



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO ENGENHARIA DE MATERIAIS

Bárbara Honorato Barroso

Análise da influência da adição dos modificadores de escória no refino secundário Fe-Si-Mn, Briquete de minério de manganês e areia de sílica sobre as características de macro-inclusões no Aço 1020 acalmado.

Blumenau
2025

Bárbara Honorato Barroso

Análise da influência da adição dos modificadores de escória no refino secundário Fe-Si-Mn, Briquete de minério de manganês e areia de sílica sobre as características de macro-inclusões no Aço 1020 acalmado.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Materiais do Campus Blumenau da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Wanderson Santana da Silva.
Coorientadora: Enga. Rafaela Bianca Prade Dalsenter.

Blumenau

Barroso, Bárbara Honorato

Análise da influência da adição dos modificadores de escória no refino secundário Fe-Si-Mn, Briquete de minério de manganês e areia de sílica sobre as características de macro-inclusões no Aço 1020 acalmado. / Bárbara Honorato Barroso ; orientador, Wanderson Santana Da Silva, coorientadora, Rafaela Bianca Prade Dalsenter, 2025.
86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Inclusões não metálicas; Desoxidação; Escória. I. Da Silva, Wanderson Santana. II. Dalsenter, Rafaela Bianca Prade. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. IV. Título.

Bárbara Honorato Barroso

Análise da influência da adição dos modificadores de escória no refino secundário Fe-Si-Mn, Briquete de minério de manganês e areia de sílica sobre as características de macro-inclusões no Aço 1020 acalmado.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Materiais.

Blumenau, 09 de dezembro de 2025.

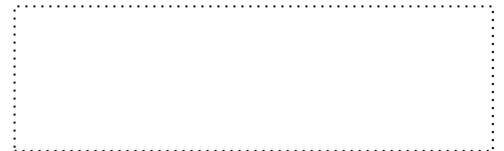


Bárbara Honorato Barroso
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca examinadora



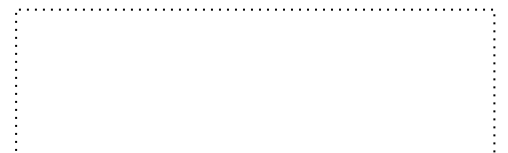
Orientador Prof. Dr. Wanderson Santana da Silva



Coorientadora Enga Rafaela Bianca Prade
Dalsenter



Prof. Dr. Marcio Roberto da Rocha



Me. Engenheiro de Materiais Thomas Conte
Machado

Blumenau, 2025.

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando com amor, força e incentivo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso representa a realização de uma importante etapa acadêmica e profissional.

Agradeço em primeiro lugar à Deus, por ter me conduzido no caminho correto durante todas as etapas de minha vida, me dando forças para poder continuar e não desistir nunca.

À minha família, em especial à minha mãe e à minha irmã Valentina, pelo amor, incentivo e pela força transmitida mesmo de longe nos momentos difíceis e por sempre acreditarem no meu potencial. Ao meu tio Rodrigo, por abrir caminhos e por contribuir significativamente para meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Prof.Dr. Wanderson Santana da Silva, pela orientação essencial e por despertar em mim o interesse pela área da metalurgia, desde o início do curso, tornando-se uma referência fundamental para minha formação.

Aos meus colegas, Tânia, Cinara, Érika e Luiz Alfredo, pela parceria, amizade e apoio ao longo da trajetória acadêmica, que tornaram essa jornada mais leve e enriquecedora.

À minha coorientadora, Enga. Rafaela Bianca Prade Dalsenter, pela orientação técnica e pelo comprometimento com este trabalho. À empresa GERDAU, pelo suporte essencial à realização desta pesquisa, especialmente aos técnicos dos laboratórios das unidades de Araçariguama e de Pindamonhangaba - SP, pela colaboração na realização dos experimentos desta pesquisa, e aos engenheiros da unidade de Araçariguama, pelo apoio quanto aos esclarecimentos fornecidos sobre o tema deste trabalho de conclusão de curso.

A todos que, que direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, deixo registrado o meu profundo agradecimento.

RESUMO

Os aços acalmados ao silício e manganês, utilizados na produção de aços de construção CA-50, devem apresentar requisitos mecânicos e superficiais que assegurem a redução da espessura e diâmetro sem ocorrência de rompimentos, durante o processo de conformação mecânica. No processo de produção em aciaria elétrica, defeitos como macro-inclusões podem surgir durante o refino secundário e o lingotamento contínuo, comprometendo a qualidade do produto final. Este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos das adições dos modificadores de escória: Fe-Si-Mn (condição padrão); briquete de minério de manganês e areia de sílica, que aliados ao desenho adequado de escórias e ao controle do processo de rinsagem, permitem a obtenção de um aço mais limpo, com macro-inclusões em menor quantidade. Para isso, foram realizadas análises comparativas entre corridas com: i) Fe-Si-Mn (condição padrão), ii) briquete de minério de manganês, iii) areia de sílica, mantidos constantes todos os outros parâmetros, como a temperatura de processo, vazão e tempo de rinsagem, carga metálica do forno elétrico à arco. Para cada modificador, foram estimadas as respectivas viscosidades teóricas das escórias. A basicidade de cada escória foi estabelecida a partir da composição química medida por FR-X. A distribuição e composição química das macro-inclusões, para os diferentes modificadores empregados, foram avaliadas por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, respectivamente. Amostras dos aços obtidos, após laminação a quente, foram avaliadas por ensaios de tração. Em termos das macro-inclusões, os resultados indicam que o uso do briquete de minério de manganês promoveu redução significativa na quantidade e distribuição das macro-inclusões, garantindo maior uniformidade nas propriedades mecânicas, enquanto a sílica apresentou efeito contrário, tomando por referência a condição padrão. Desta forma, o emprego do briquete de minério de manganês mostra-se promissor como modificador de escórias durante o refino secundário de aços acalmados ao Si e Mn.

Palavras-Chave: Aço de construção; Metalurgia da panela; inclusões não metálicas.

ABSTRACT

Silicon- and manganese-killed steels, used in the production of CA-50 construction-grade steels, must meet mechanical and surface requirements that ensure thickness and diameter reduction without rupture during the mechanical forming process. In electric steelmaking, defects such as macro-inclusions may arise during secondary refining and continuous casting, compromising the final product quality. This work aims to evaluate the effects of adding slag modifiers: Fe-Si-Mn (standard condition), manganese ore briquettes, and silica sand. Combined with proper slag design and rinsing process control, these additions enable the production of cleaner steel with fewer and smaller macro-inclusions. Comparative analyses were carried out among heats with: (i) Fe-Si-Mn (standard condition), (ii) manganese ore briquettes, and (iii) silica sand, keeping all other parameters constant, such as process temperature, rinsing flow and time, and the electric arc furnace metallic charge. For each modifier, theoretical slag viscosities were estimated. Slag basicity was determined based on chemical composition measured by XRF. The distribution and chemical composition of macro-inclusions for the different modifiers were evaluated by optical microscopy and scanning electron microscopy, respectively. Samples of the steels obtained after hot rolling were tested by tensile tests. Regarding macro-inclusions, results indicate that the use of manganese ore briquettes significantly reduced the quantity and distribution of macro-inclusions, ensuring greater uniformity in mechanical properties, while silica showed the opposite effect compared to the standard condition. Therefore, the use of manganese ore briquettes proves promising as a slag modifier during secondary refining of Si- and Mn-killed steels.

Keywords: construction steel; ladle metallurgy; non metallic inclusions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vazios gerados pela presença de macro-inclusões (apontadas pelas setas pretas) presentes nas amostras finais, após lingotamento contínuo, observadas por microscopia óptica após polimento e ataque químico. Ampliação: 100x.	15
Figura 2: Etapa de fusão.	19
Figura 3: (a) Organização dos tetraedros na estrutura do quartzo ao longo de um plano. (b) Na estrutura tridimita ao longo de um plano. (c) Estrutura de cristobalita, ao longo de um plano.	21
Figura 4: Representação esquemática de uma estação de refino secundário forno-panela.	22
Figura 5: Representação esquemática de duas formas distintas da injeção de gás inerte, durante o processo de refino secundário.	23
Figura 6: Diagrama de Ellingham – Variação da energia livre padrão por mol de oxigênio com a temperatura para vários óxidos.	25
Figura 7: Quebra das cadeias de tetraedros de sílica pela adição de óxido básico. Círculos cinzas indicados pela seta preta: $Ca + 2$	28
Figura 8: 3 tipos de oxigênio, na estrutura de uma escória. BO: <i>bridging oxygen</i> ou oxigênio formador de ponte (O_2); NBO: <i>non-bridging oxygen</i> ou oxigênio não formador de ponte ($O - 1$); Livre: oxigênio livre ($O - 2$).	29
Figura 9: Representação esquemática dos mecanismos propostos para simular a dissolução e absorção dos elementos de liga adicionado ao aço líquido nas painelas.	30
Figura 10: Ferro-ligas de Mn e Si.	32
Figura 11: Briquetes de Mn.	32
Figura 12: Principais processos de briquetagem: (A): Briquetagem em rolos, (B) Briquetagem em prensa hidráulica e (C) Briquetagem por extrusão contínua.	33
Figura 13: Ferro silício 75% granulado, utilizado como desoxidante.	34
Figura 14: Imagens do microscópio eletrônico de varredura (MEV) de inclusões de alumina: (a) estruturas dendríticas; (b) estruturas em forma de coral; (c) aglomerados de partículas; (d) grandes esferas de óxidos complexos.	37
Figura 15: Diagrama de fases do sistema binário Al_2O_3 -CaO.	38
Figura 16: Interface refratário magnesiano de panela – Aço líquido.	39

Figura 17: Relação da atividade de oxigênio, manganês e enxofre sobre a morfologia dos sulfetos.	40
Figura 18: Morfologias típicas de diferentes sulfetos: Tipo I (a), II (b) e III (c) obtidas por MEV (Microscopia eletrônica de varredura) em escalas de 10 µm.	41
Figura 19: Diagrama de fases do sistema ternário $Al_2O_3.MnO.SiO_2$	43
Figura 20: Diagrama de fases do sistema ternário $Al_2O_3.CaO.SiO_2$	43
Figura 21: Comportamento das macro-inclusões em diferentes condições de produto: lingotado e laminado.	45
Figura 22: Formação da camada de escória aderida à parede da panela.	46
Figura 23: Eventos que promovem a formação de inclusões no distribuidor.	47
Figura 24: Inclusões modificadas no aço após o tratamento com cálcio.	49
Figura 25: Efeito do trabalho de agitação no grau de desoxidação. Os pontos envoltos por um círculo atingiram menos de 20 ppm oxigênio total.	50
Figura 26: Exemplo de rompimento no fio máquina durante laminação à quente, do aço 1018 (SAE 1020).	51
Figura 27: Efeito do teor de CaS sobre a dureza dos sulfetos.	52
Figura 28: Efeito do teor de oxigênio, relação Mn/S e % MnS sobre cada tipo de sulfeto e sua plasticidade.	52
Figura 29: Influência do tamanho das inclusões de MnS quanto ao comportamento de tenacidade à fratura do aço.	53
Figura 30: Efeito das inclusões não-metálicas sobre a energia absorvida: Energia Charpy (CVN Shelf Energy, em Joules) com o comprimento projetado das inclusões por unidade de área (P, mm^{-1}).	54
Figura 31: Preparação das amostras de aço para análises quantitativas de macro-inclusões.	59
Figura 32: Contagem de macro-inclusões nas regiões externas a área de demarcação, apontadas pela seta preta. (padrão interno).	59
Figura 33: Imagem esquemática de um distribuidor, com a disposição dos veios (seta preta apontando na região do jato de aço, entre os veios 3 e 4).	60
Figura 34: Corte das amostras.	61
Figura 35: Desenho esquemático ilustrando as regiões de análises realizadas que tiveram maior concentração de macro-inclusões nos filetes, sendo destacadas pelo quadrado e apontadas pelas setas.	62

Figura 36: Amostra após preparação metalográfica, com identificação das regiões contendo porosidade e inclusões.	63
Figura 37: Método de preparo para o ensaio de tração.	64
Figura 38: Preparação da escória do forno panela para análise química por fluorescência de raios-X.	65
Figura 39: Análise química da escória do forno panela por fluorescência de raios-X.	66
Figura 40: Macro-inclusões observadas por MEV/EDS no aço SAE 1020, em três diferentes condições: lotes (a) 5075 e (b) 5100 para amostras de controle; (c) 4774 e (d) 4776, com o briquete de Mn; (e) 5558 e (f) 5560, com o emprego do ferro-silício (sílica) . Imagens adquiridas em modo BEC (Backscattered Electron Contrast).....	71
Figura 41: Macro-inclusões observadas por MEV no aço SAE 1020, em três diferentes condições: lotes (a) 4774 e (b) 4776 com briquete de Mn; (c) 5558 e (d) 5560, com a sílica; (e) 5075 e (f) 5100, sendo as amostras de controle.....	73
Figura 42: Macro-inclusões observadas por M.O, sem ataque químico, no aço SAE 1020 em três diferentes condições: (a) briquete de minério de Mn; (b) areia de sílica e (c) amostras de controle. 5560, com aumentos de 100x, 50x e 100x, respectivamente.	74
Figura 43: Microestruturas obtidas por M.O, com briquete de Mn (a) (b) e (c), com aumentos de (a) 500x, (b) 50x e (c) 12,5 x. Lotes de Fe-Si, representados por (d) (e) e (f) com aumentos de 500x, 100x e 50x, ambos obtidos pelo ataque com nital a 3%.	75
Figura 44: Microestruturas obtidas por microscopia óptica, dos lotes das amostras de controle, com aumentos de (a) 500 x, (b) 100 x e (c) 50 x, com ataque de nital a 3%.	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 FORNO ELÉTRICO A ARCO.....	18
3.1.1 Fusão	18
3.1.2 Refino primário: Formação de escórias	19
3.1.2.1 <i>Estruturas das escórias e o impacto na viscosidade</i>	20
3.1.3 Descarburagem e desfosforagem	21
3.2 FORNO PANELA	22
3.2.1 Refino secundário	22
3.2.2 Desoxidação do aço	24
3.2.2.1 <i>Mecanismo da escória desoxidante na metalurgia secundária</i>	26
3.2.2.2 <i>Basicidade da escória</i>	27
3.2.2.3 <i>Ajuste da composição química</i>	29
3.2.2.4 <i>Briquete de manganês</i>	31
3.2.2.5 <i>Ferro silício</i>	33
3.3 INCLUSÕES NÃO METÁLICAS	34
3.3.1 Classificação das inclusões: Origem	35
3.3.2 Classificação das inclusões: Composição química	35
3.3.2.1 <i>Alumina</i>	37
3.3.2.2 <i>Aluminatos de cálcio</i>	38
3.3.2.3 <i>Espinélios</i>	39
3.3.2.4 <i>Sulfeto de manganês</i>	40
3.3.2.5 <i>Inclusões de sulfetos de cálcio</i>	41
3.3.2.6 <i>Inclusões de silicatos</i>	42
3.3.3 Influência da conformação mecânica nas inclusões e fases	44
3.3.4 Influência da metalurgia da panela na origem de inclusões	45
3.3.4.1 <i>Etapas indesejáveis: reoxidação</i>	45
3.3.4.2 <i>Influência do tempo de vida da panela: refino secundário</i>	46
3.3.4.3 <i>Geração de inclusões no distribuidor</i>	47

3.3.5 Influência do tratamento com cálcio nas inclusões de MnS	48
3.4 REMOÇÃO DE INCLUSÕES NÃO-METÁLICAS: AGITAÇÃO GÁS-METAL, AGLOMERAÇÃO E TRANSPORTE	49
3.5 EFEITOS DAS MACRO-INCLUSÕES NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	50
3.6 CARACTERIZAÇÕES DE INCLUSÕES NÃO-METÁLICAS	54
3.6.1 Métodos diretos.....	55
3.6.2 Métodos indiretos	55
4 METODOLOGIA.....	56
4.1 MATERIAL	56
4.2 MÉTODO.....	57
4.2.0 Geração dos lingotes.....	57
<i>4.2.0.1 Receitas químicas utilizadas</i>	<i>57</i>
4.2.0.2 Programa de vazão de rinsagem	58
4.2.1 Análises do aço:.....	58
<i>4.2.1.1 Corte e preparação metalográfica</i>	<i>58</i>
<i>4.2.1.2 Análises macroscópica das macro-inclusões.....</i>	<i>59</i>
<i>4.2.1.4 Influência dos veios no distribuidor do lingotamento contínuo na geração de macro-inclusões</i>	<i>60</i>
<i>4.2.1.3 Análises microscópicas das macro-inclusões</i>	<i>60</i>
<i>4.2.1.4 Caracterização das macro-inclusões e análises da composição química.....</i>	<i>62</i>
<i>4.2.1.5 Análises das macro-inclusões por MEV/EDS e o seu comportamento na matriz metálica por M.O.....</i>	<i>63</i>
<i>4.2.1.6 Ensaios mecânicos: Tração</i>	<i>64</i>
4.2.2 Análise da escória do forno panela.....	65
<i>4.2.2.1 Coleta e preparação das amostras</i>	<i>65</i>
<i>4.2.2.2 Análises químicas da escória</i>	<i>66</i>
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1 ANÁLISES DE MACRO-INCLUSÕES.....	66
5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS A LAMINAÇÃO.....	67
5.3 ANÁLISES QUANTO À COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA NO FORNO PANELA.....	68
5.4 ANÁLISES QUANTO À COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO LÍQUIDO NO FORNO PANELA.....	69

5.5 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS MACRO-INCLUSÕES	70
5.5.1 Classificação das macro-inclusões quanto à origem	70
5.5.2 Classificação das macro-inclusões quanto à composição química.....	72
5.5.3 Caracterização das macro-inclusões quanto à morfologia	73
<i>5.5.3.1 Distribuição de inclusões na matriz metálica.....</i>	<i>75</i>
6 CONCLUSÃO	77
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
ANEXOS	84
ANEXO I: COMPOSIÇÃO QUÍMICA OBTIDA POR ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS) NAS MACRO-INCLUSÕES DOS LOTES DAS AMOSTRAS DE CONTROLE.	84
ANEXO II: COMPOSIÇÃO QUÍMICA OBTIDA POR ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS) NAS MACRO-INCLUSÕES DOS LOTES COM SÍLICA, REFERENTE A IMAGEM (D) DO LOTE 5560.....	84
ANEXO III: COMPOSIÇÃO QUÍMICA OBTIDA POR ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS) NAS MACRO-INCLUSÕES DOS LOTES COM SÍLICA, REFERENTE A IMAGEM (C) DO LOTE 5558.....	84

1 INTRODUÇÃO

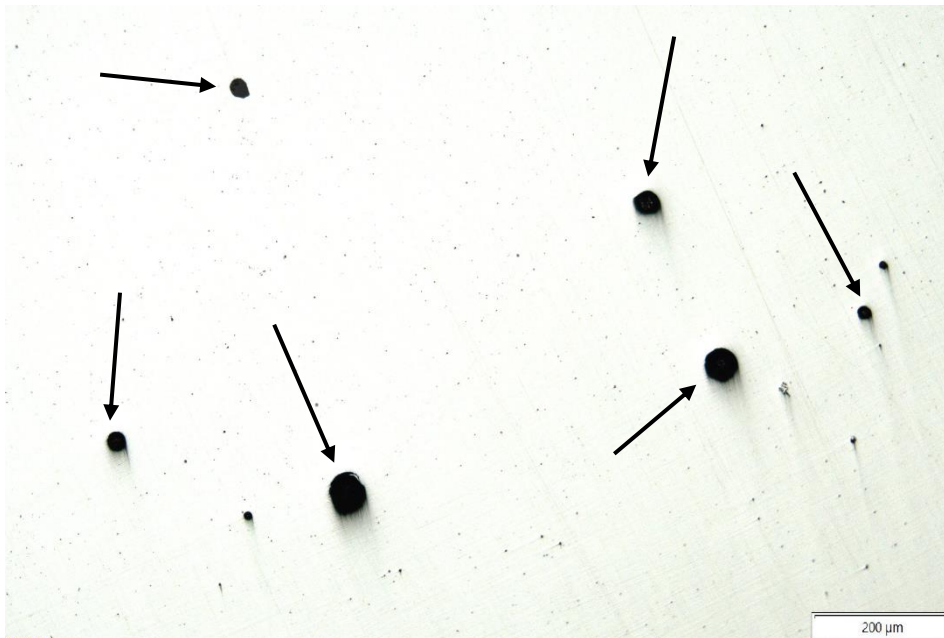
Tem grande influências sobre o comportamento dos aços tanto durante o seu processo quanto durante o seu uso, as características das inclusões não metálicas. Exercem grande influência sobre a qualidade do material laminado, a quantidade, a distribuição e a composição química dessas inclusões. Durante a laminação, estas podem causar rupturas do laminado com conseqüente descontinuidade do processo produtivo. Durante o uso, essas inclusões podem facilitar falhas indesejáveis de estruturas, uma vez que representam uma diminuição da ductilidade, tenacidade ao impacto, tenacidade à fratura, resistência à fadiga. Portanto, é tarefa fundamental o controle das características das inclusões para a garantia do bom controle de processo e do desempenho em uso de aços.

O processo produtivo de aços pode ser executado a partir de duas rotas principais: usinas integradas com conversores a oxigênio (LD/BOF) e como base de produção o minério de ferro; e as usinas semi-integradas atuando com forno elétrico à arco (FEA), utilizando como matéria-prima a sucata ferrosa, ferro gusa sólido e ferro-esponja (Bittencourt, 2015).

Durante o refino primário no FEA, ocorre a fusão da carga metálica por meio da energia elétrica e a injeção de oxigênio, gerando aço líquido e escória (Rossi, 2014). Ao decorrer dessa etapa, haverá a formação de óxidos oriundos de elementos reativos da carga metálica e dos fundentes disponíveis no banho líquido, promovendo a formação da escória oxidante constituída por impurezas que são prejudiciais à qualidade do aço (Souza, 2007).

Durante a transferência do aço do FEA para o forno panela (FP), uma pequena quantidade de escória acompanha o vazamento. Em seguida, é realizado o refino secundário, etapa responsável pela desoxidação do aço, ajuste da composição química, remoção das impurezas remanescentes e a correção da temperatura final do aço líquido. Nesse ciclo, devido a condição oxidante do aço líquido e a passagem de escória, haverá a adição de elementos de ligas, como o FeSi (ferro-silício) e/ou Fe-Si-Mn (ferro-silício-manganês), responsáveis por atuarem como modificadores da escória no processo de desoxidação, proporcionando a redução dos óxidos oriundos do refino primário, antes presentes no banho líquido, removendo-os para a escória, favorecendo a formação de inclusões não metálicas (Rizzo, 2006).

Figura 1: Vazios gerados pela presença de macro-inclusões (apontadas pelas setas pretas) presentes nas amostras finais, após lingotamento contínuo, observadas por microscopia óptica após polimento e ataque químico. Ampliação: 100x.



Fonte: O autor, 2025.

As inclusões não-metálicas, representadas pela figura 1, possuem diferentes classificações e podem impactar de forma significativa as propriedades mecânicas dos materiais, especialmente para determinadas aplicações (Bartosiaki, 2016). Esses efeitos prejudiciais podem ocorrer, durante a etapa de conformação mecânica com a redução da espessura do material, pois ao depender da quantidade e do formato das inclusões, podem ocasionar rupturas durante esse processo, gerando perdas e comprometendo a qualidade final do aço.

Neste contexto, o estudo de técnicas e de emprego de diferentes modificadores de escória durante os processos de refino de aços tem grande importância. Diversas são as técnicas empregadas durante o refino secundário, como desoxidação, dessulfuração, desfosforação, rinsagem e controle de inclusões. O controle de custos desses processos se faz necessário. O emprego de insumos mais baratos, como o briquete de minério de manganês e areia de sílica, requer estudos que demonstrem sua viabilidade. Desta forma, este trabalho tem como hipótese que o emprego de briquete de minério de manganês e areia de sílica, em comparação com

a condição padrão de uso de ferroligas de silício e manganês, tem influência na modificação da viscosidade/basicidade da escória, de forma a controlar distribuição, formato e composição química das macro-inclusões.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência da adição dos modificadores de escória no refino secundário, briquete de minério de manganês e areia de sílica, em comparação a condição padrão (Fe-Si-Mn), sobre a distribuição e a composição química das macro-inclusões presentes nos aços SAE1020 acalmado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Estabelecer a influência dos modificadores sobre a composição química da escória medida por fluorescência de raios-X.
- Estimar o grau da basicidade e a viscosidade teóricas, a partir da composição química da escória.
- Estabelecer a influência dos modificadores sobre a composição química das macro-inclusões no aço, provindas do forno panela, medida utilizando MEV/EDS.
- Estabelecer a influência dos modificadores sobre a distribuição, morfologia e composição química das macro-inclusões, utilizando microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura em amostras de aço após lingotamento contínuo.
- Estabelecer influência dos modificadores, conseqüentemente das características das macro-inclusões, sobre o comportamento mecânico dos vergalhões, através dos ensaios de tração, afim de verificar o alongamento, limite de escoamento, de resistência e a relação Lr/Le.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FORNO ELÉTRICO A ARCO

Inventado por Paul Héroult em 1889, o forno elétrico a arco (FEA) teve um crescimento limitado quanto a sua utilização na indústria siderúrgica durante vários anos devido ao custo da produção de eletricidade. Na década de 1930, o cenário se inverteu, e o FEA havia atingido um nível de desenvolvimento de participação na siderurgia “onde seria difícil ou quase impossível produzir determinadas especificações de aços sem seu emprego” (Costa e Silva, 2023).

Neste equipamento são realizadas três etapas dentro de sua operação: descarregamento da matéria-prima (sucatas e fundentes), fusão e refino desoxidante (descarburação e desfosforação) com o objetivo de uma obtenção rápida e eficiente de toda carga sólida em aço líquido, através dos elementos que o constituem e mediante a utilização da energia elétrica e química (Winck, 2018).

A sua composição baseia-se em uma carcaça metálica coberta por uma abóbada, sendo revestido internamente por material refratário (tijolos), possuindo o canal de vazamento excêntrico (onde ocorre o vazamento do aço líquido após o refino primário), a porta de escória (local que a escória é retirada), eletrodos de grafite com o seu sistema de controle e o sistema de queimadores e injetores (Gerdau, 2024).

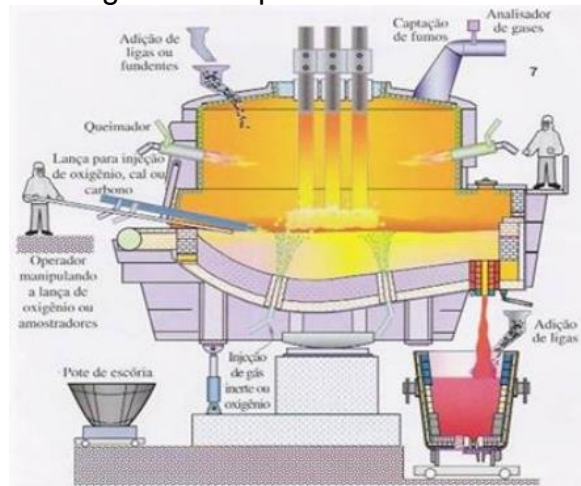
3.1.1 Fusão

Depois do descarregamento da carga metálica no FEA, ocorre a etapa de fusão após o fechamento do forno através da abóbada. Logo em seguida o disjuntor é ligado, sequenciando na energização do transformador e a passagem de corrente elétrica pelos cabos flexíveis até a ponta dos eletrodos no forno, sendo movimentados no sentido vertical para baixo, com o objetivo de formar o arco elétrico através do mínimo contato de suas extremidades com a carga metálica, gerando calor e transmitindo-o para a carga metálica sólida, resultando na fusão. (Rizzo, 2006).

Durante o ciclo, os eletrodos irão penetrar na carga, formando furos internos e favorecendo a fusão por meio do aumento da tensão e a redução do tempo de processo. A junção das cargas líquidas promove redução do volume sólido no forno,

ao passo que, no final deste ciclo, o arco elétrico irradiará calor para as paredes e para a abóbada, necessitando de uma diminuição da tensão para evitar impactos negativos.

Figura 2: Etapa de fusão.



Fonte: Rizzo, 2006.

Segundo Rizzo (2006), a proteção das paredes e da abóbada do forno contra a irradiação do arco elétrico é garantida pela formação da escória espumante, responsável por cobrir o arco e diminuir a transmissão de calor. A sua obtenção ocorre pela injeção de oxigênio através de lanças consumíveis e a reação com carbono da carga metálica para a formação de CO, que promove a sua espumação.

3.1.2 Refino primário: Formação de escórias

Segundo Costa e Silva (2023), as escórias formadas nos processos metalúrgicos tem como principal função a remoção das impurezas dos minérios e dos metais em refino, como os óxidos indesejáveis. Além disso, nas aciarias, elas atuam como isolantes térmicos, protegendo o metal líquido do contato direto com a atmosfera e reduzindo a entrada de gases, como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, que podem prejudicar a qualidade do aço.

A escória no processo metalúrgico não é um simples subproduto, mas sim uma parte essencial e controlada do processo. Para garantir a eficiência da remoção das impurezas e a separação dos compostos indesejáveis, é necessário promover o controle de propriedades como viscosidade, ponto de fusão, densidade e tensão

superficial. Para isso, são adicionados fundentes e formadores de escória em todos os processos metalúrgicos.

No passado, as escórias eram ricas em sílica devido ser um dos minerais mais abundantes na crosta terrestre. Ao passo que os conhecimentos metalúrgicos foram avançando, as composições químicas das escórias passaram a ser ajustadas com a adição de fundentes, com o objetivo de otimizar a sua função nos processos de refino (Costa e Silva, 2023).

Tabela 1: Composições típicas de escórias de processos siderúrgicos.

Escória	Composição Química (% peso)					
	SiO ₂	CaO	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	Outros
Alto-Forno	30-40	35-45	-	12-18	3-8	MnO
Conversor	10-20	40-50	10-25	-	4-10	MnO, P ₂ O ₅
Forno Elétrico (escória redutora)	15-20	60-65	<1,0	<3,0	5-10	CaF ₂

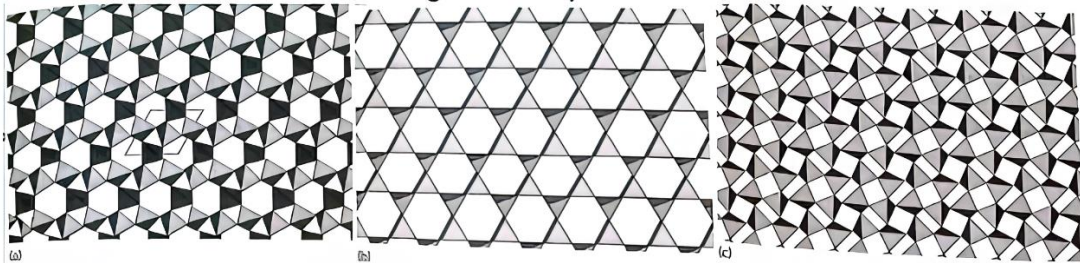
Fonte: Costa e Silva, 2023.

3.1.2.1 Estruturas das escórias e o impacto na viscosidade

A maneira como as escórias líquidas se organizam (suas estruturas) dependem do comportamento dos elementos químicos nela presentes. Um fator importante nesse comportamento é a eletronegatividade, caracterizada pela capacidade de um elemento em atrair elétrons, o quanto tende a formar íons, resultando na formação de ligações químicas de diferentes tipos, como iônicas e covalentes (Costa e Silva, 2023).

A presença de íons nas escórias líquidas, como Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , O^{-2} , PO_4^{-3} e SiO_4^{-4} contribuem na sua condutividade elétrica e influenciam diretamente em sua viscosidade, por promover a mobilidade entre suas cadeias. Os íons maiores e com estruturas mais complexas, como exemplo, o SiO_4^{-4} , tendem a formar ligações mais fortes entre si, dificultando o movimento das partículas no líquido, diminuindo a mobilidade dos íons, aumentando a viscosidade da escória devido à resistência ao escoamento desses elementos. De outra forma, a presença de íons menores evidencia menor viscosidade, possibilitando um melhor escoamento (Costa e Silva, 2023). Visando o estado sólido, os tetraedros de sílica podem se organizar de diferentes formas (polimorfismo), conforme a figura 3.

Figura 3: (a) Organização dos tetraedros na estrutura do quartzo ao longo de um plano. (b) Na estrutura tridimita ao longo de um plano. (c) Estrutura de cristobalita, ao longo de um plano.



Fonte: Costa e Silva, 2023.

Durante a fusão da sílica, a sua estrutura ordenada de tetraedros se rompe, passando à formação de redes com mobilidade limitada. Essa reorganização gera elevada viscosidade no estado líquido. À medida que a temperatura aumenta, as ligações se quebram e são refeitas continuamente, permitindo o movimento dos átomos e moléculas entre si, influenciando o escoamento e a difusão do material.

As escórias de aciaria e alto-forno, entretanto, têm adições significativas de outros óxidos, como CaO e MgO.

3.1.3 Descarburização e desfosforização

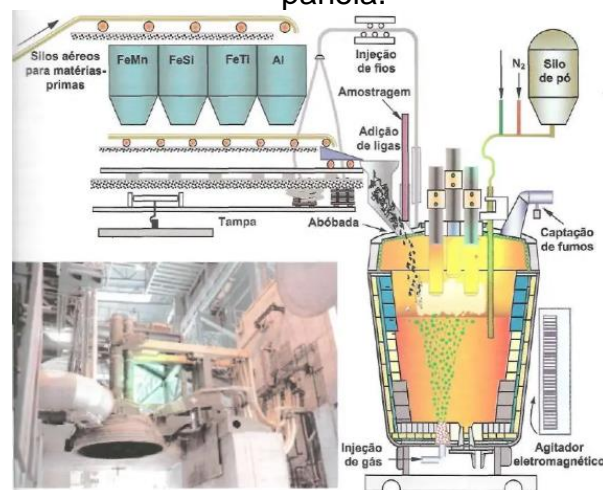
Após a etapa de fusão, o teor de carbono deve estar acima da especificação final, permitindo a sua redução até os níveis desejados por meio da oxidação do carbono. Esse processo ocorre com a injeção de oxigênio no banho, formando monóxido de carbono ($C + O = CO$). A reação promove agitação, homogeneização da composição química e da temperatura, além da eliminação de gases dissolvidos, ciclo este conhecido por descarburização (Costa e Silva, 2023).

A desfosforização ocorre em condições oxidantes e temperaturas baixas, sendo realizada simultaneamente ao final da fusão e da descarburização no forno elétrico a arco, com a presença da escória espumante. Durante esse processo, adiciona-se cal por volta de 1540 °C para formar uma escória de alta basicidade, capaz de converter o fósforo do banho metálico em fosfatos de cálcio, conforme a relação $((CaO)_4 \cdot P_2O_5)$, favorecendo a sua migração para a escória (EEL-USP, 2010).

3.2 FORNO PANELA

O forno panela é o tipo de processo mais utilizado no Brasil para o refino secundário dos aços, garantindo o equilíbrio dos elementos químicos, como o alumínio, silício e o teor de oxigênio residual no aço líquido, justificando a sua popularidade nos processos de aquecimento químico (Rizzo, 2006).

Figura 4: Representação esquemática de uma estação de refino secundário forno-panela.



Fonte: Rizzo, 2006.

Este equipamento é composto por uma abóbada com três eletrodos de corrente alternada, os sistemas de adição de ligas e amostragens de temperatura e composição, como também dispositivos responsáveis pela agitação do banho por injeção de gases inertes ou equipamentos eletromagnéticos, além de sistemas de captura de fumos e aparelhos que auxiliam no deslocamento do carro porta-panela.

3.2.1 Refino secundário

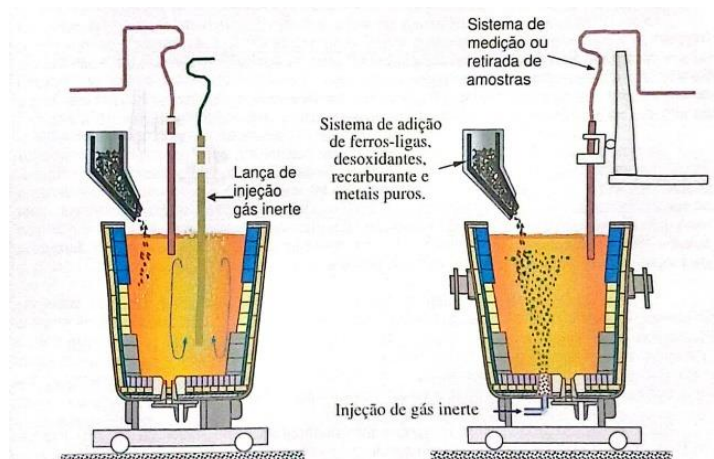
O refino secundário inicia-se com o vazamento do aço líquido para a panela até o seu tratamento final. Neste ciclo, realizam-se operações no banho metálico, como o ajuste da composição química e do grau de desoxidação, controle da temperatura, retirada do excesso de escória, remoção e modificação da morfologia de inclusões presentes, e uma leve descarburização. Para tais realizações, são aplicados os processos como a adição de recarburantes, ferro-ligas, metais puros, desoxidantes e injeção de gases inertes (Ar ou N₂) (Rizzo, 2006).

Cada processo possui objetivos e impactos específicos durante a etapa de vazamento. A incorporação de recarburante objetiva repor o carbono consumido no refino primário devido ao excesso de oxigênio, proporcionando uma elevada desfosforação. Geralmente, adiciona-se o coque moído no refino secundário durante o vazamento e após a desoxidação, evitando a formação elevada de CO (monóxido de carbono), espumação da escória e perdas do carbono. Já a adição de ferro-ligas, metais e desoxidantes pretende maximizar o rendimento e reduzir as impurezas, podendo ser realizada manualmente por calhas, ou de forma mais tecnológica, via silos equipados com dosadores. Quando adicionado antes do vazamento, pode aderir no fundo da panela e não fundir, principalmente caso vier formar algum “cascão” (Rizzo, 2006).

Os métodos de adições dos ferro-ligas impactam diretamente o tratamento do aço no forno panela. Visando um maior rendimento, inicialmente é feita a adição com elementos mais desoxidantes (ex.: alumínio) e posteriormente com os menos eficientes (ex.: ferro-manganês), ou ao contrário, começando com os menos eficazes para prolongar a agitação do banho metálico, auxiliando na remoção de inclusões.

Em seguida, ocorre a injeção de gás inerte, geralmente sendo o argônio, representado pela figura 5, podendo ser introduzido pelo fundo da panela, mediante a utilização de peças refratárias (*plug* poroso), ou pelo topo, por meio de lanças refratárias até o fundo, garantindo sua dispersão no banho.

Figura 5: Representação esquemática de duas formas distintas da injeção de gás inerte, durante o processo de refino secundário.



Fonte: Rizzo, 2006.

Essa etapa é fundamental para promover a homogeneização da composição química e a temperatura do aço, além de favorecer a flotação de inclusões. Durante esse ciclo, a turbulência depende da intensidade da injeção de gás, pois com baixa intensidade, são privilegiadas as remoções das inclusões e a limpidez do aço, em altas intensidades, obtêm-se maior homogeneidade do banho líquido (Rizzo, 2006).

3.2.2 Desoxidação do aço

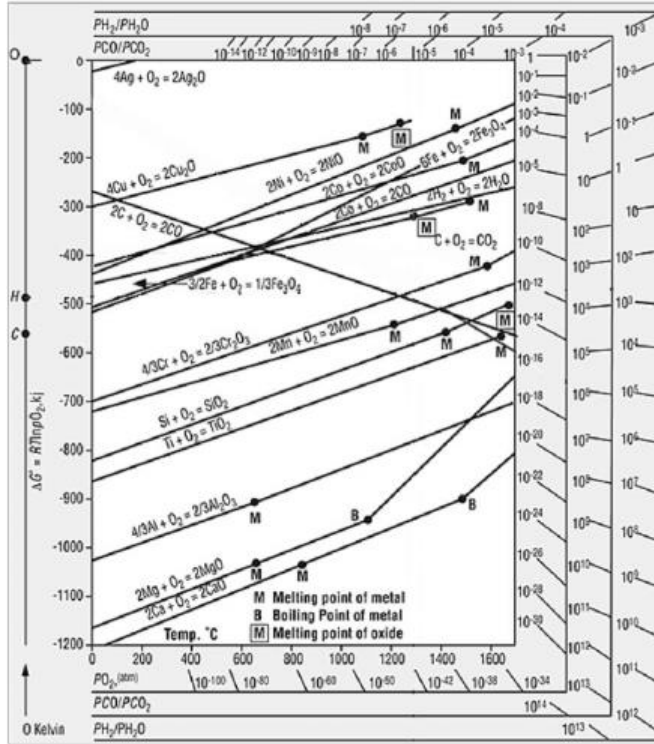
No refino secundário, durante ou após o vazamento para o forno panela, são adicionados elementos de liga visando controlar o grau de desoxidação do aço líquido, resultando na variação dos teores de oxigênio no banho, em torno de 0,04 a 0,10 % (400 a 1.000 ppm). Devido a solubilidade do oxigênio ser limitada (0,16% no aço líquido e 0,003% no sólido), o controle é necessário para evitar diversos fatores nocivos, como a formação de inclusões, projeções de metal ou de escória, baixo rendimento de ligas, formação de FeO (óxido de ferro), bolhas de CO (monóxido de carbono) e defeitos nos produtos lingotados (Rizzo, 2006).

O mecanismo de desoxidação ocorre por meio da adição de elementos químicos que apresentam afinidade com o oxigênio, formando óxidos que garantem a remoção deste elemento do banho líquido, transferindo-os para a escória por meio da flotação. Segundo Melo (2019), o Diagrama de Ellingham permite comparar o poder redutor de um metal em relação ao óxido de outro metal. Como exemplo, na figura 6 à 1000° C, o alumínio tem a capacidade de reduzir a sílica, ao contrário do cromo (Cr). Logo, os elementos de Si (silício) e Mn (manganês) poderão reduzir o ferro, realizando a sua desoxidação (retirada de oxigênio), resultando na obtenção de produtos de desoxidação desde a sílica sólida (maior facilidade de ser fixada na escória, após retirada do banho líquido) até o silicato líquido de manganês ($MnSiO_3$).

De acordo com a variação da energia livre padrão de formação (ΔG°) dos óxidos em função da temperatura, quanto mais baixa for a posição da curva (linha cheia), maior a estabilidade do óxido e, portanto, maior a eficiência do elemento como desoxidante (afinidade pelo oxigênio), deixando o banho com uma menor concentração de oxigênio livre, transferindo para escória no formato de óxidos. Por

exemplo, Al (alumínio) e Si (silício) estão em posições mais baixas, sendo desoxidantes fortes, enquanto o manganês é considerado fraco.

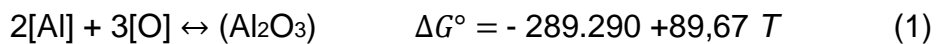
Figura 6: Diagrama de Ellingham – Variação da energia livre padrão por mol de oxigênio com a temperatura para vários óxidos.



Fonte: Silva, 2013.

Quanto ao formato de cada elemento adicionado, o alumínio pode ser em barras, granulado ou arames, enquanto o silício via ferro-silício granulado. Quando combinados, desoxidantes como o Si + Mn (silício + manganês) promovem uma desoxidação complexa. Diferente da alumina que flutua facilmente, a sílica pura não apresenta essa característica, porém na presença de Mn, formam partículas de SiO₂ (ácido) e MnO (básico) cuja atração favorece a flotação (Rizzo, 2006).

Um exemplo do controle de variáveis na desoxidação é a reação entre o alumínio com o oxigênio dissolvido no aço líquido:



A porcentagem de oxigênio em equilíbrio com o alumínio em certa temperatura, pode ser determinada pela energia livre de Gibbs (ΔG°), responsável por definir a estabilidade do sistema:

$$\Delta G^\circ = \Delta G^\circ_{Al_2O_3} - 2\Delta G^\circ_{[Al]\%} - 3\Delta G^\circ_{[O]\%} \text{ e } \Delta G^\circ = -RT \ln K \frac{\alpha_{Al_2O_3}}{(\%Al)^2 \cdot (\%O)^3} \quad (2)$$

Considerando os coeficientes de atividade henriano para oxigênio e do alumínio iguais a 1,0, a energia livre de Gibbs da reação de desoxidação pelo alumínio é:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \text{ onde } K = \frac{a_{Al_2O_3}}{(\%Al)^2 \cdot (\%O)^3} \quad (3)$$

$$(\%Al)^2 \cdot (\%O)^3 = \frac{a_{Al_2O_3}}{K} \quad (4)$$

Como a alumina formada está no estado sólido e pura, seu coeficiente de atividade $a_{Al_2O_3} = 1,0$:

$$-298.290 + 89,67 \cdot T = \Delta G^\circ = -RT \ln[(\%Al)^2 \cdot (\%O)^3] \quad (5)$$

Com temperatura de 1600 °C, a equação resulta em:

$$(\%Al)^2 \cdot (\%O)^3 = 6,95 \times 10^{-15} \quad (6)$$

Portanto, para reduzir o teor de oxigênio no aço, pode-se aumentar o teor de Al ou reduzir o coeficiente de atividade da alumina (por exemplo, utilizando escória que favoreça a remoção do oxigênio).

3.2.2.1 Mecanismo da escória desoxidante na metalurgia secundária

Após a fusão, verifica-se a redução dos teores dos elementos químicos no banho metálico, sendo eles: fósforo, carbono, silício e manganês. Esse ciclo objetiva a pré-limpeza do aço líquido devido a presença de elementos nocivos, a depender do teor de oxigênio presente, da homogeneização do banho, da interação metal-escória e da variação de temperatura (Rizzo, 2006). A pré-limpeza ocorre pela ação do oxigênio livre, dos fundentes (cal, dolomita) e da oxidação dos elementos oriundos da carga metálica, como o silício, manganês e o alumínio, formando a escória de desoxidação constituída por óxidos e impurezas do banho líquido.

Antes de ocorrer o vazamento do aço líquido para o forno panela, o teor de oxigênio dissolvido é medido com células eletroquímicas (Celox), fornecendo também a concentração de oxigênio livre e a temperatura final do aço líquido.

Posteriormente, o banho é transferido do FEA para o forno panela, e durante esse ciclo, é necessário ter o mínimo de concentração de escória no forno panela, retendo cerca de 20% em fornos com bica lateral e 10% do tipo EBT. A redução da passagem de escória favorece o tratamento no refino secundário, reduzindo as adições de fundentes, permitindo a formação de escórias sintéticas a base de cálcio,

alumínio, garantindo eficiência na dessulfuração, proteção térmica e o controle da incorporação de gases da atmosfera (Costa e Silva, 2006).

3.2.2.2 Basicidade da escória

A basicidade (B) da escória é um parâmetro essencial no refino secundário, pois controla a atividade dos óxidos presentes no banho líquido e sua interação com a escória (Dutra, 2018). É normalmente definida pela razão entre óxidos básicos e ácidos, geralmente expressa como:

$$B = \frac{CaO}{SiO_2} \quad (7)$$

Considerando a estrutura química das escórias, compostas por diferentes íons e cadeias poliméricas, os óxidos são classificados conforme a sua capacidade de doar ou receber íons O^{-2} . Por exemplo:

- Doadores (óxidos básicos): $CaO = Ca^{+2}, + O^{-2}$
- Receptores (óxidos ácidos): $SiO_2 + O^{-2} = SiO_4^{-4}$

Essa classificação está relacionada à eletronegatividade do cátion, que indica a facilidade ou dificuldade de remoção de elétrons. Óxidos básicos, como CaO (óxido de cálcio), favorecem reações que reduzem a oxidação do aço e auxiliam na absorção das inclusões, enquanto óxidos ácidos tendem a aumentar a oxidação e a formação de macro-inclusões indesejadas.

Segundo Costa e Silva (2023), com a adição de um óxido básico (CaO, por exemplo) a um silicato líquido, haverá a formação de cadeias menores no interior da escória, deixando-a mais fluída. Essa “quebra” de cadeias de sílica é demonstrada pela equação (8) e pela figura 7, logo em seguida.



Fincham e Richardson (1954) sugeriram, pela primeira vez, que há íons de oxigênio livres (íon O^{-2}) na escória, quando estudaram a dessulfuração do aço, devido a dissociação do CaO. Eles identificaram três tipos de átomos de oxigênio na estrutura de uma escória: os formadores de pontes (*bridging* – BO), os que não formam pontes

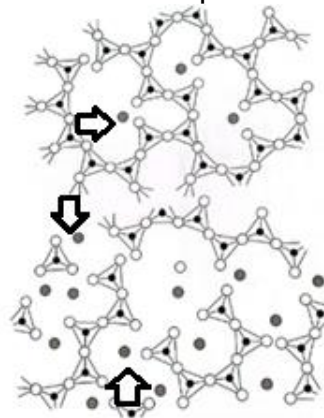
(*non-bridging* (NBO)), e os livres. Na figura 8 são indicados esses três tipos de átomos de oxigênio, no esquema estrutural de uma escória.

Tabela 2: Eletronegatividade de cátions típicos encontrados em escórias e a classificação, quanto à basicidade de seu óxido.

Classificação do óxido	Óxido	Eletronegatividade do cátion
Básicos	Na ₂ O	0,9
	BaO	0,9
	CaO	1,0
	MnO	1,4
	FeO	1,7
	ZnO	1,5
Intermediários	MgO	1,2
	Cr ₂ O ₃	1,6
	Al ₂ O ₃	1,5
	Fe ₂ O ₃	1,8
	TiO ₂	1,6
Ácidos	B ₂ O ₃	2,0
	SiO ₂	1,8
	P ₂ O ₅	2,1

Fonte: Costa e Silva, 2023.

Figura 7: Quebra das cadeias de tetraedros de sílica pela adição de óxido básico. Círculos cinzas indicados pela seta preta: Ca^{+2} .



Fonte: Adaptado de Costa e Silva, 2023.

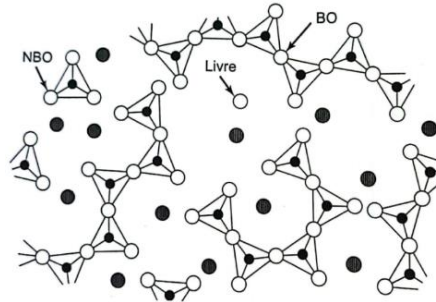
Em analogia ao conceito de pH em soluções aquosas, Costa e Silva (2023) traz como definição ideal de basicidade (B) para as escórias a seguinte equação:

$$B = \log a_{O^{2-}} \quad (9)$$

Ou seja, o logaritmo da atividade do óxido de íon na escória. Porém, essa abordagem não é utilizada, pois termodinamicamente não é possível definir a

atividade desse íon na escória. Por outro lado, empregar a atividade de CaO apenas não é o suficiente, pois diversos óxidos podem fornecer o íon O^{-2} à escória.

Figura 8: 3 tipos de oxigênio, na estrutura de uma escória. BO: *bridging oxygen* ou oxigênio formador de ponte (O^2); NBO: *non-bridging oxygen* ou oxigênio não formador de ponte (O^{-1}); Livre: oxigênio livre (O^{-2}).



Fonte: Costa e Silva, 2023.

Portanto, para superar essa limitação, são empregados indicadores indiretos que possibilitam estimar o comportamento da escória em relação à presença e atividade do íon O^{-2} , podendo oferecer uma forma mais prática de avaliar sua basicidade.

Tabela 3: Diferentes fórmulas para quantificar a atividade de íon O^{-2} nas escórias.

Basicidade V	$\frac{\%CaO}{\%SiO_2}$	Basicidade binária (% peso)
	$\frac{\%CaO}{(\%SiO_2 + \%P_2O_5)}$	Aciaria (% peso)
	$\frac{\%CaO + \%MgO}{(\%SiO_2 + \%P_2O_5)}$	
	$\frac{\%CaO}{(\%SiO_2 + \%P_2O_5)}$	

Fonte: Adaptado de Costa e Silva, 2023.

A basicidade *V* não é uma medida exata, mas uma ferramenta prática para prever o comportamento da escória em processos de desfosforação, dessulfuração ou controle da viscosidade.

3.2.2.3 Ajuste da composição química

Os elementos de liga, adicionados em formatos de ferros-ligas ou metais puros, tem a função de ajustar a composição química do aço líquido, corrigindo os teores dos elementos que estão abaixo do especificado. O rendimento dessas adições depende

da estabilidade dos elementos e do baixo teor de impurezas, podendo variar conforme o grau de oxidação do banho e a quantidade de escória presente.

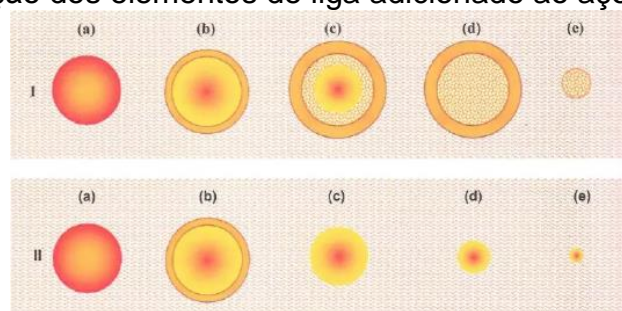
Os elementos que possuem afinidade pelo oxigênio, como exemplo, o Si, Al, Ti (titânio) e Mn, atuam na desoxidação do aço líquido, removendo as inclusões não metálicas e transferindo-as do banho líquido para a escória durante a rinsagem. A dissolução e absorção desses elementos no aço líquido ocorre sob diferentes condições possíveis, classificando-se como:

Classe I: Englobam os metais e ligas com temperatura de fusão abaixo da solidificação do aço (~1500 °C) que dissolvem no aço líquido por fusão. Abrangem ferros-liga (FeMn, FeSiMn, FeCr, FeSi), e metais puros (Cu, Al). A adição da liga ao banho (a) forma inicialmente uma camada sólida de aço ao redor (b), permanecendo intacta enquanto a liga vai sendo fundida (c), antes da camada de aço refundir e liberá-la ao banho (e) (Rizzo, 2006).

Classe II: Incluem as ligas com ponto de fusão acima de 1500 °C, como o FeV, FeW e FeMo. Conforme a figura II, com as adições ao banho, (a) ficam envoltas por uma camada solidificada de aço (b), que depois se funde, expondo a liga (c), e permitindo o seu processo de dissolução gradual no aço líquido (d), mediada pela interdifusão e solubilidade dos elementos (Rizzo, 2006).

Segundo Guthrie (1993), verificam-se que os elementos da classe I se dissolvem no aço líquido 10 vezes mais rápido que os da classe II. Vale ressaltar que o tempo de dissolução do material varia com base em três variáveis, sendo: o tipo de material, a temperatura e a agitação do banho, proporcionando a sua redução com o aumento dessas variáveis e com os tamanhos das partículas. Portanto, para evitar a oxidação pela atmosfera ou pela escória, estes elementos devem ser adicionados no refino secundário, em pó e no fundo do banho, aumentando o tempo e a área de contato e facilitando a sua dissolução.

Figura 9: Representação esquemática dos mecanismos propostos para simular a dissolução e absorção dos elementos de liga adicionado ao aço líquido nas painéis.



Fonte: Rizzo, 2006.

3.2.2.4 Briquete de manganês

O manganês (Mn) é um metal de transição de número atômico 25, pertencente ao grupo 7 e localizado no quarto período da tabela periódica. A sua massa molar é de 54,94 g e a densidade varia entre 7,21 e 7,44 g/cm^3 , dependendo de suas formas alotrópicas. Com aspecto físico prateado e coloração cinza, caracteriza-se em um metal frágil e duro (Jesus, 2020).

Localizado em diversos lugares no planeta, possui concentração média aproximada a 0,1%, sendo este elemento encontrado em classes de minerais, como os óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos, conforme a tabela 4 (Tangstad, 2013).

Tabela 4: Principais minerais de manganês.

Classe Mineral	Nome	Fórmula Química
Óxidos	Pirolusita	MnO ₂
	Vernadita	MnO ₂ .H ₂ O
	Braunita	3(Mn,Fe) ₂ O ₃ .MnSiO ₃
	Braunita II	7(Mn,Fe) ₂ O ₃ .CaSiO ₃
	Manganita	g-MnOOH
	Psilomelano	(K,Ba)(Mn ⁺² Mn ⁺⁴) ₈ O ₁₆ (OH) ₄
	Cryptomelano	(K,Ba)Mn ₈ O ₁₆ * xH ₂ O
	Hollandita	(Ba,K)Mn ₈ O ₁₆ * xH ₂ O
	Todorokita	(Ca,Na,K)(Mn ⁺² Mn ⁺⁴) ₆ O ₁₂ * xH ₂ O
	Hausmannita	(Mn,Fe) ₃ O ₄
	Jacobsita	Fe ₂ MnO ₄
Bixbyita	(Mn,Fe) ₂ O ₃	
Carbonatos	Manganocalcita	(Mn,Ca)CO ₃
	Oligonita	(Fe,Mn)CO ₃
	Rodocrosita	MnCO ₃
Silicatos	Rodonita	MnSiO ₃
	Tefroita	Mn ₂ SiO ₄
Sulfetos	Alabandina	MnS
	Gauerita	MnS ₂

Fonte: Lopes, 2023.

O mineral Mn possui diversas formas para serem empregados, podendo ser por ferro-ligas e também pelos briquetes, a depender da maneira como é produzido, de acordo com sua base mineralógica.

No processo de refino secundário, durante a etapa de desoxidação, são utilizadas as ferro-ligas, como exemplo de Mn e Si, que proporcionam melhorias nas propriedades mecânicas do aço e auxiliam na remoção do oxigênio:

- Rodonita (MnSiO_3), é um silicato de manganês. Pode ser fonte de ambos os elementos desoxidantes (Mn e Si), embora com uso industrial mais limitado.

Figura 10: Ferro-ligas de Mn e Si.



Fonte: Ferroligas Brasil, 2016.

Além disso, para garantir o seu formato de briquete, as partículas finas do mineral são aglomeradas por meio da aplicação de pressão, podendo ser com ou sem o uso de ligantes, objetivando a produção de um sólido compactado, com formato, tamanho e resistência mecânica adequados (Jesus, 2020). Neste caso, o uso de ligantes favorece a incorporação de componentes na escória, adequando a sua condição no refino secundário.

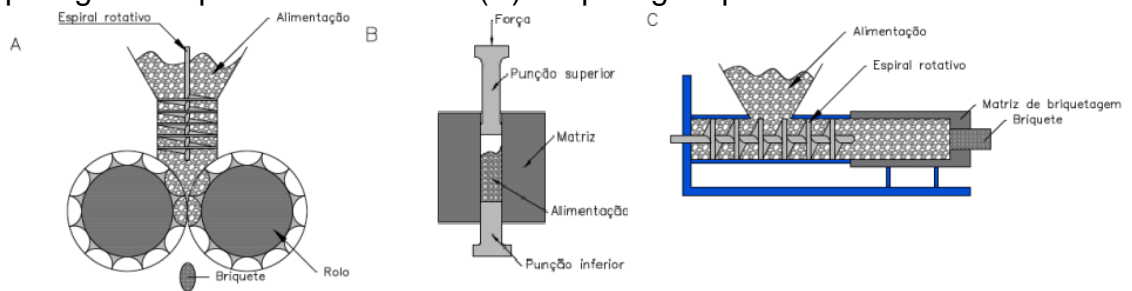
Figura 11: Briquetes de Mn.



Fonte: Metais BR.

Segundo Carvalho e Brink (2010), na figura 12 existem três principais processos de briquetagem utilizados no Brasil: briquetagem por rolos (A), o mais comum, em que o material passa continuamente entre dois rolos paralelos, com moldes; briquetagem em prensa hidráulica (B), feita de forma intermitente com preenchimento e prensagem dos moldes; briquetagem por extrusão contínua (C), onde o material é moldado de forma contínua.

Figura 12: Principais processos de briquetagem: (A): Briquetagem em rolos, (B) Briquetagem em prensa hidráulica e (C) Briquetagem por extrusão contínua.



Fonte: Jesus, 2020.

Em termos ambientais, econômicos e operacionais, os briquetes de manganês apresentam vantagens significativas. Produzidos a partir de minério de manganês, promovem o reaproveitamento de resíduos que seriam descartados em barragens, reduzindo impactos ambientais e as necessidades de novas extrações. Além disso, diminuem custos com a aquisição de insumos e gestão de rejeitos, enquanto sua alta densidade e resistência mecânica asseguram eficiência na desoxidação e estabilidade do processo, contribuindo para a limpeza do aço e para práticas sustentáveis na siderurgia (Costa et al., 2024; Lopes, 2023; Medeiros, 2018).

3.2.2.5 Ferro silício

Segundo Alves (2025), o ferro silício é uma liga composta principalmente por ferro e silício, com 65% a 75% de silício, com bastante utilização nas siderurgias como desoxidante e agente de liga. É produzida por meio da redução carbotérmica da sílica (SiO_2) na presença de ferro, realizado em fornos elétricos a arco submerso. Logo em seguida, ocorre o vazamento do metal líquido em moldes, sendo resfriado para formar lingotes ou granulados. Durante a etapa de refino secundário, tem como objetivo reduzir o teor de oxigênio dissolvido no aço líquido, proporcionando maior limpeza no produto final (Alves, 2025).

Quanto ao seu princípio termodinâmico, a sua eficiência como desoxidante está associada à sua alta afinidade pelo oxigênio, formando sílica (SiO_2), quando em contato com o aço líquido.



Com base no diagrama de Ellingham, termodinamicamente esta reação é altamente favorável, pois a linha de formação desse óxido evidencia valores negativos de ΔG^0 , tornando-se um desoxidante eficaz (Alves, 2025).

Quanto ao seu mecanismo de atuação, quando adicionado no aço líquido, promove a liberação do silício que reage com o oxigênio dissolvido no banho. Posteriormente, obtendo-se a sílica, haverá a formação de inclusões não metálicas que podem flutuar para a escória ou permanecer no banho líquido, dependendo de vários fatores, como a eficiência da rinsagem e as variáveis da qualidade da escória.

Figura 13: Ferro silício 75% granulado, utilizado como desoxidante.



Fonte: ZZ Ferroalloy, 2023.

3.3 INCLUSÕES NÃO METÁLICAS

Segundo Moraes (2009), as inclusões são partículas não metálicas, principalmente de óxidos e sulfetos, apresentando dimensões sub-microscópicas, que se formam na matriz de metais e ligas durante o processo de desoxidação.

A presença dessas inclusões compromete diversas propriedades mecânicas, como a tenacidade à fratura, resistência ao impacto, à fadiga, à corrosão, e a trabalhabilidade à quente, principalmente nos casos específicos de aços que devem apresentar alta resistência para aplicações críticas. Apesar de ser impossível eliminar totalmente esses tipos de inclusões nesses materiais, estima-se que sua quantidade varie entre 10^{10} e 10^{15} partículas por tonelada de aço.

As inclusões não-metálicas presentes no aço são classificadas principalmente pelo seu tamanho, em micro-inclusões e macro-inclusões. As macro-inclusões, com dimensões geralmente superiores a 50 -100 μm , devem ser eliminadas devido ao seu efeito nocivo nas propriedades mecânicas do aço. Já as micro-inclusões, com

tamanho inferior a 50 μm , podem ser toleradas, e em alguns casos, contribuem positivamente para o desempenho do material em determinadas situações. Quando controladas, elas auxiliam no refino do tamanho de grão, podem aumentar o limite de escoamento e dureza e atuar como núcleos para a precipitação de compostos, como os carbonetos e nitretos, quando essas características são desejadas para aplicação do aço (Moraes, 2011; Avillez, 2006).

3.3.1 Classificação das inclusões: Origem

Além da classificação baseada no tamanho, as inclusões também são classificadas quanto à sua origem, em endógenas e exógenas, pois apresentam efeitos diferentes nas propriedades do produto final (Ghosh, 2001):

- As inclusões endógenas são oriundas das reações do processo de desoxidação durante a fabricação do aço (Finardi, 1989). Esses tipos de inclusões são geralmente encontrados em aços com baixo teor de carbono e acalmados ao alumínio, resultando em inclusões de alumina, enquanto que nos aços acalmados ao silício predominam-se as inclusões de sílica. Essas partículas são geradas pela interação do oxigênio dissolvido no metal líquido e os elementos dos agentes desoxidantes utilizados, como o alumínio e o silício.
- Segundo Finardi (1989), as inclusões exógenas são resultadas das associações químicas ou mecânicas do metal líquido com os refratários, com os pós de cobertura (distribuidor) e os fluxantes (escórias que interagem com ar atmosférico).

Além da classificação baseada no tamanho, as inclusões também podem apresentar diferentes formas e distribuições devido a outros fatores, como a presença de bolhas de gases (de argônio e nitrogênio, por exemplo) durante o processo de fabricação. Essas bolhas são responsáveis por envolver as inclusões, favorecendo a sua aglomeração devido a tensão superficial, resultando em defeitos lineares nos produtos finais (Castello, 2022).

3.3.2 Classificação das inclusões: Composição química

As inclusões presentes nos aços podem ser classificadas com base em sua composição química presente, dividindo em quatro categorias: óxidos, sulfetos, nitretos e fosfetos.

Segundo Moraes (2009), os óxidos englobam compostos como alumina, sílica, aluminatos de cálcio, espinélios, óxidos de ferro e de manganês. O grupo de sulfetos são representados, principalmente, pelos sulfetos de manganês e cálcio. Enquanto que os nitretos apresentam variações devido aos elementos de ligas presentes, como exemplo os nitretos de titânio, alumínio e carbono. E os fosfetos incluem compostos de ferro e outros elementos com fósforo.

Tabela 5: Classificação química dos tipos de inclusões presentes nos aços.

Classe	Tipo de Inclusão	Descrição
1	Al ₂ O ₃	Inclusão de alumina
2	CA	Aluminato de cálcio
3	CA-CaS	Aluminato de cálcio com sulfeto de cálcio
4	CA-(Ca,Mn)S	Aluminato de cálcio com sulfeto de cálcio-manganês
5	MgO.Al ₂ O ₃	Espinélio de magnésio
6	MnO.Al ₂ O ₃	Espinélio de manganês (galaxita)
7	Mn-Silicato	Silicato de manganês
8	Al-Silicato	Silicato de alumínio
9	Mn-Al-Silicato	Silicato de manganês e alumínio
10	CaO-CaS	Óxido de cálcio ou óxido de cálcio com sulfeto de cálcio
11	(Mn,Fe)S	Sulfeto de manganês e ferro
12	TiS	Sulfeto de titânio
13	(Mn, Fe, Ti)S	Sulfeto de manganês-ferro-titânio
14	CaS	Sulfeto de cálcio
15	(Mn,Fe,Ca,Ti,Mg)S	Sulfeto de manganês-ferro-cálcio-titânio-magnésio
16	OS	Oxissulfeto (óxido endógeno com sulfeto)
17	OCN	Oxicarbonitreto
18	OCN-S	Oxicarbonitreto com sulfeto
19	CN	Carbonitreto
20	CN-S	Carbonitreto com sulfeto
21	Exógena+Na	Inclusão exógena contendo sódio
22	Exógena	Inclusão exógena
23	Desconhecida	Partícula não classificada

Fonte: Moraes, 2009.

A tabela acima contempla quase todos os tipos de inclusões em aços, com exceção dos óxidos de ferro e dos fosfetos. Isso ocorre devido ao método utilizado para a determinação da composição química das inclusões, que desconsidera o ferro na composição das inclusões para evitar interferências na matriz metálica.

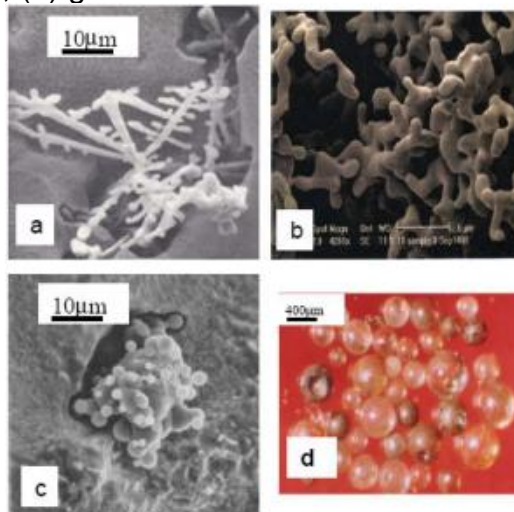
Além disso, as inclusões de fosfetos são pouco comuns nos aços produzidos atualmente, devido à maior eficiência na etapa de desfosforação durante o processo de refino dos aços no FEA.

3.3.2.1 Alumina

As inclusões de alumina (Al_2O_3) são formadas por diversas formas, principalmente pela desoxidação do aço com o alumínio ou da contaminação do metal líquido por partículas provenientes dos refratários da panela. Também podem surgir de ferro-ligas, como o FeSi, as quais podem conter alumínio como impureza. Na presença de alumínio e oxigênio dissolvidos no aço líquido, irão predominar inclusões com grande quantidade de Al_2O_3 já que a constante de desoxidação do alumínio no aço líquido é muito baixa, em torno de 10^{-14} à 1600 °C, favorecendo a formação dessas partículas mesmo com pequenas quantidades de alumínio presentes (Moraes, 2009).

Quanto às estruturas cristalinas da alumina, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ e $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, apenas $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ é encontrada nas inclusões presentes nos aços, sendo do tipo hexagonal com estrutura lamelar (Castello, 2022). Em relação às formas que esses tipos de inclusões apresentam, Zhang e Thomas (2002) propuseram que podem ser: dendríticas, que são originadas durante a desoxidação do aço, contendo alto teor de oxigênio; estruturas em forma de um coral, produzidas através do *amadurecimento de Ostwald* das inclusões dendríticas; aglomerados de partículas, que são formados por meio de colisões de pequenas esferas de alumina; grandes esferas de óxidos complexos, devido ao arraste da escória líquida. Esses formatos são evidenciados pela figura 15.

Figura 14: Imagens do microscópio eletrônico de varredura (MEV) de inclusões de alumina: (a) estruturas dendríticas; (b) estruturas em forma de coral; (c) aglomerados de partículas; (d) grandes esferas de óxidos complexos.



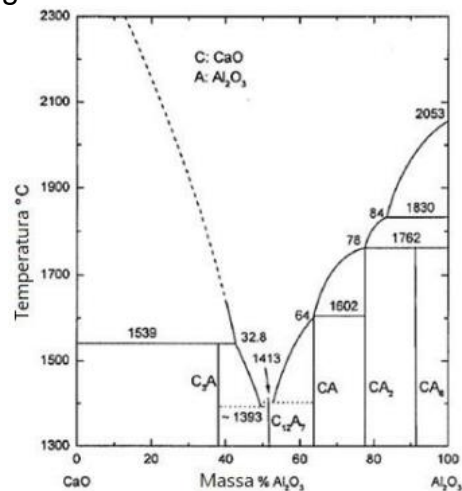
Fonte: Moraes, 2009.

3.3.2.2 Aluminatos de cálcio

Na aciaria, os aluminatos de cálcio se formam durante o processo da modificação das inclusões da alumina, através da adição de cálcio ao aço líquido, como também podem surgir da interação da alumina com a escória, quando existe a adição de cal (Moraes, 2009).

O tratamento com cálcio é amplamente utilizado no refino dos aços para modificar a morfologia das inclusões de alumina, que não se fundem facilmente durante o processo. A adição de cálcio favorece a formação de aluminatos de cálcio, como o $C_{12}A_7$, que possuem baixo ponto de fusão e se transformam em inclusões líquidas e globulares. Essa modificação é benéfica durante a etapa de vazamento, pois evita o entupimento de bicos e canais. Embora o cálcio não remova as inclusões, ele melhora a fluidez do processo, tornando as inclusões mais toleráveis por serem pequenas (menores que $0,25 \mu\text{m}$) e menos prejudiciais ao produto final (Yang et al., 2022). Com base no diagrama de fases do sistema binário $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, conforme o teor de CaO aumenta até aproximadamente 50%, os pontos de fusão dos aluminatos de cálcio diminuem, com temperatura mínima de fusão por volta de $1400 \text{ }^\circ\text{C}$, especificamente para as inclusões $C_{12}A_7$, podendo estar presentes na forma líquida até o aço se solidificar (Castello, 2022).

Figura 15: Diagrama de fases do sistema binário $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$.

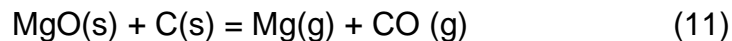


Fonte: Castello, 2022.

3.3.2.3 Espinélios

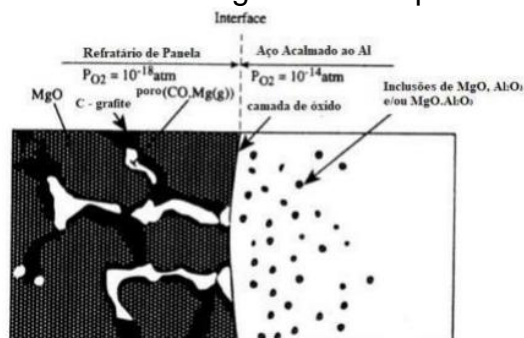
Espinélios são inclusões constituídas por óxidos mistos de dois tipos de metais: um com valência II (Mg^{2+} , Fe^{2+} ou Mn^{2+}) e outro com valência III (Al^{3+} , Fe^{3+} ou Cr^{3+}). Eles possuem a mesma estrutura cristalina, seguindo a fórmula geral $AO.B_2O_3$. O nome “espinélio” é oriundo do mineral $MgO.Al_2O_3$, podendo apresentar variações, conforme dito anteriormente: o Mg ser substituído pelo Fe^{2+} ou Mn^{2+} , enquanto o Al_2O_3 pode ser parcialmente substituído por exemplo, pelo Cr_2O_3 , resultando em espinélios como, $MgO.Al_{2-x}.Cr_2O_3$. Caso o Al for totalmente substituído pelo Fe^{3+} , irá ser formada a ferrita de magnésio ($MgO.Fe_2O_3$) (Castello, 2022). Segundo Pires (2004), em aços acalmados com alumínio e escória básica, podem estar presentes inclusões de espinélio ($MgO.Al_2O_3$), devido à entrada de magnésio e cálcio da escória para o metal.

Conforme Dekkers (2005), durante o processo de produção do aço, o magnésio tem origem por diversas fontes, tais como: impurezas no alumínio usado como desoxidante, desgaste do refratário ou da própria escória. Em altas temperaturas, o refratário reage com o carbono, liberando o Mg gasoso, movendo-se até a superfície do aço, oxidando e formando a camada de óxido. Esse mecanismo é representado pela reação 8:



Ademais, o monóxido de carbono gerado pode reagir com o Al e Mg já dissolvidos no aço, resultando em óxidos sólidos (Al_2O_3 e MgO). Inicialmente, ocorre a formação de uma película fina de óxidos, posteriormente essa camada aumenta devido a adsorção de CO na interface gás/óxido, trazendo dificuldades para novas oxidações, pois estará limitando a difusão de gases. Vale ressaltar que durante o refino secundário na panela, também pode ocorrer as formações de espinélios através da reação do alumínio presente no banho com o refratário magnesiano.

Figura 16: Interface refratário magnesiano de panela – Aço líquido.



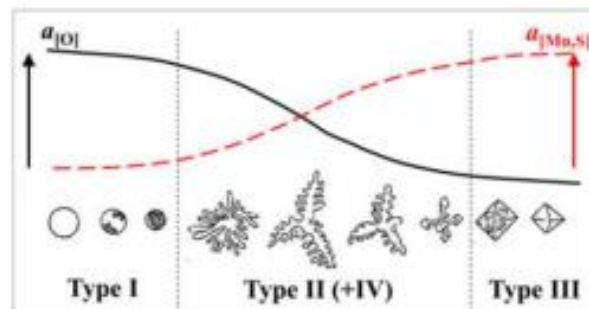
Fonte: Castello, 2022.

3.3.2.4 Sulfeto de manganês

Quando a solubilidade do oxigênio diminui, haverá menos formação de óxidos no banho líquido, com isso o enxofre permanece mais tempo dissolvido no aço líquido, favorecendo a formação de sulfetos (MnS) ao invés de óxidos, trazendo consequências nas morfologias das inclusões. Os sulfetos de manganês classificam-se conforme as suas morfologias, em três tipos: sulfetos do tipo I, tipo II, e do tipo III (Castello, 2022).

Os sulfetos do tipo I caracterizam-se em formatos globulares, com diversas faixas de tamanho. Geralmente, são formados nos aços acalmados ao silício, ou nos semi-acalmados, os quais apresentam alto teor de oxigênio dissolvido e pouco enxofre solúvel, favorecendo a formação de inclusões compostas, chamadas de duplex, que são constituídas de duas fases diferentes que não se misturam, por exemplo, MnS e silicatos. Nestes tipos de inclusões, a fase MnS pode incorporar outros elementos, como o cromo, formando uma solução sólida (Sant'na, 2025).

Figura 17: Relação da atividade de oxigênio, manganês e enxofre sobre a morfologia dos sulfetos.

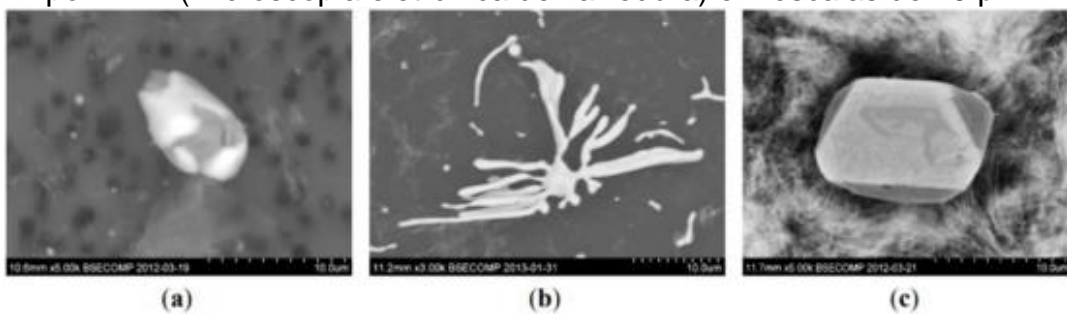


Fonte: Sant'na, 2025.

As inclusões do tipo II, com estrutura dendrítica, são encontradas em aços desoxidados com Al, apresentando baixo teor de oxigênio dissolvido. Nesses aços, o enxofre tem baixa solubilidade, fazendo com que os sulfetos precipitem nos contornos de grãos durante o resfriamento. Durante a etapa de desoxidação, a alumina formada serve como núcleo para a precipitação dos sulfetos, ou pode combinar-se com os mesmos formando inclusões compostas (duplex), sendo constituídas por duas fases distintas, MnS e Al_2O_3 , ficando separadas dentro da mesma inclusão (Castello, 2022).

Os sulfetos do tipo III apresentam morfologia irregular e contornos angulares, sendo distribuídas de maneira aleatória na matriz do aço. São oriundas de aços acalmados ao Al e com excesso de desoxidante, apresentando baixo teor de oxigênio dissolvido, reduzindo a solubilidade do enxofre devido ao excesso de Al, favorecendo a formação de sulfetos com estrutura mais rígida e menos deformável. Podem atuar como pontos de fragilização do material, aumentando a anisotropia do aço, tornando-o mais suscetível à fratura sob tensões localizadas (Sant'na, 2025).

Figura 18: Morfologias típicas de diferentes sulfetos: Tipo I (a), II (b) e III (c) obtidas por MEV (Microscopia eletrônica de varredura) em escalas de 10 μm .



Fonte: Sant'na, 2025.

3.3.2.5 Inclusões de sulfetos de cálcio

Embora o tratamento com cálcio seja essencial para modificar inclusões e melhorar a qualidade do aço, excessos podem gerar efeitos indesejados. Segundo Costa e Silva (2023), quantidades elevadas de cálcio favorecem a formação de sulfeto de cálcio (CaS), mesmo em altas temperaturas. Esse composto apresenta baixa solubilidade e origem em inclusões sólidas que não se deformam nos processos termomecânicos, comprometendo as propriedades mecânicas.

Além disso, o excesso de cálcio reage indiscriminadamente com o oxigênio e enxofre, aumentando a concentração de partículas não-metálicas no banho líquido.

As inclusões de CaS costumam aparecer contornando as inclusões globulares, como aluminados de cálcio, alumina ou CaO (sulfeto de cálcio), sendo comuns em aços líquidos devido ao seu tratamento com o cálcio. Diferenciando-se do MnS, apresenta baixa deformabilidade, mesmo sendo encontrada em solução sólida com o MnS.

Vale ressaltar que o CaS reage intensamente com a água, podendo formar depósitos ou bolhas de gases, trazendo obstruções nos tubos de válvulas submersas no lingotamento contínuo, assim como ocorre com as inclusões com alumina (Moraes, 2009).

3.3.2.6 *Inclusões de silicatos*

Nos aços desoxidados com FeSi ou aços semi-acalmados desoxidados com Si/Mn, Si/Mn/Al, Si/Mn/Ca, comumente são encontradas as inclusões contendo silicatos. Este grupo é composto pela sílica, silicatos de manganês, silicatos de cálcio, silicatos de alumínio e os silicatos de alumínio-manganês. Na presença do manganês, pode surgir uma segunda fase de sulfeto de manganês, que não se mistura com os silicatos.

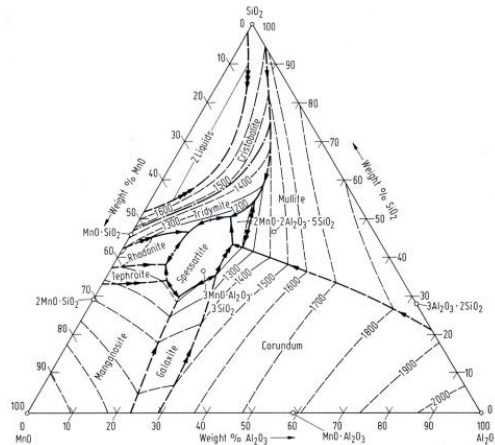
Com o aumento da temperatura, a sílica (SiO_2) passa por três transformações polimórficas: inicialmente o quartzo, depois a tridmita e, em seguida, a cristobalita. A sílica fundida surge posteriormente caso aumente mais a temperatura.

Segundo Moraes (2009), dentro de uma matriz de silicatos metálicos, os comportamentos dessas fases são distintas, pois a cristobalita tende a formar dendritas, já a tridmita apresenta estabilidade quando os íons metálicos estão dissolvidos em sua estrutura. Caso sejam encontradas inclusões de quartzo, haverá indícios de inclusões com origem exógena, como a erosão de refratários à base de sílica. Quanto aos silicatos de alumínio, manganês e alumínio-manganês, haverá a formação da mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) por meio da mistura de alumina e sílica, em altas temperaturas. Em condições adequadas de temperatura e composição, a mulita se precipita dentro dessa matriz. Porém, essas fases são mais comuns em inclusões exógenas devido à erosão de materiais refratários.

A rondonita ($\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$) é considerada como uma fase comum nas inclusões, apresentando-se de forma pura ou parcialmente vítrea. Já a espessartita ($3\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$) geralmente é encontrada nas inclusões originadas após a laminação à quente dos aços, com o resfriamento lento. Enquanto as inclusões contendo Mn-anortita ($\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) são de origem endógena, podendo ser formadas através de um núcleo produzido no forno ou na escória do forno panela

(Moraes, 2009). Os silicatos de alumínio, manganês e alumínio-manganês são evidenciados pelo diagrama ternário $Al_2O_3.MnO.SiO_2$, na figura abaixo.

Figura 19: Diagrama de fases do sistema ternário $Al_2O_3.MnO.SiO_2$.

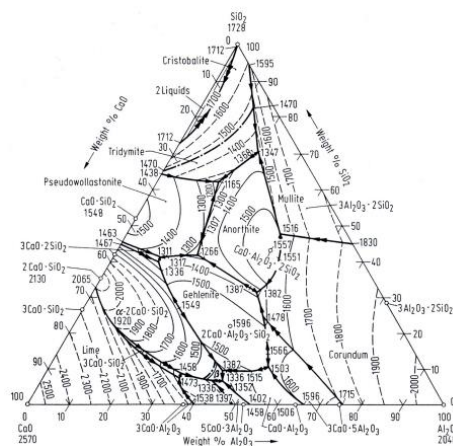


Fonte: Moraes, 2009.

Os silicatos de cálcio presentes na aciaria geralmente provêm por dois mecanismos principais: O primeiro, durante o tratamento da escória com o cálcio, que promove a modificação das inclusões de silicatos já existentes. O segundo está relacionado à interação da escória quando existe a adição de cal no processo, também podendo formar silicatos.

Estes silicatos passam por diversas transformações polimórficas, e para facilitar a nomenclatura, utiliza-se a forma abreviada: **C** representa o óxido de cálcio (CaO) e **S** representa a sílica (SiO_2), sendo os principais silicatos de cálcio formados: $CaO.SiO_2$ (CS), $3CaO.2SiO_2$ (C_3S_2), $2CaO.SiO_2$ (C_2S) e o $3CaO.SiO_2$ (C_3S).

Figura 20: Diagrama de fases do sistema ternário $Al_2O_3.CaO.SiO_2$.



Fonte: Moraes, 2009.

Essas fases podem influenciar nas propriedades das inclusões, conforme a tabela 5, que apresenta as propriedades físicas da sílica e dos principais silicatos.

Tabela 6: Propriedades físicas dos silicatos.

Nome	Fórmula	P.F. (°C)	Densidade (g/cm ³)	Dureza Vickers (HV)
Cristobalita	SiO ₂	1723	2,23	1600
Tridmita	SiO ₂	1670	2,26	1600
Quartzo	SiO ₂	1710	2,65	1600
Galaxita	MnO.SiO ₂	1560	4,23	1500-1700
Mulita	3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	1850	3,15	1500
Rodonita	MnO.SiO ₂	1291	3,72	750
Tephrorita	2MnO.SiO ₂	1345	4,04	950
Espessartita	3MnO.Al ₂ O ₃ .3SiO ₂	1195	4,18	1000-1100
Mn-anortita	MnO.Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	-	-	-
Mn-corderita	2MnO.2Al ₂ O ₃ .5SiO ₂	-	-	-
Pseudovollastonita	CS (CaO.SiO ₂)	1544	2,90	1000
Rankenita	C ₃ S ₂ (3CaO.2SiO ₂)	1475	-	-
Larnita	C ₂ S (2CaO.SiO ₂)	2130	2,97-3,70	-
Alita	C ₃ S (3CaO.SiO ₂)	2070	3,22	-
Anortita	CaS ₂ (CaO.Al ₂ O ₃ .2SiO ₂)	1550	2,77	-
Gehlenita	C ₂ AS (2CaO.Al ₂ O ₃ .SiO ₂)	1590	3,04	-
Ca-corderita	C ₂ A ₂ S ₅ (2CaO.2Al ₂ O ₃ .5SiO ₂)	-	-	-
Grossularita	C ₃ AS ₃ (3CaO.Al ₂ O ₃ .3SiO ₂)	-	3,5	-

Fonte: Moraes, 2009.

3.3.3 Influência da conformação mecânica nas inclusões e fases

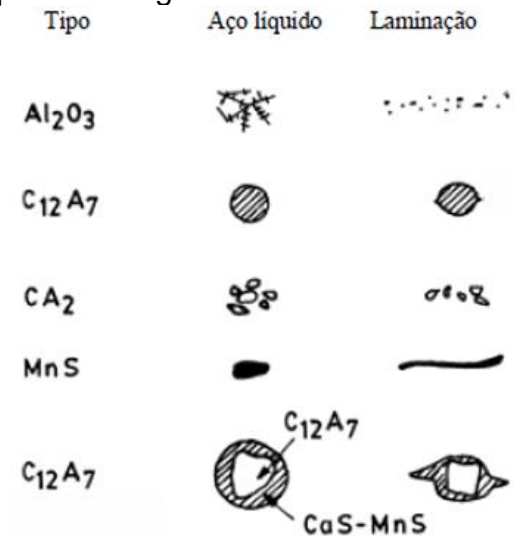
A conformação mecânica do aço altera o formato das inclusões de MnS, devido à sua plasticidade e baixa dureza, deixando-as alongadas, em formatos de tiras ou placas, dependendo da direção de laminação (Moraes, 2009).

Nas inclusões duplex de MnS e silicatos, os silicatos se deformam mais facilmente, deixando as marcas de deformação. Porém, nas inclusões duplex de sulfetos e alumina, a fase alumina por apresentar elevada dureza não se deforma, permanecendo como grãos no interior da fase sulfeto deformada. O mesmo ocorre com as inclusões de sulfeto com aluminatos de cálcio “duros” (Moraes, 2009).

Durante o tratamento com cálcio, as inclusões sólidas e duras são transformadas em aluminatos de cálcio globulares, que mantêm esse formato durante a solidificação e laminação. O cálcio também modifica os sulfetos, alterando-os para sulfetos ricos em cálcio, que ao depender da quantidade de cálcio, podem não ser deformáveis, contribuindo na redução da anisotropia (propriedades do aço mais uniforme em todas as direções) das propriedades mecânicas do aço.

A figura 21 ilustra como essas inclusões se comportam após a conformação, trazendo uma comparação em seus aspectos de produtos lingotados e laminados.

Figura 21: Comportamento das macro-inclusões em diferentes condições de produto: lingotado e laminado.



Fonte: Ghosh 2001, Adaptado.

3.3.4 Influência da metalurgia da panela na origem de inclusões

Embora a desoxidação do aço seja um fator importante na geração de inclusões, é essencial incluir os impactos de diferentes etapas ao longo do processo de fabricação do aço. Desde a metalurgia da panela até o lingotamento contínuo, alguns fatores operacionais influenciam na formação e morfologia das inclusões. Essas variáveis incluem desde a reoxidação, efeito de vida da panela, interação do aço líquido com os refratários até a formação no distribuidor.

3.3.4.1 Etapa indesejável: reoxidação

Considerado como indesejável, a etapa de reoxidação é responsável pelo transporte de oxigênio da atmosfera e massa para o banho, resultando na precipitação da fase de óxidos, seguida pelo seu crescimento e aglomeração, resultando nas inclusões (Moraes, 2009).

As inclusões exógenas são geradas através de reações indesejadas entre os elementos reativos presentes no aço líquido com o oxigênio da atmosfera. Essas reações podem arrastar as inclusões para o interior do banho líquido, comprometendo

a qualidade do produto final após o processo de lingotamento contínuo, em tarugos já resfriados, manifestando por meio de defeitos estruturais nestes aços.

Segundo Moraes (2009), a reoxidação pode ocorrer desde o tratamento no forno panela, como também no distribuidor, quando as superfícies ficam desprotegidas, ou nas juntas entre os refratários e as válvulas (junção entre o distribuidor e a válvula submersa na máquina de lingotamento contínuo).

3.3.4.2 Influência do tempo de vida da panela: refino secundário

Posteriormente o vazamento do aço líquido da panela, a escória que permanece na superfície do aço forma uma camada aderida à parede interna da panela, que também infiltra nos poros do refratário.

Após corridas subsequentes, a camada de escória solidificada na panela pode ser parcialmente removida ou refundida, liberando partículas não-metálicas que se incorporam ao aço no formato de inclusões (Bartosiaki et al. 2014). Este mecanismo pode ser observado na figura abaixo.

Figura 22: Formação da camada de escória aderida à parede da panela.



Fonte: Moraes, 2009.

Acredita-se que esta camada aderida seja um grande contribuinte na geração de inclusões no aço líquido, durante a metalurgia da panela. A quantidade de inclusões no aço líquido depende não só de fatores como a temperatura do aço, composição da escória, tipo de aço, o tipo de desoxidação utilizada e o grau de agitação, mas também do número de vezes que a panela foi utilizada, pois ao passo que a panela é utilizada várias vezes, mais inclusões são geradas pela camada de escória aderida a parede interna da mesma (Moraes, 2009).

Segundo Moraes (2009), dois tipos de inclusões foram identificadas em estudos nessa camada de escória aderida: uma composta por solução sólida de óxidos do tipo $3CaO \cdot Al_2O_3$ (C_3A) e outro contendo óxidos de MgO e C_3A .

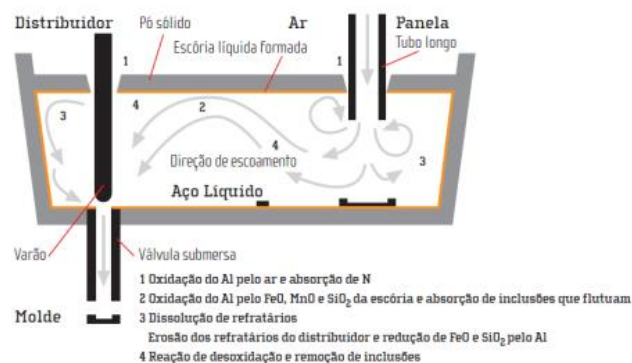
3.3.4.3 Geração de inclusões no distribuidor

O distribuidor atua como reservatório de aço líquido antes do lingotamento contínuo. Ele pode auxiliar na remoção de inclusões vindas da panela, mas também podem favorecer a formação de novas inclusões que permanecem no produto final.

O aço líquido no distribuidor é protegido por um pó de cobertura (comumente contendo MgO ou SiO_2), evitando o contato com o ar atmosférico e recobre a escória arrastada da panela. Caso houver regiões de superfície do aço líquido no distribuidor sem cobertura, pode ocorrer a reoxidação do aço, oxidando o Al presente (tanto usado na desoxidação quanto presente na composição química do aço).

A composição do pó de cobertura é um fator muito importante, pois o Al pode reagir com FeO ou reduzir SiO_2 presentes nele. Além disso, o Al também pode oxidar por óxidos de Fe, Mn e Si presentes na escória ou pela dissolução dos refratários do distribuidor (Moraes, 2009). A figura abaixo ilustra esses mecanismos de formação e remoção de inclusões no distribuidor.

Figura 23: Eventos que promovem a formação de inclusões no distribuidor.



Fonte: Moraes, 2009.

Segundo Moraes (2009), os mecanismos enumerados na figura 24 são explicados da seguinte forma: Oxidação do Al pelo ar e absorção de N: Quando o aço entra em contato com o ar na superfície do distribuidor, o alumínio presente no aço (usado como desoxidante e também presente na composição química) pode oxidar,

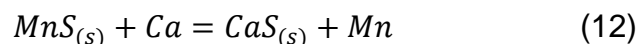
formando óxidos de alumínio (Al_2O_3). Além disso, o nitrogênio do ar pode ser absorvido pelo aço, alterando sua composição. Oxidação do Al pelo FeO, MnO e SiO_2 da escória e absorção de inclusões flutuantes: A escória formada contém óxidos como FeO, MnO e SiO_2 . Esses óxidos reagem com o alumínio do aço, formando inclusões de Al_2O_3 . Inclusões já presentes podem ser incorporadas novamente ao aço se não forem removidas. Dissolução de refratários: O revestimento refratário da panela e do distribuidor pode sofrer desgaste químico e físico, liberando partículas (como MgO) que entram no aço como inclusões. Erosão dos refratários do distribuidor e redução de FeO e SiO_2 pelo Al: O alumínio reduz óxidos presentes na escória (FeO e SiO_2), formando novas inclusões. Ao mesmo tempo, a erosão do refratário adiciona mais partículas sólidas ao aço.

Reação de desoxidação e remoção de inclusões: O aço é desoxidado com alumínio ou outros agentes, e parte das inclusões é removida para a escória. Porém, se o fluxo não for controlado, algumas inclusões podem retornar ao aço.

3.3.5 Influência do tratamento com cálcio nas inclusões de MnS

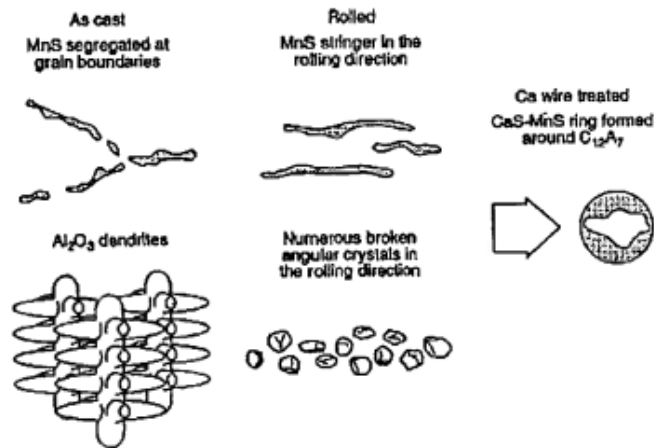
Em aços com teor de enxofre (S) acima de 2 ppm (0,0002%), a adição de cálcio pode alterar a morfologia das inclusões de MnS (sulfeto de manganês). Essas inclusões com origens alongadas, tendem a se formar durante o processo de conformação mecânica, como a laminação, podendo gerar discontinuidades no material (A.R.Jha, 2014).

Após o tratamento com o cálcio, ocorre uma reação entre Ca e MnS, formando CaS (sulfeto de cálcio). Esse composto se deposita ao redor das inclusões globulares, como aluminatos de cálcio ou CaO, criando uma camada protetora. As inclusões de sulfeto de manganês possuem formato alongado, sendo estiradas durante o processo de conformação mecânica, a laminação.



A figura 24 ilustra a morfologia das inclusões após o tratamento com cálcio, atuando na redução da deformabilidade das inclusões alongadas, tornando-as mais arredondas e menos prejudiciais ao processo.

Figura 24: Inclusões modificadas no aço após o tratamento com cálcio.



Fonte: Turkdogan, 2010.

3.4 REMOÇÃO DE INCLUSÕES NÃO-METÁLICAS: AGITAÇÃO GÁS-METAL, AGLOMERAÇÃO E TRANSPORTE

Segundo Costa e Silva (2023), inclusões muito pequenas levariam um tempo excessivo para subir até a escória e serem removidas apenas por flotação em uma panela de aço. Cálculos simplificados na Lei de Stokes mostram que a velocidade limite dessas partículas são muito baixas para tamanhos comuns.

A Lei de Stokes define a velocidade limite de uma partícula em um fluido como:

$$v_m = D^2 g \frac{(\rho_p - \rho_f)}{18\eta} \quad (13)$$

Onde:

ρ_p = densidade da partícula;

ρ_f = densidade do fluido;

D = diâmetro da partícula;

η = viscosidade do fluido.

Para referência, a densidade do aço líquido (fluido) a 1600 °C é cerca de 7000 kg.m⁻³, enquanto inclusões (partículas) apresentam densidade aproximada de 2700 kg.m⁻³ a 1600 °C. A viscosidade do aço líquido nessa temperatura é 6.1 x 10⁻³ N s m⁻², obtendo-se como resultado de velocidade limite, $v_m \cong 384180D^2$.

Com isso, uma inclusão de 10 µm de diâmetro atinge uma velocidade de 3,84 x 10⁻⁵ m/s, enquanto uma inclusão maior, de 60 µm, alcança cerca de 0,001 m/s. Considerando que as panelas possuem profundidade da ordem de metros, o tempo

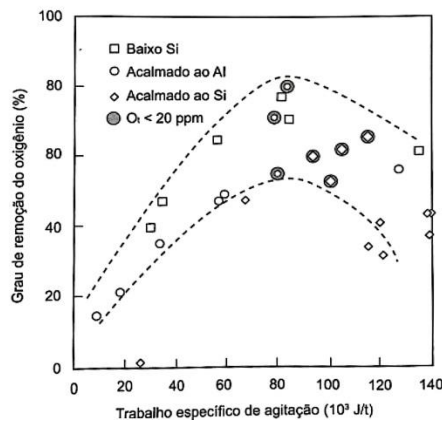
necessário para flotação não é compatível com os prazos usuais de processamentos (Costa e Silva, 2023).

Estudos mostram que a aglomeração das partículas no aço líquido favorece sua remoção, como ocorre com partículas sólidas, por exemplo, alumina. Entretanto, os mecanismos envolvidos na aglomeração de inclusões só foram observados recentemente, e até hoje, apenas na superfície do metal líquido.

A agitação desempenha um papel essencial nesse processo, aumentando a frequência de choques entre as partículas, e conseqüentemente, sua união. Além disto, a agitação contribui para a remoção de inclusões não-metálicas presentes do banho.

Pesquisas de Engh e colaboradores (1975) indicaram que maior a agitação melhora a remoção de inclusões. Contudo, resultados industriais sugere que essa eficiência atinge um ponto máximo: após certo nível de agitação, a remoção diminui. Estudos de Suzuki (1982) apontam que essa redução está ligada à erosão dos refratários e à retenção de partículas da escória, já que inclusões contendo CaO e MgO aumentaram com maior energia de agitação, conforme ilustrado na figura.

Figura 25: Efeito do trabalho de agitação no grau de desoxidação. Os pontos envoltos por um círculo atingiram menos de 20 ppm oxigênio total.



Fonte: Costa e Silva, 2023.

3.5 EFEITOS DAS MACRO-INCLUSÕES NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Conforme Costa e Silva e Rangel (2023), durante a produção dos aços as inclusões são difíceis de se evitarem através de métodos convencionais, afetando diretamente as propriedades mecânicas do material como a ductilidade, tenacidade,

resistência à corrosão e à fadiga. Por isso, o controle da morfologia dessas inclusões é de grande necessidade para garantir a qualidade do material.

Figura 26: Exemplo de rompimento no fio máquina durante laminação à quente, do aço 1018 (SAE 1020).



Fonte: Arquivo próprio.

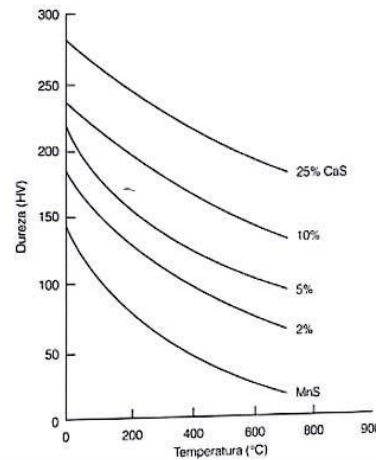
Os maiores problemas ocorrem nos casos de as inclusões serem formadas por óxidos e sulfetos, pois a pureza do aço depende de vários fatores dessas partículas, como a quantidade, a forma e a composição química. As macro-inclusões são especialmente prejudiciais às propriedades mecânicas, sendo difíceis de detectar, pois mesmo em pequenas quantidades, ocupam uma área significativa, podendo causar falhas em toda a corrida.

Antes do início da etapa de solidificação, algumas inclusões se formam, distribuindo-se aleatoriamente no aço. Já as inclusões secundárias, que podem surgir durante ou após a solidificação, estão diretamente associadas à segregação do processo. Por exemplo, o sulfeto de manganês tende a se concentrar nas regiões mais segregadas, pois precipita nas últimas partes do líquido a se solidificar (Paliwoda; Wilson, 1964).

Os sulfetos de manganês e os silicatos são reconhecidos pela sua elevada plasticidade, tornando-os mais suscetíveis ao alongamento.

O teor de oxigênio e a proporção de MnS também influenciam diretamente na morfologia das inclusões, sendo apresentado pela figura 27, trazendo uma relação entre a plasticidade dos sulfetos e a composição química do aço.

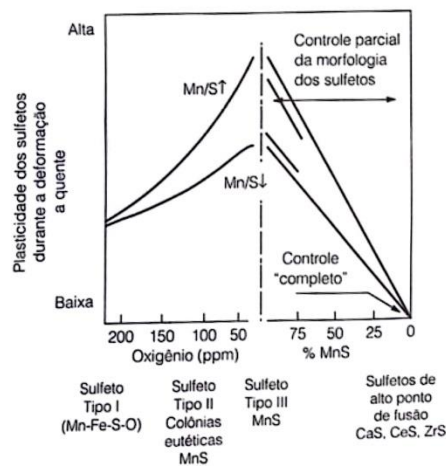
Figura 27: Efeito do teor de CaS sobre a dureza dos sulfetos.



Fonte: Sant'na, 2025.

A figura abaixo apresenta que, em condições de alto teor de oxigênio, predominam os sulfetos do tipo I (Mn-Fe-S-O), com baixa plasticidade. Ao passo que o teor de oxigênio diminui, os sulfetos do tipo II irão aumentar a plasticidade, ainda assim podendo comprometer as propriedades mecânicas do aço.

Figura 28: Efeito do teor de oxigênio, relação Mn/S e % MnS sobre cada tipo de sulfeto e sua plasticidade.



Fonte: Sant'na, 2025.

Em teores baixos de oxigênio e elevada proporção de MnS, vão ser formados os sulfetos do tipo III (puros), possuindo alta plasticidade, trazendo menor impacto negativo na tenacidade. Com a adição de cálcio, haverá modificações nessas

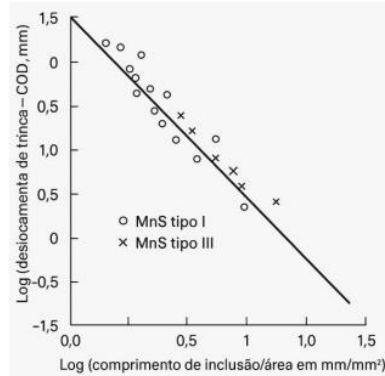
inclusões, promovendo a formação de sulfetos globulares (Ca,Mn)S, facilitando a remoção pela escória e reduzindo a anisotropia do material.

Quando o MnS for convertido em sulfetos com alto ponto de fusão (CaS, CeS, ZrS), haverá o controle completo da morfologia. Esses compostos são mais rígidos, com menor deformabilidade, aumentando o risco de fissuras durante a etapa de conformação a quente. Por isso, faz-se necessário equilibrar a adição de cálcio e enxofre para então obter uma microestrutura otimizada (Paliwoda; Wilson, 1964).

A relação do comprimento das inclusões de MnS por unidade de área e o deslocamento da abertura de trinca (COD) à temperatura ambiente funciona como um indicativo da tenacidade à fratura do material. Os maiores valores de COD evidenciam maior resistência à propagação de trincas.

O gráfico abaixo apresenta uma correlação inversa: quanto maior o comprimento das inclusões, menor a tenacidade do aço, deixando-o mais vulnerável à fratura, devido as inclusões serem consideradas como pontos de concentração de tensão.

Figura 29: Influência do tamanho das inclusões de MnS quanto ao comportamento de tenacidade à fratura do aço.

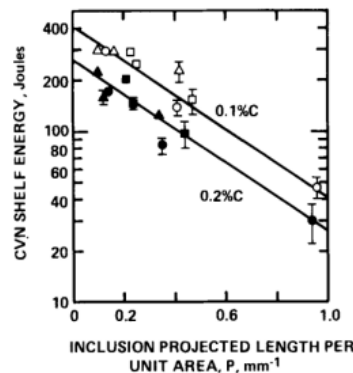


Fonte: Sant'na, 2025.

Segundo Barker e Charles (1971), esse comportamento ressalta a importância da modificação das inclusões, como a adição de cálcio influencia na modificação de inclusões alongadas (Tipo I) de MnS para sulfetos globulares (Tipo II) de CaS, diminuindo a anisotropia e fragilidade do material, aumentando a resistência mecânica.

Spitzig (1983) confirma em seus estudos que, quanto maior o comprimento das inclusões, menor a energia absorvida durante o impacto, indicando que as inclusões não-metálicas prejudicam a tenacidade do aço, conforme a figura 29.

Figura 30: Efeito das inclusões não-metálicas sobre a energia absorvida: Energia Charpy (CVN Shelf Energy, em Joules) com o comprimento projetado das inclusões por unidade de área (P , mm^{-1}).



Fonte: Spitzig, 1983.

Portanto, o controle das adições de cálcio durante os processos de refino secundário para a modificação dessas partículas é de extrema necessidade para garantir o grau de limpeza desses aços durante o seu processo de produção, proporcionando maior confiabilidade conforme seu tipo de aplicação, posteriormente (Athkinson; Shi, 2003).

3.6 CARACTERIZAÇÕES DE INCLUSÕES NÃO-METÁLICAS

Com o objetivo de verificar a limpeza dos aços, especificamente, a quantidade e os tipos de macro-inclusões presentes, existem várias formas para as caracterizações de inclusões não-metálicas por meio métodos diretos e indiretos.

A limpeza dos aços é caracterizada por baixos teores de elementos indesejáveis no banho líquido, como o oxigênio, enxofre, fósforo, hidrogênio e nitrogênio, e em alguns casos, o carbono. Além disso, envolve a redução de macro-inclusões nos aços, principalmente óxidos e sulfetos. Esse conceito é conhecido como *clean steel* (aços limpos), incluindo tanto a composição química quanto o controle das inclusões não-metálicas, sua morfologia, tipo, e distribuição, presentes no aço líquido e após a solidificação (Moraes, 2009).

3.6.1 Métodos diretos

Os métodos diretos permitem observar seções ou volumes de amostras de aço solidificado, oferecendo boa precisão, embora apresentam alto custo e demandam bastante tempo.

Além de identificar a composição química da amostra, também fornecem informações sobre a quantidade e a distribuição de inclusões na amostra, sendo como principais exemplos: microscopia óptica, análise de imagens e microscopia eletrônica de varredura (MEV), dentre outros.

A microscopia óptica consiste em analisar superfícies polidas de amostras de aço para identificar e quantificar as inclusões visualmente. Apesar de ser um método tradicional, apresenta limitações como alto consumo de tempo, ausência de informações sobre a composição química e a forma tridimensional das inclusões, como também a possibilidade de erros para quem estiver executando o ensaio.

A norma ASTM E45-05 estabelece métodos de ensaios para determinar o teor de inclusões não-metálicas em aços. A norma descreve como classificar as inclusões com base em morfologia (tipo) e severidade (quantidade), geralmente por comparação visual com imagens de referência ou por métodos automatizados.

Já as normas ASTM E1245-03 e ASTM E1122-96 trazem métodos quanto às análises de imagens, permitindo quantificar inclusões não-metálicas de forma semelhante à microscopia óptica, porém utilizando-se de imagens digitalizadas. Por meio de variações de tons de cinza e dos fatores de forma das inclusões, é possível diferenciar as regiões nas imagens.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilita determinar a composição química das inclusões por meio da espectrometria de dispersão de energia (EDS), fornecendo informações tridimensionais, a depender do tipo de preparação da amostra, utilizando das normas ASTM E1508-98 e ASTM E2142-01.

3.6.2 Métodos indiretos

Os métodos indiretos avaliam os teores dos elementos dissolvidos nos aços para estimar as quantidades de inclusões presentes. Os mais utilizados são a medição de oxigênio total e a verificação de “pick-up” de nitrogênio. O oxigênio total corresponde à soma do oxigênio livre no aço líquido e o oxigênio ativo, que é aquele

combinado com elementos diferentes de Fe ou C, formando as inclusões não-metálicas. Esse tipo de medição é realizado com sensores (Celox), inseridos no aço líquido durante as corridas.

4 METODOLOGIA

Com base nos objetivos propostos, a metodologia empregada neste trabalho consiste na análise de macro-inclusões nos aços 1020 e as consequências nas propriedades mecânicas desses materiais. Essa avaliação busca verificar a tolerância vinculada à qualidade microestrutural e mecânica, perante os processos de conformação, salientado a etapa de trefilação, pois a presença de macro-inclusões se tornam críticas quando as reduções de seções são significativas nesta etapa, por exemplo.

Com base no exposto, este trabalho foi conduzido por meio de análises das escórias e das amostras finais de aço solidificadas, como também nos ensaios de tração após etapa de laminação, comparando os efeitos da utilização do desoxidante, o briquete de manganês e a sílica, em formato de óxido, na escória do refino secundário, com a condição padrão de desoxidação com ferroligas de silício e manganês.

Nas escórias, foram avaliadas as composições químicas antes e após a utilização desses dois materiais, com o objetivo de verificar os teores de óxidos que poderiam originar inclusões não-metálicas. Nas amostras finais de aço solidificadas, foram realizadas análises químicas, quantificação e caracterização das macro-inclusões, incluindo identificação e mapeamento das macro-inclusões, quanto a sua morfologia e a distribuição espacial na amostra em conjunto com a localização preferencial, e as análises químicas com o intuito de verificar se o processo de desoxidação foi eficaz e se as inclusões não-metálicas apresentaram morfologias adequadas para não comprometer a estrutura do produto final, o fio-máquina, durante a etapa de trefilação.

4.1 MATERIAL

Para a realização da análise experimental, foram coletadas 17 amostras de lotes de tarugo do aço 1020, com o objetivo de avaliar a influência da utilização do

briquete de manganês e da sílica na quantidade e no formato das macro-inclusões, durante a etapa de desoxidação.

Desse total:

- 10 lotes foram produzidos com a aplicação do briquete de manganês, com total de 1.240 toneladas e quantidade de 300 kg.
- 2 lotes com a utilização da sílica, com total de 250 toneladas e quantidade de 50 kg.
- 5 lotes referiam-se a corridas como amostras de controle, totalizando-se em 600 toneladas.

Dos 10 lotes que usaram briquete de manganês, 2 foram escolhidos com base nos valores máximos e mínimos de macro-inclusões, para analisar a distribuição espacial e análises mais detalhadas, como MEV/EDS e microscopia óptica, nas amostras de aço. Essas análises incluíram a caracterização microestrutural, química e a avaliação dos resultados dos ensaios de tração.

Tabela 7: Composição química do aço 1020 (norma padrão de referência no processo de fabricação)

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SAE 1020								
%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%P	%S	%N ppm
0,18	0,10	0,45	-	-	-	Máx.	Máx.	Máx.
0,22	0,35	0,80				0.05	0.05	120

Fonte: O autor, 2025.

4.2 MÉTODO

4.2.0 Geração dos lingotes

Para a geração dos tarugos, com dimensional de 160 mm x 160 mm x 12.000 mm, por meio do lingotamento contínuo, foram discutidos os parâmetros de processo que foram comumente utilizados pela empresa, englobando as quantidades de fundentes e os desoxidantes utilizados para cada cenário. Além do programa de rinsagem padrão.

4.2.0.1 Receitas químicas utilizadas

Dentre as receitas químicas utilizadas para cada condição: lotes Mn-1 e Mn-2 foram com o emprego do briquete de Mn, Si-1 e Si-2 para as condições com sílica e P-1 e P-2 foram para as amostras de padrão.

Tabela 8: Receita de fundentes e desoxidantes utilizados para cada lote.

LOTES	CAL CALCÍTICA (kg)	CAL DOLOMÍTICA (kg)	FLUORITA (kg)	SiO ₂ (%)	BRIQUETE Mn (kg)	FeSiMn (kg)	FeSi75% (kg)
Mn-1	446	50	152	27	302	552	182
Mn-2	447	47	149		301	557	195
Si-1	449	50	150	27	-	839	181
Si-2	449	29	152	50	-	801	150
P-1	449	27	149	27	-	981	247
P-2	419	49	139	31	-	807	247

Fonte: Arquivo próprio.

4.2.0.2 Programa de vazão de rinsagem

Outros parâmetros operacionais influenciaram na formação de macro-inclusões, como a vazão de argônio utilizada na rinsagem. Esse gás proporcionou a agitação no banho líquido, favorecendo a flotação de inclusões para a escória e reduzindo a sua permanência no aço líquido. A eficiência desse processo depende do volume de gás injetado, em NL^3/min .

Segundo os dados da empresa, o programa de rinsagem envolveu os seguintes passos durante a etapa de refino secundário, os quais foram:

Durante o vazamento do forno elétrico a arco para o forno panela: 400 e 250 Nm^3 , durante 3 minutos, para garantir a mistura do aço líquido.

Na homogeneização e retirada de amostras: o volume utilizado caiu para 150 Nm^3 . Com a inserção e dissolução das ligas: aumento para 250 Nm^3 , para haver a dissolução das ligas.

Para uma nova homogeneização com a retirada de amostras: mesma vazão anterior.

4.2.1 Análises do aço:

Foram retiradas as amostras dos tarugos quadrados, pelo auxílio de um maçarico, com dimensões em 160 mm x 160 mm x 45 mm, seguindo para a sua preparação e posteriormente as análises.

4.2.1.1 Corte e preparação metalográfica

O método de preparação envolveu o corte (a), (b) retirada de carepas, (c) lixamento com a esmerilhadeira nas faces e o jateamento em toda a amostra (d) e (e), conforme a figura abaixo.

Figura 31: Preparação das amostras de aço para análises quantitativas de macro-inclusões.



Fonte: O autor, 2025.

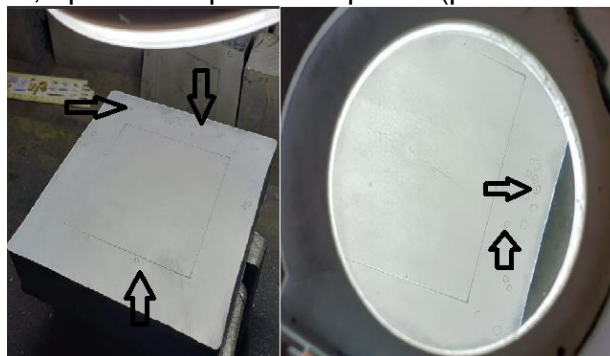
4.2.1.2 Análises macroscópica das macro-inclusões

A análise de macro-inclusões foi realizada por meio da inspeção visual, baseando-se na norma ASTM E381-22, porém não envolvendo o ataque químico. Essa etapa tem o objetivo de identificar e quantificar as macro-inclusões presentes nas amostras, através da preparação de sua face.

Conforme a figura 31, após a etapa de resfriamento dos tarugos, os mesmos foram cortados transversalmente com o auxílio de um maçarico automático de oxicorte, em seções padronizadas de 160 mm^2 e espessuras de 45 mm. Posteriormente, as amostras foram esmerilhadas e jateadas.

Logo em seguida, foi realizada a demarcação das extremidades das faces em áreas padronizadas de 3 x 3 cm. Essas áreas proporcionaram a identificação e contagem das macro-inclusões nas regiões externas ao quadrado previamente destacado, conforme a figura 32, onde estão presentes as macro-inclusões, devido ao seu surgimento durante a etapa de solidificação (padrão interno da empresa).

Figura 32: Contagem de macro-inclusões nas regiões externas a área de demarcação, apontadas pela seta preta. (padrão interno).



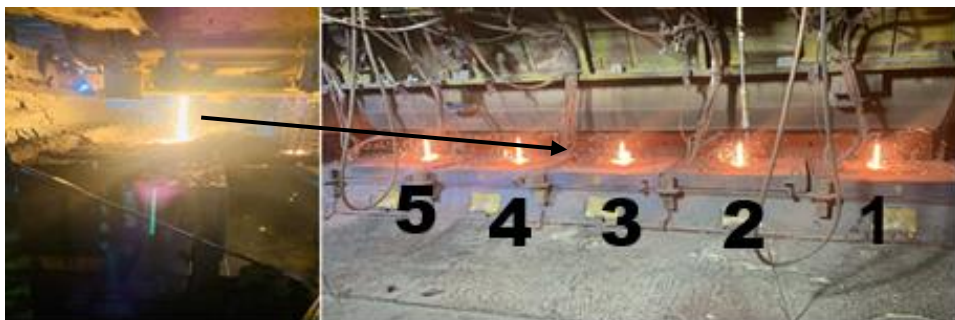
Fonte: O autor, 2025.

4.2.1.4 *Influência dos veios no distribuidor do lingotamento contínuo na geração de macro-inclusões*

Na etapa de lingotamento contínuo, os veios presentes no distribuidor de aço líquido exercem influência na formação de macro-inclusões, principalmente em função de sua localização. Esse efeito está relacionado à chegada do aço líquido ao distribuidor, com condições de alta turbulência e trazendo consigo óxidos externos, sendo direcionado para os veios logo em seguida.

Para esta análise, diante os lotes obtidos de cada veio, os veios 1 e 4 destacaram-se para serem analisados, pois apresentaram os números mínimos e máximos de macro-inclusões no aço líquido, respectivamente. O posicionamento do veio 4 está apontado pela seta preta, enquanto os outros veios estão representados pela sequência numérica, na figura 33.

Figura 33: Imagem esquemática de um distribuidor, com a disposição dos veios (seta preta apontando na região do jato de aço, entre os veios 3 e 4).



Fonte: Arquivo próprio.

4.2.1.3 *Análises microscópicas das macro-inclusões*

Com o objetivo de realizar a caracterização microestrutural e a análise química das macro-inclusões presentes nas amostras de aço, foi realizada a preparação metalográfica adequada, conforme a norma ASTM E45, para observações no microscópio óptico (M.O), microscópio eletrônico de varredura (MEV) e o sistema de espectroscopia de dispersão de energia (EDS), afim de verificar a morfologia e dimensão das macro-inclusões, como também os elementos presentes que estão no formato de óxidos.

Inicialmente, as amostras encontravam-se no formato de placas quadradas, conhecidas por “bolachas”, com base na figura (a). Para proporcionar uma análise mais profunda das macro-inclusões, foi necessário realizar o corte das amostras no formato de barras estreitas, ou seja, filetes. Esse corte teve como base uma demarcação, por meio de um quadrado, antes estabelecida na face da amostra, utilizando como referência para análise as regiões com maior concentração de macro-inclusões, que já estavam identificadas na etapa de contagem desses defeitos (figura c).

A execução do corte foi em uma serra fita, marca Franho, seguindo as linhas delimitadas nas áreas de interesse, com maior incidência de macro-inclusões.

Figura 34: Corte das amostras.



Fonte: O autor, 2025.

Antes do corte das amostras em formatos de filetes, as dimensões eram de 160 mm x 45 mm. Em seguida, a espessura foi reduzida para 20 mm e os filetes horizontais ajustados para 120 mm, sendo posteriormente submetidos a ataque químico e análises nos equipamentos.

Logo em seguida foi realizada a preparação metalográfica das amostras por meio das etapas de lixamento, polimento e ataque químico, com o objetivo de revelar a microestrutura e permitir a análise de macro-inclusões.

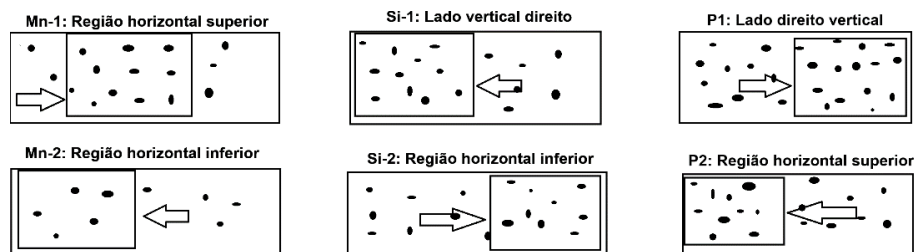
As amostras foram lixadas nas politrizes da marca ALLIED TWINPREP 3, utilizando diferentes granulometrias: 100, 220, 300 e 600 mesh. Cada etapa foi realizada com mudança de direção em 90°, deixando a superfície plana e livre de deformações. Posteriormente, foi realizado o polimento, utilizando a pasta de diamante de 6 μm , seguido de polimento com suspensão de alumina de 1 μm . Logo em seguida, as amostras foram lavadas em água corrente e limpas com algodão, removendo resíduos de suspensão abrasiva.

Para a realização do ataque químico, as amostras foram mergulhadas na solução de nital a 3%, em um recipiente apropriado. Após o ataque, as amostras foram novamente lavadas em água corrente, com o auxílio de algodão, e receberam a aplicação de álcool para evitar a oxidação na face das amostras. Enfim, as amostras passaram pelo processo de secagem com o auxílio de um secador, ao mesmo tempo que se realizava a limpeza final com algodão nas faces preparadas.

4.2.1.4 Caracterização das macro-inclusões e análises da composição química

A caracterização microestrutural e a composição química das macro-inclusões foram realizadas em seis lotes, 2 para cada condição, ou seja: Mn-1 e Mn-2 referente à desoxidação com o briquete de manganês; Si-1 e Si-2 com o ferro-silício, P1 e P2 como amostras de controle, para fins de comparação. Essas análises foram realizadas nas regiões que tiveram maiores concentrações de macro-inclusões, conforme imagem abaixo.

Figura 35: Desenho esquemático ilustrando as regiões de análises realizadas que tiveram maior concentração de macro-inclusões nos filetes, sendo destacadas pelo quadrado e apontadas pelas setas.



Fonte: O autor, 2025.

As regiões analisadas nas corridas foram identificadas pelas setas, conforme cada corrida: Mn-1 (região superior horizontal) e Mn-2 (região inferior horizontal); Si-1 (lado vertical direito) e Si-2 (região horizontal inferior); P1 (lado vertical direito) e P2 (região superior horizontal).

Após a preparação metalográfica, as amostras de cada corrida ficaram conforme a figura abaixo, indicando por “A” as regiões com porosidades e “I” com inclusão, a fim de facilitar no momento da identificação.

Figura 36: Amostra após preparação metalográfica, com identificação das regiões contendo porosidade e inclusões.



Fonte: O autor, 2025.

4.2.1.5 Análises das macro-inclusões por MEV/EDS e o seu comportamento na matriz metálica por M.O

As análises de MEV, do modelo JEOL JSM - 649OLV (Scanning Electron Microscope) foram conduzidas no Laboratório Metalúrgico da Gerdau, unidade de Pindamonhangaba – SP. O comportamento das macro-inclusões na matriz metálica e as suas morfologias foram analisadas com maior detalhamento pelo microscópio óptico, da marca OLYMPUS e modelo BX51M.

Considerando os óxidos presentes nas escórias do forno panela, é fundamental identificar os tipos de elementos químicos presentes e suas quantidades nas amostras de aço analisadas.

Essa investigação teve como objetivo verificar a análise química das macro-inclusões. Além disso, teve o objetivo de compreender a formação dos óxidos a partir dos elementos presentes e avaliar a redução de suas quantidades no aço solidificado. Para isso, os resultados obtidos nas amostras foram comparados com as concentrações previamente determinadas nas escórias do forno panela, permitindo verificar a eficiência da remoção ou incorporação dos elementos durante o refino secundário.

Entre os principais elementos associados a essas inclusões, foram selecionados para análises: Ca, Si, Mg, Al, P, Mn, Fe+Mn e o S.

4.2.1.6 Ensaios mecânicos: Tração

O ensaio de tração foi realizado conforme a norma NBR ISO 6892 (2002) – Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente - que especifica o método de ensaio de tração em materiais metálicos e define as propriedades mecânicas que podem ser determinadas à temperatura ambiente.

Foram utilizados corpos de prova no formato de vergalhões CA-50 (Concreto armado – a cada mm do vergalhão, deve aguentar 50 kg), obtidos após a etapa de laminação. As quantidades de amostras para as três condições estão apresentadas a seguir:

- Mn-1 e Mn-2: 8 amostras
- Si-1 e Si-2: 12 amostras
- P-1 e P-2: 9 amostras.

Os vergalhões apresentaram comprimentos iniciais e diâmetros nominais distintos, pois o comprimento inicial foi definido como dez vezes o diâmetro da bitola, conforme as condições:

- Mn-1 e Mn-2: 240 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro;
- Si-1 e Si-2: 160 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro;
- P1- e P-2: 120 mm de comprimento e 12,5 mm de diâmetro.

Antes do ensaio, cada amostra foi marcada com gabaritos para a medição do alongamento, pesada em balança e medida com trena (mm), registrando o comprimento (mm) e a massa (g). Esses dados foram inseridos no software Bluehill Universal, versão 4.08.24426, utilizado pela máquina de tração para controle e registro dos dados.

Figura 37: Método de preparo para o ensaio de tração.



Fonte: O autor, 2025.

Quanto à realização dos ensaios, foi conduzido numa máquina INSTRON GR044 – EMIC 23600, com capacidade máxima de 600 kN, equipada com célula de

carga e extensômetro. Após a fixação dos vergalhões nos mordentes, e o acoplamento no extensômetro, iniciou-se a aplicação da carga, com velocidade realizada de ensaio em 15 mm/min.

Durante o ensaio, foram obtidos os seguintes parâmetros: Limite de escoamento (L_e), limite de resistência (L_r), alongamento total (%) e a relação L_r/L_e .

4.2.2 Análise da escória do forno panela

Já as escórias do forno panela foram coletadas e analisadas quimicamente, com o foco de identificar os óxidos que estão diretamente relacionados à formação das macro-inclusões no aço líquido. Ou seja, essa análise possibilitou avaliar a influência da composição química da escória sobre sua viscosidade e basicidade, bem como o impacto desses parâmetros na eficiência da transferência de óxidos do aço líquido para a escória.

4.2.2.1 Coleta e preparação das amostras

Para realizar essa análise química, o processo de preparação das escórias envolveu as seguintes etapas ilustradas na figura 38: (a) antes da trituração inicial; (b1, b2 e b3) após trituração e (c), após moagem no moinho vibratório da marca HERZOG, durante 30 segundos; (d1 e d2) peneiramento em malha de 150 mesh; (e) pesagem de 9 gramas da amostra, sendo misturada com 1 grama de tetraborato de lítio, garantindo a sua densificação durante a prensagem; (f) prensagem da mistura, no equipamento da marca HERZOG, com força de 100 kN; (g) amostra finalizada, pronta para análise química por fluorescência de raios-X, com o uso do equipamento da marca ZETIUM PANalytical, utilizando o programa *Sample Change*.

Figura 38: Preparação da escória do forno panela para análise química por fluorescência de raios-X.



Fonte: O autor, 2025.

4.2.2.2 Análises químicas da escória

Após a preparação das amostras de escórias do forno panela, ocorreram as análises químicas através da fluorescência de raios-X, pelo equipamento de Raios-X da marca ZETIUM conforme a figura 39, fornecendo os dados da composição química da escória de cada corrida por meio do programa Sample Change.

Figura 39: Análise química da escória do forno panela por fluorescência de raios-X.



Fonte: O autor, 2025.

Após 9 minutos de análise, foram determinadas as concentrações dos elementos químicos presentes nas escórias, como o %CaO, %SiO₂, %Fe₂O₃, %MgO, %Al₂O₃, %P₂O₅, %MnO, %FeO+MnO, %CaF₂, com base em dois lotes para cada condição, tanto antes quanto após a utilização do briquete de manganês, do Fe-Si e das amostras de padrão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISES DE MACRO-INCLUSÕES

Com base na tabela 9, para cada condição, considerando as médias obtidas através das extremidades das faces analisadas, observa-se uma menor quantidade de macro-inclusões nas corridas com a utilização do briquete de manganês. Enquanto que os lotes de sílica apresentaram maior proporção. Portanto, analisando os cenários apresentados, o briquete de manganês resultou no melhor conjunto desoxidante e modificador de escória para a diminuição da quantidade de macro-inclusões.

Neste contexto, vale ressaltar que as variações nas quantidades de macro-inclusões parecem estar relacionadas ao posicionamento do jato de aço líquido no distribuidor em relação as localizações dos veios, destacando-se comportamento diferentes nos veios 1 e 4 nas condições de amostras de controle e uso do briquete de manganês.

Tabela 9: Resultados das análises de macro-inclusões em diferentes cenários.

ANÁLISES DE MACRO-INCLUSÕES								
AMOSTRAS DE CONTROLE (Fe-Si e Mn)			USO DO BRIQUETE DE MANGANÊS			APÓS USO DA SiO ₂		
LOTES	Nº VEIO	Nº DE PARTÍCULAS/FACE	LOTES	Nº VEIO	Nº DE PARTÍCULAS/FACE	LOTES	Nº VEIO	Nº DE PARTÍCULAS/FACE
P1	1	160	Mn-1	1	12	Si-1	1	262
P2	4	334	Mn-2	4	113	Si-2	2	210
P3	2	230	Mn-3	1	24			
P4	3	227	Mn-4	2	43			
P5	5	193	Mn-5	3	27			
			Mn-6	5	64			
			Mn-7	2	61			
			Mn-8	3	69			
			Mn-9	4	86			
			Mn-10	5	100			
MÉDIA = 229 ± 65			MÉDIA = 60 ± 34			MÉDIA = 236 ± 37		

Fonte: O autor, 2025.

Os lotes do veio 4, próximo à entrada do aço no distribuidor, apresentaram maiores quantidades de macro-inclusões devido a sua alta turbulência no distribuidor, além da maior interação com o ar, formando óxidos para o interior do aço líquido, visto as condições das amostras de controle e também com o briquete de Mn.

Enquanto os lotes do veio 1, localizado nas extremidades do distribuidor, apresentaram menores incidências de macro-inclusões por receber o aço em menor velocidade e com fluxo estável, favorecendo a flotação das inclusões e diminuindo no seu interior, trazendo benefícios nas propriedades mecânicas do aço.

5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS A LAMINAÇÃO

Os resultados obtidos de limite de escoamento e resistência pelo ensaio de tração após laminação são apresentados a seguir.

Tabela 10: Resultados do limite de escoamento e resistência do material laminado, após a utilização do briquete de manganês.

PROPRIEDADES MECÂNICAS – ENSAIO DE TRAÇÃO				
	AI%	LE MPa	LR MPa	LR/LE
Valores de referência norma NBR ISO 6892 (2002)	8 a 25	510 a 990	551 a 990	1,1 a 1,8
Amostras de controle	11,5 – 12,0	608-615	743-752	1,2
Briquete de Mn	11,3-11,7	614-616	712-716	1,2
Sílica	10,5-10,6	605-611	747-756	1,2

Fonte: O autor, 2025.

Com base nos parâmetros apresentados na tabela 10, vale ressaltar que os valores de estrição não foram medidos, visto que a empresa realiza essa medição

apenas quando é solicitada pelo cliente o qual foram destinados os vergalhões, desconsiderando este caso. As três condições foram comparadas a seguir:

Com o briquete de manganês: Os valores de limite de escoamento ficaram maiores e o de resistência ficaram menores, comparando-se as outras condições, indicando maior uniformidade do aço quanto à presença e distribuição das macro-inclusões. Enquanto que com a sílica, houve uma redução no alongamento, apontando maior heterogeneidade de macro-inclusões na matriz metálica e maior dificuldade quanto à remoção de inclusões.

Já as amostras de controle apresentaram maiores discrepâncias entre os valores de limites de resistência, sugerindo heterogeneidades. Esses resultados foram maiores, possivelmente devido à segregação de macro-inclusões.

5.3 ANÁLISES QUANTO À COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA NO FORNO PANELA

As três condições analisadas —briquete de manganês, adição de sílica e amostras de controle — permitiram avaliar a transferência de óxidos para a escória, afim de reduzir a formação de macro-inclusões no aço líquido durante a etapa de desoxidação, garantindo a sua melhor qualidade final.

Tabela 11: Análise química da escória do forno panela para as condições durante a etapa de desoxidação.

CONDIÇÃO	%CaO	%SiO ₂	%MgO	%MnO	%S	BASICIDADE
Mn-1 e Mn-2	45,79	22,18	19,04	1,11	0,16	2,07
Si-1 e Si-2	45,59	23,26	17,29	0,7	0,09	1,96
P1 e P2	48,17	24,76	14,23	0,43	0,05	1,94

Fonte: O autor, 2025.

Com a adição do briquete de manganês, observou-se redução da sílica (22,18%) e o aumento de MnO (1,11%), indicando a eficácia deste material na etapa de desoxidação. A basicidade foi de 2,07, destacando-se entre as outras duas condições, proporcionando uma escória menos viscosa e mais fluida, aumentando a capacidade de absorção de óxidos na escória e reduzindo a quantidade de macro-inclusões no aço líquido, conforme Rizzo (2006).

A adição de sílica favoreceu um aumento no teor de SiO_2 e redução de MnO (0,70%), confirmando a ação da sílica como desoxidante. A basicidade foi de 1,96, próxima à condição controle, porém inferior à do briquete de Mn. O aumento da sílica, comparando-se as condições do briquete de manganês, dificultou a transferência de óxidos do aço líquido para a escória. Com isso, observou-se maior quantidade de macro-inclusões no aço, resultado que corrobora com Costa e Silva (2023), ao afirmar que íons de maior tamanho tendem a formar ligações mais fortes entre si, aumentando a viscosidade da escória e dificultando o movimento de transferência das partículas no aço líquido para a superfície. Já as amostras de controle apresentaram maior teor de CaO e SiO_2 (24,76%), com baixo MnO (0,43%). A basicidade foi de 1,94, menor que as outras condições e dentro da faixa operacional (1,8–2,3). A elevada presença da sílica contribuiu para uma escória mais viscosa, dificultando a absorção de macro-inclusões e favorecendo a sua permanência no aço líquido. Esse comportamento está conforme a literatura, que relaciona alta viscosidade à menor eficiência de limpeza do banho de aço líquido.

Portanto, escórias que apresentaram maior basicidade podem ter levado a uma menor viscosidade, como as condições Mn-1 e Mn-2, favorecendo a transferência de óxidos antes presentes no aço líquido para a escória. Porém, com o emprego da sílica como desoxidante, houve uma redução da mobilidade desses óxidos para essa região, tendendo a uma maior quantidade de macro-inclusões no aço líquido, quando comparado com o briquete de Mn.

5.4 ANÁLISES QUANTO À COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO LÍQUIDO NO FORNO PANELA

Com o intuito de comparar a composição química do aço líquido com a da escória, foram avaliados a eficiência dos desoxidantes utilizados e se estes favoreceram a transferência de elementos do aço líquido para a escória no formato de óxidos, contribuindo para a redução de macro-inclusões no aço líquido.

Observa-se que nem todos os elementos presentes na forma de óxidos aparecem na tabela da escória. Por isso, a comparação será realizada apenas entre os elementos comuns às duas tabelas.

Tabela 12: Análise química do aço líquido, com base nas duas condições de desoxidantes utilizados no forno panela.

CONDIÇÃO	%C	%Mn	%Si	%S	ppmO FEA	ppmO FP	Rendimento Mn %	Rendimento Si %
BRIQUETE DE Mn	0,20	0,52	0,15	0,02	437	39	116,51	71,50
SÍLICA	0,19	0,51	0,14	0,02	477	28,3	119,53	63,50

Fonte: O autor, 2025.

A partir da tabela 12, observa-se que, na condição com briquete de Mn, a quantidade efetiva de manganês adicionada ao aço líquido foi maior, resultando em menor rendimento desse elemento e maior quantidade de MnO na escória, conforme apresentado na tabela 11. Em comparação, na condição com a sílica, a quantidade efetiva de manganês adicionada ao aço líquido foi menor, proporcionando maior rendimento e menor quantidade de MnO na escória. Portanto, verificam-se que ambas as condições de desoxidantes - briquete de Mn e sílica - indicaram capacidade para desempenhar boa eficiência como desoxidante.

Quanto aos teores de carbono, os mesmos permaneceram próximos entre as duas condições, trazendo informações que não houve interferência deste elemento nas propriedades mecânicas.

5.5 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS MACRO-INCLUSÕES

A caracterização microestrutural das macro-inclusões foi realizada com base em sua origem, composição química e morfologia, conforme apresentado a seguir.

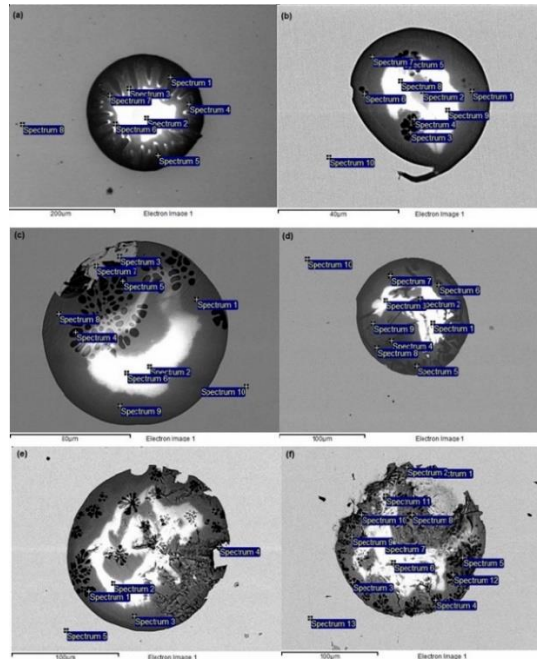
5.5.1 Classificação das macro-inclusões quanto à origem

A composição química das macro-inclusões foi obtida através dos espectros (Spectrum), sendo representada pela tabela 15, que correspondem às regiões analisadas dos óxidos presentes em cada inclusão, por espectroscopia de energia dispersiva (EDS), possibilitando a determinação da origem da macro-inclusão, por meio de sua composição química, com base na figura 40.

A figura é acompanhada por uma tabela de EDS, representada pelos Anexos I, II e III, que apresentam as quantidades em peso, expressas em percentual, dos elementos químicos presentes. Com base na análise por MEV/EDS das amostras de controle, as macro-inclusões presentes no aço líquido foram classificadas como

endógenas, pois contêm predominantemente elementos oriundos do processo de desoxidação, como Al, Si, S e Mn, com base no anexo I.

Figura 40: Macro-inclusões observadas por MEV/EDS no aço SAE 1020, em três diferentes condições: lotes (a) 5075 e (b) 5100 para amostras de controle; (c) 4774 e (d) 4776, com o briquete de Mn; (e) 5558 e (f) 5560, com o emprego do ferro-silício (sílica). Imagens adquiridas em modo BEC (Backscattered Electron Contrast).



Fonte: O autor, 2025.

Para a condição do briquete de Mn, os principais elementos presentes nas macro-inclusões, resultantes deste processo de desoxidação, foram o silício, manganês e o oxigênio, ambos em maiores quantidades com base na tabela 13. Esse resultado foi coerente, visto que o material foi eficaz na etapa de desoxidação através de maiores concentrações desses elementos. Além disso, houve a formação de óxidos complexos ($\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$), que foram propiciados pela desoxidação com este tipo de material (Moraes, 2009).

Na condição com ferro-silício (sílica), conforme anexo II, as inclusões apresentaram composição similar, com predominância de O, Si, S e Mn, mas também pequenas quantidades de Na, Mg e F, indicando possível interação com escória ou refratário, porém em pequenas quantidades para classificá-las como exógenas, quando comparadas aos elementos de origem endógena.

Tabela 13: Composição química obtida por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) nas macro-inclusões dos lotes com briquete de Mn.

Spectrum	.C	O	Al	Si	S	Ti	Cr	Mn	Fe	Total
Spectrum 1		48.88	0.38	19.71	1.97			29.59		100
Spectrum 2		59.32	0.49	19.31	1.54			19.44		100
Spectrum 3		2.72		29.71				0.83	66.74	100
Spectrum 4		59.94		34.07	0.36			5.62		100
Spectrum 5		51.43	0.26	29.16	1.18			17.96		100
Spectrum 6		62.02	0.46	19.17	1.62			16.72		100
Spectrum 7		18.89		60.09				21.02		100
Spectrum 8		41.05		19.61	1.86			37.48		100
Spectrum 9		46.95	0.44	18.71	1.92	0.19	0,22	31.57		100
Spectrum 10	6.81	0.67						0.51	92.01	100
Máximo	6.81	62.02	0.46	60.09	1.97	0.19	0,22	37.48	92.01	
Mínimo	6.81	0.67	0.26	18.71	0.36	0.19	0,22	0.51	66.74	

Fonte: O autor, 2025.

5.5.2 Classificação das macro-inclusões quanto à composição química

A análise por MEV/EDS permitiu identificar os elementos presentes nas macro-inclusões e classificá-las quanto a sua composição química.

Essa avaliação mostrou a influência dos desoxidantes — briquete de manganês (lotes Mn-1 e Mn-2) e ferro-silício (sílica) (lotes Si-1 e Si-2) — em comparação com as amostras de controle (P-1 e P-2).

Com o briquete de manganês, houve aumento nos teores de silício (31,15% para 60,09%), manganês (30,88% para 37,48%) e enxofre (1,22% para 1,97%), indicando formação de silicatos de manganês, típicos de aços acalmados ao Si/Mn (Moraes, 2009). Na condição com sílica, representada pelo Anexo III, observou-se uma redução no teor de oxigênio (62,02% para 80,27%) e enxofre (1,97% para 19,73%), redução de silício e manganês, além da presença de elementos externos como F, Mg, Ca, Ti e Cr, sugerindo interação com escória ou refratário. Segundo Melo (2020), esses elementos possuem alta estabilidade de óxido, justificando sua ocorrência nas inclusões.

Comparando os desoxidantes, o briquete favoreceu inclusões ricas em silício e manganês (silicatos), enquanto a sílica promoveu maior teor de oxigênio e enxofre, indicando predominância de óxidos e sulfetos, além de contaminações externas.

Tabela 14: Influência dos desoxidantes nos tipos de inclusão encontradas conforme composição química.

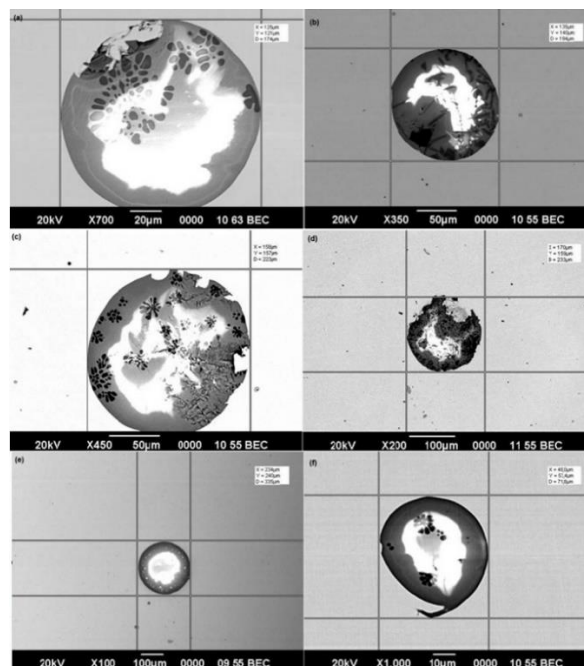
Desoxidantes utilizados	Tipo de inclusão	Descrição
Briquete de manganês	Mn-Silicato	Silicato de manganês
Sílica	Mn-S Exógena	Sulfeto de manganês Inclusão exógena

Fonte: Adaptado de Moraes, 2009.

5.5.3 Caracterização das macro-inclusões quanto à morfologia

Verificando os três cenários diferentes, com base na utilização dos desoxidantes em apenas duas condições, as análises químicas por MEV mostraram na figura 41, que as macro-inclusões presentes nos lotes (a) e (b) obtidos após a desoxidação com o briquete de manganês apresentaram formatos globulares. Com base na composição química, foram classificadas como silicatos de manganês, típico de aços desoxidados com Si/Mn devido à alta afinidade desses elementos com oxigênio durante a desoxidação (Moraes, 2009).

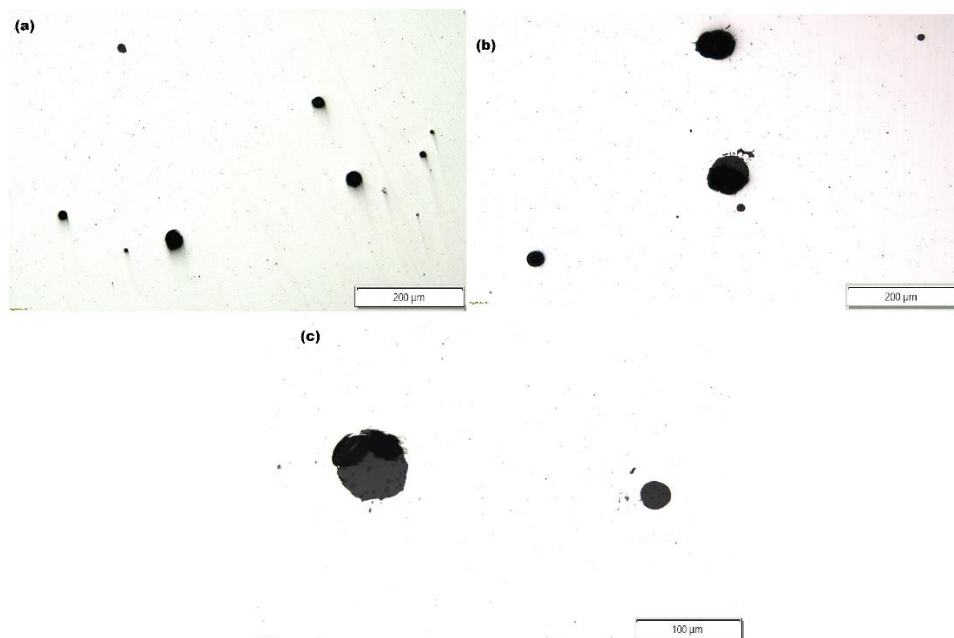
Figura 41: Macro-inclusões observadas por MEV no aço SAE 1020, em três diferentes condições: lotes (a) 4774 e (b) 4776 com briquete de Mn; (c) 5558 e (d) 5560, com a sílica; (e) 5075 e (f) 5100, sendo as amostras de controle.



Fonte: O autor, 2025.

As macro-inclusões resultantes da desoxidação com o ferro-silício (sílica), das amostras (c) e (d) apresentaram formatos aproximadamente globulares, sendo inclusões duplex, com a presença de sulfetos e silicatos de manganês em conjunto, característica de aços com alto teor de oxigênio dissolvido e baixo enxofre (Sant'ana, 2025). Por fim, as amostras de controle (e) e (f) apresentaram óxidos simples, indicando que a adição de desoxidantes influencia na formação de compostos estáveis. Ou seja, com base na figura 42, os lotes com desoxidantes, representados (a) e (b) apresentaram macro-inclusões maiores que as amostras de controle (c), devido à maior interação química na desoxidação, formando compostos estáveis (silicatos e sulfetos) que se aglomeram antes da solidificação. Nas amostras de controle (c), as inclusões são compostas por óxidos simples. Segundo Costa e Silva (2023), inclusões menores tendem a permanecer mais tempo no banho, dificultando a remoção. A adição de desoxidantes reduz o oxigênio dissolvido, favorece a flotação para a escória e diminui a quantidade de macro-inclusões no aço líquido.

Figura 42: Macro-inclusões observadas por M.O, sem ataque químico, no aço SAE 1020 em três diferentes condições: (a) briquete de minério de Mn; (b) areia de sílica e (c) amostras de controle. 5560, com aumentos de 100x, 50x e 100x, respectivamente.

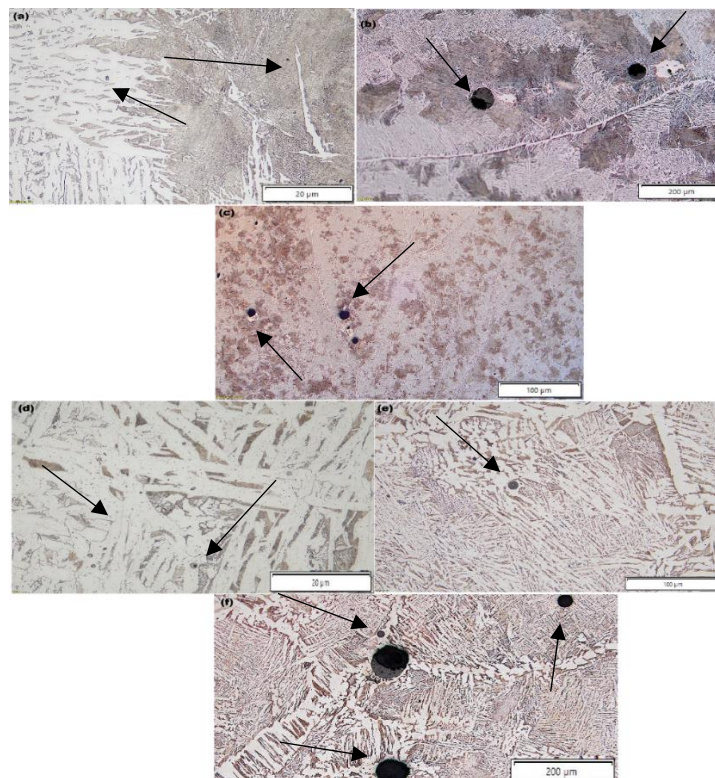


Fonte: O autor, 2025.

5.5.3.1 Distribuição de inclusões na matriz metálica

As microestruturas obtidas por microscopia óptica possibilitaram verificar a interação das macro-inclusões com a matriz metálica do SAE 1020, como também a sua distribuição e o impacto nas propriedades mecânicas. Na figura 43 abaixo, composta por ferrita (região clara) e perlita (lamelas escuras), verificam-se nas figuras referentes aos lotes de briquetes de Mn (a), (b) e (c), que as macro-inclusões estão distribuídas de forma isolada na matriz, destacando-se em formatos esféricos. Com a adição do briquete de manganês, as inclusões observadas na microestrutura são globulares e aparecem mais afastadas dos contornos de grão, estando mais isoladas entre si, indicando a formação de silicatos ($\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$). A flotação promovida pelo desoxidante reduziu a quantidade total de inclusões, indo de 334 para 113. Esse comportamento impactou nas propriedades mecânicas do lote 4774: o alongamento médio foi de 11,67%, semelhante à corrida sem desoxidante, porém a presença de inclusões grandes atuaram como concentradores de tensão, reduzindo o alongamento e limitando a deformação plástica.

Figura 43: Microestruturas obtidas por M.O, com briquete de Mn (a) (b) e (c), com aumentos de (a) 500x, (b) 50x e (c) 12,5 x. Lotes de Fe-Si, representados por (d) (e) e (f) com aumentos de 500x, 100x e 50x, ambos obtidos pelo ataque com nital a 3%.

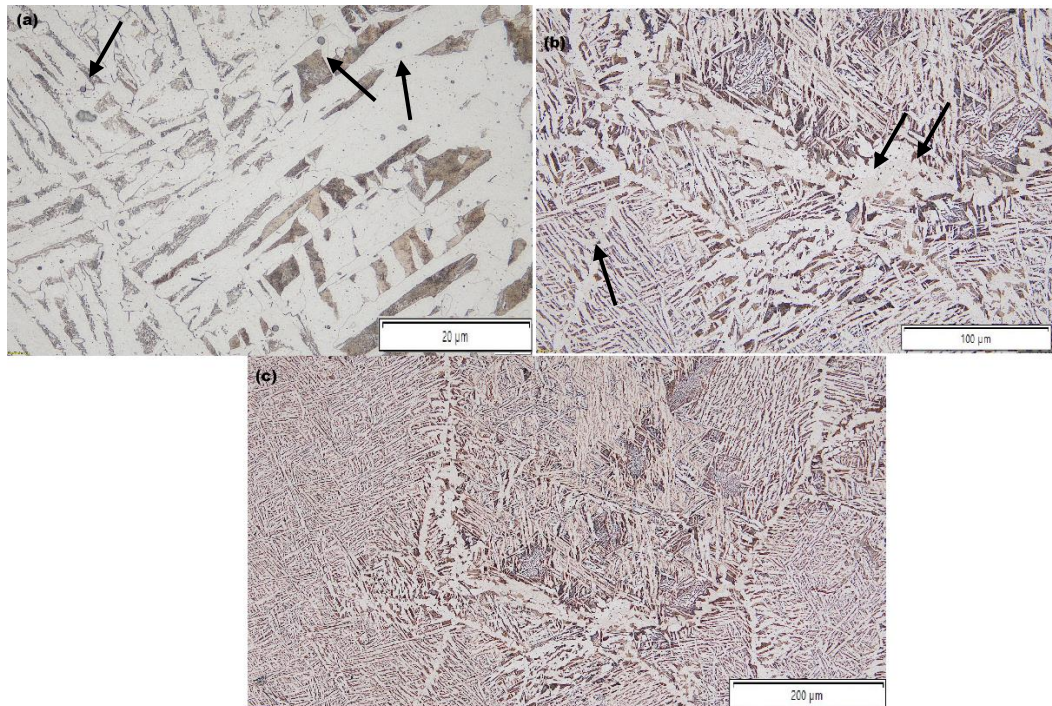


Fonte: O autor, 2025.

Quanto à microestrutura referente a utilização da sílica como desoxidante, referente a figura 43, (d), (e) e (f), observaram-se um maior número de macro-inclusões, estando mais próximas entre si, diferenciando-se da condição com briquete de Mn. Além disso, verificam-se algumas próximas ao contorno de grão, podendo trazer influências nas propriedades mecânicas. Inclusões perto dos contornos de grão fragilizam a matriz, aumentando a susceptibilidade à propagação de trincas, podendo causar uma redução na sua resistência à fadiga. Porém, neste caso não houve interferência significativa, visto que os valores de alongamento observados nas amostras testadas neste trabalho estavam próximos.

Vale comparar com as microestruturas das amostras de controle, afim de verificar o impacto da utilização dos desoxidantes em relação ao comportamento das macro-inclusões na matriz metálica.

Figura 44: Microestruturas obtidas por microscopia óptica, dos lotes das amostras de controle, com aumentos de (a) 500 x, (b) 100 x e (c) 50 x, com ataque de nital a 3%.



Fonte: O autor, 2025.

Nas microestruturas da figura 43 (a) e (b), as macro-inclusões apresentaram morfologias irregulares e maiores quantidades, com distribuição dispersa na matriz.

Essa característica indica a formação de óxidos simples (FeO e MnO), confirmado pelas análises EDS, devido à ausência de elementos desoxidantes que favoreçam a formação de silicatos ou sulfetos complexos. Embora o impacto individual dessas inclusões seja baixo, sua maior quantidade no produto final (após o lingotamento contínuo) compromete a ductilidade. Essa tendência é confirmada pelos resultados dos ensaios de tração, que apresentaram alongamento médio de 11,46 %.

Portanto, com base nas explicações acima, a utilização de desoxidantes traz alterações no comportamento das macro-inclusões na matriz metálica, reduzindo a quantidade total de inclusões e modificando a sua distribuição na matriz metálica.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar a influência da adição dos modificadores de escória no refino secundário: Fe-Si-Mn, Briquete de manganês e areia de sílica sobre as características de macro-inclusões no Aço 1020 acalmado, avaliando sua quantidade, caracterização microestrutural e o impacto nas propriedades mecânicas.

Os resultados indicaram que o uso do briquete de manganês reduziu significativamente as macro-inclusões no aço líquido, devido à maior basicidade e menor viscosidade da escória, favorecida pela inserção de MnO como modificadores de rede (Costa e Silva, 2023), o que aumentou a flotação das macro-inclusões para a escória. Em contrapartida, a sílica, por ser um óxido ácido, elevou a viscosidade da escória e dificultou a flotação, resultando em maior quantidade de macro-inclusões no aço líquido.

Na caracterização microestrutural, as macro-inclusões da desoxidação com o briquete de manganês apresentaram morfologia próxima à globular, distribuídas isoladamente na matriz metálica, e afastadas dos contornos de grãos, com a formação de silicatos. Comparando-se as condições da sílica, tiveram maior uniformidade nos valores de limite de escoamento e a relação L_r/L_e , embora sem ganho significativo em ductilidade.

Já as macro-inclusões associadas ao ferro-silício (sílica) concentraram-se nas regiões próximas dos contornos de grão, agrupadas, formando inclusões duplex

(sulfetos de manganês e silicatos). Esse comportamento reduziu o alongamento e aumentou a relação Lr/Le, indicando menor uniformidade.

Portanto, conclui-se que o briquete de manganês é o desoxidante mais eficaz para otimizar a limpidez do aço líquido, reduzindo macro-inclusões e garantindo maior homogeneidade da matriz metálica, desde que associado a um controle adequado da escória e do processo de desoxidação.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a análise das propriedades mecânicas por meio de ensaios de tração, incluindo a avaliação das superfícies de fraturas dos corpos de prova para classificar o comportamento frágil ou dúctil nas amostras de vergalhão. Essa etapa permitirá correlacionar a caracterização microestrutural com o efeito das macro-inclusões após a conformação mecânica.

Além disso, sugere-se realizar ensaios de impacto para determinar a tenacidade do material, verificando a influência das macro-inclusões como pontos de concentração de tensão. Esses estudos contribuirão para otimizar as propriedades mecânicas e aumentar a confiabilidade na produção de fio-máquina, podendo reduzir os riscos de ruptura durante a trefilação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGNOL, Gabriela Boeira Dall. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESCÓRIA DE DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO NA LIMPEZA INCLUSIONÁRIA DO AÇO SAE 1055**. 2019. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/238538/001113740.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 ago. 2025.

ALVES, Ana Laura Medeiros. **Revisão da literatura sobre o processo de produção do ferro sílicio (FeSi)**. 2025. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/46012/1/Revis%c3%a3oLiteraturaProcesso.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2025.

AVILLEZ, Roberto Ribeiro de. **Inclusões em Aços: cresce a importância de controlar as inclusões endógenas. Cresce a importância de controlar as**

inclusões endógenas. 2006. Disponível em: https://ccc.mines.edu/PDF%20Files/Publications/06_abm_proofs%20abm573_CadTec_reprint_post.pdf. Acesso em: 20 jul. 2025.

BAPTISTA, André Luis de Brito; BAPTISTA, Rodrigo Chaves. AGLOMERANTES EMPREGADOS NO PROCESSO DE BRIQUETAGEM DE FINOS DE MATÉRIA PRIMA SIDERÚRGICA. **Semana Nacional de Ciência e Tecnologia**. Volta Redonda - Rj, p. 1-28. out. 2016. Disponível em: <https://www.doccity.com/pt/docs/aglomerantes-empregados-no-processo-de-briquetagem-de-finos-de-materia-prima-siderurgica/4901558/>. Acesso em: 15 ago. 2025.

BELLÉ, Matheus Roberto. **INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE SiO₂ NAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE ESCÓRIAS INDUSTRIAIS DE FORNO-PANELA**. 2021. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/225649/001129069.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 ago. 2025.

BELTRAMI, Júlia; BIELEFELDT, Wagner Viana; VILELA, Antônio Cezar Faria. ESTUDO TERMODINÂMICO DE INCLUSÕES NÃOMETÁLICAS NA PRODUÇÃO DE AÇOS DUAL-PHASE COM ALTO TEOR DE SILÍCIO. **Anais do Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos**, Rio de Janeiro, p. 572-582, 17 ago. 2017. Editora Blucher. <http://dx.doi.org/10.5151/1982-9345-26896>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320122878_ESTUDO_TERMODINAMICO_DE_INCLUSOES_NAOMETALICAS_NA_PRODUCAO_DE_ACOS_DUAL-PHASE_COM_ALTO_TEOR_DE_SILICIO. Acesso em: 05 out. 2025.

BOBSIN, Alexsandro; BIELEFELDT, Wagner Viana; VILELA, Antônio Cezar Faria. ESTUDO DA MORFOLOGIA, TAMANHO, DISTRIBUIÇÃO E PRECIPITAÇÃO SOBRE ÓXIDOS DE INCLUSÕES DE SULFETOS DE MANGANÊS EM AÇOS RESSULFURADOS. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 532-541, dez. 2019. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20191946>. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/210691/001114611.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 ago. 2025.

BOTELHO, Thales. **ESTUDO DA TAXA DE DESOXIDAÇÃO NO REFINO SECUNDÁRIO EM AÇOS DESOXIDADOS AO SILÍCIO E MANGANÊS**. 2019. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - Rj, 2019. Disponível em: <http://ppgem.sites.uff.br/wp-content/uploads/sites/182/2020/10/06Disserta%C3%A7%C3%A3o-Thales-Botelho-ESTUDO-DA-TAXA-DE-DESOXIDA%C3%87%C3%83O-NO-REFINO-SECUND%C3%81RIO-EM-A%C3%87OS-DESOXIDADOS.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2025.

CASTELLO, Lorena Silva. **QUANTIFICAÇÃO DE INCLUSÕES EM AÇOS UTILIZANDO SOFTWARE IMAGEJ**. 2022. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/2851/TCC_QUANTIFICA%C3%87%C3%83O_INCLUS%C3%95ES_A%C3%87OS_UTILIZANDO_SOFTWARE_IMAGEJ.pdf?sequence=1. Acesso em: 26 ago. 2025.

COSTA E SILVA, André Luiz V. da. *Capítulo 6 – Escórias: Estrutura e Propriedades*. Revisão 0.6 com índice. 28 jul. 2013. Disponível em: https://equilibriumtrix.net/refino/capitulos_acs_refino/Capitulo%206%20rev%200.6%20com%20indice%2028072013.pdf. Acesso em: 01 out. 2025.

CUNHA, Márcio Nascimento. **“Análises de Inclusões não Metálicas no Aço Inoxidável Ferrítico 409”**. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/b1eca672-b9ab-4a64-bffa-ca97e13092df/content>. Acesso em: 18 set. 2025.

HUPPES, Ronaldo Müller. **ESTUDO DE ALTERNATIVAS PARA A IDENTIFICAÇÃO E CONTROLE DA DESOXIDAÇÃO DO AÇO NO FORNO PANELA**. 2014. 54 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/156008/001013476.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2025.

JESUS, Leandro Gustavo Mendes de. **AVALIAÇÃO DA PRÉ-REDUÇÃO DE BRIQUETES DE FINOS DE MINÉRIOS DE MANGANÊS EM AMBIENTES ANÁLOGOS AOS FORNOS ELÉTRICOS A ARCO SUBMERSO**. 2020. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/214514/001119009.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 05 set. 2025.

MAGALHÃES, Roberto. Inclusões não metálicas no aço: origens e controle. *COMPRACO – Indústria, Tecnologia e Notícias*, 29 abr. 2024. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/industria/inclusoes-nao-metalicas-no-aco-origens-e-controle>. Acesso em: 01 out. 2025

MALYNOWSKYJ, Antonio. **Modificação de inclusões não metálicas pela adição de "mischmetal" em aços acalmados ao alumínio e silício**. 1992. 123 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Usp, São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-15082024-102957/publico/AntonioMalynowskyjDissert.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2025.

MELO, Jeová da Silva. **REDUÇÃO DO CONSUMO DE FERRO-LIGAS UTILIZADAS NO REFINO SECUNDÁRIO VIA FORNO-PANELA DE UMA ACIARIA ELÉTRICA**. 2019. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - Ce, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/44830/1/2019_tcc_jsmelo.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025.

MORAES, Luís Augusto Batista de. **CARACTERIZAÇÃO DE MACRO E MICRO-INCLUSÕES EM AÇOS ACALMADOS AO ALUMÍNIO PRODUZIDOS POR LINGOTAMENTO CONTÍNUO**. 2009. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-18112009-102050/publico/Luis_Moraes.pdf. Acesso em: 17 jul. 2025.

NAVARRO, Rogério C.s.; AVILLETZ, Roberto R. de; GOES, Thiago Freire; GOMES, Angelo M.s.. Low temperature thermal and volumetric behavior of MnAl₂O₄ spinel. **Journal Of Materials Research And Technology**. Rio de Janeiro, p. 4194-4205. 12 fev. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Rcs-Navarro/publication/339668072_Low_temperature_thermal_and_volumetric_behavior_of_MnAl2O4_spinel/links/5ed644954585152945282350/Low-temperature-thermal-and-volumetric-behavior-of-MnAl2O4-spinel.pdf?origin=publication_detail. Acesso em: 18 ago. 2025.

NETTO, Mariana Boger; BIELEFELDT, Wagner Viana; VILELA, Antônio Cezar Faria; BARTOSIAKI, Bruna Goulart; YOSHIOKA, Ayumi. **ESTUDO DA VISCOSIDADE DE ESCÓRIAS DE REFINO SECUNDÁRIO ATRAVÉS DA TERMODINÂMICA COMPUTACIONAL**. Anais do Enemet - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, Rio de Janeiro, p. 2813-2822, set. 2015. Editora Blucher. <http://dx.doi.org/10.5151/1516-392x-26812>.

OLIVEIRA, Ana Carolina Zacharias de. **Avaliação do uso de alumínio e cálcio-silício na desoxidação e engenharia de inclusões de aços baixo carbono**. 2015. 99 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/fc0b95a4-31e7-462b-b8cf-42bb62f44803/AnaCarolinaZachariasdeOli>. Acesso em: 12 set. 2025.

PAULINO, Mateus Alves Segundo; KLUG, Jeferson Leandro; BIELEFELDT, Wagner Viana; VILELA, Antônio Cezar Faria; HECK, Nestor Cezar. **ESTUDO DA ESCÓRIA ESPUMANTE EM FORNO ELÉTRICO A ARCO***. 2014. 713 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, São Paulo, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/57597/1/2014_eve_maspaolino2.pdf. Acesso em: 20 set. 2025.

PIRES, José Carlos dos Santos; FERNANDES NETO, Marcolino; GARCIA, Amauri. Avaliação do tamanho, da morfologia e da composição química de inclusões não metálicas em aço baixo carbono desoxidado ao alumínio. **Rem**: Revista Escola de Minas, São Paulo, v. 55, n. 1, p. 25-29, mar. 2002. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672002000100006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/P3MqMGNH5Hqkf8xQzKfcp5S/?lang=pt>. Acesso em: 10 jul. 2025.

RIBEIRO, Mariana Alves. **AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E METALÚRGICAS DE UM BRIQUETE DE PÓ DE ACIARIA E O IMPACTO AMBIENTAL DE SEU USO COMO REFRIGERANTE NO CONVERTEDOR LD**. 2023. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/66b1c075-0029-4c37-a85b-ac4b5782e4fa/content>. Acesso em: 01 out. 2025.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos processos de refino secundário dos aços**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006. 102 p. (Capacitação Técnica em Processos Siderúrgicos. Área: Aciaria).

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos processos de refino primário dos aços nos fornos elétricos a arco**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006. 102 p. (Capacitação Técnica em Processos Siderúrgicos. Área: Aciaria).

SANT'ANA, Fernando Acioli Martorano. **Engenharia de Inclusões em Aços: Otimização das Propriedades Mecânicas via Tratamento com Cálcio e Simulação Thermo-Calc**. 2025. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2025. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/267256/TCC_Fernando_Acioli_Martorano_Sant%27ana.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 16 set. 2025.

SILVA, André Luiz V. da Costa e. **REFINO DOS AÇOS: fundamentos e aplicações**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2023. 439 p.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2021. 576 p.

SILVA, André Luiz Vasconcellos da Costa e. 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. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785418300280>. Acesso em: 17 ago. 2025.

VALENTINIANI, Ellen Mossmann. **CARACTERIZAÇÃO DE INCLUSÕES NO AÇO 20MNCR5 PRODUZIDO EM ACIARIA ELÉTRICA**. 2022. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Feliz, 2022. Disponível em: <https://dspace.ifrs.edu.br/bitstream/handle/123456789/842/123456789842.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 set. 2025.

WEBLER, B. A.; PISTORIUS, P. C.. A Review of Steel Processing Considerations for Oxide Cleanliness. **Metallurgical And Materials Transactions B**, [S.L.], v. 51, n. 6, p. 2437-2452, 28 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-020-01949-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-020-01949-y?fromPaywallRec=true>. Acesso em: 25 out. 2025.

YOSHIOKA, Ayumi. **Caracterização de inclusões em aços: Técnicas e limitações**. 2004. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/133158/000484189.pdf?sequence=1>. Acesso em: 12 ago. 2025.

ANEXOS

Anexo I: Composição química obtida por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) nas macro-inclusões dos lotes das amostras de controle.

Espectros	.C	O	F	Al	Si	S	Ca	Ti	Mn	Fe	Total
Espectro 1		49.92		0.90	18.73	1.13	0.30	0.69	26.89	1.43	100
Espectro 2		54.86	4.25	0.90	18.43	1.13		0.61	19.05	0.76	100
Espectro 3		58.09		0.37	31.15	0.40		0.26	9.13	0.61	100
Espectro 4		57.61		0.56	23.04	0.95		0.43	16.55	0.86	100
Espectro 5		51.83		0.80	20.42	1.06		0.61	23.99	1.28	100
Espectro 6		45.24	3.77	0.82	18.61	1.19		0.68	28.02	1.67	100
Espectro 7		45.91		0.86	18.53	1.18	0.34	0.64	30.88	1.67	100
Espectro 8		55.45		0.86	18.83	1.22	0.20	0.49	21.87	1.07	100
Espectro 9		60.11		0.56	24.26	0.70		0.37	13.26	0.75	100
Espectro 10	9.37	0.57			0.43				0.68	88.96	100
Máximo	9,37	60.11	4.25	0.90	31.15	1.22	0.34	0.69	30.88	88.96	
Mínimo	9.37	0.57	3.77	0.37	0.43	0.40	0.20	0.26	0.68	0.61	

Fonte: O autor, 2025.

Anexo II: Composição química obtida por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) nas macro-inclusões dos lotes com sílica, referente a imagem (d) do lote 5560.

Spectrum	.C	O	F	Na	Mg	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Total
Spectrum 1		46.68				23.58	1.00			28.74		100
Spectrum 2		47.19				19.52	1.00			32.29		100
Spectrum 3		54.83				37.80				7.37		100
Spectrum 4		63.74				34.93				1.33		100
Spectrum 5		54.94				43.21				1.85		100
Spectrum 6		60.45		1.47	0.43	19.64	0.82	0.44		16.74		100
Spectrum 7		25.15	8.84			12.95	0.68			52.37		100
Spectrum 8		52.71				20.99	0.95			25.35		100
Spectrum 9		62.16				35.77				2.06		100
Spectrum 10		49.29				19.65	1.16		0.30	29.60		100
Spectrum 11		52.17				30.54	0.62			16.67		100
Spectrum 12		54.27				27.27	0.60		0.21	17.65		100
Spectrum 13	12.77	0.00									87.23	100
Máximo	12.77	63.74	8.84	1.47	0.43	43.21	1.16	0.44	0.30	52.37	87.23	
Mínimo	12.77	0	8.84	1.47	0.43	12.95	0.60	0.44	0.21	1.33	87.23	

Fonte: O autor, 2025.

Anexo III: Composição química obtida por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) nas macro-inclusões dos lotes com sílica, referente a imagem (c) do lote 5558.

Spectrum	.C	O	F	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Total
Spectrum 1		57.77		0.61	1.50	21.49	1.21	1.23	0.17		16.01		100
Spectrum 2		64.55		0.77	2.32	18.94	1.72	1.20			10.50		100
Spectrum 3		54.40		0.65	1.20	26.16	0.79	1.04	0.21		15.55		100
Spectrum 4	97.07	2.62					0.09					0.23	100
Spectrum 5		46.41				24.01				9.87	19.71		100
Spectrum 6	93.94	4.70				0.17						1.20	100
Spectrum 7		80.27					19.73						100
Spectrum 8		62.22	6.03	0.51	2.37	19.04	1.40	1.00	0.13		7.30		100
Spectrum 9		46.84	9.23	0.63	1.58	18.63	2.70	1.49			18.89		100

Spectrum 10	8.00	0.54										91.46	100
Máximo	97.07	80.27	9.23	0.77	2.37	26.16	19.73	1.49	0.21	9.87	19.71	91.46	
Mínimo	8.00	0.54	6.03	0.51	1.20	0.17	0.09	1.00	0.13	9.87	7.30	0.23	

Fonte: O autor, 2025.