



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE  
MATERIAIS  
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS**

**GABRIEL ANDRADE VALENÇA PEREIRA RANGEL**

**DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA DE CARACTERIZAÇÃO DE INCLUSÕES  
NÃO METÁLICAS DE AÇOS COM AUXÍLIO DO SOFTWARE IMAGEJ**

**FORTALEZA**

**2025**

GABRIEL ANDRADE VALENÇA PEREIRA RANGEL

DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA DE CARACTERIZAÇÃO DE INCLUSÕES NÃO  
METÁLICAS DE AÇOS COM AUXÍLIO DO SOFTWARE IMAGEJ

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia e Ciência de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciência de Materiais.  
Área de concentração: Processos de Transformação e Degradação dos Materiais

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug

FORTALEZA

2025

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

---

R154d Rangel, Gabriel Andrade Valença Pereira.

Desenvolvimento de técnica de caracterização de inclusões não metálicas de aços com auxílio do software ImageJ / Gabriel Andrade Valença Pereira Rangel. – 2025.  
69 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2025.  
Orientação: Prof. Dr. -Ing. Jeferson Leandro Klug.

1. Inclusões não metálicas. 2. Metodologia Yawata. 3. Aços UBC. I. Título.

CDD 620.11

---

GABRIEL ANDRADE VALENÇA PEREIRA RANGEL

DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICA DE CARACTERIZAÇÃO DE  
INCLUSÕES NÃO METÁLICAS DE AÇOS COM AUXÍLIO DO SOFTWARE IMAGEJ

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia e Ciência de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciência de Materiais.  
Área de Concentração: Processos de Transformação e Degradação dos Materiais

Aprovada em: 28/Jan/2025

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

À minha família, por acreditar e investir em mim com tanto sacrifício. À minha esposa Melina e ao nosso filho Nicolas, pois todas as minhas ações são para lhes proporcionar um futuro cada vez melhor.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por possibilitar mais essa oportunidade de conquista acadêmica e por ter sempre cuidado de mim e da minha família.

À minha família, por todo o apoio, a fé e dedicação que tiveram comigo nas noites de estudos e lazeres não aproveitados e, em especial, ao meu filho Nicolas, que acaba de chegar em nossas vidas.

Ao professor Dr.-Ing Jeferson por todos os ensinamentos e conselhos compartilhados desde a graduação e pela constante busca por melhores oportunidades ao longo desse período no programa de pós-graduação.

Aos engenheiros Carlos Carneiro e Leandro Rodrigues, da ArcelorMittal Pecém pela solicitude com o fornecimento das amostras e das demais informações sobre estas.

Aos engenheiros Anderson Nicolodi e Joelma pelos da ArcelorMittal Tubarão, por me convidarem e receberem, bem como pelos enriquecidos debates e informações trocadas sobre análises metalográficas.

Aos professores Dr. Walney do Laboratório de Pesquisa em Corrosão, Dr. Hamilton do Laboratório de Caracterização de Materiais e Mauro do Laboratório de Ensaios Mecânicos, pois sem os quais e suas respectivas equipes este trabalho não teria sido possível de executar.

Agradecimento especial ao Flávio do LACAM por todas as dicas e ajudas ímpares durante todo esse estudo.

À engenheira Lillian e toda a equipe do Laboratório de Caracterizações e Simulação Física - LASCAF, que ajudaram com o preparo das amostras e operação do ASCAT.

Aos amigos Bruno Linhares, Getúlio Marcos e Mateus Andrade pelos laços construídos nessa jornada de superação de desafios.

“A persistência é muito importante. Você não pode desistir, a não ser que seja forçado a desistir.” (Elon Musk)

## RESUMO

Este trabalho trata do desenvolvimento de uma metodologia de análise de inclusões não metálicas, para avaliar o nível de limpidez de aços, mais especificamente aços Ultra Baixo Carbono comumente utilizados pela indústria automotiva e de eletrodomésticos, por exemplo. Amostras de aços fornecidas por uma usina siderúrgica brasileira foram submetidas à caracterização do nível de limpidez utilizando a metodologia Yawata, que tem por princípio a classificação de inclusões por sua morfologia geral, utilizando microscopia óptica, e, a partir disso, classificá-las quanto ao seu tamanho e composição química. Além disso, o programa gratuito, ImageJ, foi utilizado para realizar as medições, com imagens obtidas de uma câmera acoplada ao microscópio. Comparou-se a metodologia com análises realizadas em uma Ferramenta Automatizada de Análise de Limpidez - ASCAT, que é um microscópio eletrônico de varredura especial, para analisar inclusões e realizar caracterização química por espectroscopia de energia dispersiva pontual, de forma automatizada. Assim, verificou-se que, através da aplicação da metodologia Yawata com auxílio do software ImageJ, e utilizando imagens obtidas por câmera acoplada ao microscópio óptico, resulta em uma metodologia de baixo custo que é adequada para determinar a limpidez de aços Ultra Baixo Carbono.

**Palavras-chave:** inclusões não metálicas; metodologia Yawata; aços UBC.

## **ABSTRACT**

This work addresses the development of a methodology for the analysis of non-metallic inclusions to evaluate the cleanliness level of steels, more specifically that of Ultra Low Carbon steels, commonly used in automotive and household appliance industries. Steel samples supplied by a Brazilian steel mill were submitted to cleanliness characterization using the Yawata methodology, which has as its principle the classification of non-metallic inclusions by their general morphology, by means of optic microscopy, and, from that, rank them by their size and chemical composition. Furthermore, the freeware ImageJ was utilized to perform the measurements in photos taken by a camera attached to the optic microscope. The methodology was compared with the analysis results collected by an Automated Steel Cleanliness Analysis Tool, which is a special scanning electron microscope to analyze inclusions and classify them by their chemical composition using automatic punctual Energy Dispersive Spectroscopy. Therefore, it was verified that through Yawata's methodology with the help of the software ImageJ and the images collected by an optic microscope's camera, results in a low-cost methodology that is adequate to determine the cleanliness level of Ultra Low Carbon steels.

**Keywords:** non-metallic Inclusions; Yawata methodology; ULC steels.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração dos componentes de uma estação de refino por processo FP .....	20
Figura 2 – Representação esquemática dos componentes de uma estação de refino por processo RH.....	22
Figura 3 – Ilustração do efeito da laminação a quente nas inclusões e na interface matriz-inclusão. ....	27
Figura 4 – Esquema ilustrativo de como se dá a fragilização por hidrogênio gerada por uma inclusão de sulfeto de manganês.....	28
Figura 5 – Representação esquemática mostrando a modificação morfológica de inclusões pelo tratamento de cálcio.....	29
Figura 6 – Compilado da modificação da morfologia de inclusões de alumina em percentual de Al por atividade média local de oxigênio. ....	29
Figura 7 – Diagrama esquemático do sistema de componentes de um MO voltado para metalografia. ....	33
Figura 8 – Exemplificação esquemática de uma coluna ópticoeletrônica do MEV. ....	34
Figura 9 – Foto de uma agulha de canhão de elétrons do tipo FEG.....	35
Figura 10 – Ilustração da pera de interações gerada pela reação do feixe de EP com a superfície da amostra .....	36
Figura 11 – Foto das amostras de aço UBC como recebido.....	39
Figura 12 – Politriz modelo AROPOL 2V utilizada no estudo. ....	39
Figura 13 – Microscópio óptico de modelo DMI3000 M utilizado no estudo. ....	40
Figura 14 – ASCAT utilizado no estudo. ....	41
Figura 15 – Janela de abertura do ImageJ. ....	42
Figura 16 – Em 'a' um exemplo da região de corte e em 'b' o exemplo do complemento de seu corte tomado como amostra já embutida e pronta para análise em MO.....	42
Figura 17 – Em 'a' a calibração e em 'b' a medição no ImageJ. ....	43
Figura 18 – Classificação Yawata para inclusões quanto aos seus tipos com base em suas geometrias.....	44
Figura 19 - – Exemplar de uma inclusão de alumina encontrada na amostra A, observado através do microscópio óptico.....	46
Figura 20 – Exemplar de um cluster de alumina encontrado na amostra A, observado através do microscópio óptico.....	47

Figura 21 – Exemplar de uma inclusão do tipo duplex na amostra A.....	48
Figura 22 – Exemplar de uma inclusão do tipo cluster de sulfeto na amostra A.....	49
Figura 23 – Cluster de alumina encontrado na Amostra A, observado através do MO e medido usando o ImageJ. ....	51
Figura 24 – Resumo comparativo dos resultados obtidos para a amostra A. ....	52
Figura 25 – Exemplar de inclusão duplex menor do que 5 $\mu\text{m}$ na Amostra B, observado através do microscópio óptico.....	53
Figura 26 – Exemplar de inclusão globular na Amostra B, observado através do microscópio óptico. ....	54
Figura 27 – Exemplar de sulfeto na Amostra B, observado através do microscópio óptico. ....	54
Figura 28 – Exemplar de duplex categorizada como "Outros"de tamanho entre 20 a 40 $\mu\text{m}$ ...	55
Figura 29 – Resumo comparativo dos resultados obtidos para a amostra B. ....	57

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Relação de alguns processos mais difundidos para a realização do refino secundário dos aços e seus objetivos .....	20
Tabela 2 – Ajuste de parâmetros no MEV. ....	31
Tabela 3 – Composição química das amostras em estudo.....	38
Tabela 4 – Tabela padrão para apresentar os resultados após análise.....	45
Tabela 5 – Resultados da Amostra A pela metodologia Yawata. Em uma área de 78,54 mm <sup>2</sup> . .....	49
Tabela 6 – Resultados da Amostra A pelo ASCAT. Em uma área de 63,34 mm <sup>2</sup> , sendo em uma face distinta da submetida pela metodologia Yawata. ....	50
Tabela 7 – Resultados da Amostra B pela metodologia Yawata. Em uma área de 78,54 mm <sup>2</sup> . .....	56
Tabela 8 – Resultados da Amostra B pelo ASCAT em uma área de 82,57 mm <sup>2</sup> , sendo a mesma face retrabalhada. ....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHSS	<i>Advanced High Strength Steel</i>
AR	Aços de Alta Resistência
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace</i>
CAS-OB	<i>Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling and Oxygen Blowing</i>
DH	<i>Dortmund-Hörder Huettenunion</i>
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
EP	Elétrons Primários
ERE	Elétrons Retro-espalhados
ES	Elétrons Secundários
FEA	Forno Elétrico a Arco
FEG	<i>Field Emission Gun</i>
FP	Forno-Panela
IF	<i>Interstitial Free</i>
IF-HSS	<i>Interstitial Free High Strength Steel</i>
LD	<i>Linz-Donawitz</i>
LF	<i>Ladle Furnace</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscópio Óptico
RH	<i>Ruhrstahl-Heraeus</i>
RH-KTB	<i>Kawasaki Top Oxygen Blowing</i>
RH-OB	<i>Ruhrstahl-Heraeus Oxygen Blowing</i>
UBC	Ultra Baixo Carbono
UHSS	Ultra-High Strength Steel
VD	<i>Vacuum Degassing</i>
WDS	<i>Wavelength Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Aciaria .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1.1</b>	<b><i>Refino secundário .....</i></b>	<b>19</b>
<b>3.1.1.1</b>	<b><i>Processo Forno Panela (FP) .....</i></b>	<b>20</b>
<b>3.1.1.2</b>	<b><i>Processo Ruhrstahll-Heraeus (RH).....</i></b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>Aços Ultra Baixo Carbono (UBC) e Aços Livres de Intersticiais (IF) .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.1</b>	<b><i>Aços UBC.....</i></b>	<b>23</b>
<b>3.2.2</b>	<b><i>Aços IF.....</i></b>	<b>23</b>
<b>3.3</b>	<b>Inclusões .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.1</b>	<b><i>Fontes .....</i></b>	<b>24</b>
<b>3.3.2</b>	<b><i>Origens.....</i></b>	<b>25</b>
<b>3.3.3</b>	<b><i>Efeitos .....</i></b>	<b>26</b>
<b>3.3.4</b>	<b><i>Controle .....</i></b>	<b>28</b>
<b>3.4</b>	<b>Microscopia.....</b>	<b>31</b>
<b>3.4.1</b>	<b><i>Microscópio Óptico .....</i></b>	<b>32</b>
<b>3.4.2</b>	<b><i>Microscopia Eletrônica de Varredura .....</i></b>	<b>33</b>
<b>3.4.2.1</b>	<b><i>ASCAT .....</i></b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Amostragem.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>40</b>
<b>4.3</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>61</b>
<b>7.1</b>	<b>Trabalho 1 .....</b>	<b>61</b>
<b>7.2</b>	<b>Trabalho 2 .....</b>	<b>61</b>
<b>7.3</b>	<b>Trabalho 3 .....</b>	<b>61</b>

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	62
--------------------------	----

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por materiais mais eficientes e processos produtivos mais sustentáveis tornou-se um imperativo nas últimas décadas, impulsionada por uma consciência crescente sobre a importância da preservação ambiental e a necessidade de desenvolvimento social responsável (Galán *et al.*, 2012). Nesse contexto, o controle e estudo das inclusões não-metálicas em aços desempenha um papel crucial no aperfeiçoamento do processo siderúrgico, indo além da esfera da análise puramente qualitativa desse material.

O aprimoramento das propriedades dos aços, especialmente no que diz respeito à redução de peso e à melhoria das características mecânicas, por estudo de inclusões não metálicas, vem sendo intensivamente desenvolvido, como mostrado por Wang *et al.* (2023), Guo *et al.* (2022), Wang *et al.* (2021a), Chen *et al.* (2020), Gorkusha *et al.* (2020) e Costa e Silva (2018). Estudos estes que não apenas impulsoram a inovação tecnológica, mas também estão alinhados com as demandas contemporâneas para com setores-chave, como a indústria automotiva, aeroespacial, energética e petrolífera, por exemplo.

A indústria automotiva, por sua vez, enfrenta constantes desafios relacionados à eficiência e sustentabilidade. A utilização de aços mais limpos, com controle rigoroso das inclusões não metálicas, possibilita a produção de chassis mais leves e com melhor resistência mecânica, resultando na categoria dos aços *Aços de Alta Resistência* (AR), que são aços monofásicos compostos de ferrita e garantem a segurança dos ocupantes ao passo que contribuem para a redução do consumo de combustível por meio da redução de peso e, consequentemente, diminuindo as emissões de gases poluentes (Callister, 2016).

Como uma categoria mais ampla, os aços podem ser classificados apenas quanto ao teor de carbono em sua composição química, resultando nos aços UBC, que são definidos por serem aços com teor de carbono menor do que 20 ppm (Rizzo, 2006; Domgin *et al.*, 2005). Alinhados com as características dos *Advanced High Strength Steel* (AHSS) pela adição de elementos de liga como titânio, alumínio e manganês, possuem baixa densidade e uma combinação alta e favorável de resistência à tração e ductilidade, que permitem resultados excelentes tanto a temperaturas criogênicas quanto à temperatura ambiente (Urrutia, 2021; Guo; Bao; Wang, 2017). A combinação de especificações como estas geram aços especiais cujas características estão em concordância com os materiais analisados deste trabalho.

A qualidade do aço é fundamental para garantir seu desempenho em diversas aplicações industriais. Um dos fatores que afetam diretamente essa qualidade é a presença de inclusões não metálicas na matriz do aço. Essas inclusões podem ter origem diversa e são

prejudiciais para as propriedades mecânicas, a usinabilidade e a resistência à corrosão do material. Para controlar a qualidade do aço, é necessário realizar a análise de inclusões, que consiste na identificação, quantificação e caracterização dessas partículas (Costa e Silva, 2018).

De um modo geral, existem dois tipos principais de métodos de análise de inclusões: diretos e indiretos. Os métodos diretos permitem a observação e análise individualizada das inclusões, fornecendo informações detalhadas sobre sua morfologia, tamanho, distribuição e composição química. Exemplos de métodos diretos incluem a microscopia óptica, que permite a visualização das inclusões em aumentos adequados, e a microscopia eletrônica de varredura (MEV), que oferece imagens de alta resolução e a possibilidade de análise elementar por meio de espectrometria de raios-X (EDS). Os métodos indiretos, por sua vez, estimam o teor de inclusões a partir de outras características do aço, como o teor de oxigênio total, por exemplo. Este método se baseia no princípio de que o oxigênio presente no aço está principalmente na forma de inclusões de óxido, e sua medição pode indicar indiretamente a quantidade dessas inclusões. Ambos os tipos de métodos são importantes e complementares, sendo que a escolha do método mais adequado depende do objetivo da análise e dos recursos disponíveis (Carneiro *et al.*, 2020; Bartosiaki *et al.*, 2015).

Em virtude da importância de tal controle, uma área denominada de engenharia de inclusões vem conquistando uma presença crescente nos últimos anos dentro das indústrias, onde, por meio de aplicações termodinâmicas computacionais e modelagens matemáticas, é possível manipular os teores e a morfologia das inclusões e determinar o nível inclusionário desejado, de tal forma que não seja prejudicial para o produto final e, a partir disso, determinar a composição do aço que irá gerar tal densidade de sujidade pela análise do diagrama de equilíbrio ternário da liga para os principais formadores de inclusões,  $Al_2O_3$ ,  $MnO$  e  $SiO_2$  (Jung; Dechterov; Pelton, 2004; Ono, 2021; Costa e Silva, 2018; Wang *et al.*, 2021b).

Neste sentido, o presente trabalho buscou coletar o máximo de informações sobre inclusões não metálicas, de modo a evidenciar para o leitor a amplitude de contribuição e aplicação desta pesquisa e os benefícios que o desenvolvimento de uma análise de nível inclusionário acessível, economicamente, poderá resultar para a qualidade de limpidez dos aços e, consequentemente, para o desenvolvimento técnico-científico.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é desenvolver uma metodologia para a realização de análise de inclusões não metálicas presentes em aços UBC, utilizando a metodologia Yawata modificada com o auxílio do aplicativo gratuito ImageJ, para ampliar a aplicabilidade com baixo investimento financeiro e conferir maior versatilidade ao estudo inclusionário.

### 2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) realizar a caracterização das inclusões não metálicas em duas amostras de aço UBC por meio da microscopia óptica conforme a metodologia Yawata com o auxílio do *software* ImageJ;
- b) comparar os resultados obtidos com os dados coletados pelo ASCAT.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Aciaria

Considerando as siderúrgicas integradas, ou seja, as que possuem as etapas de redução, aciaria e conformação mecânica, a aciaria inicia suas operações refinando o ferro-gusa nos fornos Básicos a Oxigênio, *Basic Oxygen Furnace* (BOF), ou nos mundialmente conhecidos fornos *Linz-Donawitz* (LD) (Ghosh; Chatterjee, 2008), que denomina o processo como refino primário do aço. A finalidade deste refino é promover a oxidação de elementos tais como carbono, silício, manganês e fósforo pela inserção de gás oxigênio no banho metálico, redução dos teores de óxidos de ferro e manganês da escória por borbulhamento de monóxido e dióxido de carbono (ASM, 1998), todas estas ações visam aumentar o grau de pureza do Fe no banho metálico que servirá de base para inserção dos elementos de liga na etapa subsequente denominada de refino secundário.

##### 3.1.1 Refino secundário

O refino secundário, ou metalurgia secundária, é uma das duas principais etapas que compõem a aciaria de uma siderúrgica, ele tem em comum com o refino primário a capacidade de realizar desoxidação e descarburação do banho metálico, caso os níveis esperados não tenham sido alcançados, além de realizar ajustes finos na composição química como a adição e controle de elementos de liga, desgasificação e realiza o controle do grau de limpidez do aço, bem como a forma das inclusões não metálicas (ASM, 1998).

Rizzo (2006) exemplifica quinze diferentes processos que podem compor o refino secundário de uma siderúrgica, dentre eles, os mais conhecidos são o Forno Panela FP ou *Ladle Furnace* (LF), *Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling and Oxygen Blowing* (CAS-OB), *Dortmund-Hörder Huettenunion* (DH), *Vacuum Degassing* (VD) e estação RH. Um resumo das características gerais de cada um dos processos citados anteriormente encontra-se na Tabela 1, onde é possível observar a amplitude de alguns processos e demonstrar parte do motivo de existirem diversas opções de estações de tratamento.

Um dos fatores decisivos na escolha de qual processo a siderúrgica deve ter em sua planta é o tipo de aço que deseja-se produzir, estações como DH e VD não controlam muito bem o nível de limpidez do banho e, por tanto, são mais baratos e limitam as possibilidades da empresa (Rizzo, 2006).

Tabela 1 – Relação de alguns processos mais difundidos para a realização do refino secundário dos aços e seus objetivos

Processos	Objetivos						
	Homogeneização	Ajuste de Composição	Desoxidação e dessulfuração	Captação de Inclusões	Modificação da morfologia das inclusões	Aquecimento	Remoção de H e N
CAS-OB	X	X	X	X	X	X	
LF <sup>1</sup>	X	X	X	X	X	X	
RH <sub>1;2</sub>	X	X	X	X	X		X
DH <sup>2</sup>	X	X	X	X			X
VD <sup>2</sup>	X	X	X	X			X

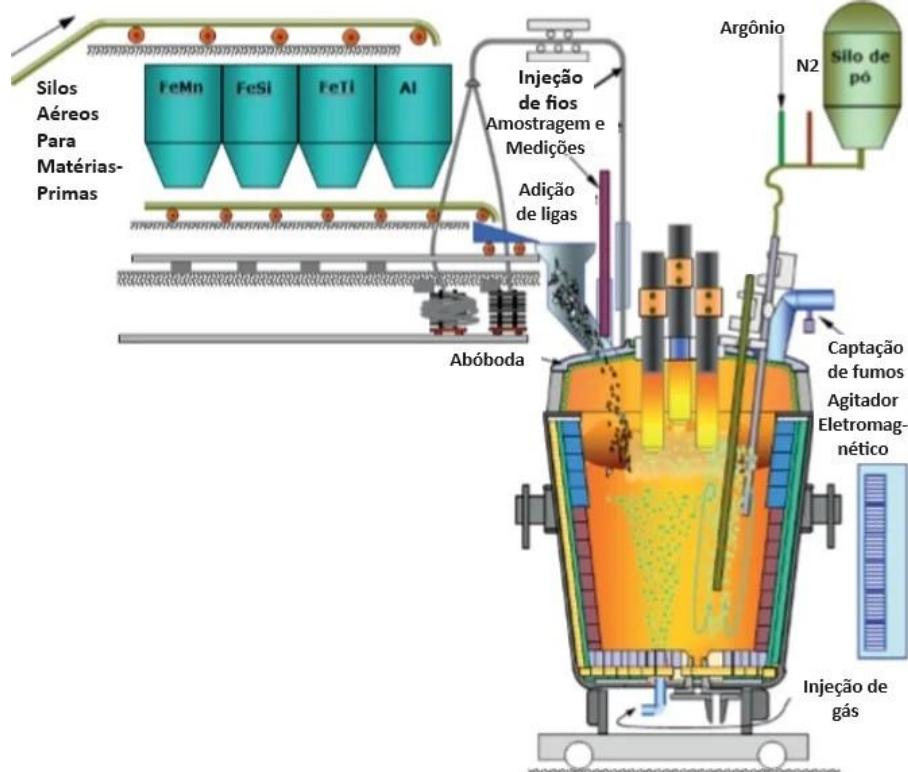
<sup>1</sup> Executa desfosforação.

<sup>2</sup> Executa descarbonatação.

Fonte: adaptado de Rizzo (2006).

### 3.1.1.1 Processo Forno Panela (FP)

Figura 1 – Ilustração dos componentes de uma estação de refino por processo FP



Fonte: Rizzo (2006).

Representado pela Figura 1, o FP é uma estação que fisicamente se assemelha com o Forno Elétrico a Arco (FEA) utilizado nos *mini-mills*, isto se dá por conta dele fazer uso de energia elétrica para realizar o processo de aquecimento do banho metálico. Composto por um

sistema de silos aéreos para adição de elementos de liga, lança de amostragem, injeção de fios, sistema de captação de fumos, injeção de gases inertes (argônio e N<sub>2</sub>) e eletrodos localizados no topo de sua abóboda (Rizzo, 2006).

Essa estação de refino possibilita realizar o controle térmico durante a adição de elementos de liga (Stragliotto *et al.*, 2017), conforme descrito na Tabela 1, com o destaque por ser um dos melhores processos em dessulfuração e em realizar micro limpeza de inclusões, porém, não sendo o melhor para modificar a morfologia de inclusões quando no modo de desgaseificação a vácuo e comparado com o processo RH, por exemplo (ASM, 1998, p.350).

Para a produção de aços comuns, sem grandes exigências no grau de limpidez, o processo FP economiza tempo e energia por não necessitar da agitação magnética para flotar inclusões, fazendo com que a sua aplicabilidade seja bem ampla, o que se reflete no fato de o forno panela ser o processo de refino secundário mais utilizado no Brasil, segundo Rizzo (2006, p.17).

### *3.1.1.2 Processo Ruhrstahll-Heraeus (RH)*

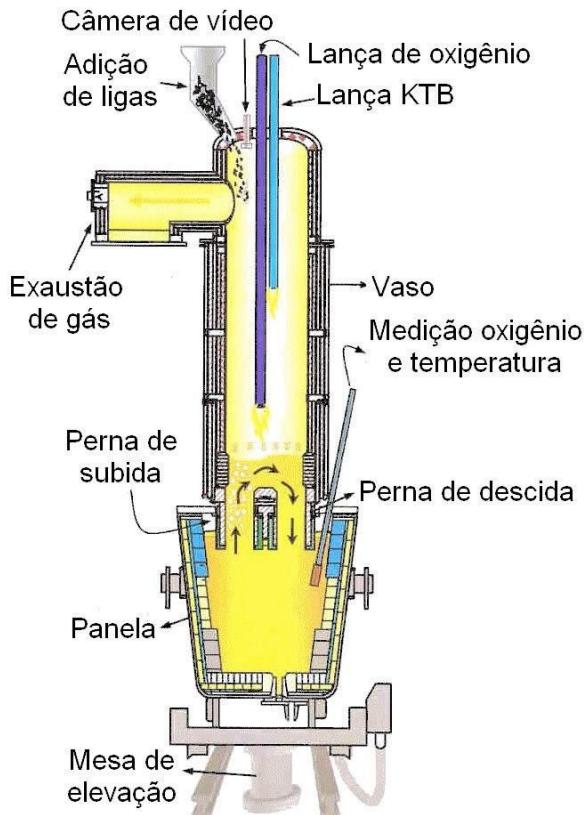
Os processos de refino do aço via vácuo subdividem-se em dois tipos, os que realizam a circulação do banho metálico por um recipiente fora da panela, como é o caso de estações *Kawasaki Top Oxygen Blowing* (RH-KTB) e DH, e as que não realizam a circulação do banho metálico fora da panela, como as estações VD e suas variações (Rizzo, 2006).

Desenvolvido na década de 50 após o advento das bombas de vácuo e classificado como um dos vários processos de refino secundário de desgaseificação a vácuo, a estação RH ilustrada na Figura 2 caracteriza-se por promover a agitação e circulação do aço por meio de tubos denominados *snorkels*, ao passo que gás argônio é borbulhado na perna de subida e gás O<sub>2</sub> é queimado no limite de subida do banho de aço (Rizzo, 2006; Morales; Barboza; Vilela, 2008).

O processo RH pode fazer uso da queima de gás oxigênio por meio de lanças semelhantes às utilizadas no BOF, que permitir o controle de temperatura do aço por meio de reações exotérmicas, resultando nos denominados processos *Ruhrstahl-Heraeus Oxygen Blowing* (RH-OB), semelhante aos conhecidos processos RH-KTB e demais variações encontradas na literatura. O processo RH-KTB combina o sopro de oxigênio pelo topo do *snorkel*, como desenvolvido por Thyssen RH (RH-TOP), para realizar o aquecimento do banho metálico pela adição de *Al* ou pela pós-combustão de CO (Guo *et al.*, 2017). Com essas características, o processo RH pode ser utilizado para produzir aços limpos através da remoção de oxigênio por meio de reações de formação de bolhas de CO que previnem a formação de

óxidos pois promovem a flotação de inclusões sólidas e líquidas no banho metálico (Rizzo, 2006; Ghosh, 2001).

Figura 2 – Representação esquemática dos componentes de uma estação de refino por processo RH.



Fonte: Morales, Barboza e Vilela, (2008).

O RH é um dos melhores processos para controlar a macro e micro limpeza do banho e um bom controlador da morfologia das inclusões (Ghosh, 2001). Permite efetuar a adição tanto de grandes volumes quanto de pequenas quantidades de elementos de liga durante o tratamento, sendo ideal para realizar ajustes finos na composição ou desenvolver desde composições mais grosseiras. O processo possui uma vantagem de não apresentar obstrução pela camada de escória, uma vez que a adição dos elementos ligantes é feita dentro do fluxo interno do *snorkel*.

Ao utilizar a combinação tanto do sopro de oxigênio quanto do vácuo, permite alcançar níveis de carbono da ordem de 0,0020% C, sendo uma das principais rotas para produzir aços UBC e aços *Interstitial Free* (IF), segundo Rizzo (2006).

### **3.2 Aços Ultra Baixo Carbono (UBC) e Aços Livres de Intersticiais (IF)**

Semelhantes na maioria das aplicações e com características composicionais levemente distintas, os aços UBC e IF são frequentemente usados na fabricação de veículos automotivos pois foram projetados para ter excelente deformabilidade e estampabilidade através do fino controle composicional dos elementos de liga destes aços, sendo o C e o Mn os principais para esta definição (ASM, 1998). Estes aços são produzidos pela rota em desgaseificador a vácuo, podendo passar por estações VD ou RH, a depender da configuração da usina (Domgin *et al.*, 2005). Tornam-se, então, sinônimos para efeito de entendimento e escopo desse trabalho e resumidos ao termo, aços UBC.

### **3.2.1 Aços UBC**

Aços UBC são aqueles que possuem teores baixíssimos de carbono, da ordem de 0,0030 ou menos de percentual em peso. Os aços UBC são conhecidos mundialmente por terem excelente estampabilidade e ótima resistência à tração devido ao baixo teor de carbono e ao teor de manganês da ordem de 0,20%. Quando em produção pela rota BOF-RH-Lingotamento Contínuo, estes aços têm por característica o problema de entupimentos no distribuidor do lingotamento contínuo por precipitação de  $Al_2O_3$ , elemento oriundo do processo de desoxidação por alumínio no refino secundário, que dá nome aos chamados aços acalmados ao alumínio.

Esse também é o responsável pelo grande número de inclusões de alumina nos aços UBC (ASM, 1998; Rizzo, 2006).

### **3.2.2 Aços IF**

Os aços IF, mais especificamente, são definidos por teores de carbono de até 0,003% e manganês menor do que 0,18% em peso. Seus baixíssimos teores de nitrogênio para prevenir envelhecimento e hidrogênio para evitar floculação, alinhados aos teores citados de C e Mn resultam na ausência de elementos intersticiais que os caracterizam como aços IF (Rizzo, 2006, p. 33). Por vezes, pequenas adições de P, Mn e Si são feitas para conferir maior resistência aos interstícios, o que resulta nos aços *Interstitial Free High Strength Steel* (IF-HSS) que mantêm a excelente deformabilidade sem prejudicar a soldabilidade deste material.

## **3.3 Inclusões**

Inclusões são partículas ou resquícios de componentes químicos que não puderam ser removidos do banho metálico e estão presentes em todo e qualquer tipo de aço produzido, pois são resultados naturais da concepção do aço. Resultando da reação do banho metálico com elementos de diferente natureza, as inclusões recebem o nome de não metálica por sua característica química de composto não metálico, sendo mais comuns em tipos de óxidos, sulfetos e espinélios. Nos tópicos subsequentes será abordado desde suas fontes e origens, até seus efeitos no produto final e controle durante o processo de fabricação do aço.

### **3.3.1 Fontes**

Escória oxidante, ar atmosférico, material refratário e outros a serem vistos nesse tópico, são conhecidos fatores que servem de fontes de inclusões não-metálicas durante todo o processo de refino do aço (Goto; Miyazawa, 1998; Tanaka *et al.*, 1994).

Wang *et al.* (2023) realizou um estudo em escala laboratorial que avalia a capacidade formadora de inclusões tanto da escória como do cadiño, refratário, na produção de aços altos em Al e Mg e comprovou o surgimento de espinélios. As inclusões originalmente presentes no aço antes do tratamento consistem de  $MgS$ ,  $AlN$ ,  $MgAl_2O_4$ , e  $AlN - MgS$ , e com a adição da escória para início do tratamento, a rota de formação de inclusões se deu conforme explicado na Equação 3.1 e Equação 3.2.



Uma das principais fontes de inclusões não-metálicas nos aços são os desoxidantes diversos, como a alumina ( $Al_2O_3$ ), óxido de silício ( $SiO_2$ ) e o óxido de manganês ( $MnO$ ), mas Ti, V e Zr também podem ser utilizados para desoxidar o banho metálico e contribuírem para a formação de inclusões também (Goto; Miyazawa, 1998; Nafisi *et al.*, 2016). O manganês é comumente utilizado como elemento de liga para melhorar a resistência mecânica e a tenacidade, além de ser inserido no sistema pela reação com as paredes do material refratário (Gamutan; Miki; Nagasaki, 2020).

Ti, V e Zr são bem efetivos para realizar o refinamento dos grãos na microestrutura de aços, porém, não é recomendada a adição destes elementos em aços estruturais que precisarão

ser tratados termicamente por têmpera e revenimento, uma vez que seus carbetos são bastante estáveis e de difícil dissolução em austenita (ASM, 1998). Estudos no efeito de aços acalmados por Ti e Zr podem ser obtidos a partir da leitura de Chai *et al.* (2014) Chai *et al.* (2008) e Tanaka *et al.* (1994)

O alumínio é geralmente adicionado como redutor durante os processos de refino secundário (Ghosh, 2001). As inclusões de alumina podem ser formadas também a partir do alumínio presente como impureza nas matérias-primas do aço ou demais aditivos, como sucata ou minérios de ferro de baixa qualidade (Poirier, 2015).

Além do citado, pode-se também obter inclusões a partir de aluminatos de cálcio, espinélios e nitretos, bem como a partir da reoxidação do aço líquido pelo contato com o ar, aquecimento químico ou até mesmo por contato com o pó fluxante do molde (Leão, 2018).

### **3.3.2 Origens**

As inclusões podem ser classificadas de duas formas diferentes no que diz respeito a origem, podendo ser endógenas ou exógenas. Inclusões endógenas são aqueles oriundas de etapas do processo de aciaria e de composição predominante por óxidos e sulfetos, já as inclusões exógenas são oriundas de agentes externos, tais como pedaços de material refratário e escória retida, por exemplo (Costa e Silva, 2018; Valdez; Shannon; Sridhar, 2006; Carneiro *et al.*, 2020).

As inclusões endógenas podem ser subclassificadas ainda como secundária, ternária e quaternária, as quais se formam em cima de sua precursora, ou seja, a secundária cresce em cima da primária, a ternária em cima da secundária e etc (Emmel *et al.*, 2013; Mantovani *et al.*, 2011; Sahai; Emil, 2008). Subclassificações essas que não serão abordadas mais a fundo neste trabalho pois além de não serem muito usadas podem causar maiores confusões desnecessárias ao conteúdo, tal como afirmado por Costa e Silva (2018).

Rotuladas como tipo-A, tipo-B e tipo-C, as inclusões do tipo-A no aço são predominantemente vítreas, não precipitando uma grande fração de volume de fases cristalinas duras antes e durante o processo de trabalho a quente. Estas inclusões tendem a se alongar durante o trabalho a quente, enquanto mantêm uma composição química homogênea, conforme observado por (Sahai; Emil, 2008).

Por outro lado, as inclusões do tipo-B no aço são compostas por fases quebradiças, algumas das quais se rompem durante trabalhos a quente, resultando em descontinuidades no material. Essas fases frágeis originam-se da separação de fases durante o resfriamento de

inclusões líquidas, da formação de estruturas compostas devido à aglomeração de partículas frágeis e plásticas, ou da transformação da superfície de uma partícula de inclusão frágil em uma crosta deformável, como discutido por (Sahai; Emil, 2008).

As inclusões do tipo-C consistem em pequenas partículas aglomeradas que se formam enquanto o aço está em estado líquido e permanecem presentes após o processo de solidificação. Exemplos clássicos dessas inclusões incluem os *clusters* de alumina, conforme destacado por Sahai e Emil (2008).

### **3.3.3 Efeitos**

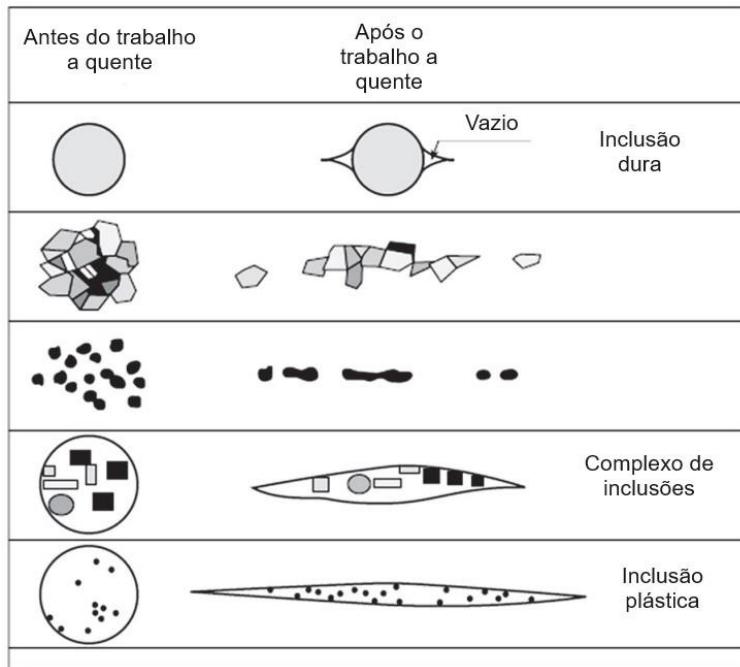
De acordo com diversas características das inclusões, composição morfologia, distribuição e demais, as propriedades do material serão afetadas a depender do tipo de trabalho realizado no mesmo após manufatura, tal qual o ocasionado pelas estilhas. Estilhas são defeitos superficiais concebidos durante o lingotamento contínuo que em muitos casos são consequência direta da presença de inclusões, mas podem ser definidos por dois grupos, estilhas à base de inclusões não-metálicas e estilhas à base de óxidos de ferro (FeO) Koba, Fushiwaki e Nagataki (2019) e Roy, Gorain e Suresh (2019).

Inclusões com alto teor de dureza tendem a formar vazios quando submetidas a deformações mecânicas para fins de fabricação de demais produtos, ao aplicar esforços do tipo laminação em chapas de aço as respectivas inclusões irão sofrer alterações estruturais de acordo com as suas características, se deformando mais ou menos do que a matriz de aço na qual estão inseridas (Leão, 2018; Sahai; Emil, 2008).

Nesse sentido, as inclusões mais duras, tais como as que são a base de alumina, tendem a formar vazios na interface metal-inclusão em processos de laminação, por exemplo. Na etapa posterior, que poderá ser de estampagem, a chapa tenderá a se romper, uma vez que os vazios gerados na laminação irão nuclear trincas durante os esforços da estampagem, conforme o estudado por Buakaew *et al.* (2007) e ilustrado na Figura 3 (Costa e Silva, 2019; Sahai; Emil, 2008).

Inclusões de formato semelhante ao do tipo “complexo de inclusões” e “inclusões plásticas” apresentadas na Figura 3 são prejudiciais para a ductilidade do material por estarem na mesma direção de laminação e por apresentarem comportamento anisotrópico (Leão, 2018). Já as inclusões de formato semelhante ao apresentado no exemplo de vazio gerado por inclusão dura globular ou *butterfly crack* na Figura 3, foram estudadas por Guan *et al.* (2017) e relatam que o módulo de elasticidade das inclusões chega a 500GPa, muito acima dos 209GPa da matriz de aço, o que leva a formação das referidas trincas.

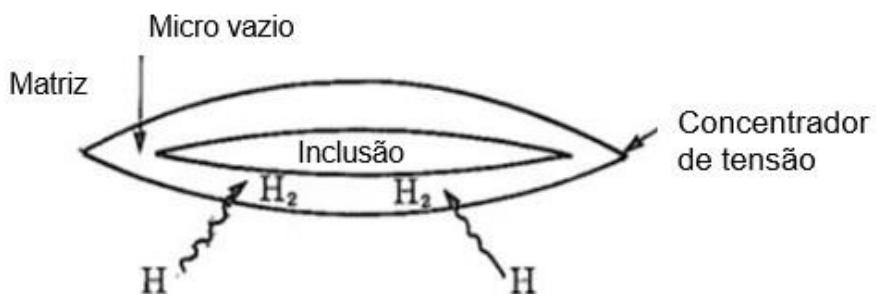
Figura 3 – Ilustração do efeito da laminação a quente nas inclusões e na interface matriz-inclusão.



Fonte: Costa e Silva (2019).

Yin *et al.* (2015), Jin, Liu e Cheng (2010) e Zhang *et al.* (2003) estudaram mais a fundo o surgimento de trincas induzidas por hidrogênio e revelam que as trincas têm maior propensão a se formarem em inclusões muito duras e de formato esférico enquanto trincas mais alongadas não apresentam mesma tendência de nucleação desse defeito, mas, conforme ilustrado na Figura 4, as inclusões de formato alongado geram micro-vazios na interface metal-inclusão que concentram  $H_2$  e geram pontos concentradores de tensão que levam ao surgimento de trincas do tipo linha central (*center line-cracking*) e trincas do tipo bolhas (*Blister cracking*), conforme mostrado no estudo de Yin *et al.* (2015).

Figura 4 – Esquema ilustrativo de como se dá a fragilização por hidrogênio gerada por uma inclusão de sulfeto de manganês.



Fonte: Yin *et al.* (2015).

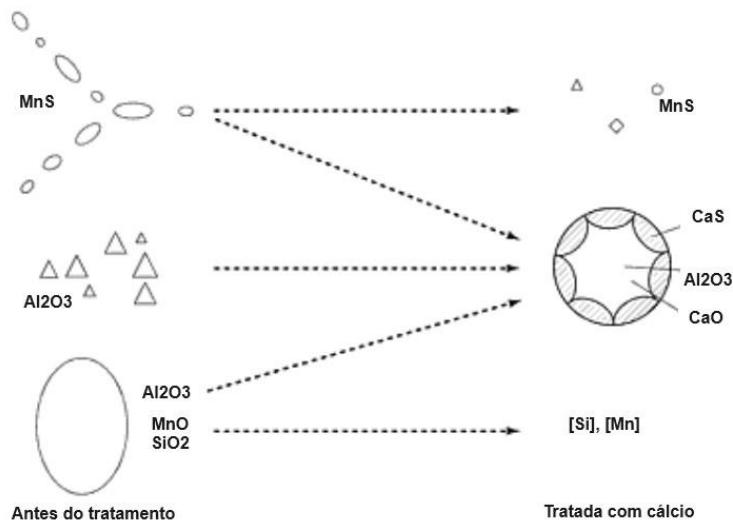
Os efeitos das inclusões não-metálicas afetam não somente o material e a sua aplicabilidade, mas também as estações por onde ela é submetida para tratamento e transporte. Carneiro *et al.* (2020), Moreira *et al.* (2019) e Basu, Choudhary e Girase (2004) são exemplos dos diversos estudos envolvendo o efeito de inclusões não-metálicas nas instalações das usinas siderúrgicas. A alumina tem uma forte tendência a aglomerar-se durante a etapas que envolvem a sua remoção como na estação RH (Zhu *et al.*, 2016) ou no distribuidor (Moreira *et al.*, 2019) o que resulta no surgimento de inclusões maiores no produto final e causam entupimentos, os chamados *clogging*, nas passagens, reduzindo a qualidade do produto e prejudicando o processo.

O problema se estende para a produção de aços acalmados ao alumínio como os aços IF, conforme mencionado anteriormente (Carneiro *et al.*, 2019), pois em aços onde deseja-se adicionar titânio, foi comprovado um aumento significativo no aumento da quantidade e tamanho de inclusões de alumina contendo titânio, compostos bifásicos que têm maior afinidade com o metal líquido, o que resulta na formação de *clusters* no produto final (Basu; Choudhary; Girase., 2004).

### **3.3.4 Controle**

A morfologia é um fator importante de se observar no ato do estudo e classificação das inclusões pois não só trazem informações sobre a sua composição, mas indicam qual etapa do processo produtivo elas podem ter sido geradas (Sahai; Emil, 2008). Nesse sentido, analisar e controlar suas morfologias ajuda a obter aços com propriedades mais isotrópicas pela mudança de estrias de sulfeto para sulfetos globulares pela adição de cálcio, conforme ilustrado na Figura 5 (ASM, 1998).

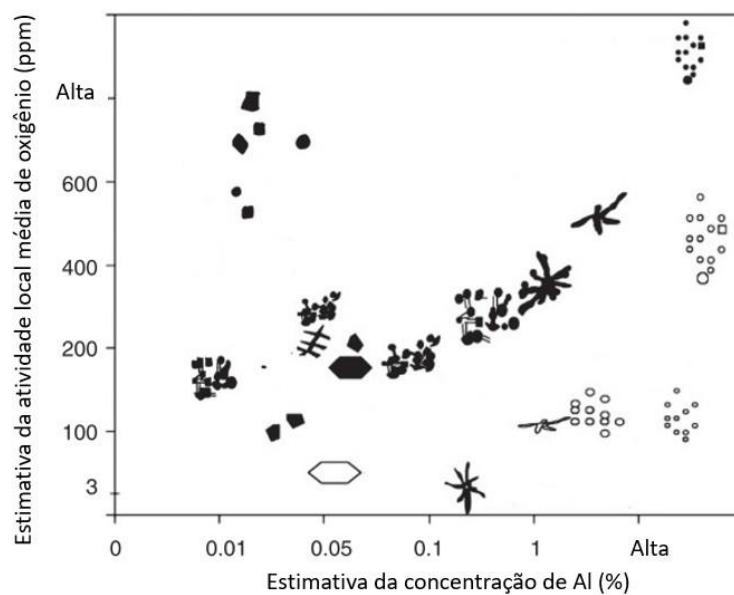
Figura 5 – Representação esquemática mostrando a modificação morfológica de inclusões pelo tratamento de cálcio.



Fonte: ASM (1998).

A Figura 5 traz uma representação de possíveis morfologias para inclusões de alumina como função do oxigênio e da supersaturação da alumina, onde Costa e Silva (2018) menciona e Tiekink *et al.* (2010) demonstra que além das variáveis citadas, a morfologia pode variar com o tempo de processamento da etapa em questão.

Figura 6 – Compilado da modificação da morfologia de inclusões de alumina em percentual de Al por atividade média local de oxigênio.



Fonte: Adaptado de Costa e Silva (2018).

A adição de terras raras no banho metálico ajuda a controlar a morfologia e o surgimento de inclusões não-metálicas, como apresentado por Jiang *et al.* (2023), onde foi estudado os efeitos da adição de cério em aços Ultra-High Strength Steel (UHSS) e comprovado que a adição de baixo teor de Ce (0,0367%Ce) afeta positivamente na transformação de inclusões a base de enxofre em inclusões menores e esféricas de Ce, o que resulta em melhora na resistência ao impacto. Em contra partida, a adição de alto teor de Ce (0,0792%Ce) tem resultados negativos pois aumenta consideravelmente o número de inclusões duras e quebradiças de formato poligonal.

Um bom parâmetro para o controle de qualidade de limpidez do aço é a composição adequada da escória (Costa e Silva, 2018), pois ela permite uma melhor absorção e e diversas formas de remoção de inclusões não-metálicas, como afirmado por Costa e Silva (2018) e confirmado por Pan *et al.* (2023), Wang *et al.* (2023), Zeng *et al.* (2022) e Tang (2011).

A variação de viscosidade da escória é um dos fatores que ajuda a controlar sua interação com o metal líquido, conforme estudado por Pan *et al.* (2023), por exemplo, o qual avaliou a eficiência de remoção de inclusões de SiC com a variação de viscosidade da escória e afirma que um aumento na temperatura de fusão, na proporção de escória para Si-10%SiC, gera uma alteração na composição da escória e, em tempo de espera mais longos, são mais eficazes na remoção das inclusões. Esses parâmetros reduzem a viscosidade do sistema, melhorando a fluidez da liga líquida e a capacidade de transferência de massa da escória, o que afetou a migração das inclusões do tipo SiC.

A engenharia de inclusões é uma área de estudo e prática dentro da metalurgia e engenharia de materiais que se concentra no controle e manipulação das inclusões não-metálicas em materiais, como aços e ligas metálicas segundo Holappa e Wijk (2014).

O objetivo da engenharia de inclusões é minimizar ou eliminar a presença de inclusões indesejáveis nos materiais, garantindo assim a qualidade e o desempenho adequado dos produtos finais (Holappa; Wijk, 2014). Isso é feito através do desenvolvimento de técnicas e estratégias de controle durante os processos de fabricação, desde a aciaria até o tratamento térmico e acabamento, o que classifica os trabalhos de Jing, Shu-Sen e Zi-Jian (2013), Zheng *et al.* (2022), Anmark, Karasev e Jönsson (2017) e Silva, Pereira e Heck (2019) além dos referenciados trabalhos no Subitem 3.3.4 deste trabalho como excelentes e atuais exemplos da engenharia de inclusões.

Outra área importante da engenharia de inclusões é a análise e caracterização dessas partículas. Métodos como MEV, MO e análise de imagem são utilizados para identificar, quantificar e avaliar as características das inclusões presentes nos materiais, conforme avaliado

por Bartosiaki *et al.* (2015) e no desenvolvido por Mayerhofer (2021) em sua tese. Isso permite entender melhor a origem das inclusões e desenvolver estratégias mais eficazes para controlá-las de forma mais assertiva para cada situação.

Segundo Bartosiaki *et al.* (2015), a área representativa é um aspecto importante a ser considerado, pois é uma limitação ao utilizar o MEV. Essa área representativa pode não ser suficiente para fornecer uma visão geral e precisa da amostra como um todo. Isso pode levar a conclusões errôneas sobre as propriedades do material. Ao estar ciente dessa limitação e adotar estratégias adequadas, é possível obter resultados mais precisos e confiáveis. Detalhes de funcionamento do MEV serão abordados no Subitem 3.4.2, mas por ora, a Tabela 2 traz uma melhor visualização de diversos estudos e explicados mais a fundo por Bartosiaki *et al.* (2015) e seus parâmetros considerados em MEV.

Tabela 2 – Ajuste de parâmetros no MEV.

Autor	Material	Área (mm <sup>2</sup> )	Energia do Feixe (kV)	Dist. Trabalho (mm)	Tamanho Mínimo da Partícula (μm)	Tempo Partic.
Pereira <i>et al.</i> (2020)	SAE 52100	62	20	16-18	4	Mín.: 1s Máx.: 2s
Kaushik; Lehmann; Nadif (2012)	AHSS	150-180	20	-	-	-
Michelic, Wieser e Bernhard (2011)	Aço Inoxidável	100-200	15	10	4	3s
Kaushik, Pielet e Yin (2009)	Aço	180	20	15-20	1	2s
Graham e Yang (2003)	HY-100 Lab.: Desoxi. Al-Mg	>30	-	-	1.1	-
Verma <i>et al.</i> (2012)	Ind.: AlKLC	-	20	-	-	-
Nuspl <i>et al.</i> (2004)	Aço BC	-	15	18-20	1	(EDX) 3s

Fonte: Adaptado de Bartosiaki *et al.* (2015).

### 3.4 Microscopia

A microscopia desempenha um papel crucial no estudo de microestruturas e partículas, pois ela abrange desde a praticidade do MO até a complexidade e versatilidade do MEV e demais microscópios de desenvolvimento mais moderno. O princípio de funcionamento dos microscópios é o mesmo, mudando apenas a sua natureza, *i. e.*, todos fazem uso de lentes para corrigir e direcionar as ondas de modo que seja possível obter informações sobre a amostra

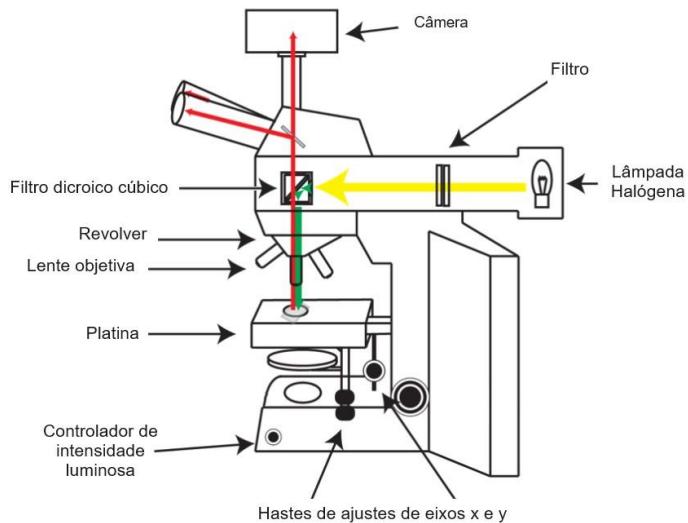
em estudo. Nesse sentido, a natureza das ondas utilizadas é o fator determinante do poder de resolução do equipamento (Mannheimer *et al.*, 2002).

### ***3.4.1 Microscópio Óptico***

O microscópio óptico tem como fonte luminosa lâmpadas do tipo halógenas, cujos raios luminosos irão passar por um filtro polarizador antes de incidirem na amostra. Nos microscópios metalográficos, representados na Figura 13, que diferem dos convencionais equipamentos utilizados em biologia e medicina por não usarem luz transmitida e sim refletida, são compostos pelos mesmos componentes anteriormente citados, contendo, porém, o adicional de um filtro dicroico cúbico que permite a passagem de determinados comprimentos de onda, os reflete em direção a amostra e e capta, através da lente objetiva, as ondas que retornam perpendicularmente e as direciona à lente ocular e/ou câmera (Mannheimer *et al.*, 2002; Holik, 2001).

Existem dois modos de operação nos microscópios ópticos, o modo campo claro, que é o sistema definido no parágrafo anterior, consiste em captar a luz refletida por superfícies planas da amostra, em relação à platina do equipamento, deixando mais claras essas regiões e tudo que não for paralelo ficará em tons de preto, a depender da angulação relativa, sendo esse o modo de estudo padrão. O modo campo escuro faz o contrário, ele permite captar os raios refletidos de forma dispersa e ignora os raios paralelos, deixando completamente escura a superfície paralela à platina e evidenciando regiões de imperfeição, sendo essencial para avaliar acabamento de preparos metalográficos (Mannheimer *et al.*, 2002; Holik, 2001).

Figura 7 – Diagrama esquemático do sistema de componentes de um MO voltado para metalografia.

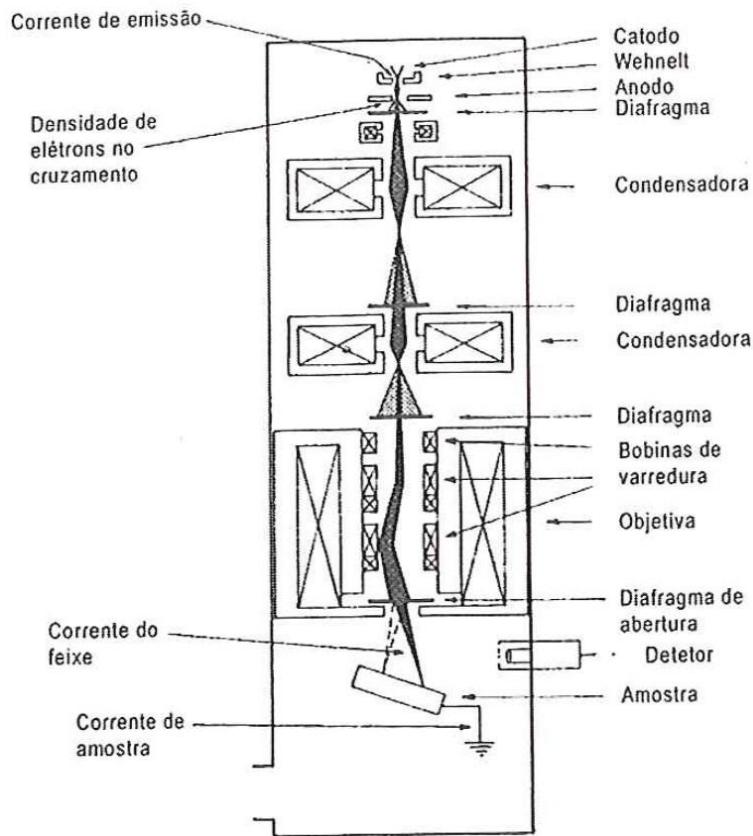


Fonte: Intitute [...] (2023).

### **3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura**

O MEV é um equipamento que oferece altíssima resolução e definição de imagens ao passo em que providencia aumentos superiores a 2000x. Para alcançar tais características, o MEV faz uso de uma coluna óptico-eletrônica evacuada para controlar, ordenar e focar os elétrons, representada na Figura 8. Ela é composta por um canhão de elétrons que faz o papel de catodo, um anodo, 3 lentes eletromagnéticas, sendo 2 condensadoras, que desmagnificam o feixe de elétrons, e uma objetiva, que foca o feixe na amostra (Mannheimer *et al.*, 2002).

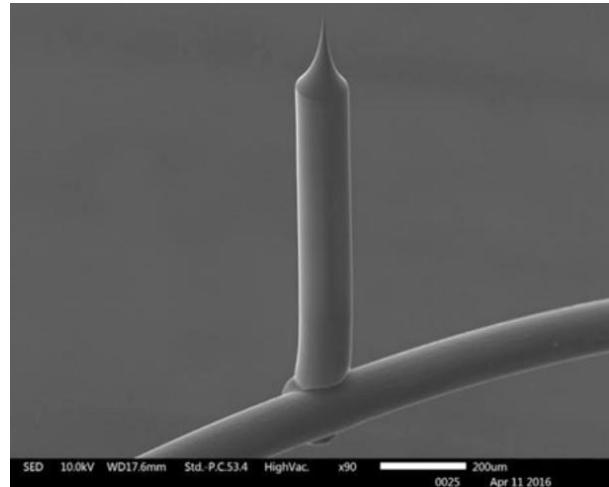
Figura 8 – Exemplificação esquemática de uma coluna ópticoeletrônica do MEV.



Fonte: Mannheimer *et al.* (2002).

O canhão de elétrons é composto por uma fonte de alta tensão ligada a um filamento de emissão termiônica de tungstênio ou por uma agulha de diferentes tipos (Hexaboreto de lantânia, emissão de campo Schottky ou a frio), performando o papel de um cátodo produzindo um feixe de elétrons que serão acelerados para baixo pelo ânodo, na direção da coluna ópticoeletrônica por diferença de potencial. A diferença entre estas opções irá refletir especificamente na capacidade de foco do microscópio, pois quanto menor for a área de emissão, mais coerentes será o feixe. A agulha encontrada em equipamentos do tipo *Field Emission Gun* (FEG), representado na Figura 9, que fazem uso de monocristais de tungstênio com uma ponta afilada de raio menor do que 100nm. A combinação desses fatores permite que o FEG emita elétrons em temperatura ambiente (Goldstein *et al.*, 2017; Mannheimer *et al.*, 2002).

Figura 9 – Foto de uma agulha de canhão de elétrons do tipo FEG.

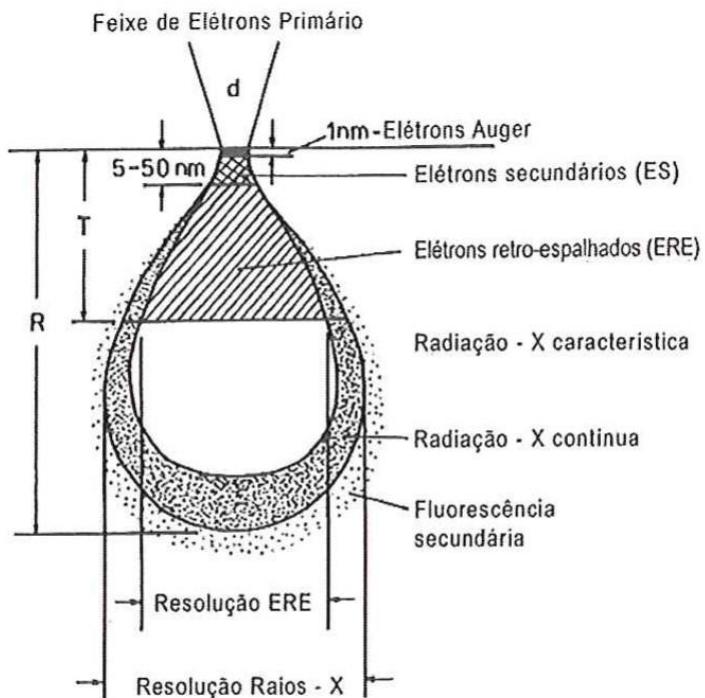


Fonte: Ul-Hamid (2018).

As lentes eletromagnéticas possuem bobinas de cobre que passam corrente elétrica para gerar o campo magnético que irá afetar o feixe do canhão. Altas correntes na bobina resultam em lentes condensadoras mais fortes que, por sua vez, resultam em lentes com alto potencial focal. As lentes objetivas recebem o feixe duplamente desmagnificados e realizam o foco do feixe de elétrons, pelo mesmo princípio funcional das lentes condensadoras, e resulta em um feixe com diâmetro pequeno, denominado de *spot* que incidirá e fará a varredura na amostra (Mannheimer *et al.*, 2002).

O feixe colimado de elétrons, definido por EP, mapeia a amostra gerando uma série de interações que denomina-se pera ou gota de interações, conforme ilustrado na Figura 10. A profundidade da pera na amostra depende da tensão de aceleração do feixe de EP, tal que quanto mais alta, maior será a profundidade alcançada (Mannheimer *et al.*, 2002).

Figura 10 – Ilustração da pera de interações gerada pela reação do feixe de EP com a superfície da amostra



Fonte: Ul-Hamid (2018).

Elétrons Retro-espalhados (ERE) são elétrons oriundos do feixe incidente e são chamados assim pois ao penetrarem na estrutura da amostra eles interagem com os átomos e seus elétrons e sofrem um redirecionamento consequente de uma interação elástica com a amostra, interação essa que será diferente para diferentes números atômicos. Essa característica faz com que o ERE sejam muito utilizados para avaliar amostras quanto aos diferentes componentes químicos nela presentes, gerando um contraste por composição química (Ul-Hamid, 2018).

O Elétrons Secundários (ES), em contra partida, originalmente pertencem à amostra-alvo e resultam da interação inelástica do feixe incidente com os átomos da amostra. Se impactados com a quantidade certa de energia, esses elétrons se desprendem da amostra e, por estarem muito próximos da superfície, são ejetados e detectados, formando a imagem por diferença de contraste topográfico. Uma interação curiosa sobre os ES é o efeito de borda, uma vez que esses elétrons são originados próximos da superfície, se a face incidente tem ângulo desfavorável à ejeção desses elétrons ao detector, essa região irá aparecer mais escura na imagem pela ausência de elétrons, enquanto que o contrário gera imagens mais claras pelo elevado número de elétrons (Ul-Hamid, 2018).

A combinação dos modos de imagem por ES ou ERE com a mecanização autônoma de alguns equipamentos mais modernos, permite realizar a varredura da amostra pela técnica de campo amplo, que consiste na determinação da área a ser considerar, seu respectivo local na amostra e a magnificação a ser considerada, definidos estes parâmetros o equipamento então realiza o mapeamento e compila as diversas fotos capturadas em uma única grande imagem que possibilita uma visualização geral da amostra para análises posteriores pertinentes (Goldstein *et al.*, 2017).

A radiação característica é um fenômeno da interação de elétrons externos com elétrons da camada de valência do alvo, que, ao serem ejetados, emitem raios-x característicos e possibilitam a análise microquímica do tipo *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) que pela captação em detektors do tipo *Wavelength Dispersive X-Ray Spectroscopy* (WDS) permite realizar análise química elementar na amostra, sendo extremamente útil em diversos estudos por permitir análise não somente qualitativa, mas também quantitativa (Mannheimer *et al.*, 2002).

### 3.4.2.1 ASCAT

Baseado em um MEV de última geração e um software inteligente e especializado, *Automated Steel Cleanliness Analysis Tool* (ASCAT), como o próprio nome sugere, é uma ferramenta que visa melhorar o processo de caracterização de inclusões, reduzir o tempo de análise e permitir ajustes no processo de produção para aumentar a qualidade do aço e evitar problemas como obstruções em bicos no distribuidor do lingotamento contínuo, por exemplo. Além disso, a ferramenta oferece suporte à pesquisa e desenvolvimento de materiais, ajudando a otimizar a produção, aumentar lucros e economizar energia (Casuccio *et al.*, 2005; Lyons; Kaushik, 2011; Passigatti *et al.*, 2022).

O ASCAT tem como diretório de funcionamento fazer a detecção da partícula e medir seu tamanho, depois performa o EDS em diferentes pontos ao longo da partícula, identifica os picos da espectroscopia e processa as informações identificadas através de um software de análise de espectros. Com base nessa análise ele então classifica a partícula como uma inclusão do tipo óxido, sulfeto, espinélio, dentre outros (Casuccio *et al.*, 2005).

Dessa forma, segundo Casuccio *et al.* (2005), o ASCAT é uma tecnologia que por mais de 20 anos vem transformando o modo como a análise de inclusões em aço é realizada, permitindo aos produtores avaliarem com maior precisão a qualidade do material e identificar oportunidades para otimizar o processo produtivo em tempo real. A ferramenta possibilita a classificação detalhada das inclusões com base em características químicas e morfológicas, o

que é essencial para garantir a pureza e a qualidade do aço. Além disso, sua eficiência é destacada pela capacidade de analisar centenas de inclusões em questão de minutos, o que acelera os diagnósticos e as tomadas de decisão. O ASCAT também se destaca por sua facilidade de uso, eliminando a necessidade de operadores altamente especializados, e por sua robustez, que garante confiabilidade mesmo em ambientes industriais exigentes. Outro diferencial importante é a qualidade de suas imagens, o que permite que ele seja utilizado tanto para análise de inclusões quanto como um microscópio eletrônico de varredura convencional.

## 4 MÉTODOS

### 4.1 Amostragem

As amostras deste estudo foram coletadas no distribuidor da etapa de lingotamento contínuo e fornecidas ao autor deste trabalho por uma siderúrgica brasileira no estado do Ceará. Duas amostras de aço UBC de duas corridas diferentes foram usadas neste estudo, que estão representadas pela Figura 11, fornecidas já usinadas e de diâmetro igual a 2,80cm e espessura de 1,30cm e 1,80cm para a amostra A e B, respectivamente.

Produzidas pela rota de beneficiamento por estação RH e com consumo total de alumínio igual a 2,40 e 1,99 kg/t.aço para as amostras A e B respectivamente, a composição química das mesmas está resumida na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química das amostras em estudo.

Amostras	Elementos (%)*									
	C	Al	Mn	P	S	Cu	Ni	Si	Mo	N
A	0.0028	0.0367	0.0820	0.0073	0.0036	0.0190	0.0050	0.0110	0.0020	0.0032
B	0.0029	0.0460	0.0820	0.0093	0.0045	0.0250	0.0080	0.0090	0.0020	0.0024

\* Teores de Ca e  $O_{total}$ , não disponibilizados pela empresa.

Fonte: Adaptado da siderúrgica.

Figura 11 – Foto das amostras de aço UBC como recebido.



Fonte: Produzido pelo autor.

## 4.2 Materiais

Preparadas na politriz de modelo Aropol 2V, conforme visto na Figura 12, que foi cedida pelo Laboratório de Ensaios Mecânicos. Possui aumento gradativo de rotações, variável de 300 a 600 RPM e frequência de 60Hz com 380V trifásico.

Figura 12 – Politriz modelo AROPOL 2V utilizada no estudo.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para a microscopia óptica, foi utilizado o MO de modelo DMI3000 M da Leica®, cedido pelo Laboratório de Pesquisa em Corrosão do DEMM-UFC. O equipamento possui iluminação do tipo halógena de 12V e 100W de potência, foram utilizadas, uma lente objetiva de aumento 500x, uma câmera de modelo DFC295 e o software LAS para capturar as imagens.

Figura 13 – Microscópio óptico de modelo DMI3000 M utilizado no estudo.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para comparar as metodologias em questão, foi utilizado o ASCAT – TESCAN VEGA 3, de uma das filiais da siderúrgica no estado do Espírito Santo, conforme a Figura 14.

Figura 14 – ASCAT utilizado no estudo.

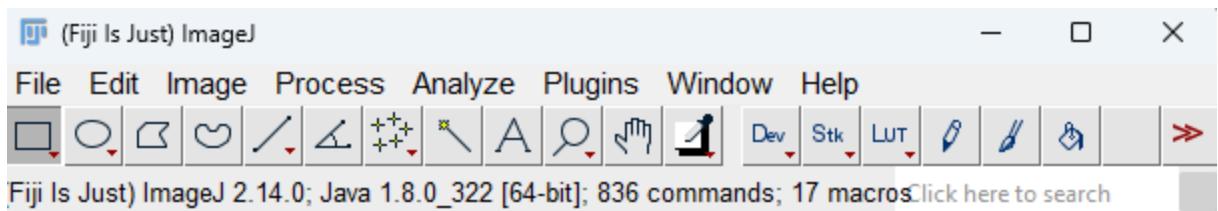


Fonte: Produzido pelo autor.

Desenvolvido por Wayne Rasband em 1997, o ImageJ, representado na Figura 15, é um *freeware open source* desenvolvido para processamento de imagens, inicialmente projetado para contar células no estudo biológico e tem se provado ser extremamente útil e versátil para outras áreas de estudo, performando desde medições simples até compilações de grandes quantidades de imagens tiradas em sequência (SCHNEIDER *et al.*, 2012). O ImageJ versão 2.0, foi usado para medir e ampliar as inclusões das fotos das amostras com o intuito de ter à

disposição a vasta gama de recursos da ferramenta, como os macros, por exemplo, que são desenvolvidos pela comunidade e ampliam ainda mais a utilidade do *freeware* mas que não serão usados para o presente estudo.

Figura 15 – Janela de abertura do ImageJ.

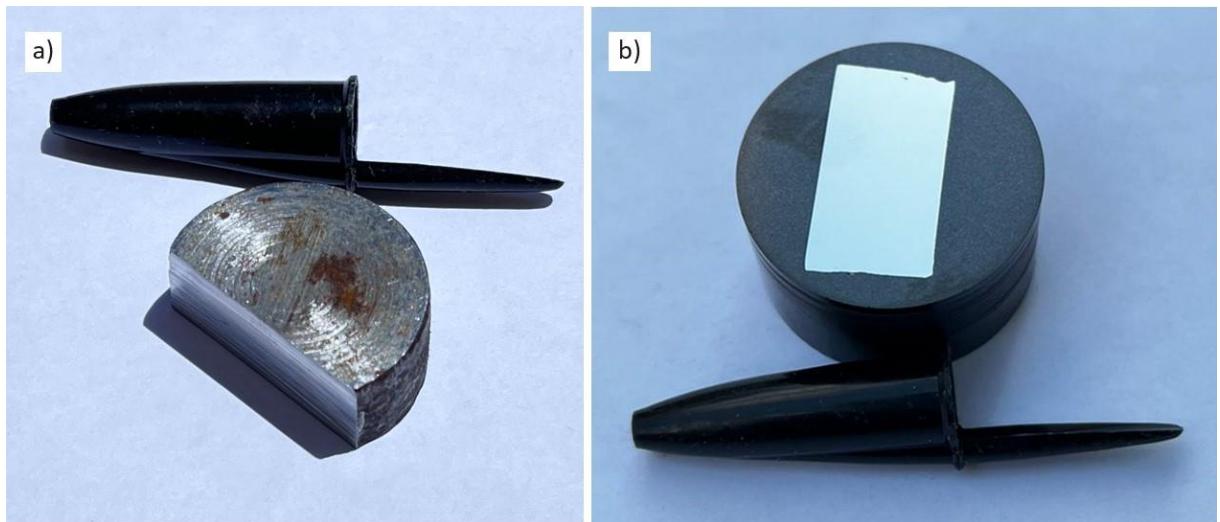


Fonte: Produzido pelo autor.

#### 4.3 Metodologia

Semelhante a norma ASTM E-45 para análise de inclusões não metálicas, a metodologia Yawata é uma proposta comercial dentro do âmbito prático das siderúrgicas que não possui muitos registros no âmbito acadêmico. A metodologia Yawata foi, então, adotada, tomando por base a sua aplicação no trabalho de Leão *et al.* (2017) para seguirmos com o presente trabalho. A mesma pede que os estudos sejam conduzidos em MO com aumento de 500x e um acessório reticulado com arestas de 10x10 micrões seja acoplada à lente ocular do equipamento. O estudo consiste em classificar inclusões por tamanho, maiores do que 10 $\mu\text{m}$  nas seguintes faixas: de 10 a 20, 20 a 40, 40 a 100, 100 a 400 e maiores do que 400 $\mu\text{m}$ , e por tipo: alumina, *clusters*, globulares e outras. Em vista da característica das amostras, foi adotado o intervalo inicial de 5 a 10 $\mu\text{m}$  para tornar a análise mais significativa. Maiores detalhes no Capítulo 5.

Figura 16 – Em 'a' um exemplo da região de corte e em 'b' o exemplo do complemento de seu corte tomado como amostra já embutida e pronta para análise em MO.



Fonte: Produzido pelo autor.

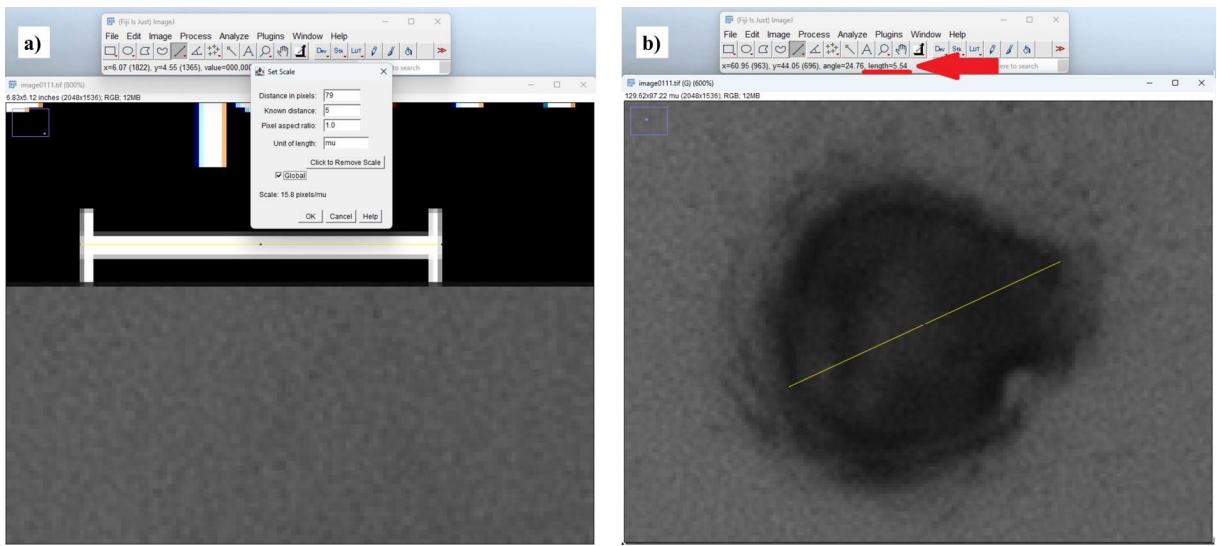
As amostras foram cortadas conforme a Figura 16-a, embutidas e preparadas conforme Leão *et al.* (2017), onde a área analisada foi mantida a  $75\text{mm}^2$  e foram utilizadas lixas de carbonato de cálcio de granulometrias variando de 80, 100, 200, 320, 400, 600 e 1200 mesh, finalizando com os polimentos em pasta de diamante nas seguintes medidas granulométricas  $6\mu$ ,  $3\mu$  e  $1\mu$ , sem performar ataque químico. Após trabalhadas ficaram conforme a Figura 16-b.

Quando prontas, as amostras foram levadas ao MO e foi usado um limitador de área de observação de furo redondo nativo do equipamento, o qual mede 5mm de raio que resulta em uma área de análise igual a  $78,54\text{mm}^2$  e mantida como padrão para o estudo. A amostra foi percorrida com a lente objetiva e fazendo uso da escala do software do microscópio, onde áreas com partículas maiores do que  $5\mu\text{m}$  foram fotografadas e salvas para posterior análise no ImageJ.

No ImageJ, foi feita a calibração da unidade de medida ( $\mu\text{m}$ ) em relação aos pixels da foto com base na escala presente nas imagens capturadas como mostrado na Figura 17.

A classificação das partículas quanto ao tipo de inclusão é estritamente feita pela observação de sua morfologia e comparação com a literatura, conforme exemplificado na Figura 18 qual é esse parâmetro, então é medido seu comprimento na maior seção da partícula presente na vista de estudo tal como apresentado na Figura 17-b.

Figura 17 – Em 'a' a calibração e em 'b' a medição no ImageJ.



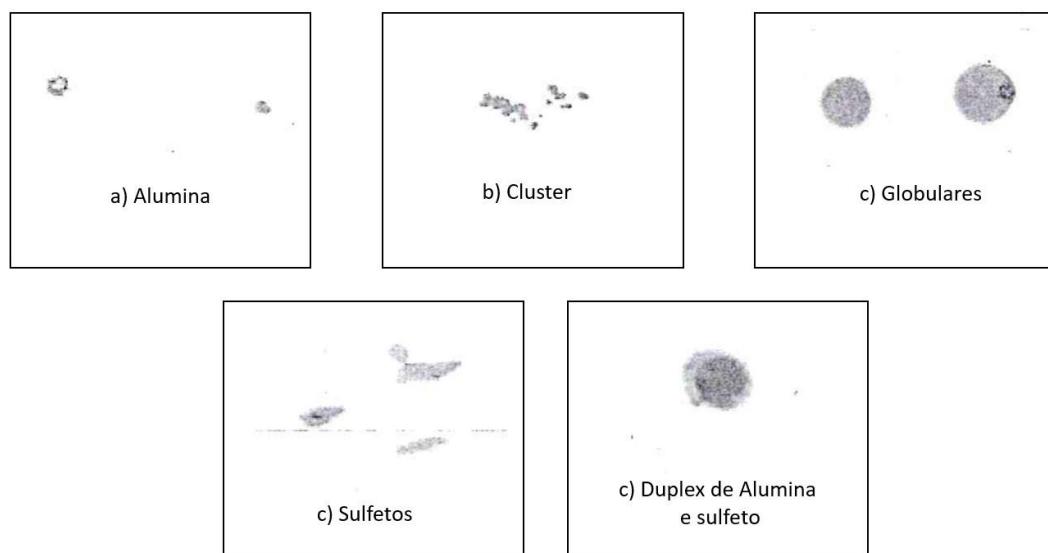
Fonte: Produzido pelo autor.

Os critérios para definir o tipo de cada inclusão foram:

- Alumina: composto geralmente apresentado se apresenta com morfologia poligonal, mas não se restringe apenas a essa. Quando observado no MO apresenta cor escura, conforme Figura 18-a;
- Cluster: aglomerado de quatro ou mais partículas que podem ser de alumina ou de sulfetos;
- Globulares: são partículas de forma circular normalmente oriundas da reação/tratamento do banho metálico com Ca ;
- Outros: são as inclusões que não se encaixam nas anteriormente apresentadas, podendo ser sulfetos, duplex, óxidos diversos, etc. Destacando que sulfetos são compostos de cor cinza claro e duplex apresentam duas fases, logo, cor preta/escuro e diferentes tons de cinza, quando observados pelo MO.

Os resultados de cada amostra são então discriminados nos intervalos de tamanho correspondente e apresentados em tabelas adaptadas a partir do padrão demandado pela metodologia Yawata, conforme exemplificado na Tabela 4, onde foi adicionada a coluna de 5 a  $10\mu\text{m}$  em vista da característica das amostras e do escopo deste trabalho.

Figura 18 – Classificação Yawata para inclusões quanto aos seus tipos com base em suas geometrias.



Fonte: Adaptado de Carneiro *et al.* (2020).

Tabela 4 – Tabela padrão para apresentar os resultados após análise

Tipo	Tamanho ( $\mu\text{m}$ )					
	5 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 100	100 a 400	>400
Alumina	-	-	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-
Cluster	-	-	-	-	-	-
MnS	-	-	-	-	-	-
Globular	-	-	-	-	-	-
Outras	-	-	-	-	-	-

Fonte: Produzido pelo autor.

Os respectivos resultados foram então comparados com os dados fornecidos pela filial da siderúrgica aferidos no ASCAT e apresentados no Capítulo 5, considerando que o ASCAT retorna o valor das contagens totais em relação à composição química de cada partícula e que ele considera, por padrão, partículas menores do  $20\mu\text{m}$ . Em vista disso, a segregação nos mesmos parâmetros da metodologia Yawata foi feita considerando apenas a composição química para alocar nos campos definidos na tabela e não a geometria de cada partícula, uma vez que para fins de validação a contagem total já é um bom indicativo de eficiência do estudo, bem

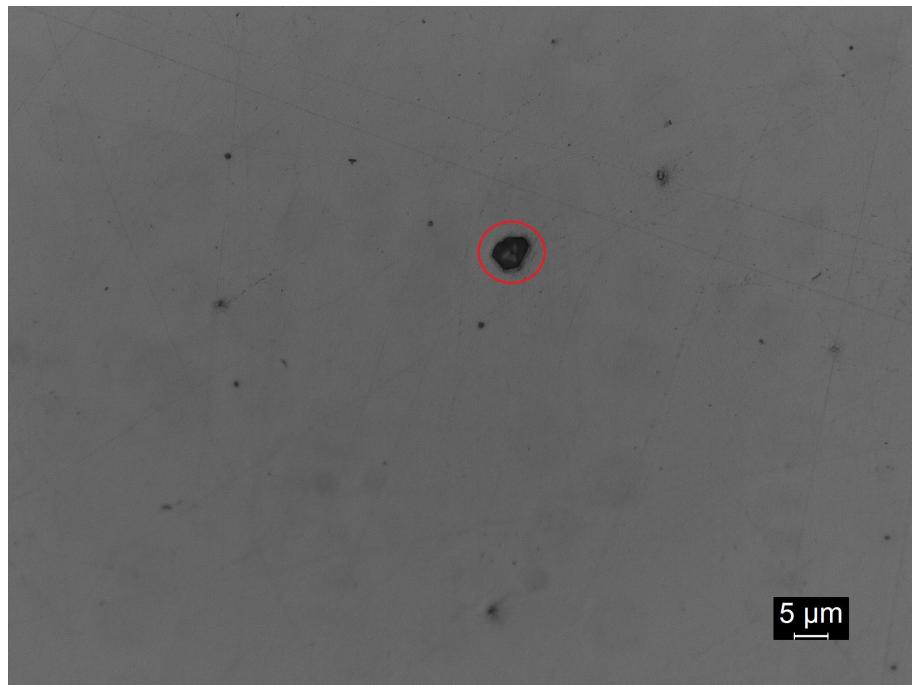
como focou-se nos resultados de interseção das duas tabelas de resultados, ASCAT vs Yawata Modificada, sendo  $5\mu\text{m}$  a  $10\mu\text{m}$  e de  $10\mu\text{m}$  a  $20\mu\text{m}$ .

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme apresentado no Capítulo 4, duas amostras de aço UBC foram analisadas neste estudo e conforme dados a serem apresentados na sequência, ambas apresentaram nível de limpidez condizente com o esperado para o tipo de material, sendo bem dispersa a quantidade de partículas e seus tamanhos dificilmente ultrapassam  $20\mu\text{m}$ .

Para a Amostra A foram obtidas 221 fotos no microscópio óptico, das quais apresenta-se 3 imagens para servir de exemplo de partículas encontradas como destaque nas Figuras 19, 20, 21. O resultado da classificação pela metodologia Yawata modificada, desenvolvida e proposta pelo presente estudo, e o resultado entregue pelo ASCAT encontram-se compilados nas Tabelas 5 e 6 respectivamente, para facilitar o entendimento e o confrontamento dos dados. A Figura 19, é um destaque de inclusão de alumina registrado pelo microscópio óptico utilizado no estudo.

Figura 19 - – Exemplar de uma inclusão de alumina encontrada na amostra A, observado através do microscópio óptico.

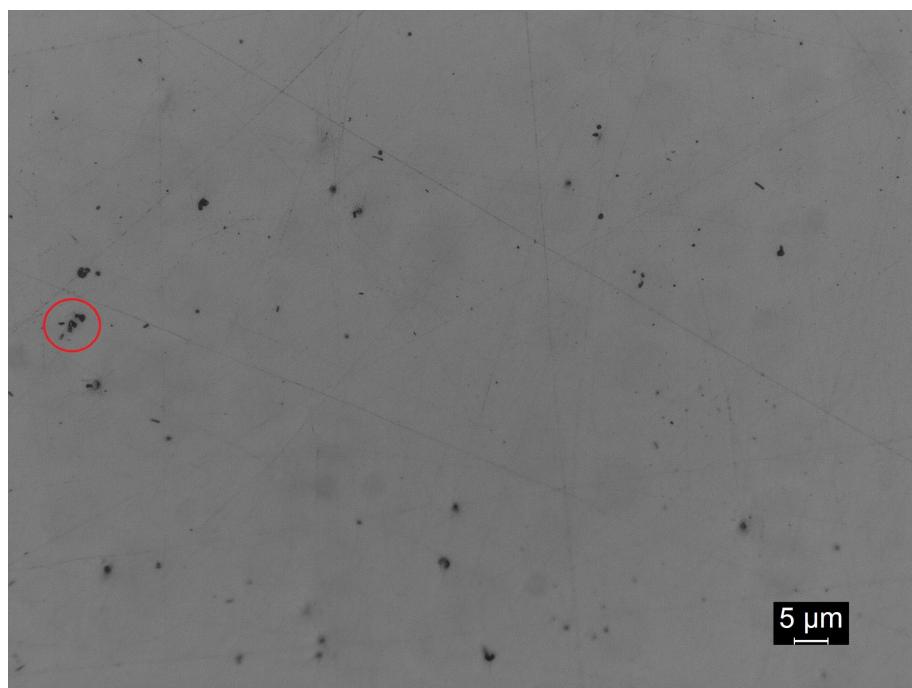


Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 19 podemos observar um exemplar de uma inclusão de alumina encontrada na amostra A, pois apresenta uma geometria facetada, ou seja, que aparenta ter faces retas como um polígono 3D em vista de corte transversal 2D, além da cor levemente clara no centro e predominantemente escura nos arredores de seu perímetro, indicando assim uma forte

semelhança com o exemplar de alumina encontrado na referência apresentada na Figura 18. O motivo do centro apresentar cor levemente mais clara do que o perímetro se dá em vista do preparo metalográfico da amostra que, ao polir a superfície da amostra com pasta de diamante, planifica levemente essa face da inclusão, resultando no efeito observado na imagem. A Figura 20 apresenta o exemplar de um cluster de alumina encontrado na amostra A capturado pela câmera do microscópio óptico do estudo.

Figura 20 – Exemplar de um cluster de alumina encontrado na amostra A, observado através do microscópio óptico.

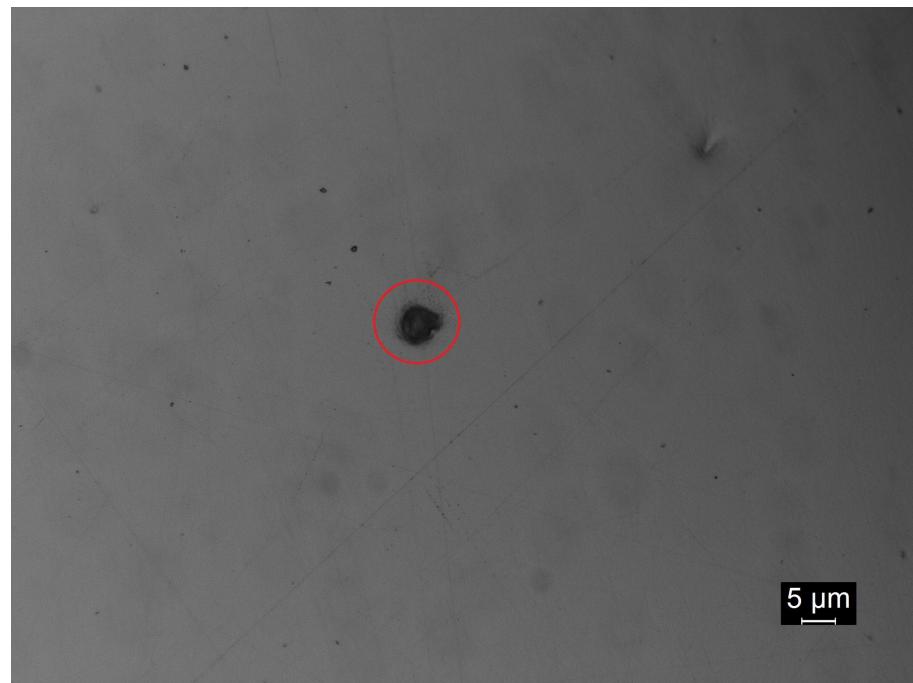


Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 20, é possível notar que pelo menos 4 partículas pequenas e de geometria poligonal estão igualmente espaçadas umas das outras e essa uniformidade de dispersão indica que o processo produtivo foi bem controlado, mas que ainda assim houve reoxidação do banho metálico. A maior medida do cluster é  $5,09\mu\text{m}$ , no limiar do intervalo estipulado, estando conforme a referência 'b' da Figura 18. Cluster de morfologia mais arredonda e maiores não são benéficos para a qualidade dos aços, pois indicam turbulência/agitação em excesso e maior facilidade de reoxidação por contato com a escória, porém este não é o caso presenciado na amostra em questão. Na Figura 21 pode-se observar um exemplar de inclusão do tipo duplex na Amostra A obtido pela câmera do microscópio óptico do estudo. Na Figura 21, em vista de sua característica geometria mais arredondada e cor mesclada entre preto, caracterizando a presença de alumina, e a cor cinza mais clara, dispersa em sua extensão e que dá a forma geral

arredondada característica de gota de sulfeto, que não teve tempo suficiente para se difundir, e solidificaram com morfologia de gota de inclusão líquida, que é o mais desejado tipo de inclusão durante o processo produtivo do aço, pois as inclusões líquidas reduzem a probabilidade de entupimento dos canais de vazamento do distribuidor e da sonda de alimentação do mesmo. Representando, assim, um exemplar de inclusão do tipo duplex.

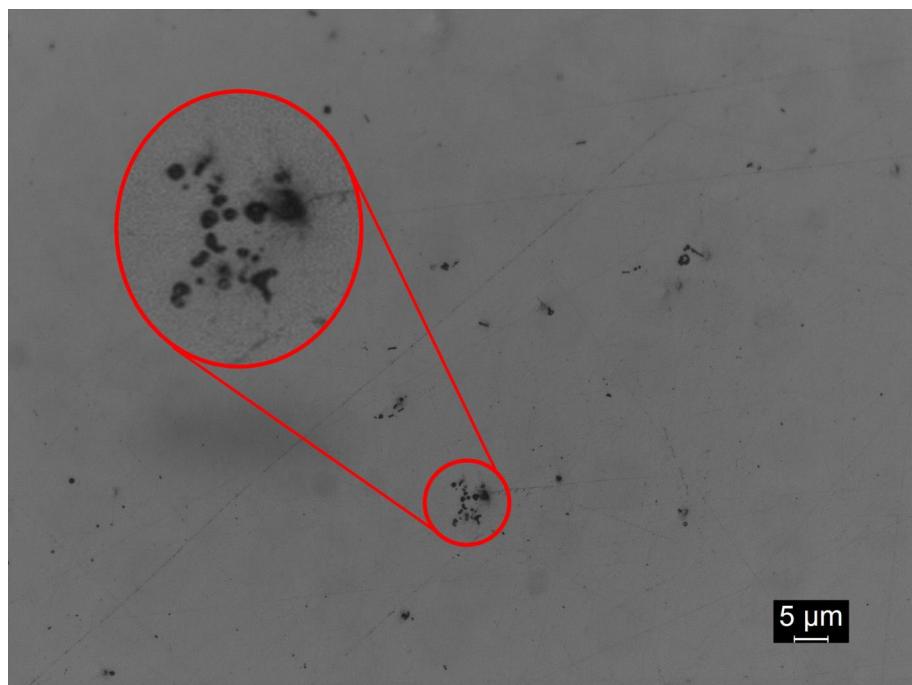
Figura 21 – Exemplar de uma inclusão do tipo duplex na amostra A.



Fonte: Produzido pelo autor.

A Figura 22 traz um exemplo classificado como cluster de MnS, observado através do MO.

Figura 22 – Exemplar de uma inclusão do tipo cluster de sulfeto na amostra A.



Fonte: Produzido pelo autor.

Pode-se observar a morfologia alongada semelhante estrias, de algumas partículas neste cluster da Figura 22, que é um indicativo de inclusões do tipo sulfeto, sendo classificadas, portanto, como MnS, conforme rege a metodologia Yawata.

O resultado das contagens encontram-se agrupados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Resultados da Amostra A pela metodologia Yawata. Em uma área de 78,54 mm<sup>2</sup>.

Tipo	Tamanho ( $\mu\text{m}$ )					
	5 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 100	100 a 400	>400
Alumina	36	4	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	1	1	-	-	-
Cluster	4	-	-	-	-	-
MnS						
Globular	10	2	-	-	-	-
Outras	18	1	-	-	-	-

Fonte: Produzido pelo autor.

Como esperado, a Amostra A apresentou maior contagem de inclusões de alumina em relação aos demais tipos mapeados em virtude de serem aços acalmados ao Al com adição total igual a 2,40kg/t.aço durante a corrida, conforme dados fornecidos pela equipe da

siderúrgica. O teor de alumínio adicionado reflete diretamente no número de inclusões de alumina presentes no aço. Observa-se também a fina dispersão das inclusões, sendo bem escassa a presença de partículas maiores do que  $10\mu\text{m}$  ao considerar a área total em análise refletindo um processo de refino muito bem controlado e eficiente.

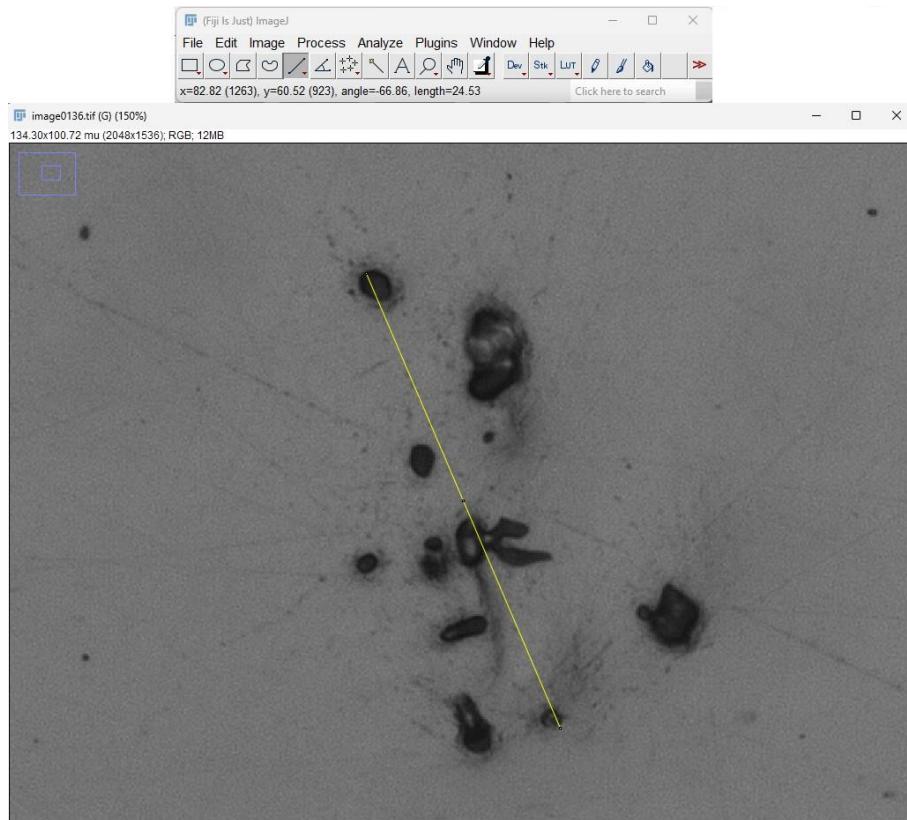
Tabela 6 – Resultados da Amostra A pelo ASCAT. Em uma área de  $63,34 \text{ mm}^2$ , sendo em uma face distinta da submetida pela metodologia Yawata.

Tipo	Tamanho ( $\mu\text{m}$ )					
	5 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 100	100 a 400	>400
Alumina	96	18	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-
Cluster	-	-	-	-	-	-
MnS						
Globular	-	-	-	-	-	-
Outras	15	-	-	-	-	-

Fonte: Produzido pelo autor.

Ainda para a Amostra A, apresentado na Figura 23 está o maior exemplar de cluster de alumina encontrado.

Figura 23 – Cluster de alumina encontrado na Amostra A, observado através do MO e medido usando o ImageJ.

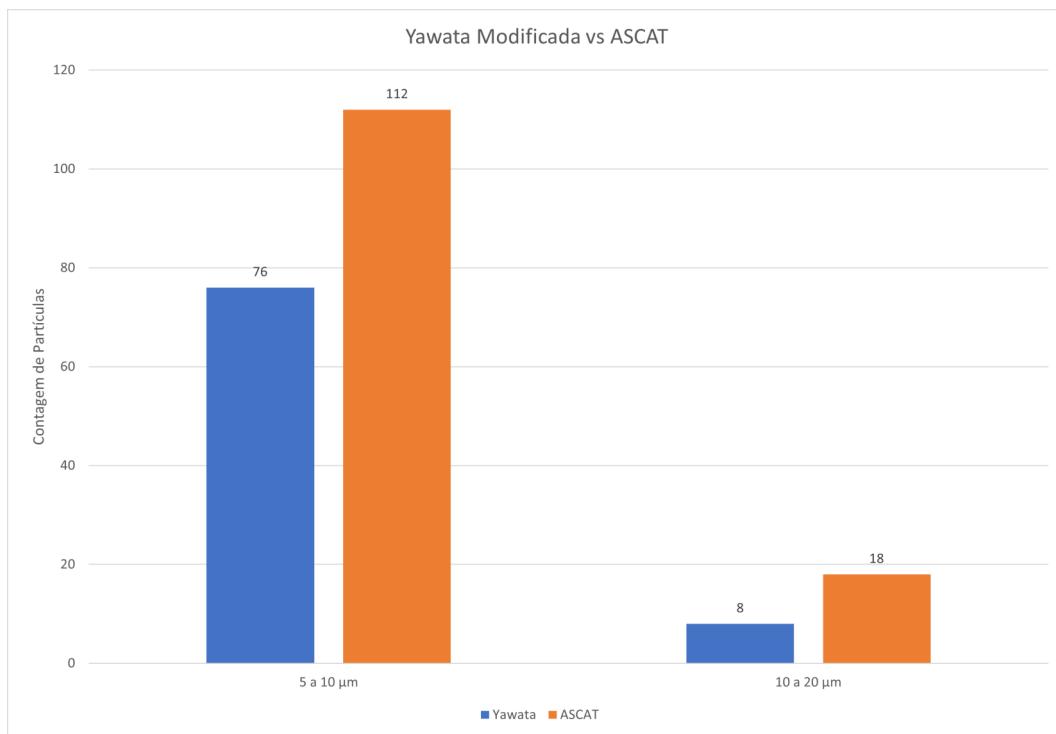


Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 23, é possível notar o cluster com partículas relativamente grandes e próximas umas das outras. O cluster mede  $24,53\mu\text{m}$  e está mais próximo do limite inferior do que do limite superior, o que é um bom resultado apesar de não desejado. Cluster com essas medidas acabam por atuar como se fossem uma partícula inteira medindo o tamanho de sua totalidade, e por esse motivo não é desejado.

A Figura 24 resume as informações obtidas para a Amostra A em um gráfico de barras.

Figura 24 – Resumo comparativo dos resultados obtidos para a amostra A.



Fonte: Produzido pelo autor.

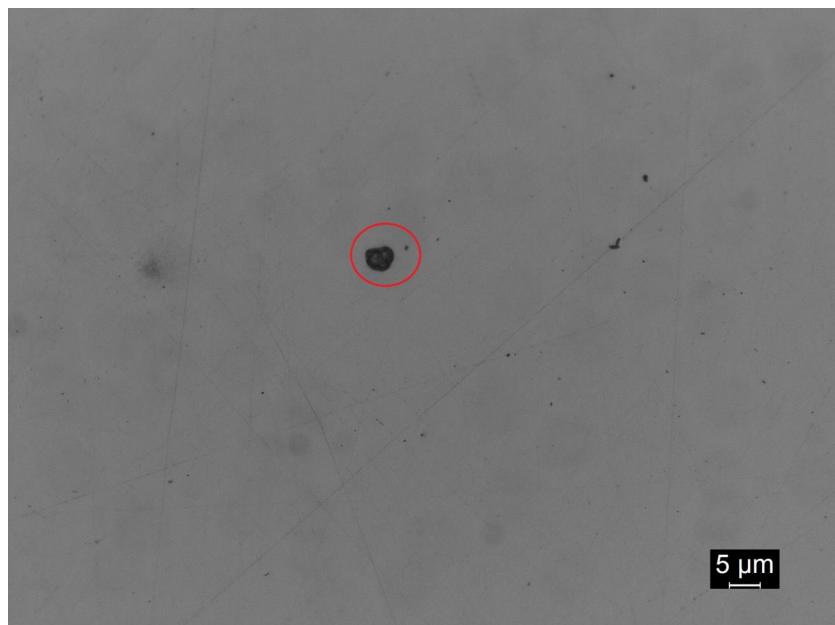
No apresentado na Figura 24, é possível observar que em um intervalo de 5 a 10  $\mu\text{m}$  foram evidenciados 76 partículas para a Metodologia Yawata modificada e 111 partículas para o ASCAT, além de 8 evidenciações contra 18 contagens para o intervalo de 10 a 20  $\mu\text{m}$ , comprovando uma eficiência aceitável para a proposta de desenvolvimento simples e versátil da nova metodologia.

Em virtude de testes realizados para explorar maiores possibilidades do estudo, a Amostra A foi cortada antes de ser submetida à análise no ASCAT, a sua área útil havia sido reduzida para aproximadamente 75  $\text{mm}^2$  por corte mecânico visando facilitar a análise em MO. O ASCAT, por sua vez, necessita de uma pré-configuração por parte do operador para definir os quadrantes que irão compor a área a ser analisada para cumprir o critério de programação: 3 mil partículas menores do que 20  $\mu\text{m}$  ou 100  $\text{mm}^2$  de área analisada. Assim, tivemos que a face de análise considerada no ASCAT foi diferente da face observada no MO e a sua área foi menor.

Para a Amostra B foram obtidas 286 fotos no microscópio óptico, das quais, foram selecionados 3 exemplares para serem apresentados, dispostos nas Figuras 25, 26 e 27 como destaques. O resultado da contagem e classificação pela metodologia proposta e o entregue pelo ASCAT encontram-se compilados nas Tabelas 7 e 8 respectivamente.

A Figura 25 representa um exemplar de inclusão do tipo duplex observado na Amostra B através do microscópio óptico utilizado no estudo.

Figura 25 – Exemplar de inclusão duplex menor do que  $5\mu\text{m}$  na Amostra B, observado através do microscópio óptico.



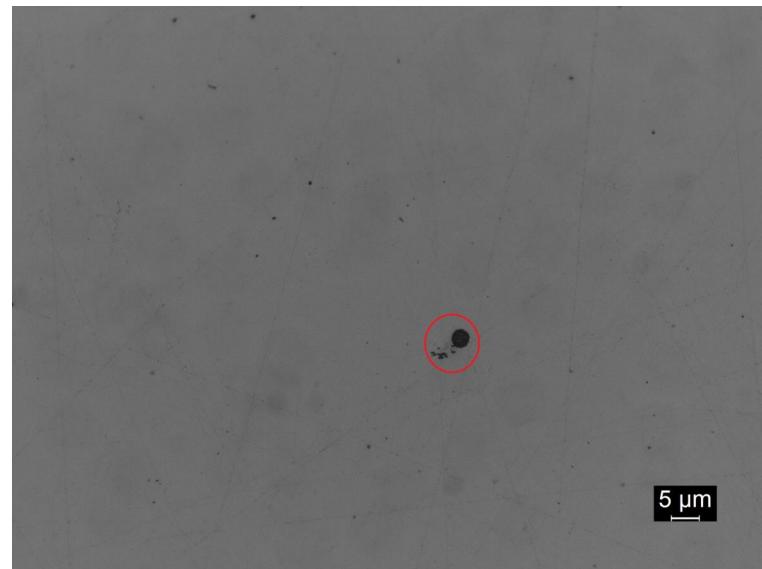
Fonte: Produzido pelo autor.

Tal como explicado anteriormente para a Amostra A, na Figura 25 pode-se observar um exemplar de inclusão do tipo duplex na Amostra B, por apresentar aspecto arredondado e cor mesclada entre preto e cinza claro. Essa partícula não foi, porém, contabilizada na tabela pois sua maior medida deu menor do que  $5\mu\text{m}$ , ficando então fora do escopo da análise mas ainda assim um ótimo exemplar a ser destacado.

A Figura 26 representa um exemplar de inclusão do tipo globular, observado na Amostra B através do microscópio óptico utilizado no estudo.

Na Figura 26 temos um exemplar de inclusão globular na Amostra B, onde por meio da comparação com a Figura de referência, nota-se que esse exemplar é mais arredondado e uniforme do que o duplex apresentado na Figura 21, a qual inicialmente gerou dúvida sobre a sua classificação. A partícula globular em questão mede  $3,04\mu\text{m}$  e é uniforme em sua cor, indicando ser um possível espinélio resultante da reação da parede do refratário com o alumínio presente no aço líquido, reação esta que é comum e muito provável de ter ocorrido.

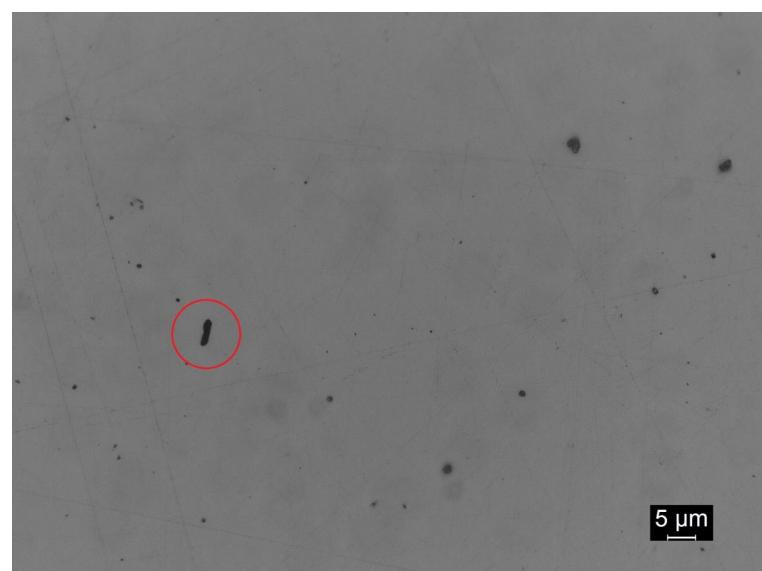
Figura 26 – Exemplar de inclusão globular na Amostra B, observado através do microscópio óptico.



Fonte: Produzido pelo autor.

A Figura 27 representa um exemplar de inclusão do tipo sulfeto, observado na Amostra B, através do microscópio óptico utilizado no estudo. Sendo este, classificado na medida das possibilidades conforme determinado pela metodologia Yawata.

Figura 27 – Exemplar de sulfeto na Amostra B, observado através do microscópio óptico.

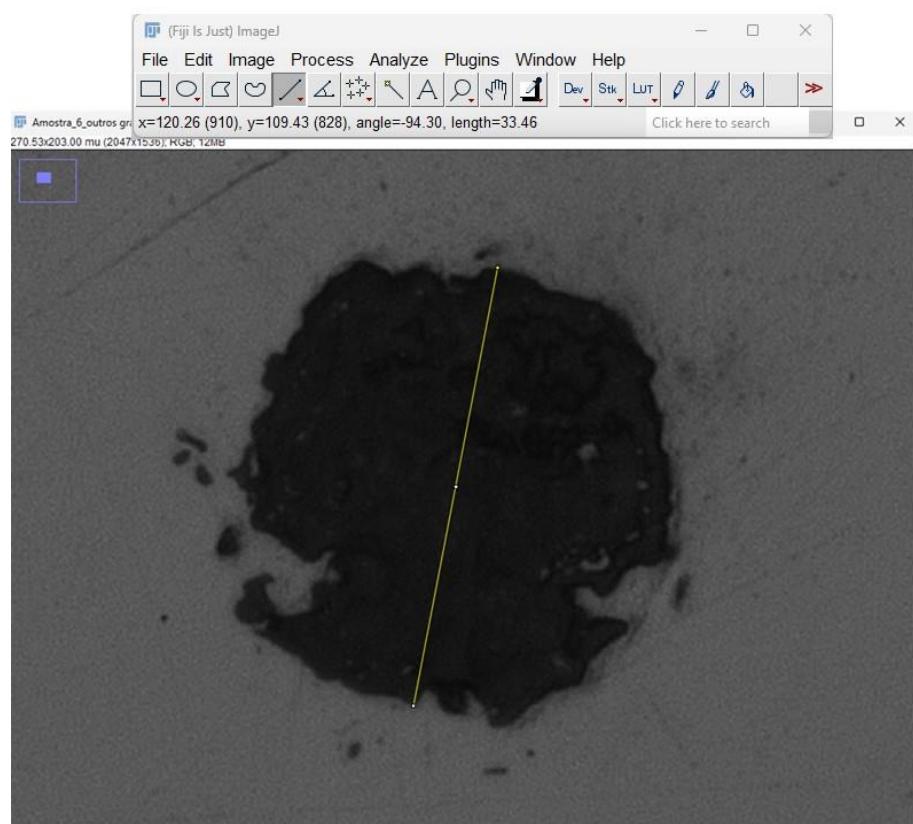


Fonte: Produzido pelo autor.

O exemplar da Figura 27, o qual apresenta morfologia alongada concebida quando em solução líquida, e por conta da tensão superficial entre as interfaces matriz-sulfeto, sua morfologia tende a ser alongada, pois atua como um retardante do crescimento dos grão da matriz metálica o que termina por favorecer a usinabilidade do material. Tais características e semelhança com o disposto na literatura, essa partícula pode ser classificada como inclusão do tipo sulfeto.

A Figura 28 apresenta uma partícula grande observada na matriz da Amostra B.

Figura 28 – Exemplar de duplex categorizada como "Outros" de tamanho entre 20 a 40 $\mu\text{m}$ .



Fonte: Produzido pelo autor.

A partícula apresentada na Figura 28, é caracterizada como inclusão do tipo duplex com suas extremidades apresentando deformação, sendo assim, um indicativo de solidificação turbolenta. Sua maior medida aferida é de 33,46 $\mu\text{m}$ , conforme indicado na própria janela do ImageJ presente na figura.

Partículas de sulfeto, semelhantes ao exemplar da Figura 27, e os duplex, tal como o exemplo da Figura 28, são agrupadas na tabela de resultados na linha de descrição "Outros", conforme rege a referência, juntamente com as demais já citadas no Capítulo 4.

As contagens para cada categoria de inclusões na Amostra B estão apresentadas na Tabela, 7, para o microscópio óptico, e na Tabela 8, para os resultados do ASCAT. Assim como para a Amostra A, a Amostra B apresentou maior contagens de inclusões do tipo alumina em relação aos demais tipos mapeados em virtude de serem aços acalmados ao Al, com adição total igual a 1,99kg/t.aço durante a corrida, também conforme dados fornecidos pela equipe da siderúrgica. O mesmo padrão de fina dispersão das inclusões e a baixa presença de partículas maiores do que 10 $\mu\text{m}$  foi observado.

Tabela 7 – Resultados da Amostra B pela metodologia Yawata. Em uma área de 78,54 mm<sup>2</sup>.

Tipo	Tamanho ( $\mu\text{m}$ )					
	5 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 100	100 a 400	>400
Alumina	69	58	4	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	-	-	-	-	-
Cluster	-	-	-	-	-	-
MnS						
Globular	3	-	-	-	-	-
Outras	8	17	2	-	-	-

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 8 – Resultados da Amostra B pelo ASCAT em uma área de 82,57 mm<sup>2</sup>, sendo a mesma face retrabalhada.

Tipo	Tamanho ( $\mu\text{m}$ )					
	5 a 10	10 a 20	20 a 40	40 a 100	100 a 400	>400
Alumina	104	12	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-
Cluster	-	-	-	-	-	-
MnS						
Globular	-	-	-	-	-	-
Outras	19	2	-	-	-	-

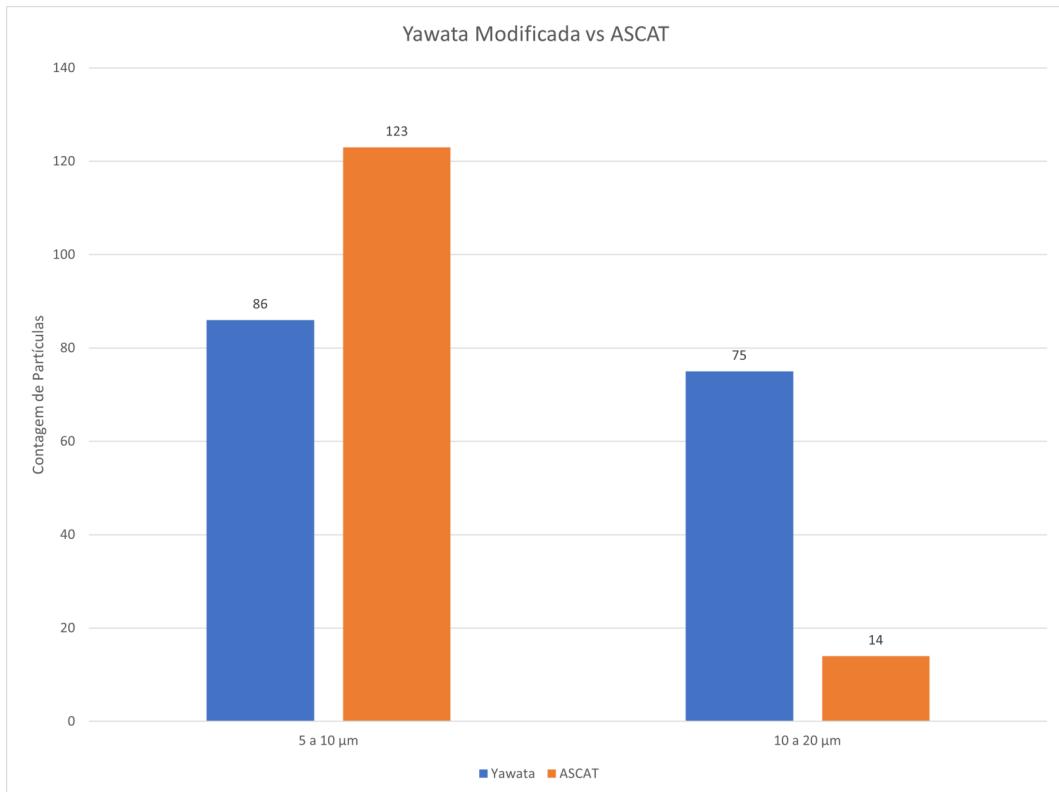
Fonte: Produzido pelo autor.

Embora sejam as mesmas faces analisadas pelas duas metodologias, a justificativa para a presença de uma maior quantidade de inclusões entre 10 e 20 $\mu\text{m}$  na análise da Tabela 7 em relação ao apresentado na Tabela 8 é a necessidade de lixar e polir novamente a amostra, que resulta em algumas divergências nas contagens, pois estamos expondo uma nova área do material que pode conter um teor maior ou menor de limpidez. Mas a proporção principal de contagens de alumina é possível observar que se mantêm.

Os resultados obtidos para a amostra em questão encontram-se resumidos no gráfico da Figura 29, onde em um intervalo de 5 a 10 $\mu\text{m}$  foram evidenciadas 86 partículas para a Metodologia Yawata modificada e 123 partículas para o ASCAT, além de 75 evidenciações contra 14 contagens para o intervalo de 10 a 20 $\mu\text{m}$ , comprovando a divergência em virtude do re-trabalho da amostra, bem como apresentando uma eficiência aceitável da nova metodologia em função da alta precisão do ASCAT.

Ademais, nos exemplares destacados para ambas as amostras é possível observar a aplicação prática da comparação de geometrias características das inclusões mapeadas com a composição química das mesmas, conforme determinado pela Metodologia Yawata. É possível notar também que em um quadrante de aumento de 500x quase não se observam clusters ou inclusões maiores do que 5 $\mu\text{m}$ , padrão este que se mantém ao longo das amostras indicando elevada eficiência de controle inclusionário do processo na estação RH do refino secundário do aço bem como excelente nível de fluidez no distribuidor do lingotamento contínuo.

Figura 29 – Resumo comparativo dos resultados obtidos para a amostra B.



Fonte: Produzido pelo autor.

Pode parecer contraditório ter o interesse em remover alumínio e as inclusões à base dele no banho metálico, e ao mesmo tempo adicionar Al para realizar a desoxidação. Mas é importante salientar que em casos como este os benefícios de acalmar um aço ao Al e seguir

com o refino em um processo altamente eficiente, resulta numa combinação de fatores que permite reduzir o tempo de tratamento e garantir um ajuste fino da composição, gerando o nível de qualidade e excelência visto nas imagens destacadas neste Capítulo.

Por fim, ao aplicar a metodologia notou-se que o tempo de execução das etapas para cada amostra no presente estudo foi elevado em vista de translados entre os laboratórios parceiros e a logística natural do uso compartilhado de patrimônio público. Em média 4,5 horas por amostra é um tempo promissor que pode ser melhorado realizando todas as etapas no mesmo local e com o preparo de amostras em bateladas, usando acessórios que permitam tal capacidade na politriz, principalmente.

## 6 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que:

- a) Foi desenvolvida uma metodologia de baixo custo por meio da utilização de um software gratuito ImageJ, para realizar análise de inclusões não metálicas em aços Ultra Baixo Carbono com base na metodologia Yawata modificada;
- b) A utilização do ImageJ para análise de inclusões não metálicas otimiza o processo, pois permite medições mais precisas, dispensando o uso do reticulado tradicional da metodologia Yawata e facilitando a análise.

## 7 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, destaca-se as principais linhas que agregarão à presente pesquisa.

### 7.1 Trabalho 1

Explorando os Macros do ImageJ, há um grande potencial de melhoria ao se fazer uso dos macros existentes ou a serem desenvolvidos pelo operador/comunidade usuária do ImageJ, que promete maiores facilidades e automações para reduzir ainda mais o tempo de cada análise e aumentando a confiabilidade da metodologia sem necessitar de um equipamento de ponta como o MEV modificado com ASCAT.

### 7.2 Trabalho 2

Diversificando com Análises Estatísticas Aumentar o número de amostras, de modo a obter dados estatísticos que enriquecerão o presente estudo.

### 7.3 Trabalho 3

Expandindo para Outros Tipos de Aço Como o foco do trabalho foi em aços Ultra Baixo Carbono, sugere-se aplicar a metodologia desenvolvida em outros tipos de aço, além de agrupar as sugestões anteriores a essa tentativa.

## REFERÊNCIAS

- ANMARK, N.; KARASEV, A.; JÖNSSON, P. G. The influence of microstructure and non-metallic inclusions on the machinability of clean steels. **Steel Research International**, Wiley-VCH Verlag, v. 88, n. 1, 2017. Disponível em:  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/srin.201600111>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- ASM, I. H. C. **Metals Handbook**. 2nd. ed. [S. l.]: CRC Press, 1998. v. 1.
- BARTOSIAKI, B. G.; PEREIRA, J. A. M.; BIELEFELDT, W. V.; VILELA, A. C. F. Assessment of inclusion analysis via manual and automated SEM and total oxygen content of steel. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 235-240, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.01.008>. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785415000277>. Acesso em: 10 fev. 2026.
- BASU, S.; CHOUDHARY, S. K.; GIRASE, N. U. Nozzle clogging behavior of ti-bearing al-killed ultra low carbon steel. **ISIJ International**, v. 44, n. 10, p. 1653–1660, 2004. Iron and Steel Institute of Japan. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1653>. Acesso em: 18 ago. 2024.
- BUAKAEW, V.; SODAMUK, S.; SIRIVEDIN, S.; JIRATHEARANAT, S. Formability prediction of automotive parts using forming limit diagrams. **Journal Of Solid Mechanics And Materials Engineering**, [S.L.], v. 1, n. 5, p. 691-698, 2007. Japan Society of Mechanical Engineers. Disponível em: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmmp/1/5/1\\_5\\_691/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmmp/1/5/1_5_691/_article/-char/ja/). Acesso em: 09 jul. 2024.
- CALLISTER, W. D. **Ciências e Engenharia de Materiais**. 9. ed. São Paulo: LTC, 2016. v. 1.
- CARNEIRO, C. A. R.; GOUVEIA, M. D.; ALMEIDA, M. A.; VERONA, R.; GUIMARAES, C.; LEÃO, P.; KLUG, J. REDUÇÃO DE OCORRÊNCIAS DE OBSTRUÇÕES EM AÇOS ACALMADOS AO ALUMÍNIO COM CÁLCIO. In: Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, 50., 2019, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABM, 2019. p. 111-127. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/reduo-de-ocorrncias-de-obstrues-em-aos-acalmados-ao-aluminio-com-clcio>. Acesso em: 13 nov. 2024.
- CARNEIRO, C. A. R.; LEAL, J. F. C.; FILHO, M. D. G.; SOUSA, A. L. P. de; KLUG, J. L. CLEANLINESS DEVELOPMET OF ULTRA LOW CARBON GRADES FOR AUTOMOTIVE APPLICATION. In: Seminário de Fusão, Refino e Solidificação de Metais, 51., 2022, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABM, 2022. p. 993-1007. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/cleanliness-developmet-of-ultra-low-carbon-grades-for-automotive-application>. Acesso em: 09 nov. 2024.
- CASUCCIO, G.; POTTER, M.; SCHWERER, F.; FRUEHAN, R. J.; STORY, S.. **Automated Steel Cleanliness Analysis Tool (ASCAT)**. [S.L.]: Rj Lee Group, Inc, 2005. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/861927>. Acesso em: 18 jan. 2025.
- CHAI, F.; SU, H.; YANG, C. fu; XUE, D.m. Nucleation Behavior Analysis of Intragranular Acicular Ferrite in a Ti-killed C-Mn Steel. **Journal Of Iron And Steel Research**

**International**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 369-374, mar. 2014. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60057-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60057-1). Acesso em: 09 nov. 2024.

CHAI, F.; YANG, C. F.; SU, H.; ZHANG, Y. Q.; XU, Z.; YANG, Y. H. Effect of Zr addition to Ti-killed steel on inclusion formation and microstructural evolution in welding induced coarse-grained heat affected zone. **Acta Metallurgica Sinica (English Letters)**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 220-226, jun. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1006719108600423>. Acesso em: 18 ago. 2024.

CHEN, C.; JIANG, Z.; LI, Y.; SUN, M.; WANG, Q.; CHEN, K.; LI, H. State of the Art in the Control of Inclusions in Spring Steel for Automobile - a Review. **Isij International**, [S.L.], v. 60, n. 4, p. 617-627, 15 abr. 2020. Disponível em: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/4/60\\_ISIJINT-2019-513/\\_html/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/4/60_ISIJINT-2019-513/_html/-char/en). Acesso em: 09 nov. 2024.

COSTA E SILVA, A. L. V. da. Non-metallic inclusions in steels - origin and control. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 7, n. 3, p. 283-299, jul. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785418300280>. Acesso em: 18 nov. 2024.

COSTA E SILVA, A. L. V. da. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 2408-2422, abr. 2019. ISSN 2238-7854. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785418304320>. Acesso em: 9 mar. 2023.

DOMGIN, J.-F.; GARDIN, P.; SAINT-RAYMOND, H.; STOUVENOT, F.; HUIN, D. Carbon Concentration in ULC Steels Numerically Tracked in Vacuum Processes. **Steel Research International**, [S.L.], v. 76, n. 1, p. 5-12, jan. 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/srin.200505967>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/srin.200505967>. Acesso em: 27 nov. 2023.

EMMEL, M.; ANEZIRIS, C. G.; SCHMIDT, G.; KREWERTH, D.; BIERMANN, H. Influence of the Chemistry of Surface Functionalized Ceramic Foam Filters on the Filtration of Alumina Inclusions in Steel Melts. **Advanced Engineering Materials**, [S.L.], v. 15, n. 12, p. 1188-1196, 6 set. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adem.201300118>. Acesso em: 09 nov. 2024.

GALÁN, J.; SAMEK, L.; VERLEYSEN, P.; VERBEKEN, K.; HOUBAERT, Y. Advanced high strength steels for automotive industry. **Revista de Metalurgia**, [S.L.], v. 48, n. 2, p. 118-131, 30 abr. 2012. Disponível em: <https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1231>. Acesso em: 18 nov. 2024.

GAMUTAN, J.; MIKI, T.; NAGASAKA, T. MnS Precipitation Behavior in MnO–SiO<sub>2</sub> Inclusion in Fe–Mn–Si–O–S Alloy System at Solid-Liquid Coexistence Temperature. **Isij International**, [S.L.], v. 60, n. 8, p. 1610-1616, 15 ago. 2020. Disponível em:

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/8/60\\_ISIJINT-2019-777/\\_html/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/8/60_ISIJINT-2019-777/_html/-char/en). Acesso em: 13 nov. 2024.

GHOSH, A. **Secondary steelmaking**: principles and applications. Florida: CRC Press, 2001.

GHOSH, A.; CHATTERJEE, A. **Iron making and steelmaking**: theory and practice. Delhi/India: PHI Learning Pvt. Ltd., 2008.

GOLDSTEIN, J.; NEWBURY, D.; MICHAEL, J.; RITCHIE, N.; SCOTT, J.; JOY, D. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. 4. ed. New York: Springer, 2017. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=D0I\\_DwAAQBAJ](https://books.google.com.br/books?id=D0I_DwAAQBAJ). Acesso em: 1 dez. 2023.

GORKUSHA, D.; KARASEV, A. V.; KOMOLOVA, O.; GRIGOROVICH, K. V.; JÖNSSON, P. G. Characterization of Non-metallic Inclusions and Clusters during Production of Low-carbon IF Steel. **Isij International**, [S.L.], v. 60, n. 12, p. 2819-2828, 15 dez. 2020. Disponível em: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/12/60\\_ISIJINT-2020-202/\\_html/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/12/60_ISIJINT-2020-202/_html/-char/en). Acesso em: 16 nov. 2024.

GOTO, H.; MIYAZAWA, K. GOTO, Hiroki; MIYAZAWA, Ken-Ichi. Reoxidation Behavior of Molten Steel in Non-killed and Al-killed Steels. **Isij International**, [S.L.], v. 38, n. 3, p. 256-259, 1998. Disponível em:

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/38/3/38\\_3\\_256/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/38/3/38_3_256/_article). Acesso em: 09 nov. 2024.

GRAHAM, S.; YANG, N. Representative volumes of materials based on microstructural statistics. **Scripta Materialia**, [S.L.], v. 48, n. 3, p. 269-274, fev. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646202003627>. Acesso em: 20 nov. 2024.

GUAN, J.; WANG, L.; ZHANG, C.; MA, X. Effects of non-metallic inclusions on the crack propagation in bearing steel. **Tribology International**, [S.L.], v. 106, p. 123-131, fev. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.10.030>. Acesso em: 20 nov. 2024.

GUO, J. long; BAO, Y. ping; WANG, M. Cleanliness of Ti-bearing Al-killed ultra-low-carbon steel during different heating processes. **International Journal Of Minerals, Metallurgy, And Materials**, [S.L.], v. 24, n. 12, p. 1370-1378, dez. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12613-017-1529-8>. Acesso em: 20 ago. 2024.

GUO, S.; ZHU, H.; ZHOU, J.; SONG, M.; DONG, S. An in situ scanning electron microscope study of void formation induced by typical inclusions in low-density steel during tensile deformation. **Steel Research International**, [S.L.], v. 93, n. 11, 23 jul. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/srin.202200388>. Acesso em: 13 nov. 2024.

HOLAPPA, L.; WIJK, O. **Treatise On Process Metallurgy**, [S.L.], p. 347-372, 2014. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-096988-6.00008-0>. Acesso em: 09 nov. 2024.

HOLIK, A. S. Optical microscopy. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**, p. 6458-6463, 2001.

JIANG, Y.; LI, Y.; DAI, Q.; CHAI, S.; LI, K. Evolution of inclusions with cerium addition and effects of c-containing rare earth inclusions on the toughness of ultra-high-strength structural steel. **Ironmaking & Steelmaking**, [S.L.], v. 50, n. 2, p. 184-196, 22 jul. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/03019233.2022.2099696>. Acesso em: 18 nov. 2024.

JIN, T.y.; LIU, Z.y.; CHENG, Y.F.. Effect of non-metallic inclusions on hydrogen-induced cracking of API5L X100 steel. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 35, n. 15, p. 8014-8021, ago. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.05.089>. Acesso em: 09 nov. 2024.

JING, G.; SHU-SEN, C.; ZI-JIAN, C. Mechanism of Non-metallic Inclusion Formation and Modification and Their Deformation during Compact Strip Production (CSP) Process for Aluminum-Killed Steel. **Isij International**, [S.L.], v. 53, n. 12, p. 2142-2151, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.2142>. Acesso em: 09 nov. 2024.

JUNG, I.-H.; DECTEROV, S. A.; PELTON, A. D. Computer applications of thermodynamic databases to inclusion engineering. **Isij International**, [S.L.], v. 44, n. 3, p. 527-536, 2004. Iron and Steel Institute of Japan. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.44.527>. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.527>. Acesso em: 09 nov. 2024.

KAUSHIK, P.; LEHMANN, J.; NADIF, M. State of the art in control of inclusions, their characterization, and future requirements. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 43, p. 710–725, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11663-012-9646-2>. Acesso em: 31 jan. 2025.

KAUSHIK, P.; PIELET, H.; YIN, H. Inclusion characterisation–tool for measurement of steel cleanliness and process control: Part 1 and part 2. **Ironmaking & Steelmaking**, [S.L.], v. 36, n. 8, p. 561-571, nov. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1179/030192309x12492910938131>. Acesso em: 09 nov. 2024.

KOBA, M.; FUSHIWAKI, Y.; NAGATAKI, Y. Influence of selective surface oxidation of si and mn on fe-zn alloying reaction on hot-rolled steel sheets. **Isij International**, [S.L.], v. 59, n. 9, p. 1650-1658, 15 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-067>. Acesso em: 09 nov. 2024.

LEÃO, P. B. P. Caracterização de inclusões não-metálicas de aços peritéicos produzidos com diferentes técnicas de desoxidação. 2018. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

LEÃO, P. B. P.; FILHO, R. N. R.; FERREIRA, H. C.; CARNEIRO, C. A. R.; SILVA, S. K. C.; BIELEFELDT, W. V.; KLUG; LEANDRO, J. Characterization of non-metallic inclusions in ti stabilized al-killed ultra-low carbon steel. In: Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, 48., 2017, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABM, 2017. p. 712–723. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/57160>. Acesso em 20 de nov. 2024.

LYONS, C.; KAUSHIK, P. Inclusion Characterization of Titanium Stabilized Ultra Low Carbon Steels: impact of oxygen activity before deoxidation. **Steel Research International**,

[S.L.], v. 82, n. 12, p. 1394-1403, 19 ago. 2011. Disponível em:  
<http://dx.doi.org/10.1002/srin.201100163>. Acesso em: 09 nov. 2024.

MANNHEIMER, W. A.; SCHMIDT, P. F.; VOOT, G. F. V.; WILLIAMS, D. B. **Microscopia dos materiais**: uma introdução. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda., 2002.

MANTOVANI, C. M.; JUNIOR, R. M. L.; CABRAL, F. E.; SILVA, L. R.; POSSENTE, A. E.; URA, M. M.; MURARI, A.; BARBOSA, A. B. J.; BARBOSA, A. C.; RAMOS, P. B. INTERACTION BETWEEN MOLTEN STEEL AND MgO-BASED TUNDISH LINING: a potential source of non-metallic inclusions. In: Seminário de Aciaria, 42., Salvador, 2011, Salvador. **Anais** [...]. Salvador: ABM, 2011. p. 550-561. Disponível em:  
<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/interaction-between-molten-steel-and-mgo-based-tundish-lining-a-potential-source-of-non-metallic-inclusions>. Acesso em: 20 nov. 2024.

MAYERHOFER, A. **Enhanced Characterization of Non-Metallic Inclusions for (Sub) Micro Steel Cleanliness Evaluations**. 2021. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ferrous Metallurgy, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2021. Disponível em:  
<https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/7692350/AC16336074.pdf>. Acesso em: 30 out. 2024.

MICHELIC, S. K.; WIESER, G.; BERNHARD, C. On the Representativeness of Automated SEM/EDS Analyses for Inclusion Characterisation with Special Regard to the Measured Sample Area. **Isij International**, [S.L.], v. 51, n. 5, p. 769-775, 2011. Disponível em:  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.769>. Acesso em: 18 nov. 2024.

MORALES, B. B.; BARBOZA, L. T.; VILELA, A. C. F. Simulação numérica do escoamento em modelo físico da estação de refino secundário rh. In: Seminário de Aciaria – Internacional, 39., 2008, Curitiba. **Anais** [...]. Curitiba: ABM, 2008. p. 627–632. Disponível em:  
<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/simulao-numrica-do-escoamento-em-modelo-fsico-da-estao-de-refino-secundrio-rh>. Acesso em: 20 de nov. 2024.

MOREIRA, S. R. L.; DIAS, R. M.; MARTINS, R. S.; OLIVEIRA, L. J.; DE, S.; MOREIRA, F. A.; LEMOS, L. R. Avaliação da limpidez das placas de aço ultra baixo carbono provenientes do fluxo inicial do distribuidor do lingotamento contínuo. In: Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, 50., 2019, São Paulo. **Anais** [...] São Paulo: ABM, 2019. p. 377–388. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/avaliao-da-limpidez-das-placas-de-ao-ultra-baixo-carbono-provenientes-do-fluxo-inicial-do-distribuidor-do-lingotamento-contnuo>. Acesso em: 09 nov. 2024.

NAFISI, S.; AMIRKHIZ, B. S.; FAZELI, F.; ARAFIN, M.; GLODOWSKI, R.; COLLINS, L. Effect of Vanadium Addition on the Strength of API X100 Linepipe Steel. **Isij International**, [S.L.], v. 56, n. 1, p. 154-160, 2016. Disponível em:  
<http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2015-290>. Acesso em: 09 nov. 2024.

NUSPL, M.; WEGSCHEIDER, W.; ANGELI, J.; POSCH, W.; MAYR, M. Qualitative and quantitative determination of micro-inclusions by automated SEM/EDX analysis. **Analytical And Bioanalytical Chemistry**, [S.L.], v. 379, n. 4, p. 640-645, 18 fev. 2004. Disponível em:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00216-004-2528-y>. Acesso em: 09 nov. 2024.

ONO, H. Preface to the special issue on recent progress in inclusion precipitate engineering. **ISIJ International**, v. 61, 2021.

PAN, D.; JIANG, D.; HU, Z.; LI, P.; TAN, Y.; LI, J.; LI, J. Slag refining at various viscosity conditions for SiC inclusion removal during Si scraps recycling. **Materials Science In Semiconductor Processing**, [S.L.], v. 156, p. 107274, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.107274>. Acesso em: 09 nov. 2024.

PASSIGATTI, S. T. P.; OLIVEIRA, M. S. de; OLIVEIRA, J. R. de; SOUZA, R. M. de; VIEIRA, E. A. On the comparative inclusion analysis in steels: spark-dat, ascat and optical microscopy. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 19, p. 4745-4755, jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.155>. Acesso em: 09 nov. 2024.

PEREIRA, J.; ROCHA, V. D.; ALVES, P. C.; BIELEFELDT, W.; VILELA, A. C. Analysis of Spinel Based Inclusions During the Last Stage of The Steelmaking Process of SAE 52100. **Materials Research**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 1-11, 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2019-0558>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0558>. Acesso em: 09 nov. 2024.

POIRIER, J. A review: influence of refractories on steel quality. **Metallurgical Research & Technology**, [S.L.], v. 112, n. 4, p. 410-410, 2015. Disponível em: <https://www.metallurgical-research.org/articles/metal/abs/2015/04/metal150060/metal150060.html>. Acesso em: 09 nov. 2024.

RIZZO, E. M. da S. **Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços**. Campo Belo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

ROY, T. K.; GORAIN, N. C.; SURESH, S. A Study to Relate Slab Surface Defects with FeO-Type Slivers in Hot Rolled Product. **Journal Of Failure Analysis And Prevention**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 131-137, 7 dez. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11668-018-0575-5>. Acesso em: 09 nov. 2024.

SAHAI, Y.; EMIL, T. **Tundish technology for clean steel production**. Singarope: World Scientific Publishing, 2008.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, [S.L.], v. 9, n. 7, p. 671-675, 28 jun. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/nmeth.2089>. Disponível em: <https://imagej.net/ij/features.html>. Acesso em: 30 nov. 2023.

SILVA, A. L.; PEREIRA, J. A. M.; HECK, N. C. Formação de inclusões e a reoxidação do aço: exemplos de aplicação da análise termodinâmica. In: Congresso Anual da ABM, 74., 2019, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABM, 2019. p. 3285-3298. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/formao-de-incluses-e-a-reoxidao-do-ao-exemplos-de-aplicao-da-anlise-termodinmica>. Acesso em: 30 nov. 2023.

STRAGLIOTTO, B. V.; VIEIRA, D.; BIELEFELDT, W. V.; VILELA, A. C. F.; TRINDADE, L. B.; CONTINI, A. C.; MACHADO, F. d. D. Modelo de previsão de temperatura de chegada no forno-panela do aço líquido em aciaria elétrica. In: Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos, 48., 2017, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABM, 2017. p. 623–636. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/modelo-de-previsao-de->

temperatura-de-chegada-no-forno-panela-do-aco-liquido-em-acaria-eletrica. Acesso em: 30 nov. 2023.

TANAKA, H.; RYOJI, N.; RYUSUKE, M.; TSUJINO, R.; TAKESHI, K.; NISHII, T.; IMOTOI, T. Technology for Cleaning of Molten Steel in Tundish. **Isij International**, [S.L.], v. 34, n. 11, p. 868-875, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.868>. Acesso em: 09 nov. 2024.

TANG, Y. Effect of Slag Composition on Inclusion Control in LF-VD Process for Ultra-low Oxygen Alloyed Structural Steel. **Procedia Earth And Planetary Science**, [S.L.], v. 2, p. 89-97, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.015>. Acesso em: 09 nov. 2024.

INTITUTE for Molecular Bioscience. **The University of Queensland Austria**. Queensland. 2023. Disponível em: <https://imb.uq.edu.au/facilities/microscopy/hardware-software/> routine-widefield-microscopes. Acesso em: 1 dez. 2023.

TIEKINK, W.; BOOM, R.; OVERBOSCH, A.; KOOTER, R.; SRIDHAR, S. Some aspects of alumina created by deoxidation and reoxidation in steel. **Ironmaking & Steelmaking**, [S.L.], v. 37, n. 7, p. 488-495, out. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/030192310X12700328925822>. Acesso em: 09 nov. 2024.

UL-HAMID, A. **A beginners' guide to scanning electron microscopy**. New York: Springer International Publishing, 2018. v. 1. 402 p. ISBN 978-3-319-98481-0.

URRUTIA, I. G. Low Density Fe–Mn–Al–C Steels: phase structures, mechanisms and properties. **Isij International**, [S.L.], v. 61, n. 1, p. 16-25, 15 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-467>. Acesso em: 09 nov. 2024.

VALDEZ, M.; SHANNON, G.; SRIDHAR, S. The Ability of Slags to Absorb Solid Oxide Inclusions. **Isij International**, [S.L.], v. 46, n. 3, p. 450-457, 2006. Disponível em: <https://asu.elsevierpure.com/en/publications/the-ability-of-slags-to-absorb-solid-oxide-inclusions>. Acesso em: 09 nov. 2024.

VERMA, N.; PISTORIUS, P. C.; FRUEHAN, R. J.; POTTER, M. S.; OLTmann, H. G.; PRETORIUS, E. B. Calcium modification of spinel inclusions in aluminum-killed steel: Reaction steps. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 43, p. 830–840, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11663-012-9660-4>. Acesso em: 31 jan. 2025.

WANG, H.; BAO, Y. P.; ZHI, J. G.; DUAN, C. Y.; GAO, S.; WANG, M. Effect of rare earth ce on the morphology and distribution of al<sub>2</sub>o<sub>3</sub> inclusions in high strength if steel containing phosphorus during continuous casting and rolling process. **ISIJ International**, v. 61, p. 657–666, 3 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-053>. Acesso em: 09 nov. 2024.

WANG, J.; SONG, S.; XUE, Z. Transient evolution of non-metallic inclusions in molten high aluminum and high manganese steel contacting with slag and crucible: experimental investigation and factsage macros modeling. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 25, p. 2841-2853, jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.025>. Acesso em: 09 nov. 2024.

WANG, W.; WANG, Y.; MU, W.; PARK, J. H.; KONG, H.; SUKENAGA, S.; SHIBATA, H.; LARSSON, H.; MAO, H. Inclusion engineering in Co-based duplex entropic alloys. **Materials & Design**, [S.L.], v. 210, p. 110097-110097, nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110097>. Acesso em: 09 nov. 2024.

YIN, X.; SUN, Y.; YANG, Y.; DENG, X.; MCLEAN, A. Effects of non-metallic inclusions and their shape modification on the properties of pipeline steel. In: International Conference on the Science and Technology of Ironmaking, 7., 2015, Cleveland. **Anais** [...]. Cleveland, OH, USA: Proceedings of the AISTech Conference, 2015. p. 4–7. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Yindong-Yang-2/publication/282792188\\_Effects\\_of\\_non-metallic\\_inclusions\\_and\\_their\\_shape\\_modification\\_on\\_the\\_properties\\_of\\_pipeline\\_steel/links/58dd840f458515add901e430/Effects-of-non-metallic-inclusions-and-their-shape-modification-on-the-properties-of-pipeline-steel.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Yindong-Yang-2/publication/282792188_Effects_of_non-metallic_inclusions_and_their_shape_modification_on_the_properties_of_pipeline_steel/links/58dd840f458515add901e430/Effects-of-non-metallic-inclusions-and-their-shape-modification-on-the-properties-of-pipeline-steel.pdf). Acesso em: 09 nov. 2024.

ZENG, Q.; LI, J.; XU, Q.; YU, W. Effect of MgO in low-basicity refining slag on properties of MnO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions in tire cord steel. **Materials Today Communications**, [S.L.], v. 33, p. 104351, dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104351>. Acesso em: 09 nov. 2024

ZHANG, T.; CHU, W. Y.; GAO, K. W.; QIAO, L. J. Study of correlation between hydrogen-induced stress and hydrogen embrittlement. **Materials Science & Engineering**, v. 347, p. 291–299, 2003. Disponível em: [www.elsevier.com/locate/msea](http://www.elsevier.com/locate/msea). Acesso em: 15 set. 2023.

ZHENG, L.; MALFLIET, A.; YAN, B.; JIANG, Z.; BLANPAIN, B.; GUO, M. Role of Interfacial Properties in the Evolution of Non-metallic Inclusions in Liquid Steel. **Isij International**, [S.L.], v. 62, n. 8, p. 1573-1585, 15 ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-079>. Acesso em: 09 nov. 2024.

ZHU, B.; LIU, Q.; ZHAO, D.; REN, S.; XU, M.; YANG, B.; HU, B. The influence of flow asymmetry on refractory erosion in the vacuum chamber of a RH degasser. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 3764-3771, set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.036>. Acesso em: 09 nov. 2024.