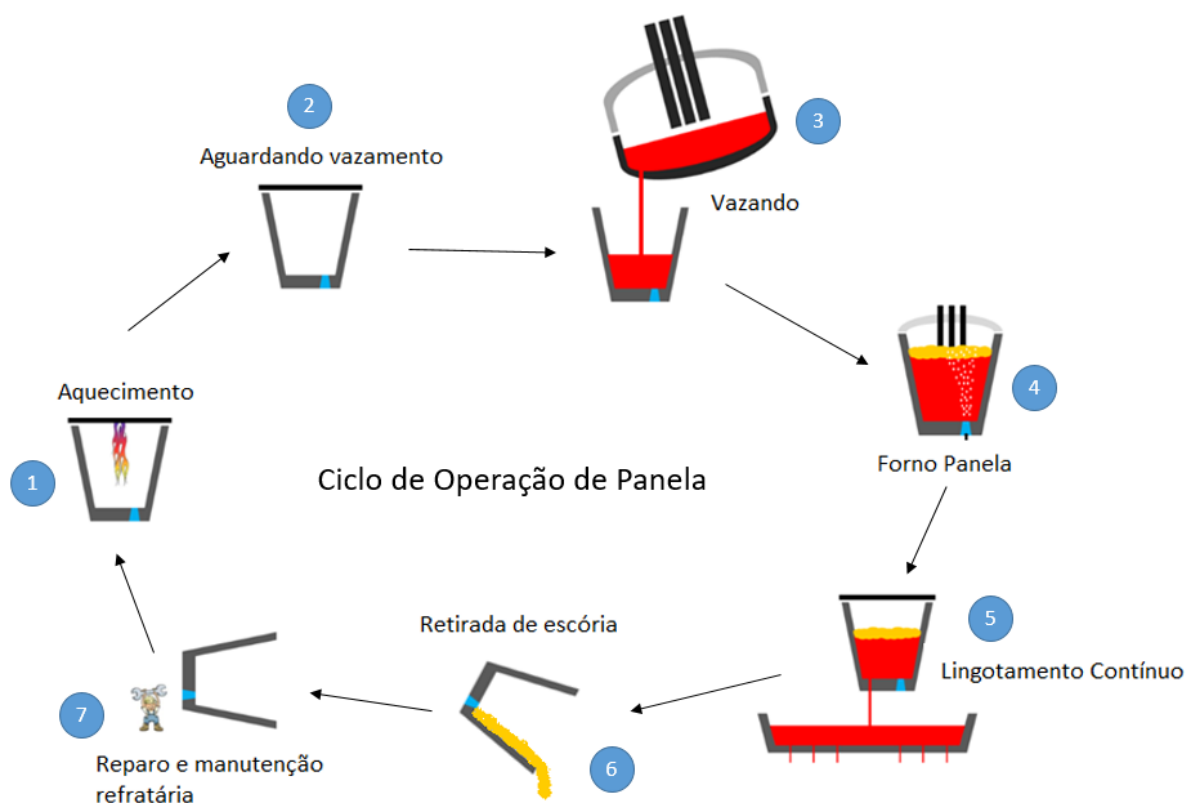
Após ajustada a composição química e temperatura do aço líquido nas panelas, se dá o fim da etapa de refino secundário e a panela é transportada para o lingotamento contínuo. No lingotamento contínuo, a panela será esvaziada e o aço líquido solidificado e transformado em tarugos, blocos ou placas de aço. Após esvaziada a panela, a mesma é transportada para a área de preparação de panelas. Lá é retirada a escória remanescente presente no fundo da panela, além de realizada manutenção e inspeção refratária de válvulas, plugs, sedes e tijolos refratários (DA SILVA, 2013).

Conforme discutido por Al-Harbi *et al.* (2012), o ciclo de operação de panelas (Figura 7) em uma aciaria elétrica pode ser descrito com as seguintes etapas:

1. Aquecimento das panelas;
2. Aguardando vazamento;
3. Vazamento do FEA para panela;
4. Tratamento no forno panela;

5. Lingotamento Contínuo;
6. Retirada de escória remanescente;
7. Inspeção, reparo e manutenção dos refratários.

Figura 7 – Ciclo de operação de painéis em uma aciaria elétrica

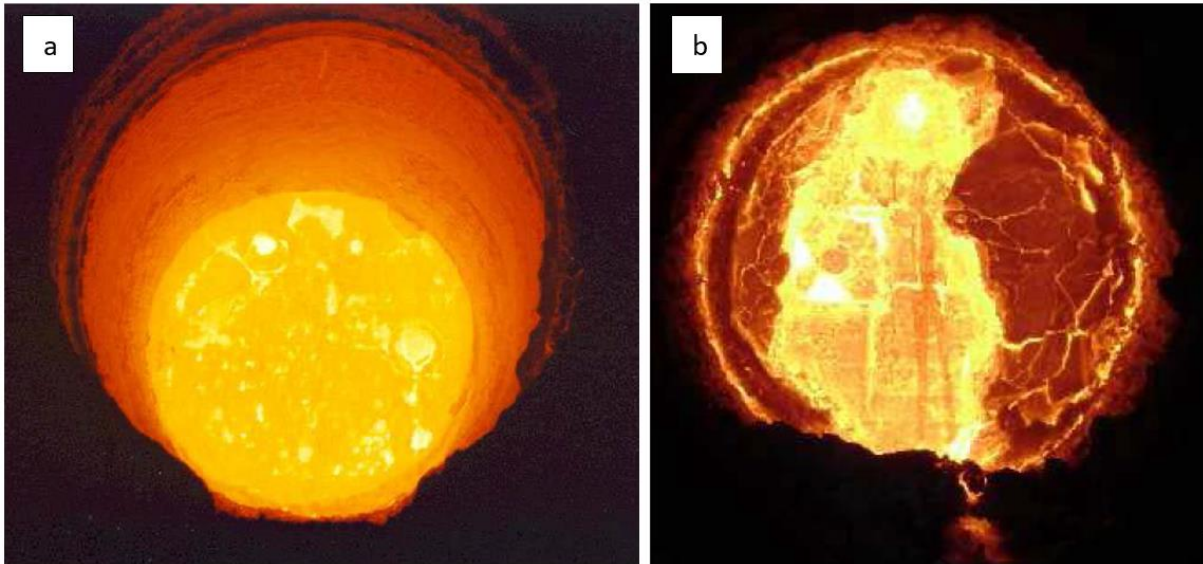


Fonte: Adaptado de Al-Harbi (2012)

Após a passagem completa do aço líquido presente na panela para o distribuidor, inicia-se a passagem da escória, que devido a sua menor densidade, sobrenadava na parte superior da panela. A passagem de escória para o distribuidor não é desejável e, portanto, há o fechamento da válvula gaveta da panela após o aparecimento de escória no fluxo que anteriormente vazava somente aço. Esta etapa finaliza o lingotamento da panela em questão, que será movimentada para descartar a escória remanescente na panela. Fatores como temperatura, viscosidade e partição líquido+sólido da escória influenciam o quanto dessa escória escoará para fora da panela e o quanto permanecerá dentro da panela. O acúmulo consecutivo de escória no fundo e paredes da panela durante a etapa de retirada de escória acarretará numa redução do volume útil da panela, influenciando, assim, o peso vazado e a

produtividade da aciaria. Na Figura 8, é possível verificar exemplos de panelas sem e com acúmulo de escória no fundo.

Figura 8 – Panela sem acúmulo de escória no fundo (a) e panela com acúmulo de escória no fundo (b)



Fonte: Gerdau (2012b)

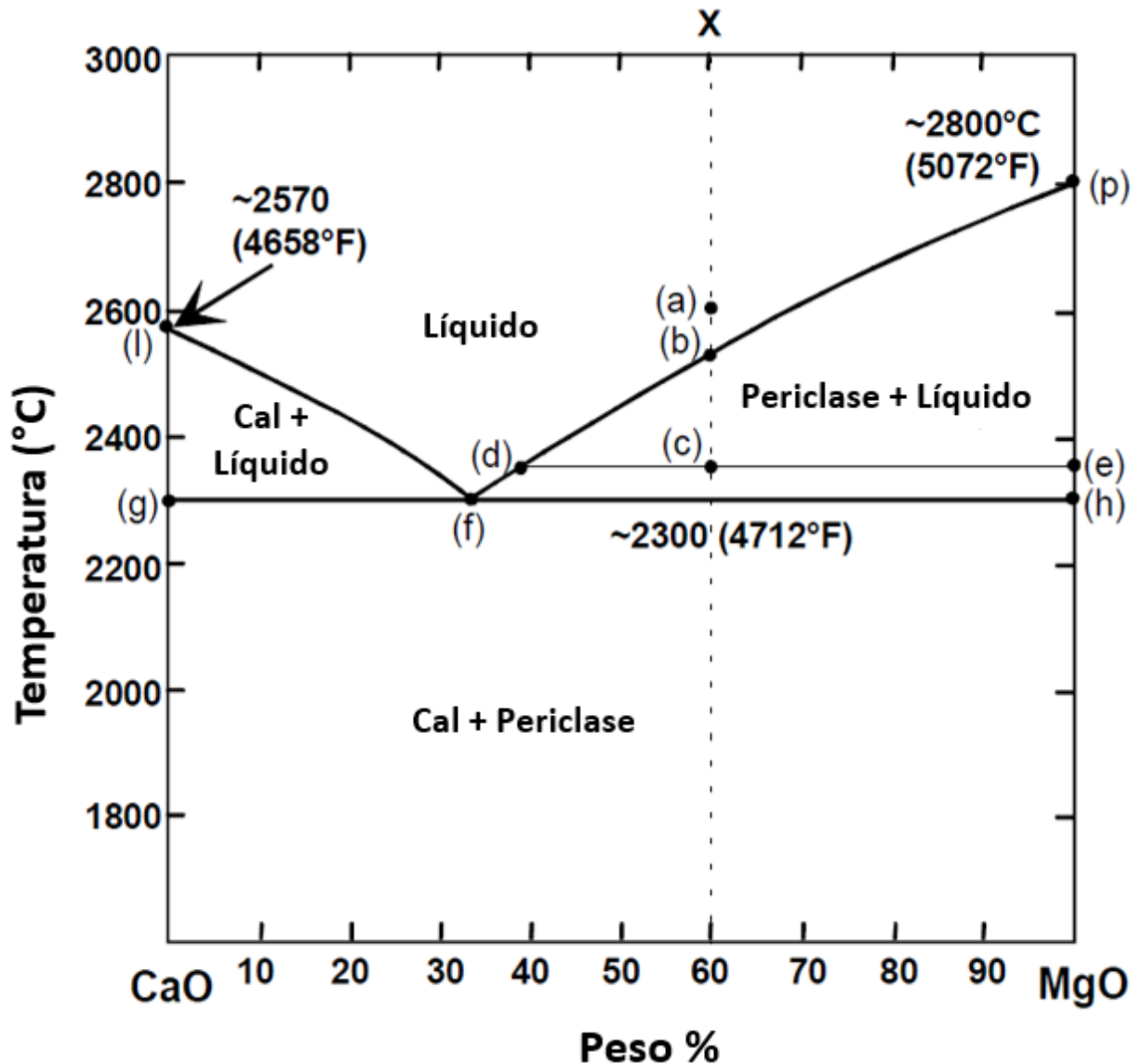
### 3.4 DIAGRAMA DE FASES

Os diagramas de fase fornecem uma variedade de informações termodinâmicas através do equilíbrio entre várias fases (líquida, sólida e gasosa), bem como dados quantitativos sobre a distribuição de fases em um sistema específico (SEETHARAMAN, 2005). Os diagramas binários, ternários e quaternários são considerados multicomponentes e neles é possível determinar a fração de cada fase através da fração molar dos componentes presentes no diagrama (GERDAU, 2012a).

Os diagramas binários são compostos pela fração molar de dois componentes em função da temperatura, e o ponto obtido determina a fração de fase daquele material. A Figura 9 é uma demonstração simplificada de um diagrama de fases do sistema CaO-MgO (SEETHARAMAN, 2005).



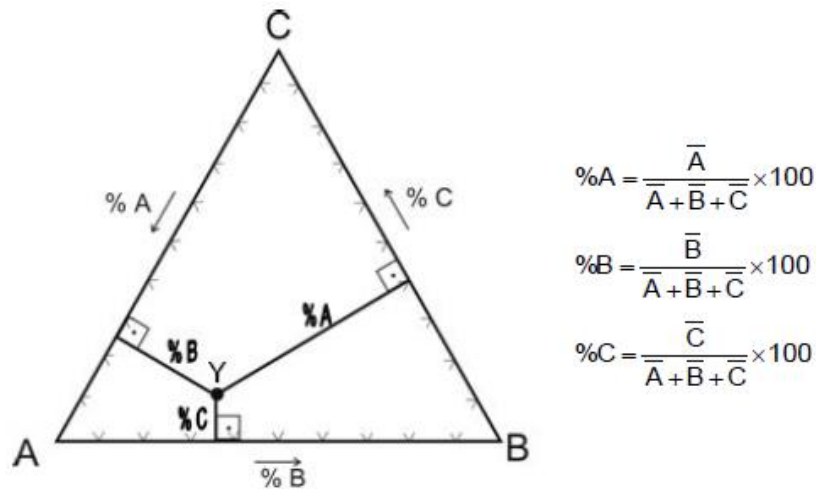
Figura 9 – Diagrama de fase simplificado do sistema CaO-MgO



Fonte: Adaptado de Pretorius (1996)

Os diagramas ternários (Figura 10) são amplamente utilizados para determinar as fases presentes na escória de refino secundário. Esses diagramas possuem três componentes (em geral os componentes em maior fração molar do composto) e duas variáveis de estado: temperatura e composição. A pressão é considerada constante, a exemplo dos diagramas binários (Pretorius, 1996). O ponto Y na Figura 10 corresponde à composição do composto representado pelo ponto em um diagrama e, através do método das perpendiculares, é possível calcular o percentual de cada componente.

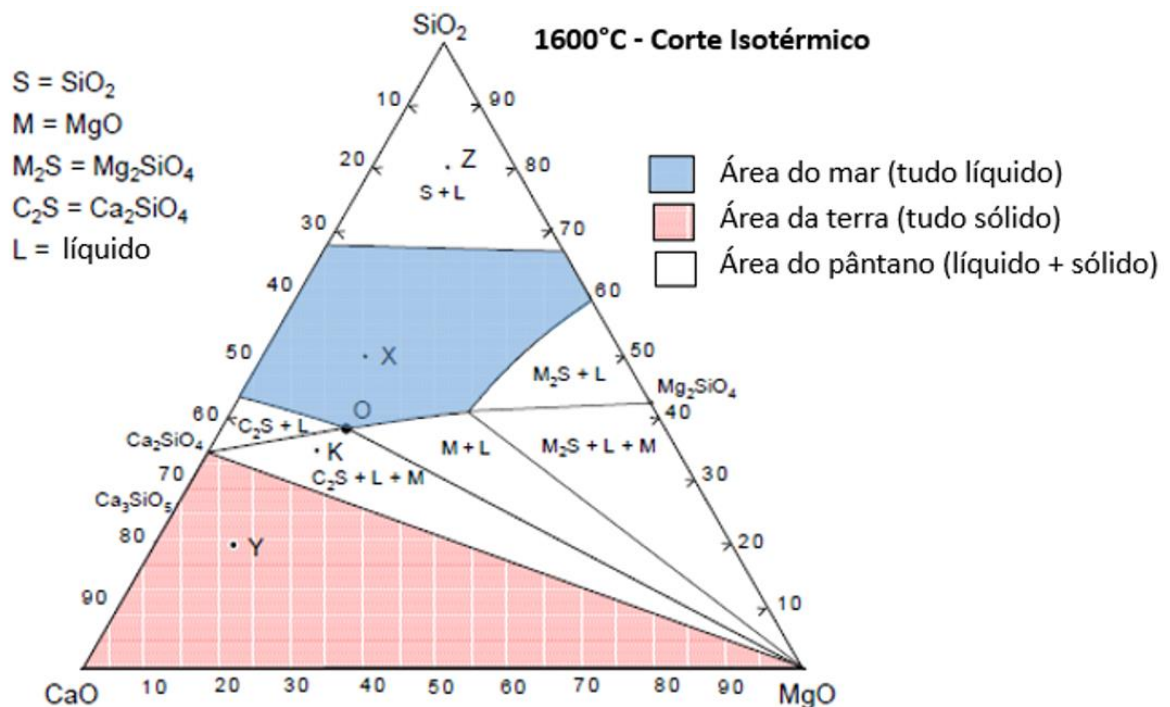
Figura 10 – Representação do método das perpendiculares em um diagrama ternário



Fonte: Gerdau (2012a)

As principais ferramentas utilizadas para analisar escórias de aciaria em diagramas ternários são os cortes isotérmicos e os triângulos de compatibilidade. A Figura 11 apresenta um diagrama ternário CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO, que é o mais indicado para analisar escórias em aços acalmados ao silício segundo Pretorius (1996), com corte isotérmico a 1600°C (temperaturas de operação em forno panela) e triângulos de compatibilidade (apresentando as fases precipitadas).

Figura 11 – Corte isotérmico no diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>

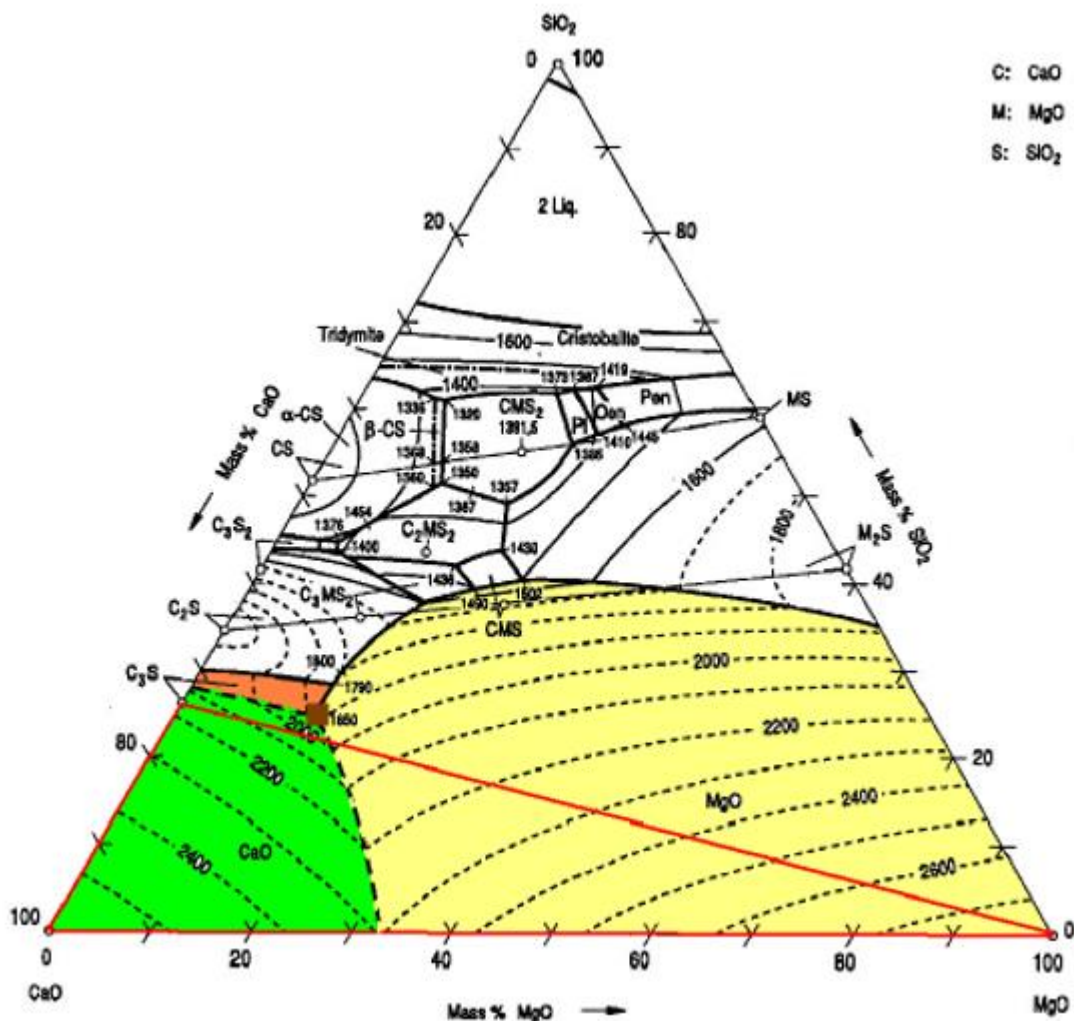


Fonte: Adaptado de Pretorius (1996)

### 3.4.1 Triângulos de compatibilidade de interesse para refino secundário

Na Figura 12, tem-se em vermelho o triângulo  $\text{CaO} - \text{MgO} - 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , que possui os vértices nos pontos 100%  $\text{CaO}$ , 100%  $\text{MgO}$  e no ponto de isobasicidade igual a 3 (formação de  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ). O início da fusão do peritético se dá a  $1850^\circ\text{C}$  (quadrado marrom) e, portanto, para as temperaturas de operação de  $1600^\circ\text{C}$  a escória é completamente sólida (GERDAU, 2012a).

Figura 12 - Representação do triângulo  $\text{CaO} - \text{MgO} - 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  no diagrama ternário  $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2$

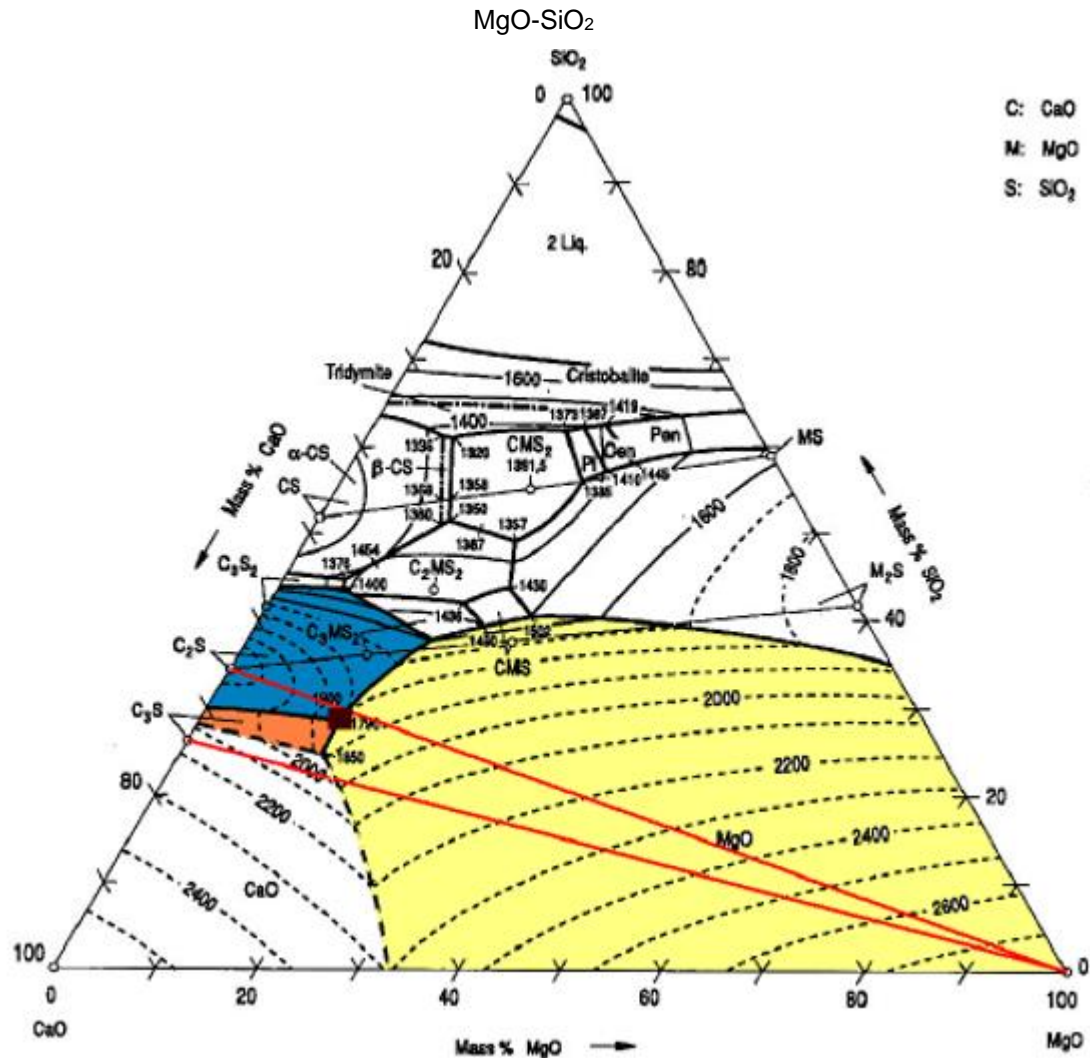


Fonte: Adaptado de Gerdau (2012a)

O segundo triângulo de interesse é o  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - \text{MgO}$  (Figura 13), que se dá nos vértices de isobasicidade igual a 3, isobasicidade igual a 2 e 100%  $\text{MgO}$ . O início de fusão no eutético acontece no ponto marrom a  $1790^\circ\text{C}$ . Portanto, em

se tratando de escórias sem adição de  $\text{CaF}_2$  e com baixo teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , é uma área completamente sólida na temperatura de trabalho de  $1600^\circ\text{C}$  (GERDAU, 2012a).

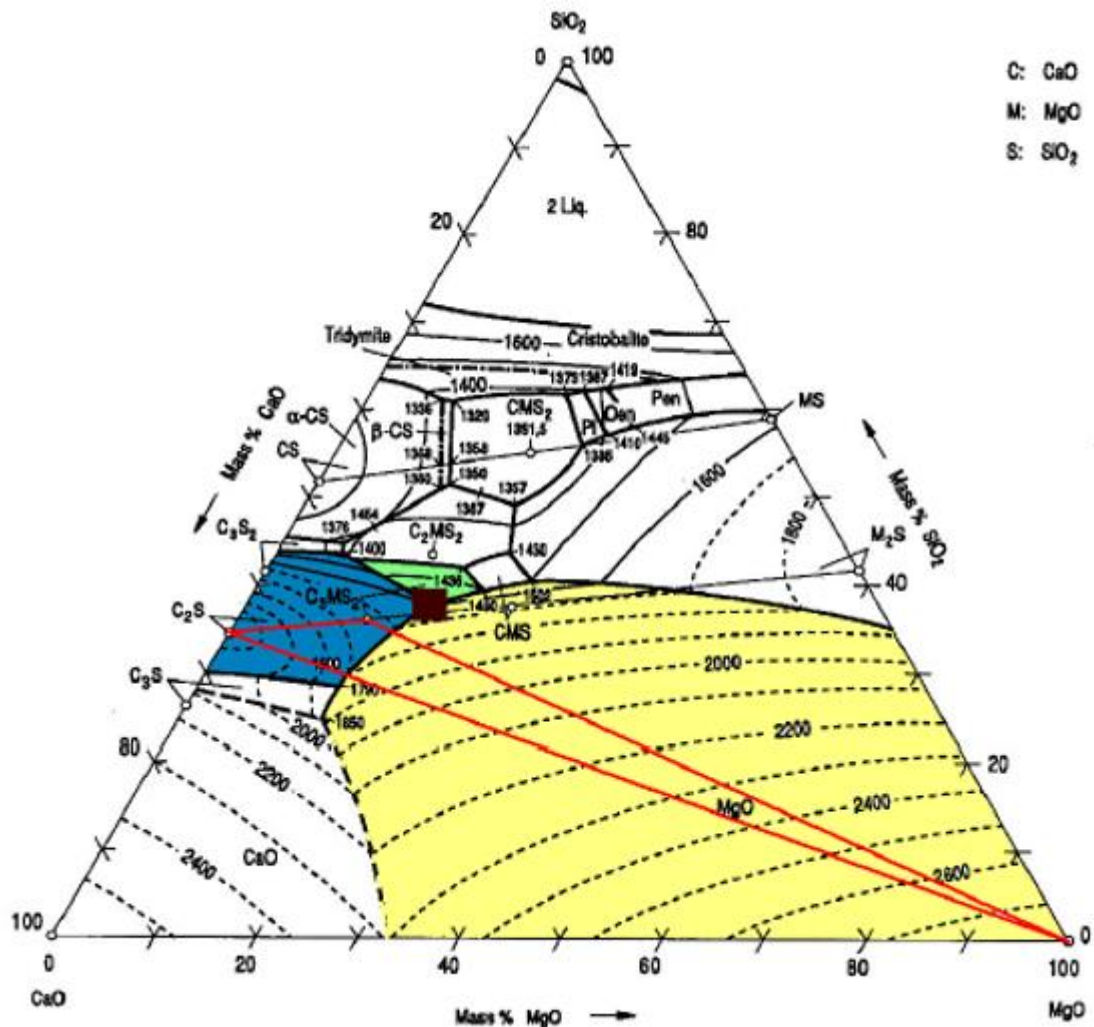
Figura 13 - Representação do triângulo  $3\text{CaO}.\text{SiO}_2 - 2\text{CaO}.\text{SiO}_2 - \text{MgO}$  no diagrama ternário  $\text{CaO}-$



Fonte: Adaptado de Gerdau (2012a)

Na Figura 14, tem-se o triângulo de interesse  $3\text{CaO}.\text{MgO}.\text{SiO}_2 - 2\text{CaO}.\text{SiO}_2 - \text{MgO}$  em vermelho. A isobasicidade dentro desse triângulo se dá entre 1,5 e 2,0 e o início da fusão do peritético é a  $1575^\circ\text{C}$ , ou seja, abaixo da temperatura de operação de  $1600^\circ\text{C}$ . Portanto, qualquer ponto dentro do triângulo terá uma fração líquida e sólida (GERDAU, 2012a).

Figura 14 - Representação do triângulo  $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - \text{MgO}$  no diagrama ternário CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>

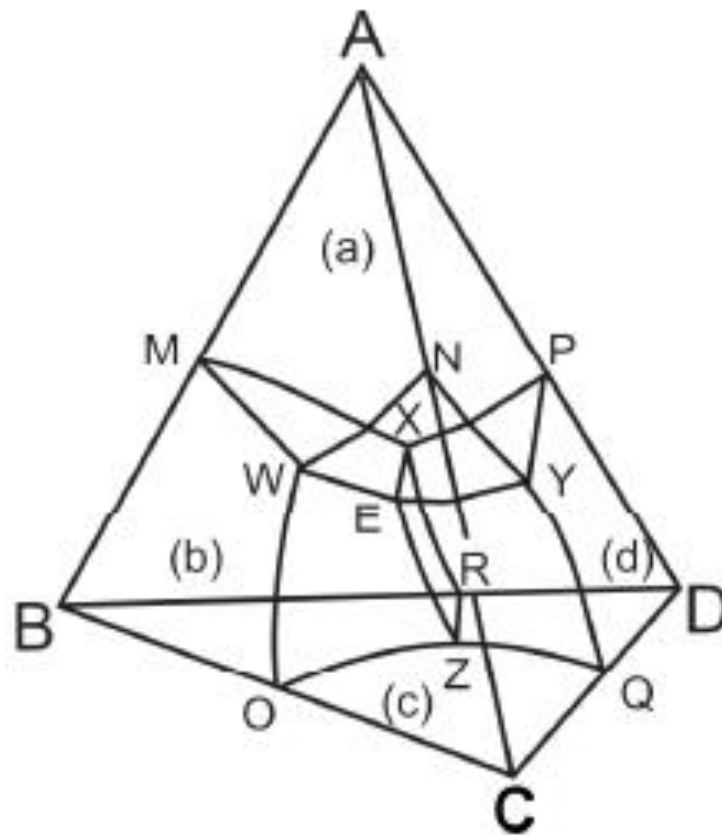


Fonte: Adaptado de Gerdau (2012a)

### 3.4.2 Diagramas quaternários

Os diagramas quaternários requerem três dimensões para representar a composição dos materiais e uma quarta dimensão para representar a temperatura. Dessa forma, uma representação gráfica desses diagramas torna-se tarefa extremamente complexa (Pretorius, 1996). Na Figura 15, tem-se uma representação de um diagrama quaternário na forma de um tetraedro.

Figura 15 - Modelo de um tetraedro representando um diagrama quaternário

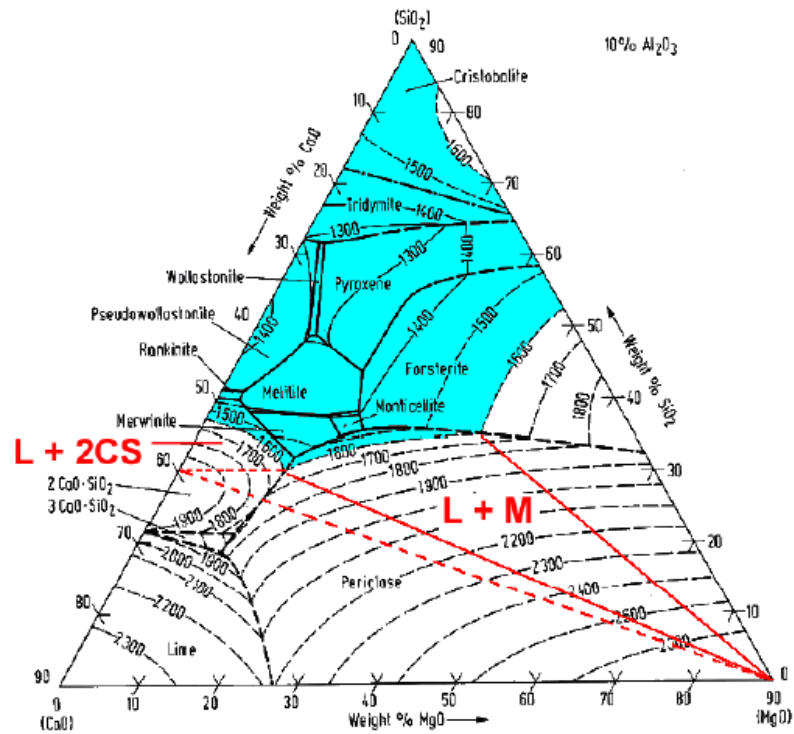


Fonte: Gerdau (2012a)

Entretanto, a forma mais comum de representar os sistemas com quatro componentes são os diagramas pseudoternários. Para tal, é selecionado no tetraedro a isopleta de interesse, na qual será destacada a isoterma desejada. Conforme descrito em Gerdau (2012a), em aciarias elétricas o exemplo mais utilizado é o diagrama  $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$  com valores fixos para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Nas Figuras 16 e 17, é possível ver os dois diagramas pseudo-ternários para 10% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 20% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  respectivamente. Comparando-os, é possível verificar uma série de características, como por exemplo, o aumento da área de composto 100% líquido com o aumento da alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o aparecimento de fase espinélio e o deslocamento das demais fases líquido+sólido.

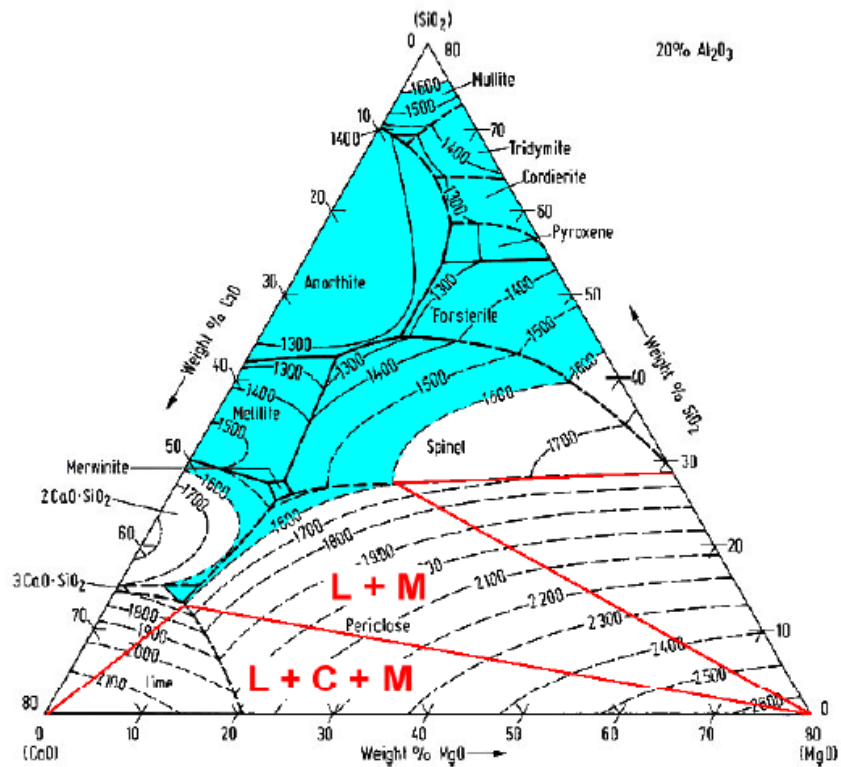


Figura 16 – Diagramas pseudo-ternários CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para 10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Fonte: Adaptado de Gerdau (2012a)

Figura 17 – Diagramas pseudo-ternários CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



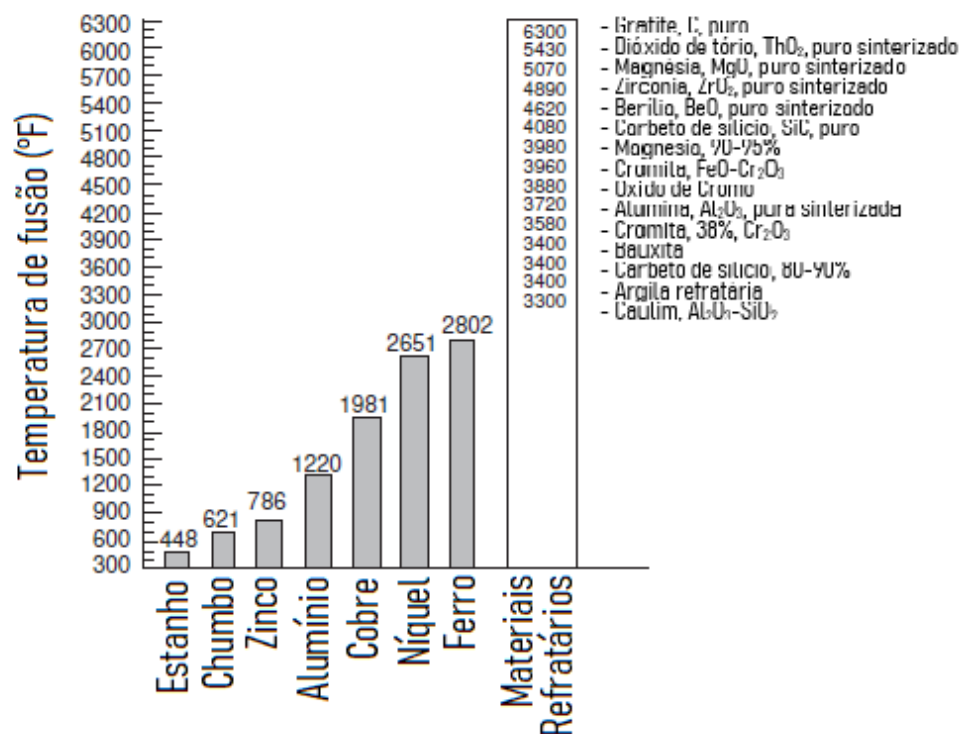
Fonte: Adaptado de Gerdau (2012a)

### 3.5 REFRATÁRIOS

Devido ao alto ponto de fusão (Figura 18), os materiais refratários são os principais materiais utilizados na siderurgia para o revestimento de fornos e panelas. Os materiais refratários empregados devem, ainda, ter a capacidade de suportar a carga mecânica (carregamento da sucata no FEA) e o ataque químico (causado principalmente pela interação entre refratário e escória) (GHOSH, 2013).

Refratários são materiais de custo elevado, e na presença de falhas podem resultar em grandes perdas de produção, equipamentos e, às vezes, impactos na segurança operacional. O tipo de refratários também influenciará no consumo de energia e na qualidade do produto. Portanto, a seleção dos materiais refratários mais adequados para cada aplicação é de suma importância. O refratário mais adequado para uma aplicação não é, desta forma, necessariamente aquele que dura mais, mas em vez disso, aquele que oferece o melhor equilíbrio entre o custo inicialmente instalado e o desempenho. Do ponto de vista químico, substâncias refratárias são de três classes: ácida, básica e neutra. Teoricamente, refratários ácidos não devem ser usados em contato com escórias básicas, enquanto os refratários básicos podem ser melhor usados em contato com um ambiente químico básico (FRUEHAN, 1998).

Figura 18 – Temperatura de fusão de diversos materiais



Fonte: Adaptado de Fruehan (1998)



### 3.5.1 Refratários para panela

Os tijolos refratários dolomíticos (CaO + MgO) são os mais utilizados para processos de forno panela para aços acalmados ao silício e baixo teor de alumina. A dolomita possui excelente refratariedade e é termodinamicamente muito estável (FRUEHAN, 1998). A composição típica de um tijolo dolomítico de alta pureza pode ser verificada no Quadro 3.

Quadro 3 – Composição química típica de tijolos dolomíticos

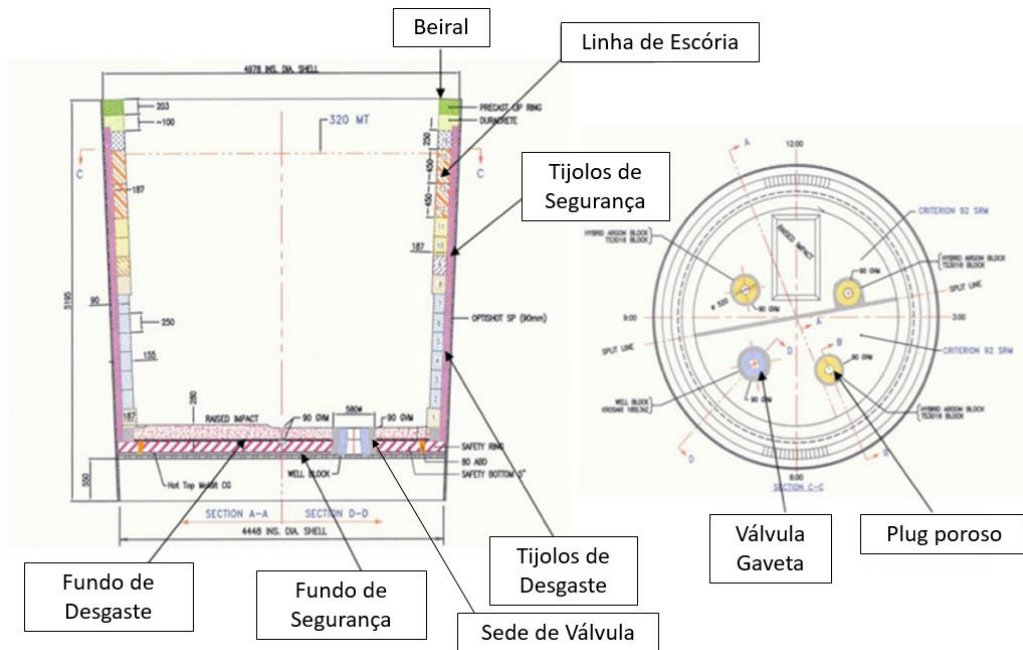
| <b>Componentes</b>             | <b>%</b> |
|--------------------------------|----------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,45     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,90     |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,70     |
| MgO                            | 41,20    |
| CaO                            | 56,70    |

Fonte: Adaptado de Fruehan (1998)

#### 3.5.1.1 Design de refratário de panela

Conforme descrito por Fruehan (1998), os refratários das panelas são dimensionados para cada parte da panela por tipo e espessura, visando máxima eficiência e mínimo custo. As principais áreas refratárias da panela são a região de trabalho ou desgaste, composta por linha de escória, linha de desgaste e fundo da panela, bem como pela região de segurança, composta por tijolos de segurança ou tijolos permanentes. Além das regiões descritas, há ainda a região de impacto, correspondente à região onde o fluxo de aço atinge o fundo da panela durante o vazamento, e o plug poroso, responsável pela injeção de gás inerte durante a operação do forno panela. Na Figura 19, é possível verificar um design típico de refratário de panela com seus principais componentes e regiões de refratários.

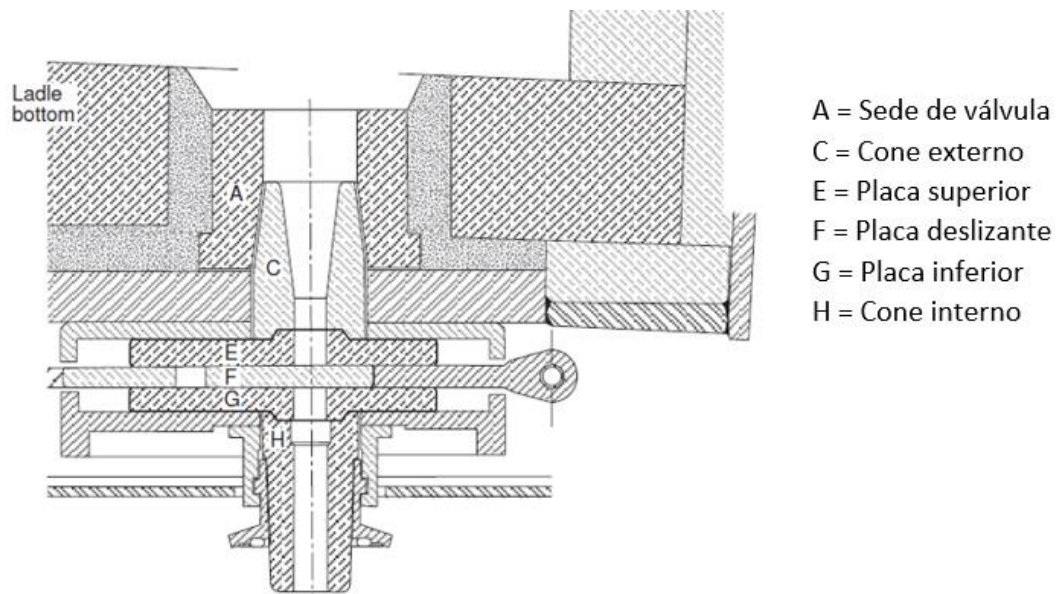
Figura 19 – Design refratário da panela e posição do plug poroso e válvula gaveta



Fonte: Adaptado de MWI Bureau (2019)

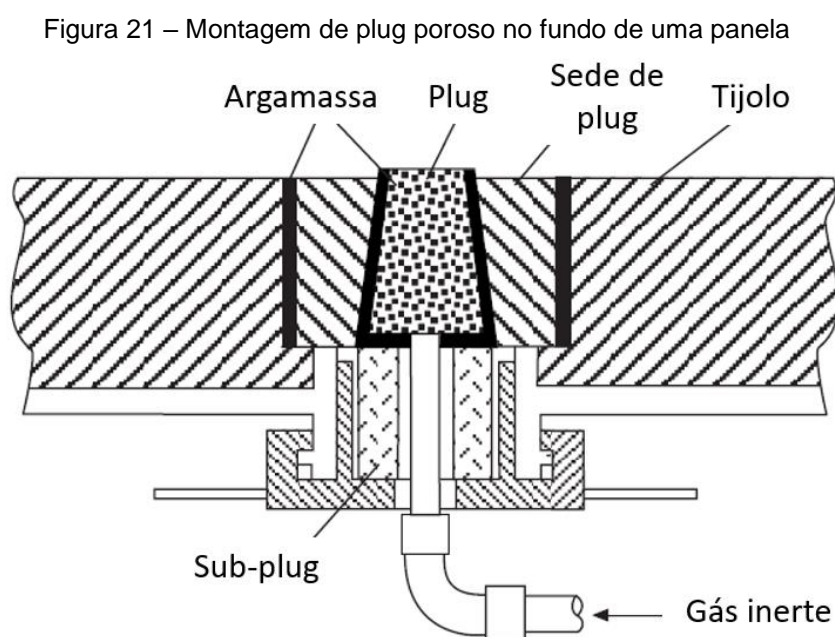
Para possibilitar o vazamento do aço da panela para o distribuidor, há um sistema de válvula gaveta na panela que é composto por sede de válvula (que corresponde ao bloco onde o cone interno se assenta), cone interno, cone externo, válvula interna, válvula externa e válvula deslizante (FRUEHAN, 1998). Um esboço desse sistema pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Refratários típicos em um sistema de válvula gaveta



Fonte: Adaptado de Fruehan (1998)

Visando atingir temperaturas e composição química homogênea, o aço presente nas placas é agitado utilizando-se de um sistema de rinsagem que injeta gás inerte (normalmente argônio) pelo fundo da placa. O gás inerte é injetado por um plug poroso refratário que é instalado durante a etapa de montagem das placas. O sistema é composto por componentes como plug poroso, sede de plug, sub-plug, gaxeta de vedação, componentes mecânicos, chapa de base, placa de retenção e placa de vedação. Um esboço simplificado com os principais componentes refratários do sistema de rinsagem, retirado de Fruehan (1998), pode ser visto na Figura 21.



Fonte: Adaptado de Fruehan (1998)

### 3.5.2 Mecanismos de desgaste de refratários

A vida de revestimentos refratários é, em geral, limitada pela corrosão química, erosão, falha por choque térmico ou uma combinação destes (LEE e ZHANG, 2004).

Pode-se determinar, então, que o processo de desgaste dos refratários ocorre gradualmente, tendo como principal fator a corrosão química. Em alguns casos, esse processo é fortemente acelerado devido aos danos em consequência das oscilações térmicas e da influência dos fenômenos mecânicos, como a erosão, abrasão e esforços de compressão, flexão e tração. Em geral, tem-se que a corrosão química inicia a degradação e as tensões térmicas e mecânicas levam à degradação final dos tijolos refratários (BRAGANÇA, 2012).

### 3.5.2.1 Corrosão Química

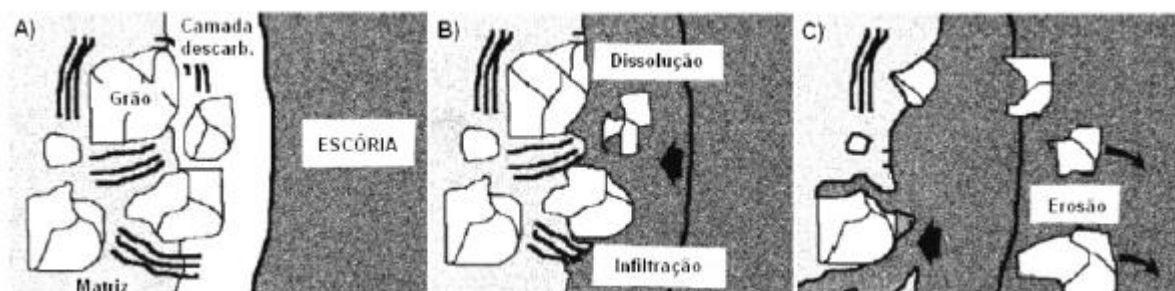
De forma geral, um processo de corrosão pode ser definido por qualquer interação entre uma fase sólida e uma fase líquida, resultando em um efeito deletério em qualquer uma das fases (JAHNSSON, JÖNSSON, BRABIE, 2005).

Escórias não saturadas em MgO e CaO em contato com tijolos dolomíticos tendem a buscar o equilíbrio químico interagindo com o MgO e CaO dos materiais refratários no qual estão em contato (PRETORIUS, 1996).

A corrosão química seguida de dissolução é o principal mecanismo de desgaste refratário em processos siderúrgicos. Essa corrosão química consiste na penetração de líquidos seguindo a lei de Poiseuille e subsequente dissolução do sólido em contato com o líquido. A taxa de corrosão é uma função de diversas variáveis, incluindo temperatura, composição da interface refratário/escória, densidade, viscosidade, difusividade e grau de agitação da escória (LEE e ZHANG, 2004).

A primeira etapa no processo de corrosão é a dissolução ou difusão, na qual o material refratário é dissolvido na escória líquida. Após a difusão do material refratário, ocorre a penetração da escória no material refratário, causando desgaste mecânico e químico. O terceiro estágio é a erosão, que é um processo de abrasão do material refratário ao ataque pelos gases e ao movimento da escória (JAHNSSON, JÖNSSON, BRABIE, 2005). Há ainda, especialmente para refratários com adição de carbono (como por exemplo MgO-C), uma etapa anterior de oxidação do carbono amorfo ou do grafite, aumentando a molhagem do refratário, favorecendo a penetração ou infiltração da escória nos poros presentes nos refratários. A Figura 22 exemplifica as etapas descritas de corrosão do material refratário (MATTIELLO, 2016).

Figura 22 – Mecanismos de desgaste de material refratário em contato com escória de aciaria



Fonte: Adaptado de Lee e Zhang (2004)

## 4 METODOLOGIA

A coleta de dados para desenvolvimento do presente estudo foi realizada em uma indústria siderúrgica semi-integrada localizada em Recife, Pernambuco. A referida empresa destaca-se na produção de toda a linha de aços longos, fundamentais na construção civil, em estruturas de grades e portões e na indústria mecânica e automotiva.

Visando reduzir a incidência da aderência de escória no fundo das panelas durante a operação de refino secundário no processo de fabricação do aço, foram analisadas as principais características da escória do forno panela que influenciam a ocorrência desse problema, como sua composição química, viscosidade e temperatura liquidus, fatores esses que se correlacionam entre si.

### 4.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA DO FORNO PANELA

Durante o processo produtivo de fabricação do aço, foram retiradas amostras de escória de 14 diferentes corridas produzidas, durante a etapa de refino secundário no forno panela, visando analisar suas composições químicas. Para retirar tais amostras, foi utilizado um cabo metálico com uma ponta em formato de concha, e elas foram coletadas sempre ao final do processo de refino secundário, ou seja, após as etapas de desoxidação, adição de ligas e aquecimento do aço.

#### 4.1.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras passou pelas etapas de moagem, peneiramento e preparo do copo porta amostra com filtro fosco e transparente, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Preparação de amostra de escória para análise em EDXRF



Fonte: Autor (2022)

#### 4.1.2 Análise das amostras

A análise da composição química das escórias do forno panela foi realizada utilizando um espectrômetro EDXRF (*Energy Dispersive X-Ray Fluorescence*) do fabricante ThermoScientific, operando em três diferentes condições, para melhor identificação dos picos de energia para os respectivos elementos de interesse, sendo estas:

- 8kV sem filtro;
- 8kV com filtro de celulose;
- 20kV com filtro de película fina de paládio (*Pd thin*).

#### 4.1.3 Caracterização da escória do forno panela

Uma vez realizadas as análises da composição química das 14 amostras de escória do forno panela, definiu-se uma escória média padrão para esse processo,

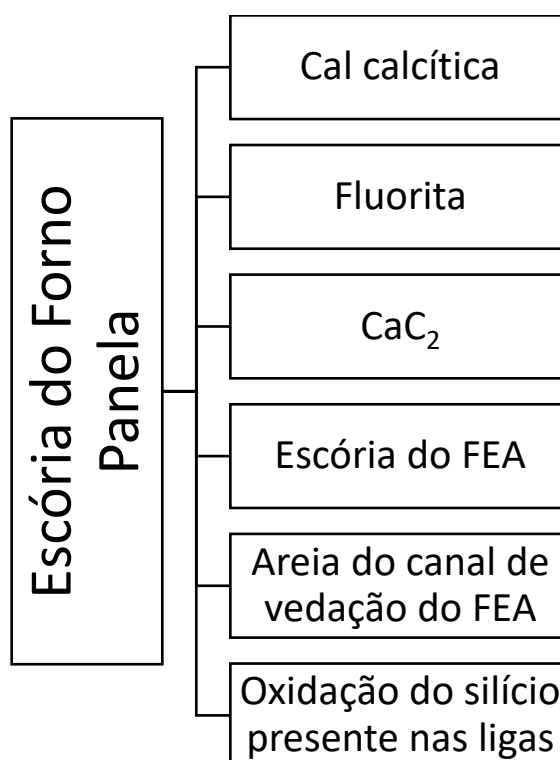
calculada por meio do valor médio dos percentuais de cada composto químico constituinte, para efeitos de avaliação.

Deste modo, de posse da composição química média da escória do forno panela em análise, foi plotado o ponto que a representa no diagrama de fases ternário num sistema CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO para 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Figura 12). A seleção do diagrama ternário em questão foi realizada com base em análise bibliográfica acerca do tema, conforme disposto no item 3.4.1.

#### 4.1.4 Análise dos compostos formadores da escória do forno panela

Foi realizado um balanço de massa da escória do forno panela, considerando as principais fontes de material advindos de processos anteriores, bem como aqueles adicionados no forno panela durante a etapa de refino secundário para formação da escória, conforme disposto na Figura 24.

Figura 24 – Principais compostos que formam a escória do forno panela



Fonte: Autor (2023)

De maneira análoga, a análise da composição química da escória do FEA foi realizada conforme metodologia disposta nos itens 4.1.1 e 4.1.2. As amostras das

escórias do FEA foram extraídas sempre ao final do processo de refino, no momento da retirada da primeira amostra de temperatura para controle do processo, após 95% da duração das corridas. Para definição da composição química da escória do FEA, foi considerado o valor médio dos percentuais de cada composto químico constituinte das amostras retiradas das mesmas 14 corridas nas quais foram retiradas amostras da escória do forno panela.

Quanto aos demais materiais adicionados, utilizou-se como padrão de avaliação a composição química disponibilizada pelos respectivos fornecedores.

## 4.2 PROPOSIÇÃO DA ALTERAÇÃO DA ESCÓRIA DE FORNO PANELA

Uma vez definida a composição química da escória do forno panela, e avaliadas as quantidades adicionadas de cada um dos materiais constituintes dessa escória, foi estabelecida uma composição química alvo para a escória em questão, possibilitando o desenvolvimento de propostas de alteração dessa escória, visando atender os objetivos definidos.

### 4.2.1 Definição da escória objetivo

Tendo em vista as características desejadas para a escória do forno panela, utilizou-se o diagrama ternário CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> para 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para definir uma região de interesse para a nova escória proposta.

### 4.2.2 Definição de propostas para alteração da composição química da escória do forno panela

De posse das informações obtidas através do balanço de massa realizado no forno panela, conforme descrito no item 4.1.4, foi possível determinar quais materiais podem ser alterados em composição e/ou quantidade, visando ajustar a composição química da escória do forno panela e suas características adjacentes.

Desta forma, tendo como objetivo a região de interesse definida no diagrama ternário CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> para 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, conforme disposto no item 4.2.1, foram propostas soluções para a alteração da escória do forno panela, sendo realizadas



análises de viabilidade de implantação dessas propostas no processo produtivo em questão.

#### **4.2.3 Seleção de proposta para alteração da composição química da escória do forno panela**

Com base nas análises de viabilidade das propostas sugeridas no item 4.2.2, foi selecionada a alteração na composição química da areia de vedação do canal do FEA, visando atingir a composição química desejada para a escória do forno panela. Assim, após definição das especificações do material adequadas ao propósito em questão, buscou-se junto aos fornecedores opções de areia de vedação do canal do FEA disponíveis que pudessem atender as necessidades descritas.

#### **4.3 TESTE DA NOVA AREIA DE VEDAÇÃO DO CANAL DO FEA**

Para o teste com a areia de vedação proposta, foram consideradas as mesmas condições de operação previstas anteriormente, ou seja, quantidades similares de adição de cal, fluorita e  $\text{CaC}_2$  no vazamento do FEA e no forno panela, bem como quantidades similares de passagem de escória do FEA e dos produtos de desoxidação. Corridas com variações drásticas, como longos tempos de interrupção no FEA (acima de 12 minutos) e no Forno Panela (tempo total acima de 22 minutos), passagem de escória do FEA para o Forno Panela acima do normal (inferida através da avaliação do fundo úmido remanescente no FEA, do rendimento das ligas no Forno Panela e da avaliação visual) e grande variação na carga metálica, foram descartadas da avaliação.

Nestas condições, durante a execução de testes com a nova areia de vedação do canal do FEA, foram retiradas amostras da escória do Forno Panela de sete diferentes corridas produzidas. As médias da composição química da escória dessas corridas foram comparadas com as 14 amostras de escórias retiradas do processo anterior às alterações. Vale ressaltar que a metodologia de análise utilizada foi a mesma descrita no item 4.1.

### 4.3.1 Análise dos resultados do teste

#### 4.3.1.1 Estimativa da viscosidade da escória do forno panela

A viscosidade de um fluido é originada pela coesão entre suas moléculas e pelos choques entre elas (FRANCISCO, 2018). De forma prática, viscosidade é a propriedade que indica a maior ou a menor dificuldade de o fluido escoar (escorrer), possuindo um valor diferente para cada fluido e variando, para um mesmo fluido, principalmente em relação à temperatura (BRUNETTI, 2008). Nos líquidos, ela diminui com o aumento da temperatura, enquanto nos gases ela aumenta com o aumento da temperatura (FRANCISCO, 2018).

Mills (2011) aborda que a viscosidade é uma característica muito dependente da estrutura dos materiais e conseqüentemente de sua temperatura, uma vez que o aumento da temperatura tende a modificar a estrutura dos materiais. A equação de Arrhenius (Equação 5) é comumente utilizada para expressar a dependência da viscosidade em função da temperatura:

$$\eta = \left( A_A \cdot \exp \frac{B_A}{T} \right) \quad 5$$

onde  $A_A$  é uma constante dependente da estrutura da escória e  $B_A = E_\eta/R^*$ , onde  $E_\eta$  é a energia de ativação para escoamento viscoso e  $R^*$  é a constante de gases.

Por outro lado, a relação de Weymann também é utilizada em diversos estudos para avaliar o comportamento da viscosidade em função da temperatura, sendo a mesma apresentada na Equação 6.

$$\eta = \left( A_W \cdot T \cdot \exp \frac{B_W}{T} \right) \quad 6$$

onde  $A_W$  e  $B_W$  são similares aos parâmetros  $A_A$  e  $B_A$  da Equação 1, mas possuem valores diferentes.

Foram utilizados quatro modelos teóricos para avaliar a correlação dos óxidos que compõem a escória e a respectiva influência em sua viscosidade. Os modelos propostos por Riboud *et al.* (1981) e Urbain (1987) utilizam a relação de Weymann e o modelo proposto lida *et al.* (2002) e Mills (2011) utilizam a equação de Arrhenius para

demonstrar a dependência da viscosidade com a temperatura e estimar a viscosidade das escórias com base em sua composição química. O Quadro 4 apresenta as principais informações acerca dos modelos em questão.

Quadro 4 – Detalhes de modelos matemáticos para estimar a viscosidade de escórias (continua)

| Modelo               | Dependência da Temperatura | Detalhes do modelo  | Tipos de Escória                | Incerteza % |
|----------------------|----------------------------|---|---------------------------------|-------------|
| Riboud <i>et al.</i> | Weymann                    | <p><math>A_W</math>; <math>B_W</math> em função de 5 grupos:<br/> "<math>\text{CaO}</math>"+"<math>\text{SiO}_2</math>"+"<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>"+"<math>\text{CaF}_2</math>"+"<math>\text{Na}_2\text{O}</math>"</p> <p><math>X^{\text{CaO}} = X_{\text{CaO}} + X_{\text{MgO}} + X_{\text{FeO}} + X_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + X_{\text{MnO}} + X_{\text{NiO}} + X_{\text{CrO}} + X_{\text{ZnO}} + X_{\text{Cr}_2\text{O}_3}</math></p> <p><math>X^{\text{SiO}_2} = X_{\text{SiO}_2} + X_{\text{P}_2\text{O}_5} + X_{\text{TiO}_2} + X_{\text{ZrO}_2}</math></p> <p><math>X^{\text{Al}_2\text{O}_3} = X_{\text{Al}_2\text{O}_3} + X_{\text{B}_2\text{O}_3}</math></p> <p><math>X^{\text{CaF}_2} = X_{\text{CaF}_2}</math></p> <p><math>X^{\text{Na}_2\text{O}} = X_{\text{Na}_2\text{O}} + X_{\text{K}_2\text{O}} + X_{\text{Li}_2\text{O}}</math></p> <p><math>\ln A = -19,81 + 1,73 X^{\text{CaO}} + 3,58 X_{\text{CaF}_2} + 7,02 X^{\text{Na}_2\text{O}} - 35,76 X^{\text{Al}_2\text{O}_3}</math> ;</p> <p><math>B = 31140 - 23896 X^{\text{CaO}} - 46356 X_{\text{CaF}_2} - 39159 X^{\text{Na}_2\text{O}} - 68833 X^{\text{Al}_2\text{O}_3}</math></p>  | Escórias;<br>Fluxantes de molde | 30          |
| Urbain               | Weymann                    | <p><math>A_W</math>; <math>B_W</math> função de 3 grupos:</p> <p><i>Glass formers:</i><br/> <math>X_G = X_{\text{SiO}_2} + X_{\text{P}_2\text{O}_5}</math></p> <p><i>Amphoterics:</i><br/> <math>X_A = X_{\text{Al}_2\text{O}_3} + X_{\text{B}_2\text{O}_3} + X_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + X_{\text{Cr}_2\text{O}_3}</math></p> <p><i>Network Modifiers:</i><br/> <math>X_M = X_{\text{CaO}} + X_{\text{MgO}} + X_{\text{CaF}_2} + X_{\text{FeO}} + X_{\text{MnO}} + X_{\text{CrO}} + X_{\text{NiO}} + X_{\text{Na}_2\text{O}} + X_{\text{K}_2\text{O}} + X_{\text{Li}_2\text{O}} + 2X_{\text{TiO}_2} + X_{\text{ZrO}_2}</math></p> <p><math>B_W = B_0 + B_1 X_G + B_2 X_G^2 + B_3 X_G^3</math></p> <p><math>\alpha = X_M / (X_M + X_A)</math></p> <p><math>B_i = \alpha_i + b_i \alpha + c_i \alpha^2</math>,<br/> onde o <math>i</math> pode ser 0,1,2 ou 3 e <math>a, b, c</math> são constantes para cada caso 0, 1, 2 e 3.</p> <p>No estudo <math>X^{\text{MnO}}</math> foi modificado para representar <math>X^{\text{MnO}} = X_{\text{MnO}} + X_{\text{FeO}} + X_{\text{NiO}} + X_{\text{CrO}} + 0,6(X_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + X_{\text{Cr}_2\text{O}_3})</math></p> <p>Resultando em:<br/> <math>B_{\text{global}} = (X_{\text{MnO}} B_{\text{MnO}} + X_{\text{CaO}} B_{\text{CaO}} + X_{\text{MgO}} B_{\text{MgO}}) / (X_{\text{MnO}} + X_{\text{CaO}} + X_{\text{MgO}})</math></p> <p><math>-\ln A_W = 0,29 B_W + 11,57</math></p> | Diversos                        | 25          |

Quadro 4 – Detalhes de modelos matemáticos para estimar a viscosidade de escórias (conclusão)

|                    |           |  |   |       |
|--------------------|-----------|--|---|-------|
| lida <i>et al.</i> | Arrhenius | $\eta(\text{Pas}) = A \eta_0 \exp(E/B_i)$<br>onde A = termo pré-exponencial, E= Energia de ativacao, $\eta_0$ = viscosidade hipotética para cada constituinte da escória (i) e $B_i$ = índice de basicidade<br><br>$A = 1,029 - 2,078 \times 10^{-3}T + 1,05 \times 10^{-6}T^2$<br>$E = 28,46 - 2,884 \times 10^{-2}T + 4,0 \times 10^{-6}T^2$<br><br>$\eta_0 = 1,8 \times 10^{-7} \{ (M_i T_i^m)^{0,5} \exp(H_i/R^*T) \} / \{ V_m \}^{0,6667} \exp(H_i/R^*T)$<br><br>onde $V_m$ é o volume molar de cada constituinte, $H_i = 5,1 (T^m)_i$ e $R^*$ é a constante dos gases.<br><br>$B_i = \sum (\alpha_i \%_i)_B / \sum (\alpha_i \%_i)_A$<br>Onde $\alpha_i$ é uma constante para cada constituinte expressado em relação à basicidade e $\%_i$ é o % de massa | Fluxantes de molde; Escória de alto-forno | 19-25 |
| Mills              | Arrhenius | Basicidade ótica ( $\Lambda$ ): medida de depolimerização<br><br>$\Lambda_{\text{corr}}$ : Composição ajustada para $\text{Al}_2\text{O}_3$<br><br>$\ln A = -232,7 (\Lambda_{\text{corr}})^2 + 357,3 (\Lambda_{\text{corr}}) - 144,2$<br><br>$\ln (B/100) = -1,77 + (2,88/\Lambda_{\text{corr}})$<br>$\ln \eta(\text{Pas}) = \ln A + \exp(B/T)$  | Fluxantes de molde                        | 34    |

Fonte: Adaptado de Mills (2011)

#### 4.3.1.1.1 Comparação da viscosidade entre as escórias do forno panela (processo pré-teste x processo teste)

Utilizando os modelos propostos por Riboud *et al.* (1981), Urbain (1987), lida *et al.* (2002) e Mills (2011) discutidos no item 4.3.1.1, foram calculadas as viscosidades da escória original do forno panela (condição inicial do processo), bem como da escória obtida nas corridas de teste, utilizando areia de vedação do canal do FEA com diferente composição química.

#### 4.3.1.2 Estimativa da temperatura *liquidus* das escórias do forno panela (processo pré-teste x processo teste)

Para calcular a temperatura *liquidus* das escórias analisadas, foi utilizada a Equação 7, baseada nos estudos de Mills, Yuan e Jones (2011).

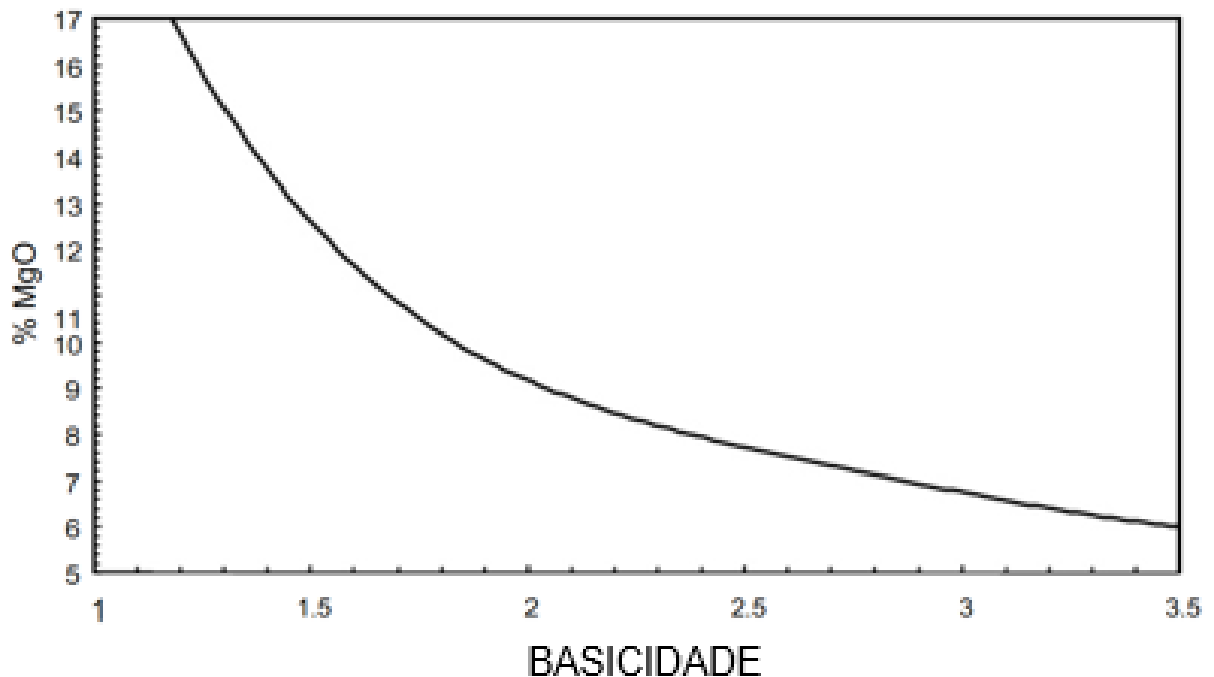
$$T_{liq}(K) = 958 + 656,9X_{SiO_2} + 1040,7X_{CaO} + 1343,2X_{Al_2O_3} + 1090,5X_{MgO} + 137X_{Na_2O} - 668X_{K_2O} + 408,7X_{Li_2O} + 522X_{FeO} + 760,9X_{MnO} + 1022X_{CrO} + 794X_{Fe_2O_3} + 2198X_{Cr_2O_3} - 532X_{CaF_2} + 844X_{TiO_2} - 12,6X_{B_2O_3} + 1207X_{BaO} + 1768X_{SrO} + 2234X_{ZrO_2}$$

7

#### 4.3.1.3 Saturação de MgO

Um dos parâmetros relevantes quanto ao desgaste refratário de painéis dolomíticos é o teor de MgO da escória em relação ao seu teor de saturação. Escórias com teores de MgO muito abaixo do seu teor de saturação, tendem a ter um elevado desgaste refratário devido à dissolução desse constituinte dos tijolos dolomíticos, quando o sistema escória-refratário busca entrar em equilíbrio químico. É válido salientar que fatores como cinética de reação, temperatura e tempo efetivo de contato podem influenciar o quanto essa diferença entre o teor de MgO e sua saturação efetivamente irão gerar em desgaste refratário. Pretorius e Carlisle (1998) demonstraram que o limite de saturação de MgO das escórias diminui conforme a basicidade binária aumenta (Figura 25).

Figura 25 – Solubilidade do MgO para escórias duplamente saturadas em CaO e MgO a 1600°C



Fonte: Adaptado de Pretorius e Carlisle (1998)

As equações utilizadas para calcular a saturação de MgO das escórias conforme o estudo de Pretorius e Carlisle (1998) estão apresentadas abaixo:

$$B_2 = \left( \frac{CaO}{SiO_2} \right) \quad 1$$

$$B_3 = \left( \frac{CaO}{(SiO_2 + Al_2O_3)} \right) \quad 2$$

$$\%MgO(B_3) = 0,6B_3^4 - 7,25B_3^3 + 32,65B_3^2 - 67,5B_3 + 61,9 \quad 8$$

$$\%MgO_{sat} = \%MgO_{ref}(B_3ratio) - Al_2O_3 \text{ fator de correção} \quad 9$$

$$Al_2O_3 \text{ fator de correção} = 0,615 * \left( \frac{\%Al_2O_3}{(SiO_2 + Al_2O_3)} \right) * (\%MgO_{ref} - 6) \quad 10$$

Considerando os efeitos aproximados da temperatura de operação na saturação de MgO, tem-se que:

$$\%MgO_T = \%MgO_{ref} + (0,0175 * (T - 1600)) \quad 11$$

Desta forma, foi realizado o cálculo da saturação de MgO da escória pré-teste e das variantes analisadas, e comparado com os teores de MgO de cada respectiva escória. A escória com uma maior diferença entre percentual de saturação de MgO e o teor de MgO possui tendência a ocasionar um maior desgaste refratário, visto que a escória buscaria desgastar o refratário dolomítico, visando atingir o equilíbrio químico.

#### 4.4 Avaliação de outros resultados práticos no longo prazo

Uma vez que os resultados obtidos nos testes de alteração na composição química da areia de vedação do canal do FEA demonstraram uma melhoria na

condição da viscosidade e da temperatura líquidas da escória do Forno Panela e, conseqüentemente, uma melhora no escoamento da mesma, a mudança em questão foi aplicada ao processo por um período de seis meses, visando avaliar sua eficácia em relação ao objetivo proposto, bem como seus impactos a longo prazo.

Sendo assim, foram analisados os indicadores de peso vazado, desgaste refratário e percentual de abertura livre do canal do FEA, por meio da comparação entre os seis meses posteriores e os seis meses anteriores à alteração.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE FORNO PANELA

#### 5.1.1 Análise da composição química da escória do forno panela

O resultado da análise da composição química da escória do forno panela das 14 corridas avaliadas encontra-se disposto na Tabela 1. Para efeitos de análise, será utilizado o valor médio da composição química das 14 amostras em questão.

Tabela 1 – Composição química das amostras de escória do forno panela

| Corrida       | % SiO <sub>2</sub> | % CaO        | % MgO        | % CaF <sub>2</sub> | % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | % FeO       | %P            | %S          | %MnO        | %TiO <sub>2</sub> | %Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|---------------|--------------------|--------------|--------------|--------------------|----------------------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------------|---------------------------------|
| FP1           | 23,49              | 53,18        | 12,83        | 1,51               | 5,36                             | 1,13        | 0,0013        | 1,75        | 0,30        | 0,40              | 0,030                           |
| FP2           | 24,35              | 52,38        | 12,80        | 1,58               | 5,24                             | 1,17        | 0,0003        | 1,80        | 0,31        | 0,36              | 0,007                           |
| FP3           | 24,86              | 50,80        | 14,12        | 1,19               | 5,08                             | 1,82        | 0,0000        | 1,18        | 0,51        | 0,43              | 0,011                           |
| FP4           | 24,24              | 52,62        | 12,92        | 1,59               | 5,05                             | 1,13        | 0,0015        | 1,76        | 0,31        | 0,37              | 0,012                           |
| FP5           | 25,32              | 50,24        | 14,26        | 1,25               | 5,31                             | 1,84        | 0,0021        | 1,18        | 0,48        | 0,10              | 0,010                           |
| FP6           | 24,06              | 53,21        | 12,03        | 1,42               | 5,18                             | 1,63        | 0,0015        | 1,71        | 0,35        | 0,38              | 0,009                           |
| FP7           | 23,99              | 52,91        | 11,92        | 1,83               | 5,36                             | 1,54        | 0,0021        | 1,74        | 0,30        | 0,40              | 0,008                           |
| FP8           | 23,57              | 52,09        | 12,76        | 1,78               | 5,56                             | 1,82        | 0,0012        | 1,65        | 0,37        | 0,39              | 0,009                           |
| FP9           | 23,95              | 53,24        | 12,07        | 1,91               | 5,02                             | 1,26        | 0,0003        | 1,82        | 0,33        | 0,39              | 0,007                           |
| FP10          | 25,28              | 49,75        | 14,64        | 1,27               | 5,62                             | 1,29        | 0,0000        | 1,15        | 0,59        | 0,41              | 0,009                           |
| FP11          | 25,01              | 50,74        | 14,18        | 1,40               | 5,24                             | 1,21        | 0,0025        | 1,21        | 0,56        | 0,41              | 0,030                           |
| FP12          | 25,31              | 49,55        | 13,91        | 1,34               | 5,82                             | 1,84        | 0,0171        | 1,21        | 0,54        | 0,42              | 0,032                           |
| FP13          | 25,87              | 49,05        | 14,72        | 1,46               | 5,62                             | 1,12        | 0,0030        | 0,88        | 0,80        | 0,43              | 0,026                           |
| FP14          | 26,25              | 49,44        | 14,67        | 1,54               | 4,23                             | 1,40        | 0,0019        | 1,13        | 0,86        | 0,43              | 0,050                           |
| Média         | <b>24,68</b>       | <b>51,37</b> | <b>13,42</b> | <b>1,51</b>        | <b>5,26</b>                      | <b>1,44</b> | <b>0,0025</b> | <b>1,44</b> | <b>0,47</b> | <b>0,38</b>       | <b>0,018</b>                    |
| Desvio Padrão | <b>0,86</b>        | <b>1,59</b>  | <b>1,04</b>  | <b>0,22</b>        | <b>0,38</b>                      | <b>0,30</b> | <b>0,0043</b> | <b>0,33</b> | <b>0,18</b> | <b>0,08</b>       | <b>0,013</b>                    |

Fonte: Autor (2022)

#### 5.1.1.1 Análise da composição química dos principais constituintes da escória do forno panela

Conforme discutido nas referências bibliográficas, as principais fontes dos compostos constituintes da escória do forno panela são as cales, fluxantes, desoxidantes, escória do FEA, areia de vedação do canal do FEA e os produtos da



desoxidação. Cada uma das fontes da escória do forno panela foi analisada, visando entender suas respectivas influências e impactos.

Para análise da composição química da escória do FEA, foram retiradas amostras das mesmas 14 corridas nas quais as amostras de escória do forno panela foram coletadas. Para efeitos de análise, será utilizado o valor médio da composição química das 14 amostras analisadas. Os resultados destas análises, bem como a composição química média da escória do FEA, encontram-se dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química das amostras de escória do FEA

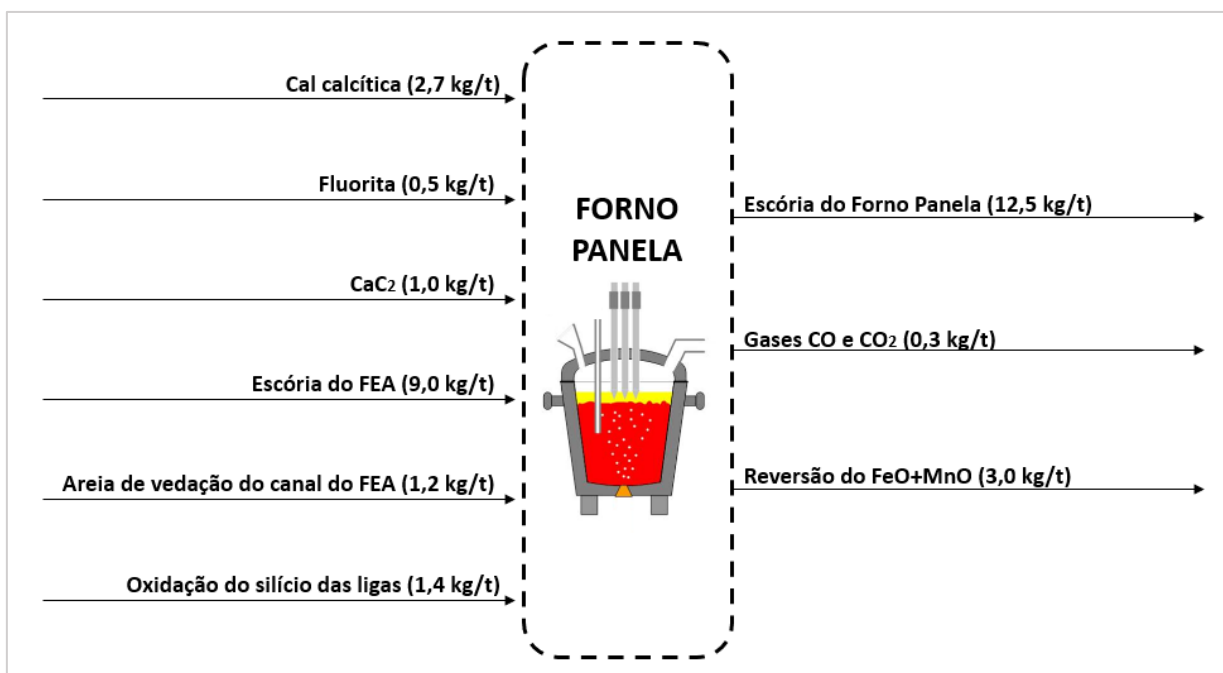
| Corrida              | % SiO <sub>2</sub> | % CaO        | % MgO       | % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | % FeO        | % P         | % S           | % MnO       | %TiO <sub>2</sub> | % Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|----------------------|--------------------|--------------|-------------|----------------------------------|--------------|-------------|---------------|-------------|-------------------|----------------------------------|
| FEA1                 | 11,91              | 31,80        | 7,49        | 5,18                             | 36,14        | 0,249       | 0,160         | 4,60        | 0,56              | 1,48                             |
| FEA2                 | 10,62              | 32,68        | 6,10        | 5,39                             | 38,90        | 0,170       | 0,123         | 4,16        | 0,50              | 1,45                             |
| FEA3                 | 10,90              | 33,66        | 7,27        | 5,35                             | 35,38        | 0,157       | 0,126         | 4,71        | 0,52              | 1,63                             |
| FEA4                 | 10,41              | 32,67        | 7,84        | 5,09                             | 36,59        | 0,153       | 0,114         | 4,84        | 0,50              | 1,67                             |
| FEA5                 | 9,28               | 30,33        | 6,69        | 5,39                             | 43,55        | 0,122       | 0,111         | 3,84        | 0,44              | 1,37                             |
| FEA6                 | 8,62               | 30,73        | 6,91        | 4,46                             | 43,07        | 0,135       | 0,116         | 3,85        | 0,50              | 1,46                             |
| FEA7                 | 10,03              | 31,56        | 7,30        | 4,78                             | 41,15        | 0,153       | 0,129         | 4,41        | 0,53              | 1,57                             |
| FEA8                 | 11,08              | 31,16        | 7,01        | 4,89                             | 40,71        | 0,162       | 0,157         | 4,12        | 0,52              | 1,39                             |
| FEA9                 | 10,96              | 32,84        | 7,11        | 5,01                             | 38,88        | 0,148       | 0,142         | 4,58        | 0,50              | 1,60                             |
| FEA10                | 10,46              | 29,83        | 6,14        | 4,43                             | 44,42        | 0,143       | 0,124         | 3,95        | 0,45              | 1,33                             |
| FEA11                | 9,40               | 29,48        | 5,90        | 4,44                             | 46,58        | 0,152       | 0,122         | 3,91        | 0,42              | 1,31                             |
| FEA12                | 10,06              | 31,78        | 6,20        | 5,14                             | 42,02        | 0,145       | 0,154         | 4,33        | 0,53              | 1,53                             |
| FEA13                | 11,02              | 32,41        | 7,02        | 6,12                             | 35,52        | 0,153       | 0,158         | 4,88        | 0,53              | 1,66                             |
| FEA14                | 13,48              | 32,31        | 6,85        | 5,87                             | 36,07        | 0,141       | 0,102         | 4,48        | 0,51              | 1,54                             |
| <b>Média</b>         | <b>10,59</b>       | <b>31,66</b> | <b>6,85</b> | <b>5,11</b>                      | <b>39,93</b> | <b>0,16</b> | <b>0,13</b>   | <b>4,33</b> | <b>0,50</b>       | <b>1,50</b>                      |
| <b>Desvio Padrão</b> | <b>1,19</b>        | <b>1,22</b>  | <b>0,58</b> | <b>0,51</b>                      | <b>3,69</b>  | <b>0,03</b> | <b>0,0194</b> | <b>0,37</b> | <b>0,04</b>       | <b>0,12</b>                      |

Fonte: Autor (2022)

Por sua vez, na Figura 26 é representado o balanço de massa realizado, enquanto a Tabela 3 apresenta a composição química média dos principais compostos no processo em análise, e suas respectivas quantidades adicionadas em kg/ton de aço para formação da escória do forno panela.

Vale ressaltar que as composições químicas dos componentes adicionados foram retiradas das respectivas fichas técnicas de cada produto. Ainda, é importante salientar que a composição química destes materiais e suas respectivas quantidades adicionadas foram consideradas baseadas na média das mesmas 14 corridas supracitadas.

Figura 26 – Balanço de massa da escória do forno panela



Fonte: Autor (2022)

Tabela 3 – Composição química dos principais constituintes da escória do forno panela

| Composto                      | kg/t Aço | %SiO <sub>2</sub> | %CaO  | %MgO | %CaF <sub>2</sub> | %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %FeO/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %CaC <sub>2</sub> | %MnO | % Outros |
|-------------------------------|----------|-------------------|-------|------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------|------|----------|
| Cal calcítica                 | 2,7      | 0,61              | 95,2  | 0,88 | -                 | -                               | -                                   | -                 | -    | 3,31     |
| CaF <sub>2</sub> (Fluorita)   | 0,5      | 4,0               | -     | -    | 85,0              | 0,75                            | -                                   | -                 | -    | 10,25    |
| CaC <sub>2</sub>              | 1,0      | 1,52              | -     | 0,60 | -                 | -                               | -                                   | 75,0              | -    | 22,88    |
| Escória FEA                   | 9,0      | 10,59             | 31,66 | 6,85 | -                 | 5,11                            | 39,93                               | -                 | 4,33 | 1,53     |
| Areia do canal FEA            | 1,2      | 1,8               | -     | 87,1 | -                 | 5,6                             | 1,7                                 | -                 | -    | 3,8      |
| Oxidação do silício das ligas | 3,0      | 100               | -     | -    | -                 | -                               | -                                   | -                 | -    | -        |

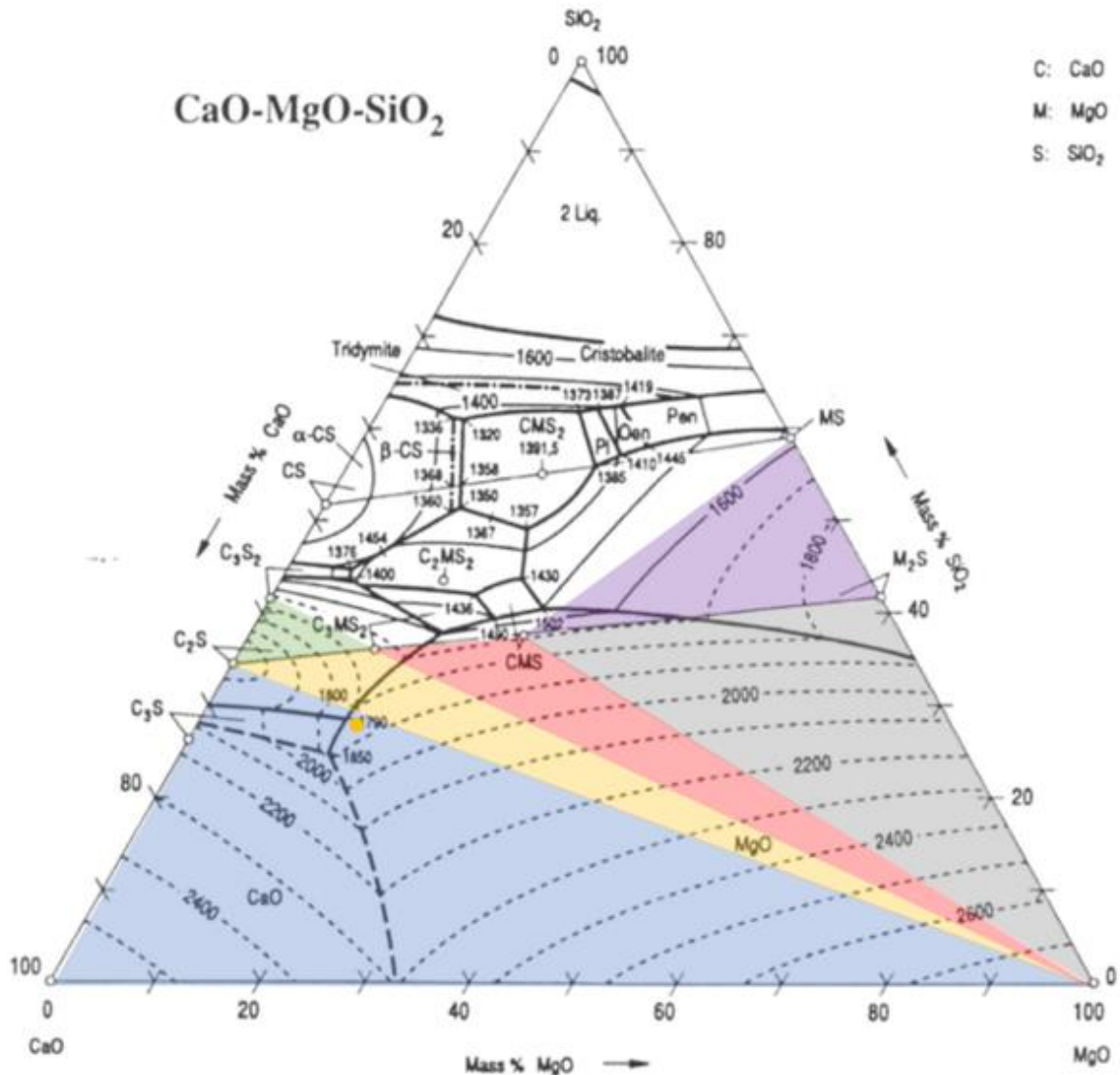
Fonte: Autor (2022)

### 5.1.2 Diagrama ternário de fases da escória de forno panela pré-teste

A partir da composição química média da escória de forno panela (Tabela 1), foi plotado o ponto que a representa no diagrama ternário de fases num sistema CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO para 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Figura 27), retirado do capítulo escrito por Kowalski, Spencer e Neuschütz (1995) do Slag Atlas. O ponto laranja representa a escória do

forno panela pré-teste e a região delimitada em azul representa a região de fase sólida. Desta forma, a escória pré-teste teria somente fase sólida nessa composição e temperatura de operação.

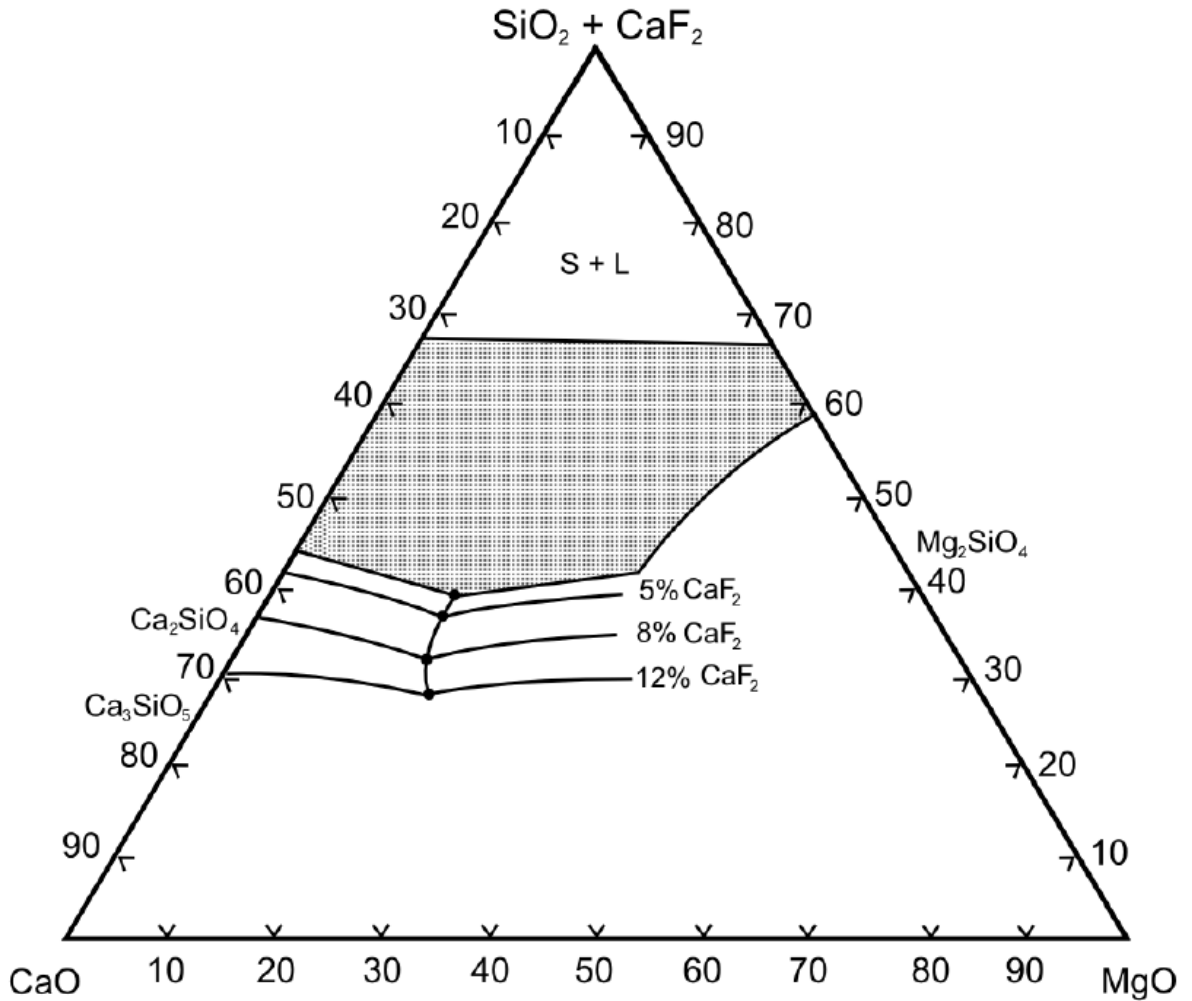
Figura 27 – Representação da escória pré-teste (ponto laranja) no corte isotérmico do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>



Fonte: Adaptado de Kowalski, Spencer e Neuschütz (1995)

Entretanto, conforme apresentado na Figura 28, a presença de fluorita na escória desloca a linha de fase no diagrama, de forma que a escória do forno panela representada pelo ponto laranja na Figura 27 estaria alocada na região de sólido + líquido no diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>.

Figura 28 – Representação do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub> a 1600°C



Fonte: Pretorius (1996)

Apesar disso, a escória pré-teste possui alto ponto de fusão e relativa fragilidade às possíveis variabilidades do processo. Assim, alterações nas quantidades dos óxidos na escória, provenientes, por exemplo, da variação da quantidade e composição química da escória passante do FEA para o forno panela, bem como de variações nas quantidades adicionadas de cales, fluorita, areia do canal de vedação do FEA e desoxidantes, poderiam facilmente deslocar a escória para região de fase somente sólida.

## 5.2 PROPOSIÇÃO DA ALTERAÇÃO DA ESCÓRIA DO FORNO PANELA

Conforme discutido previamente, o objetivo da escória proposta é possuir uma maior capacidade de escoamento durante a etapa de preparação de painéis. Para

tal, serão avaliadas propostas de alteração na composição química da escória pré-teste, buscando atingir o objetivo em questão com o mínimo de custos, impactos operacionais e na estabilidade do processo, além de mínimo desgaste refratário e atendendo as principais premissas de operação e qualidade do processo de refino secundário.

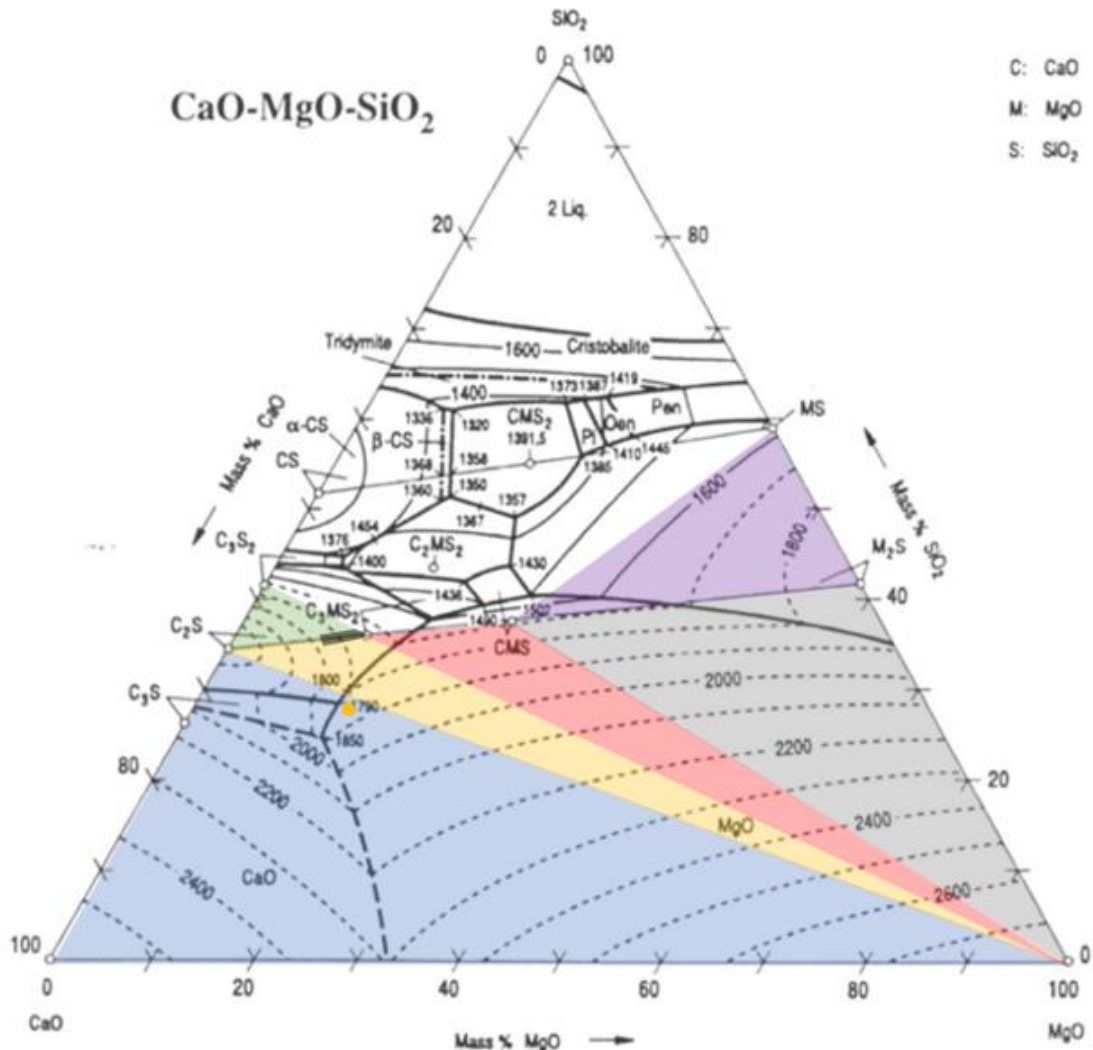
### 5.2.1 Definição da escória objetivo

#### 5.2.1.1 Região de interesse no diagrama ternário de fases

Utilizando o diagrama ternário CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> para 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, é possível definir uma região de interesse para a nova escória. Conforme discutido por Pretorius (1996), apesar dos tijolos dolomíticos consistirem basicamente de CaO e MgO, o requerimento chave para escórias em contato com tijolos dolomíticos é a saturação do CaO. Isso se dá pelo fato de que o MgO presente nos tijolos dolomíticos estão envoltos em uma matriz de CaO, sendo assim, o CaO é o elemento mais exposto ao contato com a escória durante o processo.

Por este motivo, como apresentado na Figura 29, a região de interseção (sombreado preto) entre a região verde (Líquido + 2CaO.SiO<sub>2</sub>) e a região amarela (Líquido + 2CaO.SiO<sub>2</sub> + MgO) é a mais indicada para escória no processo em questão. Uma escória nessa região apresentaria uma menor temperatura líquidus, maior fração líquida e, conseqüentemente, uma menor viscosidade, sendo mais adequada ao processo quando comparada à escória pré-teste. Nesta região, há a precipitação do 2CaO.SiO<sub>2</sub>, necessário para formação do *coating* nas painelas, e para escórias próximas à região de interesse na área amarela, há leve precipitação de MgO devido à saturação desse composto (GERDAU, 2012b), levando ao baixo consumo refratário e escória com viscosidade adequada.

Figura 29 – Representação da escória pré-teste (ponto laranja) e região de interesse da escória (sombreado preto) no corte isotérmico do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>



Fonte: Adaptado de Kowalski, Spencer e Neuschütz (1995)

### 5.2.2 Análise da influência dos óxidos e fluxantes na temperatura liquidus da escória do forno panela

A Equação 7, definida por Mills, Yuan e Jones (2011), possibilita o cálculo da temperatura liquidus das escórias do forno panela em função dos óxidos presentes nessa escória.

$$T_{liq}(K) = 958 + 656,9X_{SiO_2} + 1040,7X_{CaO} + 1343,2X_{Al_2O_3} + 1090,5X_{MgO} + 137X_{Na_2O} - 668X_{K_2O} + 408,7X_{Li_2O} + 522X_{FeO} + 760,9X_{MnO} + 1022X_{CrO} + 794X_{Fe_2O_3} + 2198X_{Cr_2O_3} - 532X_{CaF_2} + 844X_{TiO_2} - 12,6X_{B_2O_3} + 1207X_{BaO} + 1768X_{SrO} + 2234X_{ZrO_2}$$

Avaliando essa equação, é possível perceber que os compostos com maior peso que tendem a aumentar a temperatura liquidus da escória são:  $ZrO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $SrO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $BaO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$  e  $CrO$ , nessa ordem. Além disso, tem-se os fluxantes, materiais que necessariamente reduzem a viscosidade da escória, como  $K_2O$ ,  $CaF_2$  e  $B_2O_3$ .

Os compostos  $ZrO_2$ ,  $SrO$ ,  $BaO$ ,  $Li_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  e  $B_2O_3$  não estão presentes ou possuem percentual muito próximo de zero em escórias de forno panela, tendo sido, portanto, considerados desprezíveis.

Em aços acalmados ao silício, o percentual de  $Al_2O_3$ , bem como de  $Cr_2O_3$ ,  $CrO$  e  $TiO_2$  são provenientes da sucata carregada no FEA e, portanto, sua quantidade é uma consequência dos teores dos respectivos elementos presentes na sucata, sendo sua alteração de difícil execução.

$Fe_2O_3$ ,  $FeO$  e  $MnO$  são compostos com baixa afinidade com oxigênio, em comparação com os demais óxidos presentes na escória do forno panela e, portanto, são instáveis e possuem baixos teores (até 2%) nos processos de refino secundário.

Desta forma, uma alteração nos teores de  $CaO$  e  $MgO$ , além do teor do fluxante  $CaF_2$ , é indicada quando se visa modificar a temperatura liquidus da escória do forno panela.

### **5.2.3 Propostas de alteração da escória do forno panela**

No Quadro 5, foram analisadas as fontes de óxidos presentes na escória do forno panela quanto à possibilidade de alteração da composição química e quantidades adicionadas no processo. Para os compostos puros ou praticamente puros (acima de 80% de um só composto), uma simples alteração da quantidade adicionada já seria suficiente para modificar a composição química da escória, não sendo necessário nem vantajoso a alteração da composição química desse composto, tendo em vista que quaisquer mudanças desse tipo podem ocasionar dificuldades na disponibilidade e aumento de custos perante os fornecedores.

Quadro 5 – Avaliação das fontes de óxidos presentes na escória do forno panela quanto à composição química e quantidade adicionada

| <b>Composto</b>                   | <b>Composição química</b>                                   | <b>Quantidade adicionada</b>                                |
|-----------------------------------|---|---|
| <b>Cal calcítica</b>              | Composto praticamente puro                                  | Possível alterar  |
| <b>CaF<sub>2</sub> (Fluorita)</b> | Composto praticamente puro                                  | Possível alterar  |
| <b>CaC<sub>2</sub></b>            | Composto praticamente puro                                  | Alteração levaria a mudanças indesejadas no processo do FP  |
| <b>Escória FEA</b>                | Alteração levaria a mudanças indesejadas no processo do FEA | Difícil alterar   |
| <b>Areia do canal FEA</b>         | Possível alterar  | Alteração levaria a mudanças indesejadas no processo do FEA |
| <b>Produtos da desoxidação</b>    | Alteração levaria a mudanças indesejadas no processo do FP  | Alteração levaria a mudanças indesejadas no processo do FP  |

Fonte: Autor (2022)

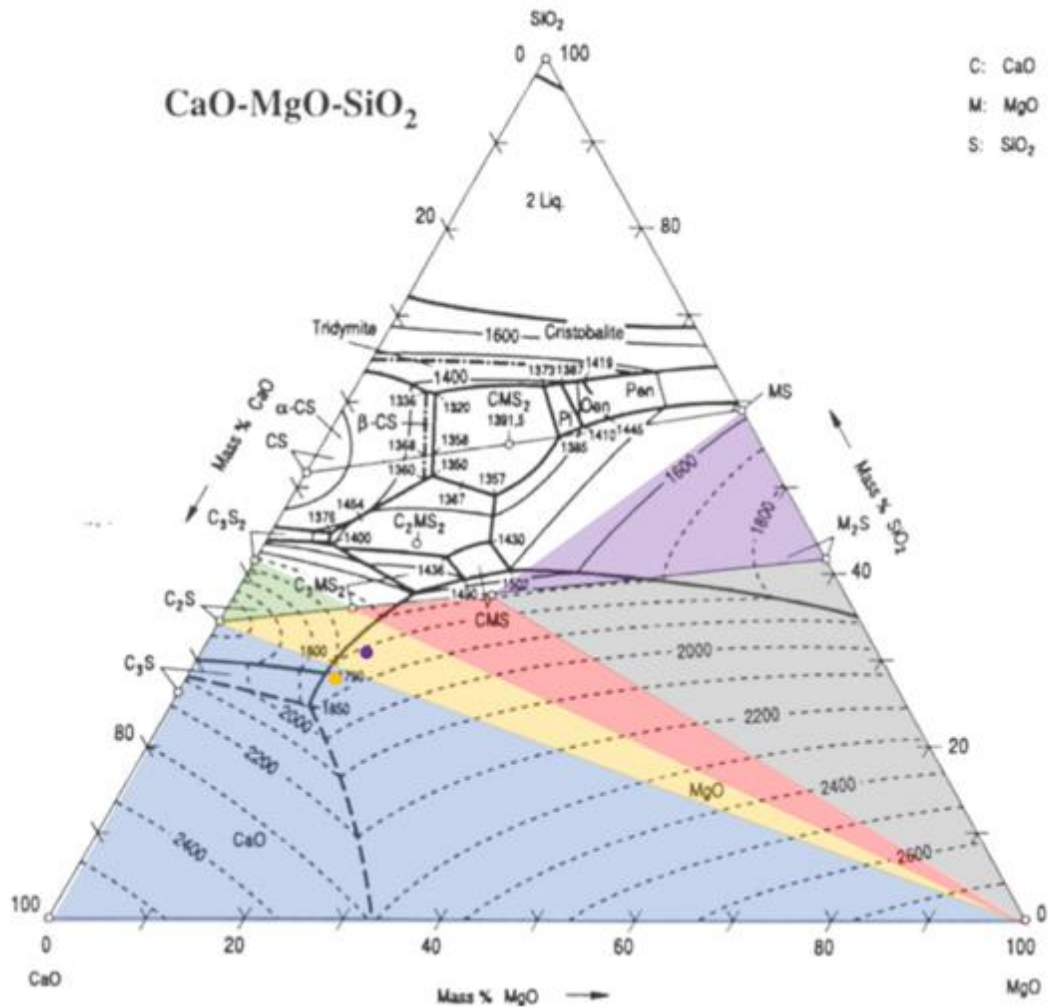
Assim, percebe-se que a cal calcítica, como fonte de CaO, a fluorita, como fonte de CaF<sub>2</sub> e a areia de vedação do canal do FEA, como fonte de MgO, são os compostos mais viáveis de serem alterados, em quantidade ou composição química, visando a adequação da escória do forno panela em análise.

#### 5.2.3.1 Proposta 1: Alteração da quantidade de cales

Visando deslocar a escória pré-teste para a região de interesse, com alteração da quantidade de CaO da escória e mantendo as demais fontes com mesma quantidade e composição química, se faz necessário a redução da adição de cal calcítica. Baseando-se nos valores ideais de basicidade binária descritos na literatura para tijolos dolomíticos de 1,8 a 2,2 (GERDAU, 2012b), foi avaliada e proposta uma redução da quantidade de cal calcítica adicionada no forno panela. Tal proposta é apresentada na Figura 30, representada pelo ponto roxo, sendo a quantidade de cal calcítica adicionada ao processo reduzida de 2,7 kg/ton de aço para 1,6 kg/ton de aço.



Figura 30 – Representação da escória pré-teste (ponto laranja) e escória com alteração da adição de cales (ponto roxo) no corte isotérmico do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>



Fonte: Adaptado de Kowalski, Spencer e Neuschütz (1995)

Apesar da mudança levar a escória para a região de duas fases (líquida + sólida), a redução da quantidade adicionada de cal calcítica reduziria a basicidade binária da escória, aumentando a quantidade de MgO necessário na escória para a saturação (PRETORIUS, 1996), conseqüentemente elevando o desgaste refratário por dissolução. Ainda, apesar de melhorar a condição da escória, a alteração proposta não leva sua composição química para a região de interesse. Além disso, a capacidade de dessulfuração dessa escória seria diminuída, o que não é desejável.

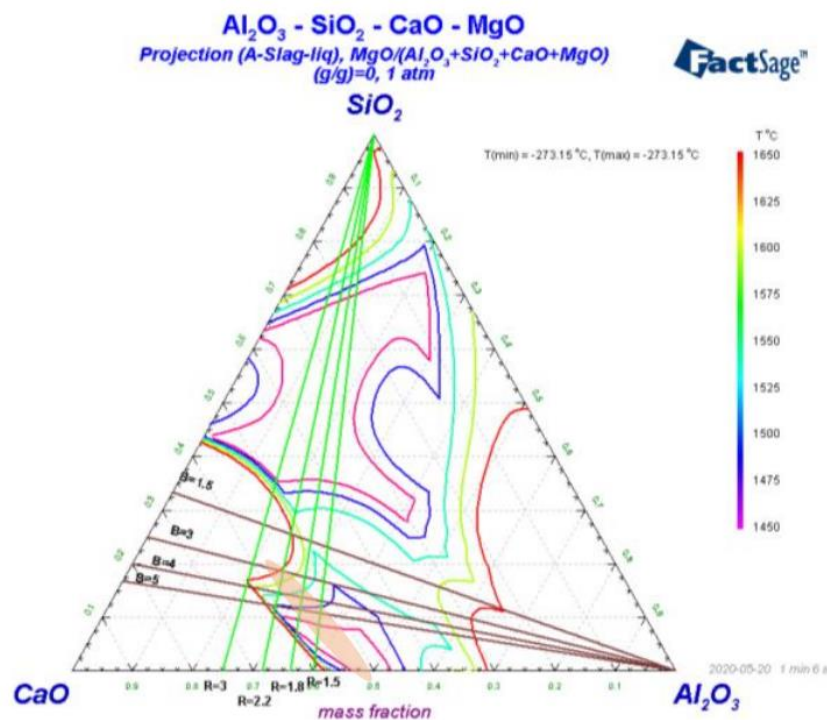
### 5.2.3.2 Proposta 2: Alteração da quantidade de fluorita

Conforme disposto na Figura 28, um aumento do teor de fluorita levaria a um aumento da área de dupla fase (líquido+sólido) e reduziria a viscosidade e temperatura *liquidus* da escória. Entretanto, vale salientar que um aumento da quantidade de fluorita pode provocar a precipitação do composto cuspidina ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{CaF}_2$ ), que possui baixo ponto de fusão e ataca fortemente os refratários dolomíticos. Desta forma, um aumento da quantidade adicionada de fluorita na escória está descartado como solução viável.

### 5.2.3.3 Proposta 3: Alteração de MgO para ajuste da temperatura liquidus da escória do forno panela

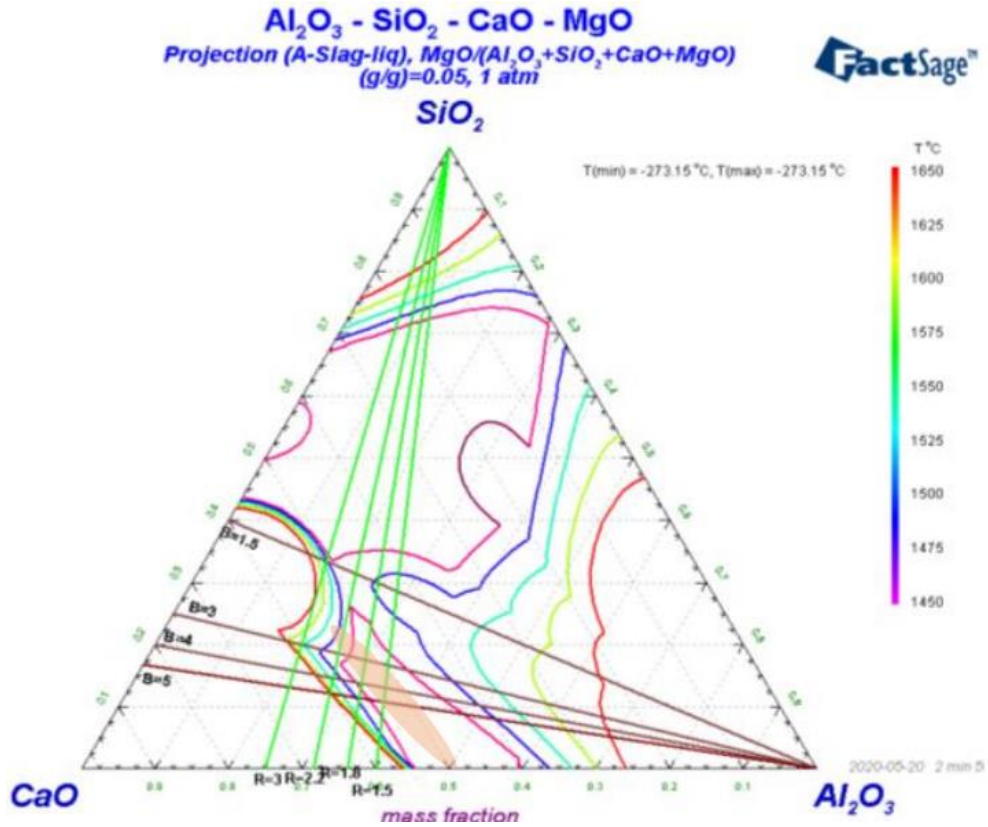
No estudo realizado por Sniegoň *et al.* (2021) utilizando o software FactStage, foi demonstrada a faixa ótima do teor de MgO para ajuste da viscosidade de escórias de forno panela. As Figuras 31 a 34 apresenta a temperatura liquidus dessas escórias em função dos teores de CaO, MgO e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em diagramas ternários, com quatro diferentes teores de MgO.

Figura 31 – Comparação do diagrama quaternário de escórias com 0% de MgO



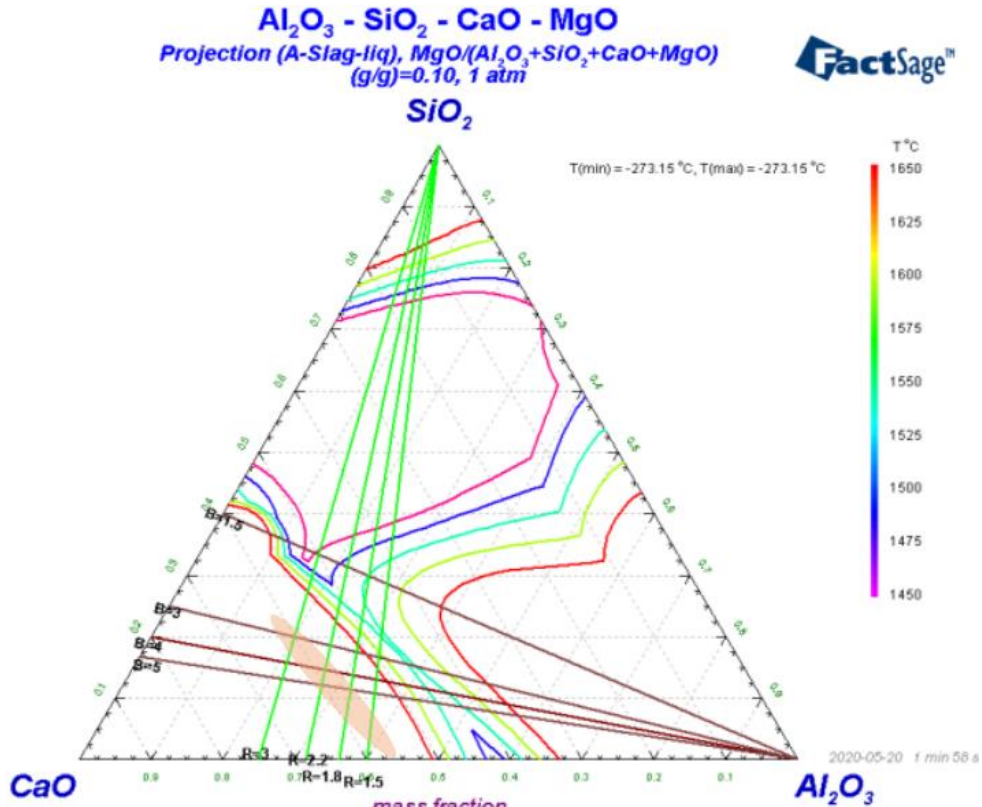
Fonte: Adaptado de Sniegoň *et al.* (2021)

Figura 32 – Comparação do diagrama quaternário de escórias com 5% de MgO



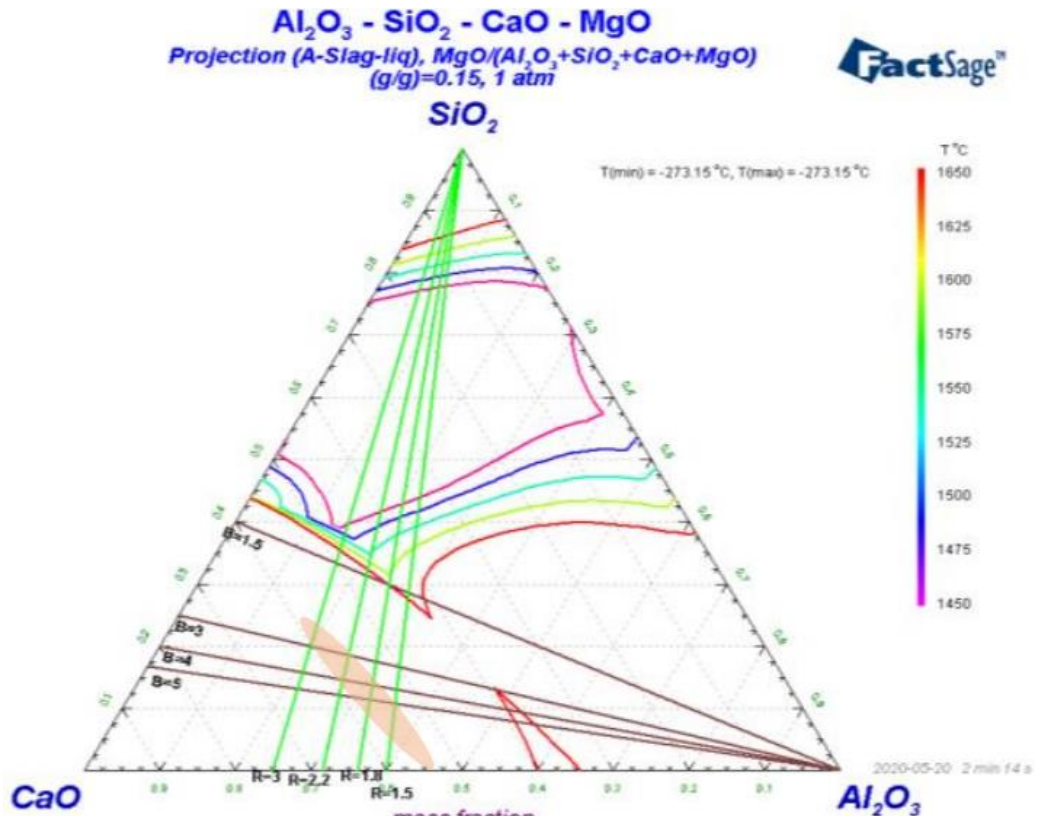
Fonte: Adaptado de Sniegoñ *et al.* (2021)

Figura 33 – Comparação do diagrama quaternário de escórias com 10% de MgO



Fonte: Adaptado de Sniegoñ *et al.* (2021)

Figura 34 – Comparação do diagrama quaternário de escórias com 15% de MgO



Fonte: Adaptado de Sniegoň *et al.* (2021)

As isolinhas coloridas nas Figuras 31 a 34 estão correlacionadas com as temperaturas liquidus, conforme escala de cores apresentada nos diagramas ternários, para os respectivos teores de MgO. A isolinha rosa representa a menor temperatura liquidus a 1450°C, enquanto a isolinha vermelha representa a maior temperatura liquidus de 1650°C.

De acordo com Sniegoň *et al.* (2021), o diagrama com 0% de MgO (Figura 31), possui uma área reduzida de menor temperatura liquidus da escória (área delimitada pela isolinha rosa). Elevando o percentual de MgO para 5% a 10%, conforme Figura 32 e 33 respectivamente, há um efeito positivo na expansão da área de menor temperatura liquidus da escória. O aumento de teores de MgO para valores acima de 15% (Figura 34) acarreta menor área de escória líquida. Dessa forma, é possível concluir que teores de MgO entre 5% e 10% tendem a ser mais adequados para escórias de forno panela visando menor temperatura liquidus e, possivelmente, menor viscosidade.

### 5.2.3.3.1 Alteração da areia de vedação do canal do FEA

Tendo em vista que a areia de vedação do canal do FEA é a principal fonte de MgO da escória do forno panela em análise, e considerando a composição química de escória desejada, se propõe uma redução no teor de MgO da areia atualmente utilizada.

Na Figura 35, foram plotadas no diagrama ternário quatro escórias diferentes: a escória pré-teste e três escórias calculadas considerando a substituição da areia do canal de vedação original por outras três variantes, cada uma com composição química distinta. A Tabela 4 apresenta a composição química da areia de vedação do canal atualmente utilizada no processo em questão, bem como das três variantes de areia de vedação selecionadas para análise frente ao objetivo proposto.

Tabela 4 – Composição química de diversas areias de vedação do canal do FEA

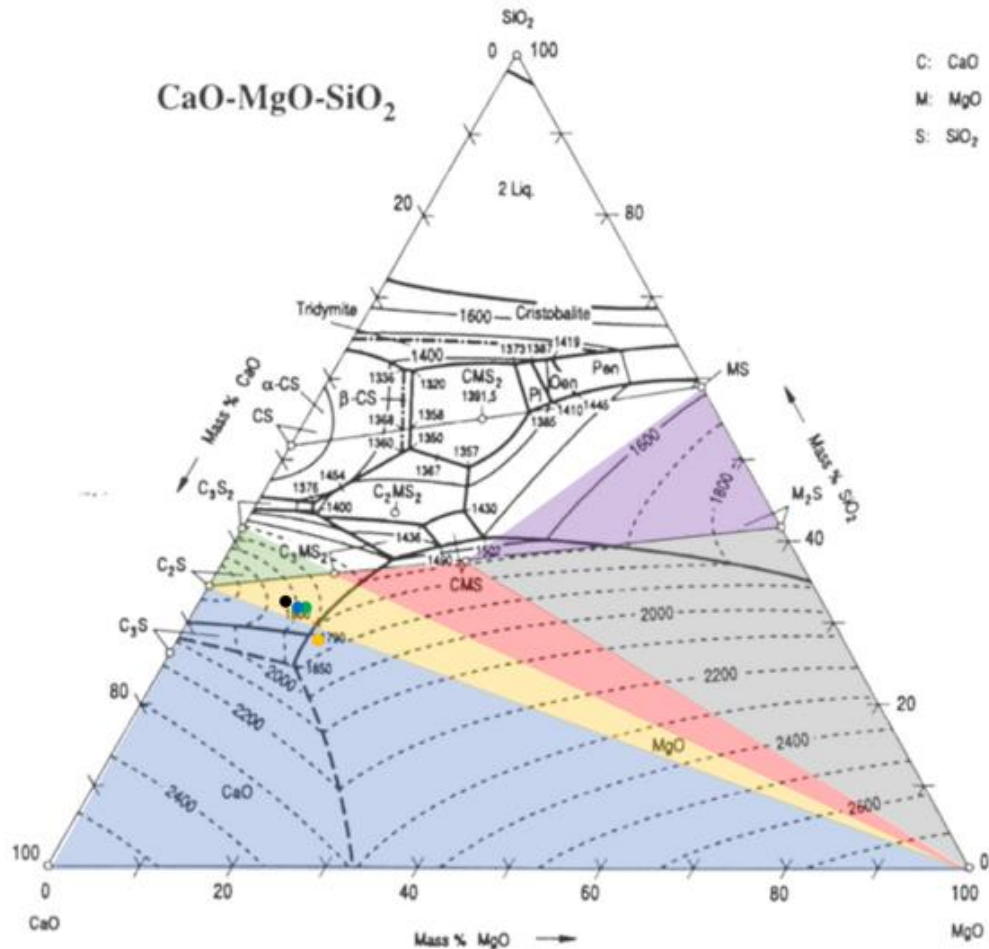
| <b>Areia de Vedação</b> | <b>%SiO<sub>2</sub></b> | <b>%MgO</b> | <b>%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>%FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>%C</b> | <b>%CaO</b> |
|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------------------|---|-----------|-------------|
| <b>Pré-teste</b>        | 1,8                     | 87,1        | 5,6                                 | 1,7                                     | -         | -           |
| <b>Variante 1</b>       | 36,3                    | 55,7        | 5,4                                 | -                                       | 0,2       | -           |
| <b>Variante 2</b>       | 32,8                    | 47,2        | 2,4                                 | 5,4                                     | -         | 1,5         |
| <b>Variante 3</b>       | 40,0                    | 30,0        | 5,0                                 | 5,0                                     | -         | 5,0         |

Fonte: Autor (2022)

No diagrama ternário representado na Figura 35, estão plotadas as escórias utilizando a areia de vedação pré-teste (ponto laranja), variante 1 (ponto verde), variante 2 (ponto azul) e variante 3 (ponto preto).



Figura 35 – Representação da escória pré-teste (ponto laranja) e escórias com alteração da areia de vedação do canal do FEA (pontos verde, azul e preto) no corte isotérmico do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>



Fonte: Adaptado de Kowalski, Spencer e Neuschütz (1995)

Avaliando a Figura 35, percebe-se que as escórias utilizando as novas areias de vedação do canal se situam na região de sólido e líquido (região delimitada em amarelo), e todas se encontram mais próximas da região ótima determinada no item 5.2.1.1 do presente estudo. Considerando a influência da fluorita na dissolução de CaO e o deslocamento da linha de fases (Figura 28), espera-se que as novas escórias estejam ainda mais próximas da região de interesse, devido ao deslocamento da linha de saturação de MgO.

Ainda, as três escórias sugeridas possuem teor desse composto dentro da região ótima entre 5% e 10%, sendo, portanto, consideradas adequadas frente ao objetivo proposto, conforme apresentado no item 5.2.3.3.

Assim, visando determinar qual das escórias é a mais adequada, será comparada a diferença entre o teor de MgO e sua saturação de cada escória.

Conforme discutido no item 4.3.1.3, as escórias com diferença mais próxima de zero entre o teor de MgO e a sua saturação possuem um melhor equilíbrio entre desgaste refratário e acúmulo de escória nas paredes e fundo das panelas e são, portanto, mais indicadas para o processo.

Conforme disposto na Tabela 5, é possível verificar que a escória de forno panela utilizando a variante 1 da areia de vedação do canal possui um menor delta em módulo entre o percentual de MgO e o percentual de saturação desse composto, dentre as novas variantes de areia analisadas e, sendo assim, a mais recomendada para equilibrar o menor acúmulo de escória e o desgaste refratário.

Tabela 5 – Comparação do %MgO, %Saturação de MgO e o delta entre a saturação e o %MgO entre escórias de forno panela com o uso de diversas areias de vedação do canal do FEA

| <b>Escória</b>    | <b>%MgO</b> | <b>%Saturação MgO</b> | <b><math>\Delta</math> (%MgO - %Saturação)</b> |
|-------------------|-------------|-----------------------|--|
| <b>Pré-teste</b>  | 13,3        | 10,2                  | 3,1  |
| <b>Variante 1</b> | 10,3        | 11,6                  | -1,3   |
| <b>Variante 2</b> | 9,5         | 11,6                  | -2,1   |
| <b>Variante 3</b> | 7,9         | 11,8                  | -3,9   |

Fonte: Autor (2022)

### 5.3 ALTERAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA DO FORNO PANELA

A principal fonte de MgO da escória de forno panela do processo em questão é a areia do canal de vedação do FEA, que é responsável por aproximadamente 90% do MgO presente nessa escória. Desta forma, foi proposta uma modificação na composição química da areia de vedação do canal do FEA, visando atingir a composição química desejada. Uma alteração na quantidade de areia adicionada no canal foi descartada, tendo em vista os impactos operacionais adjacentes à estas mudanças.

Conforme discutido anteriormente, alterações nos teores de CaO e CaF<sub>2</sub> poderiam ser soluções prováveis. No entanto, devido à necessidade de dessulfuração o processo e ao aumento do desgaste refratário causado pela precipitação da cuspidina, essas alterações não seriam viáveis e, por isso, foram descartadas.

### 5.3.1 Alteração da composição química da areia de vedação do canal do FEA

Tendo em vista o objetivo de reduzir a viscosidade, ponto de fusão e, conseqüentemente, facilitar o escoamento da escória da panela durante sua limpeza, foi selecionada uma areia de vedação do canal do FEA com reduzido teor de MgO e maior teor de SiO<sub>2</sub>, em relação àquela atualmente utilizada no processo em análise. As composições químicas da areia de vedação pré-teste e proposta (Pré-teste e Variante 1, respectivamente) são apresentadas na Tabela 5.

### 5.4 TESTE DA NOVA AREIA DE VEDAÇÃO DO CANAL DO FEA

Foram realizadas inicialmente sete corridas de teste com uso da nova areia de vedação do canal do FEA. Durante os testes, foi possível observar de forma prática uma redução significativa da viscosidade da escória. Em todas as corridas do teste, houve o escoamento total ou quase total da escória durante a etapa de retirada de escória da panela após o lingotamento. Apesar dos resultados satisfatórios das corridas de teste, se fez necessário um teste em um período mais longo para atestar que a melhora no escoamento, de fato, acarreta em um melhor aproveitamento do volume útil da panela devido ao não acúmulo da escória nas paredes e fundo das panelas.

A Tabela 6 apresenta a composição química das amostras de escória do forno panela retiradas de 7 corridas de teste, após alteração da areia de vedação do canal do FEA.

Tabela 6 – Composição química das escórias do forno panela durante o teste

| Corrida | % SiO <sub>2</sub> | % CaO | % MgO | % CaF <sub>2</sub> | % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | % FeO | % P    | % S  | % MnO | %TiO <sub>2</sub> | % Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|---------|--------------------|-------|-------|--------------------|----------------------------------|-------|--------|------|-------|-------------------|----------------------------------|
| T1      | 28,52              | 48,89 | 11,5  | 1,76               | 6,69                             | 0,55  | 0,0072 | 0,46 | 1,11  | 0,43              | 0,108                            |
| T2      | 28,39              | 49,56 | 11,03 | 1,73               | 6,34                             | 0,73  | 0,0068 | 0,47 | 1,18  | 0,45              | 0,129                            |
| T3      | 29,03              | 51,39 | 9,02  | 1,68               | 6,86                             | 0,47  | 0,0063 | 0,61 | 0,52  | 0,42              | 0,004                            |
| T4      | 29,99              | 51,35 | 10,09 | 1,62               | 5,35                             | 0,23  | 0,0059 | 0,4  | 0,54  | 0,41              | 0,020                            |
| T5      | 29,98              | 49,71 | 10,75 | 1,84               | 6,49                             | 0,13  | 0,0082 | 0,43 | 0,31  | 0,34              | 0,012                            |
| T6      | 29,63              | 50,53 | 10,58 | 1,83               | 6,21                             | 0,14  | 0,0079 | 0,42 | 0,3   | 0,34              | 0,004                            |
| T7      | 29,08              | 50,80 | 10,58 | 1,83               | 6,35                             | 0,23  | 0,0080 | 0,43 | 0,32  | 0,35              | 0,011                            |
| Média   | 29,23              | 50,32 | 10,51 | 1,76               | 6,33                             | 0,35  | 0,0072 | 0,46 | 0,61  | 0,39              | 0,041                            |

Fonte: Autor (2022)



#### 5.4.1 Comparação da composição química entre as escórias do forno panela

A composição química média das escórias de teste foi comparada com a composição química média da escória do forno panela do processo inicial. Na Tabela 7 são apresentadas as composições químicas médias das escórias do forno panela antes e após o teste.

A escória de teste possui um maior teor de  $\text{CaF}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , bem como, uma basicidade binária inferior em comparação com a escória pré-teste. Por esses motivos, de acordo com a literatura, a escória de teste tende a possuir menor viscosidade, menor partição sólida e maior capacidade de escoamento em comparação com a escória pré-teste. Os teores mais baixos de  $\text{FeO}$  podem ser resultado de uma maior capacidade de desoxidação da escória devido as mudanças implantadas. Vale salientar que o *grade* de aço fabricado em todas as escórias analisadas eram similares.

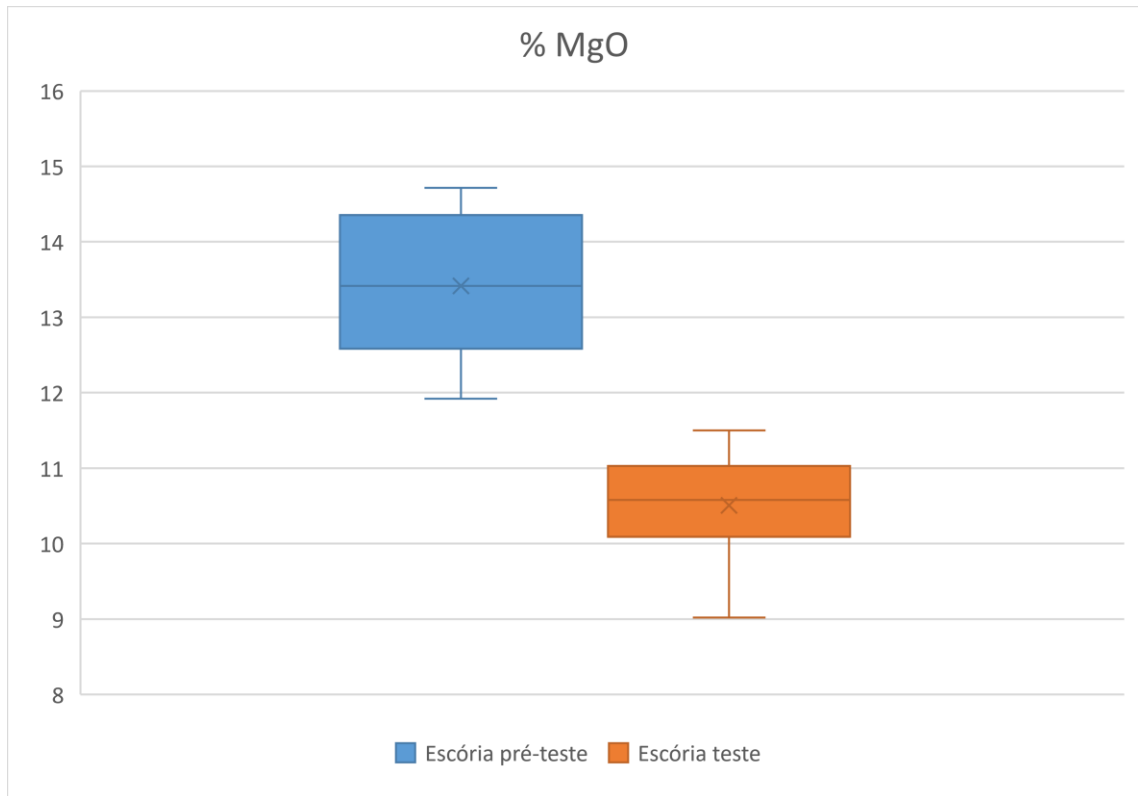
Tabela 7 – Composição química das escórias pré-teste e teste

|                          | %SiO <sub>2</sub> | %CaO  | %MgO  | %CaF <sub>2</sub> | %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %FeO | %P     | %S   | %MnO | %TiO <sub>2</sub> | %Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|--------------------------|-------------------|-------|-------|-------------------|---------------------------------|------|--------|------|------|-------------------|---------------------------------|
| <b>Escória pré-teste</b> | 24,68             | 51,37 | 13,42 | 1,51              | 5,26                            | 1,44 | 0,0025 | 1,44 | 0,47 | 0,38              | 0,018                           |
| <b>Escória teste</b>     | 29,23             | 50,32 | 10,51 | 1,76              | 6,33                            | 0,35 | 0,0072 | 0,46 | 0,61 | 0,39              | 0,041                           |

Fonte: Autor (2022)

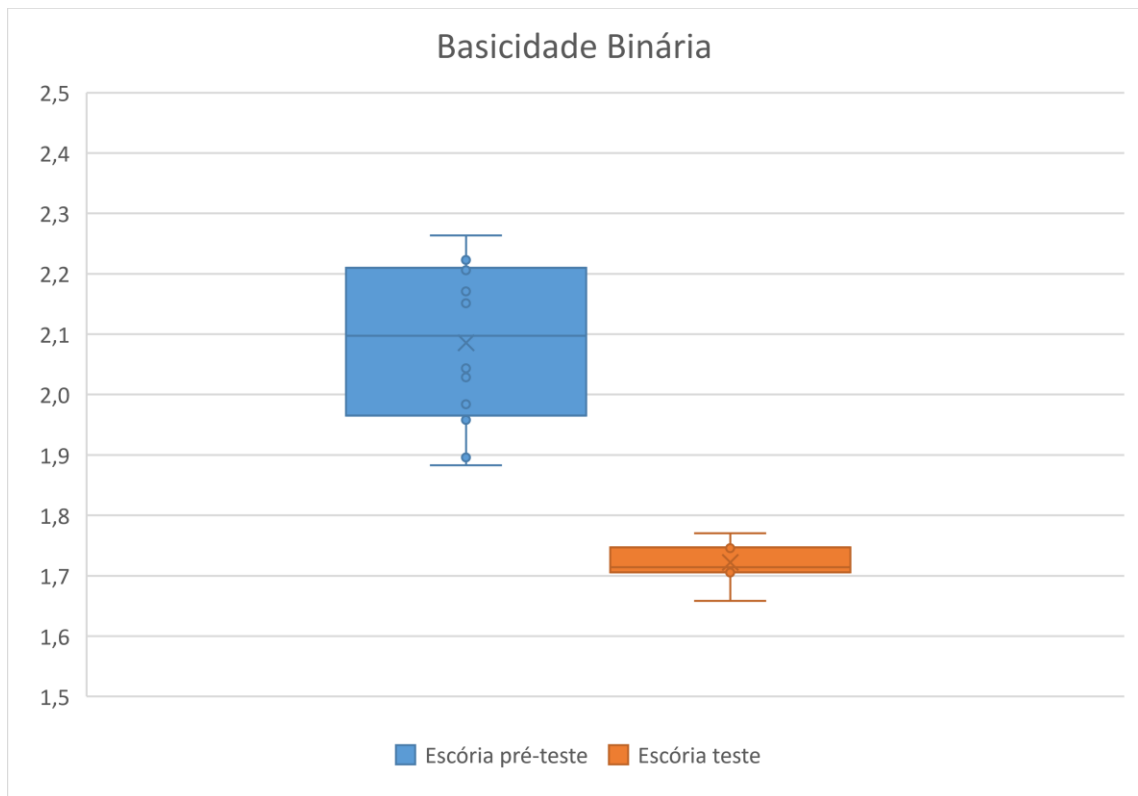
Nos Gráficos 1 e 2 a seguir, é possível perceber as alterações no teor de  $\text{MgO}$  e na basicidade binária ( $\text{CaO/SiO}_2$ ) da escória, respectivamente.

Gráfico 1 – Percentual de MgO na escória pré-teste e na escória de teste



Fonte: Autor (2023)

Gráfico 2 – Basicidade binária na escória pré-teste e na escória de teste



Fonte: Autor (2023)

Com percentual inferior de MgO, a escória de teste tende a possuir menor partição sólida, tendo em vista que o MgO é um dos sólidos constituintes da escória com maior ponto de fusão. Entretanto, o menor teor de MgO pode acarretar em um aumento do desgaste refratário, tendo em vista que os tijolos das painéis são dolomíticos, ou seja, à base de MgO e CaO.

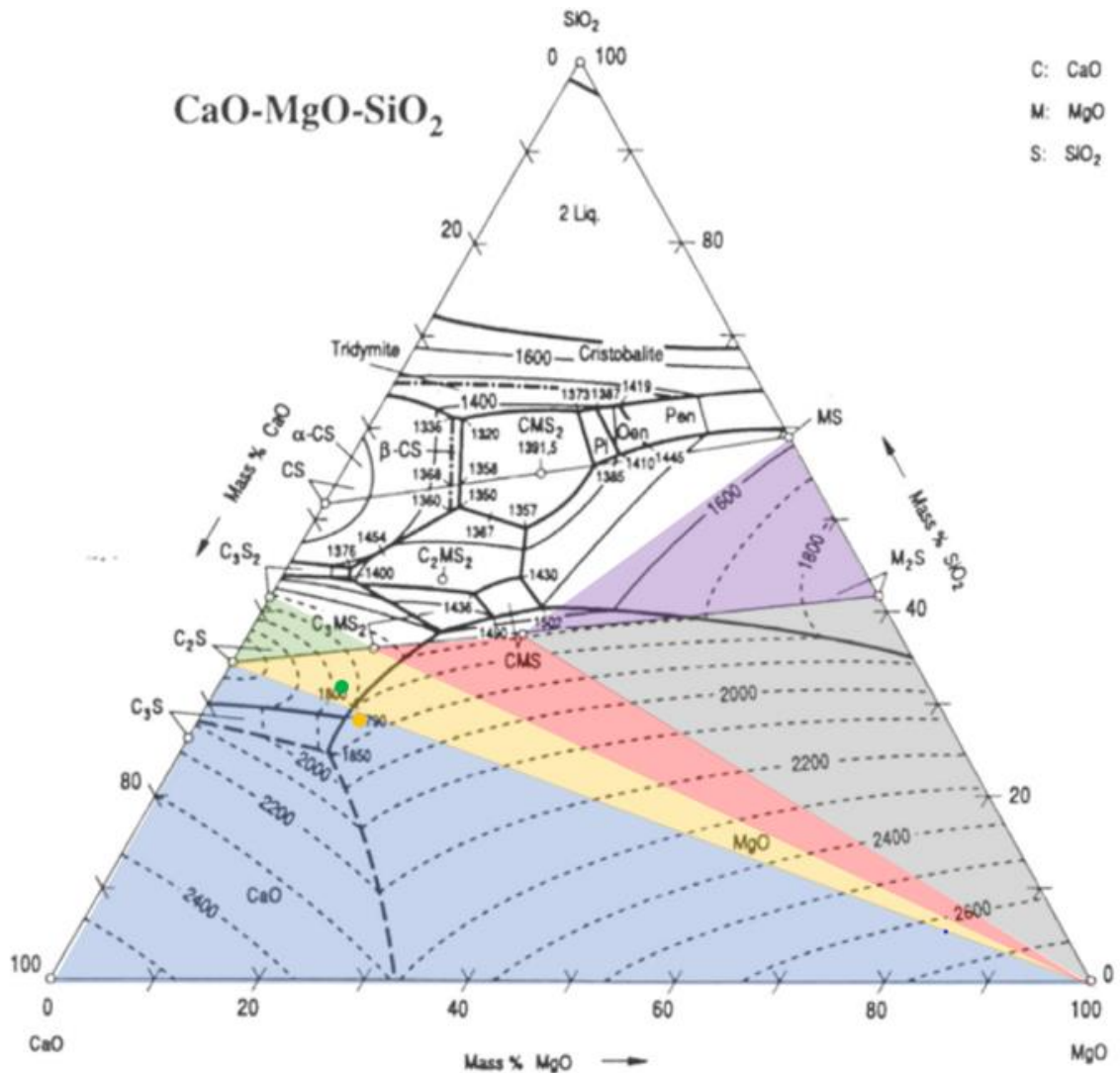
A basicidade binária, outro ponto crítico na avaliação das escórias, teve uma significativa redução na escória de teste em relação à escória pré-teste. A redução da basicidade binária tende a reduzir a viscosidade da escória e aumentar a partição líquida, em ambos os casos se aproximando do objetivo proposto. A redução da variabilidade da basicidade binária da escória de teste pode estar correlacionada com o acompanhamento *in loco* do teste (operadores tendem a realizar menos mudanças devido ao acompanhamento) ou pelo fato da nova composição demandar menos ajustes posteriores pelos operadores do forno painel. Ainda, foi descrito pelos operadores que a escória de teste possui facilidade para espumação, outro ponto relevante no processo do forno painel. Devido a esta tendência, há uma menor necessidade de realização de ajustes na composição química da escória que levariam a possíveis variabilidades.

#### **5.4.2 Avaliação de partição líquida e sólida no diagrama ternário**

Para avaliação das fases da escória e seus precipitados, foi utilizado o diagrama ternário CaO.MgO.SiO<sub>2</sub> com 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Figura 36). Devido à influência da fluorita (Figura 28) no diagrama ternário de fases, há um aumento da capacidade de diluição dos precipitados sólidos presentes na escória e, portanto, um aumento das regiões de fase líquida+sólida. Devido a influência da fluorita, há um deslocamento das regiões verde (2CS + L), região amarela (2CS + M + L) e vermelha (M + L) e uma redução da região azul (100% fase sólida). O ponto verde, que representa a composição química da escória teste, estaria, portanto, ainda mais próximo da linha de interesse, enquanto o ponto amarelo, que representa a escória pré-teste, estaria dentro da região de precipitação de sólido+líquido.

Percebe-se, ainda, que apesar de ambas as escórias possuírem fases líquidas + sólidas e precipitarem Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, a escória teste possui um percentual de fase líquida superior à escória pré-teste.

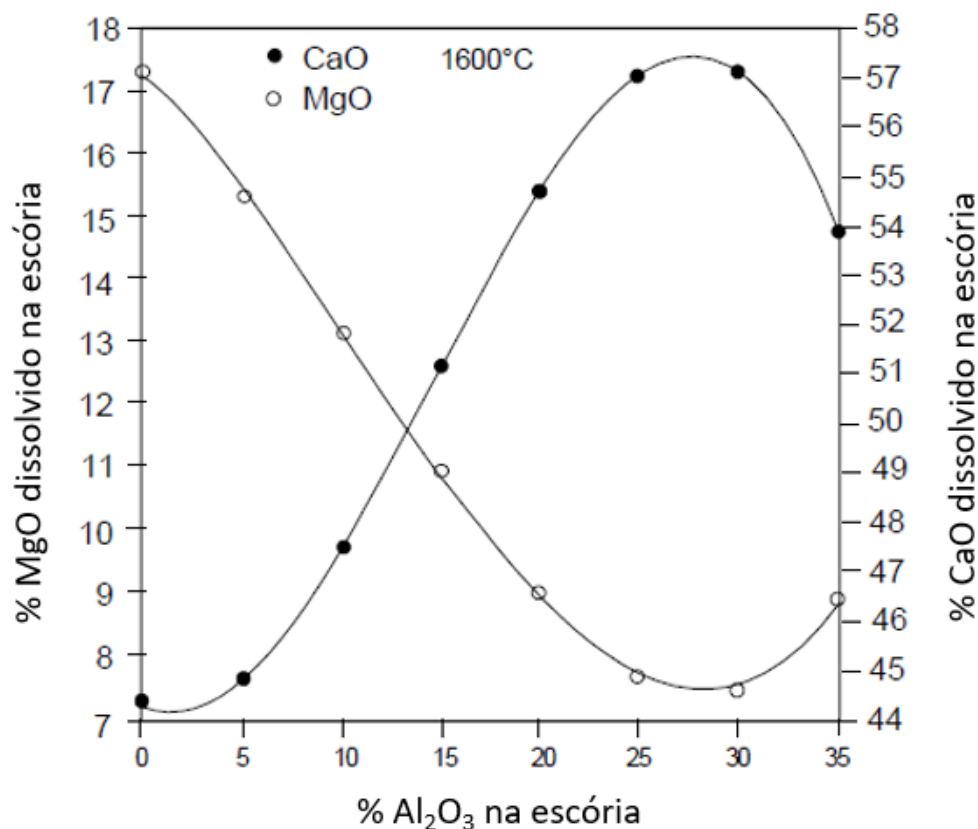
Figura 36 – Representação da escória pré-teste (ponto laranja) e escória de teste (ponto verde) no corte isotérmico do diagrama ternário do sistema CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>



Fonte: Adaptado de Kowalski, Spencer e Neuschütz (1995)

Ainda, o teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mais elevado da escória de teste proporciona um aumento da solubilidade do CaO na fase líquida, reduzindo a fração sólida precipitada e, conseqüentemente, contribuindo ainda mais para a obtenção de uma escória com maior facilidade de escoamento (PRETORIUS, 1996). Esse fenômeno da influência da Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na solubilidade do CaO e MgO pode ser observado na Figura 37.

Figura 37 – Solubilidade do CaO e MgO em função do teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em escórias  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  a  $1600^\circ\text{C}$



Fonte: Adaptado de Pretorius (1996)

#### 5.4.3 Comparação da viscosidade entre as escórias do forno panela

Utilizando os modelos propostos por Riboud *et al.* (1981), Urbain (1987), Iida *et al.* (2002) e Mills (2011), foram calculadas as viscosidades teóricas de ambas as escórias, cujos resultados encontram-se dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Cálculo da viscosidade das escórias pré-teste e teste utilizando quatro modelos matemáticos de estimativa da viscosidade

| Modelo | Viscosidade (dPa.s) |               |
|--------|---------------------|---------------|
|        | Escória Pré-teste   | Escória Teste |
| Riboud | 0,221               | 0,390         |
| Urbain | 0,510               | 0,614         |
| Iida   | 1,297               | 1,494         |
| Mills  | 0,595               | 0,755         |

Fonte: Autor (2022)

Pereira *et al.* (2018) encontrou valores de viscosidade variando entre 0,80 e 1,00 dPa.s, para escórias de forno panela com composição química similar às escórias analisadas no presente estudo. Da mesma forma, Sniegoň *et al.* (2021) calculou valores de viscosidades de 0,2 dPa.s, para escórias com 0% de MgO, 0,6 a 0,8 dPa.s para escórias com 8% de MgO e valores superiores de viscosidade para escórias com maior percentual de MgO. Com base nessas informações, o modelo de Mills foi selecionado dentre os demais modelos, por apresentar resultados de viscosidade mais próximo dos estudos em questão. Vale ressaltar que as conclusões das análises se manteriam similares independentemente do modelo de cálculo de viscosidade escolhido.

Avaliando os resultados dispostos na Tabela 8, percebe-se que a escória de teste apresentou uma viscosidade maior que a escória pré-teste em todos os modelos analisados, o que iria de encontro aos resultados práticos obtidos. Isso se dá pelo fato da viscosidade calculada pelos modelos ser referente à fração líquida da escória, entretanto, uma vez que a fração sólida da escória do forno panela possui grande influência em sua viscosidade, deve-se utilizar a viscosidade efetiva para avaliar escórias com fração sólida + líquida (PRETORIUS, 1996).

A Equação 12, descrita por Pretorius (1996), é utilizada para avaliação da viscosidade efetiva da escória.

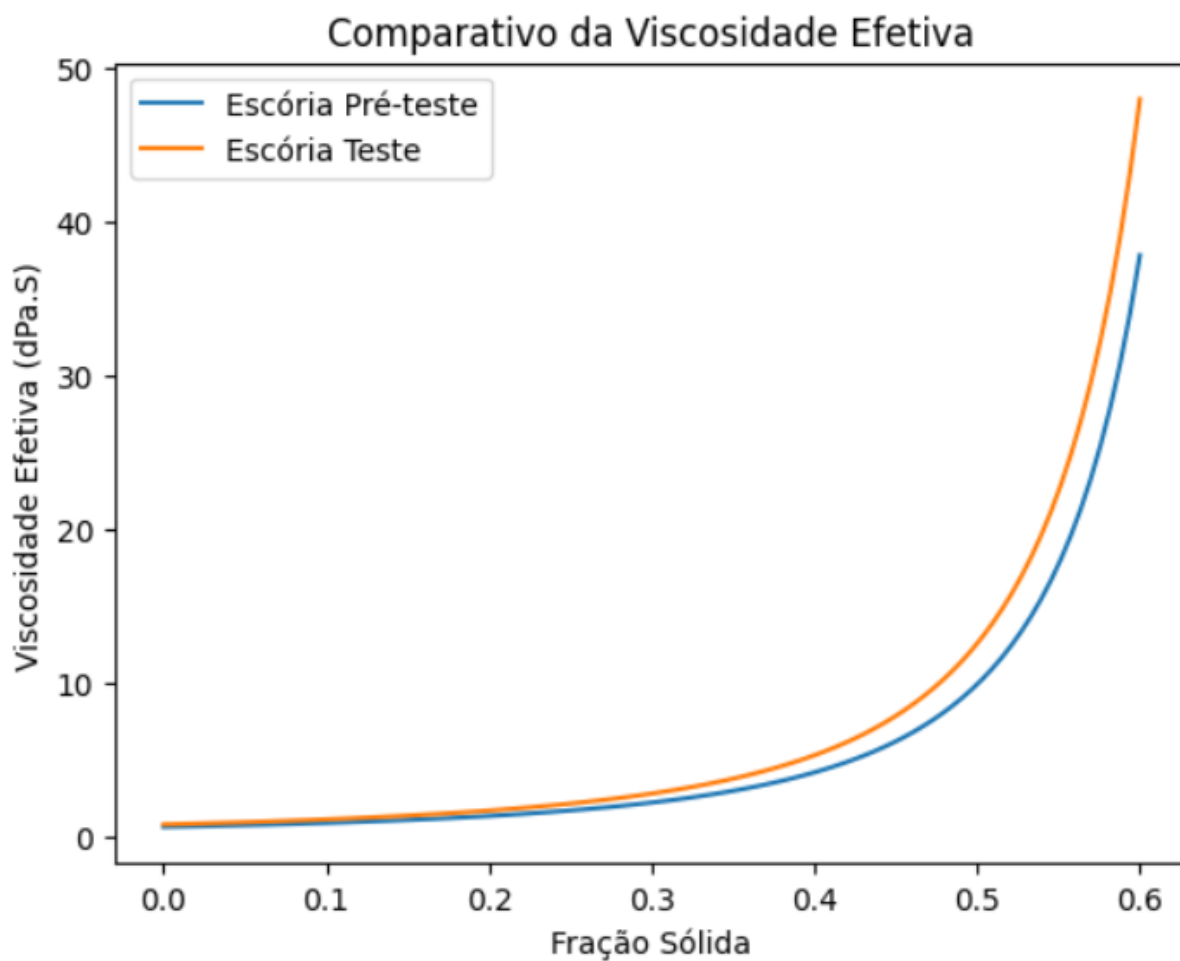
$$\eta_e = \eta (1 - 1,35 \theta)^{-5/2} \quad 12$$

Onde,  $\eta_e$  representa a viscosidade efetiva,  $\eta$  é a viscosidade da fase líquida da escória e  $\theta$  é a fração sólida precipitada.

Os Gráficos 3 e 4 foram elaborados utilizando o conceito de viscosidade efetiva em relação à fração sólida, aplicando os valores de viscosidade obtidos através do modelo de Mills (2011) para cada uma das escórias analisadas.

No Gráfico 3 estão representadas as viscosidades efetivas da escória pré-teste e escória de teste em função de um percentual de partição sólida entre 0 e 60%. Neste gráfico, é possível perceber que, para valores de fração sólida precipitada acima de 40%, a viscosidade efetiva da escória apresenta valores extremamente elevados. Sendo assim, escórias com esse patamar de viscosidade possuem extrema dificuldade para escoar devido à grande quantidade de precipitado sólido.

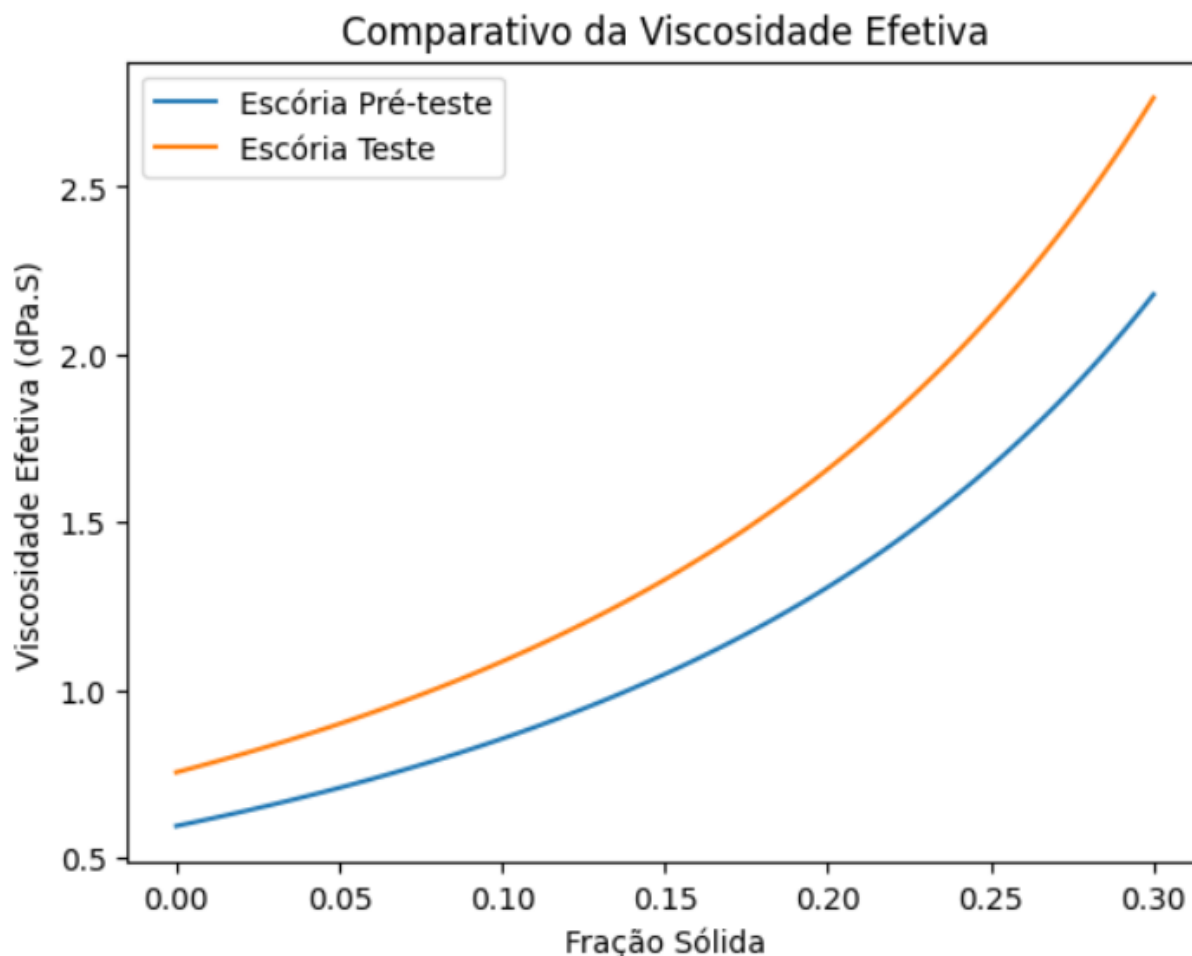
Gráfico 3 – Comparação da viscosidade em relação à fração sólida da escória pré-teste e escória de teste para uma fração sólida entre 0 e 60%



Fonte: Autor (2023)

No Gráfico 4 foram utilizados valores entre 0 e 30% de fração sólida, valores estes mais representativos em relação àqueles encontrados nas escórias de forno panela analisadas. É possível perceber que o percentual da fase sólida precipitada possui uma influência significativa na viscosidade efetiva, quando comparado com a viscosidade da fase líquida da escória.

Gráfico 4 – Comparação da viscosidade em relação à fração sólida da escória pré-teste e escória de teste para uma fração sólida entre 0 e 30%



Fonte: Autor (2023)

Considerando uma redução da fração sólida da escória de teste em relação à escória pré-teste superior a dez pontos percentuais, tem-se uma escória com viscosidade efetiva inferior, ou seja, mais líquida e de escoamento mais fácil durante a limpeza da panela. Durante os testes práticos, a diminuição da viscosidade e o aumento fluidez da escória foram visualmente perceptíveis, corroborando com a afirmativa de diferença entre a viscosidade efetiva das escórias. Com base no Gráfico 4, considerando que a escória de teste apresenta uma viscosidade efetiva com uma fração sólida entre 10 e 30 pontos percentuais inferior à da escória pré-teste, a viscosidade efetiva da escória de teste é entre 12% e 65% menor em comparação com a viscosidade efetiva da escória pré-teste.

Desta forma, a escória pré-teste apesar de possuir uma fase líquida com menor viscosidade, apresenta uma viscosidade efetiva mais elevada que a escória teste, por



possuir, conforme comentado anteriormente, um percentual maior de fração sólida precipitada. Conforme mencionado, apesar da viscosidade escolhida para comparação ter sido a do modelo apresentado por Mills (2011), o caráter comparativo da análise da viscosidade se manteria verídico, independentemente do modelo escolhido.

#### 5.4.4 Comparação da temperatura liquidus entre as escórias do forno panela

Baseado na Equação 7, definida por Mills, Yuan e Jones (2011), a temperatura liquidus da escória teste seria de aproximadamente 1567°C, ou seja, 14°C menor do que os 1581°C da escória pré-teste (Tabela 9). Sendo assim, a escória teste possui uma tendência maior para formação de fase líquida, o que tende a reduzir a viscosidade efetiva e melhorar o escoamento da escória na etapa de limpeza da panela.

Tabela 9 – Cálculo da temperatura liquidus das escórias pré-teste e de teste utilizando modelo matemático de Mills, Yuan e Jones

| Modelo                     | Escória Pré-teste | Escória Teste |
|----------------------------|-------------------|---------------|
| Modelo Mills, Yuan e Jones | 1581°C            | 1567°C        |

Fonte: Autor (2023)

Desta forma, é possível afirmar que a escória de teste deverá possuir uma menor tendência a agregar nas paredes e fundo da panela ao longo do seu tempo de vida útil, visto que possui uma maior fração líquida, menor viscosidade efetiva e menor temperatura *liquidus*, em comparação com a escória pré-teste.

#### 5.4.5 Análise do desgaste refratário potencial entre a escória pré-teste e a escória de teste do forno panela

Uma escória de forno panela adequada para o processo de fabricação de aço deve possuir baixo índice de desgaste refratário das panelas. Os principais mecanismos de desgaste de refratários dolomíticos são a penetração e dissolução. As escórias não saturadas de MgO e CaO penetram nos tijolos refratários dolomíticos e dissolvem o MgO e CaO presente, buscando atingir sua saturação. Essa taxa de

dissolução é proporcional à diferença de concentração dos óxidos CaO e MgO entre a escória e o refratário que estão em contato (LEE e ZHANG, 2004).

#### 5.4.5.1 Análise da saturação de MgO

O teor da saturação de MgO da escória foi calculado baseado no modelo de Pretorius (1996) para uma temperatura de operação de 1600°C e pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação do %MgO e %Saturação de MgO entre a escória de pré-teste e a escória de teste

|                          | <b>%MgO</b> | <b>%Saturação MgO</b> | <b>Δ (%MgO - %Saturação)</b> |
|--------------------------|-------------|-----------------------|------------------------------|
| <b>Escória Pré-teste</b> | 13,3        | 10,2                  | 3,1                          |
| <b>Escória Teste</b>     | 10,3        | 11,6                  | -1,3                         |

Fonte: Autor (2022)

Tendo em vista que o percentual de MgO da escória teste é inferior ao seu percentual de saturação, espera-se uma redução na aderência de material da escória nos tijolos refratários, devido ao processo de precipitação do MgO da escória. Em contrapartida, pelos mesmos motivos, é possível que haja um aumento do consumo refratário.

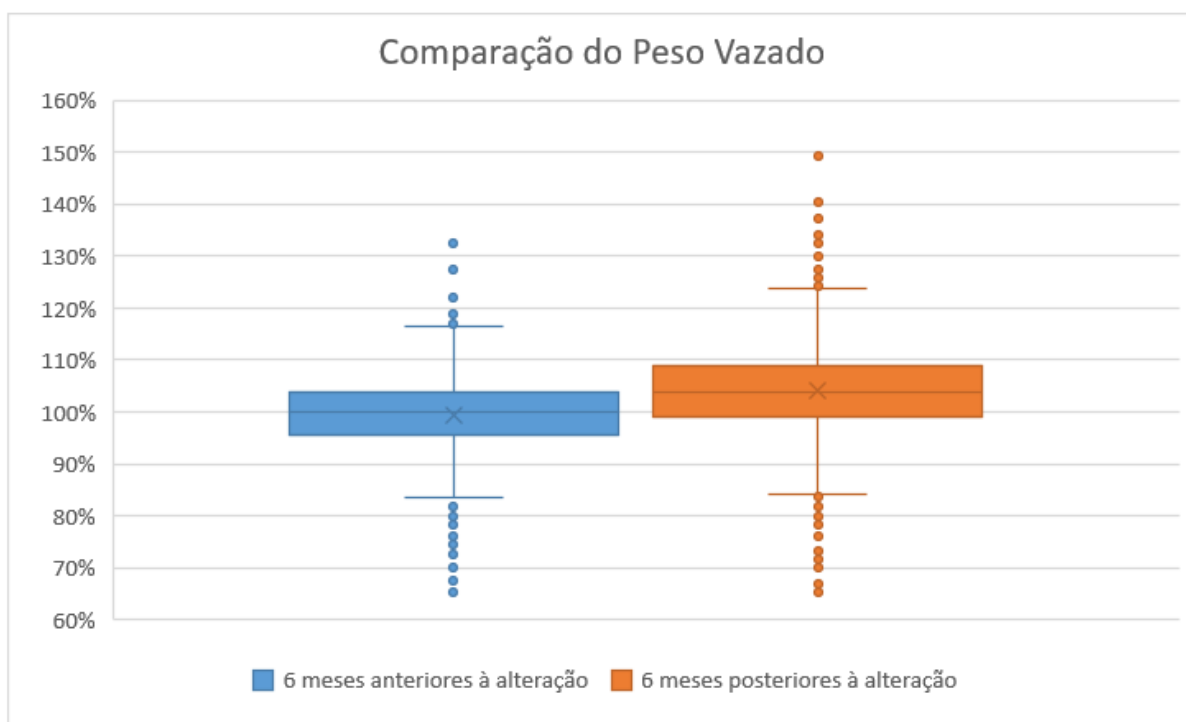
## 5.5 OUTROS RESULTADOS PRÁTICOS

Tendo em vista os resultados satisfatórios obtidos nas corridas de teste, decidiu-se aplicar as alterações na areia do canal de vedação do FEA e, conseqüentemente, alterar a composição química da escória do forno panela em um período de seis meses, a fim de avaliar o impacto das mudanças sugeridas. Nesta etapa, serão apresentados e discutidos os resultados práticos obtidos nos testes realizados ao longo dos seis meses posteriores à mudança, em comparação com os seis meses anteriores à mudança.

### 5.5.1 Peso vazado

Para avaliação dos resultados práticos da produção de aço por corrida, comumente chamada de peso vazado, foram comparados os seis meses anteriores e os seis meses posteriores à alteração da composição da areia de vedação do canal. Houve um aumento de 4,7% no indicador do peso vazado nos meses posteriores às alterações citadas, em comparação com o período anterior. Os resultados podem ser vistos no Gráfico 5, em percentual, sendo o valor de 100% referente à média dos 6 meses anteriores às alterações.

Gráfico 5 – Comparação dos valores de peso vazado entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes



Fonte: Autor (2023)

Durante os seis meses posteriores à alteração, houve uma perceptível redução do acúmulo de escória no fundo das panelas, em virtude da redução da viscosidade efetiva da escória, propiciando o escoamento da escória para fora da panela durante a etapa de limpeza das panelas. A Figura 38 demonstra a diferença observada no acúmulo das escórias durante o processo entre o período anterior e posterior à alteração.

Figura 38 – Comparação entre o acúmulo de escória nas panelas entre o período de seis meses anteriores (esquerda) e os seis meses posteriores ao início dos testes (direita)



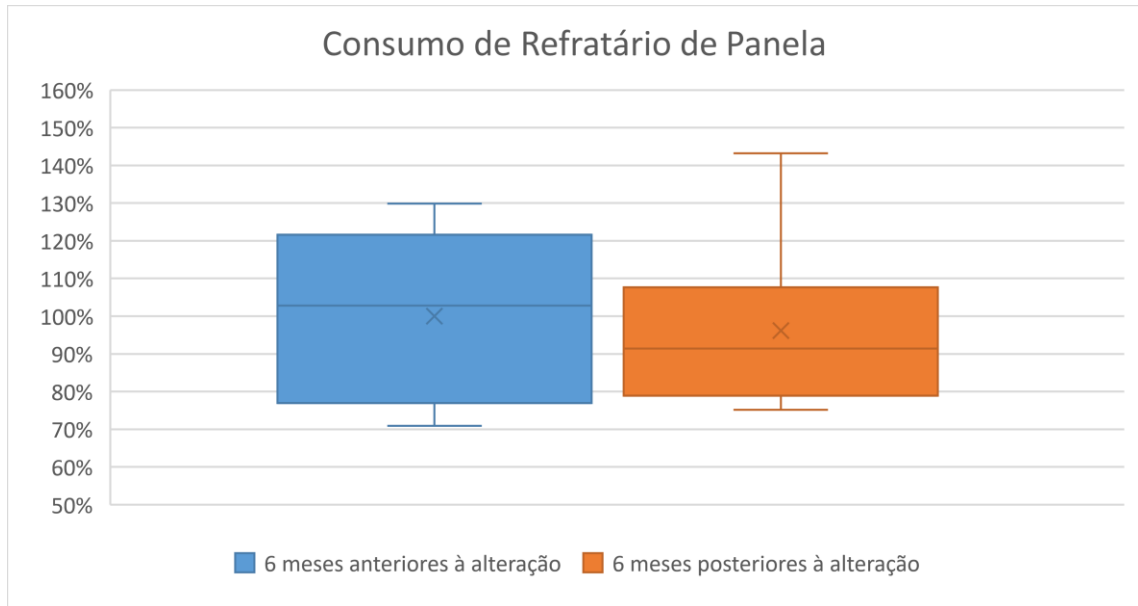
Fonte: Autor (2023)

### 5.5.2 Desgaste refratário

As alterações na composição química na areia do canal do FEA acarretaram em uma redução no percentual de MgO da escória do forno panela, fazendo com que tal valor seja inferior ao percentual de saturação de MgO. Desta forma, era esperado um aumento no consumo de refratário das panelas, tendo em vista que essa diferença entre o teor de MgO e saturação de MgO levariam a escória a consumir o MgO presente nos tijolos dolomíticos da panela, visando equilibrar sua composição química.

Entretanto, no período dos seis meses posteriores ao início dos testes em comparação com os seis meses anteriores, houve uma redução do consumo específico de refratários em kg por tonelada de aço. No Gráfico 6, é possível verificar uma redução de quatro pontos percentuais no consumo refratário médio do período posterior, sendo o valor de 100% referente à média dos valores registrados no período dos seis meses anteriores ao teste.

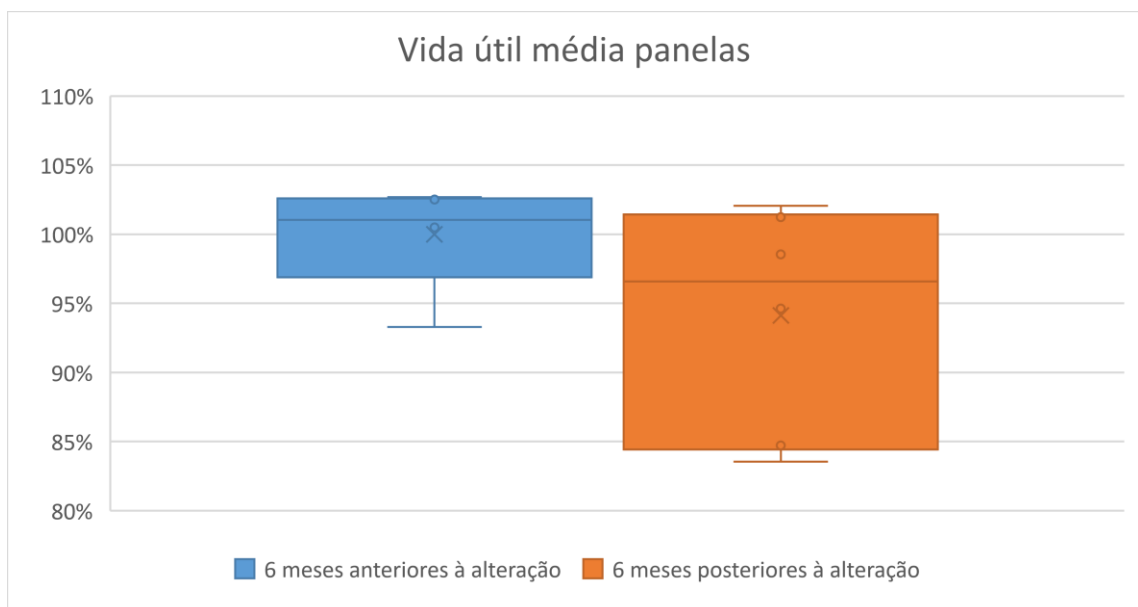
Gráfico 6 – Comparação entre o consumo de refratário de panela em percentual de kg/t entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes



Fonte: Autor (2023)

Apesar disso, como pode ser visto no Gráfico 7, houve uma redução da vida útil média das panelas em seis pontos percentuais no período posterior às mudanças, sendo o valor de 100% referente à média dos valores no período dos seis meses anteriores ao teste.

Gráfico 7 – Comparação da vida útil média das panelas entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes

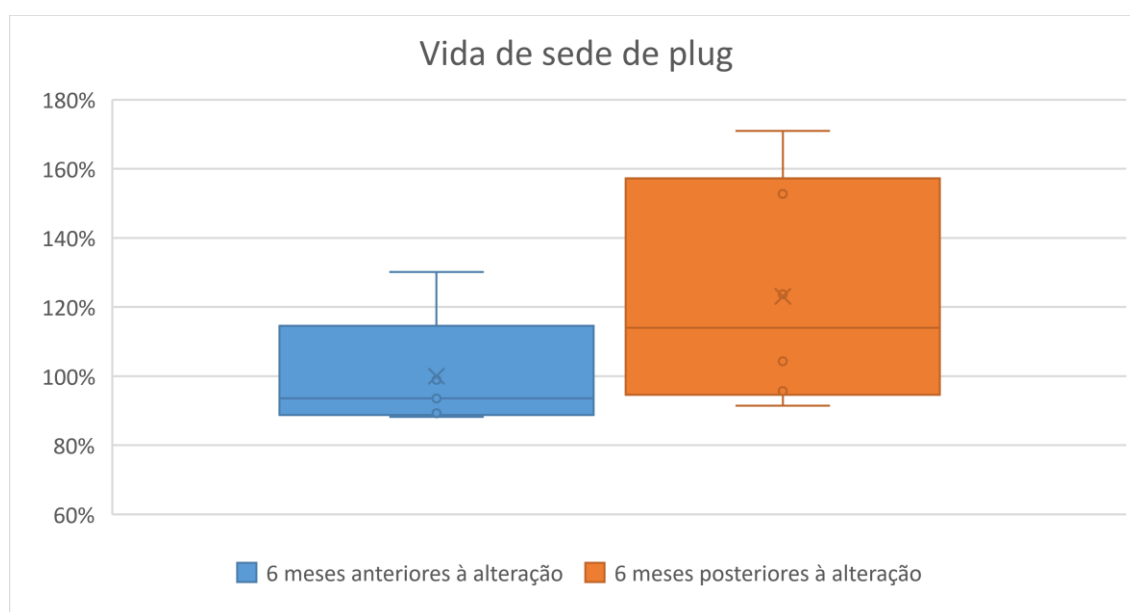


Fonte: Autor (2023)

A redução da vida útil média das panelas demonstra que há sim um aumento do desgaste refratário dos tijolos, principalmente na linha de escória das panelas. Entretanto, o aumento do peso médio vazado auxilia na diluição do consumo quando consideramos a massa de refratário por toneladas de aço produzido.

A redução do consumo específico de refratários está relacionada, ainda, a um aumento da vida da sede de plug da panela em 23 pontos percentuais (Gráfico 8) e a redução de quase 50% na quantidade de trocas de sede de plug (Gráfico 9). A redução do acúmulo de escória no fundo das panelas diminuiu a necessidade da limpeza das sedes com oxigênio (prática utilizada para a face do plug poroso desobstruído), reduzindo significativamente o consumo das sedes de plug.

Gráfico 8 – Comparação da vida das sedes de plug entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes

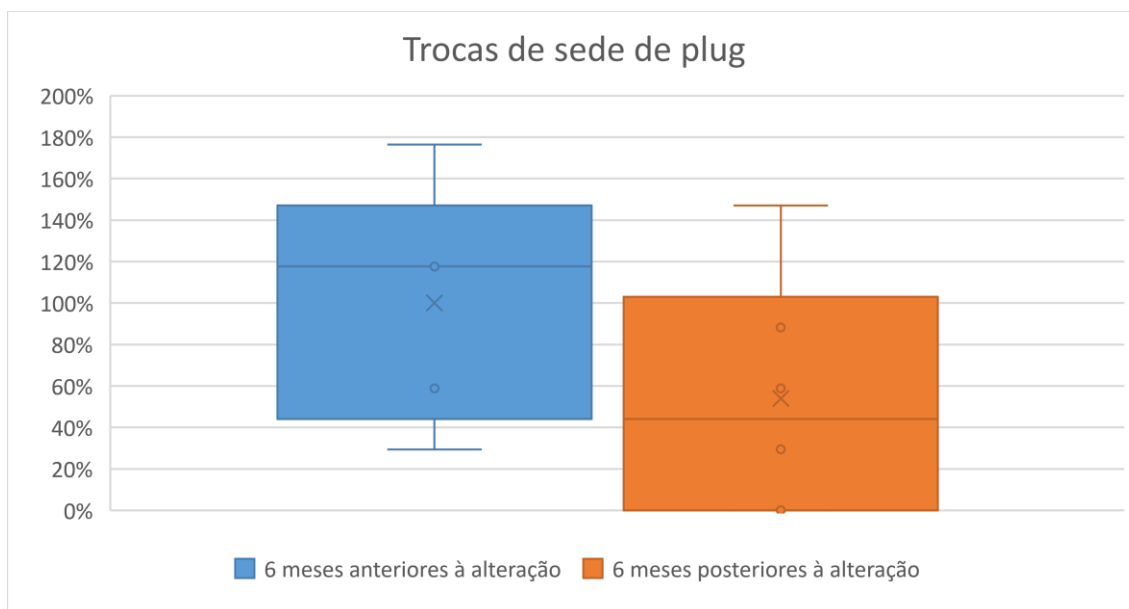


Fonte: Autor (2023)

Além disso, quando da ocorrência de acúmulo de escória em excesso no fundo das panelas, havia a prática de resfriá-las para demolir a escória acumulada no fundo das mesmas. O intuito desse procedimento é recuperar o volume útil e aumentar o peso vazado das panelas. Durante esta etapa de demolição, que acontecia aproximadamente no meio da vida das panelas, havia também a troca da sede de válvula. Essa operação se iniciava após o resfriamento dos tijolos refratários, resfriamento tal que impacta negativamente nas condições operacionais dos refratários, levando a uma redução de sua vida útil. Por este motivo, realizava-se a

troca dos tijolos da linha de escória, aumentando, assim, o consumo específico de refratários.

Gráfico 9 – Comparação da quantidade de troca média de sedes de plug entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes



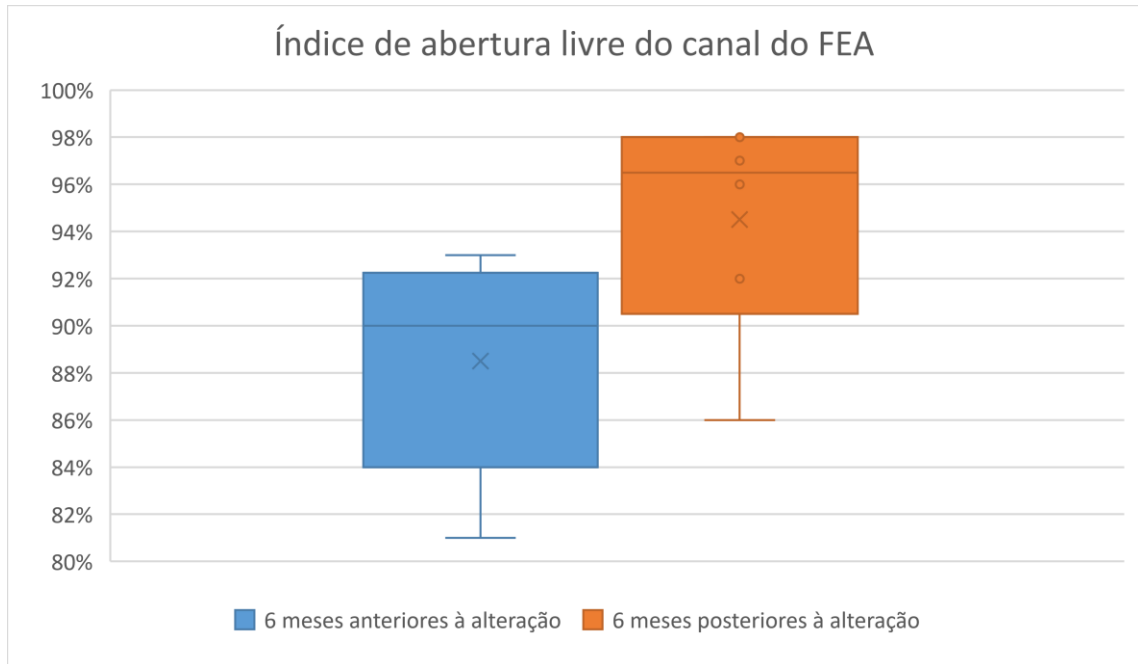
Fonte: Autor (2023)

### 5.5.3 Abertura livre do canal do FEA

Devido à alteração da areia do canal do FEA, houve também uma melhora no indicador de abertura livre do canal do FEA. Durante a etapa de vazamento, é possível que mesmo após a abertura da gaveta ou raquete não haja passagem do aço do FEA para a panela. Esse fenômeno acontece ocasionalmente nos processos de fabricação de aço em aciarias elétricas com fornos EBT por motivos diversos. A não abertura do canal do FEA gera interrupções operacionais, bem como riscos ocupacionais indesejáveis.

No Gráfico 10, é possível visualizar a melhora do percentual da abertura livre do canal do FEA. Nos seis meses anteriores à alteração da composição química da areia de vedação do canal do FEA, houve um índice de abertura livre médio de 89%, enquanto nos seis meses posteriores à alteração, houve uma melhora de 6 pontos percentuais, ou seja, um índice de 95% de abertura livre.

Gráfico 10 - Comparação entre os valores de abertura livre do canal do FEA entre o período de seis meses anteriores e seis meses posteriores ao início dos testes



Fonte: Autor (2023)

#### 5.5.4 Outros resultados práticos observados

Além dos resultados discutidos anteriormente, houve uma melhora no índice de abertura livre das panelas no lingotamento contínuo, uma redução das interrupções relacionadas às baixas temperaturas da panela causadas pela massa fria de escória acumulada no fundo das mesmas, melhora na capacidade de dessulfuração das escórias e uma maior flexibilidade para ajuste da escória do forno panela em caso de variações no processo.



## 5 CONCLUSÕES

As alterações realizadas na composição química da escória do forno panela, resultantes da modificação na composição química da areia de vedação do canal do FEA geraram resultados positivos quanto à redução do acúmulo de escória no fundo das panelas. Tais mudanças acarretaram uma redução média de 3,0% do MgO e 0,36 da basicidade binária, alterando características como viscosidade, partição sólido-líquido e temperatura *liquidus*.

Após as mudanças, o escoamento da escória durante a etapa de limpeza das panelas foi facilitado, aumentando o volume útil das panelas durante a operação e resultando em um aumento de 4,7% no peso médio vazado. Dessa forma, ao vaziar uma maior quantidade de aço por corrida, foi possível incrementar a produtividade na aciaria onde o presente estudo foi conduzido.

O diagrama ternário foi utilizado para analisar as escórias do presente estudo. Apesar de ser um método simplificado quando comparado com softwares como o FactStage e Thermo-Calc, se mostrou eficaz para identificação das causas do acúmulo de escória, bem como para realização do teste de hipóteses e seleção da melhor variante a ser testada.

Foram utilizados quatro modelos teóricos para calcular a viscosidade da partição líquida da escória, os quais apresentaram resultados consistentes. Embora a viscosidade da partição líquida da escória de teste fosse superior à da escória pré-teste, indicando um possível aumento da dificuldade no seu escoamento, a viscosidade efetiva, que leva em conta o percentual de partição sólida, foi utilizada para comparar as escórias estudadas. Uma diferença no percentual de partição sólida entre 10% e 30% entre a escória pré-teste e a escória de teste resultou em uma redução entre 12% e 65% na viscosidade efetiva da escória de teste em relação à escória pré-teste, respectivamente. Escórias com partição sólida acima de 30% terão acréscimo significativo na sua viscosidade efetiva, dificultando sua capacidade de escoar durante a etapa de limpeza da panela. Além disso, o modelo de cálculo da temperatura *liquidus* mostrou uma redução na temperatura, o que se alinha com os resultados obtidos no diagrama ternário.

Apesar da redução do teor de MgO e não saturação do MgO da escória de teste em relação à escória pré-teste, observou-se uma redução de 4 pontos percentuais do consumo específico geral de refratários da panela. A não saturação de

MgO da escória de teste resultou em um aumento pontual do consumo de refratário na linha de escória.

Adicionalmente, as mudanças aumentaram o índice de abertura livre das panelas em seis pontos percentuais, reduziram as interrupções devido à baixa temperatura do aço no forno panela, diminuíram o desgaste de sede de plug e melhoraram a capacidade de dessulfuração.

As alterações implementadas após as análises proporcionaram inúmeros benefícios ao processo de produção de aço na siderurgia em questão. Esses resultados demonstram como mudanças de baixo investimento, quando realizadas com análises criteriosas e o uso de ferramentas adequadas de análise de processos, podem gerar impactos significativos na produtividade, segurança e redução de custos nas siderurgias.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Utilizar os softwares FactStage e Thermo-Calc para comparar com os modelos matemáticos propostos e com os resultados práticos obtidos.

Testar outras variantes de escórias, particularmente aquelas que se aproximem da região de saturação do MgO.

## REFERÊNCIAS

- AL-HARBI, Mansour *et al.* Comprehensive CFD simulation of the ladle cycle toward lining service life optimization. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 33, 3 jul. 2012. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/33/1/012022>.
- BEHERA, Narottam. **USE OF LADLE FURNACE SLAG FROM AL-KILLED STEEL IN SI-KILLED STEELMAKING AS CALCIUM ALUMINATE FLUX**. . US n. WO 2015/114545 A1. Depósito: 28 jan. 2015. Concessão: 06 ago. 2015.
- BOKAN, Bob **AC-527: Operações de Vazamento**. Módulo Interno de Treinamento Gerdau, 2013.
- BRAGANÇA, S. R. Corrosão de refratários utilizados na siderurgia. Parte II: propriedades físicas dos refratários e fatores operacionais. **Cerâmica**, [S.L.], v. 58, n. 348, p. 459-464, dez. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132012000400007>.
- BROOKS G., SUBAGYO, **Advances in ladle metallurgy control**. In: Coley KC, Brooks G (eds) *Ladle and Tundish*, COM, 2002.
- BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- DAEHAN STEEL. **WHAT IS THE DIFFERENCE BETWEEN ELECTRIC FURNACE AND BLAST FURNACE?** Disponível em: [https://www.idaehan.com/en/business/steel/rebar\\_view?seq=15&keyword=&field=](https://www.idaehan.com/en/business/steel/rebar_view?seq=15&keyword=&field=). Acesso em: 06 ago. 2023.
- DA SILVA, J. N. Andrade. **AC-534 Operação de Panela**. Módulo Interno de Treinamento Gerdau, 2013.
- FIGUEIRA, R. M. **ACI 504: Operação do FEA**. Módulo Interno de Treinamento Gerdau, 2007.
- FRANCISCO, Alexandre Santos. **Fenômenos de Transporte**. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2018.
- FRUEHAN, R. J. **The Making, Shaping and Treating of Steel. Steelmaking and Refining Volume**. 11. ed. Pittsburgh: The Aise Steel Foundation, 1998.
- GERDAU. **ACI-503: Diagramas Ternários**. Módulo Interno de Treinamento Gerdau, 2012a.
- GERDAU. **ACI-505: Refino Secundário**. Módulo Interno de Treinamento Gerdau, 2012b.
- GHOSH, P. K. **AC-518: Refratários do FEA**. Módulo Interno de Treinamento Gerdau, 2013.

GONZÁLEZ, Luis Felipe Verdeja *et al.* **Operations and Basic Processes in Steelmaking**. Cham: Springer, 2021. (Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering).

GRITSABLARE. **Eccentric bottom tapping (EBT) taphole filler**. Disponível em: <https://gritsablare.ro/en/olivine-blasting-foundry-steel-industry.html>. Acesso em: 15 jan. 2023.

IIDA, Takamichi *et al.* An Equation for Accurate Prediction of the Viscosities of Blast Furnace Type Slags from Chemical Composition. **ISIJ International**, [S.L.], v. 40, n. , p. 110-114, 2000. Iron and Steel Institute of Japan.  
[http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.40.suppl\\_s110](http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.40.suppl_s110).

**INSTITUTO AÇO BRASIL**. Anuário Estatístico da Siderurgia Brasileira 2024. Brasília: Instituto Aço Brasil, 2024. Disponível em: [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2024/07/Anuario\\_Completo\\_2024.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2024/07/Anuario_Completo_2024.pdf). Acesso em: 12 set. 2024.

JANSSON, S.; BRABIE, V.; JÖNSSON, P. Corrosion mechanism and kinetic behaviour of MgO-C refractory material in contact with CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO slag. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 283-292, Oct. 2005.

KOWALSKI, M.; SPENCER, P. J.; NEUSCHÜTZ, D.. Phase diagrams. In: Verlag Stahleisen GmbH. **Slag Atlas**. 2. ed. Düsseldorf: Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), 1995. Cap. 3. p. 21-215.

LEE, W.E.; ZHANG, S. **Direct and indirect slag corrosion of oxide and oxide-c refractories**. In Proceedings of the VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, Cape Town, South Africa, 25–28 January 2004; pp. 309–319.

LIAO, J.; QING, G.; ZHAO, B. **Phase Equilibrium Studies of the CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> System for Iron Blast Furnace Slag: A Review**. *Metals* 2023, 13, 801.

MADIAS, Jorge. Electric Furnace Steelmaking. In: SEETHARAMAN, Seshadri. **Treatise on Process Metallurgy, Volume 3: Industrial Processes**. Oxford: Elsevier, 2014. Cap. 1.5. p. 289-318.

MATH, K. B. V. **Optimization of Steel Production: Ladle Furnace Slag and Caster Productivity**, Department of Mechanical Engineering Mcgill university Montreal, Canada (December 2012).

MATTIELLO, Jakson. **ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO OPERACIONAL DOS PRINCIPAIS COMPONENTES REFROTÁRIOS UTILIZADOS EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO**. 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MILLS, K., **The estimation of slag properties**, 2011, Department of Materials, Imperial College, London, UK. p. 56.

MILLS, K. C., L. YUAN, and R. T. JONES. **Estimating the physical properties of slags**. Journal of South African Minerals and Metallurgy, Vol. 111, 2011, pp. 649–658.

MOURÃO, Marcelo Breda *et al.* **Introdução a Siderurgia**. São Paulo: Abm – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

MWI Bureau. **Ladle functions, design, and material selection- Overview**. 2019. Disponível em: <https://metalworldinsight.com/ladle-functions-design-and-material-selection-overview/>. Acesso em: 01 jul. 2023.

PEREIRA, Julio Aníbal Morales *et al.* Analysis of Secondary Refining Slag Parameters with Focus on Inclusion Cleanliness. **Materials Research**, [S.L.], v. 21, n. 5, 2 ago. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-0296>.

PINTO JÚNIOR, Dário Moreira *et al.* **Tecnologia siderúrgica**. Belo Horizonte: Poisson, 2018.

PRETORIUS, E. **Fundamentals of EAF and Ladles Slags and Ladles Refining Principles**: introduction to slag fundamentals. [S. l.]: Process Technology Group – LWB Refractories, 1996. Nota de aula. Portable Document Format (PDF).

PRETORIUS, Eugene B.; CARLISLE, Robert C.. Foamy Slag Fundamentals and Their Practical Application to Electric Furnace Steelmaking. In: ELECTRIC FURNACE CONFERENCE, 56., 1998, New Orleans. **Proceedings [...]**. New Orleans: Iron and Steel Society, 1998. p. 275-292.

PRETORIUS, Eugene *et al.* **EAF Fundamentals**. New York: Process Technology Group – LWB Refractories, 2001.

RIBEIRO, Delmar Barros *et al.* **Refino Secundário dos Aços**. Belo Horizonte: Abm – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2000.

Riboud, P. *et al.* Improvement of continuous casting powders. **Fachber. Huttenprax. Metallweiterverarb**, v.19, p. 859-869. 1981

RIEDINGER, Dirk; OPFERMANN, Andreas; VOGEL, Alexander. The Time Balance of the Electric Arc Furnace. **MPT International**. Nov. 2008

SEETHARAMAN, Seshadri. **Fundamentals of Metallurgy**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005.

SILVA, André Luiz da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

SILVA, José Nazareno Santos. **Siderurgia**. Belém: IFPA, 2011.

SNIEGOŇ, Michal *et al.* THERMODYNAMIC ANALYSIS OF CaO - SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - MgO SLAG SYSTEM. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METALLURGY AND MATERIALS, 30., 2021, Brno. **Proceedings [...]** . Brno: Metal, 2021. p. 46-52.

URBAIN, Georges. Viscosity estimation of slags. **Steel Research**, [S.L.], v. 58, n. 3, p. 111-116, mar. 1987. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/srin.198701513>.