

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL – CAMPUS FELIZ

ELLEN MOSSMANN VALENTINIANI

**CARACTERIZAÇÃO DE INCLUSÕES NO AÇO 20MNCR5 PRODUZIDO EM
ACIARIA ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de
bacharelado em Engenharia Química.

Orientadora: Cinthia Gabrielly Zimmer

FELIZ

2022

ELLEN MOSSMANN VALENTINIANI

**CARACTERIZAÇÃO DE INCLUSÕES NO AÇO 20MNCR5 PRODUZIDO EM
ACIARIA ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química

Feliz, 21 de julho de 2022.

Dedico esse trabalho à minha avó Valeria Mohr Mossmann (*in memoriam*), que sempre esteve do meu lado e que abriu as portas da própria casa para que fosse possível a minha graduação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por estarem sempre presentes e serem fundamentais para a conclusão da minha graduação.

Ao meu avô pelo companheirismo durante toda essa jornada.

A minha melhor amiga, Ana, pela amizade e cumplicidade que é para além dos limites da graduação.

Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo vários momentos de aprendizado e por todo o companheirismo ao longo do curso.

A minha namorada, Gabriele, por todo o apoio na etapa final da minha graduação.

Aos meus colegas do time da aciaria da Gerdau Usina Charqueadas que contribuíram, de alguma forma, para a realização desse trabalho.

Ao colaborador do laboratório de inovação, por me auxiliar no preparo e nas análises do presente trabalho.

*Só há uma maneira de viver para sempre, que é
compartilhando a sabedoria adquirida e
exercitando a gratidão, sempre. (Fresno)*

RESUMO

A produção de aços com maior qualidade está em grande crescimento nos últimos anos, exigindo maior controle do processo durante toda a sua rota de produção, desde a seleção da matéria-prima (sucata ou minério de ferro) até o resfriamento do tarugo pronto, buscando a redução de impurezas no material. Essas impurezas, para o presente trabalho, são referentes à presença de inclusões não metálicas presentes na matriz do aço. Inclusões são definidas como micropartículas de material não-metálicos presentes na composição do aço (óxidos, sulfetos, carbonetos, nitretos ou carbonitretos) sendo prejudiciais às propriedades do material, como tenacidade, resistência a fadiga, ao impacto e a corrosão, podem ser classificadas quando ao seu tamanho, origem e tipo de inclusões formadas. Com isso, esses defeitos estão diretamente relacionados com a qualidade do aço, fazendo com que o entendimento dos fenômenos que influenciam a sua formação seja de suma importância. O presente trabalho tem como objetivo fazer a caracterização das inclusões presentes em dois tipos do aço 20MnCr5 e relacionar as mesmas com o seu processo produtivo, com a finalidade de conhecer seu comportamento para adquirir maior estabilidade na qualidade do processo. Para essa caracterização foram realizadas três tipos de análises com amostras do aço estudado retiradas em todas as etapas da produção do aço: análise de composição química, mais focada nos elementos que mais influenciam na formação de inclusões; análise de microscopia eletrônica de varredura para quantificar e identificar a composição química das mesmas; e análise metalográfica para visualizar o comportamento do tamanho dos defeitos ao longo do processo produtivo. Através da revisão bibliográfica e das análises realizadas foi possível concluir que a morfologia das inclusões é diretamente influenciada por cada característica do método de produção da qualidade em questão. Com esses resultados e conclusões é possível promover soluções capazes de diminuir a ocorrência desses defeitos em aços especiais.

Palavras-chave: Inclusões. Caracterização. Qualidade. Produção de aço.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da produção do aço ⁽⁴⁾	14
Figura 2 - Etapas do processo produtivo do aço em uma usina semi-integrada ⁽⁶⁾	15
Figura 3 - Pátio de sucatas.....	17
Figura 4 – Seção transversal de um forno elétrico a arco ⁽⁴⁾	18
Figura 5 - Forno elétrico a arco.	18
Figura 6 - Seção transversal de um forno panela ⁽⁴⁾	20
Figura 7 - Forno panela ⁽⁹⁾	20
Figura 8 - Desgaseificador à Vácuo (VD).....	21
Figura 9 - Lingotamento Contínuo ⁽¹²⁾	24
Figura 10 – Diminuição da ductibilidade no aço.....	26
Figura 11 - Fluxograma da metodologia.....	29
Figura 12 - Esquema de retirada de amostras	30
Figura 13 - Amostradores utilizados.....	31
Figura 14 - Amostras preparadas.....	32
Figura 15 - Teor de Alumínio do Tipo A	35
Figura 16 - Teor de Alumínio do Tipo B	35
Figura 17 - Teor de Cálcio da Qualidade A	36
Figura 18 - Teor de Cálcio da Qualidade B	36
Figura 19 - Inclusão encontrada na amostra A1 no aço A	45
Figura 20 - Inclusão encontrada na amostra A2 no aço A	45
Figura 21 - Inclusão encontrada na amostra A3 no aço A	46
Figura 22 - Inclusão encontrada na amostra A4 no aço A	46
Figura 23 - Inclusão encontrada na amostra A1 no Aço B	47
Figura 24 - Inclusão encontrada na amostra A2 no aço B	47
Figura 25 - Inclusão encontrada na amostra A3 no aço B	48
Figura 26 - Inclusão encontrada na amostra A4 no aço B	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de Composição Química do Aço 20MnCr5.....	30
Tabela 2 - Composição Química dos aços estudados	34
Tabela 3 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo A na Amostra A1	37
Tabela 4 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo A na amostra A1	38
Tabela 5 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo B na Amostra A1	38
Tabela 6 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo B na amostra A1	39
Tabela 7 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo A na Amostra A2	39
Tabela 8 - Tamanho das Inclusões presentes do Tipo A na amostra A2	40
Tabela 9 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo B na Amostra A2	40
Tabela 10 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo B na amostra A2	41
Tabela 11 - Média Ponderada da Composição Química da Tipo A na Amostra A3 ..	41
Tabela 12 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo A na amostra A3	42
Tabela 13 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo B na Amostra A3 ..	42
Tabela 14 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo B na amostra A3	42
Tabela 15 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo A na Amostra A4 ..	43
Tabela 16 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo A na amostra A4	43
Tabela 17 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo B na Amostra A4 ..	43
Tabela 18 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo B na amostra A4	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo geral.....	12
1.1.2	Objetivos específicos.....	12
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1	Etapas da produção do aço	14
2.2	Produção do aço via usina semi-integrada	14
2.2.1	Pátio de Sucatas.....	16
2.2.2	Forno Elétrico a Arco (FEA).....	17
2.2.3	Metalurgia Secundária.....	18
2.2.4	Lingotamento Contínuo	24
2.3	Inclusões não metálicas nos aços.....	25
2.3.1	Classificação de inclusões por origem.....	27
2.3.2	Classificação de inclusões por tamanho.....	27
2.3.3	Classificação de inclusões por composição química	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Metodologia.....	29
3.2	Material Utilizado.....	29
3.3	Coleta de Amostras e Dados	30
3.4	Análise de Composição Química	31
3.5	Preparação de Amostras.....	31
3.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	32
3.7	Metalografia	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	Análise de Composição Química	34

4.1.1	Análise de Alumínio	34
4.1.2	Análise de Cálcio	36
4.2	Análise da Microscopia Eletrônica de Varredura.....	37
4.2.1	Inclusões na Fase A1	37
4.2.2	Inclusões na Fase A2	39
4.2.3	Inclusões na Fase A3	41
4.2.4	Inclusões na Fase A4	42
4.3	Análise de Metalografia.....	44
5	CONCLUSÃO	49

1 INTRODUÇÃO

Na medida em que a demanda por aços com características específicas aumenta, a indústria busca a evolução do controle de qualidade no processo produtivo. Com isso, veio a necessidade de aprimorar estudos para obter propriedades controladas para aços com determinadas aplicações, tais como: propriedades mecânicas, controle de impurezas e controle de defeitos superficiais.

Para isso, o estudo de inclusões é essencial por conta do seu efeito nas propriedades do aço. Pode-se definir inclusões como micropartículas não metálicas que são presentes no aço, são formadas principalmente na desoxidação e reoxidação do aço, escórias, refratários e aquecimento químico, e são divididas principalmente pelo seu tamanho: as microinclusões e as macroinclusões. Sendo assim, é nítida a importância de adquirir conhecimento dos tipos de inclusões que podem ser formadas ao longo da produção dos aços para realizar alterações necessárias a fim de evitar a formação das mesmas, obtendo maior controle da produção e das propriedades do material.

Com isso, o objetivo desse trabalho é realizar a caracterização das inclusões geradas no processo produtivo do aço DIN 20MnCr5. Para tal, foi feita uma revisão bibliográfica para aprimorar o entendimento sobre inclusões não metálicas no aço, bem como as etapas do seu processo produtivo, reações que ocorrem durante e tipos de inclusões.

Para a caracterização das inclusões, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado a um sistema EDS capaz de avaliar o tamanho e a composição química dos defeitos. Também, foi feito o ensaio metalográfico das amostras do material para identificar a microestrutura do aço estudado e testes de dureza para melhores conclusões. Sendo assim, as discussões geradas no presente trabalho auxiliam para uma melhor compreensão sobre o processo produtivo e a formação de inclusões.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar as inclusões resultantes do processo produtivo do aço 20MnCr5 quanto ao seu tamanho e sua composição química. Um aço de média seção que apresenta temperabilidade intermediária, tem uma boa resistência mecânica e resistência ao choque, muito utilizado na indústria automobilística como engrenagens e árvores de transmissão.

1.1.2 Objetivos específicos

Identificação das inclusões encontradas em amostras do aço 20MnCr5, retiradas em algumas etapas do processo de produção: após o forno elétrico a arco, após o processo de refino secundário e ao longo do lingotamento contínuo

Por meio de metalografia, identificar a microestrutura do aço estudado e também, identificar a presença das macroinclusões.

Analisar o perfil inclusionário, a composição química e o tamanho das inclusões com resultados via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

2 REVISÃO DA LITERATURA

Desde o início das civilizações, o homem utiliza produtos oriundos do ferro desde utensílios para cultivo em busca da própria alimentação até a produção de armas para defesa pessoal. Por mais que o ferro seja um dos elementos mais abundantes na Crosta Terrestre, a sua obtenção é complexa, exigindo com que o homem desenvolvesse processos para extraí-lo dos minérios e para processar o mesmo. A grande presença de carbono nesses métodos influenciou nos estudos da ligação desse elemento com ferro, aprimorando as propriedades do material e formando suas principais ligas: aço e ferro fundido ⁽¹⁾.

Os ferros fundidos podem ser definidos como produto resultante da liga ferro carbono com teor de carbono acima de 2%. Recebem esse nome pois suas ligas apresentam temperaturas de fusão mais baixas quando comparadas ao aço, fundindo-se com facilidade, sendo então, apropriados para fundição ⁽²⁾.

Os aços são ligas de ferro carbono com teor de carbono mais baixo em relação aos ferros fundidos e podem conter a presença de outros elementos em sua composição. São classificados de acordo com o teor de carbono na liga, podendo ser: aços baixo, médio e alto carbono ⁽²⁾.

A utilização do aço como material de engenharia é consequência de diversos fatores, tanto técnicos como econômicos, necessitando de vasto conhecimento sobre as relações de composição química, estrutura, propriedades, desempenho e processamento. Um dos fatores que mais influenciaram para a importância do aço é a abundância de ferro encontrado em formato de minério pela crosta terrestre, tendo um custo de produção relativamente baixo e com grande facilidade de serem reciclados ⁽¹⁾.

O processo de produção do aço é realizado em usinas siderúrgicas que são classificadas em três tipos: usinas integradas, usinas semi-integradas e usinas não integradas. As integradas produzem a partir de matérias-primas naturais, como minério de ferro, carvão mineral ou coque em alto-forno para a fusão e redução do ferro. Nas semi-integradas, a produção é a partir da fusão de sucata metálica em um forno elétrico. Já as não-integradas possuem somente uma fase do processo que pode ser tanto a redução do minério para produção de ferro gusa, como a laminação.

2.1 Etapas da produção do aço

As etapas de produção de aço consistem na recuperação do minério de ferro, aço, fundição e conformação mecânica. A fase siderúrgica envolve o chamado refino de aço ou metalurgia de paletes ⁽³⁾.

A separação da metalurgia primária (carga, derretimento, oxidação) da metalurgia secundária (refino) foi adotada em conexão com a crescente demanda por aços melhores e a possibilidade de redução do tempo de operação, aumentando a produtividade ⁽³⁾. As plantas integradas possuem todas as etapas mencionadas, e as plantas semi-integradas não possuem um estágio de redução de minério, pois utilizam sucata como matéria-prima. As instalações não integradas têm apenas uma das etapas mencionadas.

A Figura 1 mostra um fluxograma do processo de produção de aço.

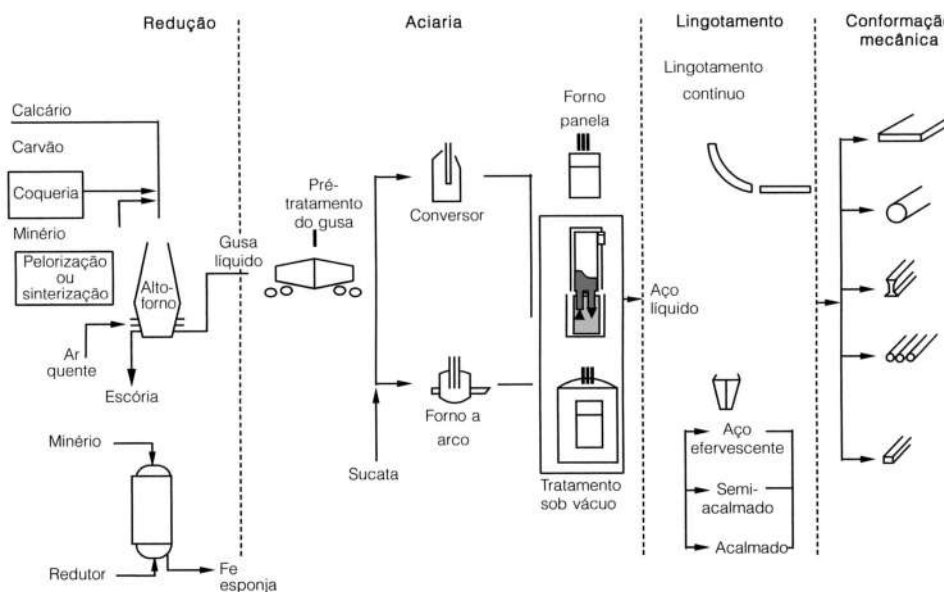


Figura 1 - Fluxograma da produção do aço ⁽⁴⁾.

2.2 Produção do aço via usina semi-integrada

A Figura 2 ilustra as etapas do processo de produção de aço via aciaria elétrica que é o modelo mais utilizado em usinas siderúrgicas semi-integradas, que consiste nas seguintes etapas: fusão no forno elétrico a arco (FEA), refino secundário no forno panela (FP) e no desgaseificador a vácuo (VD), e por último, o lingotamento contínuo (LC). Caracteriza-se pela utilização de um Forno Elétrico a Arco (FEA) para a fusão da matéria-prima que é a sucata ferrosa já selecionada e processada, no pátio de sucatas, juntamente com o ferro-gusa ⁽⁵⁾.

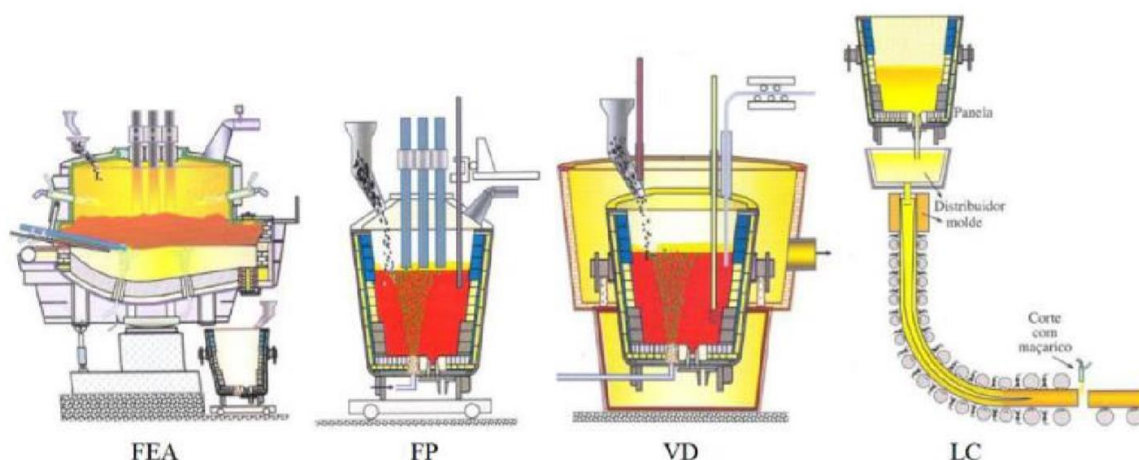


Figura 2 - Etapas do processo produtivo do aço em uma usina semi-integrada ⁽⁶⁾.

O funcionamento de um forno elétrico a arco consiste nas fases de carregamento de sucata e fundentes, fusão e refino oxidante, retirada de escória e vazamento. No forno tem a formação um arco elétrico entre os eletrodos de grafita e a carga metálica que promovem a fusão do material. Para o refino primário, é realizado a injeção de oxigênio para garantir que ocorra a descarburização e a desfoforação, e também a remoção de impurezas contidas no banho por oxidação. Os produtos formados nessa etapa são captados pela escória que é retirada pela porta do forno ⁽⁵⁾.

Após a fusão e refino primário da carga, ocorre o vazamento do aço líquido em uma panela siderúrgica. Durante esse processo, há a adição de desoxidantes na forma de ferroligas (alumínio, silício e manganês) para promover a desoxidação do aço pela formação de óxidos com o oxigênio dissolvidos no aço. Nessa etapa, tem-se o controle da passagem de escória, já que nela contém impurezas indesejadas para o processo de refino secundário ⁽⁷⁾.

O forno panela tem como principal objetivo o ajuste de composição química do aço pela adição de ligas, refino redutor, remoção e transformação de inclusões, e atingir a temperatura adequada para as etapas subsequentes. Durante essa parte do refino, é feita a injeção de gases inertes (argônio ou nitrogênio) através de um *plug* presente no fundo da panela, esse processo tem por finalidade promover a uniformidade térmica e química, e auxiliar a flotação de inclusões e escória. A checagem de composição química é feita através de coletas de amostras e de escórias ⁽⁴⁾.

Realizado o tratamento no forno panela, a panela com aço líquido é conduzida para o desgaseificador a vácuo (VD), que é um tanque fechado hermeticamente por uma tampa e tem como objetivo a remoção de gases nitrogênio e hidrogênio, além de dessulfuração, descarburização e ajuste fino de composição química pela adição de fios ⁽⁴⁾.

Com a composição química desejada, o aço é encaminhado a etapa de solidificação e transformação na forma de tarugos, sendo essa a última etapa do processo de uma aciaria. A máquina de lingotamento contínuo é composta por componentes responsáveis pela solidificação do material. Uma torre sustenta a panela e a posiciona acima do distribuidor para realizar a distribuição do aço líquido ao longo dos veios. Os moldes tem como objetivo realizar a solidificação no seu primeiro estágio, com a formação de uma casca sólida para o aço seguir para a segunda zona de resfriamento, onde acontece a solidificação por meio da injeção de água diretamente nos tarugos. Com o auxílio dos endireitadores, os tarugos ganham a forma reta e são cortados através de oxi-corte em um tamanho adequado para a laminação ⁽⁶⁾.

2.2.1 Pátio de Sucatas

É o setor responsável pelo recebimento, classificação e processamento das matérias-primas (sucata e ferro gusa), representa em torno de 70% do custo da produção do aço, sendo fundamental o funcionamento do fluxo. Com uma adequada limpeza, classificação, armazenamento, movimentação e processamento para evitar misturas, contaminações, influência das impurezas no produto final e retrabalhos.

A classificação é a primeira etapa do processo de preparação da matéria prima, realizada de maneira visual, com o classificador avistando a carga do caminhão de cima para conferir se o material recebido está de acordo com o pedido da empresa especificado em nota. É esperado baixo teor de impurezas no material e que a composição química especificada esteja de acordo.

O processamento é a etapa em que prepara a matéria prima recebida e classificada para ser utilizada na aciaria. Os principais equipamentos são: prensa tesoura, tesoura móvel e oxicorte, responsáveis por cortar a sucata no tamanho adequado para a utilização no forno, por remover impurezas que ainda restaram após a classificação e pelo aumento de densidade da carga.

A movimentação do material é feita por equipamentos de transporte, como: garra, eletroímã, escavadeiras, empilhadeiras e caminhões. Tendo como função transportar a sucata já processada para as pilhas de armazenamento e para as baias da aciaria, onde serão utilizadas para abastecer o forno. A Figura 3 mostra o pátio de sucatas.



Figura 3 - Pátio de sucatas.

FONTE: Da autora.

2.2.2 Forno Elétrico a Arco (FEA)

O forno de arco elétrico (FEA) é usado para derreter e pré-refinar a carga. O forno tem eletrodos de grafite, e o arco elétrico formado entre os eletrodos e a carga é responsável por sua fusão. Após o vazamento de aço líquido, a escória se formou durante o derretimento da carga permanece.

A Figura 4 mostra um diagrama da seção transversal de um forno elétrico a arco com indicação de algumas de suas partes e componentes ⁽⁴⁾.

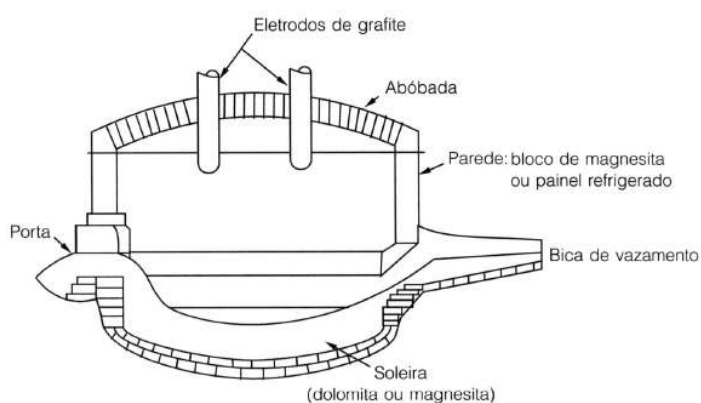


Figura 4 – Seção transversal de um forno elétrico a arco ⁽⁴⁾.

Já a Figura 5 mostra um forno elétrico a arco real de uma indústria siderúrgica.



Figura 5 - Forno elétrico a arco.

FONTE: Da autora.

2.2.3 Metalurgia Secundária

A etapa de metalurgia secundária é dividida em duas etapas: o Forno Panela (FP) e o Desgaseificador à Vácuo (VD), é responsável pelo refino do aço, pelo ajuste de composição química e pela limpeza inclusionário.

O refino de aço é necessário na indústria siderúrgica de oxigênio porque após reduzir o teor de carbono dissolvido do ferro fundido no conversor, a banheira torna-se abundante com oxigênio. E também é necessário na indústria siderúrgica elétrica, pois a composição química exata de toda a sucata contida na carga não é conhecida. Quando refinado, o teor de oxigênio dissolvido do banho é reduzido, o teor de impurezas nocivas como enxofre e fósforo é reduzido, o teor de gases dissolvidos como nitrogênio e hidrogênio é reduzido, e ajustes finos são feitos na composição, especialmente no caso de aços de liga.

O excesso de oxigênio no banho é muito indesejável, pois quando endurece, permanecerá dentro do aço, gerando pequenas cavidades no produto final, piorando sua resistência mecânica. Para reduzir o teor de oxigênio no banho, elementos com maior afinidade por oxigênio do que ferro são adicionados ao aço líquido, denotando desoxidantes como alumínio e silício. Esses elementos, em combinação com oxigênio, formam os óxidos Al_2O_3 e SiO_2 , respectivamente. Os produtos de desoxidação de aço são uma das fontes de inclusões não metálicas ou simplesmente inclusões, eles têm um tamanho de microns, e sua remoção completa do aço líquido é muito difícil. O número de inclusões no produto acabado deve ser o mais baixo possível, uma vez que geralmente têm uma dureza maior que o aço, e o aparecimento de rachaduras ocorrerá nas proximidades das inclusões, e, portanto, a presença de inclusões piora as propriedades mecânicas do aço.

O aço líquido do FEA é transferido para a panela e a escória que cobre o aço na panela é removida. A panela é então inserida em um carro transportador. O FP é uma tampa de panela que tem eletrodos de grafite como o FEA, embora com menor capacidade térmica, e tem a função de manter a temperatura do banheiro. Adição dos elementos liga podem ser feitos no FP para corrigir a composição do aço, adicionar desoxidantes e modificadores de aço. Nesta fase, o aço também é dessulfurizado. A unidade FP possui um sistema de bolhas de gás inertes (argônio ou nitrogênio) que serve para agitar o banho, como ilustrado na Figura 6 ⁽⁴⁾.

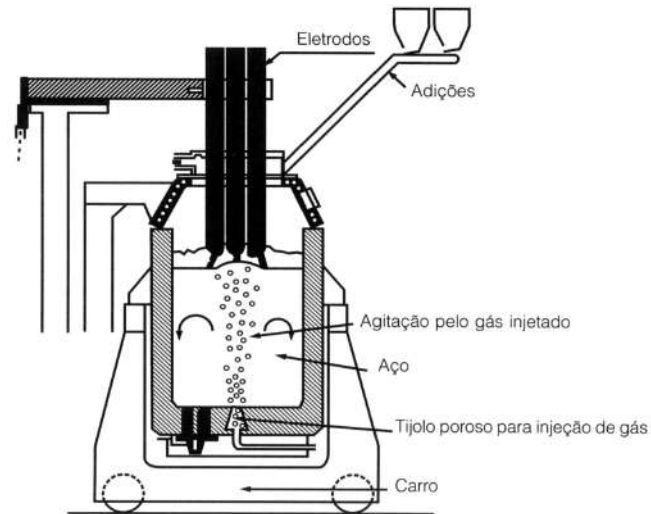


Figura 6 - Seção transversal de um forno panela ⁽⁴⁾.

Durante o refino, certos elementos são adicionados à formação de escória sintética que ajudam no refino de aço. A escória sintética é tipicamente baseada em $Al_2O_3-CaO-SiO_2$, que contém principalmente raspas de cálcio ou silicatos de cálcio, além de cal (CaO) e fluorite (CaF_2) ⁽⁸⁾.

A FP também é importante para garantir que a temperatura do aço seja estritamente controlada durante o refino antes que o aço atinja o estágio de fundição, pois a banheira tenderá a perder gradualmente a temperatura se não houver aquecimento. A Figura 7 mostra um forno panela em ação ⁽⁹⁾.



Figura 7 - Forno panela ⁽⁹⁾.

As etapas de limpeza da panela geralmente são realizadas na seguinte ordem ⁽¹⁰⁾:

- Desoxidação;
- Dessulfuração;
- Adições controladas de elementos de ligas;
- Modificação de inclusões.

Após o processo no Forno Panela, a panela com o aço líquido é transportada via ponte rolante com o auxílio de uma garra, para o desgaseificador à vácuo (VD). O VD consiste em um tanque, dotado de um carro tampa e um sistema de bombas de vácuo. Após ser colocada no tanque, o carro tampa realiza a vedação da panela e a mesma é submetida a pressões de até 1 mbar. Esse processo tem como finalidade promover a desgaseificação do banho, retirando os gases indesejados como por exemplo o hidrogênio, e se necessário, o ajuste final de composição química através da adição de fios de ligas. A Figura 8 mostra o tanque do VD com a panela inserida e o carro tampa.



Figura 8 - Desgaseificador à Vácuo (VD).

FONTE: Da autora.

2.2.3.1 Redução

Existem 3 categorias de aços desoxidados dependendo do teor de oxigênio dissolvido do aço, o que é desejável no final da desoxidação ⁽¹⁰⁾.

- a) Os aços reciclados desoxidados com o FeMn atingem de 200 a 100 partes por milhão de oxigênio dissolvido.

- b) Aços semi acalmados desoxidizados com:
 - (i) Si/Mn para alcançar 70-50 ppm de oxigênio dissolvido;
 - (ii) Si/Mn/Al para alcançar 40-25 ppm de oxigênio dissolvido;
 - (iii) Si/Mn/Ca para alcançar 20-15 partes por milhão de oxigênio dissolvido.

- c) Os aços oxidados são aquecidos a 4-2 partes por milhão de oxigênio dissolvido.

O aço pode ser desoxidado na presença de uma escória sintética contendo carbonato de cálcio, carboneto de silício ou carboneto de cálcio.

Na desoxidação parcial, os produtos femininos de desoxidação são óxidos de ferro e manganês, e a atividade desses óxidos pode ser reduzida com o uso de escórias contendo carbonato de cálcio.

Quando o Si/Mn é desoxidado, os produtos de desoxidação são silicatos de manganês, e o uso combinado de silício e manganês fornece desoxidação mais eficiente do que o realizado com esses elementos separadamente. A presença de uma pequena quantidade de Al pode reduzir significativamente o teor de oxigênio dissolvido obtido pela desoxidação Si/Mn. Neste caso, os produtos obtidos como resultado da desoxidação são aluminossilicatos de manganês.

Os aços semi acalmados estendidos com Si/Mn podem ser posteriormente desoxidados com o CaSi, resultando em silicato de manganês e produtos desoxidantes de silicato de cálcio que reduzem o oxigênio dissolvido.

Ao desoxidar Al, o produto de desoxidação resultante é óxido de alumínio, nesse caso a desoxidação com escória contendo cálcio para reduzir o teor de oxigênio dissolvido de aço não tem efeito, pois este é controlado por uma luminária de aço na forma de inclusões. O teor de oxigênio dissolvido de aço só pode ser reduzido após a desoxidação por tratamento de cálcio, o que modifica as inclusões de alumina para carbonato de cálcio.

2.2.3.2 Dessulfuração e desfoforação

Alguns tipos especiais de aços requerem um teor de enxofre dissolvido muito baixo (< 20 ppm), e esses níveis podem ser alcançados por dessulfurização em uma panela. Para fazer isso, você pode usar uma escória contendo cálcio quando o aço está completamente calmo.

O fósforo é geralmente removido do aço sob condições de oxidação, em um conversor de oxigênio ou em um FEA injetado em oxigênio. Mas em usinas de aço elétrico com atividade econômica estrangeira sem injeção de oxigênio, a desfoforação pode ser realizada em uma panela usando uma escória oxidante contendo cal e óxido de ferro.

2.2.3.3 Adição de Elementos de Liga

Metais e ligas podem ser adicionados ao aço líquido em várias etapas do processo siderúrgico, tais como: juntamente com o carregamento do forno, durante o vazamento do forno, em um forno panela ou durante o processamento a vácuo.

O tempo de adição depende do caminho do processo, da logística da aciaria e das características da adição. As propriedades mais importantes dos aditivos são: ponto de fusão, volatilidade, afinidade de oxigênio, pressão de vapor, densidade e tamanho de partículas ⁽¹¹⁾.

Os elementos da liga são geralmente adicionados na forma de ferroliga. Ferroliga são ligas metálicas contendo Fe e outros elementos como Mn, Ni, Cr, Si e outros.

Ferroliga são classificados de acordo com seu ponto de fusão ⁽⁸⁾:

- Ferroliga de classe I (P.F. < T. Líquida do Fe) – como FeMn, SiMn, FeSi e FeCr;
- Ferroalloys classe II (P.F. > T. Líquida do Fe) – como FeMo, FeV, FeNb e FeW.

Quando uma partícula de ferroliga é adicionada ao aço líquido, uma casca de aço é formada ao seu redor devido ao resfriamento local, e com o tempo, esta casca se funde quando o ferroliga atinge o ponto de fusão, de modo que é baseada em aço

líquido. Ferroliga podem ser derretidos em frente a uma carcaça de aço duro, no caso de ferroliga classe I. Como o ponto de fusão das ferroligas classe II é maior que o do ferro líquido, eles têm uma taxa de dissolução mais lenta em aço líquido do que ferroligas classe I ⁽¹¹⁾. Ferroliga normalmente têm inclusões de óxido, e podem permanecer em aço após o refino ⁽¹²⁾.

2.2.4 Lingotamento Contínuo

A fundição contínua foi criada para substituir os processos tradicionais de fundição, com alta produtividade e desempenho, excelente qualidade de superfície e produto interno, e tremenda versatilidade para produzir uma ampla gama de tipos de aço ⁽¹³⁾. Consiste em uma instalação que basicamente abriga 3 peças de equipamento: uma panela, um distribuidor e um molde, como mostra a Figura 9 ⁽¹²⁾.

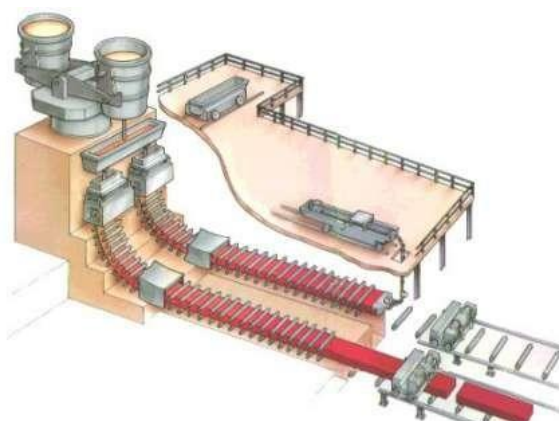


Figura 9 - Lingotamento Contínuo ⁽¹²⁾.

A principal função do distribuidor é servir como tanque de aço e manter a continuidade da fundição, especialmente na troca de panela. No distribuidor, também podem ocorrer a separação e flotação das inclusões, a modificação da morfologia das inclusões resultantes, o controle do superaquecimento e a homogeneização térmica e química do aço ⁽¹³⁾.

Finalmente, o molde é considerado um elemento básico de uma máquina de fundição contínua, e suas principais funções são conter o metal e produzir extração térmica para facilitar o início da solidificação ⁽¹³⁾.

O início da operação do lingotamento contínuo deve-se à abertura da válvula localizado no fundo de uma panela de aço suspenso em um distribuidor, unidos através de um tubo longo. Portanto, o aço é vazado para fora da panela no distribuidor. Depois de preencher o distribuidor ao nível, é possível que o aço seja derramado em um molde de cobre resfriado com água usando tubos refratários, também chamados de válvulas submersas.

Para começar a série a parte inferior do molde é coberta com uma barra falsa inserida através do eixo da máquina. Esta barra falsa age como o fundo do molde e é usada para iniciar a solidificação e extrair a placa através do eixo ⁽¹³⁾.

O aço líquido em contato com o molde e a barra falsa endurece rapidamente e, em seguida, extrai a uma taxa crescente até atingir condições padrão, que são determinadas pelo tamanho e tipo de aço ⁽¹³⁾.

A principal função do molde é dar a forma desejada ao metal endurecido. Ele está localizado abaixo do distribuidor, onde inicia o processo de endurecimento do aço, sendo solidificado da parede externa ao interior do tarugo ⁽¹³⁾.

2.3 Inclusões não metálicas nos aços

As inclusões são partículas não metálicas presentes em uma matriz de metais e ligas que podem resultar de seu processo de desoxidação, como mencionado acima. As inclusões podem ser muito prejudiciais às propriedades mecânicas, como força da fratura, resistência ao impacto, resistência à fadiga, desempenho quente e resistência à corrosão do aço, especialmente em aços de alta resistência para aplicações críticas ⁽¹⁴⁾. O aço não pode ser completamente livre de inclusões, e sua quantidade é estimada entre 1010 e 1015 inclusões por tonelada de aço ⁽¹⁵⁾. As inclusões são geralmente partículas de óxido e sulfeto e têm dimensões microscópicas. Geralmente, as inclusões mais comuns encontradas são menores que 200 micrometros, no entanto é essencial não só controlar o tamanho médio das mesmas como também que não ultrapassem um tamanho crítico que ocasione falha no produto final ⁽¹⁵⁾.

Na prática, as inclusões são divididas por tamanho em microinclusões e macro inclusões. As inclusões macro, devem ser removidas devido aos seus efeitos nocivos. No entanto, a presença de microinclusões pode ser tolerada, pois elas não

necessariamente têm um efeito nocivo sobre as propriedades do aço e podem até ser benéficas. Eles podem, por exemplo, limitar o tamanho do grão, aumentar o limite de rendimento e dureza, e também agir com núcleos para a deposição de carbonetos e nitretos ⁽¹⁴⁾.

Alguns defeitos são diretamente associados a presença de inclusões, como a diminuição da ductilidade, tenacidade, resistência a fadiga e corrosão e usinabilidade. As inclusões diminuem, também a resistência a formação de trincas induzidas pela presença hidrogênio, que são problemas que causam fadiga nos aços. A Figura 10 mostra a diminuição da ductibilidade no aço por conta da presença de óxidos e sulfetos oriundos das inclusões ⁽¹⁶⁾.

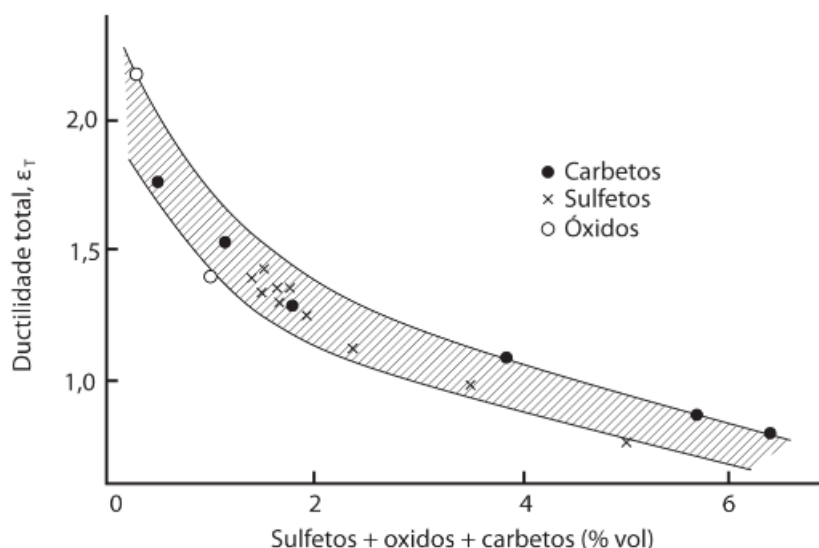


Figura 10 – Diminuição da ductibilidade no aço.

Entretanto, determinadas inclusões como as de sulfeto de manganês auxiliam na melhor usinabilidade em alguns aços ⁽¹⁷⁾. Um dos principais problemas operacionais causados pela formação de inclusões é o *clogging* (obstrução da válvula submersa do lingotamento contínuo), ocasionando perda de produtividade e interrupção da produção ⁽¹⁸⁾.

2.3.1 Classificação de inclusões por origem

As inclusões também são divididas em dois grandes grupos em relação a sua origem: inclusões endógenas e inclusões exógenas. As endógenas são resultantes de reações homogêneas que ocorrem no processo produtivo do aço (banho líquido e solidificação do aço) e estão sempre sendo geradas e com isso, só podem ser minimizadas, mas nunca eliminadas ⁽¹⁹⁾.

Já as inclusões exógenas são relacionadas com agentes externos, como incorporações mecânicas de partes de escória, pó de molde do lingotamento ou erosão dos refratários das panelas ⁽²⁰⁾.

2.3.2 Classificação de inclusões por tamanho

Um defeito pode ter origem em uma única inclusão, por esse motivo, não se deve somente observar a morfologia, composição química e tipo, mas também no seu tamanho ⁽²¹⁾. As inclusões, quanto ao seu tamanho, dividem-se em dois grandes grupos: microinclusões e macroinclusões. O fator determinante para uma inclusão ser definida como micro ou macro é a aplicação do aço, acima do limite de tamanho pré-determinado para tal finalidade do aço, trata-se de macroinclusões, dentro dos limites é microinclusão ⁽²²⁾.

As macroinclusões devem ser eliminadas por terem efeitos prejudiciais às propriedades mecânicas do produto. As microinclusões, por sua vez, muitas vezes são toleradas e até necessárias, podendo auxiliar no controle de grão, aumentar o limite de escoamento e dureza do aço ⁽²³⁾.

2.3.3 Classificação de inclusões por composição química

As inclusões podem ser classificadas agrupando-as de acordo com sua composição química, e há várias maneiras de classificá-las dessa forma. Inicialmente, as inclusões podem ser divididas em: óxidos, sulfetos, nitretos e

fosfitos⁽¹⁴⁾.

Os óxidos incluem óxidos de alumínio, sílica, cálcio, manganês e silicatos de alumínio, óxidos de ferro, óxidos de manganês e óxidos mistos. Os sulfetos incluem principalmente sulfetos de manganês e sulfeto de cálcio. Nitretos podem incluir, dependendo dos elementos de liga do aço, alumínio, titânio ou outros elementos. E os fosfitos incluem ferro e ligas que contenham fósforo ⁽²⁴⁾.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos experimentais utilizados para a realização do trabalho, bem como a metodologia utilizada.

3.1 Metodologia

Na Figura 11 pode-se observar o fluxograma da metodologia empregada no presente trabalho, tendo como objetivo a caracterização das macroinclusões encontradas em aços especiais produzidos em uma siderurgia semi-integrada, a fim de relacioná-las com a composição química do mesmo.

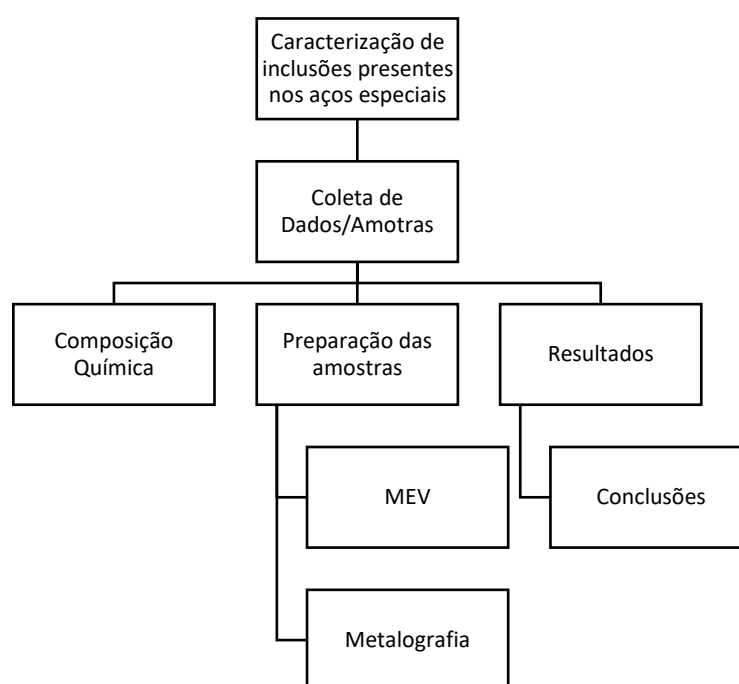


Figura 11 - Fluxograma da metodologia.

3.2 Material Utilizado

O aço escolhido para estudo é o 20MnCr5, aço de baixo carbono e média temperabilidade. A faixa de composição química do aço estudado é mostrado na Tabela 1 ⁽²⁵⁾.

Tabela 1 - Faixa de Composição Química do Aço 20MnCr5.

Faixa de Composição Química do Aço SAE 5120	
C	0,17 – 0,22
Mn	0,70 – 0,90
P	0,03
S	0,04
Si	0,15 – 0,35
Ni	0,40 – 0,70
Cr	0,40 – 0,60
Mo	0,08 – 0,15

Esse aço é utilizado na indústria automobilística para a produção de engrenagens e árvores de transmissão.

3.3 Coleta de Amostras e Dados

Acompanhou-se as primeiras corridas de sequenciais de dois tipos do aço 20MnCr5, em cada corrida foram retiradas quatro amostras de aço durante as principais etapas do processo de produção do aço na aciaria, conforme a Figura 12 ilustra. Com essas amostras, foram realizadas as análises de composição química, de metalografia e de microscopia eletrônica de varredura.

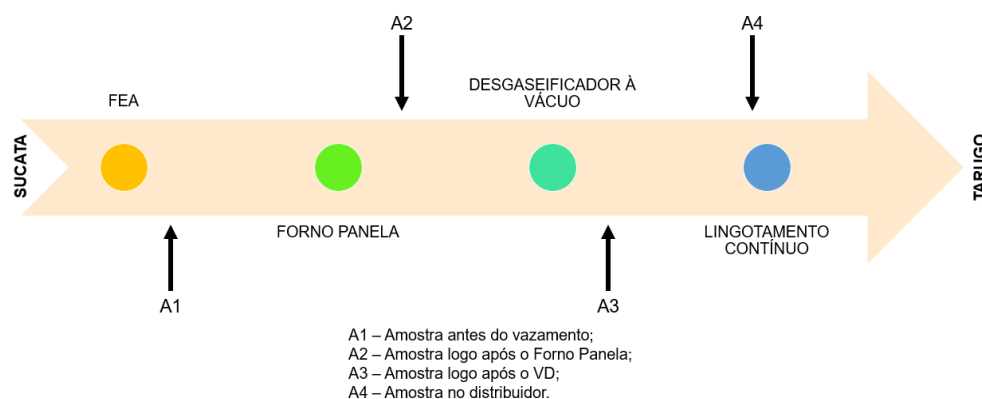


Figura 12 - Esquema de retirada de amostras

As amostras citadas foram retiradas durante o processo por meio de amostradores, os mesmos não possuem desoxidantes pois poderia interferir na composição química das inclusões, da fabricante Heraeus Electro-Nite, modelo Samp-O-Line. A Figura 13 mostra o esquema do amostrador, juntamente com seus componentes ⁽²⁶⁾.

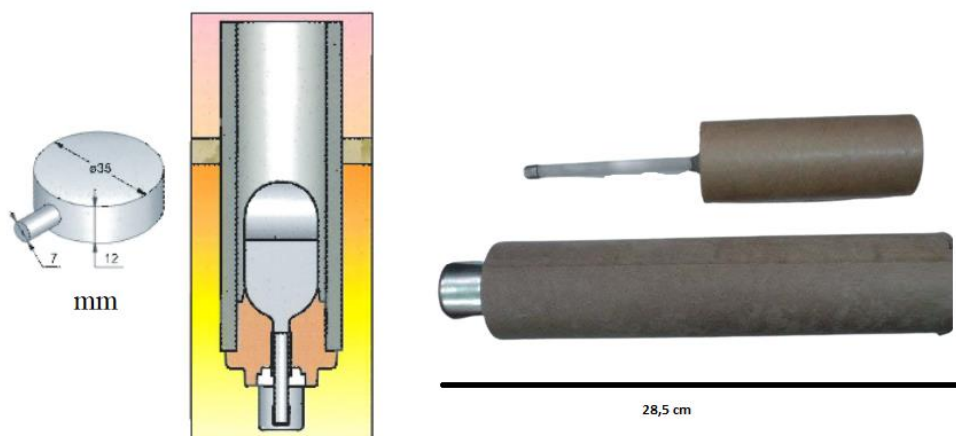


Figura 13 - Amostradores utilizados
 FONTE: Adaptado de BIELEFELDT (2005).

3.4 Análise de Composição Química

A análise de composição química das amostras foi realizada através do Espectômetro de Emissão Ótica ARL modelo 3560, que tem a finalidade de fornecer os componentes presentes no aço.

3.5 Preparação de Amostras

As amostras foram preparadas tanto para a microscopia eletrônica de varredura (MEV) quanto para a metalografia, passando pelos processos de corte, lixamento e polimento. Para o corte, foi utilizada a cortadora metalográfica Teclago modelo CM100 e realizado o corte frontal nas peças. No lixamento, foram utilizadas lixas de grana a base de carvão de silício em água com granulometrias que variam de 100 a 1200. E por fim, no polimento foi utilizada uma politriz metalográfica de duas velocidades e

dois pratos da Teclago modelo PL02ED. A Figura 14 mostra a amostra recém retirada do processo e à direita a mesma já preparada.



Figura 14 - Amostras preparadas

3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Após a preparação das amostras, as mesmas foram analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura com EDS (Espectroscopia por energia dispersiva) modelo ASPEX PSEM *Explorer*. Com cada amostra foi realizada uma varredura completa da área, de aproximadamente 100 mm², caracterizando as inclusões presentes. Com os resultados obtidos da presente análise, foi possível fazer a relação entre a composição química dos defeitos com a etapa do processo, também pode-se fazer a seleção do diagrama ternário mais adequado de acordo com a composição dos óxidos apresentados.

3.7 Metalografia

Para a análise metalográfica das peças, a mesma preparação de amostras para a análise do MEV foi utilizada. Utilizou-se um microscópio, aumentando em 100x, localizado no laboratório de caracterização do IFRS Campus Feliz. Para capturar imagens das inclusões, foi utilizada a câmera acoplada no equipamento. Com as imagens obtidas, foi possível ilustrar os defeitos encontrados e definir o tamanho das

mesmas. Em cada amostra, procurou-se 3 inclusões para a caracterização das mesmas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de Composição Química

Primeiramente, foram analisadas as composições químicas das duas corridas analisadas no trabalho, sendo necessário o conhecimento da mesma por conta da influência de cada elemento dissolvido no banho na atividade de outro. Os elementos que representam a composição nominal do aço, de acordo com a norma SAE, que são: C, Cr, Cu, Si, Mn, P, Ni, Mo e S estavam dentro da faixa de composição química ideal. Portanto, as corridas estudadas são representativas do processo. Os dados citados acima não serão mostrados por questões de confidencialidade.

Para uma análise mais focada em inclusões, foi feita também, a análise de elementos considerados fortes formadores de inclusões: Al e Ca. Na Tabela 2 mostra a porcentagem em massa presente desses elementos no aço analisado, em todas as etapas do processo.

Tabela 2 - Composição Química dos aços estudados

TIPO	ELEMENTO	A1	A2	A3	A4
A	Al	0,301	0,004	0,004	0,023
	Ca	0,0024	0,0013	0,0008	0,0011
B	Al	0,247	0,003	0,027	0,019
	Ca	0,0003	0,0004	0,0019	0,0010

4.1.1 Análise de Alumínio

A Figura 15 mostra a média dos teores de Alumínio do tipo A, assim como a média histórica de 400 outras corridas da mesma qualidade. Já a Figura 16 mostra o teor de Alumínio presente no tipo B e a média histórica de 80 outras corridas da mesma qualidade.

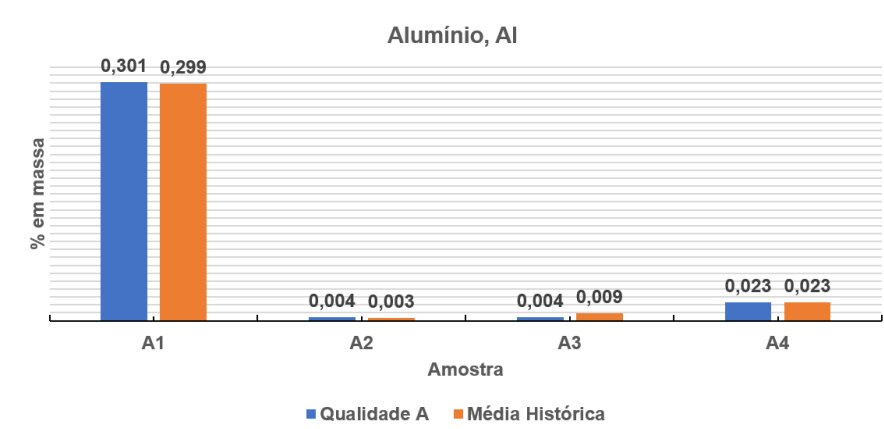


Figura 15 - Teor de Alumínio do Tipo A

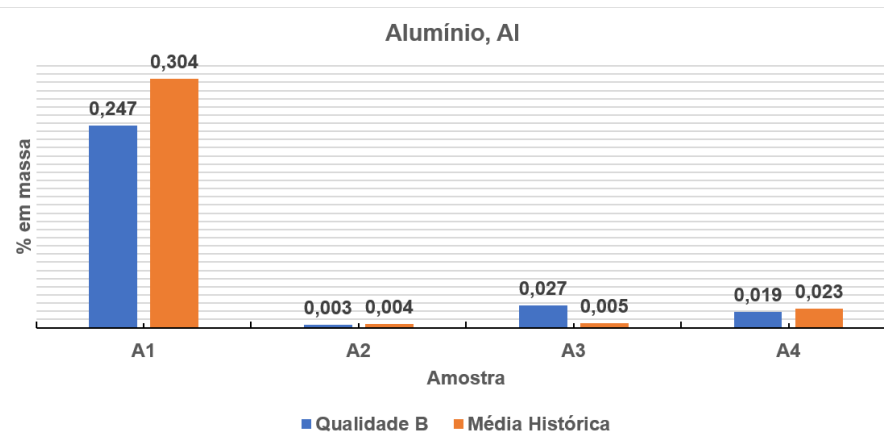


Figura 16 - Teor de Alumínio do Tipo B

O teor de Alumínio das duas qualidades está conforme a média histórica do processo. O tipo A apresenta Al desde o vazamento do FEA, originado da sucata e da adição de fundentes, porém por ter características desoxidantes, o alumínio não pertence à composição química do aço até os níveis de oxigênio presente sejam baixos, tendo a sua adição após o desgaseificador à vácuo. Podemos notar esse comportamento na Figura 15 onde o Al se mantém em poucas quantidades até o momento da sua adição (A4). Já a qualidade B, apresenta teores de Al desde o vazamento por conta da sua escória ser modificada e adaptada para capturar mais impurezas durante o processo, após a desoxidação o teor fica baixo até ocorrer a sua adição no forno panela. Também podemos notar esse comportamento na Figura 16, onde na A2 o valor está baixo, porém dentro da média histórica e no A3 apresenta um valor consideravelmente mais alto que na amostra anterior por conta da adição de

ligas. O valor está acima da média histórica, porém dentro das especificações da norma SAE para esse aço.

De acordo com Bielefeldt (2005), é normal o alumínio apresentar essa queda percentual entre as amostras A3 e A4 no tipo B. Isso deve-se por conta da flotação das inclusões que ocorre após o vácuo e pela reoxidação do aço em contato com o ar durante a passagem de aço da panela para o distribuidor do lingotamento contínuo pois o tubo longo não consegue fazer a vedação completa.

4.1.2 Análise de Cálcio

A Figura 17 mostra a média dos teores de cálcio do tipo A, assim como a média histórica de 400 outras corridas do mesmo aço. Já a Figura 18 mostra o teor de cálcio presente na qualidade B e a média histórica de 80 outras corridas da mesma qualidade.

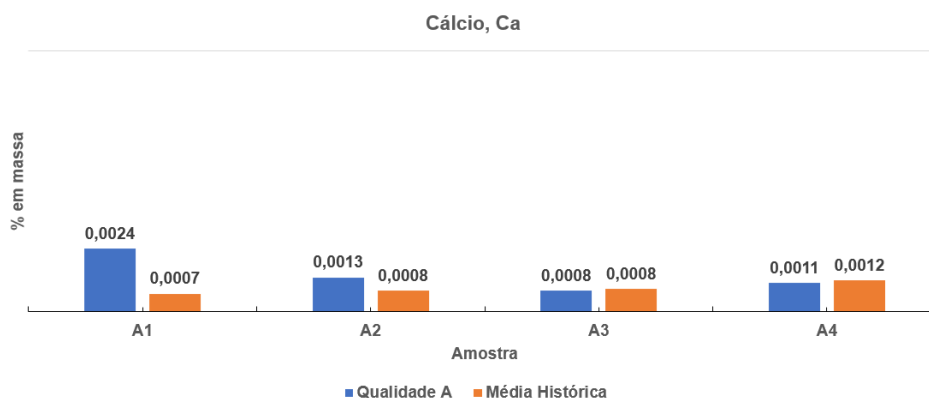


Figura 17 - Teor de Cálcio da Qualidade A

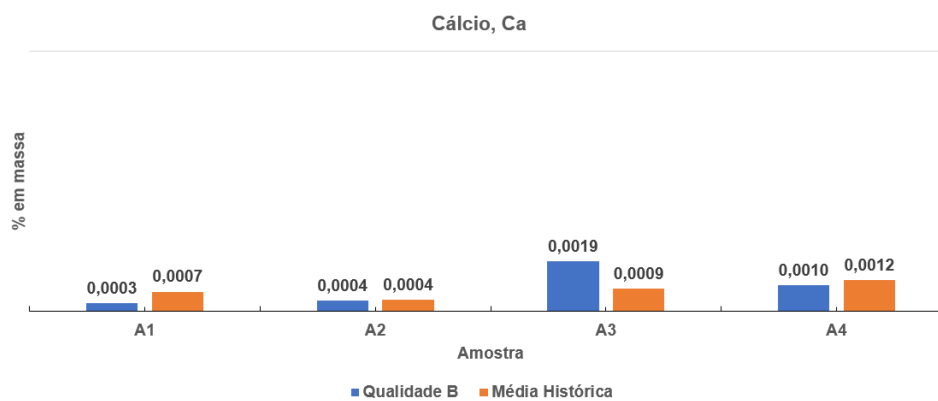


Figura 18 - Teor de Cálcio da Qualidade B

Nas duas qualidades o teor de cálcio inicial é residual, na qualidade A o valor está bem acima da média histórica porém dentro das especificações do aço, essa discrepância é consequência de algum fundente adicionado no vazamento com teor de cálcio acima do indicado pelo fornecedor. Após o vazamento, já se nota a diminuição do valor de cálcio, retornando aos parâmetros normais. Já a qualidade B, desde o início segue um comportamento habitual, tendo um pequeno acréscimo na última etapa do processo, no desgaseificador à vácuo por conta da adição da liga CaSi com a finalidade de modificar a composição das inclusões geradas pela desoxidação do alumínio.

4.2 Análise da Microscopia Eletrônica de Varredura

A caracterização de inclusões neste presente trabalho é formada pelas análises de composição química das mesmas, assim como a sua distribuição de tamanho ao longo das amostras.

4.2.1 Inclusões na Fase A1

Como descrito no capítulo de materiais e métodos, no microscópio eletrônico de varredura foi realizada uma busca completa, em uma área de aproximadamente 100 mm², de todas as inclusões presentes na amostra ilustrada na Figura 14. Na amostra A1 da qualidade A foram encontradas 2693 inclusões, a Tabela 3 mostra a média ponderada de composição química das mesmas.

Tabela 3 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo A na Amostra A1

Elemento	Média Ponderada (%)
Al	72,9
S	15,6
Ca	3,4
Si	1,6
Mn	1,4
Mg	1,4

Ti	1,2
----	-----

Na análise da mesma amostra foi constatado que 80,1% das inclusões presentes estão no estado sólido e os outros 19,9% no estado líquido. Esse comportamento é consequência da grande presença de alumínio, nesse tipo tem-se duas fontes no FEA: como fundente e oriundo da impureza presente na sucata utilizada. A Tabela 1 Tabela 4 mostra a distribuição dos tamanhos das inclusões presentes ao longo da área da amostra estudada, com base na análise realizada não foram encontradas macroinclusões.

Tabela 4 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo A na amostra A1

Tamanho, μm	N° de inclusões	Porcentagem, %
0,50 - 2,50	2257	83,8%
2,50 - 5,00	310	11,5%
5,00 - 15,00	103	3,8%
> 15,00	22	0,8%

No tipo B, a varredura apresentou 1951 inclusões, sendo dessas 69,5% no estado sólido, uma parcela menor se comparada a outra qualidade estudada, sendo consequência do processo produtivo de cada uma delas. A Tabela 5 apresenta a média ponderada da composição química das inclusões encontradas na presente amostra.

Tabela 5 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo B na Amostra A1

Elemento	Média Ponderada (%)
Al	61,0
S	22,6
Si	4,7
Ca	3,1
Mn	3,1
Ti	2,5
Mg	1,1

Pode-se notar que o seguinte aço apresenta teor de S e Si maiores se comparados com os do tipo B, uma das possíveis causas é a sucata utilizada no processo do FEA, tendo qualidade inferior do que a da outra qualidade. Também, apresenta teor de Al menor por que o alumínio presente é só oriundo das impurezas da sucata, diferentemente do tipo A que tem duas fontes do elemento. A Tabela 6 mostra a distribuição dos tamanhos das inclusões encontradas ao longo da amostra.

Tabela 6 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo B na amostra A1

Tamanho, μm	N° de inclusões	Porcentagem, %
0,50 - 2,50	1279	65,6%
2,50 - 5,00	487	25,0%
5,00 - 15,00	164	8,4%
> 15,00	20	1,0%

Nota-se que no aço B apresenta inclusões maiores que as analisadas na qualidade B, sendo consequência também, da sucata utilizada no processo.

4.2.2 Inclusões na Fase A2

Na amostra retirada após o processo no forno panela foram encontradas 526 inclusões no aço A, número consideravelmente menor que o apresentado na Fase A1, isso se deve ao trabalho de refino realizado no forno panela com a adição de elementos de liga e a homogeneização do banho. A Tabela 7 mostra a média ponderada da composição química presente nas inclusões dessa amostra.

Tabela 7 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo A na Amostra A2

Elemento	Média Ponderada (%)
Al	38,1
Ca	17,8
Si	15,5
Mg	11,1
Mn	8,6
S	4,5

Ti	2,1
----	-----

Na análise realizada na presente amostra foi constatado que 84,3% das inclusões encontradas estão no estado líquido e os outros 15,7% no estado sólido. Essa mudança de comportamento é consequência da mudança que ocorre na etapa do processo, na fase da amostra A1 tem muito material sólido oriundo da fusão da sucata já no processo do forno panela é utilizado os ferros ligas para ajuste de composição química, porém os mesmos fundem-se com maior facilidade no aço líquido. A Tabela 1 Tabela 8 mostra a distribuição dos tamanhos das inclusões presentes ao longo da área da amostra estudada, com base na análise realizada não foram encontradas macroinclusões.

Tabela 8 - Tamanho das Inclusões presentes do Tipo A na amostra A2

Tamanho, μm	N° de inclusões	Porcentagem, %
0,50 - 2,50	371	70,6%
2,50 - 5,00	98	18,7%
5,00 - 15,00	46	8,8%
> 15,00	10	1,9%

No aço B, após o processo do forno panela foram detectadas apenas 128 inclusões. Essa diminuição significativa entre o processo do FEA e o processo inicial de refino secundário, se deve ao fato do aço presente utilizar um método de produção que permite maior captação das inclusões pela escória no forno elétrico a arco. A Tabela 9 mostra a média ponderada da composição química das inclusões presentes nessa etapa do processo.

Tabela 9 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo B na Amostra A2

Elemento	Média Ponderada (%)
Si	29,2
Al	19,9
Mn	19,7
Ca	11,1
Mn	8,6
S	4,5

Ti	2,1
----	-----

Através da análise realizada foi constatado que 96,4% das inclusões encontradas estão no estado líquido e os 3,6% estão no estado sólido, mesma mudança de comportamento apresentada no tipo A. A Tabela 10 mostra a distribuição dos tamanhos das inclusões ao longo da amostra.

Tabela 10 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo B na amostra A2

Tamanho, μm	N° de inclusões	Porcentagem, %
0,50 - 2,50	82	64,1%
2,50 - 5,00	33	25,8%
5,00 - 15,00	11	8,6%
> 15,00	2	1,5%

4.2.3 Inclusões na Fase A3

No resultado das análises realizadas na amostra do aço A após o degaseificador à vácuo, foram encontradas 519 inclusões. A Tabela 11 mostra a média ponderada da composição química das inclusões encontradas.

Tabela 11 - Média Ponderada da Composição Química da Tipo A na Amostra A3

Elemento	Média Ponderada (%)
Al	41,9
Ca	21,0
S	15,6
Mg	8,6
Mn	6,7
Si	2,8
Ti	1,9

A análise realizada apresentou 58,3% das inclusões presentes estão no estado líquido e 41,7% no estado sólido. A Tabela 12 mostra a distribuição dos tamanhos das inclusões encontradas na amostra.

Tabela 12 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo A na amostra A3

Tamanho, μm	N° de inclusões	Porcentagem, %
0,50 - 2,50	268	51,6%
2,50 - 5,00	165	31,8%
5,00 - 15,00	74	14,2%
> 15,00	12	2,4%

Na análise do aço B foram encontradas 562 inclusões, nota-se um aumento significativo na quantidade dos defeitos se comparada com a amostra A2 do mesmo tipo. Isso ocorre pois nessa qualidade é feita a adição de alumínio e cálcio somente após o vácuo para alterar a morfologia e flotar com mais facilidade para a escória. A Tabela 13 mostra a média ponderada da composição química dessas inclusões.

Tabela 13 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo B na Amostra A3

Elemento	Média Ponderada (%)
Al	41,6
Ca	29,0
S	14,5
Mg	6,0
Mn	4,0
Si	3,0
Ti	0,8

Nessa etapa, 73,9% das inclusões estão no estado sólido e 26,1% no estado líquido. A Tabela 14 mostra a distribuição dos tamanhos dos defeitos.

Tabela 14 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo B na amostra A3

Tamanho, μm	N° de inclusões	Porcentagem, %
0,50 - 2,50	338	60,1%
2,50 - 5,00	182	32,4%
5,00 - 15,00	27	4,8%
> 15,00	15	2,7%

4.2.4 Inclusões na Fase A4

No resultado das análises do aço A foram encontradas 463 inclusões na etapa final do processo, tendo uma pequena diminuição do número apresentado na fase anterior do processo. A Tabela 15 mostra a média ponderada da composição química das inclusões encontradas na varredura.

Tabela 15 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo A na Amostra A4

Elemento	Média Ponderada (%)
Al	36,9
Ca	24,9
S	18,4
Mg	8,5
Mn	5,7
Si	3,7
Ti	0,6

Nessa etapa, 61% das inclusões encontradas estão no estado sólido e 39% no estado líquido por que a temperatura na presente etapa do processo já começa a diminuir, sendo propícia para a solidificação tanto do aço quanto das inclusões. A Tabela 16 mostra a distribuição dos tamanhos dos defeitos encontrados.

Tabela 16 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo A na amostra A4

Tamanho, μm	N° de inclusões	Porcentagem, %
0,50 - 2,50	338	60,1%
2,50 - 5,00	182	32,4%
5,00 - 15,00	27	4,8%
> 15,00	15	2,7%

No aço B, a varredura apresentou 561 inclusões nessa etapa do processo, permanecendo constante a quantidade do processo anterior. A Tabela 17 mostra a média ponderada das presentes inclusões.

Tabela 17 - Média Ponderada da Composição Química do Tipo B na Amostra A4

Elemento	Média Ponderada (%)
-----------------	----------------------------

Al	36,9
Ca	24,9
S	18,4
Mg	8,5
Mn	5,7
Si	3,7
Ti	0,6

Mantendo o mesmo comportamento que o tipo A, na análise realizada na qualidade B 82,1% das inclusões estão no estado sólido e 17,1% estão no estado líquido. A Tabela 18 apresenta a distribuição dos tamanhos das inclusões encontradas na amostra estudada.

Tabela 18 - Tamanho das Inclusões presentes no Tipo B na amostra A4

Tamanho, μm	N° de inclusões	Porcentagem, %
0,50 - 2,50	279	49,7%
2,50 - 5,00	238	42,4%
5,00 - 15,00	41	7,3%
> 15,00	3	0,6%

4.3 Análise de Metalografia

Nas análises metalográficas foram analisadas as inclusões encontradas num aumento de 100x em toda a superfície da amostra. Essa caracterização foi feita através da busca de inclusões presentes na superfície da amostra e com o auxílio do software IMAGEJ foi possível medir o tamanho dos defeitos encontrados.

A Figura 19 mostra uma das inclusões encontradas na amostra A1 do aço A.

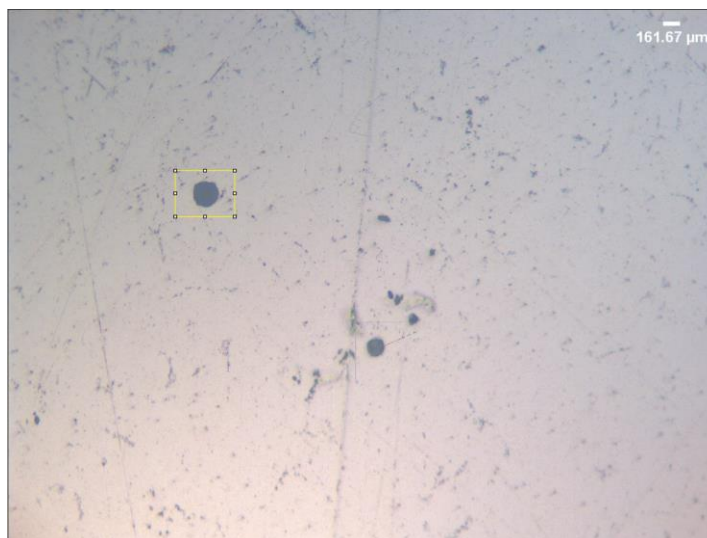


Figura 19 - Inclusão encontrada na amostra A1 no aço A

A Figura 20 mostra uma das inclusões encontradas na amostra A2 do aço A.

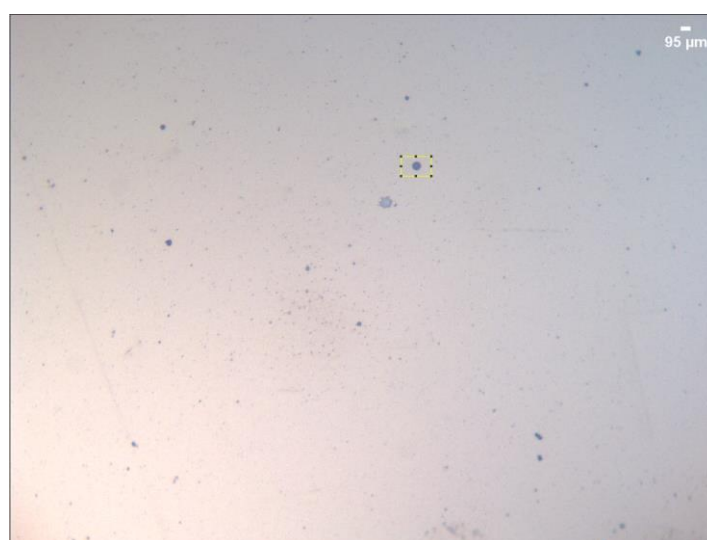


Figura 20 - Inclusão encontrada na amostra A2 no aço A

A Figura 21 mostra uma das inclusões encontradas na amostra A3 do aço A.

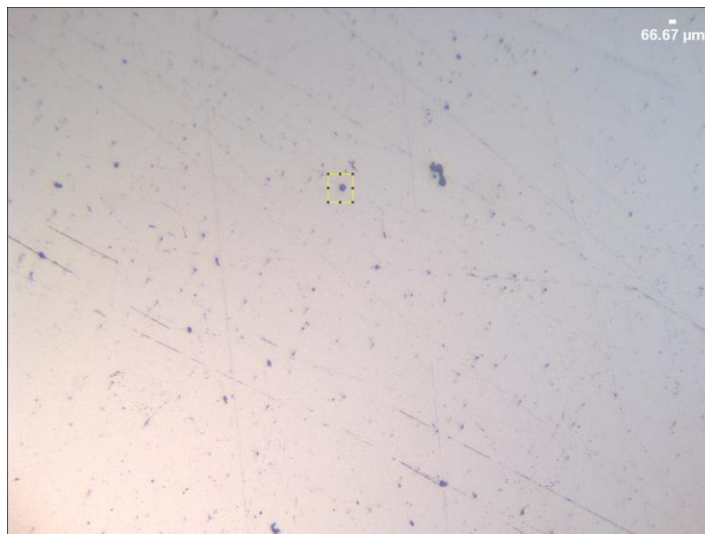


Figura 21 - Inclusão encontrada na amostra A3 no aço A

A Figura 22 mostra uma das inclusões encontradas na amostra A4 do aço A.

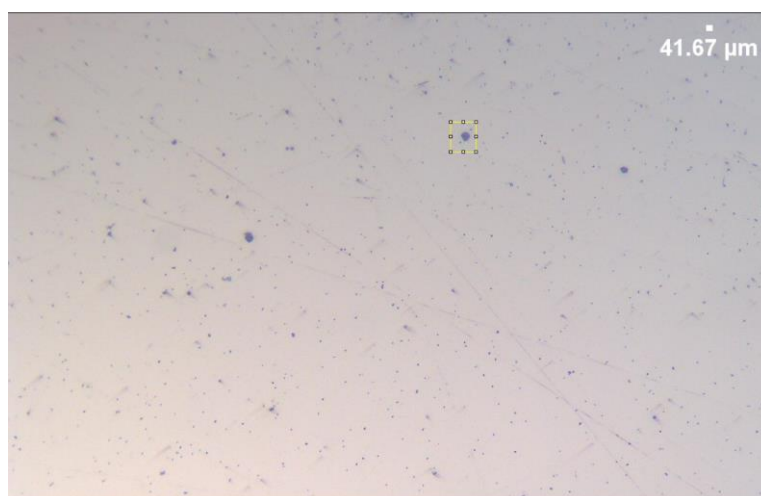


Figura 22 - Inclusão encontrada na amostra A4 no aço A

A Figura 23 mostra uma das inclusões encontradas na amostra A1 do aço B.

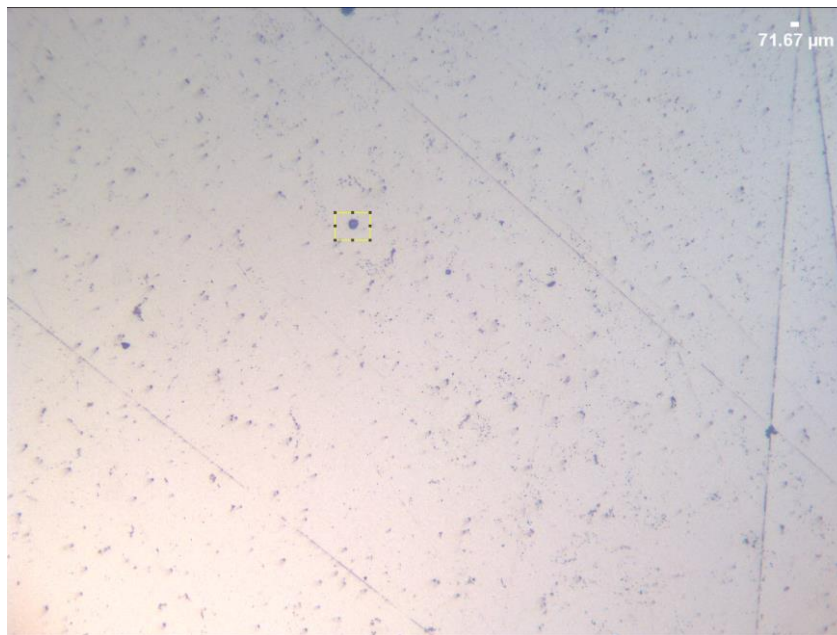


Figura 23 - Inclusão encontrada na amostra A1 no Aço B

A Figura 24 mostra uma das inclusões encontradas na amostra A2 do aço B.

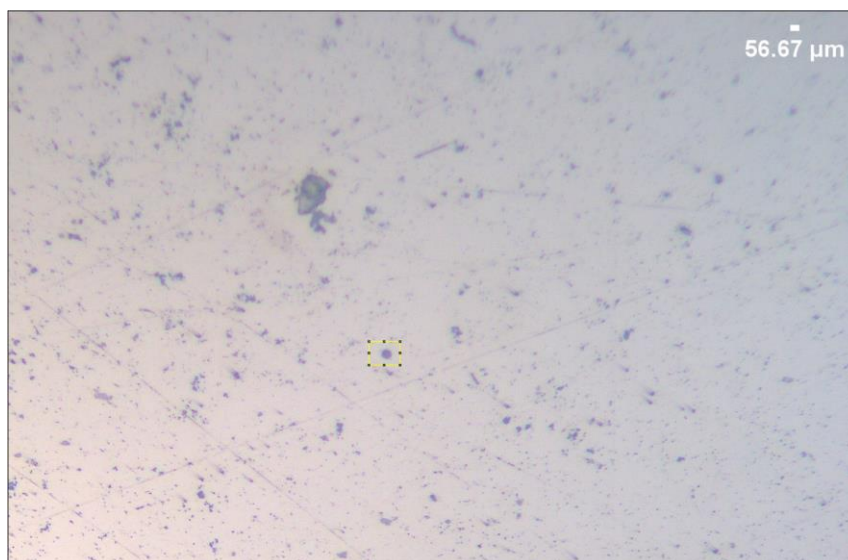


Figura 24 - Inclusão encontrada na amostra A2 no aço B

A Figura 25 mostra uma das inclusões encontradas na amostra A3 do aço B.

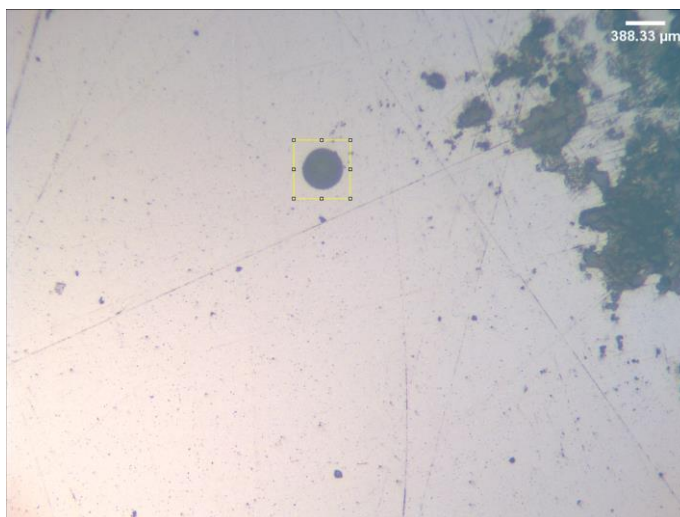


Figura 25 - Inclusão encontrada na amostra A3 no aço B

A Figura 26 mostra uma das inclusões encontradas na amostra A4 do aço B.

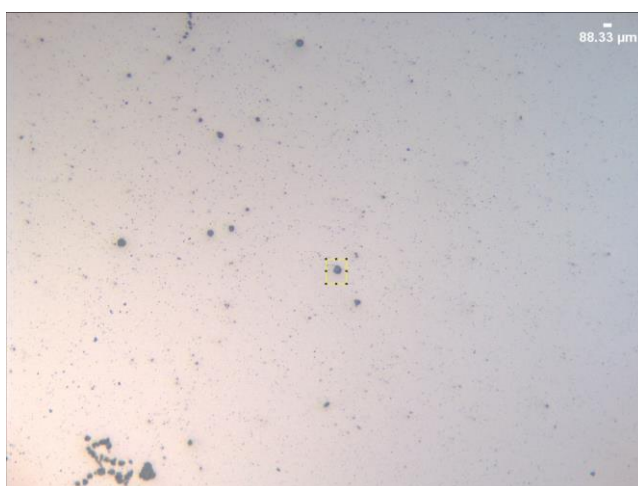


Figura 26 - Inclusão encontrada na amostra A4 no aço B

Através das imagens das análises metalográficas, pode-se concluir que as inclusões de ambos tipos possuíram o mesmo comportamento ao longo do processo, em questão de tamanho. Ao longo das etapas do processo, as inclusões foram diminuindo de tamanho e ficando mais próximas umas das outras, com exceção da macroinclusão encontrada na amostra A3 do tipo B. Esse comportamento corresponde ao processo produtivo do aço.

5 CONCLUSÃO

Por meio do presente trabalho realizado é possível concluir que as inclusões se comportam de acordo com o processo produtivo do aço e de acordo com as características da qualidade que está sendo produzida.

O aço A que possui uma faixa de composição química mais ampla e um método de produção menos específico, apresentou resultados característicos da mesma. No MEV foi possível observar o decaimento do número de inclusões ao longo das etapas do processo. Também foi possível analisar a composição química, com os teores de alumínio e cálcio com comportamento compatível para as características da qualidade produzida.

O aço B possui uma faixa mais específica de composição química e um método de produção mais robusto, possuindo escória diferente. Esse comportamento foi possível de ser observado através da análise de MEV das inclusões nas amostras retiradas durante todo o processo produtivo.

A análise metalográfica apresentou resultados assertivos a respeito do comportamento do tamanho das inclusões ao longo das etapas de produção do aço. No começo do processo, nas amostras A1, é comum obter-se inclusões maiores e mais dispersas na superfície da amostra. Já nas amostras A2 e A3 é esperado que as inclusões sejam menores e mais próximas umas das outras por conta da rinsagem realizada com gás inerte durante todo o processo de metalurgia secundária, causando a quebra das inclusões maiores e possibilitando a formação das menores. As amostras A4 possuem comportamento semelhante às amostras A2 e A3 porém em menor quantidade.

REFERÊNCIAS

- (1) COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderurgicos comuns. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 652 p.
- (2) CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2018. 882 p.
- (3) RIBEIRO, D.; SAMPAIO, R. Introdução. Q: Reciclagem de Aço, Curso PRO, 1996. Refinação secundária de aços, p. 2-9, São Paulo: PRO, 1996.
- (4) SILVA, A. C.; MEI P. R; Aços e Ligas Especiais. 2. ed. Edgard Blücher, 2006
- (5) ARAÚJO, L.A., Manual de Siderurgia. Vol.1, 2ª edição, São Paulo, 2005.
- (6) RIZZO, E. M. S. Introdução aos processos siderúrgicos. ABM, São Paulo, 2006
- (7) MOURÃO M.B., ET AL.; Introdução à siderurgia. ABM, São Paulo, 2011
- (8) RIBEIRO, D.; QUINTAN, H.; CRUZ, C. Pan. Q: Reciclagem de Aço, Curso PRO, 1996. Refino secundário de aço, pp. 128-249, São Paulo: ABM, 1996.
- (9) SMS Demag INNSE S.p.A. - Aço: Nossos produtos. Disponível em <http://www.innse.com/steel/ne_produ.htm>. Acesso: 22 de março de 2022.
- (10) KOR, G.; GLAWS, P. Refino de panela e degaseamento de vácuo. In: FRUEHAN R. Produção, modelagem e processamento de aço. Produção de aço e refino volumosa. 11ª edição. Pittsburgh, Pensilvânia, EUA: AISE Steel Foundation, 1998. 661-713.
- (11) SZÉKELY, J.; KARLSSON, G.; Helle, L. Metalurgia cubo. Nova Iorque, EUA: Springer-Verlag. 166 s.
- (12) SJÖKVIST, T.; JONSSON,. Efeito dos aditivos de ferrocromônio nas inclusões em aços. P: Procedimentos de conferência de forno elétrico. 2001. p. 61-70.
- (13) THOMAS, B. Elenco contínuo. P: Enciclopédia de Materiais: Ciência e Tecnologia, Vol. I. 2. Oxford, Reino Unido: Elsevier Science Ltd, 2001. Com. 1595-1599
- (14) GSH A. Aço secundário: princípios e áreas de aplicação Boca Raton, Flórida, EUA: CRC Press LCC, 2001. 322 s.
- (15) MILLMAN ET AL. Clean Steel – Basic Features and Operation Practices. ISIJ Study on clean steel, p. 39-58, 2004

- (16) PICKERING, F B.. Effect of Composition and Microstructure on Ductility and Toughness. Toward Improved Ductility Toughness, Climax Molybdenum Development Co. (Japan) Ltd. p. 9-31, 1972.
- (17) CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo, ABM, 6ªed, 1988
- (18) DEKKERS, R. Non-metallic Inclusions in Liquid Steel. Alemanha, 2002, Tese de Doutorado, Departamento de Geografia e Geologia, Universidade Católica de Louven
- (19) REIS B.H.; ET AL.; Investigation of the ability of secondary refining slags to absorb inclusions during steel production. 19th IAS Steel Conference, Rosário, 2013.
- (20) GHOSH, A. Secondary Steelmaking: Principles and Applications. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LCC, 2001. 322 p.
- (21) ZHANG, L.; THOMAS, B.G., State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness. ISIJ International, 2003.
- (22) GERDAU; AC-554 Aço Limpo I; Escola Técnica – Aciaria, 2016.
- (23) GERDAU; AC-554 Aço Limpo II; Escola Técnica – Aciaria, 2016.
- (24) RASTOGI, R.; KRAMB, A. Formação de inclusão e aglomeração em aços mortos em alumínio. In: Proceedings of the Steel Conference, Volume 84, Warrendale, Pensilvânia, EUA, 2001. Com. 789 a 829.
- (25) GERDAU; Gerdau Aços Especiais – Aços Especiais Para Construção Mecânica. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/2020-10/Tabela_Composicao_Quimica.pdf>. Acesso: 02 de junho de 2022.
- (26) BIELEFELDT, W. V. Estudo do Tratamento de Inclusões com Cálcio na Fabricação do Aço SAE 8620. Porto Alegre, 2005, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Departamento de Metalurgia, UFRGS.