



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

**FRANCISCO WILLIAN DA SILVA GOMES**

**EFEITO DO USO E DA GRANULOMETRIA DO CARBURETO DE CÁLCIO NO  
REFINO SECUNDÁRIO DE AÇOS**

**FORTALEZA**  
**2022**

FRANCISCO WILLIAN DA SILVA GOMES

EFEITO DO USO E DA GRANULOMETRIA DO CARBURETO DE CÁLCIO NO  
REFINO SECUNDÁRIO DE AÇOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientadora: Profa. Dra. Janaína Gonçalves  
Maria da Silva Machado

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- G614e Gomes, Francisco Willian da Silva.  
Efeito do uso e da granulometria do carbureto de cálcio no refino secundário de aços / Francisco Willian da Silva Gomes. – 2022.  
53 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Profa. Dra. Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado.
1. Carbureto de cálcio. 2. Granulometria. 3. Vazamento FEA. I. Título.

CDD 669

---

FRANCISCO WILLIAN DA SILVA GOMES

EFEITO DO USO E DA GRANULOMETRIA DO CARBURETO DE CÁLCIO NO  
REFINO SECUNDÁRIO DE AÇOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: \_\_\_ / \_\_\_ /2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Profª. Dra. Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

M.Sc. Rodrigo Alves Ramos  
Gerdau (GAB)

A Deus.

Aos meus pais, Nonato (*in memoriam*) e Valnê.

Aos meus familiares.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Aos meus pais, Nonato (*in memoriam*) e Valnê, por todo amor, exemplo e educação repassados. Sendo eles a motivação para chegar até aqui e buscar sempre ser alguém melhor.

Aos meus familiares, em especial, todos aqueles que foram essenciais para a concretização desse sonho, meu irmão Ítalo, minha avó Francisca e meus tios Farias e Valneci. Sem o apoio dessas pessoas tudo se tornaria mais difícil.

Aos grandes amigos que estiveram ao meu lado durante toda essa jornada acadêmica, sendo cada um deles essencial para minha formação pessoal e profissional. Foram muitos aprendizados, alegrias, tristezas e conquistas compartilhadas. Mais do que motivadores, eles foram verdadeiros guias para minha formação, destaco em particular: Francisco Carlos, Leandro Rodrigues, Vitor Dantas, Dylan Santos, Breno Lucena e Stephany Santos.

A Profa. Dra. Janaína Machado por aceitar orientar esse trabalho e por todos os ensinamentos passados durante minha participação no Programa de Educação Tutorial (PET).

Aos amigos aciaristas da Gerdau Cearense, por todo aprendizado a mim repassado durante o programa de estágio e por todo o apoio na execução desse trabalho. Cada um deles foram verdadeiros professores dentro da empresa, em especial: Diego Araruna, Rodrigo Ramos, Thiago Menezes, Cleiton Sousa, Erval Ribeiro, Vinícius Quirino, Hugo Cândido e Ariel Silva.

Ao grande amigo Emerson Souza por todo o apoio, ensinamentos e conversas durante a realização desse trabalho.

A Isadora Machado por toda torcida, paciência e motivação.

A todos os amigos que puderam de alguma forma contribuir para a minha formação.

“A grande conquista é o resultado de pequenas vitórias que passam despercebidas.”

(Paulo Coelho)

## RESUMO

Nas últimas décadas, o uso de carbureto de cálcio como agente redutor na metalurgia secundária foi amplamente abordado por muitos estudos. As principais características buscadas neste material, entre muitas outras, são seu efeito na redução da oxidação do aço e escória na panela, a maior eficiência na dessulfuração, a redução das perdas de silício e manganês para a escória, além de controlar o número de inclusões não metálicas presentes no produto semiacabado. Visando obter o máximo proveito dos benefícios de utilizar esse insumo, diversas metodologias vêm sendo testadas durante o refino secundário dos aços. A forma que mais apresenta resultados na sua utilização é a adição durante o vazamento de aço do Forno Elétrico a Arco (FEA) para a panela. Aspectos como quantidade adicionada, granulometria e o uso combinado com outros desoxidantes, devem ser considerados para cada meio onde o carbureto será inserido. A não consideração desses aspectos, poderá acarretar em ineficiência no uso do material ou oferecer uma situação de insegurança para a operação. Devido a criticidade na adição do carbureto de cálcio durante o vazamento, faz-se necessário a estruturação de uma metodologia para a realização dos testes. Durante esse trabalho, foi enfatizado os aspectos relacionados a escolha da granulometria, sendo esta uma característica ainda não apreciada por estudos precedentes. Por meio do desenvolvimento da metodologia, foi possível determinar a quantidade adicionada de 20 quilogramas (kg) para as condições observadas no processo, sendo necessário verificar o oxigênio dissolvido nas corridas avaliadas. Foram utilizadas duas granulometrias, uma variando entre 0 e 4 milímetros (mm) e outra entre 2 e 10 milímetros (mm). Foi observada a melhoria na desoxidação, dessulfuração e no rendimento de ligas para boa parte dos testes utilizando as duas granulometrias do carbureto. A granulometria de 0 a 4 mm apresentou resultados mais expressivos, entretanto, por apresentar resultados similares e não ter apresentado reação mais ativa nos primeiros momentos do vazamento, considera-se mais adequado para o uso a granulometria de 2 a 10 mm.

Palavras-chave: Carbureto de Cálcio; Granulometria; Vazamento FEA



## ABSTRACT

For the past decades, the use of calcium carbide as a reducing agent in secondary steelmaking was extensively covered by many studies. The main characteristics sought in this material, among many others, are its effect on reducing the oxidation of steel and slag in the ladle, greater efficiency in desulfurization, reduction of silicon and manganese losses to the slag and control the number of inclusions non-metallic present in the semi-finished product. In order to get the most out of the benefits of using this material, several methodologies have been tested during the steelmaking. The way that presents the most results in its use is the addition during the tapping of steel from the Electric Arc Furnace (EAF) to the ladle. Aspects such as amount added, granulometry and the combined use with other deoxidizers must be considered for each place where the carbide will be inserted. Not considering these aspects may result in inefficiency in the use of the material or offer a risk situation for the operation. Because to the criticality in the addition of calcium carbide during tapping, it is necessary to structure a methodology for carrying out the tests. During this work, aspects related to the choice of granulometry were emphasized, which is a feature not yet appreciated by previous studies. Through the development of the methodology, it was possible to determine the added amount of 20kg for the conditions observed in the process, being necessary to carry out the restriction of dissolved oxygen in the evaluated heats. Two granulometries were used, one varying between 0 and 4 millimeters (mm) and the other between 2 and 10 millimeters (mm). Improvements in deoxidation, desulfurization and alloy yield were observed for most of the tests using the two carbide granulometries, with emphasis on the 0 to 4 mm granulometry, which showed more promising results, however, as it presents similar results and does not present a more active reaction in the first moments of leakage, a granulometry of 2 to 10 mm is considered more suitable for use.

Keywords: Calcium carbide; Granulometry; Tapping EAF

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma simplificado do processo siderúrgico. ....	16
Figura 2 – Participação das usinas siderúrgicas integradas e semi-integradas na produção siderúrgica mundial, 2000-2030 (percentual).....	17
Figura 3 – Fluxograma de processo de uma aciaria elétrica. ....	18
Figura 4 – Forno elétrico a arco de corrente alternada EBT.....	19
Figura 5 – Sensores utilizados no FEA: (a) Medidores de oxigênio dissolvido, (b) amostradores de aço líquido. ....	21
Figura 6 – Destaque do cálcio, oxigênio e enxofre na tabela periódica.....	24
Figura 7 – Diagrama de Ellingham com dados aproximados de energia livre para alguns óxidos em função de temperaturas de interesse para o refino de aços.....	25
Figura 8 – Estação de refino do Forno Panela.....	28
Figura 9 – Condição de reação: (a) condição normal, (b) transbordo de aço na panela .....	31
Figura 10 – Fluxograma do processo FEA destacando momento de coleta de dados .....	33
Figura 11 – Ilustração do sistema de funcionamento do amostrador de imersão.....	34
Figura 12 – Fluxograma de decisão para realização do teste .....	35
Figura 13 – Tipos de carburetos de cálcio utilizados no trabalho: (a) granulometria 0-4mm, (b) granulometria 2-10mm. ....	35
Figura 14 – Sistema de adição de ligas no vazamento com destaque ao local de adição do carbureto de cálcio .....	36
Figura 15 - Adição de ligas e desoxidantes no vazamento.....	37
Figura 16 – Fluxograma do processo no FP destacando o momento de coleta dos dados.....	37
Figura 17 – Amostra de aço após análise no espectrômetro .....	38
Figura 18 – Relação entre o uso da Sucata B e o S de Vazamento no FEA.....	40
Figura 19 – Relação entre o ppmO e o silício de vazamento .....	41
Figura 20 – Relação entre o ppmO e o manganês de vazamento .....	42
Figura 21 – Variação da temperatura de vazamento agrupado por carbureto adicionado .....	43
Figura 22 – Variação do carbono de vazamento agrupado por tipo de carbureto adicionado..	43
Figura 23 – Oxigênio médio dissolvido no FEA agrupado por tipo de carbureto adicionado .	44
Figura 24 – Reação do carbureto quando adicionado 20kg na granulometria 0-4 mm .....	45
Figura 25 – Rendimento médio do silício para as adições durante o vazamento. ....	48
Figura 26 - Rendimento médio do manganês para as adições durante o vazamento.....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elementos de ligas x Efeitos objetivados .....	26
Tabela 2 – Composição química de ferro-ligas utilizadas, fornecida pelos fabricantes. ....	27
Tabela 3 – Faixa de composição química do aço AISI 1029, % em massa .....	33
Tabela 4 – Classificação dos carburetos utilizados.....	35
Tabela 5 - Métodos avaliados durante os testes.....	35
Tabela 6 – Critérios utilizados para desconsideração de corridas na análise .....	38
Tabela 7 – Diferentes adições realizadas no vazamento e o número de corridas analisadas. ...	39
Tabela 8 – Relação média %Mn/%Si após o vazamento agrupado por tipo de carbureto.....	46
Tabela 9 – Redução do %S entre a amostra de aço FEA e CHFP .....	46
Tabela 10 – Participação das etapas do refino secundário na dessulfuração do aço. ....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FEA	Forno Elétrico a Arco
LD	<i>Linz e Donawitz</i>
PPC	Pátio de Preparação de Cestão
EBT	<i>Eccentric Bottom Tapping</i>
FP	Forno Panela
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
TSM	<i>Top Sensors Manufacture</i>
CHFP	Amostra de chegada de aço no Forno Panela

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
Fe	Elemento químico Ferro
O	Elemento químico Oxigênio
Mn	Elemento químico Manganês
Si	Elemento químico Silício
≅	Aproximadamente igual
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
P	Elemento químico Fósforo
S	Elemento químico Enxofre
Kg	Quilogramas
g/mol	Gramas por mol
mm	Milímetro
t	Toneladas

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>15</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1 A indústria siderúrgica</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2 Aciaria elétrica</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2.1 Pátio de Sucatas</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2.2 Forno Elétrico a Arco (FEA)</b> .....	<b>19</b>
3.2.2.1 Fusão da carga metálica .....	20
3.2.2.2 Refino oxidante.....	20
3.2.2.3 Vazamento .....	21
<b>3.2.3 Adições no refino secundário</b> .....	<b>21</b>
3.2.3.1 Agentes desoxidantes.....	22
3.2.3.1.1 Carbureto de Cálcio .....	23
3.2.3.2 Ferro-ligas .....	26
3.2.3.2.1 Rendimento de Ferro-ligas.....	27
<b>3.2.4 Forno Panela (FP)</b> .....	<b>28</b>
3.2.4.1 Escória.....	29
3.2.4.2 Desoxidação do aço e escória .....	29
3.2.4.3 Dessulfuração .....	30
3.2.4.4 Ajuste de composição química e temperatura .....	30
3.2.4.4.1 Espectroscopia de emissão óptica .....	31
<b>4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1 Balanço de massa do carbureto de cálcio</b> .....	<b>31</b>
<b>4.2 Aço objetivo de estudo</b> .....	<b>33</b>
<b>4.3 Coleta de dados FEA</b> .....	<b>33</b>
4.3.1 Medição do oxigênio dissolvido .....	34
4.3.2 Amostra composição química do aço.....	34
<b>4.4 Adição do carbureto de cálcio</b> .....	<b>34</b>
<b>4.5 Coleta de dados FP</b> .....	<b>37</b>
4.5.1 Amostra composição química do aço.....	37
<b>4.6 Tratamento de dados</b> .....	<b>38</b>
4.6.1 Imputação de dados.....	39
4.6.1.1 Enxofre no vazamento.....	39
4.6.1.2 Silício no vazamento.....	40

4.6.1.3 Manganês no vazamento.....	41
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>42</b>
<b>5.1 Variáveis de processo.....</b>	<b>42</b>
<b>5.2 Reatividade da reação .....</b>	<b>44</b>
<b>5.3 Relação %Mn/%Si.....</b>	<b>45</b>
<b>5.4 Dessulfuração do aço.....</b>	<b>46</b>
<b>5.5 Rendimento de ferro-ligas.....</b>	<b>47</b>
<b>5.5.1 Rendimento de Silício.....</b>	<b>48</b>
<b>5.5.2 Rendimento de Manganês .....</b>	<b>48</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Tendo pouco mais de 100 anos de existência, os fornos elétricos a arco ocupam atualmente uma promissora rota produtiva dos mais diversos aços. Dentro das chamadas aciarias elétricas, a busca por aumento de eficiência, redução de custos e segurança no processo são vertentes desenvolvidas dia após dia, sendo essenciais para a longevidade e competitividade das empresas no ramo siderúrgico.

A crescente demanda por otimização do processo produtivo em uma siderúrgica, passa, de forma expressiva, pela descoberta e desenvolvimento de novos materiais que possam ser incluídos na rotina operacional. Além de trazerem um ganho significativo para o processo, esses materiais devem atender a especificações ambientais, de custos e operacionais durante sua inserção na cadeia produtiva. Um material bastante promissor, que atende a essas diversas especificações, é o carbureto de cálcio.

Diversos estudos publicados destacam a eficiência do uso do carbureto de cálcio na fase de refino secundários dos aços. Entre os benefícios mais comuns, comprovados por meio de estudos, destacam-se sua eficácia na redução do número de inclusões não metálicas, a redução do número de obstruções de válvulas e a melhoria no processo de desoxidação e dessulfuração, que impactam diretamente no rendimento das ferro-ligas adicionadas e no custo final do aço produzido.

A melhor metodologia para utilização do carbureto durante o refino secundário dos aços, vem sendo estudada buscando aprimorar o uso do material. Estudos precedentes indicam as melhores práticas a serem utilizadas na indústria, considerando variáveis como: o tempo entre a adição do material e o vazamento do aço na panela, o local de adição e a quantidade adicionada. A distribuição granulométrica do carbureto, e como esta interfere na eficiência do material durante a sua utilização, é assunto ainda não abordado pelos estudos.

Podendo ser utilizado para diversas aplicações, o fabricante do carbureto de cálcio comercializa diversas faixas granulométricas e recomenda o uso de algumas delas para determinados setores. A busca pela granulometria que mais potencializa os resultados do uso desse insumo na metalurgia secundária é o que motiva a realização desse trabalho. Objetiva-se realizar um estudo preliminar que oriente a escolha da granulometria do carbureto para a utilização na rotina operacional. Espera-se, com a identificação da granulometria mais promissora, permitir o avanço na regularidade do uso do material durante a operação de vazamento na usina em que o teste foi realizado, proporcionando assim, um aço com melhores condições para o processamento na etapa seguinte de refino.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar efeitos da adição de diferentes granulometrias do carbureto de cálcio durante o vazamento de aço em um Forno Elétrico a Arco (FEA).

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Desenvolver metodologia para teste do carbureto de cálcio em uma usina semi-integrada, considerando trabalhos anteriores e particularidades do processo;
- Apresentar observações e dados do processo durante a adição de diferentes granulometrias de carbureto de cálcio;
- Constatar efeitos do uso do carbureto de cálcio relatado em trabalhos anteriores;
- Definir a granulometria de carbureto de cálcio mais promissora a ser utilizada no vazamento do FEA na usina em questão.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

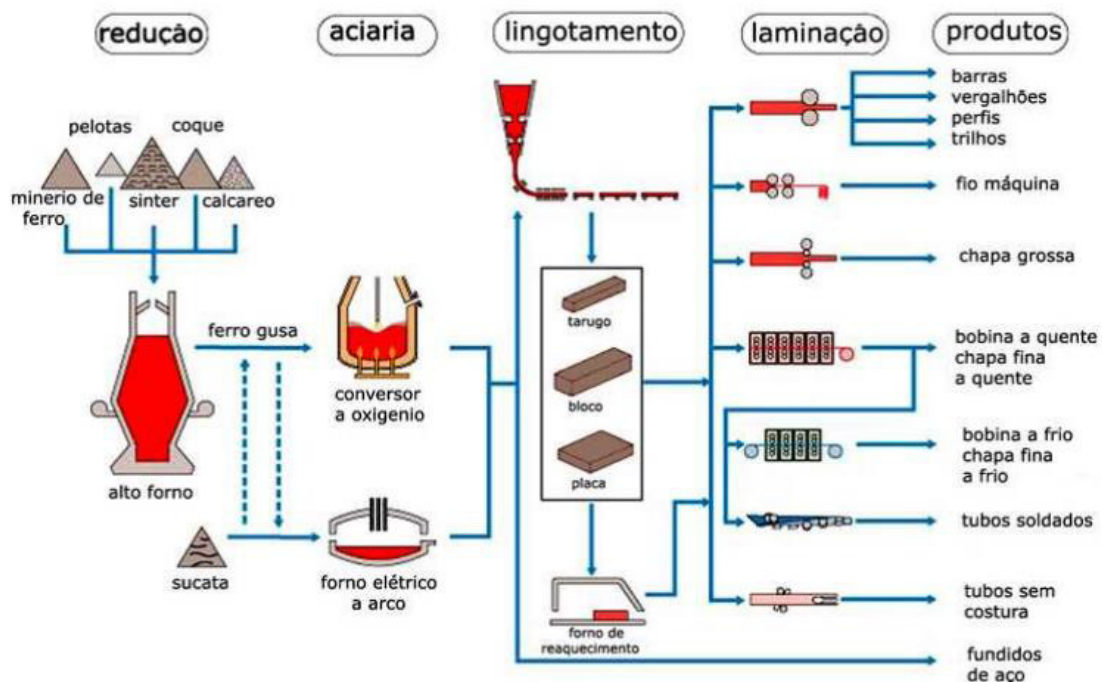
#### 3.1 A indústria siderúrgica

A produção de aço, embora marcada por um grande aumento a partir do fim do século XIX com o surgimento de processo revolucionários de conversão de gusa, tem sua evolução de forma contínua durante todo o desenvolvimento da civilização. A modernização das siderúrgicas permitiu que o aço se tornasse o material mais utilizado na indústria, não havendo restrição para sua utilização e podendo ser encontrado em todos os tipos de projetos. A variabilidade no uso, no consumo de matérias-primas e outros fatores, sugeriram a divisão das usinas siderúrgicas em dois grandes grupos: usinas integradas e semi-integradas.

Usinas integradas são aquelas onde o aço é obtido através do ferro primário, o chamado ferro-gusa, que é produzido nos altos-fornos e utiliza como matéria-prima o minério de ferro. O ferro-gusa será transformado em aço após o processo de conversão. Nas usinas semi-integradas, o aço é obtido a partir do ferro-secundário, sendo usado como matéria prima a sucata metálica, que é transformada em produto semiacabado por meio dos fornos elétricos de fusão (MOURÃO *et al.*, 2007).

A Figura 1 apresenta de forma simplificada o processo siderúrgico nas duas rotas citadas.

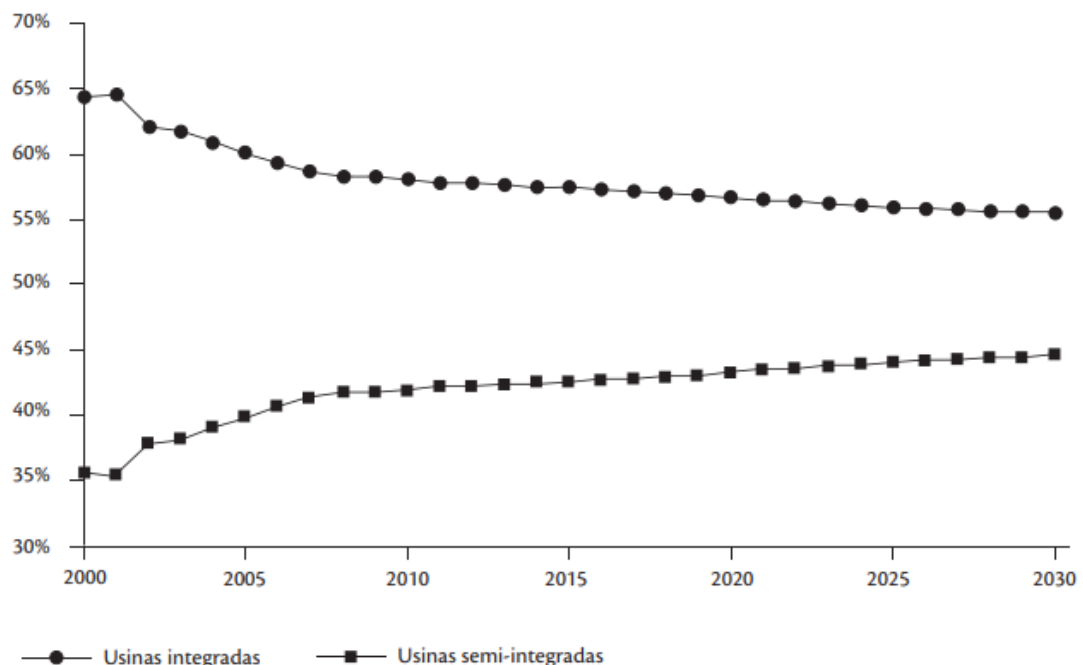
Figura 1 – Fluxograma simplificado do processo siderúrgico.



Fonte: Adaptado de MOURÃO *et al.*, 2007.

A rota utilizada nas usinas integradas, baseadas em aciarias equipadas com conversores *Linz e Donawitz* (LD), representa atualmente cerca de 2/3 da produção mundial de aço (CGEE, 2010). Para transformação do minério de ferro em aço nessa rota, durante as etapas de coqueificação, sinterização, redução e refino, são produzidos grandes volumes de emissões gasosas, efluentes líquidos e resíduos sólidos. A partir de 1980, por pressão da sociedade e da legislação pertinente, a indústria tem se tornado mais eficiente e sustentável. Nesse aspecto, há uma tendência mundial no sentido de compactar plantas siderúrgicas, flexibilizando processos e usando mais sucata reciclável (CARVALHO et al., 2015).

Conforme verifica-se na Figura 2, prevê-se que a participação das usinas integradas na produção mundial venha diminuir ao longo do tempo, mas não a ponto de ser suplantada pelas usinas semi-integradas. A produção em larga escala e a atual disponibilidade de minério de ferro, tornam as usinas integradas ainda competitivas, entretanto, o esgotamento de melhorias significativas no conversor LD e as questões ambientais cada vez mais presentes, dão espaço a significativos incrementos de produtividade na rota via aciaria elétrica (CGEE, 2010).  
 Figura 2 – Participação das usinas siderúrgicas integradas e semi-integradas na produção siderúrgica mundial, 2000-2030 (percentual).

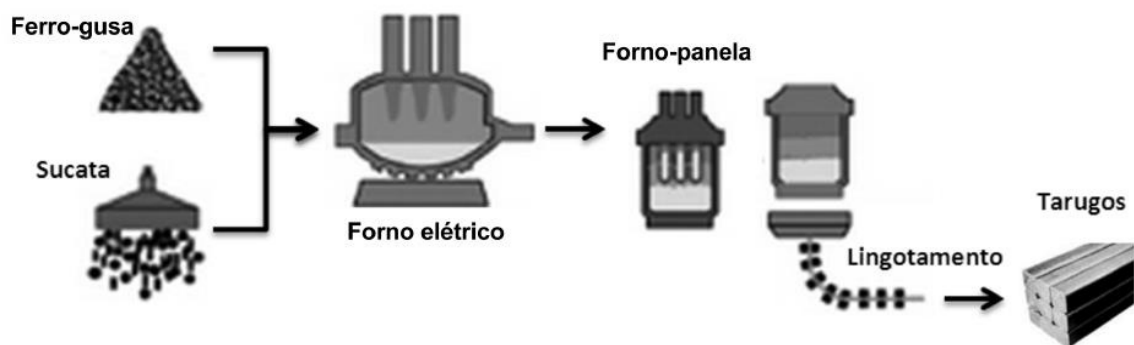


Fonte: Adaptado de CGEE, 2010.

### 3.2 Aciaria elétrica

Dentro das usinas semi-integradas tem-se um fluxo mais reduzido de produção, se comparado às usinas integradas. Nestas usinas, a produção de aço é feita na aciaria elétrica utilizando normalmente sucata metálica, ferro-gusa sólido e ferro esponja. O processo é geralmente composto por um pátio de sucatas, forno elétrico à arco, forno panela e lingotamento contínuo (ROSSI, 2014). A Figura 3 ilustra de forma resumida o fluxograma do processo de uma aciaria elétrica.

Figura 3 – Fluxograma de processo de uma aciaria elétrica.



Fonte: Adaptado de CARVALHO *et al.*, 2015

#### 3.2.1 Pátio de Sucatas

Na aciaria elétrica o processo de fabricação do aço começa no pátio de sucatas. Este local é responsável pelo recebimento, classificação e processamento das sucatas ferrosas, de forma a adequar tamanho e limpeza do material recebido às necessidades do Forno Elétrico à Arco (FEA). O tipo, tamanho e a quantidade de contaminantes da sucata que chega aos fornos elétricos, são fatores cruciais para o rendimento metálico e conseqüentemente para a produtividade dos fornos (BIELEFELDT, 2005).

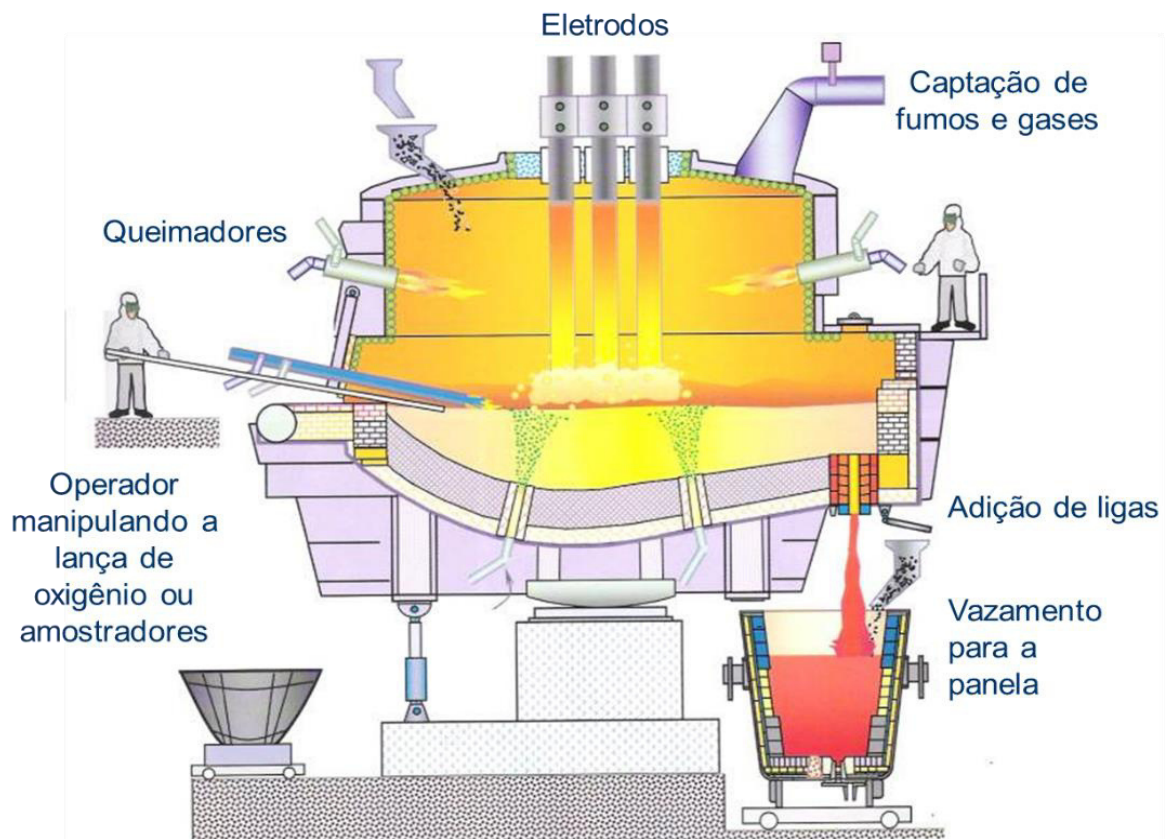
Para que a sucata ferrosa atenda as especificações exigidas para consumo no FEA é necessário a utilização de diversos métodos de processamento. Os métodos são desenvolvidos considerando a qualidade da sucata recebida, o cenário de disponibilidade de sucata no mercado e os custos envolvidos no processamento. O fim do processo no pátio de sucatas se dá pela entrega da carga metálica dentro do Pátio de Preparação de Cestão (PPC) onde deverá ser feita a confecção do cestão conforme *mix* estabelecido, sendo posteriormente carregado no FEA.

### 3.2.2 Forno Elétrico a Arco (FEA)

Entre os diversos tipos de fornos elétricos a arco, destaca-se o forno a arco direto. Nesse forno, a transmissão de calor é feita diretamente para a carga condutora de eletricidade por meio de um arco entre a carga metálica e um dos eletrodos de grafite (SILVA, 2011). O aquecimento também ocorre pela inerente resistência a passagem de corrente pelo material. Estima-se que a temperatura no centro do arco está na faixa de 10.000 a 18.000°C (RIZZO, 2006).

Estes equipamentos apresentam em sua estrutura uma carcaça metálica, sendo revestida por material refratário e painéis também refrigerados (ROSSI, 2014). Além da variação quanto ao tipo de forno, existe a distinção quanto a corrente utilizada e o tipo de vazamento. A Figura 4 apresenta de forma simplificada as características do FEA utilizado no estudo, sendo este, um forno a arco direto, que utiliza corrente alternada e com um canal de vazamento do tipo *Eccentric Bottom Tapping* (EBT).

Figura 4 – Forno elétrico a arco de corrente alternada EBT.



Fonte: Adaptado de RIZZO, 2006.

Podemos, de forma resumida, descrever as etapas de operação do forno em: fusão da carga metálica, refino e vazamento.

### 3.2.2.1 Fusão da carga metálica

Após o carregamento do cestão, que deve ter sido confeccionado de forma criteriosa pelo PPC, é feito o fechamento do forno e são baixados os eletrodos para início da fusão da carga metálica. A primeira etapa da fusão, denominada perfuração, se caracteriza por um forte ruído e uma alta instabilidade do arco, normalmente não durando mais do que 2 minutos. Após essa etapa inicial, temos a fusão de fato ocorrendo na carga, nesse momento a potência máxima é utilizada até que toda, ou praticamente toda, sucata metálica carregada esteja fundida. (JOHN, 2009).

Sendo bastante influenciada pela qualidade da carga metálica utilizada, o processo anterior pode se repetir por até 4 vezes. Devido a grande diferença de volume entre o aço líquido e a sucata carregada, o nível de preenchimento do forno é drasticamente reduzido quando a carga metálica é totalmente fundida. Além da fusão por meio da energia elétrica, utiliza-se da energia química proveniente da injeção de gases no forno. A energia química tem papel fundamental na eficiência da etapa de fusão e na redução de custos com energia elétrica.

Considera-se concluído o processo de fusão quando o último cestão é fundido e tem-se o chamado banho plano. Nesse momento, nota-se uma maior estabilidade do arco e uma menor emissão de ruídos.

### 3.2.2.2 Refino oxidante

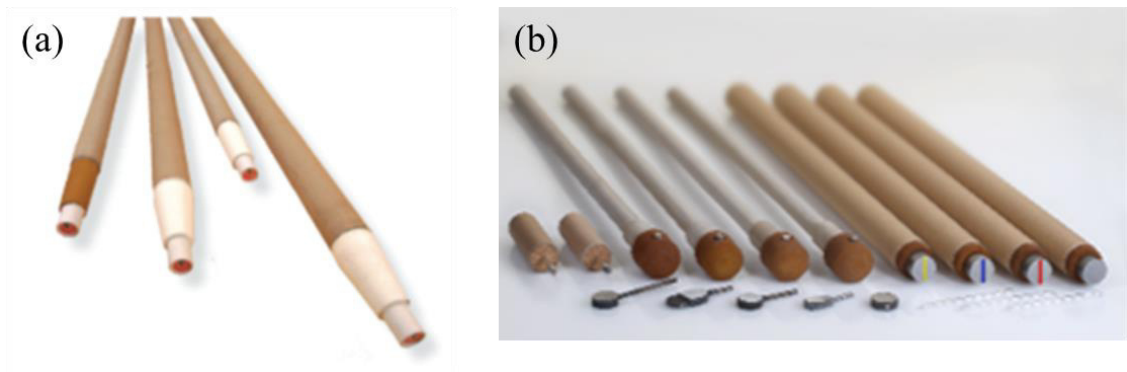
Com o banho totalmente líquido inicia-se a fase de refino oxidante dentro do FEA. Devido a injeção de oxigênio no forno, ocorre uma formação acentuada de óxidos que migram do banho metálico para a escória. Nessa etapa, ocorrerá a desfosforação e descarburização do aço pelo ambiente oxidante formado e pelo óxido de cálcio dissolvido na escória. Além disso, a simultânea injeção de carbono permite a formação da escória espumante que se mostrou uma significativa forma de aumento da eficiência do processo produtivo via FEA. (BRUCH, 2006).

Para evitar que ocorra a refosforação do aço é realizado a retirada parcial da escória, que além de melhorar rendimento dos elementos de liga, reduz as chances de passagem de escória para a panela no momento do vazamento. Durante o refino oxidante, é essencial também o controle da injeção de oxigênio no banho para que não haja significativas perdas de ferro, na forma de óxido, para a escória e nem o aumento em demasia da temperatura. (RIZZO, 2006).

Para conhecer com precisão os valores de oxigênio dissolvidos no banho, utiliza-se instrumentos de medição como sensores de controle de oxigênio ativo (Figura 5a), que de forma

quase instantânea fornecem dados como temperatura, oxigênio dissolvido (expresso em partes por milhão - ppmO) e teor de carbono estimado no aço. Para se obter uma informação mais precisa sobre a composição de carbono e outros elementos químicos antes de realizar o vazamento, é retirado também uma amostra de aço utilizando amostradores de imersão (Figura 5b) e realizando a posterior análise por espectrometria ou combustão.

Figura 5 – Sensores utilizados no FEA: (a) Medidores de oxigênio dissolvido, (b) amostradores de aço líquido.



Fonte: Adaptado de METALLURGICAL SENSORS - VESUVIUS, 2022.

### 3.2.2.3 Vazamento

Com o resultado das amostras indicando a composição química e a temperatura almejada, é realizado o vazamento do aço na panela. Atualmente, mais de 70% dos FEAs do mundo utilizando o furo de corrida do tipo EBT. Nesse tipo de método destaca-se vantagens como o jato mais compacto, menos tempo de vazamento e um vazamento livre de escória (CHEVRAND, 2007).

A cada corrida vazada, permanece de forma remanescente uma quantidade de aço líquido e de escória, cuja passagem para a panela se torna indesejada pelos benefícios de se manter o fundo úmido no forno, dos quais podemos destacar a proteção da região da soleira do forno no momento do carregamento e o aumento da taxa de fusão dos materiais (ROSSI, 2014). Além disso, a redução da passagem de escória também permite uma menor quantidade de adições na panela para garantir, por exemplo, uma dessulfuração eficiente (RIZZO, 2006).

### 3.2.3 Adições no refino secundário

Durante o vazamento da corrida, são iniciadas as operações de metalurgia da panela. Nesse momento, são feitas adições de desoxidantes e ferro-ligas. Os desoxidantes devem formar

uma nova escória, com alto poder de desoxidação, e as ferro-ligas, além de alterarem a composição química do aço, também promoverão a redução do oxigênio dissolvido.

O momento da adição de ferro ligas e desoxidantes é bastante importante no processo de desoxidação do aço. Se for realizado antes do vazamento pode ocorrer a adesão do material ao fundo da panela e não fundir, podendo gerar algum cascão e não ser dissolvido no banho. Se adicionado somente no final da corrida, o material poderá permanecer na escória, dificultando a homogeneização do aço (RIZZO, 2006).

Para uma melhor otimização da desoxidação, é aproveitada a agitação do vazamento da corrida, aliado a injeção de gases inertes, para obtenção de um maior rendimento das adições realizadas. Essa prática promove também um aço para processamento no Forno Panela (FP) mais homogêneo e com oxigênio e enxofre reduzidos em relação a amostra retirada no FEA.

### 3.2.3.1 Agentes desoxidantes

A desoxidação do aço e escória pode ser realizada utilizando diversos desoxidantes, cuja ordem é praticada de forma diferente entre usinas. Para que o material adicionado seja um bom desoxidante do banho metálico, este deve: diminuir o teor de oxigênio dissolvido no aço; reduzir óxido de ferro (FeO) e óxido de manganês (MnO) na escória; tornar o ambiente da panela redutor para favorecer a dessulfuração; além de garantir o rendimento das ferro-ligas adicionadas (GOULART, 2015).

Existem 3 principais elementos utilizados como desoxidantes dos aços, são estes: o manganês, na forma de ferro-liga de alto ou baixo carbono; o silício na forma de ferro-liga ou na forma combinada de ferro-silício-manganês (FeSiMn) e o alumínio na forma de metal de alta pureza (TURKDOGAN, 1996).

Além dos citados anteriormente, o carbureto de cálcio vem nos últimos anos com um aumento de cerca de 30% em sua utilização na etapa de refino secundário das usinas brasileiras. O aumento se justifica pela constante publicação de trabalhos que atestam sobre a eficácia técnica, financeira e energética durante a utilização do produto na produção de aço (SILVA MOTTA *et al.*, 2014).



### 3.2.3.1.1 Carbureto de Cálcio

Segundo SILVA MOTTA *et al.* (2014), nota-se que anualmente diversos trabalhos têm sido publicados constatando a eficiência do carbureto de cálcio em processos de refino secundário. Em seu trabalho, é destacado o aumento significativo do número de empresas siderúrgicas que estão utilizando a tecnologia do carbureto, além do crescimento do número de aços produzidos utilizando o material. Conforme destaca o autor, o carbureto vem sendo utilizado como aliado na recuperação da competitividade e aumento da eficiência dos processos de desoxidação e dessulfuração.

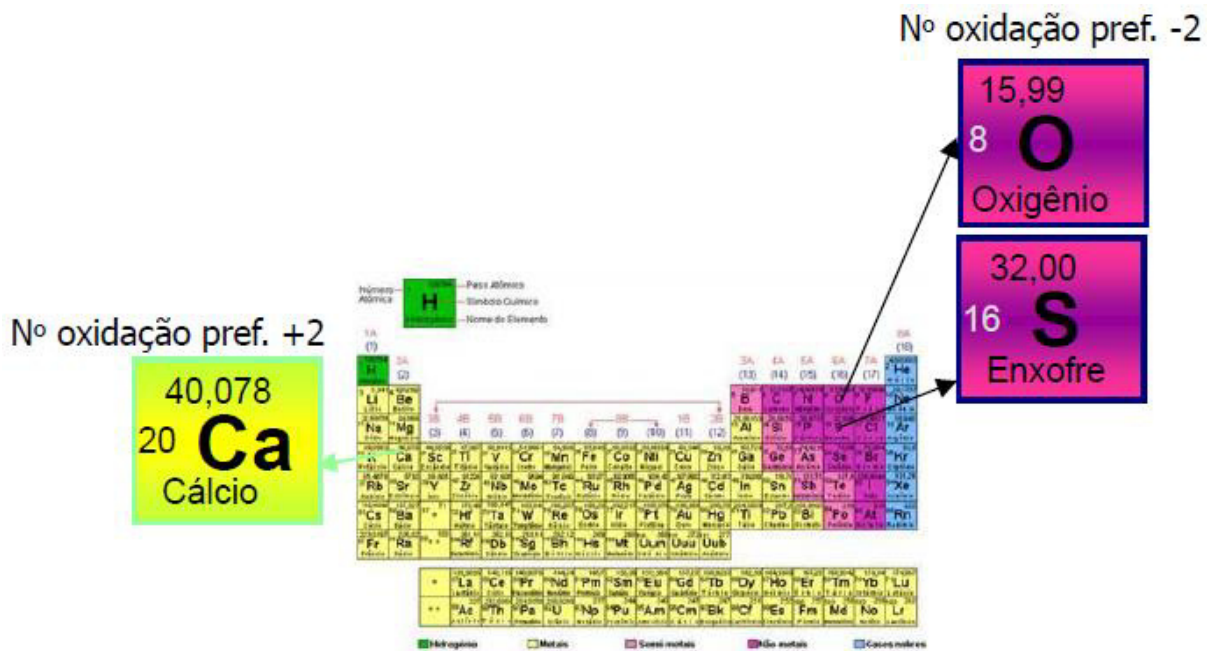
De acordo com CARDOSO FILHO *et al.* (2013), em seu trabalho foi possível verificar a redução da ordem de 40% na quantidade de inclusões formadas e uma significativa redução na obstrução de válvulas, se tornando um exemplo dos ganhos reais do uso do carbureto de cálcio no tratamento dos aços. Sendo bastante comum trabalhos avaliando a eficiência do uso do carbureto na limpeza do aço e remoção do número de inclusões, é constantemente verificado o potencial de uso do carbureto de cálcio como substituto parcial ao uso do alumínio na desoxidação.

Carbureto de Cálcio é um termo comercial atribuído a um material que contém altos teores o carbeto de cálcio ( $\text{CaC}_2$ ) e óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) (SILVA MOTTA *et al.*, 2014). O teor de  $\text{CaC}_2$  varia de acordo com a granulometria, apresentando, em média,  $\cong 80\%$ . Contendo este material diversas aplicações dentro e fora das indústrias, nesse trabalho abordaremos somente o uso do carbureto como agente desoxidante do aço e escória.

Entre as principais características do carbureto de cálcio destaca-se a baixa densidade, por volta de  $2,3 \text{ g/cm}^3$ , se comparado a do aço líquido  $\cong 7,0 \text{ g/cm}^3$ . A diferença de densidade faz com que qualquer quantidade adicionada durante o vazamento, flote rapidamente do interior do aço líquido para a escória. Outra característica de destaque é a espontaneidade de formação do gás inflamável acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) quando em contato com água, tornando a utilização do carbureto como atividade crítica de segurança (BRUCH, 2006).

Considerando aspectos químicos, obtemos justificativas técnicas para o uso de fontes de cálcio com agentes desoxidantes e dessulfurantes em aços. O cálcio, pertencente à coluna 2A da tabela periódica (metais alcalino terrosos) que têm afinidade com os elementos da coluna 6A (não metais como oxigênio e enxofre). Dessa forma, existe a forte tendência de formação de compostos do tipo óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e sulfeto de cálcio ( $\text{CaS}$ ) por meio de ligações iônicas, extraíndo oxigênio e enxofre dissolvidos no aço (SILVA MOTTA *et al.*, 2014). A Figura 6 destaca os elementos citados com seus respectivos números de oxidação preferencial.

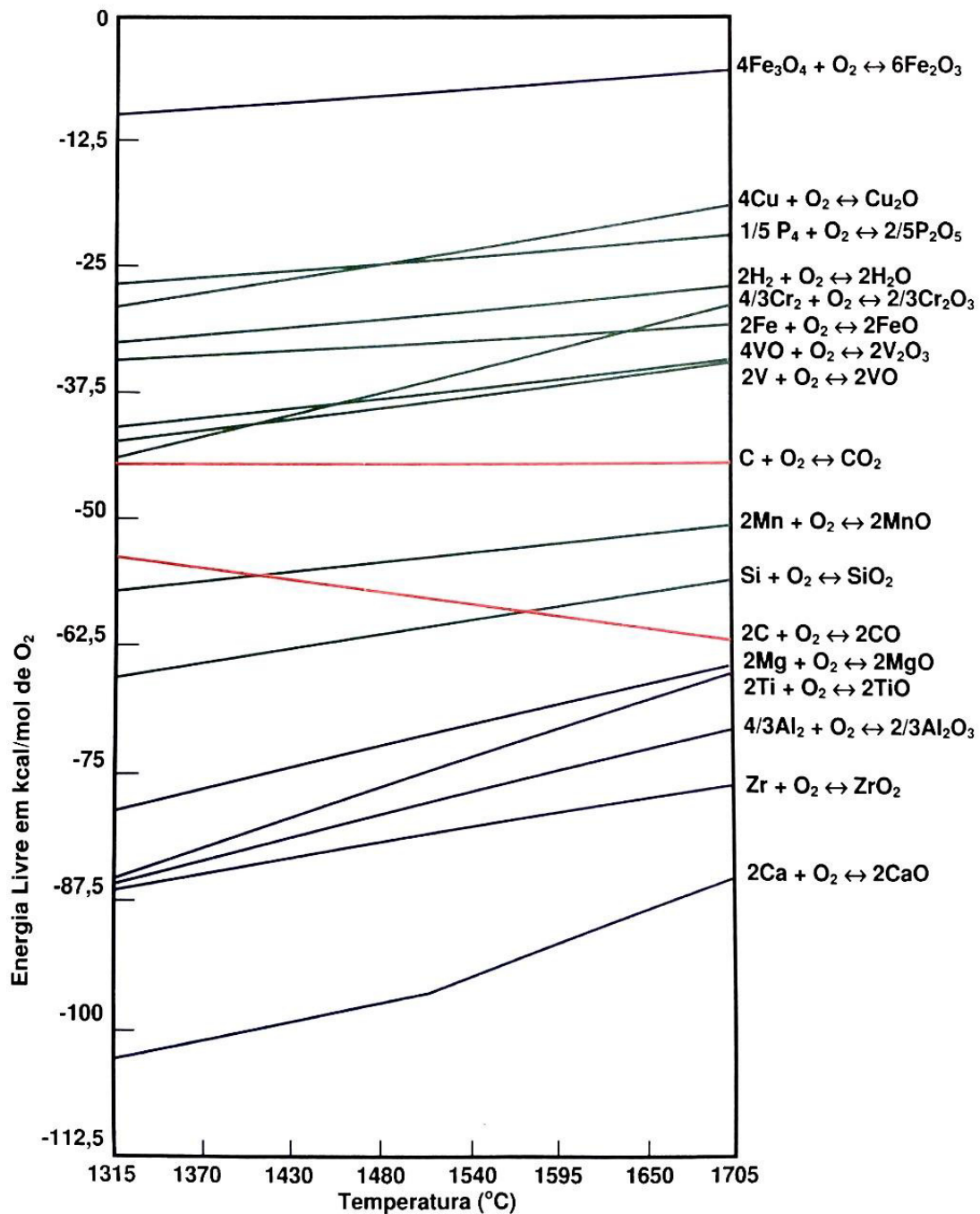
Figura 6 – Destaque do cálcio, oxigênio e enxofre na tabela periódica.



Fonte: Adaptado de SILVA MOTTA *et al.*, 2014

Do ponto de vista termodinâmico, o cálcio é um dos metais com maior potencial de desoxidação nas condições de refino secundário conhecidos. Conforme apresentado no Diagrama de Ellingham (Figura 7), o cálcio apresenta menor energia livre para as temperaturas de interesse para o refino de aço, indicando que entre as várias reações possíveis, esta ocorrerá de forma preferencial (RIZZO, 2006). As equações que representam as reações entre o carvão de cálcio ( $\text{CaC}_2$ ) e oxigênio serão abordados posteriormente neste trabalho.

Figura 7 – Diagrama de Ellingham com dados aproximados de energia livre para alguns óxidos em função de temperaturas de interesse para o refino de aços.



Fonte: Adaptado de RIZZO, 2006.

Considerando aspectos cinéticos, nota-se que o carbono presente no carbetto de cálcio é um agente desoxidante bastante eficiente, visto que, os produtos formados nas reações com oxigênio provocam uma agitação natural em todo o sistema, favorecendo a cinética da desoxidação (SILVA MOTTA *et al.*, 2014).

Para otimização do processo de desoxidação de aços utilizando o carbureto de cálcio, é comum sua adição no momento do vazamento de aço do FEA para a panela. Essa

prática favorece o processo à medida que toda a cinética do vazamento é aproveitada para reação do carboxido de cálcio. Nesse aspecto, a escolha da granulometria do carbureto de cálcio se torna essencial para eficiência da reação. Considera-se que uma maior granulometria, diminui a superfície de contato, reduzindo a frequência de colisões efetivas por unidade de tempo, tornando as reações mais lentas (LISBOA, 2016).

### 3.2.3.2 Ferro-ligas

Pode-se definir ferro-ligas como ligas de ferro que contêm um alto teor de um ou mais elementos químicos que se deseja incorporar no aço. A presença dos elementos no aço se torna essencial devido ao seu efeito no produto final, sendo alguns deles também essenciais no processo de produção. A Tabela 1 apresenta alguns dos principais elementos adicionados na forma de ferro-ligas na produção de aços carbono, relacionando ao efeito objetivado no produto e/ou no processo.

Tabela 1 – Elementos de ligas x Efeitos objetivados

Elemento	Efeito objetivado	
	No processo	No produto
<b>Silício</b>	Desoxidante, redutor	Dureza, resistência mecânica, resistência a corrosão, perdas elétricas.
<b>Manganês</b>	Desoxidante, dessulfurante	Dureza, resistência mecânica, resistência a corrosão, resistência ao desgaste.
<b>Cromo</b>	-	Dureza, resistência mecânica, resistência a corrosão, resistência ao desgaste, resistência a altas temperaturas.
<b>Níquel</b>	-	Resistência a corrosão, permeabilidade magnética.
<b>Vanádio</b>	-	Resistência a altas temperaturas, dureza, resistência ao impacto, resistência a fadiga.

Fonte: Adaptado de NOBRE, 2022.

Os elementos são adicionados na forma de ferro-ligas devido uma série de fatores técnicos, operacionais, econômicos e ambientais que podem tornar a adição dos elementos na forma pura extremamente inviável. Dentre estes fatores, podemos destacar as propriedades físicas dos elementos, que são minimizadas durante a produção da ferro-liga, e a existência de ferro na estrutura mineralógica de grande parte dos minerais, cuja remoção acarreta em um processo complexo e oneroso.

Em decorrência do alto impacto no custo final do aço, as ferro-ligas são sempre alvo de estudos objetivando seu aumento de eficiência. Considera-se uma maior eficiência para ferro-ligas quanto maior for a incorporação do elemento adicionado ao banho de aço líquido. A forma de cálculo de eficiência de ferro-ligas será apresentada no tópico a seguir.

### 3.2.3.2.1 Rendimento de Ferro-ligas

Ao ser adicionado no aço um elemento presente na ferro-liga, este pode incorporar ao aço ou se tornar um óxido. Para se obter um alto rendimento da liga é necessário que o elemento adicionado não se torne majoritariamente um óxido, isso ocorre quando o banho metálico já se encontra desoxidado o suficiente para a liga não conseguir rebaixar o teor do oxigênio residual. O rendimento da ferro-liga será 100% quando todo o elemento adicionado na forma de ferro-liga for incorporado ao banho metálico (RUPPES, 2014).

De forma simplificada, o rendimento de liga pode ser expresso pela seguinte equação [1]:

$$\text{Rendimento da liga (\%)} = \frac{\text{Elemento no aço}}{\text{Elemento adicionado}} \quad [1]$$

Para que seja possível a análise de rendimento de acordo com equação [1], é necessário a adaptação da fórmula considerando as adições realizadas em quilogramas (Kg) e o percentual do elemento de interesse na ferro-liga utilizada. Na Tabela 2 apresenta-se o teor dos elementos em cada uma das ferro-ligas utilizadas nesse trabalho.

Tabela 2 – Composição química de ferro-ligas utilizadas, fornecida pelos fabricantes.

Ferro-liga	Composição Química				
	Si	Mn	C	P	S
<b>FeSi 75%</b>	72 - 79%	-	0,30% máx.	0,05% máx.	0,01% máx.
<b>FeSiMn</b>	12 - 16%	65% min.	2,50% máx.	0,25% máx.	0,03% máx.

Fonte: próprio autor.

Conhecido o teor dos elementos para as ferro-ligas utilizadas e em posse dos dados das amostras de composições químicas retiradas, o cálculo do rendimento da liga pode ser expresso pela equação [2], adaptado de SOARES (2010):

$$R (\%) = \frac{(\text{Comp. Final} [\%] - \text{Comp. Inicial} [\%]) * \text{Peso da corrida} [t] * 1000}{\text{Qtde. de liga adicionada} [kg] * \text{Teor do elemento na liga} [\%]} \quad [2]$$

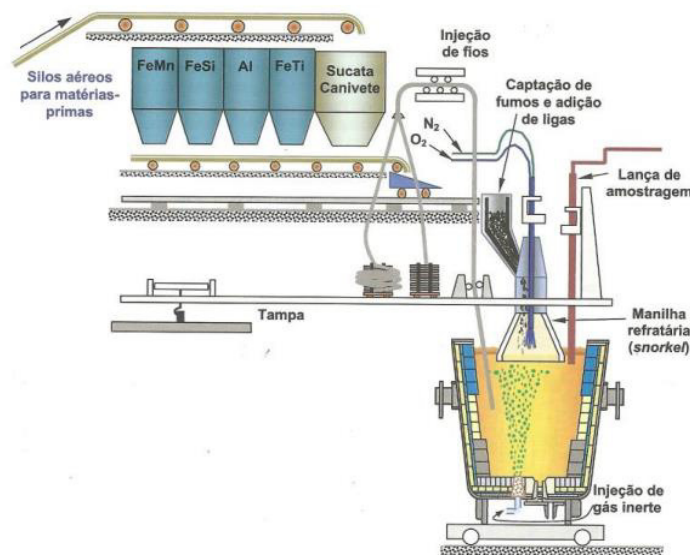
Os valores de “*Comp. Final*” e “*Comp. Inicial*” utilizados na equação [2], se referem a composição química do aço resultado de uma amostra em diferentes momentos de uma dada corrida. Por exemplo, composição do aço retirada no momento de chegada ao FP e composição retirada antes do vazamento de aço no FEA.

### 3.2.4 Forno Panela (FP)

Motivado pela dificuldade de retirar certas impurezas no processamento no FEA, grande parte das usinas siderúrgicas utilizam do processamento no Forno Panela (FP), que recebe esse nome devido seu tratamento ocorrer na própria panela onde o aço é vazado. Os principais objetivos do FP é a desoxidação, a dessulfuração, além do ajuste de composição química, temperatura e alteração da morfologia das inclusões (HUPPES, 2014).

No momento de chegada da panela na estação de trabalho do FP, é feita a amostragem de composição química e temperatura para indicar quais ajustes devem ser realizados no aço e escória para que seja possível atingir os objetivos dessa etapa. A Figura 8 apresenta a estação de trabalho do FP incluindo silos de ligas e outros sistemas que fazem parte da estação.

Figura 8 – Estação de refino do Forno Panela



Fonte: Adaptado de RIZZO, 2006

A eficiência do tratamento no Forno Panela está diretamente associada a uma série de parâmetros como qualidade da escória formada e eficiência da desoxidação durante o vazamento. O resultado obtido para cada tratamento realizado está associado a uma série de fatores que podemos denominar como variáveis de processo.

Pode-se descrever as variáveis de processo como parâmetros de difícil controle que acabam tendo interferência na eficiência de cada etapa realizada. Como exemplo para essas variáveis são: o estado da panela utilizada, a experiência do operador e a condição de rinsagem. Além desses parâmetros, outros são controlados por meio de faixas limites, podendo variar dentro de um intervalo, são exemplos desses parâmetros a temperatura de vazamento e o oxigênio dissolvido no aço.

### 3.2.4.1 Escória

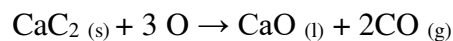
A escória é uma fase normalmente líquida, composta por óxidos que sobrenada o aço devido à diferença de densidade. Durante o processo de fusão, uma primeira escória é formada com o objetivo de proteger o aço líquido e permitir a desfosforação (MOURÃO,2007). Conforme destacado no tópico sobre o FEA, esta deverá ser removida, sendo essencial o controle da passagem dessa escória para a panela durante o vazamento.

Com o aço vazado na panela, inicia-se novamente a oxidação do ferro, e de outros elementos, pelo contato com o oxigênio do ar. Pela necessidade de controle da oxidação e pela importância da promoção de um ambiente desoxidante e dessulfurante, é gerada uma nova escória pela adição de CaO e óxido de magnésio (MgO) na panela. A viscosidade e basicidade da escória são parâmetros essenciais para a eficiência do processo de refino secundário e devem ser corrigidas sempre que necessário por meio de adições no FP.

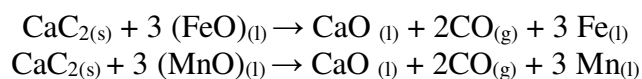
### 3.2.4.2 Desoxidação do aço e escória

Durante o tratamento do aço no refino secundário, o controle da oxidação torna-se essencial para produção de um aço que atenda as especificações em relação a composição química e limpidez. A oxidação excessiva do aço reduz o rendimento das ligas adicionadas, além de favorecer a formação de inclusões não metálicas, produto das reações que objetivam a remoção desse oxigênio dissolvido (GOULART, 2015).

Utilizando o carbureto na desoxidação, este promove a redução do teor de oxigênio no banho metálico através da desoxidação sólida e gasosa. O produto gasoso ocorre com a desoxidação através do carbono, dando origem ao gás monóxido de carbono (CO). Conforme CARDOSO FILHO *et al.* (2013), a desoxidação do aço com carbureto de cálcio se destaca porque o produto de sua reação não prejudica a limpidez do aço, como podemos observar na reação abaixo:

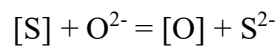


Além da desoxidação do aço, o carbureto de cálcio promove uma diminuição nos níveis de oxidação da escória e um aumento no teor de elementos como ferro e manganês no aço. Esses elementos são reduzidos da forma de óxido na escória e passam a incorporar o banho metálico. As reações indicadas são apresentadas abaixo:



### 3.2.4.3 Dessulfuração

O enxofre (S) é elemento residual indesejado devido a formação de sulfetos que podem causar falha a quente do material. A dessulfuração pode ser resumida como a passagem do elemento enxofre do banho metálico para a escória. Para que ocorra a dessulfuração, a condição mínima é um ambiente com o menor teor de oxigênio possível dissolvido no aço, conforme pode ser visto na reação abaixo (GOULART, 2015):



A principal limitação para a dessulfuração no FP é a alta atividade de oxigênio no aço, dificultando a dessulfuração a uma concentração de enxofre abaixo de 0,005% em peso, sem tratamento a vácuo ou adição de alumínio (SCHRAMA, 2021). Para manter baixa a atividade do oxigênio no aço é essencial a desoxidação da escória comumente avaliada pelos teores dos óxidos FeO e MnO presentes.

Para a dessulfuração, o carbureto de cálcio é uma opção eficaz, pois além de sua ação na diminuição do potencial de oxigênio, o produto óxido (CaO), pode dessulfurar (FRUEHAN E FOUNDATION, 1998). Desse modo, a utilização do carbureto contribui tanto para a melhoria da capacidade de sulfeto, definida como o potencial da escória na remoção de enxofre, quanto para a razão de distribuição de enxofre, que expressa a relação do teor do elemento entre a escória e o aço líquido.

### 3.2.4.4 Ajuste de composição química e temperatura

Durante o processamento do aço na estação do FP, o objetivo a ser concluído é a liberação da panela para realização do lingotamento do aço atendendo aos parâmetros de composição química e temperatura. Para que isso ocorra é necessário a manutenção da temperatura por meio da energia elétrica e correção da composição química de forma manual com a adição de ferro-ligas.

Avaliando a necessidade de melhoria na escória ou o aumento de teor de determinado elemento químico, o operador do forno adiciona diversos materiais, de forma manual, diretamente na panela. A quantidade de adições realizadas está diretamente associada ao tempo de processamento do aço no forno panela, visto que a cada adição realizada, faz-se necessário a espera pela homogeneização e incorporação do insumo no banho ou escória, para posteriormente ser realizada uma nova amostragem de aço.



#### 3.2.4.4.1 Espectroscopia de emissão óptica

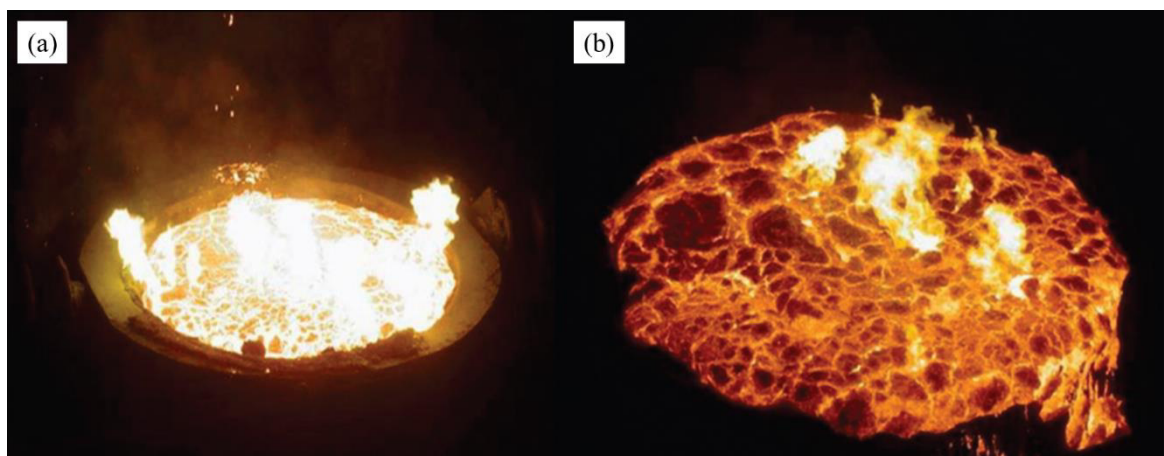
Para conhecimento da composição química do aço, é comum a utilização da técnica de espectrometria de emissão óptica. A técnica consiste na aplicação de uma carga elétrica em um eletrodo em direção uma amostra de metal, dentro de uma câmara a vácuo. Com a carga elétrica, os átomos são vaporizados e chegam ao estado de alta energia, chamado plasma. A emissão de energia com espectro de cores extremamente particular das moléculas, átomos e partículas, possibilitam descrever a composição exata da amostra analisada (ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA - AÇOS ROMAN, 2022).

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 Balanço de massa do carbureto de cálcio

A desoxidação utilizando o carbureto de cálcio, conforme apresentado anteriormente, é caracterizada pela formação do gás CO, que tende a promover uma espumação da escória. Devido ao carbureto ser significativamente exotérmico, é necessário a utilização de um balanço de massa, considerando a reação química, para definição da quantidade que deverá ser adicionada no vazamento. Torna-se também extremamente importante o conhecimento do oxigênio dissolvido (medido em ppmO) no final da corrida, antes da adição do carbureto, afim de evitar possíveis transbordamentos de aço na panela. A Figura 9a apresenta um exemplo de condições normais de reação e a Figura 9b um exemplo de transbordamento de aço, totalmente indesejável durante o processo.

Figura 9 – Condição de reação: (a) condição normal, (b) transbordo de aço na panela

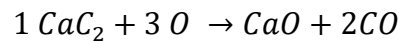


Fonte: Adaptado de CARDOSO FILHO *et al.*, 2013.

Por critério de segurança, para a realização dos testes, foi-se estabelecido que a adição do carbureto no vazamento só seria realizada após a confirmação de que o oxigênio dissolvido no banho não foi superior à 1000 ppmO após a etapa de refino do aço no FEA. Utilizando o critério citado para realização do teste, nota-se uma média de 800 ppmO, sendo então esse valor utilizado para cálculo do balanço de massa. Considerou-se, com base em estimativas e para fins de cálculos, o oxigênio dissolvido de chegada no FP como 300 ppmO.

A estequiometria da reação do carbeto de cálcio com o oxigênio e os cálculos para definição do peso adicionado (equação 3) são apresentados a seguir:

Reação do carbeto de cálcio com o oxigênio:



Cálculo para definição do peso de carbureto de cálcio necessário:

$$Peso_{\text{Carbureto}} [kg] = \frac{M_{\text{CaC}_2} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] ([\%O]_{\text{FEA}} - [\%O]_{\text{FP}}) \text{Peso}_{\text{aço vazado}} [kg]}{3M_{\text{O}_2} \left[ \frac{kg}{kmol} \right] \eta_{\text{CaC}_2}} \quad [3]$$

Considerando a redução de 500 ppmO ( $5 \times 10^{-4}$ ) entre o oxigênio dissolvido no aço antes do vazamento e a chegada a estação do forno panela, é possível por meio da equação 3 definir o valor em massa de carbureto de cálcio que deverá ser adicionada para balancear a reação com o oxigênio. Na equação 3:

$M_{\text{CaC}_2}$  é a massa molar do carbeto de cálcio, igual a 32 kg/kmol;

$[\%O]_{\text{FEA}}$  e  $[\%O]_{\text{FP}}$  são, respectivamente, o oxigênio dissolvido no FEA igual a  $800 \times 10^{-4}$  e no FP igual a  $300 \times 10^{-4}$ ;

$\text{Peso}_{\text{aço vazado}}$  é o peso médio vazados das corridas testadas, igual a 21500 kg;

$M_{\text{O}_2}$  é a massa molar do oxigênio, igual a 16 kg/kmol;

$\eta_{\text{CaC}_2}$  é teor médio de carbeto de cálcio presente no carbureto, igual a 0,8.

Substituindo os valores na equação 3:

$$Peso_{\text{CaC}_2} [kg] = \frac{32 \times 5 \times 10^{-4} \times 21500}{3 \times 16 \times 0,8} = 17,92$$

Por conta de a embalagem do material conter 10 kg em cada pacote, utilizaremos adições de 2 pacotes, ou seja, 20 kg.

## 4.2 Aço objetivo de estudo

A realização do teste ocorreu durante a produção do aço AISI 1029, produto da classe dos aços carbono comuns. A faixa de composição química dos principais elementos de interesse desse aço é exposto na Tabela 3.

Tabela 3 – Faixa de composição química do aço AISI 1029, % em massa

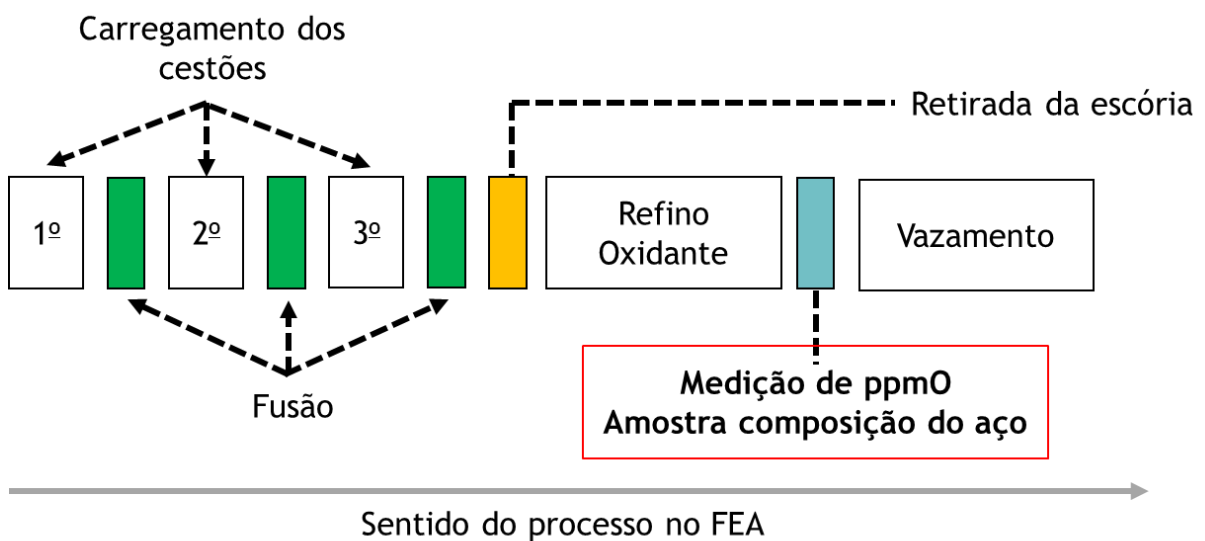
AISI 1029	C	Mn	P	S
Mín.	0,25	0,60	-	-
Máx.	0,31	0,90	0,03	0,05

Fonte: Catálogo de aços Gerdau, 2003.

## 4.3 Coleta de dados FEA

Durante a realização dos testes com o carbureto de cálcio, o processo no FEA ocorreu sem nenhuma alteração atípica ou significativa que fosse capaz de prejudicar as análises. Para essa etapa, duas informações são imprescindíveis para entendimento dos efeitos do uso do carbureto de cálcio no vazamento, sendo eles: o valor de oxigênio solúvel no banho (medido em ppmO) e a composição química do aço. Ambos os dados foram coletados momentos antes da realização do vazamento do aço na panela. A Figura 10 apresenta de forma simplificada o processo no FEA e o momento da coleta dos dados citados.

Figura 10 – Fluxograma do processo FEA destacando momento de coleta de dados



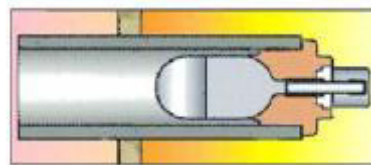
### 4.3.1 Medição do oxigênio dissolvido

Após a etapa de refino oxidante, é realizada inserção do amostrador do tipo Celox®, que tem como objetivo principal a medição do oxigênio dissolvido no banho. A amostragem ocorre em duas etapas. Inicialmente o operador da plataforma do FEA realiza a inserção do sensor no *Top Sensors Manufacture* (TSM), se afastando logo em seguida, para que seja possível o avanço do braço mecânico que levará o amostrador até o aço líquido por meio da porta de saída de escória. O valor é apresentado de forma instantânea e é usado pelo sistema para realizar estimativas de percentual de carbono no aço e FeO na escória, que são capazes de direcionar as decisões do operador em relação ao processamento da corrida ou sob o critério de segurança.

### 4.3.2 Amostra composição química do aço

A retirada da amostra de aço ocorre por meio de amostradores de imersão, cujo sistema interno pode ser verificado na Figura 11. O amostrador é inserido dentro do aço líquido e sua cavidade interna é capaz de captar a amostra de aço, que rapidamente se solidifica. Após a remoção da amostra de dentro de sensor, é realizada a preparação desta para a queima no espectrômetro de emissão óptica. A peça já solidificada tem uma de suas superfícies lixada, sendo essa face posta virada para o eletrodo do espectrômetro que realizará a queima. O resultado é apresentado de forma quase imediata.

Figura 11 – Ilustração do sistema de funcionamento do amostrador de imersão.

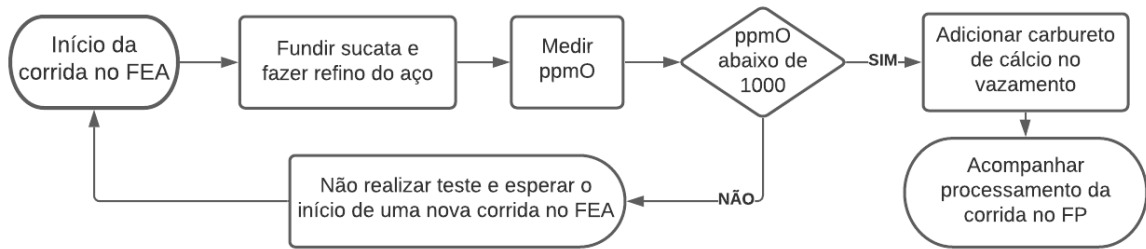


Fonte: Adaptado de BIELEFELDT, 2005.

## 4.4 Adição do carbureto de cálcio

Conforme anteriormente mencionado, por questões de segurança, a adição do carbureto de cálcio foi condicionada à quantidade de oxigênio dissolvido no banho de aço líquido. Se menor que 1000, o teste poderia ser realizado. A Figura 12 apresenta o fluxograma de decisão para realização do teste.

Figura 12 – Fluxograma de decisão para realização do teste



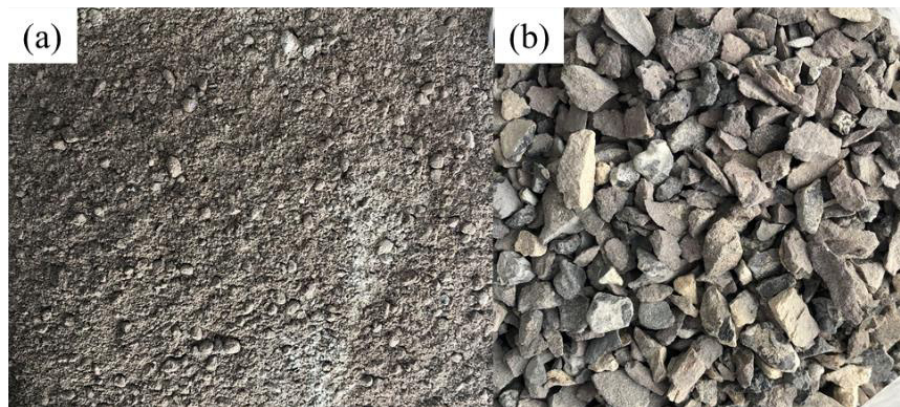
Para realização do teste foram utilizados diferentes granulometrias do carbureto de cálcio, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação dos carburetos utilizados

Tipo de Carbureto	Recomendação do uso
Granulometria 0-4mm	Dessulfuração do aço
Granulometria 2-10mm	Desoxidação do aço e escória

A diferença visual entre os tipos de carburetos é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Tipos de carburetos de cálcio utilizados no trabalho: (a) granulometria 0-4mm, (b) granulometria 2-10mm.



A Tabela 5 apresenta os diferentes métodos avaliados neste trabalho.

Tabela 5 - Métodos avaliados durante os testes

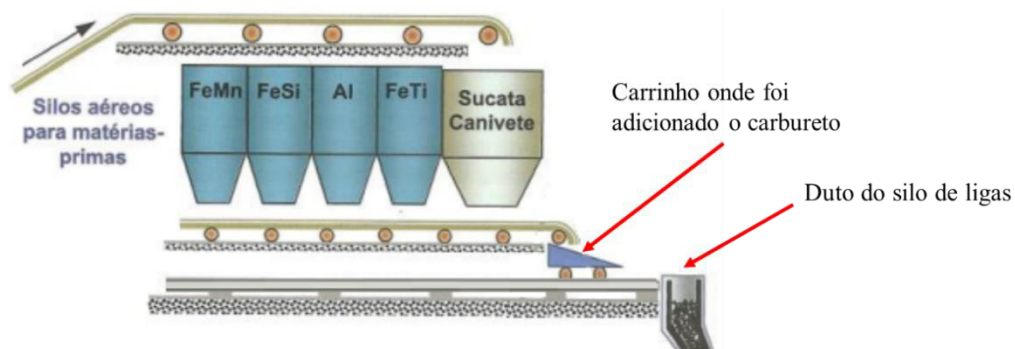
Adição de carbureto no vazamento	Número de corridas testadas
Nenhuma adição	24
10 kg com granulometria 0-4mm	6
20 kg com granulometria 0-4mm	2
20 kg com granulometria 2-10mm	5

A justificativa para a inclusão da adição de 10kg com granulometria 0-4mm será abordado posteriormente no tópico de resultados e discussões.

Em seu trabalho, BRUCH (2006), realizou o teste do carbureto de cálcio utilizando diversos métodos de adição, entre eles, alterando o local de adição e a massa de carbureto adicionada. Como resultado do seu trabalho, foi possível concluir que o método de adição que obteve melhor rendimento de silício e manganês foi o método que contou com uma adição de 10kg no fundo da panela e uma adição de 10 kg pelo silo de ligas, apresentando rendimento significativamente maior que o método de adição somente no fundo da panela. Para este trabalho, foi escolhido realizar a adição somente pelo silo de ligas, por questões operacionais.

Para realizar a adição do carbureto de cálcio no momento do vazamento, foi utilizado o carrinho de adição de ligas, mecanismo que fica abaixo dos silos e tem a função de acumular todos os materiais pesados e transferir para o duto, que deverá abrir somente no momento do vazamento, por meio do comando do operador. A Figura 14 mostra o dispositivo utilizado para realizar a adição do carbureto.

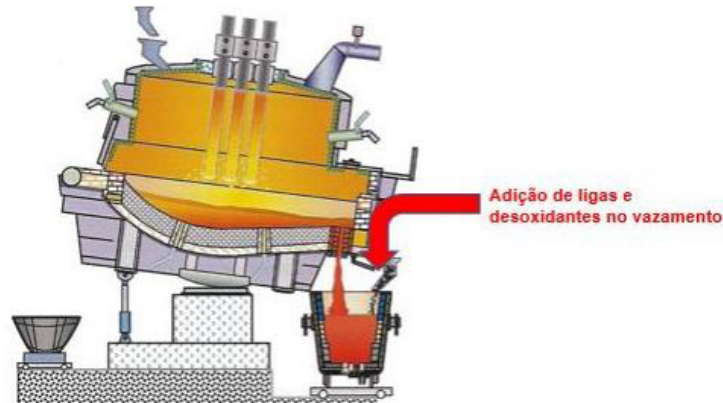
Figura 14 – Sistema de adição de ligas no vazamento com destaque ao local de adição do carbureto de cálcio



Fonte: Adaptado de RIZZO, 2006.

A Figura 15 representa o momento em que é realizada a adição de ligas e desoxidantes durante o vazamento, sendo também o momento de adição do carbureto de cálcio nas corridas em que foi realizado o teste.

Figura 15 - Adição de ligas e desoxidantes no vazamento

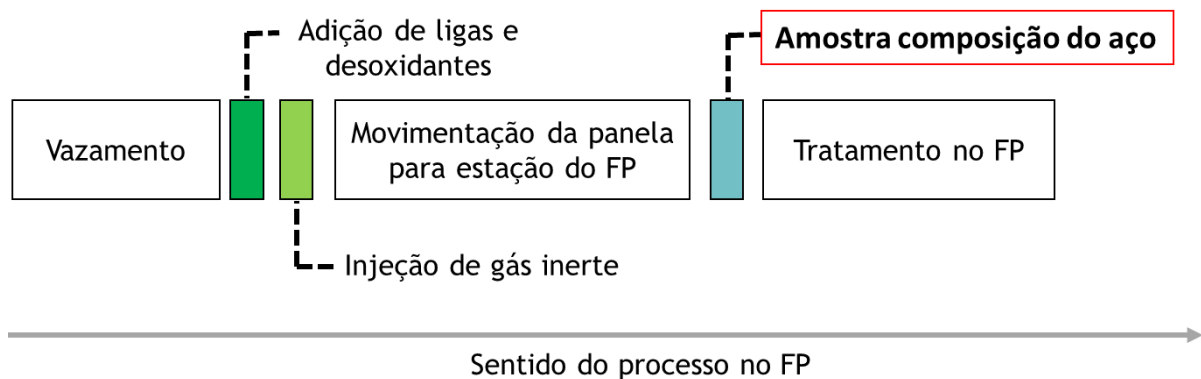


Fonte: Adaptado de BOTELHO, 2019.

#### 4.5 Coleta de dados FP

Após a realização do vazamento, o processamento no Forno Panela seguiu sem nenhuma distinção de sua normalidade, independente da adição ou não do carbureto de cálcio no vazamento. A Figura 16 apresenta o fluxograma do processo no Forno Panela, indicando etapas importantes na análise realizada.

Figura 16 – Fluxograma do processo no FP destacando o momento de coleta dos dados



##### 4.5.1 Amostra composição química do aço

Após a chegada da panela na estação de tratamento do FP, é feita a retirada de uma amostra de aço em amostrador de imersão semelhante ao utilizado para tirar a amostra no FEA. Após a retirada da amostra esta passará também por uma lixadeira, para que uma de suas superfícies esteja livre de óxidos que possam estar superficialmente na peça.



Depois de realizada a preparação, é realizada a análise no espectrômetro de emissão óptica do modelo ARL3460. A Figura 17 apresenta uma amostra de aço após lixamento e realização da análise no espectrômetro de emissão óptica.

Figura 17 – Amostra de aço após análise no espectrômetro



#### 4.6 Tratamento de dados

Como parte do desenvolvimento da metodologia de teste, os dados foram tratados e foram removidas da análise corridas que apresentaram critérios divergentes da normalidade do processo. A exclusão dos dados conhecido como *bad data* são essenciais para um resultado mais representativo da realidade do processo. Os critérios de eliminação dos dados e suas justificativas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Critérios utilizados para descon sideração de corridas na análise

Critério	Justificativa	Corridas descon sideradas
Peso da corrida $\leq 15t$	Quantidade significativa de aço não lingotado	1
Passagem de escória do FEA	Remoção de escória e nova adição de fundentes e ligas	1
Atrasos no vazamento	Aumento da oxidação da corrida após a medição do oxigênio dissolvido	1
Adições de 20kg da granulometria 0-4mm	Ocorrência de reação forte/ Realização de somente dois testes	2
Oxigênio dissolvido $\geq 1000\text{ppmO}$ .	Remover corridas sem nenhuma adição que ultrapassaram esse valor	1

Com a utilização dos critérios apresentados anteriormente e o processo de imputação dos dados, que será descrito no tópico seguinte, as 37 corridas observadas foram reduzidas para 31. A Tabela 7 apresenta o número de corridas testadas e analisadas para cada uma das adições no vazamento.



Tabela 7 – Diferentes adições realizadas no vazamento e o número de corridas analisadas.

<b>Adição no vazamento</b>	<b>Nº de corridas testadas</b>	<b>Nº de corridas analisadas</b>
Nenhuma adição	24	21
10 kg de 0-4 mm	6	6
20 kg de 0-4mm	2	0
20 kg de 2-10mm	5	4
<b>Total</b>	<b>37</b>	<b>31</b>

#### 4.6.1 Imputação de dados

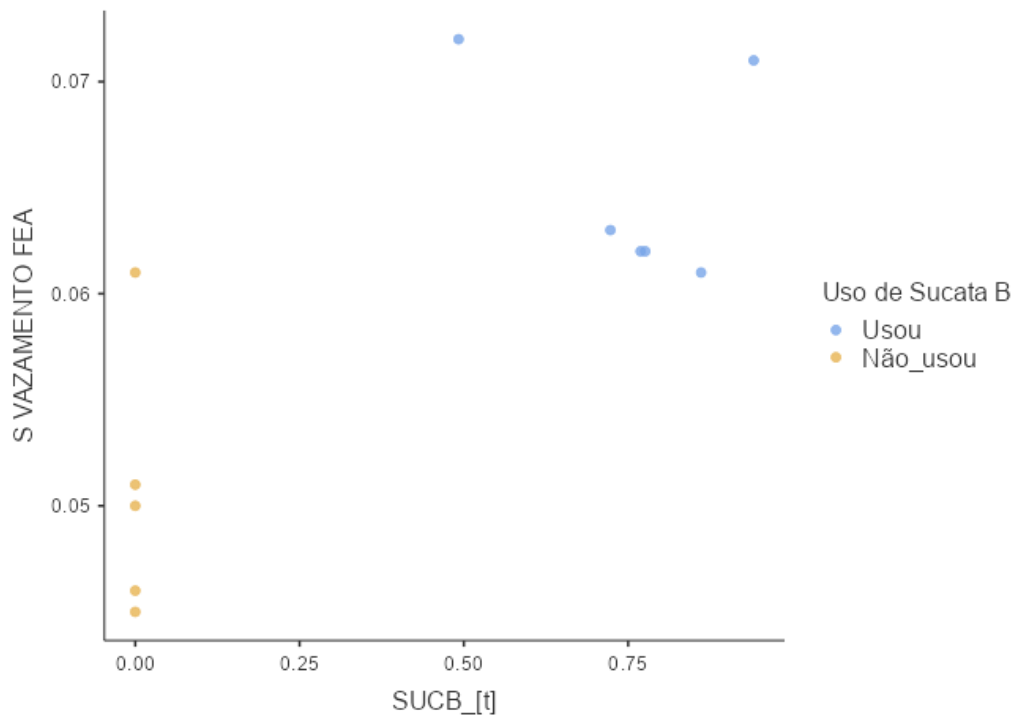
Durante a realização dos testes foi observado um problema comum se tratando de análise de dados, a ausência ou perda de algumas informações. Devido ao restrito número de amostras, foi desenvolvido o método de imputação para eliminação dos dados faltantes, considerando que os valores em questão podem ser considerados faltantes aleatórios.

Dados faltantes considerados aleatórios são quando o padrão de perda em uma variável é previsível a partir de outras variáveis no banco de dados, e não devido a variável específica na qual os dados são perdidos (NUNES, 2007). A utilização do método permitiu o ganho de 4 amostras relevantes para a análise. A imputação mostrou-se necessária para conhecimento do teor de enxofre, silício e manganês anterior ao vazamento, sendo cada uma das metodologias utilizadas descritas nos tópicos a seguir.

##### 4.6.1.1 Enxofre no vazamento

Para realizar o preenchimento dos dados faltantes relacionados ao enxofre de vazamento, foi buscada a variável do banco de dados que mais tem relação com a variável faltante. Para o enxofre, essa variável é o uso de uma sucata advinda do processo *Kambara Reactor* de uma usina integrada, para simplificação, nomeada de Sucata B. Foram utilizados para esta análise os dados do dia em que foram realizadas as corridas com valores faltantes. A segregação por dia é válida por meio da consideração de processo estável de abastecimento dos cestões nesse período, mantendo o *mix* de sucatas com mínimas alterações. A Figura 18 apresenta a relação entre o uso ou não da Sucata B com o enxofre de vazamento no dia em que houveram corridas com dados faltantes.

Figura 18 – Relação entre o uso da Sucata B e o S de Vazamento no FEA

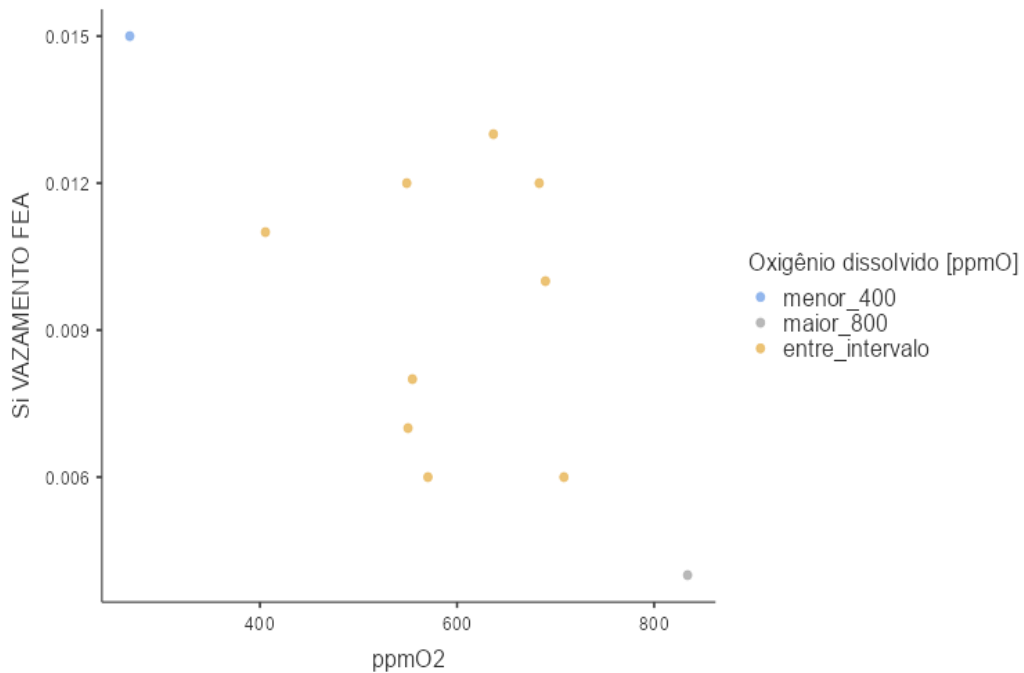


Por meio da análise do gráfico é possível verificar a distinção do enxofre de vazamento em dois grupos, corridas que usaram e que não usaram sucata B. Para as que usaram temos o valor médio de 0,065, para os que não usaram o valor médio de 0,051. Dessa forma, os dados faltantes foram preenchidos associando o valor de 0,065 ou 0,051 a depender do uso ou não da Sucata B.

#### 4.6.1.2 Silício no vazamento

Para o silício de vazamento, a variável que mais pode ser associada é o oxigênio dissolvido no aço (expresso em partes por milhão - ppmO). Quanto maior for o teor de silício no aço, menor será o oxigênio dissolvido, isso ocorre devido ao silício, por ser um forte desoxidante, tender a reagir com o oxigênio e formar sílica sólida. Por meio da Figura 19 é possível verificar o comportamento citado. Os dados para essa análise também consideraram o dia das corridas dos dados faltantes.

Figura 19 – Relação entre o ppmO e o silício de vazamento

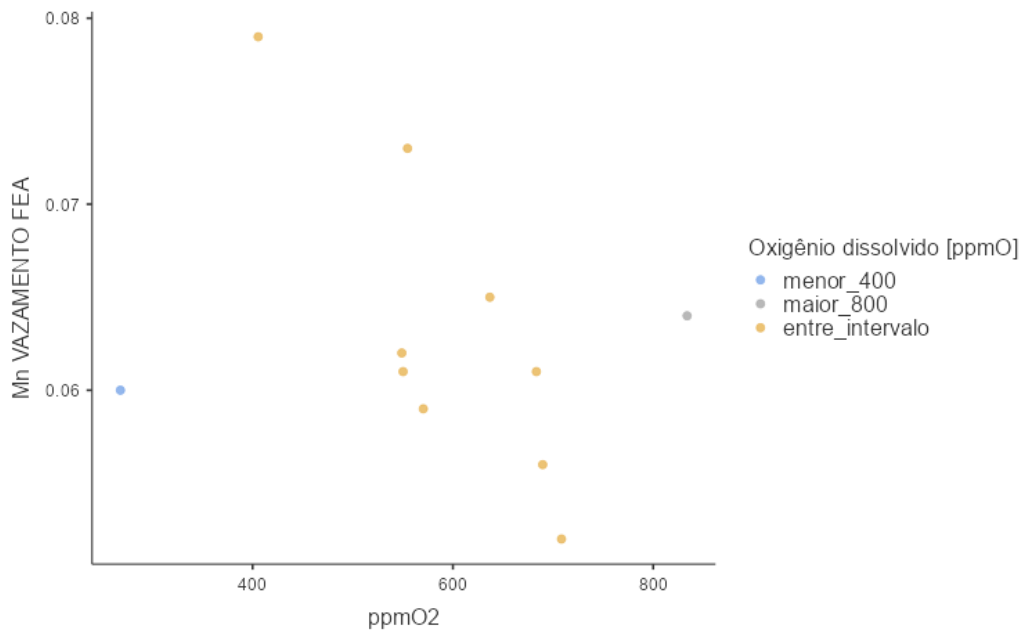


Por meio da análise da figura, é possível identificar a distinção do silício de vazamento em três grupos divididos pelo valor de oxigênio dissolvido. Para as corridas que tiveram valor menor que 400 ppmO, temos o valor médio de 0,015, para as corridas que tiveram valor entre 400 e 800 ppmO, temos o valor médio de 0,009 e para as corridas que tiveram valor maior que 800 ppmO, temos o valor médio de 0,004. Dessa forma, os dados faltantes foram preenchidos associando o valor de 0,015, 0,009 ou 0,004 a depender do valor de oxigênio dissolvido na corrida com o dado faltante.

#### 4.6.1.3 Manganês no vazamento

Para o manganês de vazamento foi realizada a mesma análise do silício. Considerando as diferentes faixas de oxigênio dissolvido, não se notou um comportamento de dependência entre o ppmO e o Mn de vazamento. O manganês é um desoxidante que permite valores altos de oxigênio no aço, mesmo quando usado em elevadas concentrações, sendo considerado um desoxidante fraco (HUPPES, 2014). Realizando o agrupamento por faixas de ppmO, nota-se que a média é praticamente igual para as 3 faixas. A Figura 20 apresenta a relação visualizada entre o ppmO e o Mn de vazamento.

Figura 20 – Relação entre o ppmO e o manganês de vazamento



Para o Mn de vazamento os dados faltantes foram preenchidos associando o valor médio de Mn do dia em questão. A permanência do mesmo *mix* de sucatas sugere que ao longo do dia não houveram variações significativas da composição desse elemento de interesse. Dessa forma os dados faltantes foram preenchidos associando o valor de 0,063.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente estudo concentrou-se em aplicar duas diferentes granulometrias de carbureto de cálcio separadamente e em diferentes quantidades durante o vazamento de aço do FEA para a panela. Serão abordados alguns resultados coletados dos testes, dos quais se destacam: a reatividade da reação, o rendimento de ferro-ligas e o processo de dessulfuração do aço.

### 5.1 Variáveis de processo

Os resultados obtidos durante os testes podem sofrer algumas distorções devido à variabilidade do processo. Nas figuras seguintes destacam-se alguns fatores que devem ser considerados como condições atenuantes às análises.

Figura 21 – Variação da temperatura de vazamento agrupado por carbureto adicionado

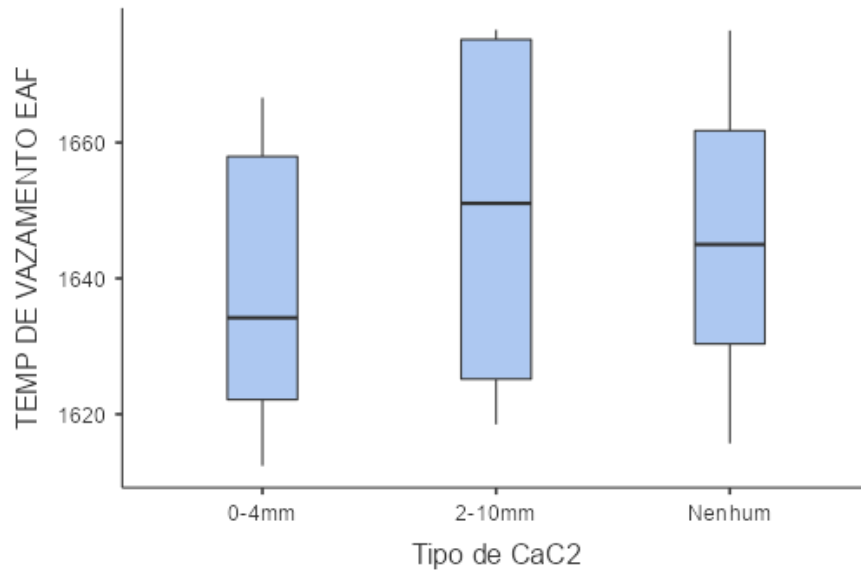
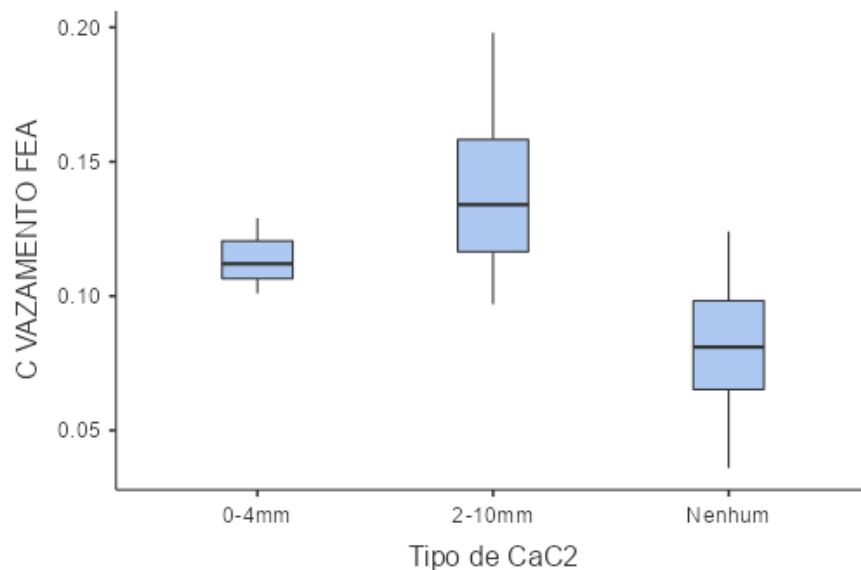


Figura 22 – Variação do carbono de vazamento agrupado por tipo de carbureto adicionado



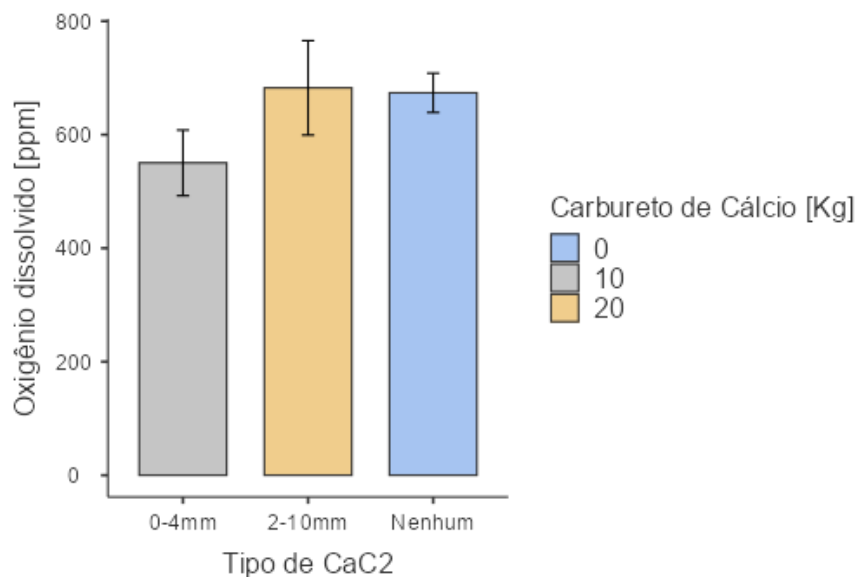
Por meio da análise das figuras anteriores, é possível observar diferentes características das corridas dentro do FEA antes da adição das diferentes granulometrias de carburetos de cálcio. As variáveis temperatura de vazamento e composição de carbono no aço, sugerem que se trata de diferentes níveis de oxidação do banho metálico e escória.

Segundo HUPPES (2014), quanto menor o teor de carbono, mais altos serão os valores de equilíbrio químico com o oxigênio solúvel. Desse modo, e de acordo com a Figura 22 é esperado que as corridas em que não foi realizada nenhuma adição seja a corrida mais oxidada, seguida pelas corridas em que houve a adição do 0-4mm e sendo as menos oxidadas as corridas que foram adicionadas a granulometria de 2-10 mm.

A condição suposta pela análise do carbono da amostra de aço FEA foi evidenciada pela medição do oxigênio dissolvido, por meio do amostrador Celox®, nas corridas em que não houve nenhuma adição ( $[\%O] = 673,7$  ppmO, em média) e nas corridas em que houve a adição da granulometria 0-4 mm ( $[\%O] = 550,3$  ppmO, em média). Nas corridas em que foram adicionadas a granulometria de 2-10 mm, nota-se uma divergência entre o valor esperado de ppmO, devido ao teor de carbono no aço, e o valor medido por meio do Celox® ( $[\%O] = 682,4$  ppmO, em média).

A divergência entre os valores esperados e os valores medidos tem expressiva relação com o baixo número de amostras e a variação dos dados durante a adição da granulometria mais grosseira do carbureto de cálcio. A Figura 23 apresenta os valores médios medidos por meio do Celox® das corridas analisadas.

Figura 23 – Oxigênio médio dissolvido no FEA agrupado por tipo de carbureto adicionado

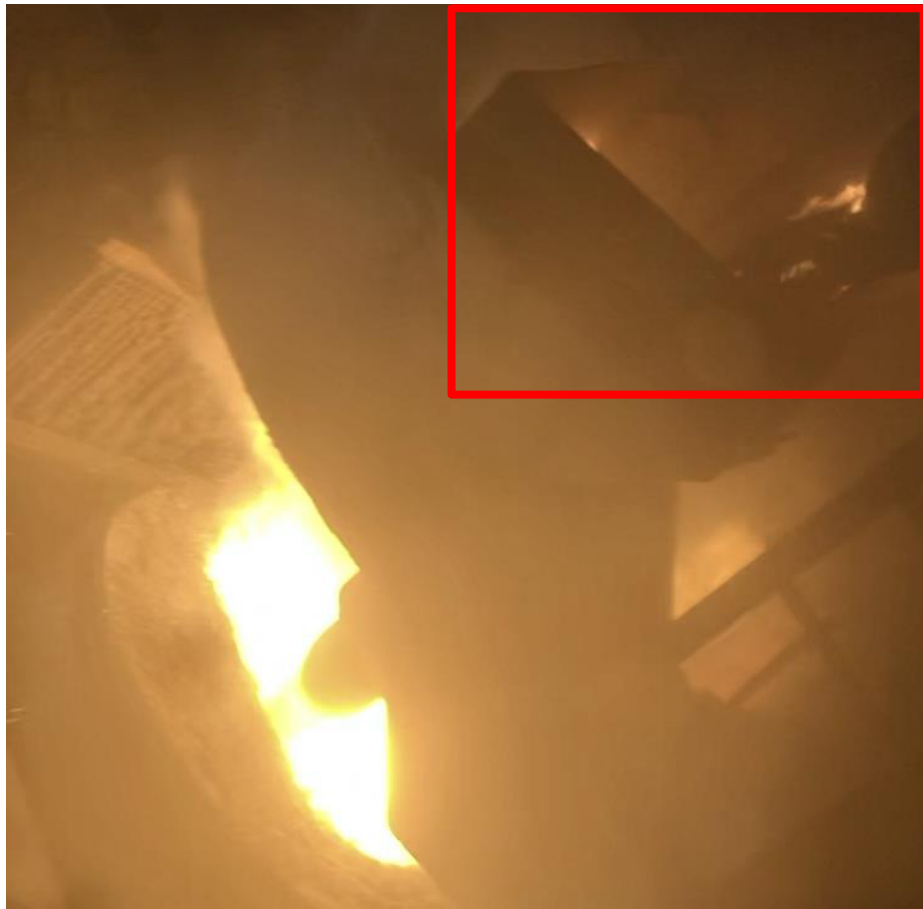


## 5.2 Reatividade da reação

Durante a realização dos testes, observou-se que o grão fino de carbureto de cálcio, 0-4 mm, reagiu abruptamente (Figura 24) durante o processo de vazamento, quando foram utilizados 20 kg de material. Devido ao material se apresentar na forma de pó (maior área superficial), houve um aumento na geração do gás CO em um curto período de tempo. Embora tal reação se apresente de forma controlada, como medida segura, foram utilizados na continuidade dos testes apenas 10 kg do carbureto de cálcio de granulometria 0 a 4 mm. A mesma reação intensa não foi observada durante os testes utilizando a granulometria de 2-10

mm, portanto, foi possível utilizar 20 kg calculados pela estequiometria.

Figura 24 – Reação do carbureto quando adicionado 20kg na granulometria 0-4 mm



### 5.3 Relação %Mn/%Si

Buscando avaliar a oxidação do banho após o vazamento de aço na panela e a adição de ligas e desoxidantes, foi utilizada a análise da proporção entre o teor de manganês e de silício presentes no aço, por meio de análises químicas, no momento de chegada do aço na estação de trabalho do forno panela. De acordo com HUPPES (2014), a relação %Mn/%Si pode ser utilizada para análise do quanto o banho está oxidado, em seu trabalho foi demonstrado a forte dependência entre a razão %Mn/%Si e o oxigênio dissolvido medido, quanto maior sendo a relação %Mn/%Si, maior a quantidade de oxigênio dissolvido no banho.

A Tabela 8 apresenta os valores médios obtidos para a razão manganês-silício. É verificado que a relação é bastante semelhante para adição da granulometria 0-4mm e para nenhuma adição. Considerando os valores de oxigênio dissolvido apresentados na Figura 23, considera-se que a granulometria de 0-4mm foi bastante favorecida pelo ppmO das corridas testadas. Nota-se, um valor maior para relação na adição da granulometria 2-10mm, entretanto, a interferência da quantidade de amostras, associada ao valor mais alto de oxigênio dissolvido,

não favorece essa análise para a granulometria de 2-10mm, mesmo esta sendo indicado pelo fabricante como a mais adequada para promover a desoxidação.

Tabela 8 – Relação média %Mn/%Si após o vazamento agrupado por tipo de carbureto

<b>Tipo de carbureto adicionado</b>	<b>Média de %Mn/%Si calculado</b>
Nenhuma adição	6,821
10 kg de 0-4mm	6,764
20 kg de 2-10mm	7,140

#### 5.4 Dessulfuração do aço

A Tabela 9 apresenta os resultados para a variação do teor de enxofre da amostra FEA até a primeira amostra retirada no forno panela (CHFP).

Tabela 9 – Redução do %S entre a amostra de aço FEA e CHFP

<b>Tipo de carbureto adicionado</b>	<b>%S médio FEA</b>	<b>%S médio CHFP</b>	<b>%S FEA - %S CHFP</b>	<b>Redução média</b>
Nenhuma adição	0,054	0,052	0,002	3,7%
10 kg de 0-4mm	0,060	0,051	0,009	15,0%
20 kg de 2-10mm	0,054	0,051	0,003	5,56%

Como se pode observar, a granulometria de 0-4 mm obteve maior valor de redução de enxofre entre o FEA e a primeira amostra retirada no forno panela (CHFP), com valor médio de redução de 15,0%. Por meio da Tabela 9, é possível identificar que a dessulfuração com o carbureto de cálcio de grão fino aproveitou um alto teor inicial de enxofre no FEA, que está menos próximo do equilíbrio do que a situação de grão maior ou sem nenhuma adição, aumentando o potencial de remoção de enxofre.

Vale ressaltar que a dessulfuração é mais eficiente em condições redutoras, como as que existem no aço bem desoxidado. Conforme apresentado na Figura 23, o valor de oxigênio dissolvido nas corridas em que foram testados o carbureto de 0-4mm, em média, foram menores, favorecendo a eficiência da remoção do enxofre pela maior proximidade da condição em que ocorre a dessulfuração.

De acordo com o trabalho de SVYAZHIN (2004), a adição de carbureto de cálcio na panela durante o vazamento permitiu o aumento da dessulfuração do aço em uma média de 23% para 40%. Em seus testes foi possível observar que cerca de 50% da dessulfuração ocorreu durante o vazamento e apenas 17% durante o tratamento no FP.



Visando comparar os resultados obtidos por SVYAZHIN (2004), foi realizada a avaliação do total de enxofre removido durante o refino secundário e a parcela de participação de cada uma das etapas possíveis de se observar. A Tabela 10 apresenta os resultados da análise.

Tabela 10 – Participação das etapas do refino secundário na dessulfuração do aço.

<b>Tipo de carbureto adicionado</b>	<b>Redução total do %S no refino secundário</b>	<b>Redução entre FEA e CHFP</b>	<b>Redução durante tratamento FP</b>
Nenhuma adição	0,014	14,3%	85,7%
10 kg de 0-4mm	0,021	42,9%	57,1%
20 kg de 2-10mm	0,015	20,0%	80,0%

Para a dessulfuração total foi notada a redução de aproximadamente 23% do teor inicial de enxofre, sendo igual para todas as condições de adição do carbureto. Quando verificamos a participação da etapa de transição entre o FEA e a estação do FP, que inclui vazamento e a translação da panela até a estação de trabalho, destaca-se a dessulfuração que ocorreu na adição da granulometria de 0-4mm pelos motivos anteriormente mencionados. A não realização de adição e a adição da granulometria 2-10mm apresentaram uma participação na dessulfuração total de 14,3% e 20%, respectivamente.

A divergência quanto aos valores obtidos por SVYAZHIN (2004) e os valores obtidos nesse trabalho se deve as condições de realização dos testes. Em seu trabalho SVYAZHIN (2004), realizou a adição de uma significativa quantidade de alumínio durante o vazamento. Por se tratar de um forte desoxidante, a quantidade de oxigênio dissolvida foi reduzida, logo nos primeiros instantes do vazamento, a valores bastante reduzidos, gerando o ambiente redutor necessário para a dessulfuração.

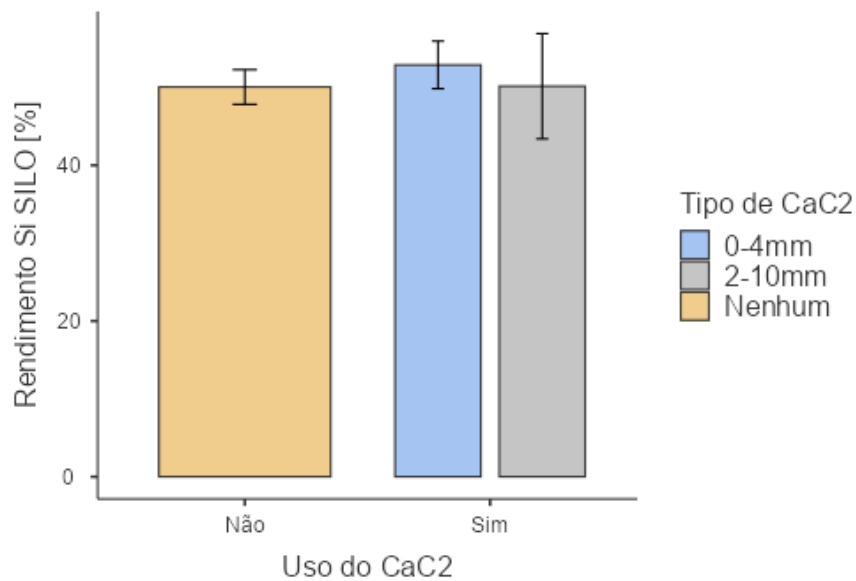
## 5.5 Rendimento de ferro-ligas

Visando avaliar o efeito da adição carbureto de cálcio no rendimento de ligas, foi realizada a análise para as duas ferro-ligas adicionadas na panela durante o vazamento por meio do silo de ligas. Nessa análise, não está sendo considerada o rendimento durante as adições manuais na estação do forno panela. Os resultados obtidos para os dois principais elementos de interesse são apresentados a seguir.

### 5.5.1 Rendimento de Silício

O rendimento de silício foi calculado considerando a massa utilizada da liga ferro-silício (FeSi) e a liga ferro-silício-manganês (FeSiMn), cada um destes ponderado pelo teor do elemento na liga, conforme apresentado na Tabela 2. Os valores obtidos para cada um dos cenários de adição no vazamento são apresentados por meio da Figura 25:

Figura 25 – Rendimento médio do silício para as adições durante o vazamento.

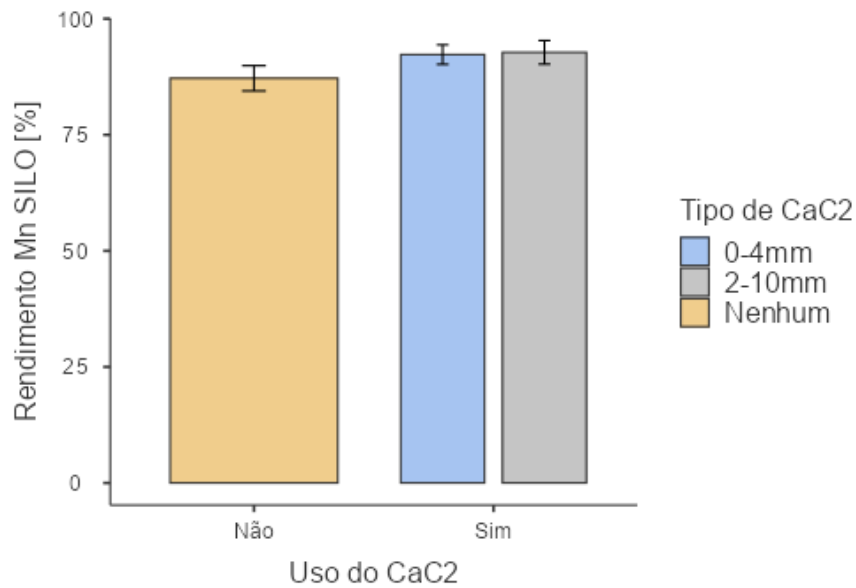


Como se pode ver na figura anterior, a variação de cada método foi muito sutil, não sendo possível identificar significativas variações. Uma hipótese para o comportamento da granulometria 0-4mm é o baixo teor de oxigênio ao final do processo FEA (Figura 23). Como o Si é o principal desoxidante adicionado, seu rendimento foi afetado pelo nível de oxidação inicial, atingindo valores maiores que as outras duas condições, mesmo tendo sido adicionados apenas 10 kg do material. Para o rendimento de Si, o carbureto de cálcio de 0-4 mm obteve um valor de 52,9%. A não adição e a adição da granulometria 2-10mm apresentaram um rendimento de 50% cada.

### 5.5.2 Rendimento de Manganês

O rendimento de manganês foi calculado considerando a massa utilizada da liga FeSiMn, ponderado pelo teor do elemento na liga, conforme apresentado na Tabela 2.

Figura 26 - Rendimento médio do manganês para as adições durante o vazamento.



Por meio da análise da Figura 26, é possível observar a semelhança de rendimento do manganês para ambas as adições do carbureto de cálcio. A granulometria 0-4 mm apresentou o rendimento médio de 92,3% e com a granulometria 2-10 mm rendimento médio de 92,8%. A não utilização do carbureto durante o vazamento resultou em um rendimento médio menor de 87,2%.

Constatando o resultado obtido no trabalho desenvolvido por GOULART (2015), foi demonstrado que a adição do carbureto apresenta uma redução no consumo de ferro-ligas por meio do aumento de rendimento do elemento no aço. Para o rendimento do manganês, nota-se que indiferentemente da granulometria adicionada, é possível a obtenção de aumento no rendimento da ferro-liga. Vale ressaltar que por se tratar de um desoxidante fraco, o manganês sofre interferência bem menos expressiva sobre o valor inicial do oxigênio dissolvido no aço, se comparado ao silício.

## 6 CONCLUSÃO

Com base no estudo realizado e nos resultados obtidos com o uso de diferentes granulometrias do carbureto de cálcio, é possível constatar que a utilização desse insumo promove ganhos significativos para o processo de refino secundário de aços. Os efeitos observados nesse trabalho se assemelharam bastante aos obtidos em trabalhos anteriores, se comparados a utilização ou não do carbureto durante o vazamento de aço no FEA. A intensidade dos resultados obtidos em outros trabalhos, não pode ser diretamente associada aos resultados apresentados devido as condições particulares de realização dos testes, como nível de oxidação.

Como resultado preliminar, caracterizado pela baixa quantidade de amostras coletadas, os dados foram razoáveis para realizar a comparação entre granulometrias. Foi-se observado que a variabilidade no processo interfere significativamente no resultado das análises, visto que promovem ambientes distintos para atuação das diferentes granulometrias. Buscando ponderar as diferentes condições encontradas para realização dos testes e utilizando estudos anteriores sobre os aspectos observados, é aceitável a consideração dos dados obtidos.

Por meio da realização dos testes, é possível concluir que, a utilização do carbureto de cálcio no vazamento deverá preceder um estudo sobre segurança e qualidade do processo devido a criticidade no uso do material. Para a granulometria mais fina, 0-4 mm, notou-se a maior restrição no uso, devido a celeridade em que ocorre a reação com o aço durante o vazamento, podendo ser somente esse critério considerado para a decisão de qual granulometria de carbureto utilizar.

Baseado nas análises realizadas para a desoxidação, dessulfuração e rendimento das ferro-ligas, é possível observar o destaque para os efeitos com o uso da granulometria mais fina. Esta granulometria apresentou melhor dessulfuração no vazamento, menor relação %Mn/%Si e melhor rendimento de silício e manganês, embora a adição tenha sido realizada com metade da massa prevista na estequiometria. A impossibilidade de afirmar que a granulometria fina é melhor, se deve pelas variáveis de processo que favorecem significativamente os testes realizados nessa granulometria.

Considera-se como mais promissor para prosseguir na utilização durante o vazamento, na usina onde foi testado, a granulometria de 2-10 mm. Esta granulometria, embora tenha sido prejudicada principalmente pela oxidação das corridas em que foram testadas, apresentou resultados relevantes como a melhoria na dessulfuração e o aumento no rendimento do manganês se comparados a não adição de nenhum carbureto. A escolha por essa granulometria para a usina em questão, se deve a possibilidade de utilizar o carbureto em

valores maiores de oxigênio dissolvido sem o risco de fortes reações, podendo nesse caso, ter se uso potencializado pela não limitação da massa adicionada.

Para conclusão sobre qual granulometria é mais adequada para outros processos, é necessário a continuidade no trabalho e a realização de um estudo em escala de laboratório. Com a promoção de um ambiente mais controlado, pode-se verificar com precisão, a interferência da granulometria do carbureto, visto que somente as variáveis de interesse serão alteradas, prática inviável dentro da indústria. O presente estudo é um dos primeiros a avaliar a granulometria do carbureto de cálcio na prática siderúrgica, sendo esta característica constantemente não descrita em trabalhos anteriores a este.

## REFERÊNCIAS

- BIELEFELDT, W. V. **Estudo do Tratamento de Inclusões com Cálcio na Fabricação do Aço SAE 8620**. 2005. Tese (Mestrado em Engenharia) – PPGEM – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- BOTELHO, Thales. **Estudo da taxa de desoxidação no refino secundário em aços desoxidados ao silício e manganês**. 2019. Tese (Mestrado em Engenharia) – PPGEM – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2019.
- BRUCH, Rafael. **Estudo termodinâmico da desoxidação do aço e escória com a adição de carbureto de cálcio**. 2006. Trabalho de Diplomação – Curso de Engenharia Metalúrgica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2006.
- CARDOSO FILHO, A.C.P. et al. **Carbureto de cálcio: Uma alternativa eficiente ao uso de alumínio**. In *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, nº 1, 2013, São Paulo. Resumos. São Paulo: ABM, 2013, p. 28-34.
- CARVALHO, Pedro S. Landim; MESQUITA, Pedro P. Dias; ARAÚJO, Elizio Damião G. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. Rio de Janeiro, 2015.
- PIRATINI, Gerdau Aços Finos. **Catálogo de Aços Gerdau**. Piratini: Gerdau, 2003. Disponível em: <[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprot/ec/catalogo\\_acos\\_gerdau.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprot/ec/catalogo_acos_gerdau.pdf)>. Acesso em: 9 jan. 2022.
- CGEE. Centro de Gestão e estudos Estratégicos. **Siderurgia no Brasil 2010-2025; subsídios para tomada de decisão**. Brasília, 2010.
- CHEVRAND, L.J.S. **Aciaria Elétrica – Situação atual e tendência 2025**. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/read/12958881/tema-aciaria-eletrica-situacao-atual-e-tendencia-2025-abm>>. Acesso em: 9 jan. 2022
- FRUEHAN, Richard. J. **The Making, Shaping, and Treating of Steel: Steelmaking and refining**. 11th edition. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998.
- GOULART, Livia Lopes de Oliveira; SILVA, André Luiz Vasconcellos da Costa e; ARAUJO JUNIOR, Ely da Silva. **Melhoria no rendimento de ferro-ligas e dos processos de desoxidação e dessulfuração com a utilização de carbureto de cálcio**. In: Seminário de Aciaria, nº46, 2015, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABM, 2015, p. 1-11.
- HUPPES, R.M. **Estudo de Alternativas para a Identificação e Controle da Desoxidação do Aço no Forno Panela**. Trabalho de Diplomação – Curso de Engenharia Metalúrgica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2014.
- JOHN, A. L. **Melhorias no desempenho dos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco**. 2009. Tese (Mestrado em Engenharia) – PPGEM – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2009.

LISBOA, Julio Cezar Foschini. **Ser protagonista química – volume 2**. 3ª edição. São Paulo: SM Didático, 2016.

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

NOBRE, Aços. **Site da Aços Nobre**, 2022. Elementos de liga: a influência dos elementos químicos no aço. Disponível em: <<https://acosnobre.com.br/blog/elementos-de-liga-no-aco/>> Acesso em: 20 dez. 2021.

NUNES, Luciana Neves. **Métodos de Imputação dos Dados Aplicados na Área da Saúde**. Tese (Doutorado em Epidemiologia) – PPGE – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos processos de refino primário dos aços nos fornos elétricos a arco**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

ROMAN, Aços. **Site da Aços Roman**, 2022. Espectrometria de Emissão Ótica: Análise química do aço. Disponível em: <<https://aco.com.br/aco/espectrometria-de-emissao-otica-analise-quimica-do-aco/>>. Acesso em: 9 jan. 2022.

ROSSI, Daniel. **Influência da proporção entre as vazões de oxigênio de gás natural do sistema de injeção na eficiência energética de um forno elétrico a arco**. Tese (Mestrado em Engenharia) – PPGEM – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SCHRAMA, Frank. N. Hermanus. **Desulphurisation in 21st century iron-and steelmaking**. Tese (Doutorado) – Technische Universiteit Delft, Delft, 2021.

SILVA MOTTA, Leonardo et al. **A evolução do emprego de carbureto de cálcio no refino secundário das siderúrgicas brasileiras**. In: Seminário de Aciaria, nº45, 2014, Porto Alegre. Porto Alegre: ABM, 2014, p. 1-10.

SILVA, José Nazareno Santos. Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil. **Siderurgia**. Belém, 2011.

SOARES, J. R. Camboim. **Controle da informação no registro de consumo de ferro-ligas durante a produção de aços especiais**. Trabalho de Diplomação – Curso de Administração – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2010.

SVYAZHIN, A. A.; KRUSHKE, E.; SVYAZHIN, A. G. The Use of Calcium Carbide in the Production of Low-Carbon Steel. **Metallurgist**, vol. 48, p 557-561, novembro, 2004.

TURKDOGAN, E. T. **Fundamentals of steelmaking**. Great Britain: Institute of Materials, 1996.

VESUVIUS. **Metallurgical Sensors – Vesuvius**, 2022. EAF Metallurgical Sensors. Disponível em: <<https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/pt-br/iron-and-steel/steel-making/melting/electric-arc-furnace/metallurgical-sensors.html>>. Acesso em: 9 jan. 2022.