

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

AVALIAÇÃO DA LIMPEZA INCLUSIONÁRIA DO AÇO DIN 38B3 AO ALTERAR
A SEÇÃO DO MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO

Victor Osiris do Valle

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto Alegre
2023

CIP - Catalogação na Publicação

do Valle, Victor Osiris
AVALIAÇÃO DA LIMPEZA INCLUSIONÁRIA DO AÇO DIN 38B3
AO ALTERAR A SEÇÃO DO MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO /
Victor Osiris do Valle. -- 2023.
62 f.
Orientador: Wagner Viana Bielefeldt.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Clean Steel. 2. Seção de Molde de LC. 3.
Inclusões Não-Metálicas. 4. Lingotamento Contínuo. I.
Viana Bielefeldt, Wagner, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dedico este trabalho ao meu avô
Álvaro Ramos, um avô, um pai e um
melhor amigo.

AGRADECIMENTOS

É difícil lembrar de todas as pessoas que me ajudaram a chegar até aqui, o caminho foi longo, e foram muitas que de alguma maneira fizeram parte do sucesso desta importante etapa realizada na minha vida. Então, à todas estas pessoas que não terão o nome aqui citado, fica o meu mais sincero agradecimento, obrigado.

As pessoas que serão citadas aqui abaixo, tiveram importância fundamental para que eu conseguisse alcançar este objetivo, sem elas eu não teria chegado tão longe:

Primeiramente, agradeço ao meu avô Álvaro Ramos e às minhas mães Gisa Ramos e Vera Lúcia Bastos por garantirem todo o suporte e apoio dados a mim durante esta jornada e todas outras, eu amo muito vocês, de coração, muito obrigado!

Agradeço ao professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt pela orientação, pelo empenho e toda dedicação a mim prestados, sem o teu auxílio seria muito mais difícil.

Agradeço a todos os meus colegas de trabalho do EPP, pela compreensão em tempos difíceis e todo amparo quando eu mais precisei, em especial: à Bianca Freitas pela parceria de sempre; à minha coordenadora Giovana Ghiraldelli e à minha gerente Renata Becker por acreditarem em mim; ao Gustavo Schmidt pela ajuda com os dados; e ao Otavio dos Reis pela mentoria, extrema dedicação ao meu aprendizado e pela coorientação ao longo de todo o trabalho, muito obrigado turma!

Agradeço ao Gustavo Mendes, colega de trabalho de outra área, por todos os ensinamentos, sugestões e auxílio dados a mim durante a elaboração do trabalho.

Agradeço aos meus colegas de trabalho e gerentes técnicos do TAE: Felipe Hexsel e Marino Moscardini por toda disposição e paciência em me ajudar nos diversos momentos de aprendizado.

Agradeço a todos os meus colegas do laboratório metalúrgico da usina siderúrgica em que foi feito o trabalho por todas as análises feitas neste estudo, em especial ao coordenador Jader de Brito e ao analista Natan da Silva Santos, pelos ensinamentos, orientação e auxílio quando eu precisei.

Agradecimento em especial ao Eng. M.Sc. André Rosiak por todos os ensinamentos dentro e fora do meio acadêmico.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos do peito pelos momentos de descontração, foram extremamente necessários, sem vocês seria impossível!

RESUMO

A exigência do mercado por aços de maior qualidade fez com que as siderúrgicas criassem o conceito de *clean steel*, com o objetivo de produzir aços que garantem um desempenho superior em frente à rigorosas especificações, principalmente de aços especiais destinados ao setor automotivo. As inclusões não-metálicas são inerentes ao processo de produção do aço, dependendo de sua composição, morfologia, tamanho e distribuição quase sempre possuem um efeito nocivo nas propriedades do aço, afetando tanto durante o processo de fabricação quanto no desempenho das peças finais. Alguns elementos são adicionados ao aço líquido afim de obter melhores propriedades, tais como usinabilidade e microestrutura homogênea. Porém, estes mesmos elementos em reações termodinâmicas podem formar inclusões sólidas que incorporadas ao aço prejudicam a lingotabilidade, podendo ocorrer o fenômeno *clogging*. Aços acalmados ao alumínio têm a tendência de formar inclusões sólidas de alumina, por este motivo estes aços são tratados com adição de cálcio para alterar a morfologia da inclusão, facilitando a absorção destas inclusões pela escória e não afetando a lingotabilidade. Neste trabalho foi realizado a avaliação da limpeza inclusionária do aço DIN 38B3 ao alterar a seção do molde de lingotamento contínuo. Foram avaliadas 100 corridas em um molde de seção 155x155 mm e 100 corridas em um molde de seção 240x240 mm. Os métodos utilizados foram a análise amostral de ensaios de microinclusão de cada uma das corridas e o percentual de rejeição em linha de inspeção automática por ultrassom de 100% das barras laminadas produzidas a partir das corridas avaliadas. A partir dos resultados observados neste estudo pode-se concluir que, ao aumentar a seção de molde de lingotamento contínuo para o aço DIN 38B3 resultou na diminuição das ocorrências de inclusões grosseiras; diminuição das médias dos resultados amostrais de cada corrida tanto para as inclusões do Tipo B (alumina) série grossa e Tipo DS (globular único) e a diminuição do percentual de rejeição em linha de inspeção por ultrassom.

Palavras-chave: Aços limpos. Inclusões não-metálicas. Seção de molde de LC.

ABSTRACT

The market requirement for higher quality steels has led steelmakers to create the concept of clean steel, aiming to produce steels that guarantee superior performance in front of rigorous specifications, mainly special steels for the automotive industry. Non-metallic inclusions are inherent to the steel production process, and depending on their composition, morphology, size, and distribution, they usually have a harmful effect on the steel's properties, affecting both the manufacturing process and the performance of the finished product. Some elements are added to the liquid steel in order to obtain better properties, such as machinability and homogeneous microstructure, but these same elements in thermodynamic reactions can form solid inclusions that incorporated to the steel harm the castability, and the clogging phenomenon can occur. Aluminum calmed steels have the tendency to form solid inclusions of alumina, for this reason these steels are treated with calcium addition to change the inclusion morphology, facilitating the absorption of these inclusions by the slag and not affecting the castability. In this work, the inclusion cleanliness of DIN 38B3 steel was evaluated by changing the section of the continuous casting mold. 100 heats in a 155x155 mm mold and 100 heats in a 240x240 mm mold were evaluated. The methods used were sample analysis of micro-inclusion tests of each of the heat and the percentage of rejection in an automatic ultrasonic inspection line of 100% of the rolled bars produced from the evaluated heats. From the results observed in this study it can be concluded that by increasing the section of the continuous casting mold for DIN 38B3 steel: decrease in the occurrences of coarse inclusions; decrease in the averages of the sample results of each heat for both Type B (alumina) coarse series inclusions and Type DS (single globular); decrease in the percentage of rejection in ultrasonic inspection line.

Keywords: *Clean steels*. Non-metallic inclusions. LC mold section.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇO.....	15
2.1.1 <i>Processo de produção de aço via aciaria elétrica</i>	16
2.1.2 <i>Forno elétrico a arco (FEA)</i>	17
2.1.3 <i>Forno-panela (FP)</i>	17
2.1.4 <i>Desgaseificador à vácuo (VD)</i>	18
2.1.5 <i>Lingotamento contínuo (LC)</i>	19
2.2 INCLUSÕES NÃO-METÁLICAS NO AÇO.....	21
2.2.1 <i>Origens das inclusões</i>	22
2.2.2 <i>Classificação das inclusões não-metálicas</i>	24
2.2.2.1 <i>Composição química das inclusões</i>	24
2.2.2.2 <i>Tamanho das inclusões</i>	25
2.2.2.3 <i>Morfologia e distribuição das inclusões</i>	26
2.2.3 <i>Desoxidação</i>	26
2.2.4 <i>Adição de cálcio para tratamento de inclusões</i>	27
2.3 MÉTODO DE ANÁLISE DE INCLUSÕES NÃO-METÁLICAS.....	29
2.3.1 <i>Micrografia por microscópio óptico</i>	30
2.3.2 <i>Método de inspeção em linha por ultrassom</i>	31
2.3.3 <i>Microscopia de varredura eletrônica (MEV); Oxigênio total; Pick up de nitrogênio</i>	34
2.4 LINGOTABILIDADE E PROCESSO.....	34
2.4.1 <i>Seção do molde em lingotamento contínuo de tarugos</i>	36
2.5 ASTM E45 (2018) E ISO 4967 (2013).....	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1 MATERIAL UTILIZADO.....	40
3.2 AÇÕES PRÉVIAS REALIZADAS NO PROCESSO PARA MELHORAR A LIMPEZA INCLUSIONÁRIA.....	41
3.3 GERENCIAMENTO EXPERIMENTAL.....	42
3.3.1 <i>Análises dos ensaios de microinclusão</i>	45
3.3.2 <i>Rejeição em linha devido à macroinclusões</i>	47

3.3.3	<i>Avaliação dos gráficos de lingotabilidade</i>	48
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	ENSAIOS DE MICROINCLUSÃO	51
4.1.1	<i>Inclusão Tipo B (alumina) série grossa</i>	51
4.1.2	<i>Inclusão do Tipo DS (globular único)</i>	54
4.2	REJEIÇÃO EM LINHA DEVIDO À MACROINCLUSÕES.....	57
5.	CONCLUSÕES	59
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
7.	REFERÊNCIAS	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema dos principais equipamentos do processo de produção de aço via aciaria elétrica. Fonte: adaptado de RIZZO, 2005.....	17
Figura 2 – Visão esquemática do LC e seus componentes. Fonte: adaptado de RIZZO, 2005.	19
Figura 3 – Fenômenos que podem ocorrer durante a operação de um distribuidor que afetam a limpeza inclusionária dos aços. Fonte: adaptado de ZHANG; THOMAS, 2003.	20
Figura 4 – Diminuição de ductilidade devido ao aumento de inclusões não-metálicas (sulfetos, óxidos e carbetos). Fonte: PICKERING, 1972.....	22
Figura 5 – Morfologias apresentadas na alumina no aço em função da variação de atividade de oxigênio e da concentração de alumínio. Fonte: adaptado de TIEKINK, 2010.	24
Figura 6 – Elementos desoxidantes em equilíbrio com aço líquido a 1600 °C. Fonte: MILLMAN, 2004.	26
Figura 7 – Diagrama de fases CaO - Al ₂ O ₃ . Fonte: BIELEFELDT, 2009.....	28
Figura 8 – Efeito do oxigênio total na janela líquida com (a) 100 ppm S e (b) 250 ppm S. Fonte: adaptado HOLAPPA, 2003.	29
Figura 9 – Seção transversal (à esquerda) e longitudinal (à direita) de uma barra de aço. Fonte: o autor.....	30
Figura 10 – Ilustração esquemática do (a) diagrama obtido pela inspeção por ultrassom portátil convencional de uma peça por transdutor simples. Fonte: adaptado TESTIA, 2009.	32
Figura 11 – Representação esquemática das válvulas do distribuidor e as regiões mais susceptíveis ao <i>clogging</i> . Fonte: BANNENBERG, 1995.	35
Figura 12 – Ilustração dos tipos e morfologias das inclusões. Fonte: adaptado de MANDAL, 2015.....	37
Figura 13 – Exemplo de uma inclusão Tipo B classificada quanto ao seu tamanho e morfologia. Fonte: adaptado de ISO 4967, 2013.	39
Figura 14 – Fluxograma apresentando as etapas realizadas durante este trabalho. Fonte: o autor.	44
Figura 15 – Exemplo de tarugos produzido a partir de (a) seção de molde 155 mm e (b) seção de molde 240 mm. Fonte: o autor.	45

Figura 16 – Imagens do (a) microscópio ótico Olympus BX60 em que foram feitas as análises de microinclusão e (b) as amostras prontas para serem analisadas. Fonte: o autor.	46
Figura 17 – Equipamento de ultrassom GE™ ROWA-B no qual foram inspecionadas as barras. (a) acoplado a linha de inspeção e (b) desacoplado a linha de inspeção. Fonte: o autor.	48
Figura 18 – Gráfico de uma das corridas analisadas no programa Aspen Process Explorer V8.0. Fonte: o autor.	49
Figura 19 – Resultados dos ensaios de microinclusão para inclusão Tipo B (alumina) série grossa com seção do molde 155x155 mm. Fonte: o autor.	52
Figura 20 – Resultados dos ensaios de microinclusão para inclusão Tipo B (alumina) série grossa com seção do molde 240x240 mm. Fonte: o autor.	53
Figura 21 – Resultados dos ensaios de microinclusão para inclusão Tipo DS (globular único) com seção do molde 155x155 mm. Fonte: o autor.	55
Figura 22 – Resultados dos ensaios de microinclusão para inclusão Tipo DS (globular único) com seção do molde 240x240 mm. Fonte: o autor.	56
Figura 23 – Gráfico com os resultados de rejeição em linha de inspeção por ultrassom para as diferentes seções de molde de LC (155x155 mm e 240x240 mm). Fonte: o autor.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química nominal em % mássica do aço DIN 38B3.....	40
Tabela 2 – Representação do diâmetro das barras laminadas e a seção do tarugo.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Al – Alumínio
Al₂O₃ – Alumina
ASTM - *American Society for Testing and Materials* (tradução do inglês, Sociedade Americana de Testes e Materiais)
C₁₂A₇ (12CaO.7Al₂O₃) – Cálcio aluminatos
Ca – Cálcio
CaC₂ – Carbetos de cálcio
CaO – Óxido de cálcio
CaS – Sulfeto de cálcio
CaSi – Carbetos de Silício de Cálcio
DIN – *Deutsches Institut für Normung* (tradução do alemão, Instituto Alemão de Normalização)
DS - Sulfeto de dióxido
FBH – *Flat Bottomed Hole* (tradução livre para Buraco de Fundo Plano)
FEA – Forno Elétrico a Arco
FeO – Wustita
FP – Forno-panela
FSH – *Full Screen Height* (tradução do inglês, altura total do ecrã)
ISO – *International Organization for Standardization* (tradução do inglês, Organização Internacional de Normalização)
LC – Lingotamento contínuo
MgO – Óxido de magnésio
MgO.Al₂O₃ – Espinélios
MnO – Óxido de manganês
MnS – Sulfeto de manganês
O – Oxigênio
PE – Programas de experiência
SDH – *Side Drilled Hole* (tradução do inglês, para Furo Lateral)
SiO₂ – Sílica
VD – Desgaseificador à vácuo
TOF – *Time of Flight* (tradução do inglês, tempo de voo)
TiN – Nitretos de titânio
xCaO-yAl₂O₃ – Cálcio-aluminatos

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por aços de maior qualidade fez com que as siderúrgicas desenvolvessem o conceito de *clean steel* (tradução livre para aços limpos), que devido suas melhores propriedades mecânicas e metalúrgicas, como resistência mecânica, ductibilidade e maior ciclo de vida útil, são produzidos para garantir desempenho superior quando impostos às severas condições de aplicação.

A limpeza dos aços está relacionada com a quantidade de impurezas presentes nos mesmos, estas impurezas que devido às reações termodinâmicas que ocorrem no processo podem tornar-se inclusões não-metálicas e serem incorporadas ao aço, prejudicando o desempenho e qualidade. Em busca de aços mais limpos tem-se estudado as origens destas inclusões não-metálicas e práticas para minimizar ou evitar a sua incorporação ao aço.

Alguns tipos de aços têm a necessidade de adição de enxofre para melhorar a usinabilidade e adição de alumínio para obtenção de uma microestrutura mais uniforme. O enxofre associado a teores de manganês forma inclusões (estas benéficas) de sulfetos de manganês que facilitam a quebra de cavaco durante a usinagem, já o alumínio ligado a teores adequados de nitrogênio é responsável por garantir um bom controle de crescimento de grão austenítico. Todavia, estes dois elementos também possuem uma parcela na formação de inclusões não-metálicas que podem obstruir a passagem de aço líquido pelas válvulas de lingotamento contínuo, sendo este fenômeno denominado *clogging*. Com a adição de alumínio podem ser formadas inclusões sólidas de alumina (Al_2O_3), estas devem ser transformadas, por meio da adição de cálcio, em inclusões líquidas complexas de cálcio-aluminatos ($x\text{CaO}-y\text{Al}_2\text{O}_3$), com o objetivo de através da flotação serem absorvidas pela escória. Durante este processo de refino, a adição de cálcio deve ser controlada para que não ocorra formação em excesso de sulfetos de cálcio (CaS), um dos responsáveis pela ocorrência de *clogging*.

Tendo em vista as faixas de especificação mais rigorosas e a demanda por aços *clean steels*, o objetivo deste trabalho foi avaliar a limpeza inclusionária do aço DIN 38B3 ao alterar a seção do molde de lingotamento contínuo. Comumente produzido na seção de molde 155x155 mm, este aço historicamente apresenta muitas ocorrências de inclusões grosseiras do Tipo B (alumina) e Tipo DS (globular único), e elevado percentual de rejeição em linha devido à macroinclusões. Sendo assim foram avaliadas 100 corridas alterando a seção de molde para 240x240 mm, o que equivale a cerca de 6 mil toneladas

de aço para serem comparadas a produção de também 100 corridas da condição de seção menor, ao todo foram aproximadamente 12 mil toneladas de aço envolvidos neste trabalho.

Ações prévias já haviam sido realizadas no processo com o intuito de melhorar a limpeza inclusionária do aço DIN 38B3 na produção em tarugos de seção de molde 155 mm. Porém estas ações não foram suficientes para garantir a limpeza necessária para atender as especificações impostas pelos clientes. Este aço é destinado principalmente ao setor automotivo para a produção de eixos e semi-eixos. Ações foram realizadas com foco em ajuste de escória e diminuição do teor inclusionário do aço.

Para avaliação da limpeza inclusionária destas corridas foram utilizados dois métodos em específico: análise de microinclusão por microscopia óptica de 18 amostras retiradas de cada corrida, totalizando 3600 amostras analisadas conforme a norma ASTM E45 (2018) e ISO 4967 (2013); e o percentual de rejeição em linha de inspeção por ultrassom de 100% das barras laminadas. Dessa maneira, foram elaborados relatórios contendo as análises e os resultados de cada corrida, para poder realizar a comparação das duas diferentes condições de processo apresentadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será descrito, inicialmente, como é realizado o processo de produção de aços especiais via aciaria elétrica, com o intuito de apresentar as etapas do processo em que são geradas e modificadas a maior parte das inclusões não-metálicas presentes nos aços. Em seguida, será discutido e aprofundado o assunto de inclusões não-metálicas. Logo após, serão apresentados os métodos de medição de limpeza inclusionária e para finalizar, uma breve descrição dos parâmetros de lingotabilidade e processo.

2.1 Processo de produção de aço

O processo siderúrgico pode ser dividido em três principais etapas: redução, refino e conformação mecânica. Desse modo, as usinas siderúrgicas são classificadas em usinas integradas, usinas semi-integradas e usinas não-integradas. A usina integrada é definida por ter à disposição as três etapas do processo siderúrgico. Sendo a obtenção de aço feita a partir do minério de ferro, este no qual é transformado em ferro-gusa em altos-fornos e, subsequente convertido em aço na aciaria. Para então, finalmente ser transformado em produtos forjados, laminados ou trefilados. Já uma usina semi-integrada é aquela que só dispõe duas etapas do processo siderúrgico, podendo ser redução e refino, ou refino e conformação mecânica. As aciarias elétricas são as usinas semi-integradas predominantes no Brasil, produzem o aço a partir de ferro secundário (fonte de ferro proveniente de sucata metálica), que é novamente convertido a aço em um forno elétrico a arco (FEA). E para completar, as usinas não-integradas são as que tem na sua operação somente uma etapa do processo, por exemplo redução ou conformação (MOURÃO, 2007; MOURÃO, 2013).

Na etapa de redução se tem como objetivo, como o próprio nome diz, a redução do minério de ferro e a eliminação de elementos que estão presentes no minério, tais como silício, manganês e fósforo. Nesta etapa, o ferro é obtido a partir do seu óxido e quando combinado com um alto teor de carbono, na faixa de 3,5% a 5,0% em massa, é denominado de ferro-gusa. E a energia necessária para obtenção do ferro é fornecida pelo carvão mineral, geralmente transformado em coque, ou pelo carvão vegetal.

Na etapa de refino, o ferro-gusa obtido anteriormente é transportado via carro-torpedo, ainda em estado líquido, para a aciaria à oxigênio, onde será transformado em

aço por meio da redução do teor de carbono e de outros elementos químicos que agem como impurezas. Uma rota alternativa à utilização de ferro-gusa líquido é a utilização de ferro-gusa sólido e/ou refusão de sucata metálica nas aciarias elétricas. Na etapa de refino o objetivo é a adição de elementos químicos que serão responsáveis por atribuir ao aço as propriedades desejadas. Logo após, o aço é solidificado em formas pré-determinadas de produtos semi-acabados, sendo o processo de lingotamento contínuo o mais difundido nos dias de hoje, apesar de ainda existirem outros processos de solidificação, como por exemplo, o lingotamento convencional.

Para finalizar, na etapa de conformação mecânica os produtos semi-acabados obtidos por lingotamento contínuo (placas, blocos, pré-formas e tarugos) são convertidos em produtos siderúrgicos acabados, tais como: barras, perfis, chapas finas e grossas, bobinas, vergalhões, entre outros (RIZZO, 2005; MOURÃO 2007).

2.1.1 Processo de produção de aço via aciaria elétrica

As aciarias elétricas têm como principal fonte de energia a eletricidade formada por um arco elétrico, que a partir do calor gerado é capaz de fundir a carga metálica e refinar o aço. Sendo a principal fonte de matéria-prima a sucata metálica, o que contribui para a redução da exploração de minério de ferro e carvão mineral, e conseqüentemente reciclagem da própria sucata.

Os principais equipamentos empregados no processo de produção de aço via aciaria elétrica são: o forno elétrico a arco (FEA), responsável pela fusão da carga metálica e refino primário do aço; o forno-panela (FP), tem como objetivo ajustar composição química e temperatura; o desgaseificador à vácuo (VD), responsável pela remoção de gases e limpeza do aço; e o lingotamento contínuo (LC), equipamento onde se inicia a solidificação do aço (RIZZO, 2005; MOURÃO, 2007). A figura 1 apresenta os equipamentos descritos.

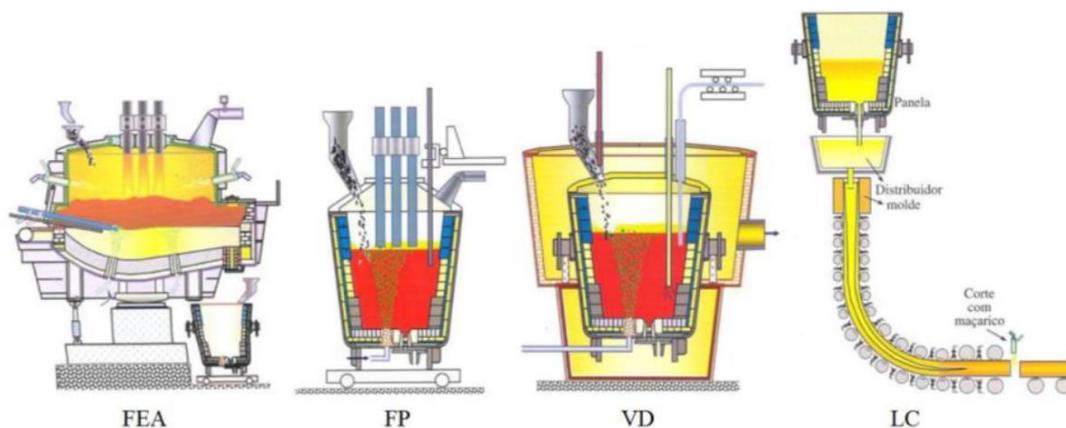


Figura 1 – Esquema dos principais equipamentos do processo de produção de aço via aciaria elétrica. Fonte: adaptado de RIZZO, 2005.

2.1.2 Forno elétrico a arco (FEA)

O forno elétrico a arco é o equipamento responsável pela obtenção e refino primário de aço a partir da fusão de sucata metálica a elevadas temperaturas. É nesta etapa que se inicia o refino de aço, também denominado de refino primário ou refino oxidante. Sendo os principais componentes do forno elétrico a arco: o transformador, a carcaça metálica revestida por material refratário, a abóboda e os eletrodos de grafita, estes que são responsáveis pela formação do arco elétrico.

Os principais objetivos do forno elétrico a arco são: a fusão da carga metálica, a descarbonização, a elevação da temperatura do banho de aço líquido e a desfosforação.

O processo inicia-se com o carregamento das matérias-primas sólidas – sucata metálica, carburantes e fundentes – logo após, tem-se o início da etapa de fusão por meio da energia elétrica fornecida pelo arco elétrico na forma de calor e energia química das reações químicas entre os compostos envolvidos. Ocorrida a fusão e obtenção do aço líquido, o processo de refino primário é iniciado com a injeção de oxigênio para formação de condições oxidantes, possibilitando assim as reações de descarbonização e desfosforação. Ao final do processo tem-se a remoção de escória e o aço líquido é vazado para a panela siderúrgica que será destinada para o processamento no forno-panela (RIZZO, 2005; MOURÃO, 2007; LIBÓRIO, 2009).

2.1.3 Forno-panela (FP)

O forno-panela é o equipamento onde tem-se a etapa de metalurgia secundária ou refino secundário do aço. O forno-panela é composto pela abóboda refrigerada, três

eletrodos de grafita e a própria panela siderúrgica que serve de base para o forno. Os principais objetivos desta etapa do processo são o ajuste da composição química do aço e ajuste de temperatura, homogeneização do banho líquido pela injeção de gás inerte ou então por um sistema eletromagnético, desoxidação, dessulfuração e desgaseificação. O controle de inclusões também é uma parte importante na operação do forno panela, devido a desoxidação ser uma das principais etapas para a remoção de inclusões não-metálicas e conseqüentemente limpeza dos aços. Este tema será visto em detalhes nas seções seguintes (RIZZO, 2005; LIBÓRIO, 2009).

Finalizada a operação no forno-panela, a panela siderúrgica com aço líquido é encaminhada ao desgaseificador à vácuo.

2.1.4 Desgaseificador à vácuo (VD)

O processo VD (*Vacuum Degassing*) é a etapa na qual a panela siderúrgica contendo aço líquido é inserida em um tanque hermeticamente fechado, assim iniciando-se o processo de desgaseificação pelo acionamento do sistema de vácuo. O principal objetivo do VD é a redução dos teores de gases dissolvidos no aço, principalmente hidrogênio e nitrogênio, que são prejudiciais às propriedades mecânicas do produto final. Devido a diferença de pressão, os gases dissolvidos no aço líquido são transportados até a superfície da panela siderúrgica e removidos do banho. Também tem como objetivo um ajuste fino de composição química pela adição de ligas metálicas na forma de fios e arames. Ao longo da operação de desgaseificação ocorre a injeção de gases inertes pelo fundo da panela siderúrgica a fim de promover a agitação do banho, tornando a remoção de gases homogênea e eficiente. Além da remoção de gases, a agitação do aço líquido auxilia na eliminação de inclusões não-metálicas através da flotação e pelo aumento da interação destas partículas com a escória (RIZZO, 2006; MOURÃO, 2007; SILVA; MEI, 2006).

Finalizada a etapa de desgaseificação no VD, a panela siderúrgica é encaminhada para a torre de lingotamento contínuo para dar continuidade ao processo, dando início a etapa de solidificação.

2.1.5 Lingotamento contínuo (LC)

O lingotamento contínuo é a etapa do processo responsável pela solidificação do aço. Os principais componentes do LC são: a torre de panela, o tubo longo, o distribuidor, a válvula submersa, o molde, os *sprays* de água e os rolos de pé, como mostra a figura 2. Máquinas de LC de placas cotam com rolos extratores, para ajudar a suportar a maior pressão metalostática e maior massa de aço solidificando. A operação inicia-se com a transferência do aço líquido localizado na torre de panela para o distribuidor por meio do tubo longo e logo em seguida é transferido para o molde com auxílio da válvula submersa, esta que se encontra conectada a cada um dos veios. No molde, a solidificação é feita pelas paredes refrigeradas à água, formando uma espécie de “casca” solidificada inicial. Os rolos extratores são responsáveis pela remoção contínua das peças do molde na mesma taxa em que mais material é acrescentado, assim fazendo com que o processo seja ininterrupto, ou seja, um processo contínuo. Após, tem-se a finalização da formação da “casca” solidificada ao utilizar jatos d’água (*sprays*) que resfriam a superfície. Depois da completa solidificação do aço, a peça é cortada pelo processo de oxicorte ou com guilhotina (MOURÃO, 2007).

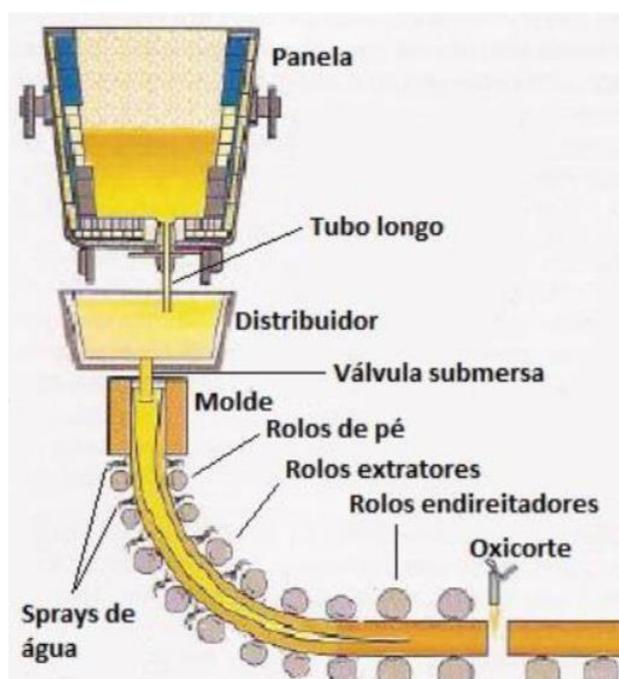


Figura 2 – Visão esquemática do LC e seus componentes. Fonte: adaptado de RIZZO, 2005.

O distribuidor, que inicialmente tinha a função de somente atuar como um reservatório, nos dias de hoje além de direcionar de maneira adequada o aço líquido para o molde, também é responsável por facilitar a remoção e flotação de inclusões não-metálicas do aço e prevenção de que novas inclusões de tamanhos maiores sejam formadas devido a reações de reoxidação, as quais são seriamente prejudiciais a qualidade do aço produzido (HOLAPPA, 2013; NAKANISHI, 1996). A figura 3, de maneira esquemática, apresenta o distribuidor e os fenômenos que podem ocorrer no decorrer da operação.

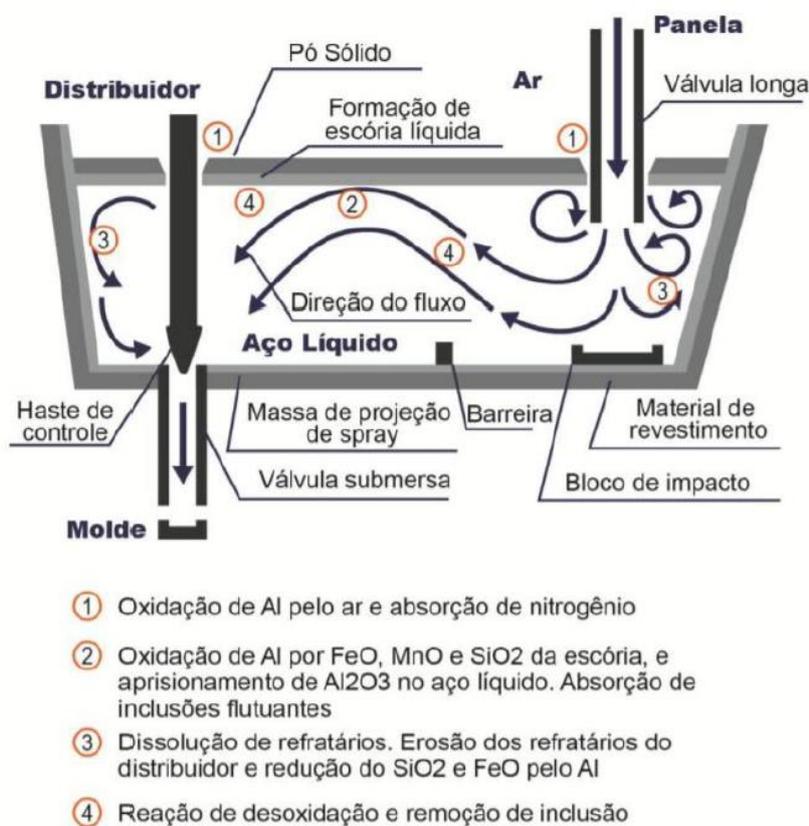


Figura 3 – Fenômenos que podem ocorrer durante a operação de um distribuidor que afetam a limpeza inclusionária dos aços. Fonte: adaptado de ZHANG; THOMAS, 2003.

O início e final do processo de lingotamento, assim como trocas de panelas siderúrgicas, são etapas muito críticas para o processo, pois geralmente nestes momentos que ocorrem o arraste de escória e reoxidação do aço líquido. Com o intuito de proteger o fluxo de aço líquido da panela para o distribuidor, utiliza-se o tubo longo, já a proteção de aço do distribuidor para o molde é feita pela válvula submersa, com o uso destes

componentes evita-se o contato com o ar atmosférico. Antes de o distribuidor receber o aço vindo da panela, a inertização do distribuidor é uma etapa essencial para prevenir reoxidação.

Os inibidores de turbulência e barreiras são utilizados no distribuidor a fim de eliminar respingos de início de sequência, reduzir a turbulência e propiciar a flotação de inclusões não-metálicas. Com o uso de inibidores, tem-se o aumento do tempo de residência do aço líquido dentro do distribuidor, o que possibilita a remoção de um número maior de inclusões (ZHANG; THOMAS, 2003).

O revestimento interno adequado do distribuidor também é de suma importância para uma melhor limpeza inclusionária dos aços, pois como está em contato com o aço líquido, deve ser química e fisicamente estável nas temperaturas de produção do aço. A composição química deste revestimento não pode conter elementos de fácil redução e que resultem na reoxidação do banho líquido ou de outros elementos químicos, os quais podem se dissolver no aço líquido e conseqüentemente formar inclusões não-metálicas (MILLMAN, 2004).

2.2 Inclusões não-metálicas no aço

As inclusões nos aços podem ser definidas como fases não-metálicas ou intermetálicas dispersas em uma matriz metálica (GHOSH, 2001). O controle de inclusões não-metálicas no aço está diretamente associado com o conceito de aços limpos, estes que são classificados como aços com um controle de composição química mais rígido, um baixo teor de elementos prejudiciais, tais como: oxigênio, fósforo, enxofre, nitrogênio e hidrogênio, da quantidade e/ou morfologia de inclusões não-metálicas presentes no aço após sua solidificação, sendo principalmente óxidos e sulfetos (RIZZO, 2006).

As inclusões não-metálicas podem surgir de várias fontes ao longo do processo e produção de aço, por exemplo o processo de refino (reações de desoxidação), suspensão de partículas insolúveis, fontes externas (erosão dos refratários), entre outros (ZHANG; THOMAS, 2003).

As inclusões, quanto a sua composição, morfologia, tipo, tamanho e distribuição, quase sempre possuem um efeito deletério nas propriedades do aço, afetando seu desempenho tanto nas operações de fabricação quanto no produto final. Propriedades mecânicas como resistência ao impacto, ductilidade, tenacidade são prejudicadas por

exemplo por óxidos e sulfetos (HOLAPPA; HELLE, 1995). A figura 4 apresenta a perda de ductilidade conforme o aumento de volume de inclusões.

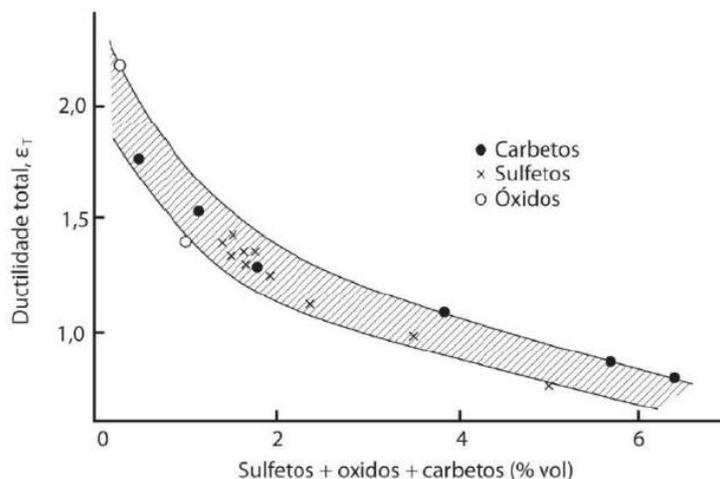


Figura 4 – Diminuição de ductilidade devido ao aumento de inclusões não-metálicas (sulfetos, óxidos e carbetos). Fonte: PICKERING, 1972.

Em aços acalmados ao alumínio são encontradas inclusões na ordem de 10^7 e 10^9 por kg de aço baixo carbono (ZHANG; THOMAS, 2003). Macroinclusões, que são consideradas grandes inclusões, situadas na faixa de 50 μm a 100 μm , são mais nocivas as propriedades mecânicas dos aços do que as pequenas inclusões. Estas macroinclusões podem ser evitadas por melhores e mais adequadas práticas de produção, juntamente com a eliminação das possíveis fontes de reoxidação do aço líquido. Já as pequenas inclusões, em alguns casos, podem não ser tão nocivas ao aço, podendo até melhorar certas propriedades, por exemplo, atuando como sítio de precipitação de outras fases ou no controle do crescimento de grão (HOLAPPA; HELLE, 1995).

2.2.1 Origens das inclusões

As inclusões não-metálicas nos aços podem ser classificadas em exógenas e endógenas. As primeiras são originadas de fontes externas, tais como incorporação de escórias, refratários e produtos de reoxidação, ou seja, interação de aço líquido com sua redondeza. Já as inclusões endógenas resultam das reações de refino (desoxidação e dessulfuração, como exemplo) e pela precipitação durante o resfriamento e a solidificação do aço (ZHANG; THOMAS, 2003).

As inclusões exógenas podem ser evitadas por meio de melhores procedimentos e controles de processo de produção de aço. Enquanto as inclusões endógenas são inerentes ao processo, pois resultam de reações que ocorrem no aço líquido, de modo que não podem ser completamente eliminadas, apenas minimizadas (MILLMAN, 2004).

As inclusões endógenas podem ser classificadas como primárias e secundárias. Esta definição é feita conforme a etapa em que se origina a inclusão, sendo as primárias antes da solidificação, formadas no processo de refino e as secundárias são aquelas que se formam após o início da solidificação. Estas inclusões são pequenas, numerosas e uniformemente distribuídas (GHOSH, 2001; KIESSLING, 1978).

As inclusões exógenas são formadas no aço de maneira acidental e podem ter origem em ações de erosão, tais como: arraste de material refratário das paredes dos fornos e distribuidor, arraste de escória pelo banho líquido, formação de produtos de reação química heterogênea entre o aço líquido, escórias e os refratários.

O arraste de escória para o banho líquido pode ser causado devido o fluxo de vazamento de aço e excesso de injeção gás inerte na panela, o que resulta numa turbulência na interface metal-escória (MILLMAN, 2004).

As inclusões exógenas possuem grande tamanho, ocorrência inesperada, forma irregular e estrutura complexa. Embora o surgimento deste tipo de inclusões seja normalmente associado a fatores externos, muitas vezes, estas podem ser sítios para a precipitação de inclusões endógenas de óxidos e sulfetos (KIESSLING, 1978).

A reoxidação do aço líquido aumenta o seu teor de oxigênio e conseqüentemente contribui para formação de novos grupos de inclusões óxidas, redução da eficiência do processo de desoxidação e aumento da ocorrência de entupimento da válvula submersa. As principais causas da reoxidação são: arraste de oxigênio atmosférico, teor de oxigênio da escória da panela siderúrgica e instabilidade química dos materiais refratários. Após a desoxidação, o tamanho das inclusões está situado entre 1 e 5 μm de diâmetro, no entanto, segundo Millman (2004) se existir reoxidação antes do lingotamento a faixa de tamanho pode variar entre 1 e 60 μm .

Uma das maneiras de prevenir este fenômeno é a completa cobertura do aço líquido ao longo do processo e com uma adequada espessura de camada de escória. A transferência de aço líquido da panela para o distribuidor e depois, do distribuidor para o molde pode acarretar exposição ao ar da atmosfera, resultando também na reoxidação do aço. Para isso, a utilização de válvulas e gás inerte são métodos eficazes na prevenção da reoxidação de aço durante a fabricação (MILLMAN, 2004).

2.2.2 Classificação das inclusões não-metálicas

Segundo Dekkers (2002), as inclusões não-metálicas podem ser classificadas a partir da composição química, do tamanho e da morfologia.

2.2.2.1 Composição química das inclusões

As inclusões não-metálicas no que diz respeito a composição química podem ser classificadas como: óxidos, sulfetos e nitretos. As inclusões de óxidos mais comuns são alumina, cálcio-aluminatos, silicato de manganês, silicato de alumínio, espinélio, óxido de ferro, óxido de manganês e óxidos mistos. Já as inclusões de sulfetos de maior ocorrência são sulfeto de manganês e sulfeto de cálcio (BARTOSIAKI, 2016). Enquanto as inclusões de nitretos são compostas principalmente por nitreto de titânio (TiN) e possui morfologia facetada (MAPELLI, 2008).

As inclusões de alumina (Al_2O_3) são sólidas e não deformáveis em qualquer temperatura. Estas inclusões surgem a partir da reação de desoxidação do aço com adição de alumínio no refino secundário, ou também a partir da reoxidação de alumínio com óxidos instáveis presentes na escória. Como esta inclusão é formada irá definir o tipo de morfologia apresentada, podendo ser pequenas partículas quase esféricas, poligonais ou dendríticas (ZHANG, 2003; TIEKINK, 2010). A figura 5 mostra as morfologias de alumina no diagrama de atividade de oxigênio *versus* concentração de alumínio.

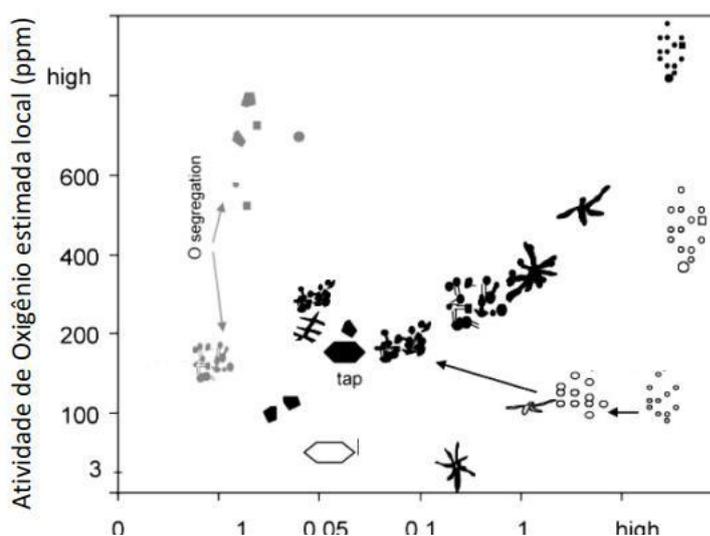


Figura 5 – Morfologias apresentadas na alumina no aço em função da variação de atividade de oxigênio e da concentração de alumínio. Fonte: adaptado de TIEKINK, 2010.

As inclusões de cálcio-aluminatos são aquelas formadas a partir da modificação de inclusões de alumina e espinélios devido ao tratamento de injeção de cálcio. Os cálcio-aluminatos que se formam podem ser observados na figura 7 da seção 2.2.4. Pode-se perceber ao analisar a figura que com o aumento do teor de CaO ocorre diminuição do ponto de fusão dos cálcio-aluminatos até atingir a composição $C_{12}A_7$, que possui menor ponto de fusão, sendo que a partir de 35% de CaO, as inclusões formadas são líquidas e globulares no aço líquido e no processo de laminação (BIELEFELDT, 2005).

As inclusões de espinélio ($MgO.Al_2O_3$) têm elevada dureza, alto ponto de fusão e apresentam morfologia irregular. Estas inclusões podem se originar devido a reação de alumínio dissolvido no aço com o óxido de magnésio (MgO) presente no material refratário ou na escória e pela reação de inclusões de alumina. O teor de sílica presente na escória deve se manter controlado o mais baixo possível, pois a sílica pode estabilizar a presença de inclusões de espinélios. As inclusões de $MgO.Al_2O_3$ podem prejudicar a lingotabilidade, gerar defeitos superficiais ou trincas no produto final ao longo da conformação mecânica (MATSUMOTO, 2018; PEREIRA, 2015).

As inclusões de sulfetos de cálcio (CaS) são comumente observadas pela formação de uma casca ao redor de inclusões globulares de cálcio aluminatos. Estas inclusões têm uma deformabilidade menor em comparação a inclusões de sulfeto de manganês (MnS), estas que tem maior aparecimento em processos de aciaria. As inclusões de CaS podem ocasionar *clogging* (será mais detalhado na seção 2.4), da mesma maneira pode acontecer com a presença de inclusões de alumina e espinélios. As inclusões de CaS são formadas pelo excesso de cálcio no tratamento de modificação de inclusões de alumina em aços que têm teores elevados de alumínio e enxofre, ocorrendo a precipitação no banho líquido ou ao longo da solidificação (GERDAU, 2016).

2.2.2.2 Tamanho das inclusões

O conhecimento do tamanho de uma inclusão é de suma importância pois afeta diretamente o produto final. Como foi dito anteriormente, uma macroinclusão em comparação à uma microinclusão pode ser mais nociva as propriedades mecânicas, sendo que uma única inclusão na faixa de 20 a 150 μm pode ocasionar um defeito catastrófico na peça final (MILLMAN, 2004).

2.2.2.3 Morfologia e distribuição das inclusões

Segundo Dekkers et al (2002), a classificação da morfologia das inclusões em aços acalmados ao alumínio pode ser disposta como: esféricas, facetadas, em placas, dendríticas, *clusters* e agregadas. Conforme apresentado neste estudo, cada uma destas morfologias se origina dependendo das condições de refino na panela siderúrgica. Sendo as grandes inclusões nas formas de *clusters*, agregados, facetados e dendríticas.

2.2.3 Desoxidação

O processo de desoxidação tem como objetivo agrupar a maior parte de oxigênio dissolvido no aço na forma de óxidos e removê-los para a escória (HOLAPPA; HELLE 1995). Este processo é realizado adicionando alguns elementos químicos que têm alta afinidade com o oxigênio, tais como: alumínio, silício e manganês.

Nem todos os óxidos resultantes destas reações são totalmente removidos para a escória, sendo então incorporados ao produto final na forma de inclusões. A figura 6 apresenta a quantidade de oxigênio dissolvido no aço líquido em função da quantidade de desoxidante em percentagem de massa em solução a 1600 °C. Pode se observar o forte poder desoxidante do alumínio, não sendo necessário grandes volumes deste elemento para garantir um baixo teor de oxigênio em equilíbrio (MILLMAN, 2004).

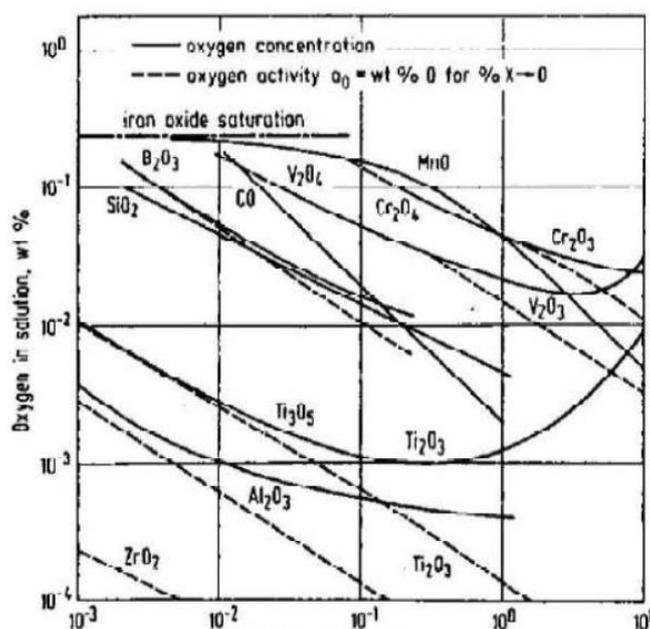


Figura 6 – Elementos desoxidantes em equilíbrio com aço líquido a 1600 °C. Fonte: MILLMAN, 2004.

Os aços desoxidados com alumínio possuem teores bastante baixos de oxigênio dissolvido, e as inclusões formadas após a desoxidação são normalmente aluminas, conforme a reação 1 (DEKKERS, 2002). A alumina que não é removida para a escória pode ser extremamente prejudicial ao processo, sendo então necessário modificar a morfologia destas inclusões que permanecem no aço líquido, e para isso é feito o tratamento do aço com adição de cálcio.



2.2.4 Adição de cálcio para tratamento de inclusões

O tratamento de inclusões com cálcio é uma técnica utilizada para modificar a morfologia das inclusões sólidas de óxidos de alumínio em inclusões líquidas. Além de transformar alumina, a injeção de cálcio também modifica a sílica, sendo formado os produtos cálcio-aluminatos e cálcio-silicatos, respectivamente. Ambas são inclusões globulares pelo efeito de tensão interfacial (ABRAHAM; BODNAR; RAINES, 2013).

Sabe-se que as inclusões sólidas são mais facilmente removíveis devido ao alto ângulo de contato com o aço líquido, porém as inclusões líquidas são preferíveis no banho líquido por assumirem formato esférico, reduzindo assim, as concentrações de tensões e os danos no processo de conformação que podem ser causados posteriormente (MILLMAN, 2004). Além de transformar as inclusões presentes no aço líquido em inclusões menos danosas, um dos principais objetivos da modificação de inclusões é evitar *clogging*.

Segundo Janke et al (2000), a reação entre o cálcio dissolvido e Al_2O_3 é a base da modificação de inclusões sólidas de alumina, o objetivo desta reação é produzir inclusões líquidas C_{12}A_7 ($12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$), que está totalmente líquida considerando a temperatura de trabalho da aciaria de 1600 °C, e assim evitando a formação de fases intermediárias CA_6 , CA_2 , CA e CaO (C e A representam CaO e Al_2O_3 , respectivamente). A figura 7 apresenta o diagrama binário de equilíbrio termodinâmico $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

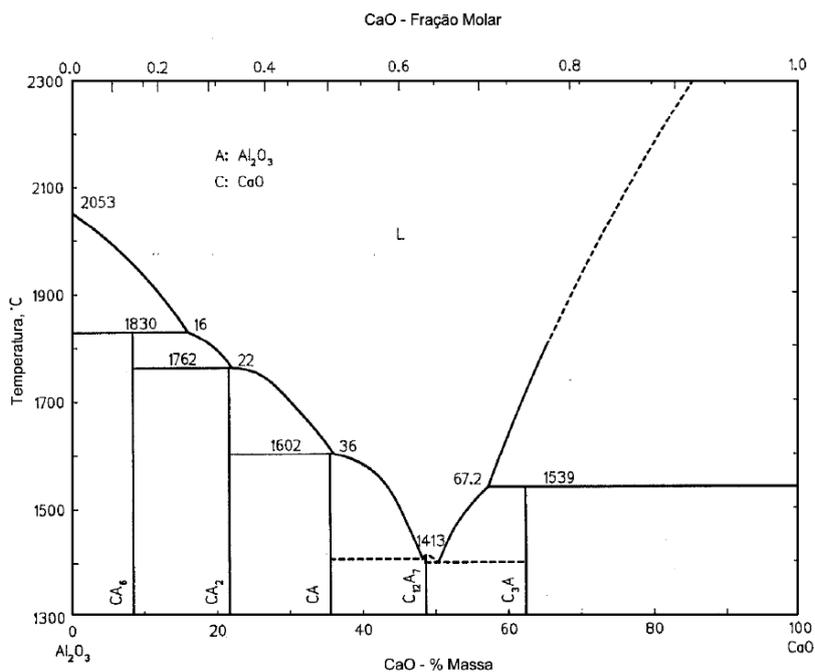


Figura 7 – Diagrama de fases CaO - Al_2O_3 . Fonte: BIELEFELDT, 2009.

Ao adicionar cálcio no banho líquido, este elemento pode tanto modificar as inclusões de alumina quanto formar sulfeto de cálcio, isto vai depender das concentrações de alumínio e enxofre dissolvidos no banho. Se os teores de Al e S forem elevados, tem-se a formação de inclusões sólidas de alumina e CaS. Porém, se Ca for adicionado em demasia, tem-se um aumento do número de inclusões ricas em cálcio, o que pode ocasionar em *clogging* e erosão da panela (STORY, 2004).

Segundo Dekkers (2002), o cálcio é um desoxidante mais forte que o alumínio, fazendo com que se alcance teores de oxigênio bem baixos, 0,4 ppm no equilíbrio. Geralmente as panelas siderúrgicas são compostas de materiais refratários ricos em Al_2O_3 e MgO, ao tratar o aço líquido com cálcio gera-se uma certa instabilidade. Podendo ocorrer erosão dos materiais refratários e até mesmo formação de espinélio junto ao MgO que se decompôs.

Conforme Bielefeldt (2005), as adições de cálcio são feitas na forma de ligas de cálcio, tais como: CaSi, CaC_2 ou CaAl, o que vai depender da especificação do teor de silício no aço. Nos dias de hoje, a maneira mais utilizada são tubos de aços com CaSi em pó no seu interior.

A expressão “janela líquida” é utilizada para definir as condições que irá ocorrer formação de inclusões líquidas (JANKE, 2000). A figura 8 apresenta o efeito dos teores de oxigênio e enxofre sobre a “janela líquida” de inclusões. Sendo definidos nos

diagramas os teores de oxigênio de 10, 20 e 40 ppm e para o enxofre os teores de 100 e 250 ppm. Para que sejam formadas as desejadas inclusões líquidas, a adição de cálcio em função do teor de alumínio deve estar entre as linhas de saturação de sulfeto de cálcio (linhas superiores de cada concentração de oxigênio) e as linhas de saturação de cálcio-aluminatos sólidos (linhas inferiores de cada concentração de oxigênio).

Pode-se notar pelos diagramas, vide figura 8, que em ambas as concentrações de enxofre, quanto menor o teor de oxigênio, menor será o teor de cálcio que deverá ser adicionado para se alcançar a janela líquida, embora mais estreita fique a janela. O efeito do teor de enxofre pode ser percebido pelas linhas de saturação de CaS, quanto maior for o teor de enxofre, ainda mais estreita será a janela.

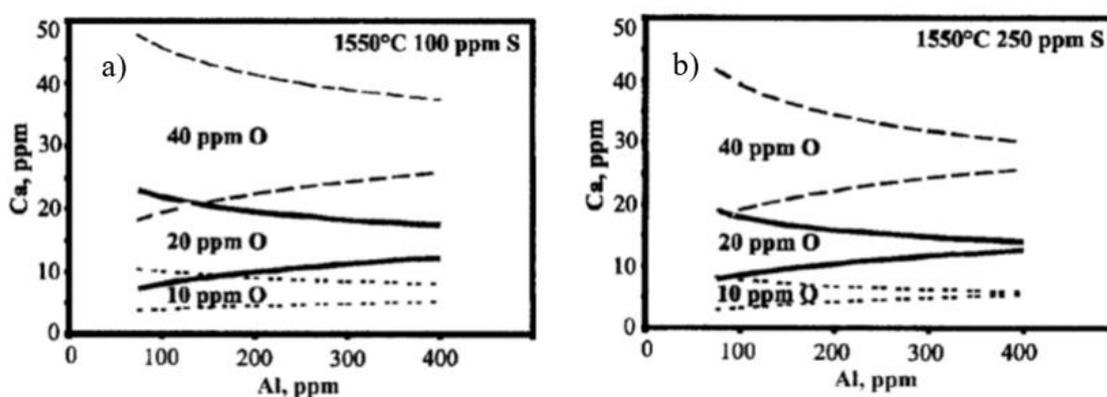


Figura 8 – Efeito do oxigênio total na janela líquida com (a) 100 ppm S e (b) 250 ppm S. Fonte: adaptado HOLAPPA, 2003.

2.3 Método de análise de inclusões não-metálicas

A limpeza do aço pode ser avaliada medindo-se em todas as etapas do processo de produção de aço, a composição química das inclusões, o tamanho, a morfologia e distribuição, assim pode-se dizer o quão limpo está o aço. Uma abordagem dos principais métodos de medição será feita nos próximos tópicos, tendo como base o estudo de ZHANG (2003), onde é relatado que métodos diretos são precisos e quantitativos, contudo, é necessário maior investimento. Por outro lado, métodos indiretos são rápidos e de menor custo, porém são utilizados somente qualitativamente. Neste trabalho, foi focalizado o estudo nos métodos de microscopia ótica e ultrassom, os demais somente citados devido sua importância no tema.

2.3.1 Micrografia por microscópio óptico

A análise metalográfica do material sob o ponto de vista de sua estrutura, tenta correlacionar as propriedades físicas, composição química, processo de fabricação, entre outros, de modo a determinar ou prever seu comportamento em uma determinada aplicação. Estas análises podem ser feitas a nível macro (sem instrumento) ou com auxílio de um microscópio (também chamado de micrografia). Com relação a macrografia, se obtém do material informações de caráter geral, como distribuição, natureza e quantidade de certas impurezas. Já as micrografias podem ser observadas a granulação do material, a natureza, quantidade, distribuição e forma dos diversos constituintes, dentre eles as microinclusões. A análise em conjunto induz a uma série de conclusões e de utilidade prática. Para a realização de um ensaio micrográfico devem ser considerados alguns pontos, sendo os mais importantes para o foco deste trabalho: a escolha e localização da seção de análise, visto que especialmente para peças laminadas tem-se muita diferença em analisar a seção transversal do que a longitudinal, principalmente quando há impurezas, pois estas são alongadas na direção de laminação, aparecendo na seção transversal como pontos (a figura 9 exemplifica este fato); preparação da superfície plana e polida no lugar de interesse, pois as peças devem ter um aspecto especular e praticamente sem riscos para estarem em condições de serem analisadas; operação no microscópio para observação das ocorrências visíveis sem ataque, depois das devidas preparações o corpo de prova pode ser analisado ao microscópio (COLPAERT, 1974).

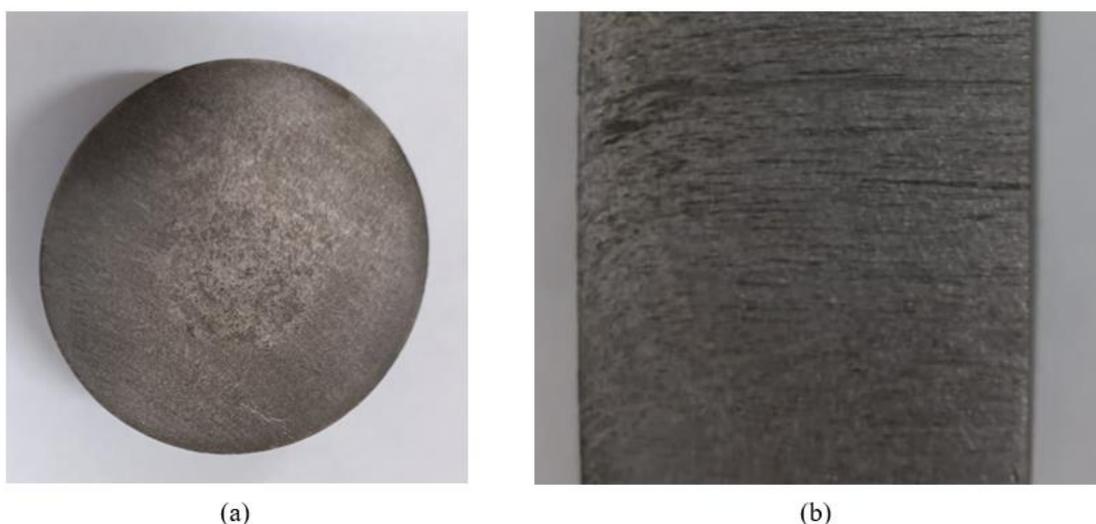


Figura 9 – Seção transversal (à esquerda) e longitudinal (à direita) de uma barra de aço. Fonte: o autor.

A realização da micrografia de um dado material tem por objetivo a obtenção de uma imagem ampliada de um corpo de prova do material de interesse. O resultado é uma fotomicrografia que apresenta os detalhes do corpo de prova com destaque em pontos de interesse. Assim, podendo ser feitas as avaliações das propriedades dos materiais, como exemplo a quantidade de impurezas, representadas pelas microinclusões. Sendo o microscópio óptico o mais utilizado para prática destes ensaios, devido ao seu baixo custo e simplicidade de operação. A importância da microestrutura nas propriedades dos materiais é muito consolidada, visto que os limites de desempenho das peças estão cada vez mais apertados, por isso que a determinação quantitativa das características microestruturais é de suma importância. As determinações mais comuns são: tamanho de grão, de partículas e de inclusões e sua distribuição; fração volumétrica de fases, inclusões e poros; número de partículas, inclusões, poros por unidade de volume. Os métodos mais comuns empregados utilizam como base fotos de micrografias padrões que são comparadas visualmente com as imagens das micrografias em análise. Diferentes órgãos normativos editam um conjunto de imagens de micrografias padronizadas para a determinação por semelhança, recomenda-se que estes padrões sejam sempre impressos para se obter um melhor resultado, também não se deve esquecer de considerar os aumentos das micrografias padrão e a magnificação das em estudo (KWIETNIEWSKI; KISS, 2011).

2.3.2 Método de inspeção em linha por ultrassom

A garantia da qualidade dos aços produzidos por uma usina de aços especiais passa muito pela integridade física do material, tanto interna quanto superficial (no estudo deste trabalho o foco será na rejeição interna). Para assegurar sua integridade interna, 100% do material produzido passa por uma inspeção por ultrassom. O objetivo é garantir a ausência de descontinuidades muito grandes. Essas descontinuidades são extremamente prejudiciais ao produto final, um exemplo são as macroinclusões. Em uma linha de inspeção automática, 100% das barras passam por um equipamento que examina peça a peça em sequência e geralmente estes processos operam de forma contínua, sendo assim mais produtivos que inspeção manual.

O método de ultrassom consiste na emissão de vibrações mecânicas por uma fonte geradora, sendo transmitidas de duas maneiras: longitudinal, onde são geradas zonas periódicas de compressão e descompressão paralelas à direção de propagação;

transversal, a partir do cisalhamento de partículas contidas no meio, perpendicular à direção de propagação.

A técnica de inspeção por ultrassom é caracterizada como um ensaio não destrutivo e tem como finalidade a detecção de defeitos e discontinuidades internas presentes em materiais metálicos e não metálicos (SILVA, 2011). O método de ultrassom consiste na geração de uma onda longitudinal a partir da pressão mecânica exercida em um transdutor, excitando o cristal piezoelétrico, esta onda percorre o material até ser refletida por um defeito. Após encontrar o defeito a onda retorna até o transdutor e é convertida novamente em sinal elétrico pelo efeito piezoelétrico. A partir do sinal do eco é fornecido um ecograma, sendo o eixo y a intensidade do eco (%) e o eixo x o percurso da onda (mm). A figura 10 apresenta de maneira esquemática como é realizada a inspeção por ultrassom, somente para ilustração nesta figura é apresentando um ultrassom portátil convencional e o diagrama conforme mencionado anteriormente.

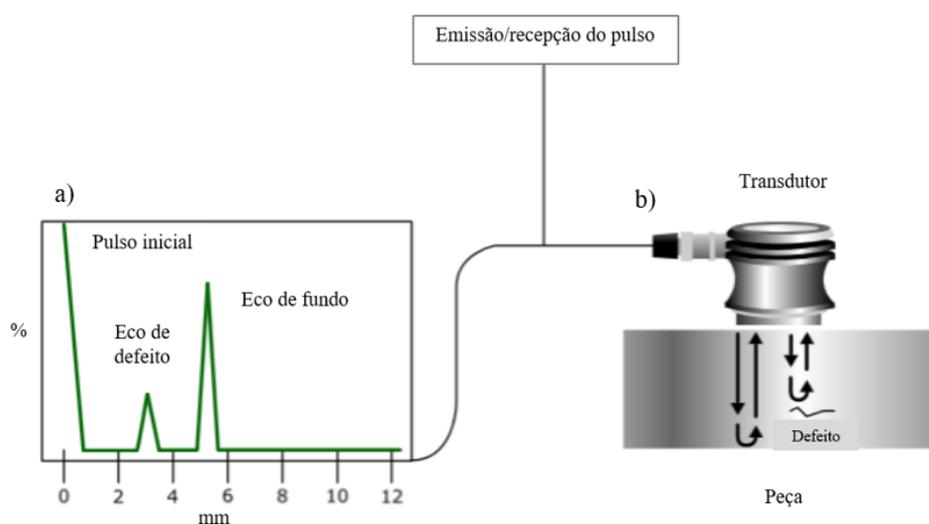


Figura 10 – Ilustração esquemática do (a) diagrama obtido pela inspeção por ultrassom portátil convencional de uma peça por transdutor simples. Fonte: adaptado TESTIA, 2009.

Pelo fato de as ondas do som não serem emitidas no ar de maneira eficiente, para que ocorra a inspeção das barras são utilizados agentes de acoplamento, que podem ser géis, pastas ou líquidos. Dependendo do tipo de aplicação, são utilizados agentes de acoplamento diferentes, porém os mais utilizados são a água, graxa ou géis a base de glicerina, e cada um destes possui propriedades sônicas distintas.

Para se obter a profundidade do defeito na peça, são levadas em consideração as velocidades de propagações das ondas sonoras (longitudinais ou transversais) no aço e na

água, sabendo estas informações do meio e do tipo de onda utilizado é possível calcular o tempo transcorrido desde a emissão do pulso até a sua recepção (TOF, do inglês *Time of Flight*), e a partir da equação 1 se obtém a distância do defeito à superfície da peça:

$$d = \frac{[c \times TOF]}{2} \text{ Equação 1}$$

Sendo “c” a velocidade do som no meio (m/s) e “d” é a profundidade do defeito (m). Sendo este termo dividido por dois pois deve ser levado em consideração o percurso da onda tanto na ida quanto na volta, ambos de mesma duração.

Para relacionar o sinal emitido com o tamanho do defeito, o equipamento de ultrassom, ou qualquer outro que utiliza o método de ensaio não destrutivo, deve passar por uma calibração. O equipamento é calibrado com um defeito artificial (também denominado de defeito padrão) de dimensões conhecidas para ser definido o padrão de resposta esperado. A calibração nada mais é do que configurar o ganho em decibéis do equipamento de maneira que a amplitude de sinal gerada pelo defeito artificial tenha um valor fixo de FSH (do inglês *Full Screen Height*). Deste modo, quando o equipamento de ultrassom é calibrado com um defeito artificial menor, terá maior sensibilidade, e ao ser calibrado com um defeito artificial maior, terá menor sensibilidade.

Os dois tipos mais comuns de defeitos padrão são: FBH (*Flat Bottomed Hole*, tradução livre para Buraco de Fundo Plano) e SDH (*Side Drilled Hole*, traduzido para Furo Lateral), sendo o primeiro tipo mais aconselhável para utilização de ultrassom portátil convencional de ondas longitudinais e o segundo tipo mais recomendável para utilização em equipamentos de ultrassom que inspecionam as seções transversais das peças, os chamados transdutores *Phased Array*. Estes transdutores são muito mais complexos que os convencionais, pois apresentam múltiplos elementos em séries, e cada um destes é capaz de emitir e receptor pulsos individualmente, sendo capazes de gerar não somente ondas longitudinais, mas também ondas transversais e angulares.

Um dos parâmetros de maior relevância na inspeção por ultrassom são as frequências utilizadas pelo transdutor, à medida que ao utilizar frequências maiores (comprimentos de onda menores) tem-se uma resolução de inspeção maior, todavia uma penetração menor na peça, isto ocorre devido aos menores comprimentos de onda sofrerem maior espalhamento pelo agente de acoplamento. A maior parte dos transdutores

Phased Array utilizados pela indústria operam com frequências entre 2 MHz e 10 MHz (MARTIN, 2014).

2.3.3 Microscopia de varredura eletrônica (MEV); Oxigênio total; *Pick up* de nitrogênio

Com o método de Microscopia de varredura eletrônica é possível a detecção de menores inclusões, apresenta a composição química e morfologia de cada inclusão, e ainda permite uma visualização tridimensional (ZHANG; THOMAS, 2003).

O oxigênio total é obtido pela soma do oxigênio dissolvido no banho líquido mais o oxigênio como óxidos, formando inclusões não-metálicas. A variação de oxigênio dissolvido no aço é muito pequena, entre 3 e 5 ppm a 1600 °C para aços acalmados ao alumínio, portanto o resultado obtido de oxigênio total é uma medida indireta da quantidade total de inclusões de óxidos no aço. O ensaio pode ser feito em uma amostra solidificada de aço através de sua fusão em um equipamento que mede simultaneamente teores de oxigênio e nitrogênio.

Pick up de nitrogênio é o termo utilizado para a diferença de teores de nitrogênio entre a panela e o distribuidor, representando um indicativo de reoxidação do aço líquido devido a exposição ao ar atmosférico. Pelo fato de a composição do ar ser principalmente composta de nitrogênio, quando ocorre reoxidação do aço, também se espera o aumento do teor deste elemento.

2.4 Lingotabilidade e processo

O termo lingotabilidade não tem uma definição exata, contudo para lingotamento contínuo está diretamente relacionado com a fluidez do aço líquido e a tendência de ocorrer *nozzle clogging* (expressão utilizada para o entupimento das válvulas do distribuidor). A lingotabilidade depende de alguns fatores, podendo citar: o aço a ser lingotado e o processo (JANKE et al, 2000).

O conceito de *nozzle clogging*, segundo BANNENBERG (1995), é definido pela deposição de alumina ou compostos de elevado teor de alumina nas paredes da válvula submersa, diminuindo o diâmetro do canal por onde passa o aço, podendo causar a obstrução do fluxo de aço. Como visto na seção 2.2.1, as inclusões de alumina são sólidas na temperatura de vazamento do aço líquido, e inclusões sólidas têm a tendência de se

aglomerarem na válvula devido ao alto ângulo de contato com o líquido. A figura 11 apresenta as duas regiões mais susceptíveis ao entupimento: a área em que a válvula tampão se conecta à válvula submersa e a região de saída do aço para o molde.

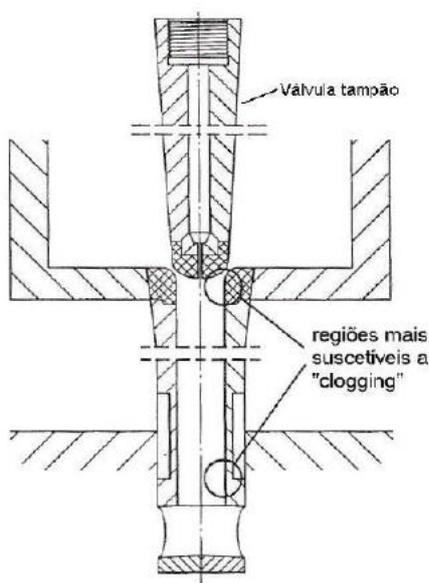


Figura 11 – Representação esquemática das válvulas do distribuidor e as regiões mais susceptíveis ao *clogging*. Fonte: BANNENBERG, 1995.

A posição da válvula tampão e as suas alterações ao longo do processo são medidas geralmente utilizadas para controle de *clogging* na indústria. Pois com o entupimento da válvula submersa, tem-se a diminuição do fluxo de aço líquido do distribuidor para o molde, e para garantir que a velocidade de lingotamento e o nível do aço no molde permaneçam constantes, a posição da válvula tampão tende a variar.

Segundo Zhang (2003), *clogging* não está associado somente a produtividade do lingotamento, também afeta a qualidade interna dos produtos lingotados quando pedaços de *clogging* são soltos e arrastados pelo fluxo de metal líquido, originando posteriormente defeitos. Além do mais, devido a elevadas alterações no fluxo de aço líquido do molde pode-se ocorrer arrastamento de escória e defeitos superficiais.

2.4.1 Seção do molde em lingotamento contínuo de tarugos

Em uma máquina de lingotamento contínuo podem ser vazados tarugos em diferentes formatos (quadrados ou redondos, por exemplo) e tamanhos (155x155 mm; 170x170 mm; 240x240 mm, para seções quadradas como exemplo).

Para cada tipo de molde existem diferentes possíveis variações no processo de lingotamento contínuo, pode-se citar, velocidades de lingotamento, tempo de flotação, área da seção transversal. Estas variações no processo têm influência na remoção de inclusões dos aços.

Para um tarugo de seção quadrada, quanto maior for o seu lado, maior será a área para captar inclusões, ou seja, em comparação a um tarugo de seção menor, tem-se maior volume de escória no molde com interface no aço líquido para absorver os óxidos formados anteriormente no processo.

Com o aumento da seção do molde tem-se a diminuição da velocidade de lingotamento, sendo então os tarugos maiores (moldes com seção maior) vazados numa velocidade menor em comparação a tarugos menores. Este fato possibilita um tempo maior em que a escória ficará em contato com o aço líquido durante o vazamento da corrida, e assim sendo possível absorver uma quantidade maior de inclusões.

Segundo Machado (2014), com o aumento da velocidade de lingotamento tem-se diminuição da capacidade de remoção das inclusões, visto que para uma velocidade de 1,8 m/min o percentual de inclusões passantes pelo veio em média foi de 11,61%, e com o aumento da velocidade para 2,6 m/min tem-se o aumento do percentual de inclusões passantes pelo veio, chegando a em média 17,45%.

O tamanho da seção do molde também afeta no quanto será reduzida a área de um tarugo por processo de conformação, por laminação por exemplo, até um diâmetro de uma barra final. Ou seja, um tarugo de seção maior necessita de mais passes de laminação em comparação com um tarugo de seção menor, sendo assim, as inclusões serão expostas mais vezes à deformação, aquelas que são deformáveis (tipo sulfetos e tipo silicatos, já os óxidos e aluminas são fragmentados) tornam-se com uma espessura menor na direção de laminação e mais distribuídas ao longo da barra.

2.5 ASTM E45 (2018) e ISO 4967 (2013)

As normas ASTM E45 e ISO 4967 consistem na análise de superfícies polidas de amostras de aço e quantificação de inclusões por meio de microscopia ótica, com este método é realizado uma comparação com resultados que apresentam a mesma morfologia e não necessariamente é considerada a composição química da inclusão não metálica. Atualmente este método é o mais comum nas análises de microinclusões na indústria para especificar os níveis de aceitação de inclusões nos aços. Quando as inclusões possuem uma geometria complexa ou tamanho individual muito pequeno este método pode não ser o mais eficaz (ZHANG, 2003).

Pelo método ISO 4967 os campos observados no microscópio ótico são comparados a campos padrões (também denominados de *plates*) estabelecidos na norma, sendo analisados cada tipo de inclusão separadamente. Estes *plates* são representados por áreas quadradas de 0,50 mm² de um plano longitudinal e observados com 100 vezes de aumento. As inclusões são classificadas a partir de suas morfologias e distribuições, sendo os campos padrões separados em cinco tipos: A, B, C, D e DS e representam as inclusões mais usualmente observadas nos aços. A figura 12 ilustra os tipos de inclusões e suas morfologias.

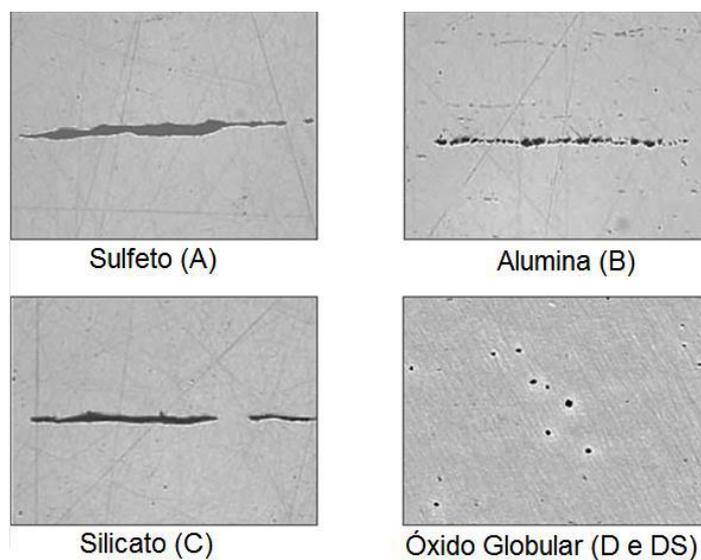


Figura 12 – Ilustração dos tipos e morfologias das inclusões. Fonte: adaptado de MANDAL, 2015.

As inclusões Tipo A (sulfetos) são caracterizadas por partículas cinzentas e bastante deformáveis, possuem uma série de relações de forma geralmente extremidades arredondadas.

As inclusões Tipo B (aluminas) são caracterizadas por partículas pretas ou azuladas e muito abundantes, não deformáveis, pouca relação de forma, angulares e alinhadas na direção de deformação.

As inclusões Tipo C (silicatos) são partículas pretas ou escuras, muito deformáveis, igualmente as Tipo A possuem uma série de relações de forma, e suas extremidades são geralmente agudas.

As inclusões Tipo D (óxidos globulares) são partículas pretas ou azuladas, não deformáveis, baixa relação de forma, são distribuídas aleatoriamente e apresentam extremidades angulares ou circulares.

As inclusões Tipo DS (globular único) são caracterizadas por partículas circulares ou quase circulares, aparecem isoladas e têm diâmetro maior que 13 μm .

Os tipos de inclusões, excluindo o DS, são divididos em série fina e série grossa, de acordo com os limites mínimos e máximos para as espessuras. Além disto, os tipos e séries também são classificados em índices numéricos de acordo com a soma dos comprimentos para os tipos A, B, e C e o número de ocorrências para o tipo D e o tamanho individual para o tipo DS. Estes índices numéricos também são denominados de níveis, podendo ser 0; 0,5; 1,0... até o nível 5,0 para os tipos A, B, C e D e para o tipo DS até o nível 3 para óxidos globulares até 107 μm , passando este diâmetro foge da classificação e pode ser considerado uma macroinclusão.

Os analistas metalográficos que são responsáveis pelas análises podem consultar os campos padrões disponibilizados como anexo da norma, a figura 13 exemplifica uma ocorrência de microinclusão tipo B série fina e grossa, com comprimento de 343 μm , assim sendo classificada como nível 2.

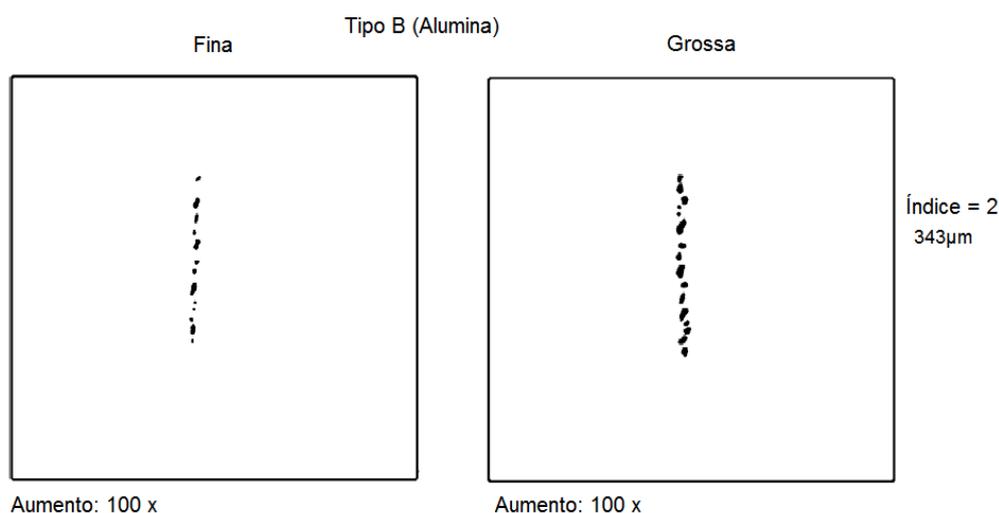


Figura 13 – Exemplo de uma inclusão Tipo B classificada quanto ao seu tamanho e morfologia.
Fonte: adaptado de ISO 4967, 2013.

As análises de microinclusão são realizadas em produtos posteriores a laminação ou forjamento, que podem ser matérias-primas para outro processo. Durante os processos de conformação por laminação ou forjamento as inclusões do tipo sulfeto possuem a tendência de se alongar na direção de conformação, já as inclusões tipo óxidos (que são mais duras e frágeis) tendem a se fragmentar. Estas partículas de óxidos fragmentadas podem prejudicar mais as propriedades do produto final em comparação as inclusões deformáveis tipo sulfetos (MANDAL, 2015). Como a morfologia e distribuição das inclusões dependem do grau de redução imposto, as comparações destas análises devem ser feitas entre amostras com deformações similares (ISO 4967, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será realizado o detalhamento dos materiais utilizados neste trabalho, do arranjo experimental e das técnicas utilizadas para a análise dos resultados.

3.1 Material utilizado

O aço utilizado no estudo deste trabalho é o DIN 38B3 (equivalente ao aço DIN 38B2) e sua composição química nominal, conforme a norma DIN EN 10263-4 2001, é mostrada na tabela 1.

Tabela 1 – Composição química nominal em % mássica do aço DIN 38B3.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	B
Mínimo	0,35	0,15	0,60	-	-	-	-	0,0008
Máximo	0,40	0,30	0,90	0,025	0,025	0,300	0,25	0,005

Fonte: adaptado da norma DIN EN 10263-4 2001.

Aços ao boro têm sua aplicação direcionada para materiais que geralmente passam por tratamentos térmicos, por exemplo, de têmpera por indução, onde se tem o endurecimento superficial da peça. Este aço é produzido em grande escala para atender a indústria automobilística, sendo uma das aplicações eixos e semieixos.

A adição de boro ao aço está diretamente relacionada ao aumento de temperabilidade devido à atuação deste elemento na diminuição ou, ainda mais, na eliminação total da formação da fase ferrítica. Este efeito ocorre pela formação de finos carbonetos no contorno de grão, que é a região mais favorável para nucleação da ferrita. Ao atrasar a transformação de fase austenítica para ferrítica, tem-se a formação em baixas taxas de resfriamento de fases de maior dureza, como exemplo a martensita e bainita.

O elemento boro tem forte tendência de formar nitretos ao se combinar com o nitrogênio, por isso em aços borados é comum a adição de elementos que possuem maior afinidade com o nitrogênio afim de formar nitretos em comparação ao boro, por exemplo o titânio. Assim, são formados nitretos de titânio (TiN), permitindo que uma fração de boro segregue para os contornos de grão, formando finos carbonetos. Esta fração livre de boro é definida como efetividade do boro e proporciona um aumento na temperabilidade do aço.

3.2 Ações prévias realizadas no processo para melhorar a limpeza inclusionária

A produção do aço DIN 38B3 pela usina siderúrgica localizada no sul do Brasil por histórico - sempre apresentou um índice de rejeição por macroinclusões elevado e os resultados apresentados pelos ensaios de microinclusão também se mostraram ao longo dos anos de produção instáveis.

Por meio de Programas de Experiência (PE) ocorreram diversas ações com o objetivo de melhorar a qualidade do aço DIN 38B3 com relação a limpeza inclusionária. O PE tem como objetivo padronizar e estabelecer procedimentos quando há necessidade de produção de novos produtos ou alteração significativa no processo, sendo então, uma ferramenta de controle e acompanhamento de um processo novo na usina no qual exige um cuidado e atenção maior pois os procedimentos operacionais não são de rotina (BIELEFELDT, 2005).

Durante o período de estudo deste trabalho foi implementado (durante a produção de algumas das corridas vazadas na seção de molde 155x155 mm) um PE com o objetivo de melhoria da limpeza inclusionária do aço DIN 38B3. Esse PE teve como pontos críticos: ajuste de escória e diminuição do teor inclusionário do aço. Vale ressaltar que tiveram outros PE criados para tentar melhorar a qualidade, antecedentes a este analisado no trabalho, e o fato deste PE que está sendo citado ter sido escolhido foi de ser o mais recente e estava sendo praticado durante o período em que foram analisadas as corridas para este estudo.

O PE por sua vez tem orientações para cada célula da área Aciaria, que não serão vistas em detalhes, e sim, uma apresentação das orientações impostas para operação que possuem maior relevância para este estudo. Sendo os pontos mais importantes para o FEA: objetivação do oxigênio ativo de vazamento; uma receita específica de escória, contendo um teor elevado de escória sintética (mais recomendada para a remoção de inclusões), teor também elevado de cal calcítica, sendo adicionados alumina e carbureto para completar a carga; já no FP os operadores foram orientados a seguirem um alvo de basicidade e teor de alumina, para ajuste de escória; e para finalizar na etapa do VD: devido ao aço ser crítico para reoxidação e formação de inclusões, foi dada a orientação de seguir todo tempo de vácuo (desgaseificação) e flotação previstos, sem reduções; e um ajuste fino de alumínio se o teor tivesse maior que determinado valor.

Em resumo, foram feitas alterações na composição química da escória, ajuste de oxigênio no banho de aço líquido, basicidade e tempos de vácuo e flotação. Estas

alterações tiveram resultados positivos, porém não foram eficazes para ter um ganho de qualidade na produção do aço DIN 38B3. Sendo então necessário a criação de outro PE com o intuito de, além destas alterações já realizadas em algum momento, porém não sendo bem-sucedidas, aumentar ainda mais a qualidade do aço com relação a limpeza inclusionária sendo suficiente para entregar na quantidade requerida pelo cliente.

No estudo deste trabalho se teve a preocupação de comparar as duas condições de vazamento do aço, tanto em molde de seção 155x155 mm quanto em molde de 240x240 mm, com parâmetros os mais parecidos possíveis, para não dizer iguais, afins de isolar somente o ponto de estudo: a alteração do tamanho do tarugo. Como já vinham sendo tomadas medidas via PE para melhorar a qualidade do aço ainda na seção de molde 155x155 mm, estas medidas também se mantiveram quando se iniciou o vazamento das corridas na seção de molde maior, porém agora com o incremento do aumento do tamanho de seção do tarugo.

3.3 Gerenciamento experimental

Para a realização do estudo deste trabalho foram analisadas 200 corridas do aço DIN 38B3 vazadas em duas condições diferentes de processo, sendo uma na área da seção de molde 155x155 mm e a outra na área da seção 240x240 mm. Foram aproximadamente 6 mil toneladas de aço analisadas em cada uma das condições (sendo a massa de uma corrida próximo de 60 toneladas), sendo divididas em 100 corridas de tarugos produzidos com lado 155 mm e 100 corridas de tarugos produzidos com lado 240 mm.

O período em que se decorreu o estudo foi de abril de 2022 até fevereiro de 2023, sendo que a produção foi dividida basicamente em duas grandes porções, nos primeiros 5 meses e meio foram vazadas somente corridas na condição de seção de molde 155 mm, e na porção seguinte vazadas as corridas com a seção de molde 240 mm. Esta faixa de tempo próxima uma da outra (meses de produção sucessivos um do outro) foi escolhida afins de evitar diferenças significativas em parâmetros do processo, de maneira que isolasse somente o objeto de estudo, a alteração do tamanho do molde.

Durante este período foram levantados relatórios de resultados de qualidade de cada uma destas corridas, nestes relatórios continham todos os ensaios solicitados pela especificação do cliente, tais como composição química, temperabilidade, tamanho de grão, entre outros, porém como o objetivo deste trabalho é estudar a limpeza do aço DIN

38B3 o foco foi direcionado para os resultados de ensaio de microinclusão (comentado em mais detalhes nos subtópicos a seguir).

Os relatórios do estudo foram retirados do sistema MES BRA (do inglês, *Manufacturing Execution Systems*), sistema utilizado pela usina siderúrgica. Este *software* que é o responsável por fazer a ligação de todos os dados e análises das áreas produtivas à gestão.

Além destes relatórios de resultados de qualidade, foram utilizados dados provenientes do programa Power BI (plataforma de *Business Intelligence*, criado pela empresa Microsoft, que reúne, compila e expõe dados de uma maneira inteligente) da área Engenharia de Inspeção, onde os especialistas controlam diversos parâmetros que influenciam o processo nas linhas de inspeção.

Com o auxílio do programa *Aspen Process Explorer V8.0* foram utilizados dados de registros de algumas das corridas afins de analisar os parâmetros mais importantes e que possuem uma influência direta na limpeza do aço estudado, como exemplo o nível de aço no distribuidor, as oscilações de altura da válvula tampão, fluxo de gás inerte no tubo longo, entre outros. Também foram analisadas com os dados gerados por este programa as corridas que apresentaram os piores resultados de ensaios de microinclusão, com o objetivo de identificar em qual momento os resultados começaram a piorar e tentar verificar o real motivo de os resultados estarem tão ruins, se foi algo relacionado ao processo ou algum evento externo, por exemplo, mau funcionamento de algum equipamento.

Após o lingotamento contínuo, os tarugos de ambas as seções de molde (155 mm e 240 mm) foram laminados em barras redondas de diferentes diâmetros, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2 – Representação do diâmetro das barras laminadas e a seção do tarugo.	
Seções do molde	Diâmetro das barras laminadas (mm)
155 mm e 240 mm	23,00
	25,00
	25,4
	26,99
	28,00
	28,58
	29,50
	31,75
	33,34
	34,93

Fonte: o autor.

Após a laminação, são retiradas as amostras para a realização dos ensaios requeridos pelo cliente para garantir que o material esteja dentro do especificado. Na sequência é realizada a inspeção por ultrassom em 100% das barras (será detalhado nos subtópicos a seguir), o material que não foi rejeitado está livre para seguir o fluxo de produção e aguardar os resultados dos ensaios de laboratório para ser liberado para o cliente.

A figura 14 apresenta o fluxograma com as etapas realizadas durante este trabalho.

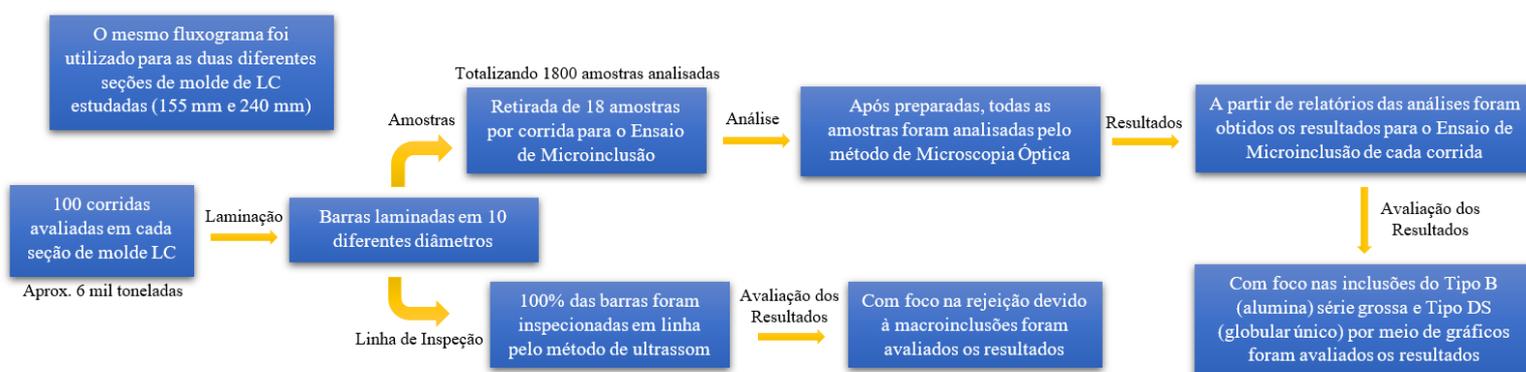


Figura 14 – Fluxograma apresentando as etapas realizadas durante este trabalho. Fonte: o autor.

Para exemplificar, é apresentada a figura 15, onde tem-se na imagem (a) tarugos produzidos a partir de corridas vazadas na seção de molde menor e na imagem (b) tarugos produzidos a partir de corridas vazadas na seção de molde 240 mm. Assim pode-se ter uma noção da diferença das dimensões das áreas da seção transversal de cada tarugo.



Figura 15 – Exemplo de tarugos produzido a partir de (a) seção de molde 155 mm e (b) seção de molde 240 mm. Fonte: o autor.

3.3.1 Análises dos ensaios de microinclusão

A produção do aço DIN 38B3 na usina siderúrgica localizada no sul do Brasil, para o cliente em específico, em decorrência de ações para melhoria da qualidade (justamente por motivos de limpeza inclusionária) as corridas são divididas em início, meio e fim. Esta divisão é feita por Ordens de Produção (termo utilizado pela indústria para representar parte do material) ou seja, uma ordem de produção representando a porção do início da corrida, outra ordem representando o meio e a última representando o fim. Sendo assim, a corrida de volume de cerca de 60 toneladas, fica dividida em três, sendo duas ordens de mais ou menos 15 t e uma porção maior contendo o restante, aproximadamente 30 t. Em cada uma destas ordens de produção devem ser retiradas amostras para os devidos ensaios de qualidade para liberação do material ao cliente, e para o estudo deste trabalho será somente focado nas amostras e resultados dos ensaios de microinclusão.

De acordo com a norma ASTM E45 são retiradas seis amostras de cada uma destas porções da corrida, assim representando esta parte. Se os resultados estão dentro de especificação, esta ordem de produção pode ser liberada para seguir o fluxo de processamento e ao final ser faturada.

Neste trabalho, foi escolhido se concentrar nas primeiras amostras (amostras retiradas na laminação) e seus respectivos resultados, pois no fluxo normal de processamento do material na usina, posteriormente na operação de linha de inspeção é possível retirar mais amostras para confirmação do resultado das primeiras. Como o foco

do trabalho é na limpeza do aço produzido pela aciaria, foram consideradas em todas as corridas somente as primeiras amostras e os primeiros resultados obtidos a partir de suas análises. Se as novas retiradas de amostras fossem consideradas o resultado do estudo teria uma certa variação, pois em algumas “re-amostragens” se obtém um resultado dentro de especificação e o material é liberado, assim não estaria sendo focado na qualidade do aço e somente em liberações.

As amostras das barras laminadas chegam ao laboratório e após preparadas para as análises estão prontas para os ensaios de microinclusão pelo método ASTM E45. As amostras foram analisadas pelo método de microscopia óptica por analistas do laboratório da usina siderúrgica e então se obteve o resultado do ensaio para cada uma das ordens de produção. Na figura 16 pode-se visualizar o microscópio óptico utilizado em todas as análises deste trabalho, da marca Olympus modelo BX60, também para ilustrar são apresentadas as seis amostras após preparadas, prontas para serem analisadas.

Na imagem (a) da figura 16 é apresentado exatamente da maneira como os analistas fazem o ensaio de microinclusão, onde são analisadas três amostras por vez, ao lado do microscópio se encontram as outras amostras que serão analisadas em seguida, e estão em cima da ficha de ensaio onde são anotados os resultados para posteriormente serem passados para o MES.



(a)



(b)

Figura 16 – Imagens do (a) microscópio óptico Olympus BX60 em que foram feitas as análises de microinclusão e (b) as amostras prontas para serem analisadas. Fonte: o autor.

Como em cada porção da corrida foram retiradas seis amostras, e cada corrida possui três ordens de produção, tem-se 18 amostras por corrida. Visto que neste estudo foram analisadas 200 corridas, ao todo foram 3600 amostras analisadas no ensaio de microinclusão. Com os resultados destes ensaios de microinclusão das 18 amostras de cada corrida foram feitos dois bancos de dados para cada uma das condições de processo estudada. Desta maneira sendo possível fazer a análise em separado da capacidade do processo de produção do aço DIN 38B3 em tarugos vazados na seção de molde 155x155 mm e em tarugos vazados em 240x240 mm.

3.3.2 Rejeição em linha devido à macroinclusões

Todas as barras laminadas são inspecionadas em linha por ultrassom automatizado, esta inspeção tem como objetivo detectar descontinuidades que podem levar a rejeição do material, podendo ser as inclusões não-metálicas uma das responsáveis pela formação das descontinuidades. As barras rejeitadas na linha de inspeção são direcionadas a uma etapa de recuperação, para serem inspecionadas mais uma vez e para identificação do tipo de defeito. O nível de aceitação de uma descontinuidade no material é definido por padrões estabelecidos de sinal de resposta conforme mencionado anteriormente.

As barras laminadas de cada corrida deste estudo foram inspecionadas na linha de inspeção automática 1 da usina siderúrgica, esta linha utiliza o equipamento de ultrassom GE™ ROWA-B, sendo a água utilizada como agente de acoplamento, e as barras foram inspecionadas conforme padrão de inspeção utilizado na operação normal da linha. A frequência utilizada foi de 10 MHz. A figura 17 ilustra o equipamento de ultrassom em que foram inspecionadas as barras.

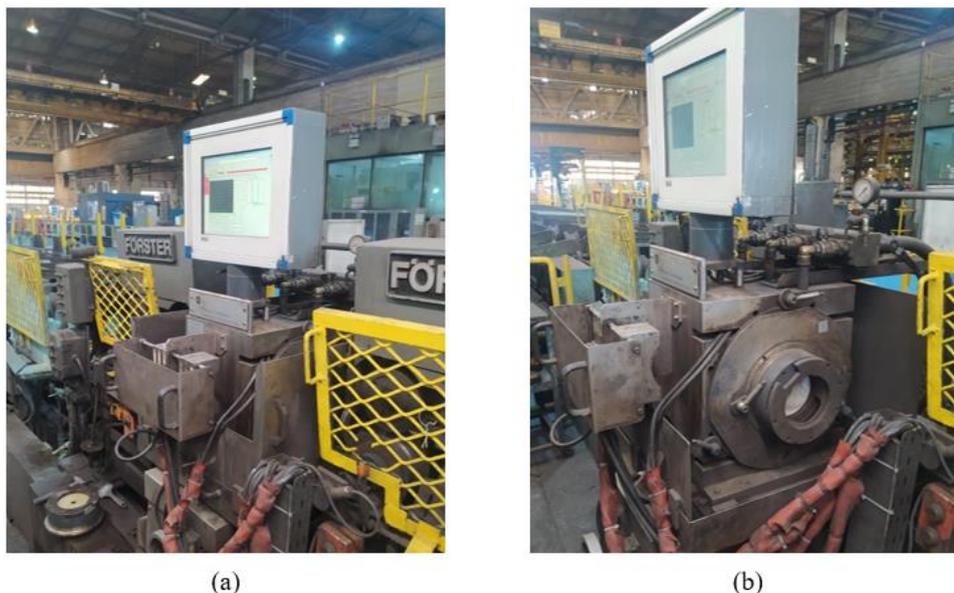


Figura 17 – Equipamento de ultrassom GE™ ROWA-B no qual foram inspecionadas as barras. (a) acoplado a linha de inspeção e (b) desacoplado a linha de inspeção. Fonte: o autor.

A área Engenharia de Inspeção é responsável pelo controle dos dados gerados pelos relatórios de linha, estes relatórios abastecem um Power BI que apresenta de maneira organizada os percentuais de rejeição com diversos filtros associados, podendo ser um determinado período de busca, um aço, um cliente e assim por diante. Neste trabalho foram filtrados o período em que se decorreu o estudo, de abril de 2022 a fevereiro 2023, o aço estudado DIN 38B3, o tipo de defeito decorrente da rejeição: macroinclusão, e a seção de molde de LC. Foi avaliado qual a rejeição de linha para barras laminadas decorrentes de tarugos produzidos na seção de molde 155x155 mm em comparação a rejeição obtida na outra condição de processo, as barras produzidas a partir de tarugos de seção de molde 240x240 mm.

3.3.3 Avaliação dos gráficos de lingotabilidade

A partir dos resultados das análises dos ensaios de microinclusão, foi feita pelo autor uma métrica para identificar quais das corridas foram as piores tendo vista o resultado do ensaio. Como cada corrida recebe 18 amostras, foi feita uma média aritmética simples dos resultados obtidos da análise de cada amostra, diferentemente do

que apresenta a norma ASTM E45 (2018) onde os resultados são níveis (como visto anteriormente), obtendo então médias de DS, por exemplo, 0,44; 0,56; 0,89.

As corridas que apresentaram valores médios dos resultados das análises para o Tipo B série grossa e DS elevados (utilizando como valor de referência resultados próximos a 1 para ambos os tipos) foram avaliadas com o auxílio do programa *Aspen Process Explorer V8.0*. Estes dois tipos de inclusão foram escolhidos, pois pelo histórico de produção do aço DIN 38B3, são as inclusões de maior ocorrência e mais problemáticas.

Estas avaliações dos gráficos de lingotabilidade destas corridas identificadas como piores em comparação as demais tiveram como objetivo tentar encontrar a razão de os resultados aparecerem tão ruins em relação à média das corridas. Assim seria possível perceber se foi um evento externo que ocasionou algum tipo de problema específico, por exemplo um mau funcionamento da tubulação onde passa gás inerte para o tubo longo. Na figura 18 tem-se um exemplo de uma das corridas em que foi feita a análise dos parâmetros de lingotabilidade.

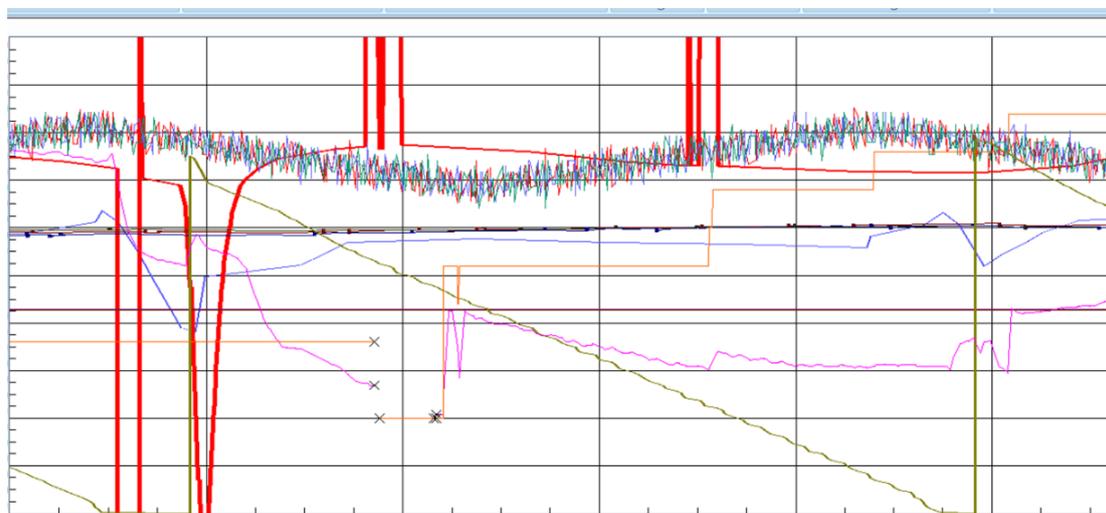


Figura 18 – Gráfico de uma das corridas analisadas no programa Aspen Process Explorer V8.0. Fonte: o autor.

Ao visualizar o gráfico percebe-se a complexidade de como os parâmetros de lingotabilidade são apresentados no programa *Aspen Process Explorer V8.0*. O entendimento completo da relação de todos os parâmetros com o desempenho da corrida requer uma certa experiência com estas avaliações, que não é o foco deste trabalho.

Afins de exemplificar uma das análises feita no programa, ao observar o gráfico da figura 18 atenta-se ao comportamento das linhas rosa e laranja (ambas cortam o gráfico

quase por inteiro, da esquerda para a direita). A linha rosa representa a contrapressão de gás inerte do tubo longo, ou seja, o quanto de gás inerte está retornando pelo contrafluxo, já a linha laranja é o quanto de pressão o operador está selecionando para manter uma adequada inertização do tubo longo. Neste sentido, se a linha rosa está decrescendo ao longo do tempo (sendo o eixo x representado pela linha temporal), torna-se necessário um aumento da pressão de gás inerte para o tubo longo, que no gráfico significa crescimento da linha laranja com o passar do tempo. Estes ajustes têm como objetivo estabilizar o fluxo de gás inerte que flui para ao tubo longo, sendo estas linhas normalmente estáveis ao longo do tempo em uma corrida com desempenho considerado regular. Grandes variações na linha de contrapressão podem representar um vazamento ou alguma obstrução na válvula onde passa o gás inerte. Como pode-se perceber no gráfico, as linhas estão variando bastante, além de em um determinado momento perderem o sinal com o sensor. E por estes motivos esta corrida foi classificada como tendo um problema externo, sendo considerado um evento específico e fora das condições normas de processo. Sendo então os resultados muito ruins para o ensaio de microinclusão associados a este problema na contrapressão de gás inerte do tubo longo, tendo diversas inclusões grosseiras encontradas nas análises das amostras desta corrida.

Como o problema ocorrido não tem relação com o objetivo de estudo deste trabalho, mesmo afetando terrivelmente a limpeza do aço, como vistos nos resultados de ensaio de microinclusão, esta corrida foi desconsiderada nas análises.

Em algumas destas corridas avaliadas não foi possível perceber o real motivo, sendo então considerado que o resultado ruim do ensaio de microinclusão foi consequência de algo intrínseco do processo, e não externo. Ambos os problemas, como pode-se perceber, afetam a qualidade do aço produzido, porém o foco deste trabalho foi direcionado as corridas que, devido as condições do processo, não estavam entregando resultados bons e os problemas podem ser resolvidos, diferente das corridas onde foram verificados episódios externos ao processo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussão das corridas que foram analisadas neste estudo. Serão mostrados os resultados das análises dos ensaios de microinclusão e o percentual de rejeição em linha de inspeção por ultrassom devido à macroinclusão.

4.1 Ensaios de microinclusão

Os resultados das análises de microinclusão das 3600 amostras, foram dispostos em dois arquivos Excel, com o objetivo de separar as duas diferentes condições de processo estudadas. Em um dos arquivos continham todos os relatórios das 100 corridas vazadas na seção de molde 155x155 mm, dispostos em 100 planilhas e mais duas planilhas contendo cada uma um banco de dados das inclusões Tipo B (alumina) série grossa e Tipo DS (globular único). Da mesma maneira, foi feito para a outra condição de processo estudada, as 100 corridas vazadas na seção de molde 240x240 mm.

A partir destes bancos de dados contendo os resultados, foram elaborados quatro gráficos simulando a capacidade de processo, com o objetivo de apresentar de maneira similar a uma distribuição normal (tendo vista que os resultados possuem uma restrição nos valores observados, por serem representados por níveis segundo a ASTM E45 e não valores inteiros), o quanto os resultados são capazes de atender a especificação requerida pelo cliente e comparar as duas condições distintas do processo.

4.1.1 Inclusão Tipo B (alumina) série grossa

Na figura 19 é apresentado o gráfico com os resultados de análises de microinclusão das 1800 amostras para inclusão do Tipo B (alumina) série grossa, na condição da seção de molde 155x155 mm. Foram assinalados no gráfico os limites técnicos requeridos pelo cliente, que são: o limite inferior especificado (LIE) e o limite superior especificado (LSE), representados pelo nível 0 e nível 1 respectivamente.

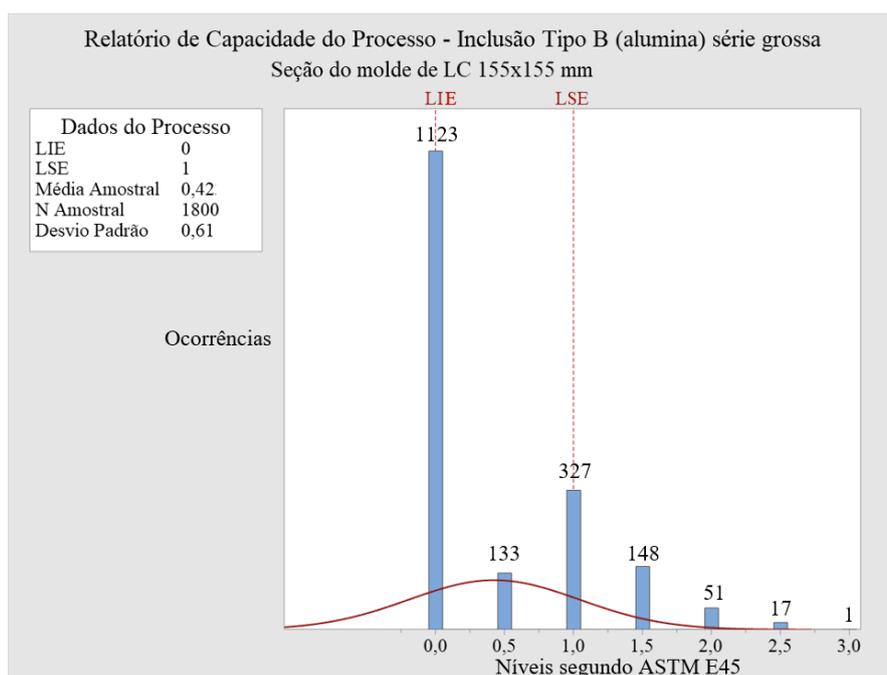


Figura 19 – Resultados dos ensaios de microinclusão para inclusão Tipo B (alumina) série grossa com seção do molde 155x155 mm. Fonte: o autor.

Pode-se observar que a média dos resultados dos ensaios de microinclusão para inclusão do Tipo B (alumina) série grossa é 0,42 e o desvio padrão encontrado foi 0,61. Das 1800 amostras analisadas, com relação aos níveis segundo a norma ASTM E45: 1123 tiveram o nível 0 como resultado, o que equivale a mais de 60% das amostras; 133 tiveram o nível 0,5; 327 tiveram o nível 1 como resultado; 148 tiveram o nível 1,5; 51 tiveram o nível 2; 17 foram obtidos como nível 2,5 e para finalizar somente 1 das amostras teve o nível 3 como resultado.

Já na figura 20 é apresentado o gráfico com os resultados de análises de microinclusão das 1800 amostras para inclusão Tipo B (alumina) série grossa, na condição de seção de molde 240x240 mm. Também está apresentado neste gráfico os limites inferiores e superiores requeridos pelo cliente assim como no anterior.

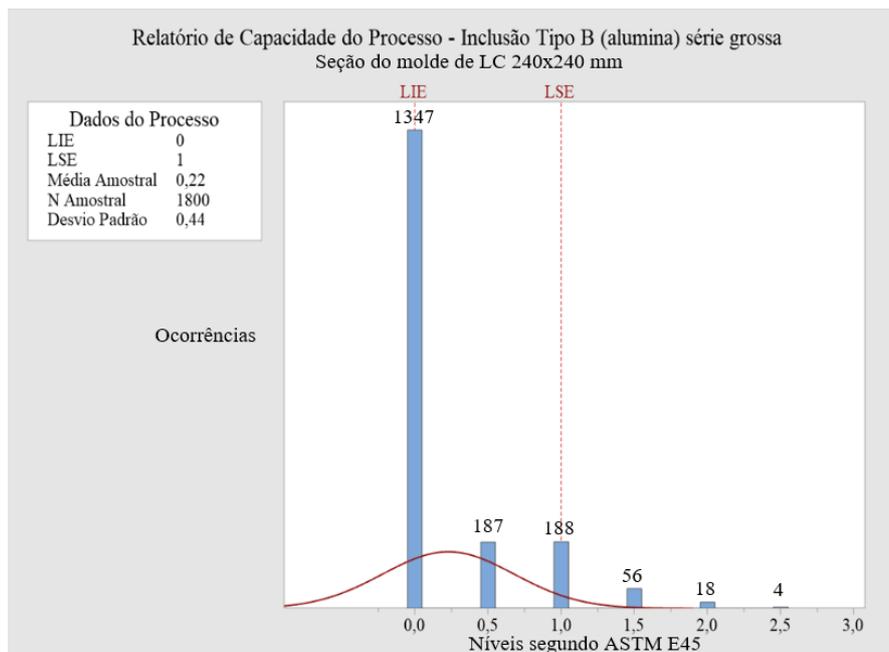


Figura 20 – Resultados dos ensaios de microinclusão para inclusão Tipo B (alumina) série grossa com seção do molde 240x240 mm. Fonte: o autor.

Como pode-se perceber a média dos resultados para inclusão Tipo B (alumina) série grossa para esta diferente condição de processo é 0,22 e o desvio padrão foi 0,44. Sendo os resultados obtidos segundo a norma ASTM E45 para esta condição de processo: 1347 tiveram o nível 0 como resultado, sendo este valor referente a quase 75% das amostras; 187 tiveram o nível 0,5; 188 tiveram o nível 1 como resultado; 56 tiveram o nível 1,5; 18 tiveram o nível 2 e 4 amostras com o nível 2,5, sendo que em nenhuma das 1800 amostras foi encontrado nível 3.

Ao comparar os resultados das duas condições de processo, pode-se perceber que no processo que tem a seção de molde maior os resultados foram melhores em comparação ao de seção de molde menor, tendo em vista o que foi comentado na revisão de literatura, por ter uma velocidade de lingotamento mais lenta, os tarugos vazados na seção de molde 240x240 mm possuem um tempo maior para flotação das inclusões, e por possuírem uma redução de área maior para as barras laminadas, as inclusões se dispersam mais ao longo da barra (MACHADO, 2014).

Estes resultados melhores podem ser percebidos pela diminuição da média dos resultados, sendo na condição de molde menor a média é 0,42 e na seção de molde maior a média cai para 0,22; também pode-se perceber ao avaliar a queda do desvio padrão destes resultados, na seção menor foi de 0,61 e na seção de molde maior 0,44, ou seja, tem-se uma menor dispersão dos resultados obtidos das análises, sendo estes mais próximos do valor da média. Também a partir destes resultados pode-se averiguar que,

sabendo os limites inferiores e superiores especificados (níveis 0 e 1, respectivamente), mais resultados foram obtidos dentro de especificação nas análises da seção de molde maior, isto é perceptível com o auxílio da frequência acumulada, para seção 155x155 mm tem-se que 87,94% dos resultados estão entre os níveis 0 e 1 (dentro do especificado), já para seção 240x240 mm os resultados alcançam a marca de 95,67%.

Ao serem analisados os resultados obtidos para os níveis maiores, ou seja, segundo a classificação da norma ASTM E45 aqueles que apresentam as inclusões mais espessas e compridas, sendo consideradas inclusões grosseiras (ASTM E45, 2013), também é fácil visualizar que os resultados são melhores, ou seja, menor quantidade de inclusões grosseiras foram encontradas ao serem analisadas as amostras vindas a partir de barras laminadas de tarugos de seção 240x240 mm, por exemplo não foram encontradas amostras para o nível 3 da classificação e para seção menor teve ocorrência de uma amostra. Isso vale para os níveis 2 e 2,5, na seção maior tiveram menos ocorrências em comparação a seção de molde 155x155 mm.

4.1.2 Inclusão do Tipo DS (globular único)

Na figura 21 é exposto o gráfico contendo os resultados das análises de microinclusão das 1800 amostras para inclusão do Tipo DS (globular único), para as corridas que foram vazadas na seção de molde 155x155 mm. Assim como para os casos anteriores, também foram assinalados no gráfico os limites técnicos requeridos pelo cliente: o limite inferior especificado (LIE) e o limite superior especificado (LSE), porém para este tipo de inclusão o limite superior requerido é diferente, nível 0,5. O limite inferior também é 0 - igual aos casos já mostrados.

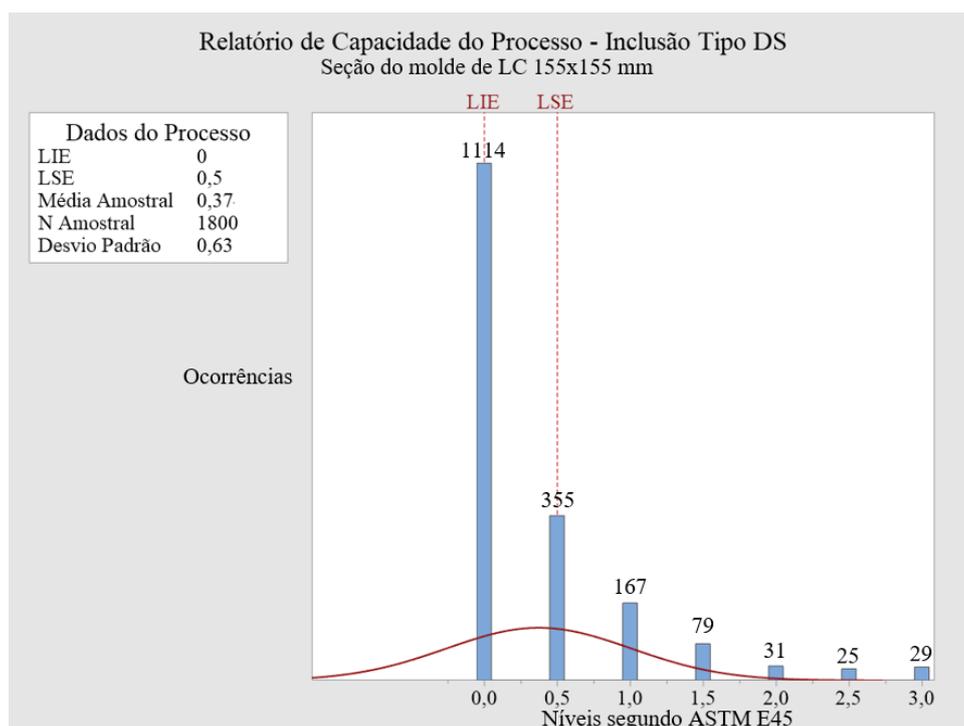


Figura 21 – Resultados dos ensaios de microinclusão para inclusão Tipo DS (globular único) com seção do molde 155x155 mm. Fonte: o autor.

Observando o gráfico, é visto que a média dos resultados dos ensaios de microinclusão para inclusão do Tipo DS (globular único) é 0,37 e o desvio padrão encontrado foi 0,63. Das 1800 amostras analisadas, com relação aos níveis segundo a norma ASTM E45 para a inclusão do Tipo DS: 1114 tiveram o nível 0 como resultado, cerca de 62% das amostras; 355 tiveram o nível 0,5; 167 tiveram o nível 1 como resultado; 79 tiveram o nível 1,5; 31 tiveram o nível 2; 25 foram obtidos como nível 2,5 e para finalizar 29 amostras tiveram o nível 3 como resultado.

Já na figura 22 é apresentado o gráfico com os resultados de análises de microinclusão das 1800 amostras para inclusão do Tipo DS (globular único), na condição de seção de molde 240x240 mm.

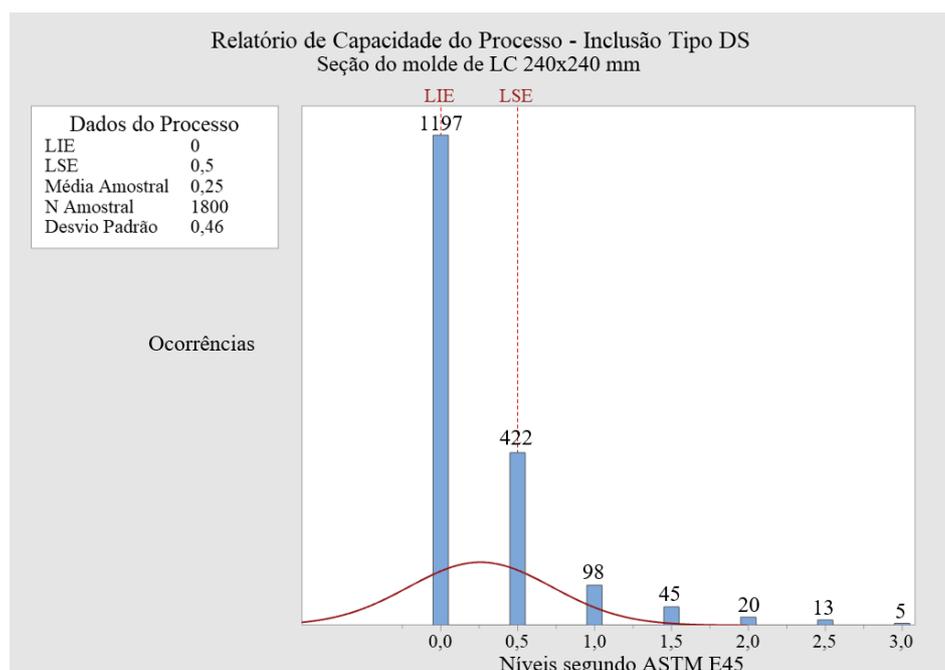


Figura 22 – Resultados dos ensaios de microinclusão para inclusão Tipo DS (globular único) com seção do molde 240x240 mm. Fonte: o autor.

A partir do gráfico é possível perceber que a média dos resultados para a inclusão do Tipo DS (globular único) para esta diferente condição de processo é 0,25 e o desvio padrão foi 0,46. Sendo os resultados obtidos segundo a norma ASTM E45 para esta condição de processo: 1197 tiveram o nível 0 como resultado; 422 tiveram o nível 0,5; 98 tiveram o nível 1 como resultado; 45 tiveram o nível 1,5; 20 tiveram o nível 2; 13 amostras com o nível 2,5, e somente 5 das 1800 amostras foi encontrado nível 3. Também está apresentado neste gráfico os limites inferiores e superiores requeridos pelo cliente assim como no anterior.

Assim como para as inclusões do Tipo B (alumina) série grossa, os mesmos comentários são válidos, é possível visualizar a melhora nos resultados obtidos pelo ensaio de microinclusão para inclusão do Tipo DS (globular único) de barras laminadas vindas de tarugos vazados com seção de molde 240x240 mm. Esta melhora é perceptível vendo a diminuição da média e do desvio padrão, igualmente no caso anterior. A média diminuiu de 0,37 para 0,25 e o desvio padrão foi de 0,63 para 0,46. O mesmo estudo de Machado (2014) é válido para a comprovação destes resultados.

Também é importante comentar a diminuição de ocorrências de inclusões grosseiras ao comparar os resultados das duas condições distintas. Sendo que em somente 5 amostras de 1800 foram encontradas inclusões grosseiras do nível 3 para a seção de

molde 240x240 mm o que equivale a 0,28% das amostras, enquanto, para a outra condição o número de ocorrências foi de 29.

4.2 Rejeição em linha devido à macroinclusões

A partir dos relatórios gerados pela linha de inspeção 1 da usina siderúrgica, que são utilizados como banco de dados para o programa Power BI gerado pela área de Engenharia de Inspeção, foram feitos alguns filtros com o objetivo de visualizar os percentuais de rejeição em linha devido à macroinclusão para as barras laminadas do aço DIN 38B3. Os seguintes filtros foram selecionados: o período em que se decorreu o estudo, abril de 2022 a fevereiro de 2023; o aço DIN 38B3; o tipo de defeito decorrente da rejeição: macroinclusão; e a seção do molde de LC.

Na figura 23 é apresentado o gráfico resultante destes filtros selecionados no Power BI, sendo possível comparar os percentuais de rejeição em linha por ultrassom das duas diferentes condições de processo estudadas neste trabalho.

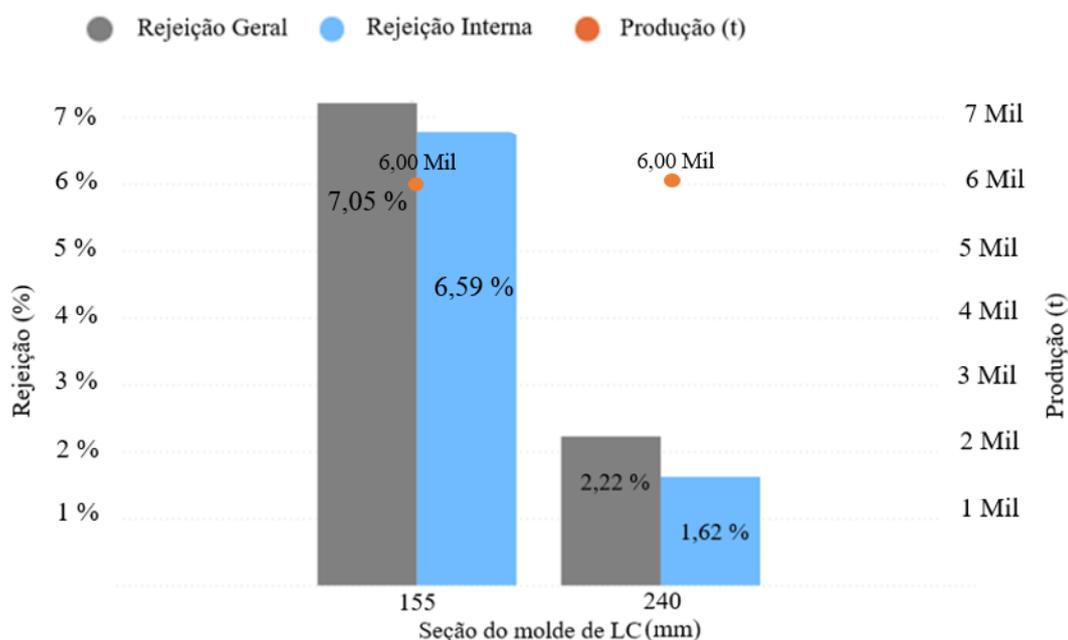


Figura 23 – Gráfico com os resultados de rejeição em linha de inspeção por ultrassom para as diferentes seções de molde de LC (155x155 mm e 240x240 mm). Fonte: o autor.

Pode-se perceber pelo gráfico que as rejeições em linha de inspeção por ultrassom foram maiores em percentual para a condição de seção de molde 155x155 mm, sendo a rejeição geral ao longo do período de estudo 7,05% e a rejeição interna 6,59%, com a

produção de cerca de 6 mil toneladas de aço. Já para seção de molde 240x240 mm os resultados percentuais foram menores, ficando em 2,22% a rejeição geral e 1,62% a rejeição interna, com a produção de cerca de 6 mil toneladas de aço. Sendo a rejeição geral o indicador que mede diversos desvios do processo, além de rejeição devido macroinclusões, como diferença de comprimento por exemplo. Já a rejeição interna sinaliza somente as barras rejeitadas em linha devido aparecimento de macroinclusões no material acima do limite especificado no equipamento de ultrassom. Para as diferentes condições estudadas neste trabalho o limite aplicado no equipamento de ultrassom para classificar o material como rejeitado ou não, foram os mesmos, por isso é válido a comparação direta nos resultados de percentuais de rejeição.

Com estes resultados observados no gráfico pode-se afirmar que, em percentual, menos barras laminadas foram rejeitadas em linha de inspeção por ultrassom quando produzidas a partir de corridas vazadas em tarugos de seção 240x240 mm. Com foco na rejeição interna, que é o indicador que representa a rejeição devido macroinclusão, obteve-se a redução de 4,97 pontos percentuais, e esta porcentagem equivale em volume de material a aproximadamente 5 corridas, cerca de 300 toneladas de aço. Sendo assim, é possível afirmar que pelo método de inspeção por ultrassom, ao ser produzido o mesmo volume de material, quando se aumenta a seção de molde de LC menores são as ocorrências de macroinclusões, reduzindo o percentual de rejeição em linha e liberando mais material para o cliente.

Das 6 mil toneladas de aço DIN 38B3 produzidas partindo de tarugos produzidos na seção de molde 155x155 mm que passaram na linha de inspeção 1 no período de abril de 2022 a fevereiro 2023, foram rejeitadas cerca de 395 toneladas devido à macroinclusões. Em contrapartida, quando produzido na seção de molde 240x240 mm, de 6 mil toneladas produzidas no período de estudo, somente cerca de 97 toneladas foram rejeitadas devido à macroinclusão. Como em cada corrida são produzidas em torno de 60 toneladas de aço, ao serem fabricados 100 corridas na seção de molde de 155x155 mm, 6,5 corridas são rejeitadas na inspeção por ultrassom e menos de 2 corridas são rejeitadas partindo de seção de molde 240x240 mm, ou seja, se obtém um ganho de quase 5 corridas para serem liberadas.

Os resultados obtidos a partir destes relatórios de rejeição em linha, sustentam os resultados também alcançados no estudo de Machado (2014), onde foram encontrados em médias percentuais um número maior de inclusões passantes pelo veio de lingotamento ao aumentar a velocidade da máquina de LC.

5. CONCLUSÕES

Com o estudo deste trabalho foi possível realizar a avaliação da limpeza inclusionária do aço DIN 38B3 ao alterar a seção do molde de lingotamento contínuo, sendo historicamente produzido na seção 155x155 mm para a seção 240x240 mm. Foram avaliados os resultados de ensaios de microinclusão por microscopia óptica e o percentual de rejeição em linha automática pelo método de ultrassom de corridas produzidas na usina siderúrgica, e este volume de material produzido equivale a cerca de 6 mil toneladas de aço avaliadas em cada condição.

Ao aumentar a seção do molde de LC, a partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- Menor número de ocorrências de inclusões grosseiras do Tipo B (alumina) série grossa, com somente 78 amostras de 1800, igual a 4,33%;
- Menor número de ocorrências de inclusões grosseiras do Tipo DS (globular único), com 181 amostras de 1800, sendo 10,06% dos resultados, na outra seção foi 18,39%;
- Diminuição da média dos resultados das análises de microinclusão para inclusão do Tipo B (alumina) série grossa, passando de 0,42 para 0,22;
- Diminuição da média dos resultados das análises de microinclusão para inclusão do Tipo DS (globular único), passando de 0,37 para 0,25;
- Maior percentual de ocorrências dentro dos limites especificados para o cliente para inclusão do Tipo B (alumina) série grossa, alcançando a marca de 95,67% das amostras dentro de especificação;
- Maior percentual de ocorrências dentro dos limites especificados para o cliente para inclusão do Tipo DS (globular único), com 89,94% das amostras dentro da faixa especificada;
- Redução de 4,97% pontos percentuais de barras rejeitadas em linha de inspeção por ultrassom, o que equivale a liberação de aproximadamente 300 toneladas a mais de aço.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo da elaboração deste trabalho foram levantadas suposições que não puderam ser sanadas com os métodos aplicados, dando espaço para o desenvolvimento de novos trabalhos para complementar o estudo. Sendo algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realização de ASPEX em amostras de aço líquido e de barras laminadas afins de comparação dos resultados para avaliar a distribuição das inclusões após lingotamento contínuo em diferentes seções de molde;
- Estudo da influência da escória na limpeza inclusionária do aço DIN 38B3;
- Utilização de outros métodos para avaliar a limpeza inclusionária do aço, como exemplos: medição de oxigênio total e *pick up* de nitrogênio, para complementar os empregados neste trabalho;
- Utilizar os métodos desenvolvidos neste trabalho para avaliação de outros aços com problemas relacionados a limpeza inclusionária.

7. REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, S.; BODNAR, R.; RAINES, J. Inclusion Engineering and the Metallurgy of Calcium Treatment. In: AISTech, 2013, Pittsburgh. **Proceedings...**, Warrendale, 2013. p 1243 – 1257.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 45-18: standard test methods for determining the inclusion content of steel. West Conshohocken, 2018. 19p.
- BANNENBERG, N.; HARSTE, K. **Improvements in Steel Cleanliness by tundish Inertization**. La Revue de Metallurgie. Janvier 1993. 71-76.
- BARTOSIAKI, B. G. **Estudo de Inclusões Não-Metálicas de Óxidos no aço SAE 52100 Durante Processo de Aciaria Elétrica**. Dissertação. PPGEM: UFRGS. 2016. 139.
- BIELEFELDT, W. V. Tratamento de inclusões não-metálicas com cálcio nos aços SAE 1141 e SAE 8620. 2009. 168 f. Tese (Doutorado) – PPGE3M: UFRGS, 2009.
- BIELEFELDT, W. V. **Estudo de tratamento de inclusões com cálcio na fabricação do aço SAE 8620**. Dissertação. PPGE3M: UFRGS, 2005.
- COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. São Paulo: Edgard Blucher v. 3, 1974.
- DEKKERS, R. **Non-metallic Inclusions in Liquid Steel**. Germany, 2002, Tese de Doutorado, Departamento de Geografia e Geologia, Universidade Católica de Lauven.
- GERDAU. **AC-554 Aço Limpo I**. Escola Técnica – Aciaria, 2016.
- GHOSH, A. **Secondary Steelmaking – Principles and Applications**. New York: CRC Press LLC, 2001.
- HOLAPPA, L. et al. Thermodynamic examination of inclusion modification and precipitation from calcium treatment to solidified Steel. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 30, n. 2, 2003. 111-115.
- HOLAPPA, L. E. K.; HELLE, A. S. Inclusion Control in High-Performance Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, Espoo, n. 53, 1995. 177-186.
- HOLAPPA, L. et al. Active Tundish Slag. **Steel Research International**, 84, 2013. p. 638-648.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4967: steel — determination of content of nonmetallic inclusions — micrographic method using standard diagrams. Genebra, 2013, 44p.
- JANKE, D. et al. **Improvement of Castability and Quality of Continuously Cast Steel**. *ISIJ International*, v. 40, nº 1, 2000.

KIESSLING, R. **Non-metallic inclusions in steel**. London: Metals Society, 1978.

KWIETNIEWSKI, C. F.; KISS, F. J. **Metalografia e Tratamentos Térmicos de Aços e Ferros Fundidos**. UFRGS, 2011.

LIBÓRIO, A. J. **Melhorias no desempenho de injetores supersônicos em um forno elétrico a arco**. Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2009.

MACHADO, F. D. **Modelagem física de remoção de inclusões em distribuidor de lingotamento contínuo de tarugos**. Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2014.

MANDAL, S. K. **Steel Metallurgy: Properties, Specifications and Applications**. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

MAPELLI, C. Non-metallic inclusions and clean steel. **La Metallurgia Italiana**, 2008. 43-52.

MARTIN, C. C. **Ultrassom**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção – Abendi. 2014.

MATSUMOTO, T.; WATANABE, Y.; YAMAUCHI, T. Recent Development to Decrease Spinel-Type Inclusions by Modification Slag Composition at Ladle Furnace. **AISTech Proceedings**, 2018. 1273-1283.

MILLMAN, S. **Clean Steel – Basic Features and Operation Practices**. IISI Study on Clean Steel. IISI Committee on Technology, 2004.

MOURÃO, M. B. **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2007.

MOURÃO, M. B. **Fundamentos da Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2013.

NAKANISHI, K. Japanese State of the Art Continuous Casting Process. **ISIJ International**, 36, 1996. 14-17.

PEREIRA, J. A. M.; BIELEFELDT, W. V.; VILELA, A. C. F. Alguns aspectos sobre a formação de inclusões de espinélio nos aços. 70º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 15º ENEMET, Rio de Janeiro, 2015. 1848-1859.

PICKERING, F. B. **Effect of Composition and Microstructure on Ductility and Toughness**. Toward Improved Ductility Toughness, Climax Molybdenum Development Co. (Japan) Ltd. 1972. 9-31.

RIZZO, M. D. S. **Introdução aos Processos Siderúrgicos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2005.

RIZZO, M. D. S. **Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2006.

SILVA, F. C. **Avaliação da sensibilidade da técnica de ultrassom através de curvas ROC.** UFRJ. 2011. 14

SILVA, A. L. V. D. C. E.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais.** 2ª ed. Edgard Blucher, 2006.

STORY, S. R. et al. **Inclusion Analysis to Predict Casting Behavior.** Iron & Steel Technology, Indianapolis, 2004. 163-169.

TESTIA. **Ultrasounds Testing – General Training.** Toulouse, 2009.

TIEKINK, W. et al. Some aspects of alumina created by deoxidation and reoxidation in steel. **Ironmaking and Steelmaking.** 37, 2010. 488-495.

ZHANG, L.; THOMAS, B. G. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness. **ISIJ International,** 43, n. 3, 2003. 271-291.