

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

Departamento de Metalurgia

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA INJEÇÃO DE GÁS NITROGÊNIO POR MEIO DE  
HASTES TAMPÃO NA LIMPEZA E LINGOTABILIDADE DE AÇOS ESPECIAIS.

**Franciele de Almeida Silva**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Ing. Antônio Cezar Faria Vilela

Porto Alegre  
2016

## DEDICATÓRIA

Este trabalho é inteiramente dedicado à minha mãe, base da minha  
existência e fundamento do meu ser.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Elisabete Regina de Almeida Silva, pelo sempre presente apoio e suporte sem medida de esforços, pelo amor, educação e sabedoria proporcionada desde a minha existência. À minha irmã Samanta de Almeida Silva pelo carinho e companheirismo de sempre.

Ao professor Dr. Ing. Antônio Cezar F. Vilela, pela atenção e orientação deste trabalho.

Ao Ms. Eng. Juliano Graziel Serra pela confiança na elaboração deste trabalho.

Aos colegas de trabalho, Ms. Eng. Marino Moscardini dos Passos Junior, Ms. Eng<sup>a</sup>. Bruna Goulart Bartosiaki, Eng. Eduardo Silva Nascimento, Ms. Eng<sup>a</sup> Ayumi Yoshioka e Ms. Eng. Paulo Carvalho Fernandes, pelo apoio e cooperação na realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	II
AGRADECIMENTOS .....	III
LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABELAS .....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	XII
RESUMO .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
2.1 O Processo Siderúrgico .....	3
2.2 Aciaria Elétrica .....	5
2.2.1 Pátio de Sucatas .....	6
2.2.2 Forno Elétrico a Arco (FEA) .....	8
2.2.3 Forno-Panela (FP).....	9
2.2.4 Desgaseificador a vácuo ( <i>Vacuum Degassing</i> – VD).....	11
2.2.5 Lingotamento Contínuo (LC) .....	12
2.3 Inclusões não-metálicas .....	15
2.3.1 Origem e formação das inclusões .....	17
2.3.2 Características físicas das inclusões.....	21
2.3.3 Inclusões e lingotabilidade.....	28
2.3.4 Deposição de inclusões nas válvulas submersas – <i>Clogging</i> .....	32
2.3.5 Diagramas ternários aplicados a sistemas de inclusões .....	37
2.4 Aços limpos .....	39
2.4.1 Considerações iniciais.....	39
2.4.2 Remoção de inclusões no Forno-Panela .....	42
2.4.3 Remoção de inclusões no lingotamento contínuo.....	44
2.4.4 Uso de tampões com injeção de gases para limpeza dos aços .....	46
3. MATERIAIS E METODOLOGIA .....	50
3.1. Tipo de aço utilizado .....	50
3.2. Equipamentos e parâmetros de processo da Aciaria .....	52
3.3. Fluxograma de práticas experimentais .....	54
3.3.1 Preparo do distribuidor .....	54

3.3.2 Seleção do gás .....	58
3.3.3 Vazão e pressão utilizadas .....	59
3.3.4 Lingotamento .....	60
3.3.5 Amostragem.....	61
3.3.5.1 Amostragem de tarugos.....	62
3.3.5.2 Amostragem de depósitos presentes nas válvulas submersas ...	63
3.3.5.3 Amostragem na laminação .....	64
3.3.6 Preparo das amostras para análise via microscopia eletrônica de varredura automatizada acoplada à espectrometria de energia dispersiva (ASPEX) .....	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	67
4.1 Lingotabilidade .....	67
4.2 Depósito inclusionário nas válvulas submersas.....	70
4.3 <i>Pinholes</i> e macroinclusões nos tarugos .....	74
4.4 <i>Pick-up</i> de nitrogênio.....	76
4.5 Quantidade, dispersão e tamanho de inclusões nas barras laminadas .....	78
5. CONCLUSÕES .....	84
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Processo siderúrgico, rotas via Usina Integrada e Semi-integrada. (Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).....	3
Figura 2.2: Processo de reciclagem do aço. (Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014) .....	6
Figura 2.3: Pátio de sucatas: a) Retirada das sucatas do caminhão. B) Guilhotina da prensa tesoura. (Fonte: BIELEFELDT, 2005).....	7
Figura 2.4: Forno Elétrico a Arco. (Fonte: MATIELLO, 2011) .....	8
Figura 2.5: Representação de uma estação de refino secundário forno-panela. (Fonte: Adaptado de RIZZO, 2006) .....	10
Figura 2.6: Representação esquemática de um desgaseificador a vácuo tipo tanque. (Fonte: Adaptado de FRUEHEN, 1998).....	12
Figura 2.7: Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo. (Fonte: Adaptado de RIZZO, 2006) .....	13
Figura 2.8: Representação do mecanismo de formação e propagação de trincas. (Fonte: Adaptado de SILVA, 2009) .....	16
Figura 2.9: Morfologias típicas de inclusões de alumina. (Fonte: ZHANG, 2003). .....	19
Figura 2.10: Morfologias típicas de inclusões extraídas da matriz. A) pequena inclusão esférica; b) inclusão octaédrica; c) pequena inclusão poliédrica; d) grande inclusão poliédrica; e) inclusão em forma de placas; f) inclusão dendrítica; g) cluster de inclusões; h) inclusões agregadas. (Fonte: DEKKERS, 2002).....	22
Figura 2.11: Representação esquemática da adição de cálcio no banho de aço líquido. (Fonte: Adaptado de VISSER, 2016). .....	24

Figura 2.12: Representação esquemática da ação do cálcio na modificação das inclusões. (Fonte: Adaptado de FRUEHAN, 2002).....	25
Figura 2.13: Modificação da morfologia da inclusão de alumina para cálcio-aluminato. (Fonte: Adaptado de HOLLAPA, 2014).....	25
Figura 2.14: Efeito do teor de cálcio na composição das inclusões. (Fonte: Adaptado de CICUTTI, 2016).....	26
Figura 2.15: Relação entre a fração sólida das inclusões e a lingotabilidade dos aços. (Fonte: CICUTTI, 2016).....	27
Figura 2.16: Diagrama binário do sistema $Al_2O_3$ -CaO. (Fonte: Adaptado de SLAG ATLAS, 1995).....	29
Figura 2.17: Linha de saturação para cálcio-aluminato e CaS e janela de inclusões líquidas para diferentes níveis de enxofre a 1600°C. (Fonte: HOLAPPA, 1995) .....	30
Figura 2.18: Linha de saturação para cálcio-aluminato e CaS e janela de inclusões líquidas para diferentes níveis de enxofre a 1550 °C. (Fonte: HOLAPPA, 1995) .....	30
Figura 2.19: Linha de saturação para cálcio-aluminato e CaS e janela de inclusões líquidas para diferentes níveis de enxofre a 1520 °C. (Fonte: HOLAPPA, 1995) .....	30
Figura 2.20: Efeito do $O_2$ nas janelas de inclusões líquidas com 100 ppm (à esquerda) e 250 ppm de S (à direita). (Fonte: HOLAPPA, 1995).....	31
Figura 2.21: Comparação do nível do molde e posição do tampão entre uma corrida padrão ideal a) e uma corrida com ocorrência de clogging b). (Fonte: adaptado de BANNENBERG, 1995) .....	33
Figura 2.22: Comparação entre válvulas com (b) e sem clogging (a). (Fonte: Cortesia Gerdau) .....	34
Figura 2.23 – Regiões favoráveis à deposição de inclusões no distribuidor. (Fonte: CONTINI, 2011).....	35
Tabela 2: Aplicação de sistemas ternários nas diferentes etapas do processo. (Fonte: BARTOSIAKI, 2013) .....	37

Figura 2.24: Diagrama ternário para o sistema CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO. (Fonte: SLAG ATLAS, 1995).....	38
Figura 2.25: Trajetória da modificação das inclusões. (Fonte: GARCIA JUNIOR, V., 2009)	39
Figura 2.26: Influência da rinsagem na remoção das inclusões. (Fonte: Adaptado de HOLAPPA, 2014) .....	43
Figura 2.27: Fontes de reoxidação e mobiliário típico dos distribuidores. (Fonte. Adaptado de ZHANG, 2002).....	44
Figura 2.28: Esquemática de um distribuidor com sistema de inertização por argônio. (Fonte: FERNANDES, 2007) .....	46
Figura 2.29: Representação esquemática da injeção de gás pela válvula tampão.....	47
Tabela 3: Faixa de composição química do aço SAE 1045 MOD.....	50
Figura 3.1: Janela de lingotabilidade para o aço SAE 1045MOD com 0,018% de enxofre e 20ppm de oxigênio à 1525 °C. (Fonte: Simulado via FactSage pelo LaSid, UFRGS, 2014).....	51
Figura 3.2: Exemplo de componente (a) e junta homocinética completa (b).....	52
Figura 3.3: Etapas de fabricação do aço, com destaque para o lingotamento contínuo de tarugos. (Fonte: adaptado de GARCIA JUNIOR, 2009) .....	53
Figura 3.4: Detalhamento da região de interesse do lingotamento contínuo: (a) macro-visão mostrando panela, distribuidor e moldes; (b) ampliação da região dos veios, onde o aço escoava do distribuidor para os moldes. (Fonte: adaptado de GARCIA JUNIOR, 2009). .....	53
Figura 3.5: Sequência adotada para os testes. ....	54
Figura 3.6: Desenho em três dimensões do distribuidor de lingotamento contínuo utilizado. (Fonte: TRINDADE, 1999).....	55
Figura 3.7: Tampão adotado nos testes, em destaque os orifícios centrais para a passagem de gás. (Fonte: Cortesia Gerdau).....	56

Figura 3.8: Acoplamento das tubulações de gases nos tampões. ....	57
Figura 3.9: a) Haste metálica para passagem de gases. B) Detalhe de vedação na ponta da haste.....	57
Figura 3.10: Montagem das conexões (a) e linhas de gases (b). ....	58
Figura 3.11: Sequência de amostragem adotada no lingotamento contínuo. ....	61
Figura 3.12: Sequência de amostragem adotada na laminação. ....	62
Figura 3.14: Válvulas submersas após o lingotamento. ....	64
Figura 3.15: Amostragem de corpo de prova para análise em ASPEX das barras laminadas. ....	65
Figura 3.16: Corpo de prova pronto para ser analisado.....	65
Figura 4.1: Variação da posição dos tampões para um sequencial padrão de 4 corridas. ....	67
Figura 4.2: Variação da posição dos tampões para um sequencial de teste de 4 corridas, com injeção de gás. ....	68
Figura 4.3: Válvulas utilizadas no lingotamento das corridas do sequencial padrão. ....	70
Figura 4.4: Destaque para o depósito presente no veio 2. ....	70
Figura 4.5: Resultados de MEV-EDS para os três veios analisados. ....	71
Figura 4.6: Válvulas utilizadas no lingotamento das corridas do sequencial de teste.....	72
Figura 4.7: Resultados de MEV-EDS para os três veios analisados do sequencial de teste. ....	73
Tabela 5: Síntese dos defeitos encontrados nos tarugos.....	74
Figura 4.8: Macrografias para inspeção de macroinclusões e <i>pinholes</i> . ....	75
Figura 4.9: Comportamento do nitrogênio ao longo do processo. Média dos valores históricos da planta para o aço SAE 1045MOD. ....	76
Tabela 6: Valores de nitrogênio encontrados em cada corrida.....	77
Figura 4.10: Análises de ASPEX para as corridas A, B, C e D do sequencial padrão.....	79

Figura 4.11: Análises de ASPEX para as corridas 1, 2, 3 e 4 do sequencial teste. ....	80
Figura 4.12: Média de inclusões obtidas por faixa de tamanho (a) e área varrida (b) para o aço SAE 1045MOD com e sem a utilização de gás nitrogênio pelos tampões. ....	81
Figura 4.13: Número total de inclusões obtidas ao longo do sequencial (a) e área total ocupada pelas inclusões (b) para o aço SAE 1045MOD com e sem a utilização de gás nitrogênio pelos tampões.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades de diferentes cálcio-aluminatos, CaO e sulfetos. (Fonte: CICUTTI, 1997) .....	28
Tabela 2: Aplicação de sistemas ternários nas diferentes etapas do processo. (Fonte: BARTOSIAKI, 2013) .....	37
Tabela 3: Faixa de composição química do aço SAE 1045 MOD. ....	50
Tabela 4: Variações de altura dos tampões para os sequenciais padrão e de teste.....	68
Tabela 5: Síntese dos defeitos encontrados nos tarugos.....	74
Tabela 6: Valores de nitrogênio encontrados em cada corrida.....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Al - Alumínio

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Alumina

C - Carbono

CA - Cálcio-aluminato

Ca - Cálcio

CaO – Óxido de cálcio

CaS – Sulfeto de Cálcio

Cd – Cádmi

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

Cr - Cromo

Cu - Cobre

C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> – Cálcio-aluminato do tipo 12CaO.7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fe - Ferro

FEA - Forno Elétrico a Arco

FeO - Óxido de Ferro

FP - Forno-Panela

g - aceleração da gravidade (9,81 m.s<sup>-2</sup>)

H - Hidrogênio

LASID - Laboratório de Siderurgia

LC - Lingotamento Contínuo

MEV/EDS - Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada à Espectrometria de Energia Dispersiva

Mg - Magnésio

MgO - Óxido de Magnésio

MgO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Espinélio

Mn - Manganês

MnO - Óxido de Manganês

MnS – Sulfeto de Manganês

Mo - Molibdênio

N - Nitrogênio

Ni - Níquel

O - Oxigênio

P - Fósforo

ppm - partes por milhão ( $10^{-4}$  %)

r - raio da inclusão (m)

S – Enxofre

SAE - Society of Automotive Engineers

Sb - Antimônio

Si - Silício

SiO<sub>2</sub> – Sílica

Sn - Estanho

T - Temperatura

Ti - Titânio

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VD - Desgaseificador a Vácuo

V<sub>f</sub> - velocidade de flotação das inclusões (m.s<sup>-1</sup>)

X1- amostra de aço retirada na chegada ao forno-panela (FP)

X2- amostra de aço retirada antes de tratamento no desgaseificador a vácuo (VD)

X3- amostra de aço retirada após o tratamento no desgaseificador a vácuo (VD)

XF- amostra de aço retirada no distribuidor de lingotamento contínuo (LC)

Σ - Somatório

ΔG° - variação da energia livre padrão de Gibbs (kJ.mol<sup>-1</sup>)

η - coeficiente de viscosidade do aço (0,0025 kg.s<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>)

ρ<sub>a</sub> massa específica do aço líquido (kg.m<sup>-3</sup>)

ρ<sub>i</sub> massa específica da inclusão (kg.m<sup>-3</sup>);

μm - micrometro (10<sup>-6</sup> m)

°C - Graus Célsius

## RESUMO

Para a realização deste trabalho, foram realizados testes em escala industrial em uma usina siderúrgica voltada à produção de aços para a indústria automotiva. O trabalho se baseia no estudo do efeito da injeção de gás nitrogênio pela ponta das válvulas tampão utilizadas no distribuidor do lingotamento contínuo. Para tanto, foram avaliados parâmetros de controle para a presença de macroinclusões, a lingotabilidade ao longo dos testes, assim como a presença de *pinholes* nos tarugos e depósitos nas válvulas submersas. Para fins de verificação da influência do nitrogênio sob a composição química, avaliou-se também o *pick-up* de nitrogênio das corridas testadas. Amostragens de aço líquido no distribuidor, tarugos e barras foram realizadas para avaliar o comportamento das inclusões. Amostragem de depósitos de válvulas com e sem a injeção de nitrogênio pelos tampões foram realizadas para avaliar o acúmulo de inclusões no local e a tendência à “*clogging*”. Testes prévios a este trabalho foram realizados com o uso de gás argônio, mostrando-se eficientes para macroinclusões porém, com excessiva geração de *pinholes* nos tarugos. Além destes, testes realizados com nitrogênio em apenas um veio para qualidade semelhantes se mostraram muito promissores, levando a segurança quanto à realização do uso de nitrogênio nos três veios. Como resultado, as análises indicaram uma melhora da lingotabilidade do aço, quase nenhuma presença de *pinholes* e isenção de macroinclusões nos tarugos. Também foi possível notar uma redução significativa do número de inclusões presentes nas barras laminadas quando comparadas às corridas onde o uso de gás não foi realizado.

Palavras-chave: Tampão, inclusões, nitrogênio, *clogging*, lingotamento contínuo, distribuidor.

## ABSTRACT

For the accomplishment of this work, tests were carried out on an industrial scale in a steel mill focused on the production of steels for the automotive industry. The work is based on the study of the effect of the injection of nitrogen gas by the tip of the stopper rod used in the continuous casting tundish. For that, control parameters were evaluated for the presence of macroinclusions, lingobility throughout the tests, as well as the presence of pinholes in the billets and deposits in the submerged valves. In order to verify the influence of nitrogen under the chemical composition, the nitrogen pick-up of the tested races was also evaluated. Liquid steel samplings at the tundish, billets and bars were performed to evaluate the behavior of the inclusions. Sampling of SEM's deposits with and without nitrogen injection by buffers was performed to evaluate the accumulation of inclusions in the site and the tendency to "clogging". Previous tests were performed with the use of argon gas, being efficient for macroinclusions, but with excessive generation of pinholes in the billets. In addition, tests performed with nitrogen on only one shaft for similar quality showed very promising, leading to safety regarding the use of nitrogen in the three veins. As a result, the analyzes indicated an improvement of the ingotability of the steel, almost no presence of pinholes and exemption of macroinclusions in the billets. It was also possible to notice a significant reduction in the number of inclusions present in the rolled bars when compared to the runs where the gas use was not performed.

Key words: Stopper rod, inclusions, nitrogen, clogging, continuous casting, tundish.

## 1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais a demanda por aços livres de inclusões vem sendo ampliada no mercado. A fabricação de aços especiais tem se tornado cada vez mais complexa devido à engenhosidade de suas características específicas exigidas pelos clientes. E também um desafio para a indústria siderúrgica, quando se trata do controle inclusionário desses aços, sendo imprescindível a limpidez mínima para que não haja um comprometimento das propriedades e do desempenho do produto final. Sendo assim, o completo entendimento e controle das inclusões e dos elementos deletérios às propriedades dos aços são de extrema importância para uma fabricação siderúrgica eficiente. Nesse contexto, as usinas de aços especiais detentoras de “*know how*” de qualidade vem ganhando espaço e competitividade no mercado frente aos seus concorrentes. São chamados de “aços especiais” aqueles onde a fabricação exige um rígido controle de processo, ou seja, são aços fabricados em usinas que possuem um processo controlado voltado à produção de aços limpos. Dentro deste controle, diversas são as formas de se reduzir a presença de inclusões nos aços, sendo as tecnologias refratárias para distribuidores as que mais crescem em termos de desenvolvimento tecnológico para remoção de inclusões.

O uso de gases inertes como barreira contra inclusões vem sendo utilizado à alguns anos por diversas usinas de aços especiais, no entanto, estudos vem sendo desenvolvidos de forma a explorar melhor este recurso no distribuidor. Assim se dá o objetivo deste trabalho, avaliar o efeito da injeção de gás nitrogênio pela ponta das válvulas tampão, sobre a lingotabilidade e limpeza inclusionária de aços especiais, neste caso, optou-se por um aço SAE 1045 MOD.

Utilizou-se de microscopia eletrônica de varredura automatizada para avaliação da limpeza inclusionária de amostras de aço retiradas da laminação de uma planta siderúrgica. Além de avaliações dos parâmetros de lingotabilidade e inspeções nos tarugos do lingotamento contínuo. Como complemento, avaliações de pick-up de nitrogênio e caracterização dos depósitos acumulados nas válvulas submersas foram realizados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da Revolução Industrial, o desenvolvimento de novos fornos na indústria siderúrgica permitiu que aços com melhores propriedades fossem desenvolvidos, definindo-se assim, uma separação clara do conceito de ferro e aço. Graças à melhora de propriedades como resistência ao desgaste, ao impacto e à corrosão, o aço passou a ser o metal mais consumido pela civilização industrial, representando cerca de 90% de todo material consumido pelo homem (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016).

De acordo com o INSTITUTO AÇO BRASIL (2016), a privatização ocorrida de grandes empresas brasileiras do setor siderúrgico trouxe um expressivo afluxo de capitais, despertando o interesse de empresas correlatas e de apoio logístico, buscando alavancos na economia e competitividade no setor.

Atualmente, o parque siderúrgico nacional compõe-se de vinte e nove usinas, administradas por onze grupos empresariais. São eles: Aperam, ArcelorMittal Brasil, CSN, Gerdau, SINOBRAS, Thyssenkrupp CSA, Usiminas, VSB Tubos, Vallourec, Villares Metals e Votorantim. Sendo o Brasil, o maior possuidor do parque industrial siderúrgico da América do Sul, ocupando o sexto lugar como exportador líquido de aço e nono como produtor mundial (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016).

Aqui será apresentada uma revisão bibliográfica a fim de revisar os conceitos de processo siderúrgico, aços limpos e inclusões não metálicas, assim como os principais meios de removê-las.

## 2.1 O Processo Siderúrgico

Hoje em dia, existem basicamente duas rotas de produção de aço no mundo, uma a partir do minério de ferro, e outra focada principalmente na reciclagem de sucatas ferrosas.

A figura 1 ilustra as duas rotas produtivas, classificadas como Usinas Semi-Integrada e Integrada. As usinas Semi-Integradas são aquelas onde parte-se da aciaria elétrica, utilizando o Forno Elétrico a Arco (FEA) carregado com sucata metálica e ferro primário (gusa) sólido ocorrendo o refino oxidante, posteriormente passando à etapa de refino secundário (reductor). Após, o aço é direcionado ao lingotamento contínuo para que sofra solidificação, posteriormente sendo transformado em produtos planos ou longos, na laminação. As usinas Integradas, são aquelas que partem do minério de ferro utilizando um Alto-Forno a coque para a produção de ferro primário (ferro-gusa) para em seguida ocorrer o refino na aciaria a oxigênio (LD). Posteriormente, o aço segue o mesmo caminho que em uma usina Semi-Integrada, passando pelo lingotamento contínuo e laminação (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016).

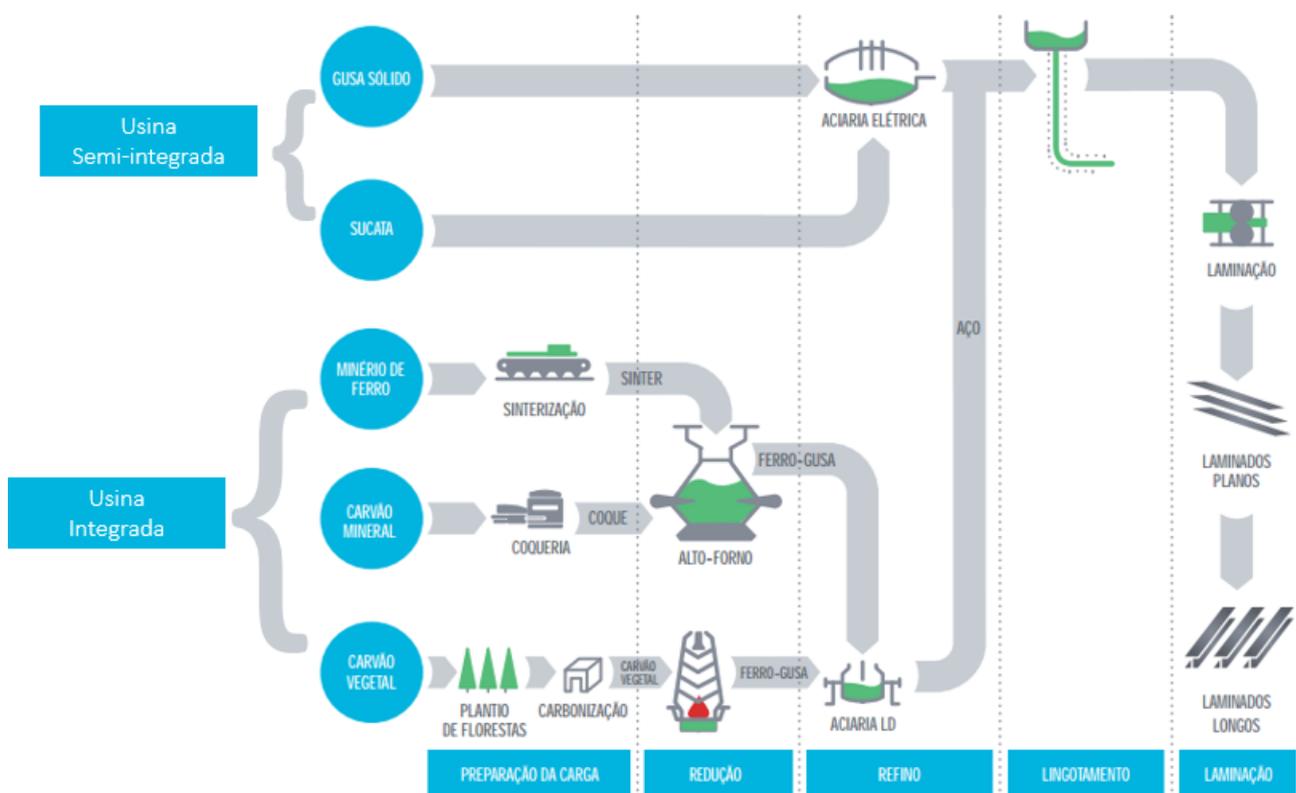


Figura 2.1: Processo siderúrgico, rotas via Usina Integrada e Semi-integrada.  
(Fonte: Adaptado de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014)

- Usinas Integradas

Usinas integradas são aquelas que utilizam as etapas de redução, refino e laminação em seu processo de fabricação do aço. No processo de redução, tem-se a redução do minério de ferro a ferro-gusa (ferro primário) a partir de reações obtidas da interação do minério com um material carbonoso chamado coque.

Minério, coque e fundentes são adicionados no topo do alto-forno que, reagem com os gases ascendentes ocorrendo a fusão da carga a medida que esta desce no sentido do cadinho. Assim, obtêm-se o ferro-gusa.

Com a composição química ajustada, o ferro-gusa, juntamente com uma escória sobrenadante ao banho é depositado líquido no cadinho do alto forno. Após o vazamento, é transportado por carros-torpedo ainda líquido até a aciaria, onde ocorre a transformação do ferro-gusa em aço através do refino oxidante.

O refino oxidante ocorre em conversores a oxigênio (LD), onde sopros de oxigênio são aplicados para ajustar a composição química (descarburação no processo LD) e remover o fósforo da carga.

O aço é então vazado em uma panela siderúrgica e direcionado ao Forno-Panela, onde ocorrerá o refino redutor. Nesta etapa são ajustadas a composição química e temperatura do aço. A última etapa então, ocorre no Lingotamento, este pode ser contínuo ou convencional, dependendo do tipo de aço ou especificação do cliente para aplicação final. Nesta etapa o aço é solidificado na forma de tarugos, lingotes, chapas, dentre outros.

O aço já solidificado e pré-formado é direcionado então, para as etapas de laminação ou forjaria. Maiores detalhes sobre o processo de uma usina integrada podem ser encontrados em ARAUJO (2005).

- Usinas Semi-Integradas

As usinas semi-integradas são aquelas onde o processo começa já na aciaria. Sucatas ferrosas de várias classes são devidamente selecionadas para a montagem (ou estratificação) do cestão. Juntamente com a sucata, cales e ferro-gusa são adicionados ao cestão de forma que se tenha a melhor montagem a ser adicionada ao forno.

A carga metálica é então fundida em um Forno Elétrico a Arco (FEA) passando posteriormente à etapa de refino primário, também chamado de refino oxidante, para remoção do fósforo (ARAUJO, 2005). A corrida é vazada em uma panela siderúrgica e segue o mesmo fluxo de uma usina integrada, passando pelo refino secundário (também chamado de refino redutor) à exceção da etapa de tratamento sob vácuo, onde neste caso, utiliza-se um desgaseificador à vácuo ao invés do conversor RH (utilizado nas usinas integradas). A última etapa é realizada no lingotamento, com a solidificação do aço.

## 2.2 Aciaria Elétrica

Devido à utilização de energia elétrica nas etapas de fusão e refino, o processo utilizado em uma usina semi-integrada é chamado de aciaria elétrica.

A primeira vez em que se ouviu falar sobre a utilização de energia elétrica para fabricação de aço data de 1878, quando W.Von Siemens patenteou o primeiro forno elétrico à arco indireto. Em 1899, Heroult patenteou o primeiro forno elétrico a arco direto e, em 1909 surgiu então, o forno elétrico de carcaça circular trifásico, modelo que é utilizado até os dias atuais (MOURÃO, 2011).

As vantagens da utilização da rota via aciaria elétrica quando comparadas ao processo via alto-forno. São elas:

- Maior quantidade de sucata pode ser reciclada em FEA, reduzindo o consumo de matérias-primas não renováveis, economizando energia e evitando a necessidade de ocupação de áreas para descarte de produtos obsoletos (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016).
- Redução na emissão de CO<sub>2</sub>, podendo chegar a quatro vezes menor do que no processo de alto-forno.

- Altas quantidades de DRI e outros substitutos de sucata só podem ser consumidos no FEA.
- O aço pode possuir menor custo de produção, dependendo dos valores de energia e custos de investimento (MOURÃO, 2011).

### 2.2.1 Pátio de Sucatas

O aço é um dos materiais mais recicláveis e reciclados do mundo. O emprego de produtos obsoletos e sucatas de retorno na fabricação de novos produtos siderúrgicos permite a fabricação de novos aços sem qualquer perda de qualidade, além de contribuir de forma sustentável no desenvolvimento do planeta (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016).

A figura 2.2 ilustra o processo de reciclagem do aço a partir do minério de ferro até a produção de bens de consumo, que serão, após o uso, sucateados e enviados para o pátio das usinas recicladoras de aço.



Figura 2.2: Processo de reciclagem do aço. (Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014)

As principais funções de um pátio de sucatas são: receber e armazenar a sucata metálica que servirá de matéria-prima no FEA; separar os contaminantes presentes (como o cobre,

madeiras, concretos, etc); classificar as sucatas de acordo com o tipo, tamanho, densidade e composição química; processar as sucatas da melhor forma que atenda às necessidades de abastecimento do FEA; dispor de forma adequada e organizada em pilhas e armazenar de forma correta o gusa e cales para abastecimento do cestão.

Para viabilizar o processamento das sucatas, uma série de equipamentos são utilizados nos pátios de sucatas como: prensas tesoura, prensas pacote, encharutadores, separadores magnéticos, tesouras móveis, oxicorte e Shredder (um tipo de moinho).

Uma adequação correta do tipo e tamanho da sucata é de suma importância ao processo, pois, influenciará diretamente na produtividade dos fornos elétricos, impactando também na qualidade do produto final.

Existem vários tipos de sucata, onde sua classificação varia conforme a composição química, nível de impurezas, forma, tamanho e densidade. A adequação da quantidade correta de cada tipo de sucata a ser empregada possibilita uma otimização da energia química utilizada no forno e a redução no consumo de ligas, impactando diretamente no custo do aço.

Diferentes densidades são empregadas na estratificação do cestão para garantir que não ocorram problemas operacionais como, quebra de eletrodos, quebra de refratários, entupimento do canal de vazamento e obstrução das injetoras (MOURÃO, 2011).

A figura 2.3 ilustra a retirada das sucatas do caminhão e o processamento numa prensa tesoura.



Figura 2.3: Pátio de sucatas: a) Retirada das sucatas do caminhão. b) Guilhotina da prensa tesoura. (Fonte: BIELEFELDT, 2005)

### 2.2.2 Forno Elétrico a Arco (FEA)

Inicialmente, a utilização da rota via FEA era utilizada apenas na fabricação de produtos longos devido ao elevado teor de resíduos presentes na sucata, longo *tap-to-tap* (tempo total de uma corrida), dentre outros. Graças ao rápido desenvolvimento tecnológico, o FEA rapidamente se tornou uma unidade de fusão em larga escala, sendo uma alternativa rápida e econômica na fabricação de produtos planos (ARAUJO, 2005).

Um forno elétrico a arco é um equipamento onde ocorre a transformação da energia elétrica em energia térmica. A corrente alternada passa por transformadores que baixam a voltagem para os limites entre 80 e 250V e é levada aos eletrodos de grafita ou carbono amorfo por meio de terminais e fios de cobre (ARAUJO, 2005).

Constituído por uma carcaça metálica revestida internamente por blocos refratários na parte inferior e um painel refrigerado à água na parte superior, o FEA ainda conta com um sistema de basculamento que proporciona a inclinação do forno para frente e para trás, permitindo a separação da escória do aço (devido à diferença de densidade). Na parte superior, uma abóbada sustenta três eletrodos de grafita que farão a fusão da carga metálica. As injetoras projetam oxigênio e grafite para otimização da fusão pela energia química e ajuste dos teores de carbono e fósforo, assim como a formação de uma escória espumante benéfica ao processo (MOURÃO, 2011). A figura 2.4 ilustra um FEA com suas principais partes.

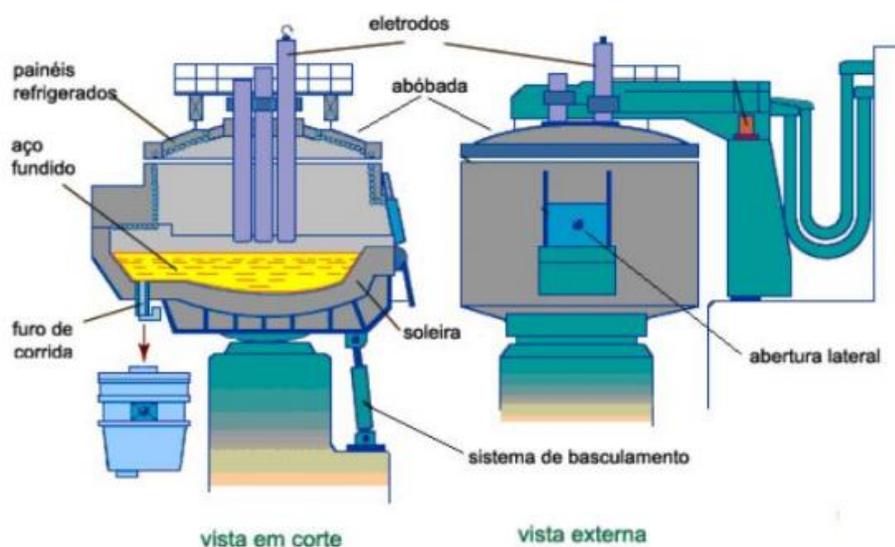


Figura 2.4: Forno Elétrico a Arco. (Fonte: MATIELLO, 2011)

As operações do FEA consistem no carregamento da sucata e fundentes (etapa esta que pode levar até três carregamentos), fusão da carga metálica em condições oxidantes, fervura do banho e retirada da escória. O refino primário ou oxidante promove a remoção de fósforo e a descarbonização (ajuste do teor de carbono), aumento da temperatura, e posteriormente é feito o vazamento em uma panela siderúrgica (ARAUJO, 2005).

Feito o carregamento, parte-se então para a primeira fusão da carga. Os eletrodos de grafita penetram no forno através de aberturas na abóbada podendo ser movimentados verticalmente, o arco elétrico é formado entre o eletrodo e a carga ocorrendo fortes variações de tensão ao longo da corrida devido à fusão da carga metálica. Para acelerar a fusão, pode-se utilizar oxigênio juntamente com uma quantidade de grafita, para que não haja superoxidação (ARAUJO, 2005).

Após a completa fusão da carga, ajuste do teor de fósforo deve ser efetuado, na etapa chamada de refino primário ou, refino oxidante, onde oxigênio é injetado no banho a fim de se obter um ambiente propício para a remoção do fósforo. O fósforo é prejudicial pela formação de um composto fragilizante, prejudicando as propriedades do produto final. Após essa etapa, a escória é removida. Retira-se então, a primeira prova a ser analisada em laboratório químico. Após os ajustes de temperatura, teor de oxigênio e carbono, a corrida é vazada em uma panela siderúrgica (MOURÃO, 2011).

### 2.2.3 Forno-Panela (FP)

Refino secundário é aquele realizado após o aço ser vazado do refino primário (FEA). Em termos de refino secundário dos aços, o forno-panela é o equipamento mais utilizado no Brasil para esta prática, em comparação aos métodos que empregam aquecimento químico, como os processos IR-UT, CAS-OB e H-ALT, por exemplo (RIZZO, 2006).

O termo forno panela pode parecer não muito apropriado pois, as instalações do mesmo em uma aciaria consistem não de um forno propriamente dito, mas basicamente de uma abóbada equipada com três eletrodos de grafita que operam com corrente alternada. Além desta, as unidades de refino secundário também contam com um sistema de adição de ligas, amostradores de composição química e temperatura, dispositivos para agitação do banho com

gases inertes, sistema de captação de fumos e dispositivos auxiliares de movimentação do carro porta-panela (RIZZO, 2006). A figura 2.5 ilustra uma estação de forno-panela.

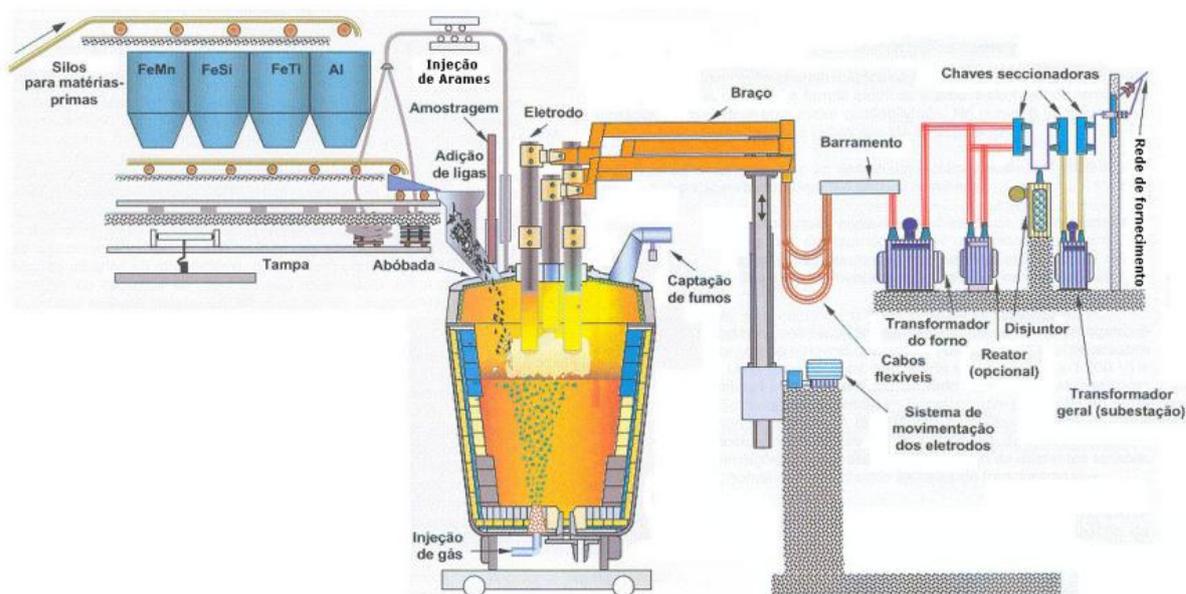


Figura 2.5: Representação de uma estação de refino secundário forno-panela.

(Fonte: Adaptado de RIZZO, 2006)

Após a fusão da carga metálica no FEA, é feito o vazamento do aço líquido em uma panela siderúrgica, a qual é transportada via carro-panela ao forno-panela para efetuação do refino secundário do aço. O forno-panela possui as seguintes funções: controle e ajuste de temperatura, ajuste da composição química, desoxidação e dessulfuração do aço, homogeneização da temperatura e da composição química por meio de rinsagem com gases inertes e remover inclusões não metálicas por flotação (MOURÃO, 2011).

O processo de desoxidação se inicia no vazamento, com a adição de desoxidantes como alumínio, silício e manganês. O controle da passagem de escória também é importante, pois a escória oxidante proveniente das operações no FEA é prejudicial para limpeza do aço devido à grande quantidade de óxidos presentes (FeO e MnO em sua maioria), levando a uma grande formação de inclusões e baixo rendimento das ligas adicionadas. Sendo assim, uma nova escória redutora deve ser formada para que favoreça a desoxidação do aço, a dessulfuração e a remoção de inclusões (MOURÃO, 2011).

Obviamente, o processo de desoxidação leva à formação de inclusões devido a reação do desoxidante com o oxigênio dissolvido no aço, estas deverão ser removidas pela escória ou

modificadas, de forma a não serem prejudiciais ao produto final. De forma a favorecer a remoção de inclusões, homogeneizar a temperatura e favorecer a dissolução das ligas no banho, é feita uma agitação do banho por gases inertes. Chamada de rinsagem, a agitação ocorre pela injeção de gases inertes por meio de um *plug* poroso presente no fundo da panela (MOURÃO, 2011).

#### 2.2.4 Desgaseificador a vácuo (*Vacuum Degassing* - VD)

Não obrigatório na produção de aços comuns (geralmente aqueles empregados em construção civil), o processo de desgaseificação a vácuo é obrigatório em usinas de aços especiais. Pois o mesmo permite a remoção de gases que são extremamente prejudiciais à qualidade do aço devido à formação de defeitos como porosidades (*pinholes* e *blowholes*) e trincas internas.

A remoção de gases nitrogênio e hidrogênio é uma das principais funções do VD, além desta, a dessulfuração, descarburização e acerto final da composição química (pela adição de fios) são também fundamentais (SILVA, 2006).

Feito o tratamento no forno-panela, a panela é então conduzida no processo de VD a um tanque que é fechado hermeticamente por uma tampa, dando início ao processo de desgaseificação pelo acionamento do sistema de vácuo (RIZZO, 2006). A desgaseificação ocorre devido à diferença de pressão, onde o vácuo atua na superfície livre do banho metálico promovendo a remoção dos gases.

A fim de promover uma remoção homogênea dos gases do banho, e de efetuar uma boa flotação de inclusões para a escória, uma forte agitação deve ser realizada por meio de injeção de gases inertes no fundo da panela.

Ajustes finais de composição química podem ser efetuados pela adição de ligas em fios, adições de fios de CaSi são comuns para efetuar o tratamento de inclusões com cálcio nessa etapa do processo (maiores informações podem ser encontradas no capítulo 2.4 deste trabalho).

A figura 2.6 ilustra um sistema de desgaseificador a vácuo.

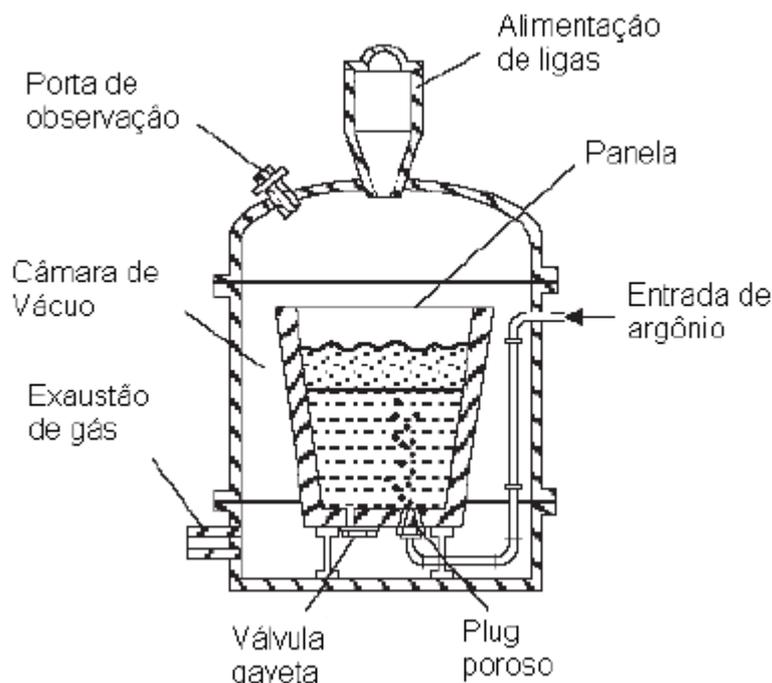


Figura 2.6: Representação esquemática de um desgaseificador a vácuo tipo tanque. (Fonte: Adaptado de FRUEHEN, 1998)

### 2.2.5 Lingotamento Contínuo (LC)

Feito todo o tratamento do aço líquido nas etapas anteriores, o aço é levado à uma nova etapa. Nesta etapa ocorre a solidificação e transformação do aço em um produto semi-acabado na forma de tarugos, blocos, placas ou outros. O processo de lingotamento contínuo é a última etapa em uma aciaria onde ainda se trabalha com aço líquido. Neste estágio do processo não há mais nenhum tipo de aquecimento ou ajuste de composição química, sendo de suma importância o controle nas etapas anteriores.

Segundo RIZZO (2006), a máquina de lingotamento contínuo é composta por muitos componentes que serão responsáveis pela solidificação eficaz do produto. Existem vários tipos de lingotamento, sendo a máquina vertical-curva a mais comum.

Neste modelo de lingotamento, uma torre faz o suporte da panela, cujo a qual é posicionada acima de um distribuidor para que se possa distribuir o aço ao longo dos veios. O distribuidor possui um mecanismo de controle de vazão do aço que pode ser por meio de hastes tampão ou um sistema de válvulas-gaveta.

Na operação de aços especiais, é comum o uso de mobiliários nos distribuidores, com o objetivo de melhorar a limpeza do aço em um último estágio. Inibidores de turbulência, válvulas submersas, barreiras contra fluxo e injetores de gases inertes são os principais mobiliários utilizados. Com a mesma função, o uso de tubo-longos na abertura da panela impede o contato do aço com o ar evitando a reoxidação do mesmo.

Os moldes possuem a função de solidificar o aço em seu primeiro estágio, com a formação de uma casca sólida com uma espessura mínima o aço pode seguir livre para a segunda zona de resfriamento, onde a solidificação continua com a injeção de água diretamente nos tarugos em uma câmara de *sprays*.

Passando pelo rolo endireitador, os tarugos tomam formas retas e podem ser cortados em um tamanho adequado para a laminação por meio de tesouras ou por oxi-corte. Após, os tarugos são transportados para um leito de resfriamento onde irão resfriar ao ar em uma chamada zona de radiação livre.

Feito o empilhamento e identificação dos lotes, os tarugos são encaminhados à um pátio de tarugos aguardando para serem encaminhados à laminação.

A figura 2.7 ilustra uma máquina de lingotamento contínuo de aços.

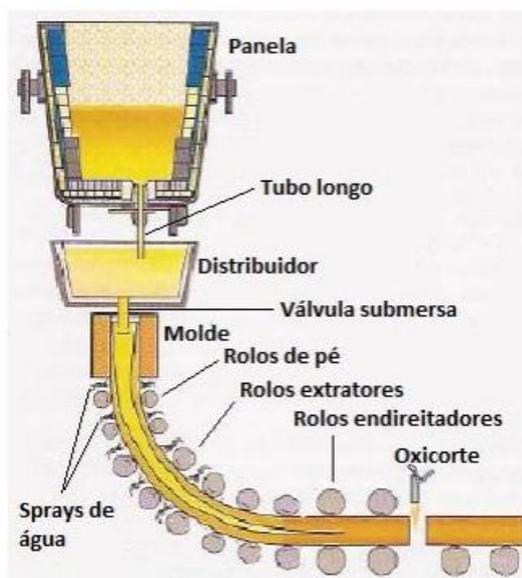


Figura 2.7: Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo. (Fonte: Adaptado de RIZZO, 2006)

O processo de lingotamento contínuo pode ser realizado por três formas diferentes: partida de máquina, *flying tundish* e *mixing tundish*.

Quando o lingotamento de uma corrida é realizado pela partida de máquina, configura-se a mesma nos parâmetros de lingotamento do aço a ser lingotado (ajuste de velocidade, curva de refrigeração, oscilação do molde, corrente das bobinas eletromagnéticas, molde a ser utilizado), introduz-se as barras-falsas pela parte inferior do molde até que chegue na linha de menisco do molde, sendo ajustada a altura com a ajuda de um gabarito metálico. Faz-se esta prática para que, ao serem abertos os veios, o aço não flua livremente pelo molde sem que haja um suporte. Introduzidas as barras-falsas, uma pequena peça metálica chamada operacionalmente de “peça de partida” é posicionada sobre a cabeça da barra-falsa a fim de impedir o contato do aço diretamente com as barras, sendo de difícil remoção e danificação do equipamento. Limalhas de prego também são adicionadas por sobre a peça de partida a fim de facilitar a remoção da barra-falsa. Após o ajuste inicial do molde, o distribuidor é posicionado por sobre os moldes e calibrado de modo que as válvulas submersas sejam corretamente centradas vertical e horizontalmente. Posiciona-se então a panela por sobre o distribuidor, a abertura da mesma é realizada por meio de um sistema de controle manual com a inserção de um tubo longo na abertura da válvula gaveta. Junto ao tubo longo, argônio é injetado à uma vazão de 10N.L/min para que ocorra uma homogeneização do aço dentro da panela e auxilie na flotação das inclusões. Esta injeção de gás é realizada até que se obtenha 40ton de aço na panela, para que não se exponha o aço devido ao baixo volume e grande vazão de gás. Após aberta a panela, e posicionado o tubo longo, o aço cai para dentro do distribuidor colidindo com o inibidor de turbulência previamente posicionado no distribuidor. Aguarda-se para que se obtenha 10ton de aço dentro do distribuidor para que se abra os veios e “parta-se” a máquina.

O método de *flying tundish* é realizado quando troca-se o distribuidor mas não é necessária uma repartida de máquina. Tal método economiza tempos de parada, otimizando a produtividade da planta que a utiliza. É utilizado quando atinge-se o limite de sequenciamento de uma qualidade ou quando tem-se duas muito distintas quimicamente. O *flying tundish* é feito diminuindo-se a velocidade de lingotamento ao final da corrida, o distribuidor é retirado e insere-se uma peça metálica chamada operacionalmente de “emenda de *flying*” dentro do molde a fim de obter-se uma separação física dos tarugos para evitar a mistura de materiais. Limalha de prego também é adicionada com a finalidade de evitar que a emenda funda-se e una-se ao tarugo posterior. As partes referentes ao final da última corrida e início da primeira do sequencial posterior são descartadas a fim de garantir a qualidade dos tarugos.

No método chamado *mixing tundish*, utiliza-se o mesmo distribuidor para sequenciais diferentes. Realiza-se esta prática quando a faixa de composição química do último aço se encaixa na faixa do primeiro do próximo sequencial. Com este método, os tempos de parada por partida de máquina e *flying tundish* são eliminados, contudo, a quantidade de material que é misturada ao final da última corrida e início da posterior ao *mixing*, tem de ser descartada pois há uma inconformidade com relação aos teores de composição química deste material, que não pertencem a nenhuma das duas corridas onde é aplicado.

### 2.3 Inclusões não-metálicas

Nos últimos anos, extensos trabalhos vem sendo realizados nas usinas de aços especiais para que se tenha cada vez aços mais limpos, ou seja, livres de inclusões prejudiciais.

Inclusões são partículas não-metálicas incorporadas na matriz de metais e suas ligas. São prejudiciais ao processo produtivo de aços, podendo levar à formação de *clogging* no lingotamento contínuo. Prejudicam também as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão dos aços voltados para aplicações críticas, como aqueles direcionados à indústria automobilística, podendo gerar muitos defeitos no produto final. Por exemplo, flanges de aços baixo carbono acalmados ao alumínio podem sofrer trincas devido à falta de deformabilidade, enquanto eixos e rolamentos sofrem problemas de vida em fadiga (GOSH, 2001; ZHANG, 2003).

Isto ocorre, pois existe uma incompatibilidade entre a interface matriz/inclusão que gera uma concentração de tensão ao redor da inclusão. A aplicação de forças externas durante o trabalho em serviço pode aumentar ainda mais esta tensão. Se a tensão local é aumentada, microtrincas irão se desenvolver. A propagação dessas microtrincas leva a posterior fratura do material (GOSH, 2001). A figura 2.8 ilustra a formação e propagação de trincas a partir de defeitos subsuperficiais (como uma macroinclusão) ou superficiais até o seu estado de ruptura.

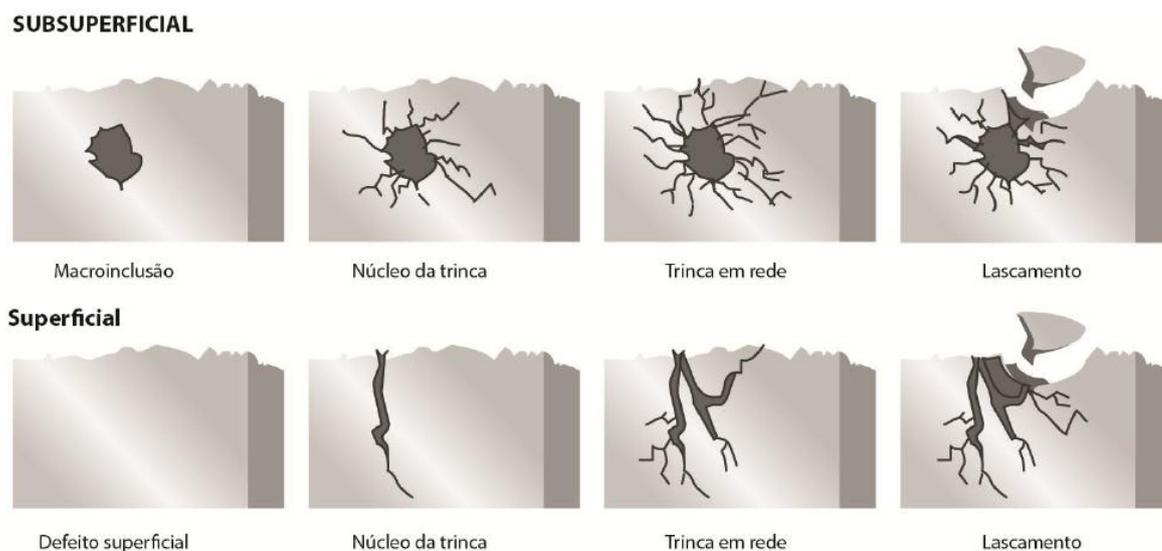


Figura 2.8: Representação do mecanismo de formação e propagação de trincas. (Fonte: Adaptado de SILVA, 2009)

Estudos comprovam que, somente grandes inclusões levam a este tipo de dano, portanto, a ideia de tamanho crítico teve de ser desenvolvida (KIESSLING, 1978). A classificação das inclusões por tamanho pode ser dividida em duas classes: macroinclusões e microinclusões. As macroinclusões devem ser eliminadas devido ao seu efeito prejudicial aos aços. Já a presença de microinclusões pode ser tolerada, desde que elas não exerçam um efeito prejudicial nas propriedades dos aços, podendo até mesmo serem benéficas para os produtos. Por exemplo, elas restringem o crescimento de grãos, aumentam a resistência a deformação e dureza, além de servir como núcleo para precipitação de carbeto, nitreto, etc.

O tamanho crítico de inclusão definido por Kiessling não é fixo, mas depende de vários fatores, como os requisitos de serviço. Amplamente utilizado, o tamanho crítico varia num intervalo de 5 a 500  $\mu\text{m}$ . Em aços de alta resistência, este tamanho deverá ser muito pequeno para evitar danos ao material (GOSH, 2001).

Por esta razão, objetiva-se a maior remoção possível de inclusões no aço. Porém, apesar de todo o esforço envolvido para se obter aços limpos, nenhum aço é completamente livre de inclusões. Estima-se que o número de inclusões por tonelada de aço esteja entre  $10^{10}$  e  $10^{15}$ . Porém, o critério de limpeza inclusionária depende exclusivamente do modo de avaliação da mesma, onde apenas o conceito de aços limpos (*'cleansteel'*) torna-se muito vago e relativo.

Aços limpos somente podem ser determinados após conhecidas as aplicações e propriedades requeridas do produto final, daí então pode-se entender e determinar o limite

máximo de tamanho, quantidade e propriedades das inclusões permitidas para o produto em questão.

Sendo assim, além da quantidade de inclusões, a limpeza dos aços depende muito da distribuição, dos tamanhos, morfologia e composição das inclusões não metálicas. Sendo a distribuição dos tamanhos particularmente importante, pois macroinclusões grandes são as mais prejudiciais às propriedades mecânicas. Porém, a completa remoção de macroinclusões é uma prática de difícil obtenção em meios industriais, devido às muitas variáveis de processo. Logo, a presença de macro e microinclusões torna-se inevitável, sendo necessária a determinação de como reduzir os efeitos prejudiciais pelo controle do tamanho, forma e propriedades das inclusões. Este método é conhecido como modificação das inclusões e para realizá-lo, primeiramente deve-se saber como os vários fatores pertencentes as inclusões afetam as propriedades dos aços (GOSH, 2001; KIESSLING, 1978; ZHANG, 2003). Estes aspectos serão melhor discutidos nos tópicos a seguir.

### 2.3.1 Origem e formação das inclusões

As inclusões não-metálicas podem ser compostas por óxidos, sulfetos, nitretos, carbetos, etc. onde os óxidos e sulfetos são os mais predominantes. Podem ter origem diferentes dependendo do tipo e classificação das mesmas, onde a classificação mais comum as divide em dois grupos: inclusões endógenas e exógenas.

Inclusões endógenas são aquelas provenientes de reações que ocorrem no banho líquido ou formadas durante a solidificação do aço, como reações provenientes da adição de desoxidantes e ligas, por exemplo.

Já as inclusões exógenas são oriundas de partículas externas ao banho, sendo arrastadas mecanicamente por meio de erosão do refratário, incorporação de escória, pós fluxantes ou areia de vedação. Atuam como sítios para nucleação de inclusões endógenas, podendo acarretar em inclusões agregadas de diferentes composições químicas.

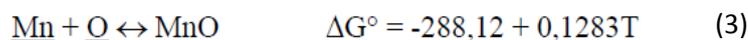
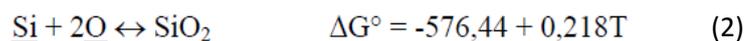
Usualmente esses grupos podem ser razoavelmente bem diferenciados com base no tamanho, composição e distribuição das inclusões. As inclusões endógenas são numerosas, pequenas e uniformemente distribuídas, sendo típicas dos aços onde ocorrem. Inclusões

exógenas são grandes, isoladas e ocorrem casualmente (GOSH, 2001; ZHANG, 2003, DEKKERS, 2002).

As inclusões endógenas podem ser originadas nas seguintes etapas:

- Desoxidação do aço:

A desoxidação tem como finalidade reduzir o teor de oxigênio presente nos aços. Porém, tal prática acaba por acarretar na formação de inclusões endógenas ao processo devido às reações do desoxidante com o oxigênio dissolvido conforme as reações descritas nas equações 1, 2 e 3:



Um exemplo típico são as inclusões de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Elas são geradas pela reação entre o oxigênio dissolvido no banho e o alumínio utilizado como desoxidante. As inclusões de alumina são dendríticas quando formadas em um ambiente com alto oxigênio dissolvido, mas também podem assumir outras formas, como aglomerados de partículas menores (ZHANG, 2003). A figura 2.9 ilustra as diferentes morfologias de alumina.

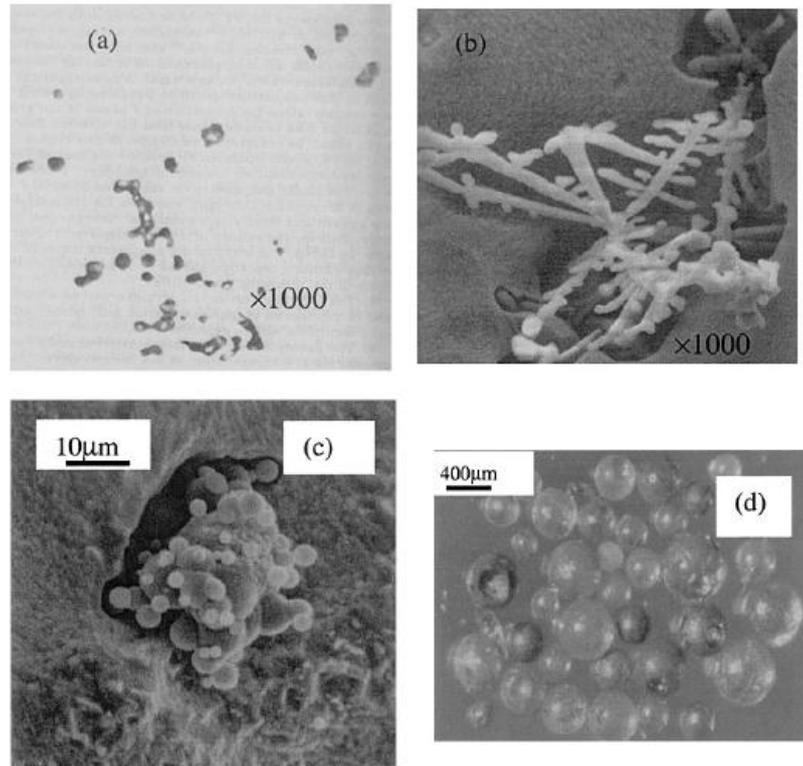


Figura 2.9: Morfologias típicas de inclusões de alumina. (Fonte: ZHANG, 2003).

- Reoxidação do aço:

Segundo ZHANG (2003) as inclusões geradas pela reoxidação ocorrem quando:

- i) O desoxidante remanescente no aço líquido é oxidado pelo FeO, MnO, SiO<sub>2</sub> e outros óxidos da escória e linha de refratário: Este caso ocorre quando a oxidação do banho é elevada, sendo comum em aços resulfurados que possuem um elevado teor de oxigênio dissolvido ou quando há passagem de escória do FEA para o FP.
- ii) Pela exposição do banho ao ar atmosférico: Pode ocorrer quando a escória encontra-se com elevada fluidez, sendo susceptível à exposição do banho ao ar ou, quando a agitação do aço por gases inertes (rinsagem) é muito brusca.

- Reações químicas:

Inclusões podem ser formadas por reações químicas que não aquelas de desoxidação como, por exemplo, a formação de óxidos pela modificação de inclusões quando o tratamento com cálcio é realizado indevidamente. A identificação da fonte neste caso nem sempre é fácil, pois, inclusões contendo CaO podem também ser originadas pelo arraste de escória, por exemplo (ZHANG, 2003).

As inclusões exógenas podem ser originadas pelas seguintes fontes:

- Arraste de escória

Comum quando ocorre a emulsão da escória para dentro do aço, em situações onde a agitação é vigorosa ou pela transferência de aço de um recipiente à outro (como do FEA para a panela). Como resultado tem-se inclusões líquidas, geralmente esféricas, conforme ilustradas na figura 2.9 d (ZHANG, 2003).

- Outras fontes externas:

Inclusões exógenas comumente são originadas por fontes externas ao aço, incluindo sujeiras soltas, quebra e erosão de refratários, pós fluxantes, areia de vedação de painéis, dentre outras. Elas são geralmente grandes e de formato irregular. Agem como sítios para nucleação heterogênea de alumina e podem incluir um formato central seguido de agregados, conforme a figura 2.9 c (ZHANG, 2003).

### 2.3.2 Características físicas das inclusões

Morfologia, composição química e tamanho das inclusões são características de extrema importância quando se trata de aços limpos. Tais propriedades afetam diretamente a consequência da presença de inclusões no produto final de uma usina siderúrgica. Sendo assim, pode-se dizer que as principais propriedades dos aços que são afetadas pelo controle inclusionário são a deformabilidade e vida em fadiga (ZHANG, 2003).

Sobre a interferência nas propriedades mecânicas do aços, algumas afirmações podem ser citadas (GOSH, 2001).

i) As propriedades de impacto são afetadas com um aumento na fração de volume assim como no comprimento da inclusão, onde as inclusões menores e esféricas são melhores. Inclusões frágeis ou que possuem baixa ligação com a matriz, implicarão em um rompimento precoce do aço em serviço, devido aos esforços ao qual é submetido, pela nucleação e propagação de vazios na interface matriz/inclusão.

ii) A resistência a fadiga de aços de alta resistência é reduzida pelas inclusões superficiais e subsuperficiais, especialmente aquelas que possuem menor coeficiente de expansão térmica do que o aço. Isto cria tensões na matriz que são as principais responsáveis pela falha em fadiga.

iii) O trabalho a quente dos aços é afetado pela baixa deformabilidade das inclusões. Inclusões sólidas ocasionarão uma maior fragilidade em trabalho a quente.

iv) A anisotropia de um aço pode ser afetada pela orientação de inclusões alongadas ao longo da direção de trabalho ou do alongamento de inclusões em serviço.

v) A usinabilidade dos aços é melhorada pela presença de macroinclusões de sulfetos.

Sendo a presença de macroinclusões inevitável aos aços, o número e tamanho destas devem ser os menores possíveis. Além disso, que sejam preferencialmente esféricas, e com boa deformabilidade sob tensão.

Geralmente, as inclusões presentes depois da adição de alumínio para desoxidação consistem de alumina pura ou óxido de alumínio com pequenas quantidades de magnésio. Ocasionalmente, traços de magnésio, sílica, e/ou cálcio também são detectados.

Dekkers (2002) classifica a morfologia das inclusões em 6 tipos, apresentadas na figura 2.10 a seguir.

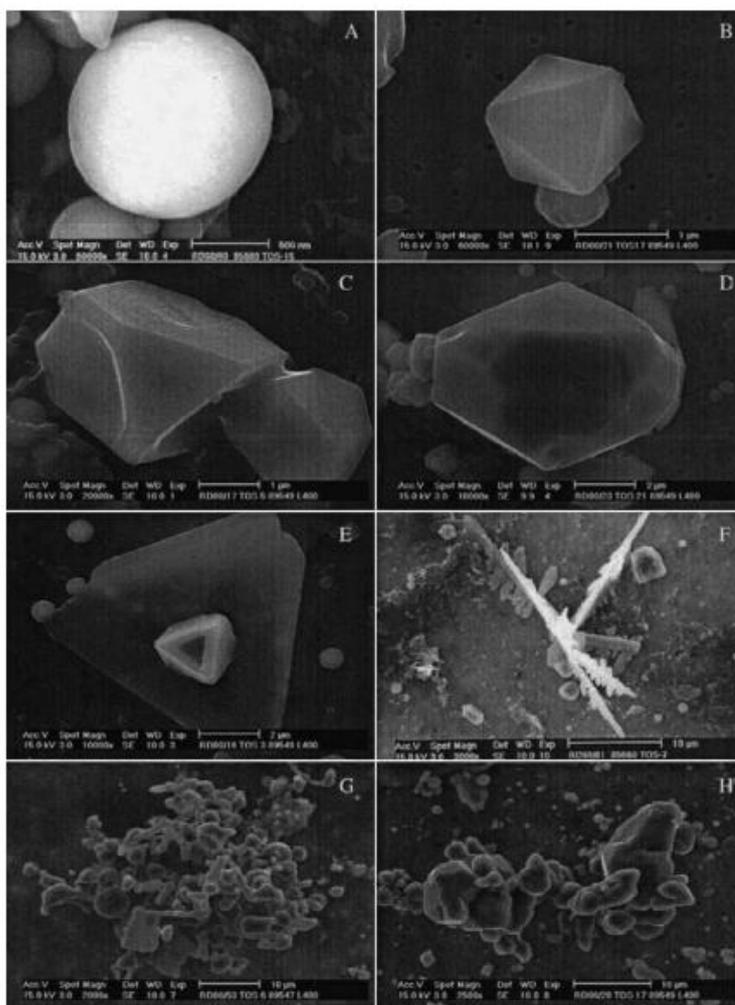


Figura 2.10: Morfologias típicas de inclusões extraídas da matriz. a) pequena inclusão esférica; b) inclusão octaédrica; c) pequena inclusão poliédrica; d) grande inclusão poliédrica; e) inclusão em forma de placas; f) inclusão dendrítica; g) cluster de inclusões; h) inclusões agregadas. (Fonte: DEKKERS, 2002).

Sobre a figura 2.10 pode-se descrever os tipos de inclusões como sendo:

1. Inclusões esféricas:

Pequenos óxidos de alumínio quase perfeitamente esféricos com um diâmetro médio de  $0,5\mu\text{m}$ . Frequentemente pequenas quantidades de manganês e sílica são detectadas. Estas inclusões somente são observadas em aços ao carbono acalmados ao alumínio.

2. Inclusões facetadas:

Podem ser octaédricas, com um tamanho médio de  $2,4\mu\text{m}$ , quase sempre contendo magnésio, ou poliédricas, partículas facetadas que não mostram uma tendência octaédrica.

Essas inclusões são definidas como sendo menores do que  $5\mu\text{m}$  e usualmente contém magnésio. As inclusões poliédricas grandes são maiores do que  $5\mu\text{m}$  e consistem de óxido de alumina puro.

3. Inclusões em forma de placa

Ocorrem principalmente na forma hexagonal ou triangular. Ocasionalmente surgindo com forma retangular. Elas possuem comprimento medio de  $2,9\mu\text{m}$  e algumas vezes magnésio é encontrado.

4. Inclusões dendríticas:

Consistem de óxido de alumina puro. Os ramos primários são comumente orientados de maneira triangular. O tamanho varia de 5 a  $20\mu\text{m}$ .

5. Clusters de inclusões:

São formados por uma rede aberta de óxidos de alumínio. A composição química das partículas individuais são frequentemente indetermináveis, e faces são ausentes ou fracamente desenvolvidas. O maior diâmetro pode ser de  $100\mu\text{m}$ .

6. Agregados consistentes de partículas facetadas.

Geralmente não é detectada a presença de magnésio nos agregados, mas podem ocorrer ocasionalmente. O maior diâmetro de agregados pode ser um pouco maior do que  $10\mu\text{m}$ .

- Modificação das inclusões com cálcio

Nenhum aço é completamente livre de inclusões e a presença destas deve ser a menor possível, onde as remanescentes sejam de tal forma que não afetem as propriedades do produto final. Para tanto, uma prática bastante comum no processo produtivo de aços especiais é o tratamento de inclusões com cálcio. Objetiva-se com esta prática obter inclusões líquidas de cálcio-aluminatos em formato arredondados, que serão menos deletérias às propriedades dos aços (GARCIA JUNIOR, V., 2009; GOSH 2001; VISSER, 2016).

Esta prática é amplamente utilizada em usinas que utilizam lingotamento contínuo em seu processo. O cálcio é introduzido no aço líquido na forma de fios de Ca-Si, injeção na forma de pós ou ainda por tubos metálicos contendo cálcio no seu interior.

Inclusões de cálcio-aluminatos [ $C_{12}A_7 (12CaO.7Al_2O_3)$ ] são formadas pela injeção de cálcio no banho ao reagir com as inclusões de alumina ( $Al_2O_3$ ) sólidas presentes no aço devido às reações de desoxidação.

Os cálcio-aluminatos são benéficos ao aço por se tratarem de inclusões de baixo ponto de fusão, estando completamente líquidas nas temperaturas de trabalho, (1500 a 1650 °C) e possuírem morfologia arredondada. Tais aspectos favorecem a lingotabilidade do aço pois diminuem as chances de ocorrência de *clogging* no lingotamento contínuo (este conceito será melhor discutido mais adiante, neste trabalho). A figura 2.11 mostra um esquema de adição de cálcio no banho, assim como as reações formadas.

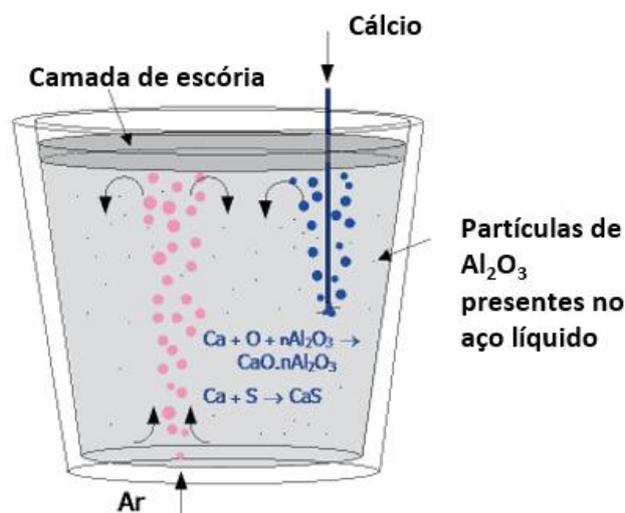


Figura 2.11: Representação esquemática da adição de cálcio no banho de aço líquido. (Fonte: Adaptado de VISSER, 2016).

Como resultado do tratamento com cálcio, inclusões de alumina e sílica são convertidas em cálcio-aluminatos líquidos ou silicatos de cálcio. Essas inclusões sofrem modificação de sua morfologia devido aos efeitos de tensão superficial, sendo líquidas e globulares após sofrerem transformação (FRUEHAN, 2002). O efeito do tratamento das inclusões com cálcio é ilustrado esquematicamente na figura 2.12. A figura 2.13 mostra a evolução da morfologia de uma inclusão de alumina ao ser tratada com cálcio, formando um cálcio-aluminato esférico.

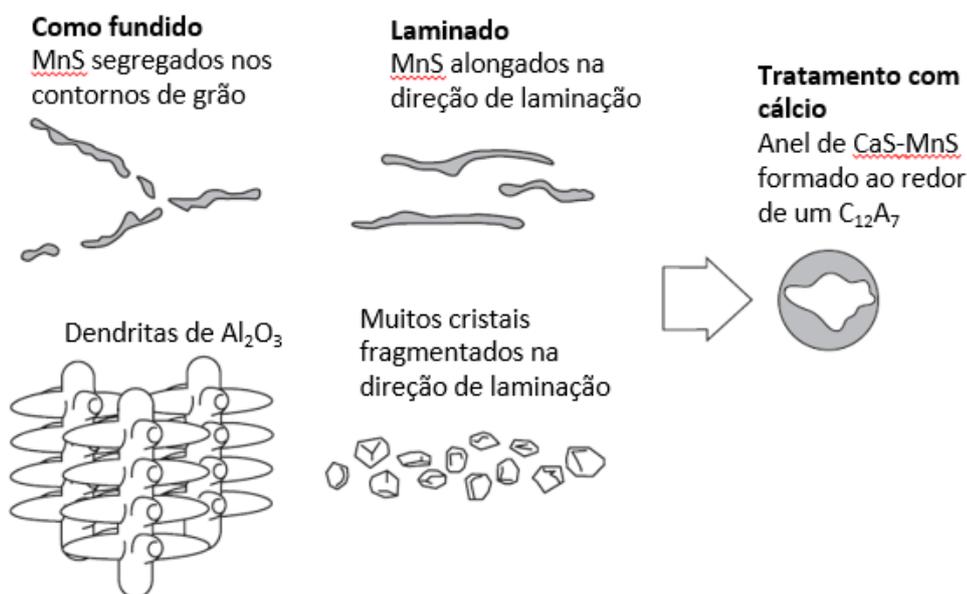


Figura 2.12: Representação esquemática da ação do cálcio na modificação das inclusões.

(Fonte: Adaptado de FRUEHAN, 2002).

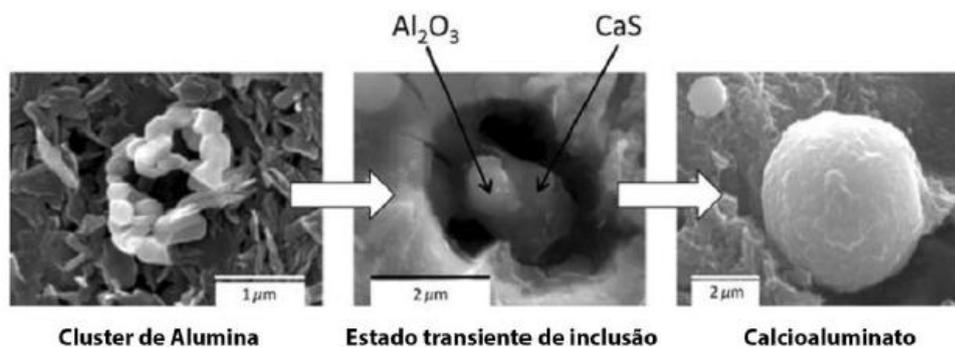


Figura 2.13: Modificação da morfologia da inclusão de alumina para cálcio-aluminato. (Fonte: Adaptado de HOLLAPA, 2014).

Conforme ilustrado na figura 2.12, espera-se não encontrar sulfetos alongados após a laminação de aços que sofreram o tratamento com cálcio. Este fenômeno é conhecido como controle de forma pelo tratamento com cálcio. Outros benefícios desta prática são: melhora da lingotabilidade dos aços pela minimização ou prevenção de *clogging*, diminuição de inclusões superficiais em barras, tarugos e chapas, melhora da usinabilidade do produto final em velocidades elevadas de corte e minimização da susceptibilidade de trincas induzidas pelo hidrogênio de aços baixa-liga (FRUEHAN, 2002).

Apesar da adição de cálcio ser benéfica para a modificação e controle da morfologia de inclusões, um certo cuidado deve ser tomado com relação à adição ideal de cálcio no aço. Elevados teores de cálcio podem levar à formação de inclusões de CaS em aços com faixa de enxofre. Da mesma forma, aços com deficiência no teor de cálcio não serão efetivos nas transformações, pois a presença do MgO proveniente dos refratários reage com as inclusões de alumina do banho, formando inclusões de  $MgO \cdot Al_2O_3$  (espinélios) que são sólidas nas temperaturas de trabalho, sendo prejudiciais ao processo e ao aço (CICUTTI, 2016). A figura 2.14 mostra como varia a composição das inclusões com adição de cálcio no banho.

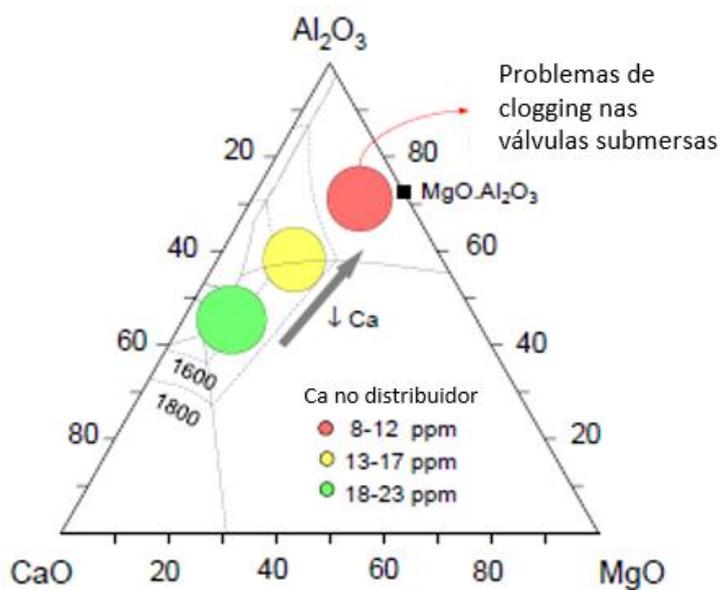


Figura 2.14: Efeito do teor de cálcio na composição das inclusões. (Fonte: Adaptado de CICUTTI, 2016).

É visível na figura 2.14 que, baixos teores de cálcio são insuficientes para a modificação das inclusões, onde a presença de inclusões do tipo  $MgO \cdot Al_2O_3$  (espinélios) são consideráveis, sendo prejudiciais pela formação de *clogging*. Sendo assim, a composição ideal das inclusões de calcio-aluminatos deve ser aquela onde tem-se o maior número possível de inclusões presentes na área líquida do diagrama ternário (maiores informações sobre diagramas ternários serão abordadas no tópico 2.5 deste trabalho).

Atualmente, o uso de MEV-EDS com analisadores automáticos de partículas permite a avaliação de um número importante de inclusões em um tempo razoável. Acoplado esta informação com dados termodinâmicos é possível calcular a fração sólida das inclusões e relacionar com o comportamento durante o lingotamento. A figura 2.15 mostra a relação entre a fração sólida das inclusões e o índice de lingotabilidade. A medida em que se aumenta a fração sólida das inclusões, a tendência ao *clogging* é também aumentada. Este tipo de análise é muito utilizado para determinar o teor ótimo de cálcio em cada tipo de aço (CICUTTI, 2016).

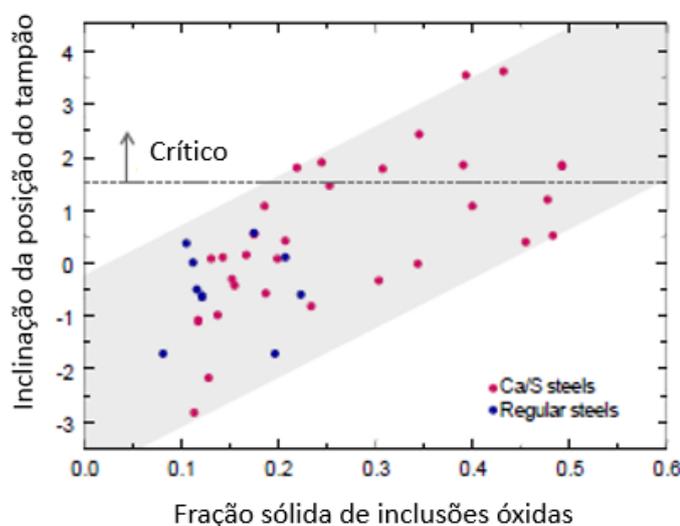


Figura 2.15: Relação entre a fração sólida das inclusões e a lingotabilidade dos aços. (Fonte: CICUTTI, 2016).

### 2.3.3 Inclusões e lingotabilidade

O conceito de lingotabilidade está diretamente relacionado com as características de fluidez e de resfriamento do aço, assim como o grau de entupimento das válvulas submersas durante o lingotamento contínuo (*clogging*). Uma definição precisa para lingotabilidade ainda não foi encontrada na literatura.

O estudo do entupimento das válvulas submersas está diretamente relacionado com a presença de inclusões não-metálicas, principalmente pela formação de *clusters* de alumina. Tal fenômeno é conhecido como “*clogging*”. Pode-se correlacionar diretamente a lingotabilidade dos aços de acordo com o tipo de inclusões formadas (Tabela 1).

Tabela 1: Propriedades de diferentes cálcio-aluminatos, CaO e sulfetos. (Fonte: CICUTTI, 1997)

Inclusão	Densidade g/cm <sup>3</sup>	T. Fusão (°C)	Dureza Vickers HV	Expansão Térmica (1x10 <sup>-6</sup> /°C)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,96	2050	3750	8
CA <sub>6</sub>	3,38	1850	2200	9
CA <sub>2</sub>	2,91	1750	1100	-
C <sub>3</sub> A	3,04	1535	-	10
CA	2,98	1605	930	7
C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>	2,83	1455	-	8
CaO	3,34	2570	400	-
CaS	2,50	2450	-	15
MnS	3,99	1610	170	18

Pode-se notar na tabela 1 que, de todos os cálcio-aluminatos, o C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> é o único que está totalmente líquido na temperatura de trabalho do aço e não ocasiona problemas de lingotabilidade. Isso pode ser facilmente observado no diagrama binário Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO da figura 2.16, onde nota-se que o ponto de fusão da alumina pura é de 2050 °C enquanto que para o C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> este valor é reduzido drasticamente.

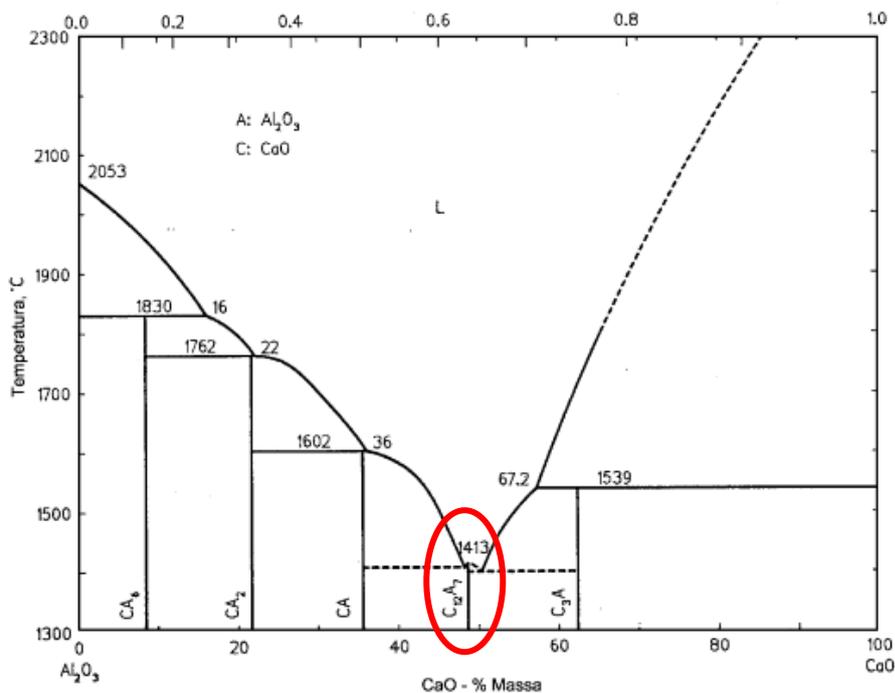


Figura 2.16: Diagrama binário do sistema  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -CaO. (Fonte: Adaptado de SLAG ATLAS, 1995)

Com vistas a se obter uma boa representação do efeito dos teores de Al, Ca e S, da temperatura de lingotamento e do oxigênio total na modificação das inclusões em equilíbrio termodinâmico com o aço, o conceito de “*janela de inclusões líquidas*” foi desenvolvido. HOLAPPA (1995) realizou um estudo considerando uma classe de aços com 0,35% C, 0,25% Si e 0,50% Mn para desenvolver estas janelas.

Na primeira série de cálculos, o oxigênio total foi considerado constante (20 ppm) e três temperaturas foram avaliadas: 1600 °C, 1550 °C e 1520 °C. As figuras 2.17, 2.18 e 2.19 mostram os resultados obtidos por Halappa onde, os limites da área líquida foram determinados nas três temperaturas pelo cálculo das linhas de saturação de cálcio-aluminatos ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e CaS, respectivamente.

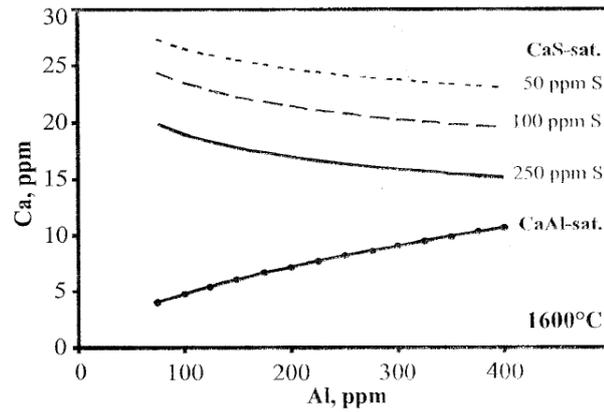


Figura 2.17: Linha de saturação para cálcio-aluminato e CaS e janela de inclusões líquidas para diferentes níveis de enxofre a 1600°C. (Fonte: HOLAPPA, 1995)

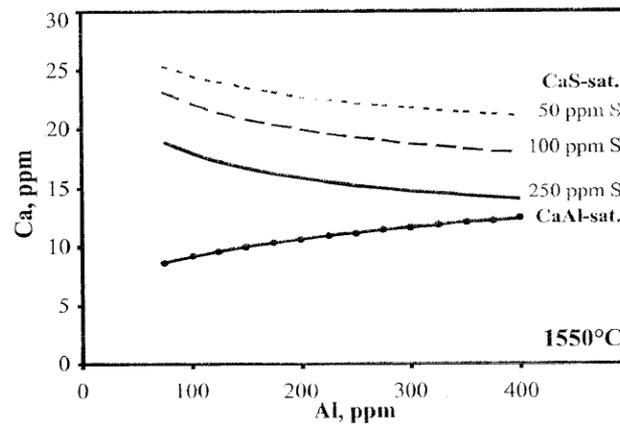


Figura 2.18: Linha de saturação para cálcio-aluminato e CaS e janela de inclusões líquidas para diferentes níveis de enxofre a 1550 °C. (Fonte: HOLAPPA, 1995)

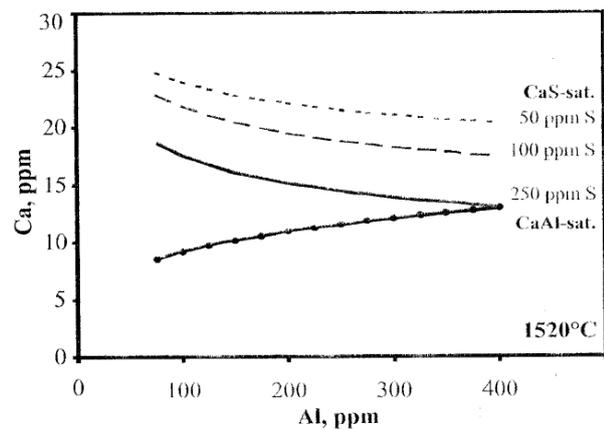


Figura 2.19: Linha de saturação para cálcio-aluminato e CaS e janela de inclusões líquidas para diferentes níveis de enxofre a 1520 °C. (Fonte: HOLAPPA, 1995)

As figuras mostram claramente a influência do teor de enxofre e da temperatura na região das inclusões líquidas. O aumento do teor de enxofre propicia a estabilidade do CaS, diminuindo a região líquida. O comportamento do enxofre é muito similar em diferentes temperaturas, no entanto, a área líquida é maior em temperaturas maiores. À 1600 °C, a formação de CaS é provável apenas com teores de cálcio relativamente muito altos, e atingir a região líquida é muito fácil. À 1550 °C, a janela fica mais estreita e quase desaparece em elevados teores de Al e S. Já na temperatura mais baixa, 1520 °C (temperatura típica de lingotamento deste aço), a janela fecha com 400 ppm de Al e 250 ppm de S. Isto significa que, nestas condições, o lingotamento deste aço não é possível, devido à inerente formação de *clogging* devido à precipitação e acúmulo de inclusões nas válvulas submersas do distribuidor.

O teor de oxigênio total também influencia na quantidade de cálcio que é necessária para converter a alumina em cálcio-aluminatos. Na Figura 2.20, o teor de oxigênio total varia entre 10, 20 e 40 ppm, e o enxofre entre 100 ppm e 250 ppm.

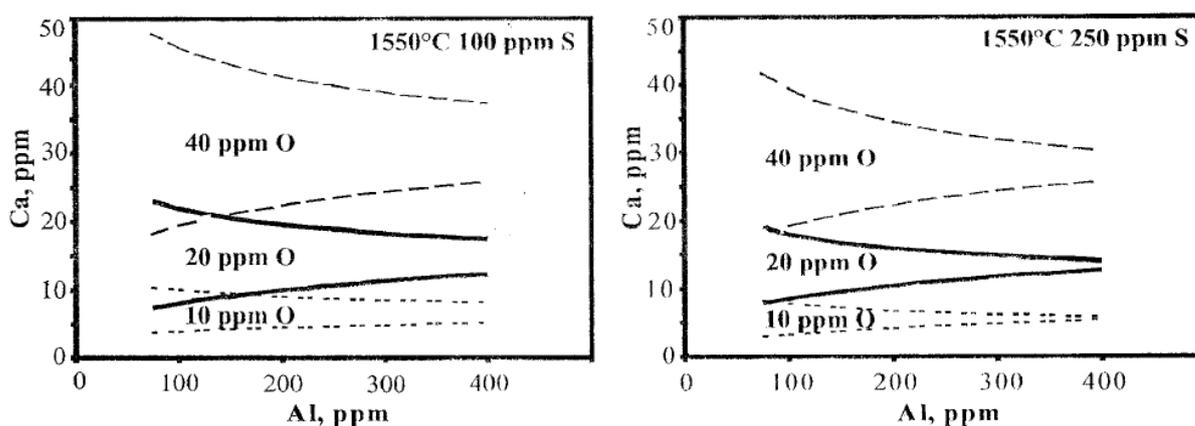


Figura 2.20: Efeito do O<sub>2</sub> nas janelas de inclusões líquidas com 100 ppm (à esquerda) e 250 ppm de S (à direita). (Fonte: HOLAPPA, 1995)

Com baixo teor de oxigênio, a janela líquida é obtida com pequenas quantidades de adições de Ca, num intervalo muito estreito. Quando o teor de oxigênio total aumenta, as adições de Ca também aumentam, e a janela se torna mais larga. O efeito do enxofre pode ser visto nas posições das linhas de saturação de CaS. Teores maiores de S empurram a linha para baixo, deixando a janela mais estreita. Na prática de aciaria, a grande variação do teor de oxigênio antes do tratamento com Ca e a previsibilidade ruim do rendimento do Ca para reagir com Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> podem fazer com que o atendimento à janela no tratamento com Ca seja problemático.

#### 2.3.4 Deposição de inclusões nas válvulas submersas – *Clogging*

A presença de inclusões nos aços além de ser, na maioria das vezes, prejudicial às propriedades mecânicas, também pode interferir na produtividade do processo pela piora da lingotabilidade, podendo levar à formação de *clogging* no lingotamento contínuo.

“*Clogging*” é o nome dado ao fenômeno de entupimento das válvulas submersas por meio do acúmulo de inclusões. Este acúmulo é um problema grave no processo pois a aglomeração de inclusões ocasiona no estrangulamento da válvula, dificultando a passagem de aço e diminuindo o fluxo do mesmo. Como consequência, as hastes tampão devem subir para compensar esta obstrução e manter a velocidade de lingotamento. Como resultado, tem-se alterações no nível do molde e da altura dos tampões, possível perda de veio (bloqueio total da passagem de aço, interrompendo o lingotamento no veio afetado) e perda de qualidade do produto final (CONTINI, 2011).

A qualidade interna dos tarugos é gravemente afetada pelo “*clogging*” pois, o desprendimento desse aglomerado de inclusões que entope as válvulas submersas pode vir a ser arrastado pelo aço vindo a submergir pelos moldes, ficando aprisionado nos tarugos após a solidificação formando uma macroinclusão (ZHANG, 2003; ALDERS, 1997).

Como método de avaliação desta obstrução, a prática mais comum é a avaliação da altura dos tampões e do nível de aço no molde em função do tempo. A figura 2.21 exemplifica esta avaliação pela comparação de uma situação padrão comparada à uma onde a presença de um *clogging* foi identificada.

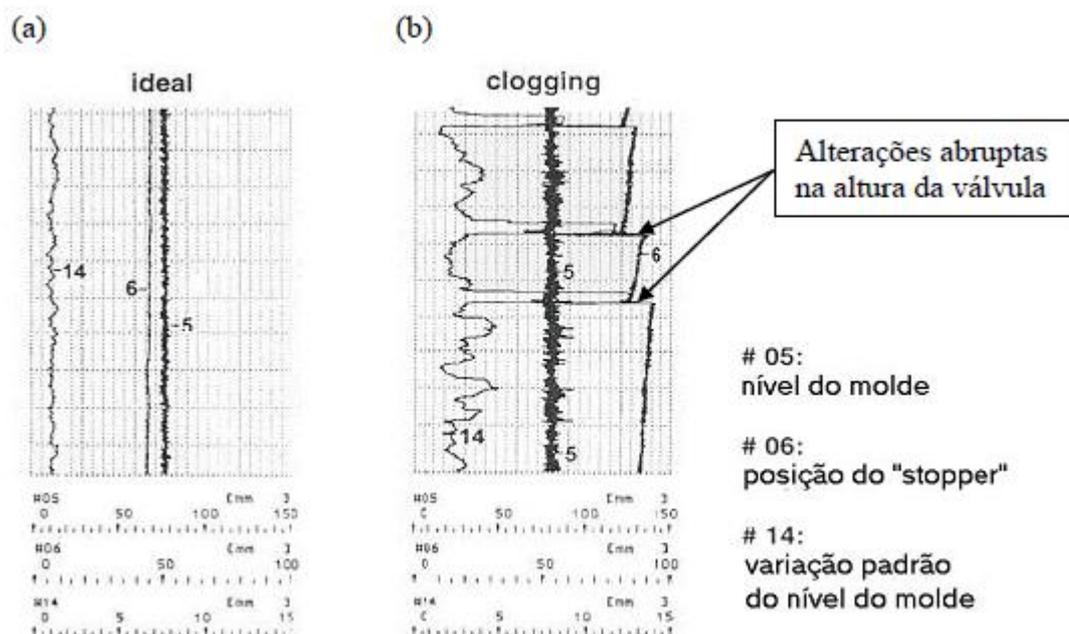


Figura 2.21: Comparação do nível do molde e posição do tampão entre uma corrida padrão ideal a) e uma corrida com ocorrência de clogging b). (Fonte: adaptado de BANNENBERG, 1995)

A figura 2.21 mostra o sistema de avaliação da lingotabilidade pela variação da altura dos tampões e variação do nível do molde. Indicados pelos números 05, 06 e 14 estão: a posição no nível do molde, a posição do tampão (*stopper*) e a variação padrão do nível do molde, respectivamente. Nota-se na figura 2.21 a) que, em situações ideais de lingotamento, praticamente não se observa alterações no nível do molde e na altura dos tampões (posições 06 e 14), porém, quando a presença de *clogging* é identificada b) observa-se variações bruscas na altura dos tampões, assim como na variação do nível do molde. Tais variações se devem à elevação dos tampões para permitir a saída de aço pelas válvulas, conforme citado anteriormente.

“Ciclos de limpeza” podem ser realizados para liberar as inclusões da válvula submersa (CONTINI, 2011). Neste procedimento, uma queda brusca do tampão é forçada, seguido do levantamento do mesmo de forma a prensar as inclusões contra a válvula, desprendendo-as da mesma. Tal prática é altamente não recomendada, visto que o destaque do *clogging* pode ser arrastado como macroinclusões para dentro dos tarugos.

A lingotabilidade dos aços através das válvulas submersas depende das práticas de desoxidação, da temperatura e perdas térmicas atreladas ao processo (FAURING, 1985;

DEKKERS, 2002). Sendo assim, a viscosidade do aço será aumentada quando se tem um aço de baixo superaquecimento, favorecendo a ocorrência de *clogging* pelo estreitamento da janela de lingotabilidade, conforme visto anteriormente.

O *clogging* é um produto de inclusões endógenas presentes no aço líquido que passam pela válvula submersa ao longo do período de lingotamento contínuo, onde as inclusões de alumina (por exemplo) vão se aglomerando devido às forças de contato inerentes à sua morfologia e tamanho (SINGH, 1974; SCHEVCHENKO, 1970). A figura 2.22 mostra uma válvula limpa a) em comparação à uma que apresenta *clogging* b).

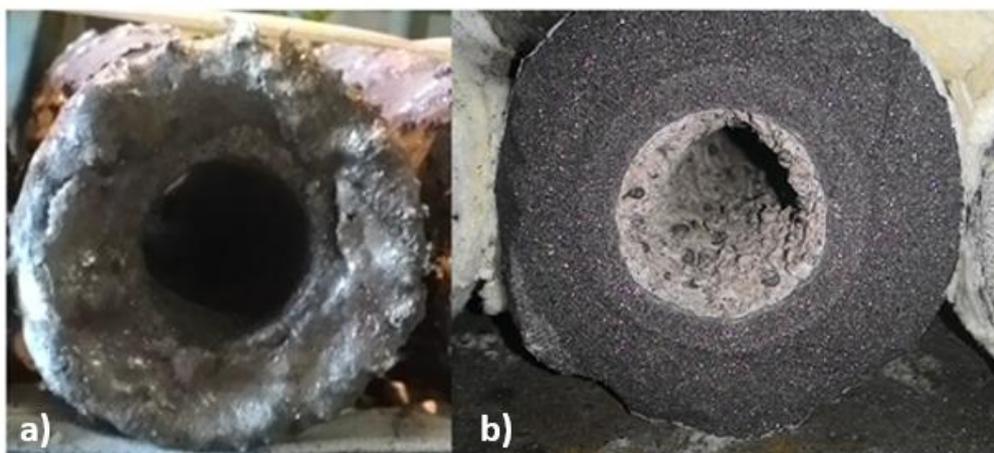


Figura 2.22: Comparação entre válvulas com (b) e sem clogging (a). (Fonte: Cortesia Gerdau)

Segundo RACKERS, K. et al. (1995), descrito por CONTINI, A. (2011) existem quatro fenômenos responsáveis pela obstrução das válvulas submersas:

i) Aglomeração de inclusões provenientes da desoxidação como: zircônia, alumina e titânia que formam aglomerados nas paredes das válvulas submersas ocasionando no bloqueio do canal da válvula.

ii) Solidificação prematura do aço na válvula (*freezing*). Ocorre quando a temperatura do aço é baixa o suficiente para solidificar antes que o mesmo venha a passar pelas válvulas, diminuindo assim a abertura dos canais.

iii) Aglomeração de óxidos complexos, como pós fluxantes. O pó utilizado nos moldes pode alcançar a região de saída das válvulas ocasionando um acúmulo no interior da válvula.

iv) Entrada de ar atmosférico ocasionando reoxidação do aço.

A localização dos depósitos de inclusões pode ocorrer: entre os tampões e as válvulas, ao longo dos canais das válvulas, ou na saída das válvulas. A figura 2.23 ilustra as regiões mais favoráveis ao *clogging*. Segundo CONTINI, A. et al. (2011) a região pertencente ao colo da válvula é a mais favorável à deposição de inclusões, seguido pela válvula submersa e tampão.

Apenas de 1 a 5% do total de inclusões do distribuidor (20 a 80 ppm) são necessárias para bloquear totalmente o canal de uma válvula (GARCIA JUNIOR, V., 2009).

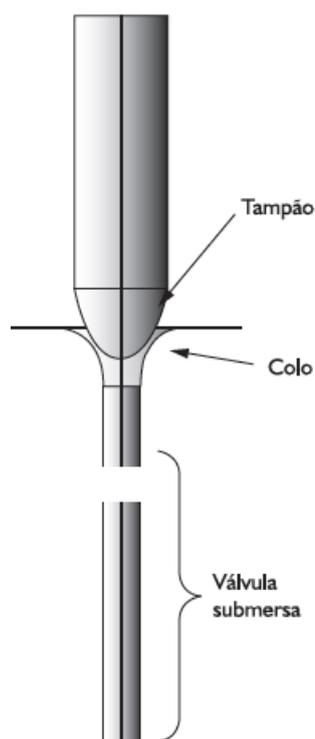


Figura 2.23 - Regiões favoráveis à deposição de inclusões no distribuidor. (Fonte: CONTINI, 2011)

Existem basicamente, três tipos diferentes de depósitos nas válvulas submersas (FUHR, 2003):

i) Camada vítria: Composta principalmente por silicatos de manganês contendo  $Al_2O_3$  e CaO. Esta camada cobre a parede interna da válvula e não é a principal causa de *clogging*.

ii) Aglomerado externo à válvula: Possível causa de *clogging*, é composto principalmente por CaO,  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$ , com traços de MgO e MnO, dentre outros óxidos. Graças à composição e localização deste depósito, acredita-se que a formação tenha origem nos pós fluxantes utilizados no molde.

ii) Depósito irregular no interior da válvula: Composto basicamente por cálcio-aluminatos contendo teores de MgO, possuem formato irregular e composição bem próxima àquelas observadas nas inclusões dos produtos finais. É o tipo mais comum presente nas ocorrências de *clogging*.

Além da composição química das inclusões, as condições hidrodinâmicas da passagem do aço através da válvula submersa influenciam fortemente na formação de *clogging*. A turbulência gerada nesta passagem aumenta o potencial de contato entre a inclusão e a parede da válvula. Quanto maior for esse contato, maior será o número de partículas que ficarão aderidas e maior será a rugosidade da parede. Se esta rugosidade for alta, maior será a tendência a formação de *clogging*, visto que a turbulência no fluxo de aço será também elevada.

A aglomeração de inclusões na válvula pode ser explicada pelo fato de que, as partículas de alumina se aderem às paredes dos refratários devido às forças de atração entre a inclusão e a parede serem maiores do que as forças do fluxo de aço. Sendo assim, a única forma de se evitar a aderência das partículas seria pela redução dessas forças de atração. Porém, esta prática é inalcançável pois, seria necessário utilizar refratários com ângulos de molhamento muito baixos para que estas forças fossem reduzidas. Refratários com ângulos tão baixos implicariam em uma elevada reatividade do material, ou seja, facilmente dissolvíveis no aço, tornando esta prática totalmente inviável e impraticável. Isto explica o porquê não existem no mercado, materiais totalmente capazes de evitar a formação de *clogging* (GARCIA JUNIOR, V., 2009).

Como alternativa, uma forma de se evitar a formação de *clogging* (além do tratamento das inclusões com cálcio) se dá pela injeção de gás pela ponta do tampão. Esta prática, que está relacionada com o objetivo deste trabalho, será discutida em maiores detalhes no tópico 2.4.

### 2.3.5 Diagramas ternários aplicados a sistemas de inclusões

Geralmente, no estudo e determinação da evolução das inclusões não-metálicas presentes no aço, retira-se diversas amostras ao longo do processo e faz-se então uma análise destas inclusões via MEV-EDS (BARTOSIAKI, 2013). Para uma completa e precisa avaliação da evolução e caracterização destas inclusões, uma avaliação da composição química é feita via diagramas de equilíbrio termodinâmico. Como o sistema de óxidos que compõem a escória e as inclusões é bastante complexo, o uso de sistemas simples como os diagramas binários não é suficiente para uma avaliação precisa. Adota-se então, o uso de diagramas de equilíbrio termodinâmico ternários e até mesmo quaternários. Dependendo do tipo de aço e da etapa do processo de fabricação em que as amostras forem coletadas, diferentes sistemas serão adotados para uma análise correta. A tabela 2 apresenta os sistemas recomendados em cada etapa do processo.

Tabela 2: Aplicação de sistemas ternários nas diferentes etapas do processo. (Fonte: BARTOSIAKI, 2013)

Origem no processo	Sistema ternário adotado
Chegada ao FP	MnO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Antes de tratamento no VD	CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Após o tratamento no VD	CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Distribuidor no LC	CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO

Neste trabalho apenas será discutido o sistema CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO por ser o mais representativo à este estudo. Maiores informações a respeito dos outros sistemas ternários podem ser encontradas na revisão do estudo realizado por GARCIA JUNIOR, V. (2009).

- Sistema  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$

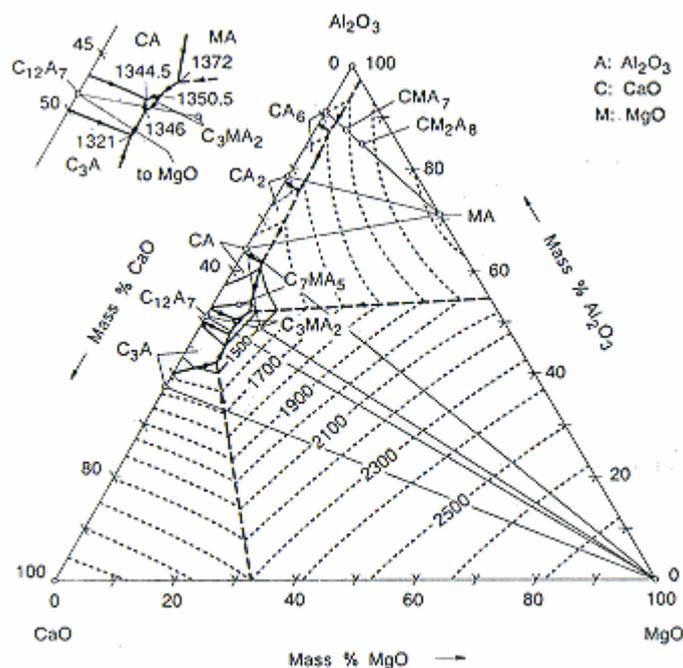


Figura 2.24: Diagrama ternário para o sistema  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ . (Fonte: SLAG ATLAS, 1995)

A figura 2.24 mostra um diagrama de equilíbrio termodinâmico para o sistema  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ . Pode-se observar que a zona ótima para a formação de inclusões líquidas se dá em uma pequena área em torno das inclusões de  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ . Neste ponto tem-se a melhor lingotabilidade do aço devido ao atendimento da faixa onde se tem uma janela completamente líquida (GARCIA JUNIOR, V., 2009).

Após o vazamento do aço, uma grande quantidade de inclusões de alumina é identificada devido às reações de desoxidação, conforme já dito anteriormente no texto. Conforme o tratamento no refino secundário é realizado, as inclusões tornam-se enriquecidas em  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$  devido às interações com a escória e refratário. Com isto, tem-se a formação de espinélios ( $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ) se a interação do aço com o refratário for demasiado extensa. Após, devido ao tratamento com cálcio, as inclusões tendem-se a enriquecer de  $\text{CaO}$ , movendo-se então para a região líquida do diagrama. A figura 2.25 ilustra o caminho seguido pelas inclusões durante os processos de refino (GARCIA JUNIOR, V., 2009).

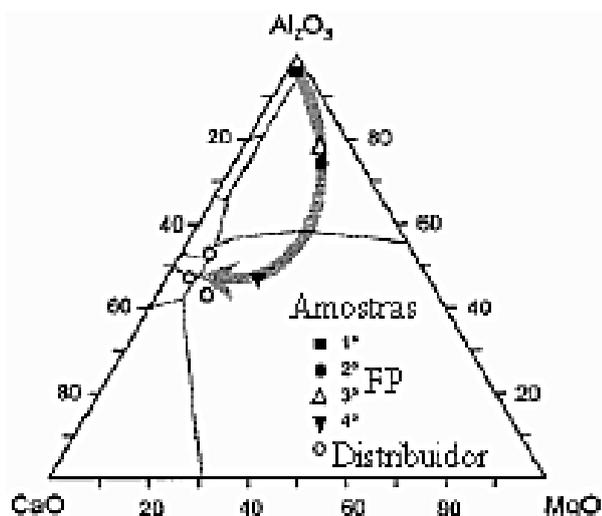


Figura 2.25: Trajetória da modificação das inclusões. (Fonte: GARCIA JUNIOR, V., 2009)

Conforme observa-se na figura 2.25, quando o tratamento com cálcio não é efetivo para a completa remoção das inclusões, estas tendem a ficar alocadas na região de formação dos espinélios. Este tipo de inclusão é altamente prejudicial à qualidade dos aços, por ser sólido nas temperaturas de trabalho, levando à tendência de formação de clogging no LC. De fato, estudos realizados previamente sobre deposição de inclusões nas válvulas indicaram a presença de espinélios nos depósitos, indicando que a ocorrência de clogging está diretamente ligada à formação de espinélios.

## 2.4 Aços limpos

### 2.4.1 Considerações iniciais

O conceito de aços limpos é muito relativo. Cada vez mais a demanda por aços livres de inclusões vem sendo ampliada no mercado. O completo entendimento e controle das inclusões e dos elementos deletérios às propriedades dos aços (S, P, H, N, Sn, Sb, Cu, Cd...) são de extrema importância para uma fabricação siderúrgica eficiente. Nesse contexto, as usinas de aços especiais detentoras de “*know how*” de qualidade vem ganhando espaço e competitividade no mercado frente aos seus concorrentes.

São chamados de “aços especiais” aqueles onde a fabricação exige um rígido controle de processo, ou seja, são aços fabricados em usinas que possuem um processo controlado voltado à produção de aços limpos, tais práticas incluem o momento e o local ideal da adição de desoxidantes e ligas, a sequência dos tratamentos de refino, agitação do banho, geometria do distribuidor e uso de desgaseificador à vácuo.

A limpeza do aço nessas usinas é realizada nos processos de refino e lingotamento pelas práticas de desoxidação, vácuo, tratamento com cálcio, rinsagem, inertização, uso de válvulas submersas e tubo longo, pós fluxantes ao invés de óleo, inibidores de turbulência e barreiras contra inclusões, por exemplo. Segundo DEKKERS (2002), as operações realizadas na panela podem reduzir a quantidade de inclusões de 65 à 75%; o distribuidor reduz 20 à 25%; e o molde consegue remover de 5 a 10% das inclusões.

A remoção das inclusões ocorre basicamente em três estágios: flotação no banho, separação do aço líquido e dissolução na escória. Sendo assim, uma inclusão somente pode ser considerada como eliminada do aço após ter sido totalmente incorporada e dissolvida na escória. Porém, para que isto ocorra, antes a inclusão precisa passar pelo processo de flotação, se separando do aço e indo até a interface metal/escória, seguido da separação dessa interface indo até a escória (REIS, 2013). As inclusões endógenas possuem massas específicas menores do que a do aço líquido, esta diferença favorece a cinética de remoção das inclusões devido à **Lei de Stokes**. Quanto menor for a massa específica das inclusões, mais favorável será a cinética de remoção das mesmas, ou seja, quanto mais leve for a inclusão, mais fácil será a sua remoção.

Além da massa específica, a temperatura é um importante fator a ser considerado na remoção de inclusões não-metálicas. Inclusões que possuem um alto ponto de fusão, serão sólidas nas temperaturas de trabalho do aço líquido (1500 – 1650 °C) geralmente com morfologia poligonal. Conforme visto anteriormente, tais características são prejudiciais à conformação do aço. Porém, em termos de remoção de inclusões, uma inclusão nestas condições é mais favorável à remoção quando comparada àquelas no estado líquido. Isto se deve ao maior ângulo de contato presente entre metal e inclusão que estas inclusões sólidas possuem, levando a uma baixa molhabilidade favorecendo a incorporação da inclusão na escória sem que sejam reabsorvidas ao aço devido à presença de uma elevada força motriz. Sendo assim, quanto maior for este ângulo de contato, maior será a remoção das inclusões. Um exemplo são as inclusões de alumina ( $Al_2O_3$ ) que, apesar de serem extremamente deletérias ao aço, possuem elevado ângulo de contato, sendo facilmente removidas já nas etapas iniciais de refino secundário. Já para as inclusões líquidas, a remoção pela escória é dificultada devido ao

baixo ângulo de contato destas inclusões, sendo facilmente molháveis pelo banho metálico. Porém, tratando-se de inclusões remanescentes no aço, as líquidas são as preferidas pois, podem ser facilmente modificadas assumindo um formato esférico, o que diminui a concentração de tensões e os efeitos deletérios que uma inclusão propicia (GARCIA JUNIOR, V., 2009).

- Lei de Stokes:

Para que uma inclusão seja efetivamente removida alguns fatores devem ser obedecidos, segundo a Lei de Stokes. Além da importância do ângulo de contato e molhabilidade das inclusões, a densidade e tamanho também são importantes características necessárias à remoção de forma que, inclusões maiores e menos densas terão uma boa facilidade de remoção.

A equação abaixo demonstra a Lei de Stokes, amplamente utilizada nos estudos de Engenharia de inclusões.

$$V_f = \frac{[2gr^2(\rho_a - \rho_i)]}{9\eta}$$

Onde:

$V_f$ : velocidade de flotação das inclusões ( $\text{m.s}^{-1}$ );

$g$ : aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ );

$r$ : raio da inclusão (m);

$\rho_a$ : massa específica do aço líquido ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

$\rho_i$ : massa específica da inclusão ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

$\eta$ : coeficiente de viscosidade do aço ( $0,0025 \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

Conforme descrito pela Lei de Stokes, a velocidade de flotação das inclusões é diretamente proporcional ao quadrado do raio das inclusões e, diretamente proporcional à diferença de densidade entre o aço e a inclusão.

#### 2.4.2 Remoção de inclusões no Forno-Panela

Diversos são os fatores que afetam a limpeza inclusionária dos aços. Além das reações diretas de formação de inclusões, outros parâmetros indiretos de processo são extremamente importantes na formação das inclusões, sendo o seu entendimento fundamental para a fabricação de aços limpos. Além do tipo de desoxidante utilizado, a ordem, tempo e quantidade de adição, práticas de vazamento e homogeneização do banho são fundamentais na fabricação de aços limpos.

Além dos fatores descritos pela Lei de Stokes, um tempo mínimo é requerido para que haja o coalescimento e flotação das inclusões (MILLMAN, 2004). Um exemplo desta influência pode ser utilizado comparando inclusões de alumina com tamanhos diferentes: uma inclusão de 100 $\mu$ m demora cerca de 4,8min para percorrer um caminho de 2,5m do interior do banho até a superfície, enquanto que uma menor, com 20 $\mu$ m de diâmetro leva em torno de 119min.

Sendo assim, um tempo mínimo de flotação deve ser obedecido para que se possa ter uma boa remoção das inclusões. Não obstante, outras práticas operacionais também são importantes e fundamentais neste trabalho. A rinsagem com gás inerte (usualmente o argônio é mais utilizado, podendo também ser utilizado o nitrogênio para aços com faixa deste elemento em sua composição química) favorece a dissolução do desoxidante e acelera o crescimento das inclusões por auxiliar na coalescência, beneficiando a flotação pela lei de Stokes (pois a coalescência das inclusões acarreta na união das mesmas, obtendo-se então, inclusões maiores). Além disto, a rinsagem faz com que as partículas de inclusões pequenas se incorporem às bolhas de gás, facilitando o transporte das inclusões menores através do banho. Outro benefício é o de aumentar a interação do aço com a escória, facilitando o contato das inclusões com a escória. A figura 2.27 ilustra o processo de rinsagem com injeção de gás inerte pela base da panela.

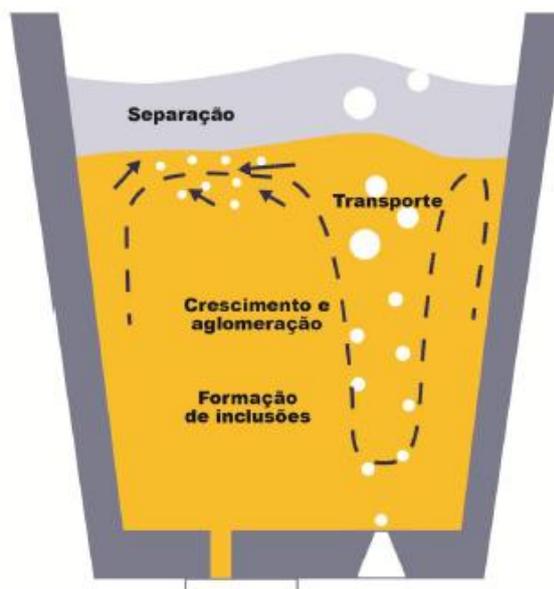


Figura 2.26: Influência da rinsagem na remoção das inclusões. (Fonte: Adaptado de HOLAPPA, 2014)

Apesar dos benefícios que a prática de rinsagem com gás inerte proporciona, alguns cuidados devem ser tomados para que não se tenham efeitos adversos. Por exemplo, uma vazão ideal de gás deve ser objetivada visto que, a separação das inclusões direcionada para a interface metal/refratário pode ser algo bastante danoso, pois pode atuar como núcleo de crescimento para aglomerados de inclusões, podendo ocorrer o descolamento destes aglomerados e posterior arraste para o aço (REIS, 2013).

Sendo assim, o ajuste de vazão deve ser otimizado de modo a evitar turbulência dentro do banho metálico. Tal ajuste varia de usina para usina pois depende dos parâmetros de processo, como tamanho e capacidade da panela siderúrgica, por exemplo. Outro ponto importante a ser destacado é que, devido ao agrupamento das inclusões menores às bolhas de gás, é de extrema importância que essas bolhas sejam completamente removidas do aço. Caso contrário, estas bolhas tornar-se-ão inclusões também, ficando aprisionadas no aço após a solidificação, sendo prejudiciais à qualidade do aço assim como as inclusões não metálicas. Como forma de controle, um adequado tempo de vácuo deve ser obedecido, de modo a garantir a melhor remoção de gases possível. Novamente, este parâmetro irá depender das condições do processo e varia entre plantas siderúrgicas.

### 2.4.3 Remoção de inclusões no lingotamento contínuo

Como última etapa onde o aço encontra-se no estado líquido, o lingotamento contínuo torna-se a última chance de se remover inclusões por flotação. No entanto, diversas são as fontes de reoxidação presentes nesta etapa, o que levou a motivação de estudos voltados a reduzir esta fonte de inclusões, assim como a remoção das mesmas por flotação já no distribuidor e molde (ZHANG, 2002).

A figura 2.28 mostra uma representação de um distribuidor com suas diferentes fontes de reoxidação do aço, assim como o típico mobiliário implementado para favorecimento da limpeza.

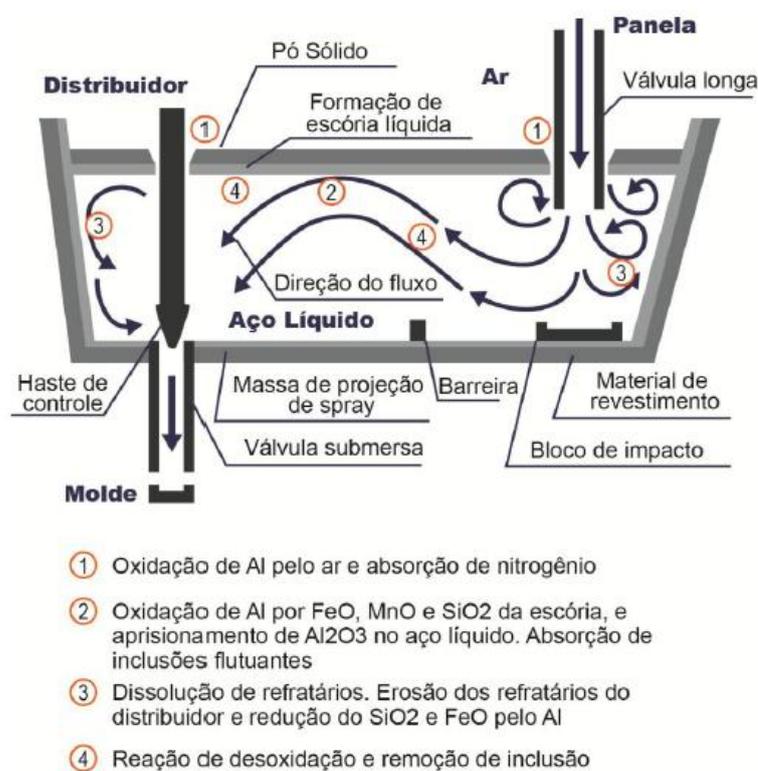


Figura 2.27: Fontes de reoxidação e mobiliário típico dos distribuidores. (Fonte. Adaptado de ZHANG, 2002)

Segundo GARCIA JUNIOR (2009), nos últimos anos os distribuidores das aciarias ao redor do mundo foram estudados, com o objetivo de maximizar os benefícios do tempo de residência disponível para flotação e assimilação dos produtos de reação do aço líquido na fase de escória. Essas reações podem ser de desoxidação, reoxidação, precipitação, emulsificação

e/ou arraste de componentes refratários no aço líquido e, assim, compreendem inclusões endógenas e exógenas.

Assim como o trabalho no distribuidor, outras práticas são adotadas no lingotamento contínuo para beneficiar a limpeza dos aços.

- Utilização de tubo longo

Tubo longo é um dispositivo refratário que permite a proteção do fluxo de aço da panela para o distribuidor, hoje em dia, sua utilização é básica em todos os processos de fabricação de aços especiais e aços ao carbono acalmados ao alumínio. Com o objetivo de prevenir a aspiração de ar atmosférico pela parede da válvula, é necessário que o refratário tenha espessura e densidade suficientes, assim como baixa permeabilidade.

A utilização do tubo longo na transferência de aço líquido da panela para o distribuidor pode reduzir muito a reoxidação do aço nessa operação. Em algumas usinas, com a utilização do tubo longo, o *pick-up* de nitrogênio foi reduzido de 24 para 3ppm. Além de proteger contra reoxidação, o tubo longo diminui o arraste da escória do distribuidor para dentro do aço. O uso do tubo longo no coletor externo da panela é frequentemente otimizado por meio de um selo refratário (*gasket*), que pode ser uma rosca aderente, um anel semipermeável ou uma cerâmica impermeável.

- Inertização do distribuidor

Assim como foi visto para a rinsagem em panelas, o uso de gás inerte pode proteger o aço contra a reoxidação do ar de muitas formas. O pó de cobertura do distribuidor só é adicionado depois que o aço já esteja fluindo, para prevenir seu arraste para dentro do aço. Combinando a turbulência na abertura da panela e o arraste de ar, a reoxidação do aço pode durar mais de 15 minutos, no início de lingotamento. Para combater esse problema, o distribuidor pode ser inertizado, antes da abertura da panela, para expurgar o ar do seu interior,

reduzindo tanto o oxigênio total quanto o *pick-up* de nitrogênio durante a partida da máquina. A Figura 2.29 mostra a esquemática de um distribuidor com sistema de inertização por argônio.

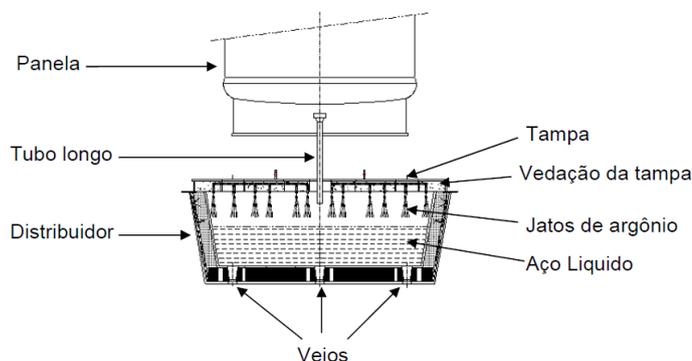


Figura 2.28: Esquemática de um distribuidor com sistema de inertização por argônio. (Fonte: FERNANDES, 2007)

#### 2.4.4 Uso de tampões com injeção de gases para limpeza dos aços

Conforme descrito em capítulos anteriores, a rinsagem tem importância fundamental na remoção das inclusões na panela. Inspiradas por esse potencial, novas tecnologias de material refratário para o distribuidor vem sendo desenvolvidas para permitir a injeção de gás inerte no fundo do distribuidor ou no colo da válvula submersa com objetivo de evitar a aglomeração de inclusões na região do colo da válvula e ocorrência de clogging. Estudos anteriores (CONTINI, 2011; GARCIA JUNIOR, V., 2009; KLOSTERMANN, 2007; BURTY, 1998; SENGUPTA, 2015) indicam que a rinsagem com gás inerte possui ótimos resultados neste aspecto.

Uma das técnicas possíveis para a barreira de inclusões, quando as melhorias nos parâmetros de processo de refino tornam-se escassos é a injeção de gás através dos tampões no distribuidor. O gás injetado na região do colo da válvula pela ponta dos tampões gera uma nuvem de gás que impermeabiliza a superfície refratária das válvulas e do tampão, isto faz com que o ângulo de entrada de inclusões e o ângulo de contato (molhamento) entre as inclusões e o colo da válvula seja reduzido, dificultando a aglomeração de inclusões no colo da válvula (CONTINI, 2011; GARCIA JUNIOR, V., 2009). A figura 2.30 mostra a representação esquemática do sistema de injeção de gás inerte pela ponta da válvula tampão.

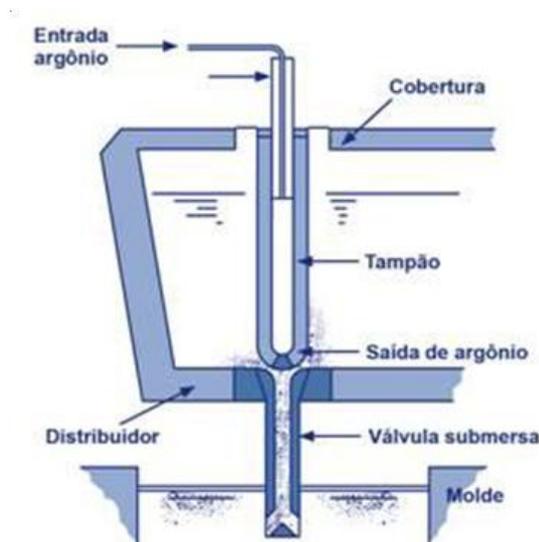


Figura 2.29: Representação esquemática da injeção de gás pela válvula tampão.

A implementação desse sistema exige tecnologia de automação, cuidados durante a montagem do tampão, válvula e circuito de injeção de gás, além do desenvolvimento das pressões e vazões ideais de purga de gás. Um rígido cuidado com a selagem das conexões deve ser adotado a fim de se evitar a infiltração de ar no sistema de injeção do gás. Caso esta infiltração ocorra, um efeito contrário será observado, pois a entrada de ar atmosférico ocasiona na reoxidação do aço, levando a formação de novas inclusões e aumentando gravemente as chances de ocorrência de *clogging*. Quando isto ocorre pontualmente em uma única linha da rede, haverá a formação de *clogging* apenas em uma das válvulas, tornando fácil a identificação do mal isolamento. Porém, aguardar a ocorrência de *clogging* para identificar a infiltração de ar na rede é um risco que não deve ser tomado, para tanto, indicativos de pressão e contrapressão da rede são ideais para o controle.

O gás mais utilizado neste processo é o argônio. Porém, seu uso pode causar efeitos adversos no lingotamento de seções pequenas. Dependendo das vazões utilizadas, o gás pode acabar sendo arrastado juntamente com o aço através das válvulas submersas, ficando aprisionado entre as dendritas do aço em solidificação, levando à formação de *pinholes* e *blowholes* nos tarugos solidificados (SERRA, J. G., 2011). Devido a isto, recentemente novos estudos com a utilização de nitrogênio vem sendo realizados. O gás nitrogênio, por possuir certa solubilidade no aço, menor densidade e tamanho, acaba por ser melhor removido do aço pela facilidade de flotação das bolhas e por solubilizar-se no aço. Com isto, a ocorrência de *pinholes* é severamente reduzida, quando comparado ao uso de argônio.

A formação de *pinholes* pelo uso de argônio pode ser explicada, pela elevada densidade e maior tamanho das bolhas formadas, o que acaba por dificultar a eliminação do gás para a superfície. Por ser menos denso e parcialmente inerte, ou seja, possuir certo grau de solubilidade no aço, o nitrogênio é o gás mais indicado quando se trabalha com seções menores de lingotamento, onde não se tem muito espaço nem tempo para que as bolhas possam flotar à superfície. A figura 3.9 indica o grau de solubilidade do nitrogênio nos aços com relação à temperatura e a fase presente.

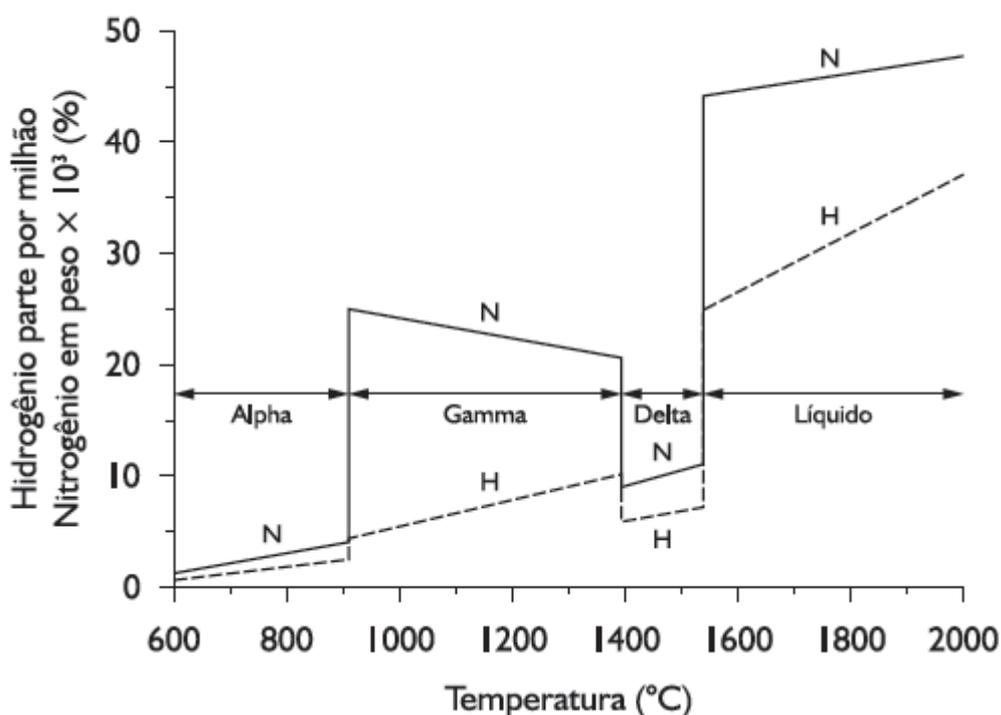


Figura 3.9. Solubilidades dos gases N e H no ferro para a faixa de temperatura de 600°C a 2000°C. (Fonte: Serra, J. G. 2011).

Pode-se observar que, à medida em que a temperatura cai a solubilidade dos gases no aço também é diminuída, indicando que, se não controlados os teores de gases presentes nos aços no estado líquido, a presença de porosidades como *pinholes* e *blowholes* tornar-se-á inevitável.

Nota-se também que, para as fases delta e alfa a solubilidade do nitrogênio cai consideravelmente com relação ao estado líquido. Sendo assim, aços com faixa muito baixa de carbono devem possuir um cuidado maior com a utilização de nitrogênio pela haste tampão, podendo ocasionar o aprisionamento do gás devido à baixa solubilidade do mesmo

em temperaturas de solidificação. Para este caso, deve-se estudar a utilização de argônio em vazões extremamente baixas.

### 3. MATERIAIS E METODOLOGIA

A seguir serão apresentadas as técnicas utilizadas, para avaliação da eficácia do uso de gás nitrogênio pela ponta das válvulas tampão no distribuidor do lingotamento contínuo de aços especiais.

#### 3.1. Tipo de aço utilizado

Para o presente trabalho, estudou-se o comportamento de um aço SAE 1045 MOD.

O aço SAE 1045 MOD possui baixa temperabilidade, ou seja, a penetração de dureza na seção transversal é baixa, sendo a utilização em bitolas grandes não recomendada, pois, somente se alcançaria uma dureza superficial para bitolas acima de 60mm. Uma boa relação entre resistência mecânica e resistência a fratura é exigida e é geralmente utilizado com durezas entre 180 e 300HB.

Os tarugos obtidos após a solidificação do aço possuem seção quadrada de 155mm, sendo posteriormente transformados na laminação em barras cilíndricas com bitola de 33mm de diâmetro. A faixa média de composição química para o aço SAE 1045 MOD utilizado neste trabalho é apresentada na tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Faixa de composição química do aço SAE 1045 MOD. % em massa.

SAE 1045 MOD	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Sn	Cu	Pb	N
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>Mín.</b>	0,43	0,15	0,7	-	0,015	0,100	-	-	0,010	-	-	-	-
<b>Máx.</b>	0,48	0,30	0,9	0,030	0,030	0,200	0,25	0,06	0,035	0,030	0,25	0,010	0,011

A tabela 3 mostra a faixa típica de composição química de trabalho para os aços SAE 1045MOD onde, os elementos que não possuem faixa mínima são indesejáveis e sua faixa máxima permitida se refere ao teor residual aceito pelo cliente. Ajustes de composição química foram realizados pela equipe de processos da usina, a fim de se alcançar a melhor faixa dentro da janela de lingotabilidade. A figura 3.1 mostra a janela de lingotabilidade obtida para o aço SAE 1045MOD, assim como sua típica faixa de trabalho para cálcio e alvo de alumínio.

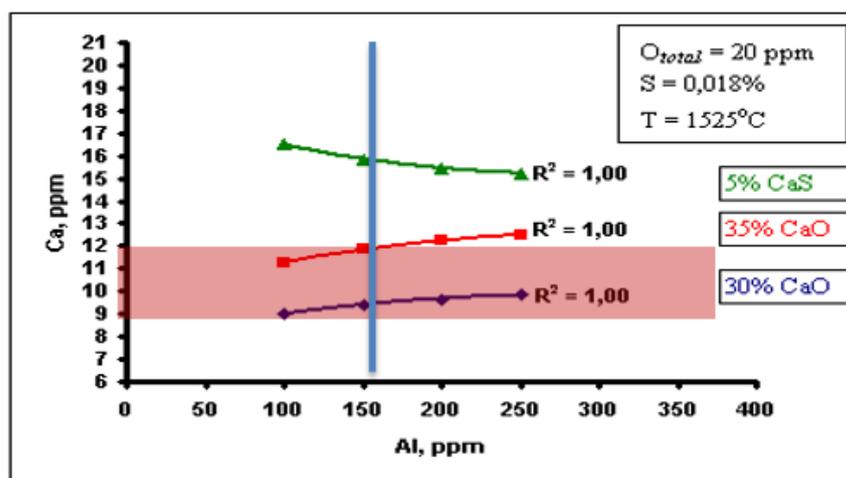


Figura 3.1: Janela de lingotabilidade para o aço SAE 1045MOD com 0,018% de enxofre e 20ppm de oxigênio à 1525 °C. (Fonte: Simulado via FactSage pelo LaSid, UFRGS, 2014)

A figura 3.1 mostra em vermelho, a faixa de trabalho usual de cálcio e representada pela reta vertical azul, o teor de alumínio. Nota-se que, ambos os valores já atingem uma área onde se obtém inclusões líquidas e boa lingotabilidade, ou seja, melhorias de processo para este aço tornam-se esgotadas. Isto justifica a abrangência do uso de barreiras físicas para inclusões no distribuidor do lingotamento contínuo, como alternativa ao controle de inclusões e melhoria de processo. Sendo assim, se fez necessário a aplicação deste estudo com vistas a melhorar os parâmetros de lingotabilidade e presença de inclusões por meio de injeção de gás nitrogênio pela ponta das válvulas tampão.

O aço SAE 1045MOD é geralmente utilizado na fabricação de componentes de uso geral onde uma boa resistência mecânica é exigida. No caso do material utilizado neste trabalho, a aplicabilidade do produto final é destinada à confecção de peças para juntas homocinéticas. Logo, um elevado controle inclusionário deve ser adotado na confecção do aço

em questão, pois, por se tratar de uma aplicação automotiva, problemas com macroinclusões são de alta gravidade.



Figura 3.2: Exemplo de componente (a) e junta homocinética completa (b).

(Fonte: carburado.com.br, 2016)

### 3.2. Equipamentos e parâmetros de processo da Aciaria

A usina siderúrgica onde ocorreram os experimentos possui uma aciaria com os seguinte equipamento principais: um forno elétrico a arco com 70t de capacidade; um forno panela com capacidade de 65t; dois tanques desgaseificadores à vácuo; operação com lingotamento convencional; e uma máquina de lingotamento contínuo de tarugos curva de três veios com moldes parabólicos do tipo *invex*, em seção quadrada que podem ser de 155 ou 240mm laterais. A máquina utilizada possui 9m de raio, e a mesma ainda conta com um “*Mould Eletromagnetic Stirrer*” na parte superior junto ao molde e, um “*Final Eletromagnetic Stirrer*” após a zona secundária de resfriamento para evitar a segregação nos tarugos. O corte é feito por oxicorte e passam por um leito de resfriamento do tipo marchante.

No caso deste trabalho, conforme já citado anteriormente, uma seção de 155mm foi adotada de forma a melhor obter-se a bitola final na laminação. A figura 3.3 mostra o fluxo de

processos de uma aciaria elétrica. Em destaque encontra-se a etapa de lingotamento contínuo, local onde ocorreram os testes deste trabalho.

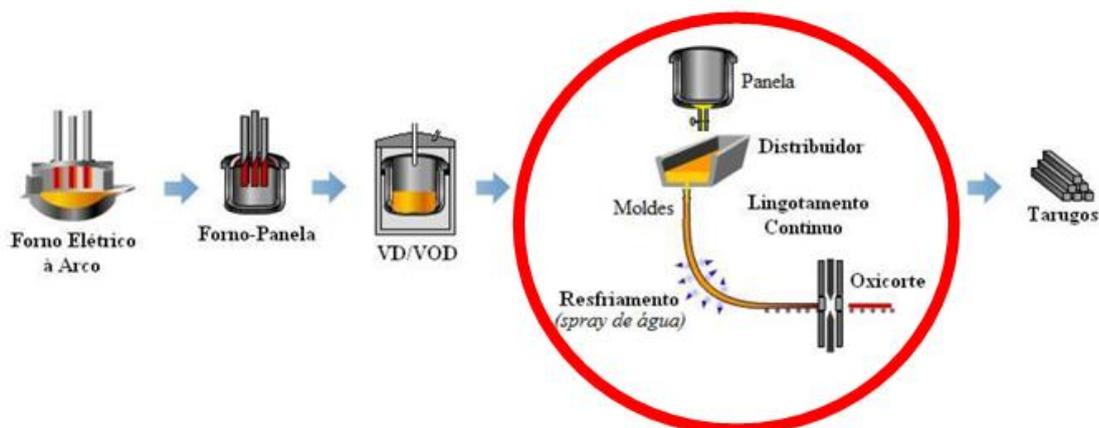


Figura 3.3: Etapas de fabricação do aço, com destaque para o lingotamento contínuo de tarugos. (Fonte: adaptado de GARCIA JUNIOR, 2009)

A Figura 3.4 detalha a região de interesse do lingotamento contínuo para este trabalho, com destaque para a letra b) onde tem-se uma ampliação da região dos veios no distribuidor. Neste ponto, concentra-se o interesse deste trabalho.

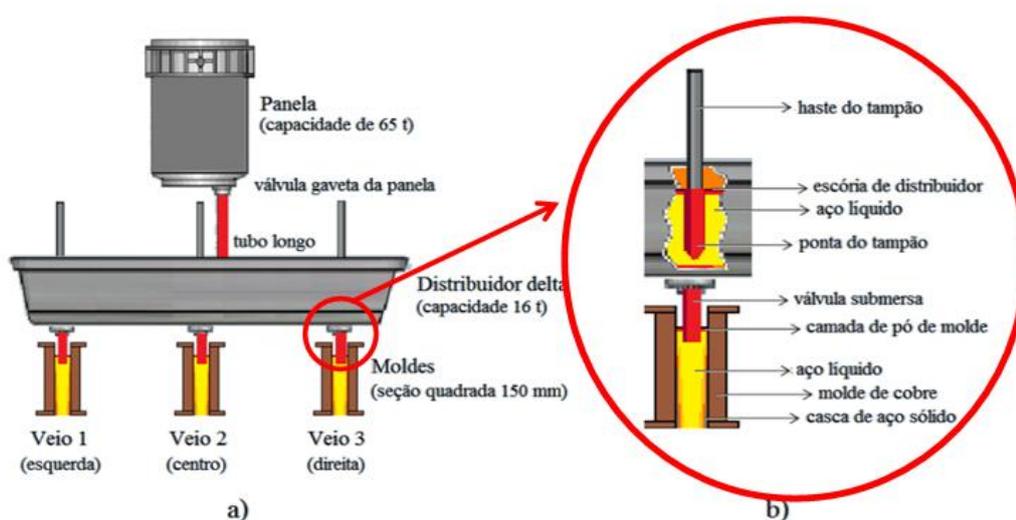


Figura 3.4: Detalhamento da região de interesse do lingotamento contínuo: (a) macro-visão mostrando panela, distribuidor e moldes; (b) ampliação da região dos veios, onde o aço escoou do distribuidor para os moldes. (Fonte: adaptado de GARCIA JUNIOR, 2009).

### 3.3. Fluxograma de práticas experimentais

Para a realização das atividades práticas referentes à este trabalho, desenvolveu-se uma ordem específica de tarefas separadas em seis etapas de processo.

A figura 3.5 mostra o fluxograma adotado para a realização dos testes e amostragem do material estudado. Adaptações da rede de gases na plataforma do lingotamento contínuo tiveram de ser feitas internamente pela usina.



Figura 3.5: Sequência adotada para os testes.

A seguir, serão apresentadas as seis etapas adotadas na metodologia, separadamente:

#### 3.3.1 Preparo do distribuidor

O distribuidor adotado pela usina é do tipo delta-t com 15ton de capacidade. Contém inibidor de turbulência, válvulas submersas e o controle de fluxo do aço é realizado por meio de válvulas tampão. A figura 3.6 mostra um desenho ilustrativo do distribuidor utilizado.

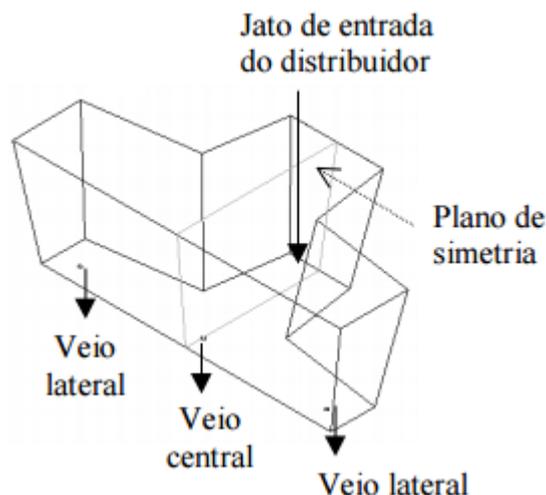


Figura 3.6: Desenho em três dimensões do distribuidor de lingotamento contínuo utilizado.  
(Fonte: TRINDADE, 1999).

A fim de se evitar a reoxidação do aço pelo contato com o ar atmosférico ao ser aberta a panela, também é utilizado um tubo longo com *gasket* de vedação na torre. Uma tampa com inertização também utilizada no distribuidor.

O preparo do distribuidor é realizado em uma plataforma, onde primeiramente são inseridas as válvulas submersas e são ajustadas a altura e centralização por meio de gabaritos localizados na parte inferior da plataforma. Após o ajuste das válvulas, é feita a inserção do inibidor de turbulência, localizado em frente ao veio central. Em seguida, uma camada de massa refratária de MgO.CaO a base d'água é projetada no fundo e nas paredes, até que se obtenha uma espessura pré-definida, regulada por meio de um gabarito. Após a projeção, é realizada a secagem da massa por um tempo pré-determinado. Feita a projeção e secagem, o distribuidor é levado à um carro transportador, onde são montados os mecanismos de elevação dos tampões. Nessa etapa, coloca-se os mecanismos e é feito o ajuste de altura e aperto dos tampões, a fim de que o mesmo efetue de forma precisa o ajuste de vazão do aço e, não caia ou quebre durante o lingotamento. Após a montagem dos mecanismos, é feito o pré-aquecimento na plataforma do lingotamento contínuo. Tal aquecimento é feito pela injeção de gás natural e, conta com um sistema de sucção por dentre as válvulas do tipo “*venturi*”. Este pré-aquecimento é realizado de modo a evitar a perda térmica do aço, diminuindo as chances de ocorrência de *freezing* e quebra das válvula por choque-térmico.

A montagem do distribuidor utilizado na execução das atividades práticas deste trabalho constituiu-se da forma padrão, à exceção do tipo de tampão utilizado e da utilização de hastes

metálicas para a condução de gases. Adotou-se o modelo de tampão com orifício longitudinal central para passagem de gases e as hastes foram confeccionadas internamente pela equipe de manutenção da planta. Parafusos e porcas também tiveram de ser adaptados ao novo conjunto. As figuras 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11 ilustram as peças utilizadas e a montagem final do distribuidor teste.

A figura 3.7 mostra a vista inferior dos tampões utilizados.



Figura 3.7: Tampão adotado nos testes, em destaque os orifícios centrais para a passagem de gás. (Fonte: Cortesia Gerdau)

Os tampões possuem uma relação de 8,6mm entre altura e diâmetro externo na parte superior, e 2,25mm entre diâmetro externo e diâmetro interno, por onde passa o gás. Ainda na parte superior do tampão, existe um “anel de vedação” que permite a selagem com o parafuso e hastes de modo a evitar infiltração de ar.

A figura 3.8 mostra as tubulações metálicas que permitem a passagem de gás das linhas até o distribuidor, acopladas aos tampões.



Figura 3.8: Acoplamento das tubulações de gases nos tampões.

Nota-se na figura 3.8 que uma capa protetora recobre os tubos para proteger de batidas, aquecimento excessivo ou quaisquer interferências externas que possam danificar as conexões. A figura 3.9 mostra o detalhe da ponta dessas conexões.

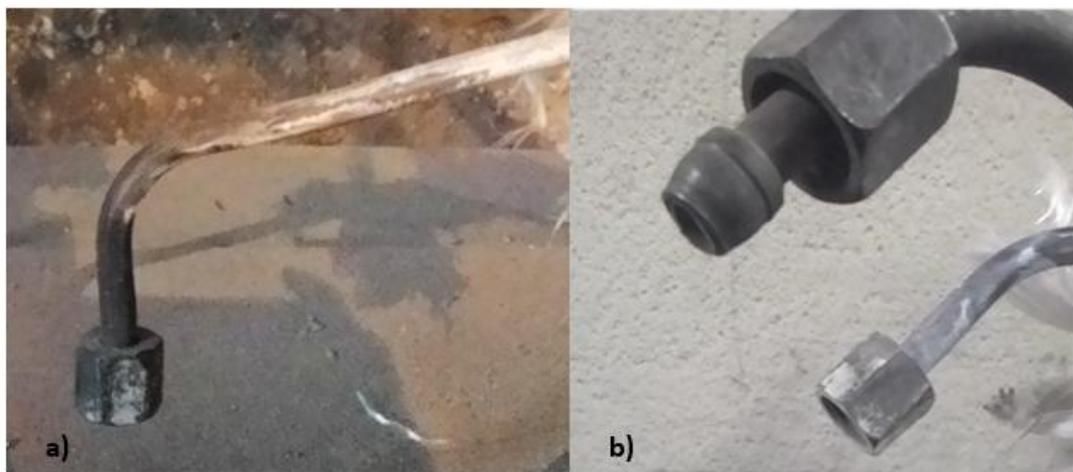


Figura 3.9: a) Haste metálica para passagem de gases. b) Detalhe de vedação na ponta da haste.

Pode ser visto na figura 3.9 a) a ponta da haste que conduz a passagem de gases. Em b) tem-se mais detalhadamente a conexão de tubo, chamada de ponta ASA. Esta peça é de fundamental importância, pois garante a vedação da conexão da haste com o parafuso de conexão do tampão. Seguidas inspeções devem ser realizadas a fim de verificar se a peça

encontra-se em boas condições. O desgaste da peça pode acarretar em uma má vedação e, conseqüentemente reoxidação do aço pela infiltração de ar. A figura 3.10 mostra os dois locais críticos para infiltração de ar.



Figura 3.10: Montagem das conexões (a) e linhas de gases (b).

A figura 3.10 mostra em a), a conexão do conjunto: haste, porca, pino e tampão. Em b) tem-se a conexão com a rede de gases via engate rápido. Estes dois pontos são os mais críticos para reoxidação, tendo que ser feitas avaliações constantes para evitar vazamentos.

### 3.3.2 Seleção do gás

Optou-se pela utilização do gás nitrogênio. Alguns autores (SENGUPTA, 2015) optam pela utilização do gás argônio em estudos semelhantes, devido ao fato deste ser inerte e não reagir com a composição química do aço onde é aplicado. Porém, testes prévios foram realizados com este gás, onde acabaram por ocasionar uma grande quantidade *pinholes* nos tarugos solidificados. Este fato inviabilizou a continuidade de utilização deste gás em testes deste tipo. Como alternativa, tem-se o nitrogênio. Com menor densidade e tamanho, sendo parcialmente solúvel no aço, esperava-se que este gás não trouxesse reações adversas à utilização no tampão.

Estudos anteriores foram realizados por CONTINI, A. (2011) e GARCIA JUNIOR, V. (2009) utilizando nitrogênio pelas válvulas submersas do tipo multiporos. Ambos os estudos mostraram resultados positivos com a utilização de nitrogênio, servindo de referência à este trabalho.

### 3.3.3 Vazão e pressão utilizadas

Testes prévios foram realizados com vazões a partir de um valor padrão, 50% do valor padrão adotado e 30% do valor padrão. Os valores de vazão são dados em N.L/min, onde a melhor configuração, ou seja, aquela onde não ocorreram efeitos adversos ao processo (como a formação de *pinholes*), se deu para a vazão de 30% do valor padrão adotado. Os números de referência foram obtidos com base em estudos realizados com modelagem matemática e física para trabalhos semelhantes. Segundo Sengupta, J. *et al.* (2015) a melhor vazão utilizada para argônio em um lingotamento de placas, seria de 7 a 10 N.L/min, porém, tal valor está diretamente relacionado ao tipo de distribuidor, seção e velocidade de lingotamento, sendo estes valores inaplicáveis às práticas adotadas neste estudo. A pressão aplicada foi a pressão normal da rede medida em bar, pelos mesmos motivos, varia conforme as características de cada planta siderúrgica.

A contrapressão é um importante parâmetro de controle deste processo pois, pode indicar entupimentos ou vazamentos na rede. Como a contrapressão é a medida da pressão inserida menos a pressão que retorna à rede, valores negativos indicam que a pressão de retorno é maior do que a que está sendo aplicada. Como trabalha-se com valores extremamente baixos, é normal que um baixo valor negativo seja encontrado. Porém, valores muito negativos podem indicar vazamentos ou entupimento da rede, necessitando uma intervenção de manutenção para solucionar o problema. Da mesma forma, valores muito positivos indicam que a vazão aplicada está muito elevada, podendo levar à infiltração de gases para dentro do aço ou, indicam que há infiltração na rede, podendo levar à uma reoxidação do aço, gerando posteriores inclusões no aço.

### 3.3.4 Lingotamento

Ajustados os parâmetros e feitas as conexões, parte-se para o processo de lingotamento em si. Para a execução deste trabalho, a fim de evitar-se misturas de composição química foi realizada a partida de máquina com barras-falsas.

Com relação à injeção de nitrogênio pelos tampões, é importante que nenhum vazamento esteja presente nas redes de gases, para que não haja infiltração de ar atmosférico, podendo ocasionar reoxidação do aço. Durante o lingotamento, constantes observações para dentro do molde foram feitas para observar se a vazão de gás estava adequada e se não havia reoxidação. Tais fenômenos são facilmente observados pelo “borbulhar” do aço dentro do molde.

Outro parâmetro importante a ser observado durante o lingotamento das corridas é a lingotabilidade do aço. É possível acompanhar se uma corrida está lingotando bem por meio da posição das hastes tampão, dada pelo sistema PIMS onde, quanto mais plana e baixa, melhor será a lingotabilidade do aço. Isto se dá pelo fato de que a posição dos tampões é um forte indicativo de *clogging* nas corridas. Conforme o número de inclusões aumenta, expandindo este acúmulo, os tampões devem subir, a fim de promover a passagem de aço para os veios. Assim, pode-se identificar a ocorrência do acúmulo de inclusões nas válvulas por meio da subida dos tampões ao longo do lingotamento, onde é comum observar a elevação dos tampões ao passar das corridas, onde as últimas terão os tampões mais elevados do que as primeiras.

O sistema PIMS ou *Process Information Management Systems* é um sistema de gerenciamento de informações que adquire dados de processo de diversas fontes, armazenando num banco de dados históricos ficando disponível em diversas formas de apresentação, geralmente na forma de gráficos. Este sistema permite a visualização de dados e variáveis de processo tanto em tempo real, quanto por pesquisas de históricos passados, podendo assim, serem apresentados em conjunto de parâmetros distintos. O sistema PIMS é de fundamental importância para um Engenheiro de Processos pois, concentra uma grande massa de dados transformando em informações que servirão de conhecimento sobre o processo em execução, permitindo que seja entendido o comportamento e situações operacionais da planta, pode-se então, confrontar o comportamento atual com o passado por meio de registros feitos pelo sistema, obtendo comparações para análises de mudanças de comportamento.

Outro parâmetro a ser levado em conta durante o lingotamento é a temperatura do aço. Sabe-se que, temperaturas muito baixas fecham a janela de lingotabilidade para qualquer aço

(HOLLAPA, 1995), facilitando a formação de inclusões e por consequência, a obstrução das válvulas submersas. Cuidados foram tomados junto à metalurgia secundária para que as corridas chegassem nas temperaturas adequadas ao lingotamento ( $T_{líquidus} + \textit{superheat}$  em °C) e evitasse problemas de temperatura como a ocorrência de *break-out* e *freezing*.

### 3.3.5 Amostragem

Para a realização da análise de eficácia do teste, diversas amostras foram retiradas ao longo do processo. Procurou-se avaliar a influência da injeção de nitrogênio pela possível presença de inclusões, pinholes e depósito nas válvulas submersas. Para tanto, amostras foram retiradas dentro da aciaria para avaliação do impacto no processo e, na laminação, a fim de se observar as influências nas barras já laminadas. As figuras 3.11 e 3.12 esquematizam os locais e objetivos da amostragem.

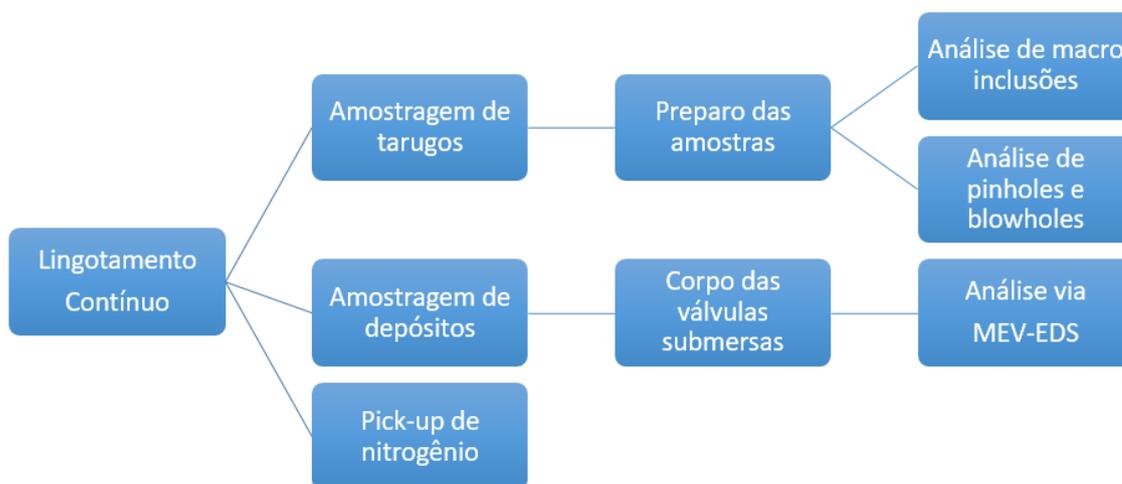


Figura 3.11: Sequência de amostragem adotada no lingotamento contínuo.

A figura 3.11 mostra o fluxograma adotado para a amostragem realizada no lingotamento contínuo. Nesta etapa do processo foram retiradas amostras de tarugos, sendo posteriormente preparadas para análise de macroinclusões, *pinholes* e *blowholes*. Amostras de depósitos das válvulas submersas foram coletadas para análise via MED-EDS. Também coletou-se amostras no distribuidor para avaliação do *pick-up* de nitrogênio.

A figura 3.12 mostra o fluxograma adotado para amostragem na laminação de barras.



Figura 3.12: Sequência de amostragem adotada na laminação.

A figura 3.12 apresenta a amostragem de barras laminadas obtidas na laminação. Optou-se pela análise via ASPEX, necessitando um preparo prévio das amostras para esta finalidade.

#### 3.3.5.1 Amostragem de tarugos

Após o lingotamento das corridas, amostras de tarugos foram retiradas para avaliação de macroinclusões e presença de porosidades nas peças (*blowholes* e *pinholes*).

Cortes transversais de 90mm de espessura foram realizados no meio de cada corrida nos veios 1 e 3, totalizando em oito amostras para avaliação. Esta amostragem não é realizada em grandes quantidades e em condições normais de operação, pois é operacionalmente inviável. As práticas de operação não permitem a análise constante dos tarugos e o corte das amostras devido ao longo tempo destinado a isto. Sendo assim, esta análise somente é feita em casos especiais, onde testes são realizados ou em homologações de novos aços.

A face superior do tarugo é identificada a fim de se analisar a posição das possíveis macroinclusões. Devido à curvatura da máquina e velocidade de lingotamento, as inclusões que estiverem nos tarugos tendem a se encontrarem na parte superior dos tarugos, pois a energia cinética de flotação as posiciona desta forma.

Após o corte e identificação dos tarugos no leito, as amostras são direcionadas a um laboratório de macrografias onde são novamente cortadas em uma serra do tipo Franho. Este corte é feito para que se elimine a superfície rugosa e irregular gerada pela oxicorte. Com a superfície plana, faz-se então o lixamento das amostras com uma lixa rotativa manual. Após, uma avaliação visual sem ataque foi realizada com o auxílio de uma lupa, para identificação

dos possíveis defeitos. *Pinholes* são identificados como pequenos orifícios de interior claro, presentes no tarugo. Já as macroinclusões apresentam-se mais escuras e podem ter formato irregular, além de serem geralmente, maiores que os *pinholes*. A figura 3.13 indica a serra utilizada para o corte das amostras.



Figura 3.13. Serra utilizada para o corte das amostras. (Fonte: Cortesia Gerdau, 2016)

### 3.3.5.2 Amostragem de depósitos presentes nas válvulas submersas

Após o lingotamento do sequencial de corridas do aço SAE 1045MOD, foram recolhidas as válvulas submersas utilizadas para análise do depósito de inclusões presentes ao final do lingotamento. Uma análise post-mortem foi feita coletando-se as pontas das válvulas e analisando-se o seu interior. Tal prática foi realizada tanto no distribuidor teste quanto em um distribuidor de uma condição normal de operação para o mesmo aço. A primeira inspeção foi feita visualmente, avaliando-se a obstrução das válvulas pelas inclusões, seguido do corte longitudinal das válvulas a fim de se extrair o depósito para posterior análise em laboratório.

Removeu-se o depósito e fez-se então análise dos depósitos via MEV-EDS a fim de identificar a composição das inclusões presentes. Sabe-se com base em trabalhos anteriores que, estas inclusões podem, além de ser endógenas serem oriundas de pós de molde (BARTOSIAKI, 2013), o que justifica a importância na análise deste depósito. A figura 3.14 mostra as válvulas devidamente identificadas, reservadas para análise.



Figura 3.14: Válvulas submersas após o lingotamento.

### 3.3.5.3 Amostragem na laminação

Devido a diferença existente na distribuição e morfologia das inclusões presentes nos tarugos das barras laminadas, amostras de barras foram retiradas após a etapa de laminação para identificação de possíveis inclusões presentes no aço. A bitola final do aço testado foi de 33mm e foram retiradas amostras de 100mm de comprimento cada. Foram retiradas três amostras de um total de 12 barras diferentes para cada uma das três corridas testadas, além da corrida padrão para fins de comparação.

### 3.3.6 Preparo das amostras para análise via microscopia eletrônica de varredura automatizada acoplada à espectrometria de energia dispersiva (ASPEX)

A figura 3.15 ilustra o modo como as amostras são cortadas para preparo. As amostras foram cortadas transversalmente à meio raio da superfície, com um mínimo de 12mm de seção quadrada e preparadas conforme corpos de prova para metalografias padrão, passando pelas posteriores etapas de limpeza, lixamento e polimento (BIELEFELDT, 2005).

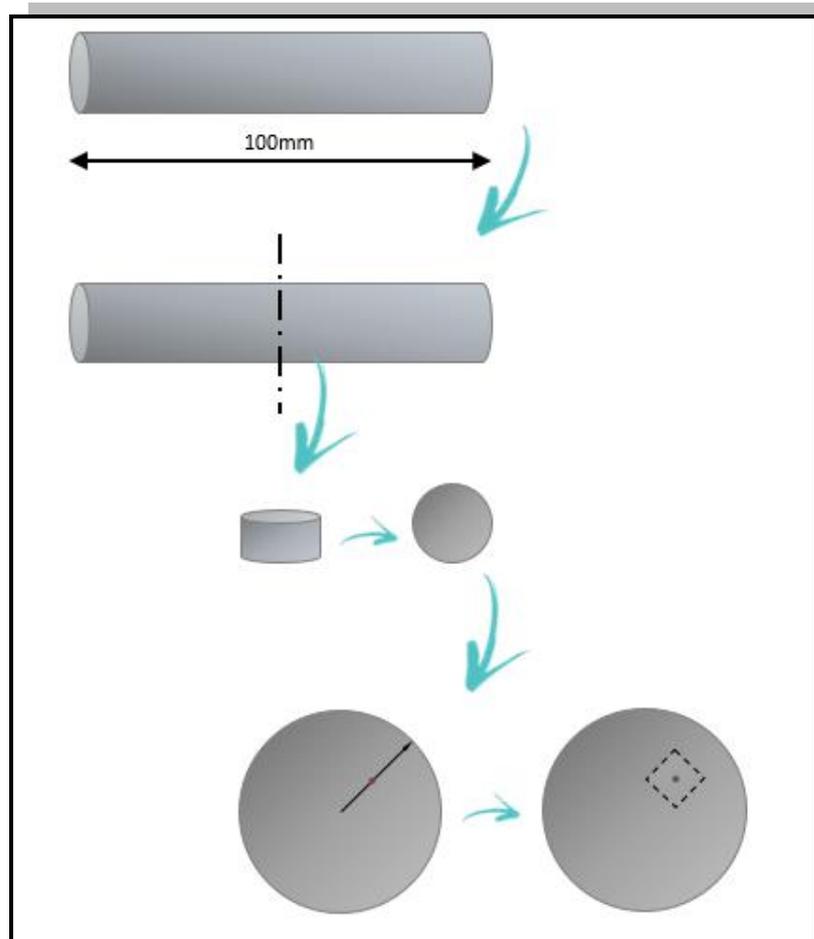


Figura 3.15: Amostragem de corpo de prova para análise em ASPEX das barras laminadas.

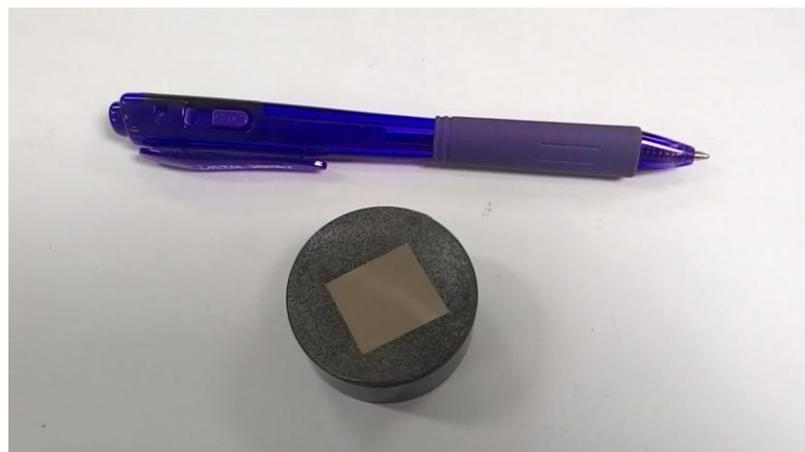


Figura 3.16: Corpo de prova pronto para ser analisado.

Após o preparo, as amostras foram analisadas via microscopia eletrônica de varredura automatizada acoplada à espectrometria de energia dispersiva (MEV/EDS). Tal método é automatizado, o que aumenta a confiabilidade dos resultados pela total análise das partículas na

área a ser varrida previamente determinada (BARTOSIAKI, 2013). Com isso é possível determinar a posição, tamanho, forma e a composição química de cada partícula não metálica identificada nas amostras. Como resultado, o equipamento gera um relatório padronizado em forma de diagramas ternários indicando as posições das inclusões encontradas. No entanto, os dados apresentados pelo relatório são sucintos e de difícil visualização. De forma a tornar a leitura dos dados mais didática, optou-se pela utilização da tabela padrão LaSid. Maiores informações sobre a metodologia e o uso desta tabela podem ser encontradas no trabalho de BARTOSIAKI, B. G. (2013).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui serão apresentados os resultados obtidos conforme proposto na metodologia. Uma comparação com corridas de mesma qualidade em condições padrão de operação (ou seja, sem a aplicação de nenhum teste e sem interferências de processo) é realizada a fim de visualizar os efeitos proporcionados pela adição do gás nitrogênio pela ponta das válvulas tampão.

#### 3.3 Lingotabilidade

A primeira e mais rápida variável de retorno sobre os testes é a lingotabilidade das corridas. Isto se deve ao fato de ser uma análise *on-line* onde pode-se observar instantaneamente através do sistema PIMS a lingotabilidade do aço. As figuras 4.1 e 4.2 mostram a lingotabilidade das corridas em sua condição padrão e de teste, respectivamente.

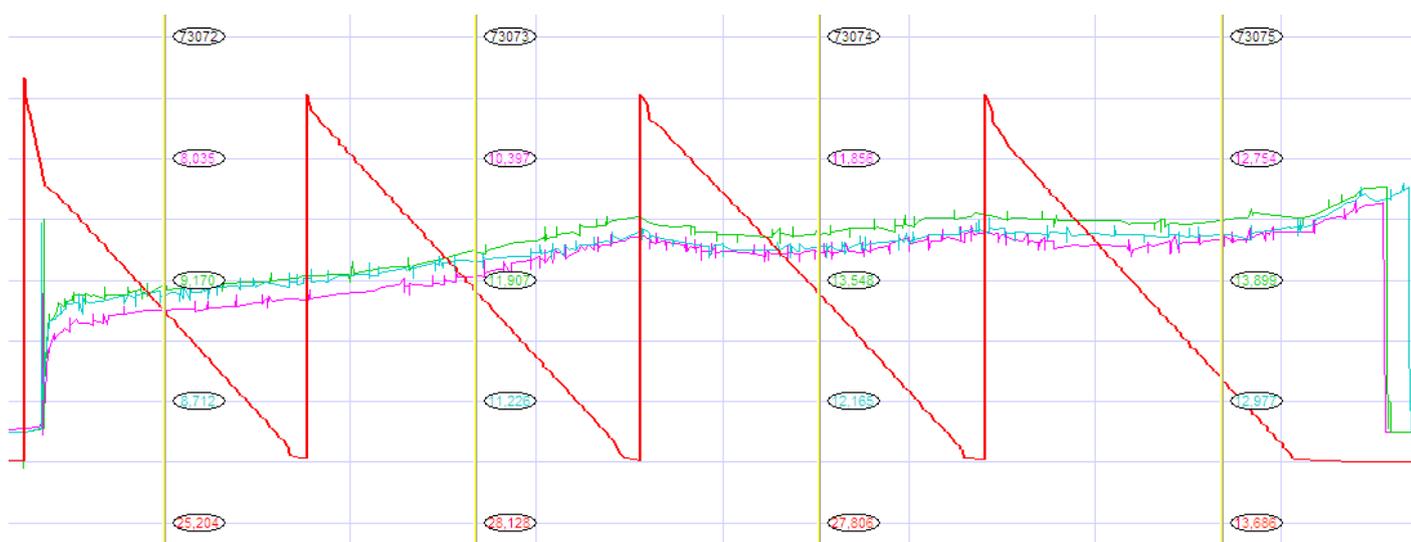


Figura 4.1: Variação da posição dos tampões para um sequencial padrão de 4 corridas.

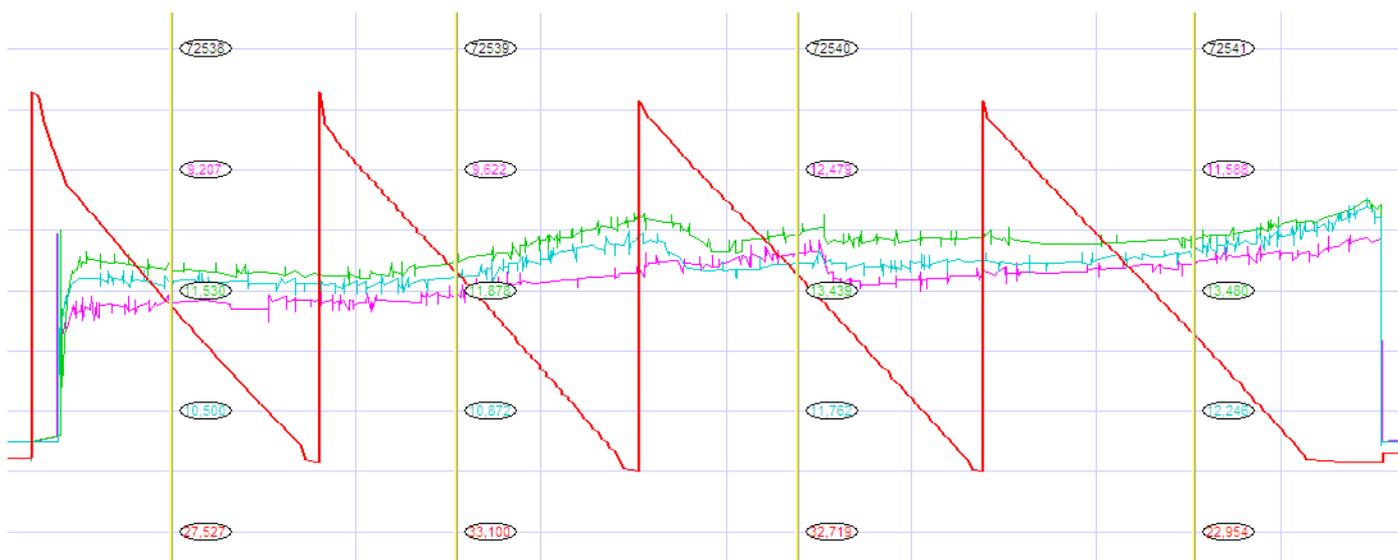


Figura 4.2: Variação da posição dos tampões para um sequencial de teste de 4 corridas, com injeção de gás.

As figuras 4.1 e 4.2 mostram a variação da altura dos tampões ao longo do lingotamento. As linhas rosa, verde e azul indicam, em milímetros, as posições dos veios 1, 2 e 3, respectivamente. A linha vermelha indica o peso, em toneladas, de aço na panela indicando o início e fim de cada corrida ao longo do tempo. A partir dos valores de elevação dos tampões obtidos via PIMS, demonstrados nas figuras 4.1 e 4.2, pôde-se obter a tabela 4 a seguir, onde são apresentadas as variações obtidas na altura dos tampões em cada veio, ao longo do sequencial.

Tabela 4: Variações de altura dos tampões para os sequenciais padrão e de teste.

	Veio 1	Veio 2	Veio 3
	(mm)	(mm)	(mm)
<b>Sequencial padrão</b>	7,63	7,04	6,76
<b>Sequencial de teste</b>	4,62	3,7	4,61

No primeiro caso, variações de 7,63mm, 7,04mm e 6,76mm nos veios 1, 2 e 3, respectivamente, foram encontradas entre o início da primeira corrida e o final da última corrida do sequencial. Enquanto que, para o segundo caso (teste com injeção de gás) foram encontradas variações de 4,62mm, 3,7mm e 4,61mm nos veios 1, 2 e 3, respectivamente, nas mesmas condições.

Nota-se que, as linhas para os três veios se mostram desencontradas ao longo das corridas. Isto pode ser explicado pela diferença no posicionamento da altura de cada válvula submersa na hora da montagem. É fato, que os próprios gabaritos de montagem mostram pequenas diferenças de alturas entre veios e entre estantes (local onde o distribuidor é posicionado para montagem das válvulas e projeção de massa refratária). Isto implica, que ao se baixar por completo o nível do tampão, este irá encontrar-se com o colo da válvula, que pode estar mais ou menos para cima, ocasionando estas diferenças de nivelamento dos tampões entre veios no distribuidor.

Sendo assim, a lingotabilidade apresentada no sequencial de teste com injeção de gás comportou-se conforme esperado. Comparando os dois sequenciais, pode-se notar que houve uma melhora deste aspecto com a utilização de nitrogênio pela ponta da válvula tampão. Não foram observados indícios de obstrução das válvulas por *clogging*, devido à boa estabilidade da altura dos tampões. Indícios de limpeza do aço também foram observados pela estabilidade do nível do molde (pois variações neste aspecto indicam a possibilidade do desprendimento de depósito e arraste para os moldes).

Logo, uma melhora na lingotabilidade pode ser observada pela estabilidade dos tampões e não observou-se variações abruptas de altura dos tampões e nível de molde. Valores quantitativos não puderam ser obtidos para esta melhora, pois seria necessário um grande número de corridas utilizando gás pela ponta do tampão para que se pudesse observar o impacto no processo e na qualidade do produto final com dados confiáveis. No entanto, espera-se que, com a utilização do gás se possa obter sequenciais maiores, visto que, parte da justificativa de limitar-se o sequencial de corridas está diretamente ligado à lingotabilidade das qualidades (limitação quanto à formação de *clogging*). Associado a isto, um aumento da produtividade da planta é esperado, pois uma redução de interrupções por perda de sequenciais devido a *clogging* é resultado da melhora da lingotabilidade dos aços.

### 3.4 Depósito inclusionário nas válvulas submersas

A caracterização de depósitos permite a identificação da ocorrência de *clogging* ou aglomerados de inclusões menos críticos presentes nas válvulas. Tal análise permite conferir se os parâmetros de processo estão sendo bem atendidos, conforme a composição química identificada nos depósitos, sabe-se se o tratamento com cálcio está sendo realizado de forma correta, se há reoxidação do banho metálico no lingotamento contínuo ou, se a utilização de pós fluxantes encontra-se adequada em termos de composição e quantidade.

A figura 4.3 ilustra as válvulas dos veios 1, 2 e 3 retiradas após o lingotamento das corridas do sequencial padrão para comparação.



Figura 4.3: Válvulas utilizadas no lingotamento das corridas do sequencial padrão.



Figura 4.4: Destaque para o depósito presente no veio 2.

Nota-se que, as corridas apresentaram uma certa quantidade de depósito inclusionário presente nas válvulas submersas após o término do sequencial. Tal deposição era, de certa forma, esperada pela elevação na altura dos tampões observada durante o lingotamento. A figura 4.5 mostra os resultados obtidos pela caracterização via MEV-EDS das válvulas.

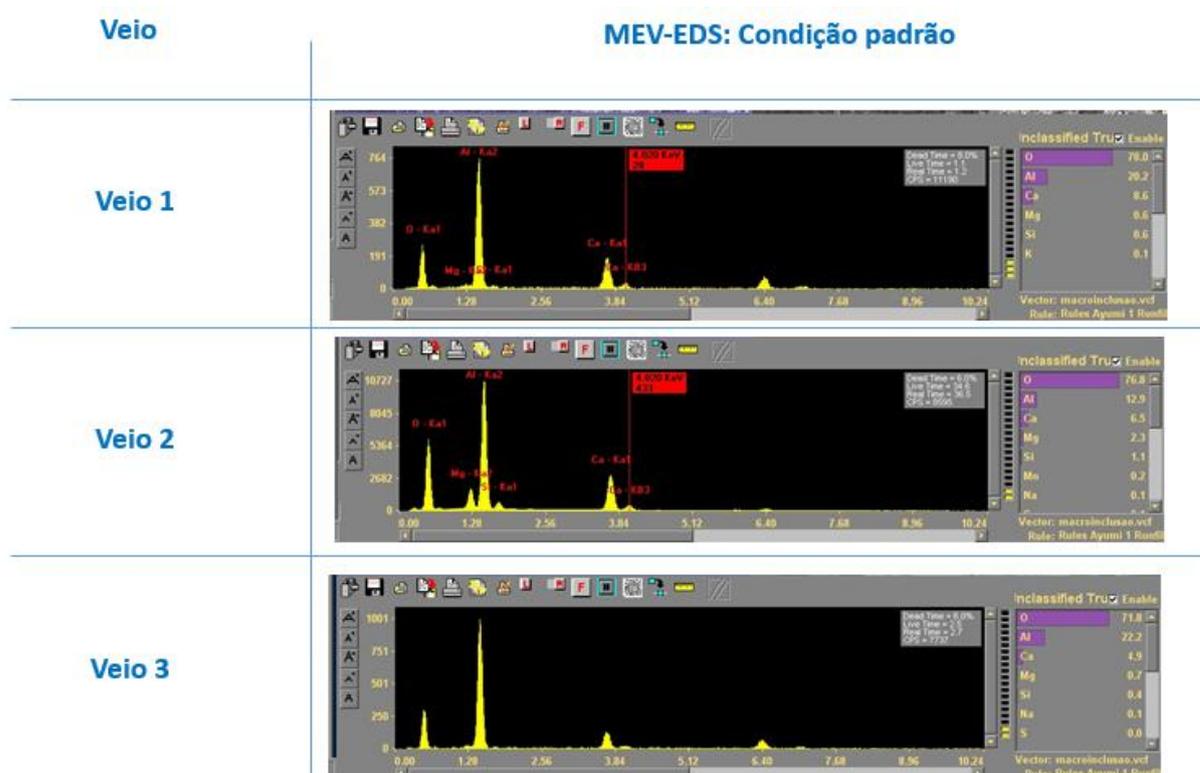


Figura 4.5: Resultados de MEV-EDS para os três veios analisados.

Com base na figura 4.5 pode-se observar que, grandes teores de oxigênio e alumínio foram encontrados nas amostras, seguidos por cálcio e magnésio, nesta ordem. Isto significa que as inclusões encontradas são majoritariamente de alumina com alguns cálcio-aluminatos presentes. Tal composição já era, de certa forma esperada devido à elevação dos tampões observada durante o lingotamento e pode ser explicada pelos fatores já descritos na revisão bibliográfica deste trabalho. A presença de magnésio pode ser explicada pelo possível desgaste do refratário presente nas paredes do distribuidor, levando à formação de espinélio (BARTOSIAKI, 2013).

Da mesma forma, analisou-se os depósitos do sequencial de teste com utilização de nitrogênio para comparação. A figura 4.6 mostra as válvulas retiradas após o lingotamento do sequencial teste de 4 corridas.



Figura 4.6: Válvulas utilizadas no lingotamento das corridas do sequencial de teste.

Pode-se observar na figura 4.6 que, as válvulas saíram limpas, ou seja, sem grandes sinais de obstrução quando comparadas àquelas onde não foi utilizado nitrogênio pelo tampão. Tal resultado também já era esperado devido à estabilidade do nível dos tampões e baixo nível dos mesmos, quando comparados ao sequencial padrão. A figura 4.7 mostra a análise de MEV-EDS realizada para o pouco depósito coletado nestas condições.

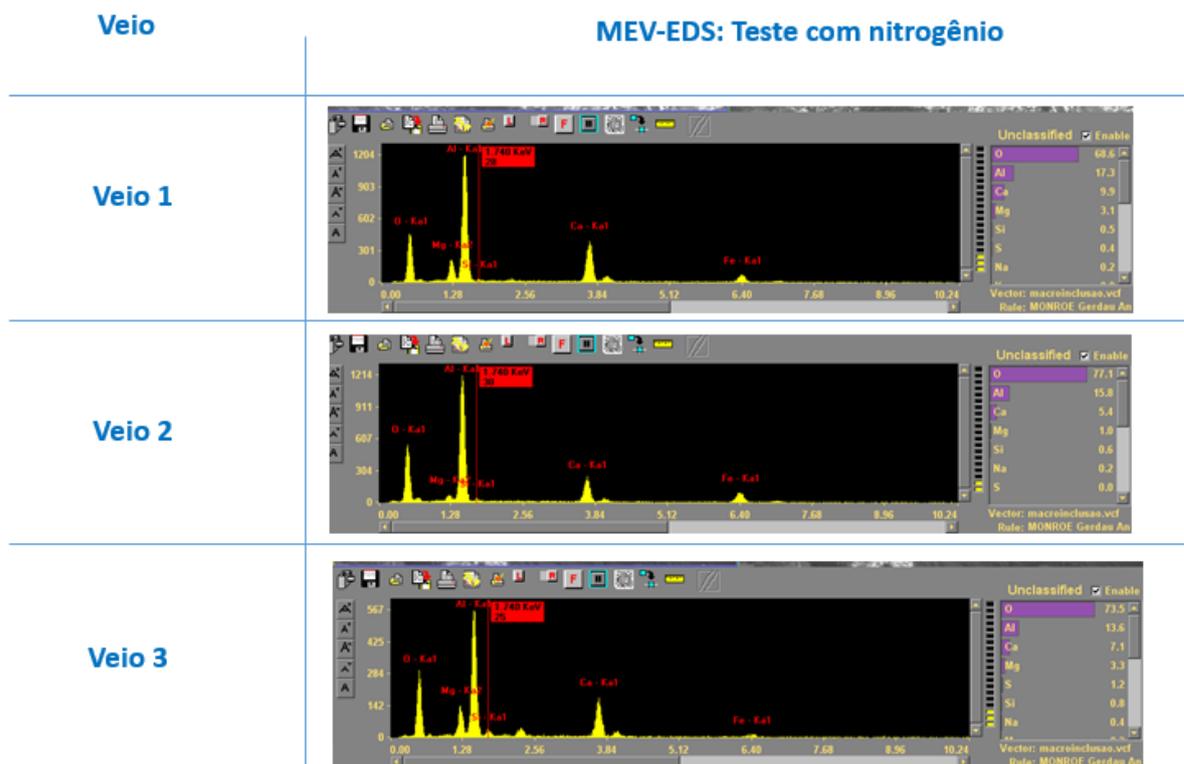


Figura 4.7: Resultados de MEV-EDS para os três veios analisados do sequencial de teste.

Observa-se que, a composição encontrada para as válvulas utilizadas no teste foram muito parecidas com aquelas onde o teste não foi aplicado. As análises indicam o mesmo tipo de depósito, o que significa que não houveram problemas de reoxidação ou modificação no tipo de inclusões obtidas.

Sendo assim, apenas analisando os resultados de EDS não se pode concluir nada a respeito da melhoria na lingotabilidade do sequencial teste, pois ambas as análises apresentaram a mesma composição química. Porém, ao se analisar visualmente a quantidade de depósitos formado em cada caso, fica claro o benefício com relação à lingotabilidade do material, pois o acúmulo de inclusões obtidas nas válvulas submersas utilizadas no sequencial de teste, foi muito menor do que aquelas obtidas no sequencial padrão.

Não foi possível uma quantificação da redução de depósito inclusionário nas válvulas, visto que, a coleta do material é na prática difícil de ser realizada e, esta quantidade pode variar conforme o número de corridas presentes no sequencial. Sendo necessária a realização de uma grande quantidade de testes para que se possa ter valores confiáveis deste resultado.

### 3.5 Pinholes e macroinclusões nos tarugos

Para efeito de verificação da presença de *pinholes* e macroinclusões nos tarugos, análises macrográficas foram realizadas no sequencial de teste. A tabela 5 resume os resultados encontrados nas amostras analisadas, enquanto que a figura 4.8 mostra as imagens referentes às análises de inspeção visual realizadas.

Tabela 5: Síntese dos defeitos encontrados nos tarugos.

<b>Corrida</b>	<b><i>Pinhole</i></b>	<b>Macro</b>	<b>Localização</b>
1	1	s/defeitos	superficial
2	s/defeitos	s/defeitos	NSA
3	s/defeitos	s/defeitos	NSA
4	s/defeitos	s/defeitos	NSA
Total	1	0	1 <i>pinhole</i> superficial

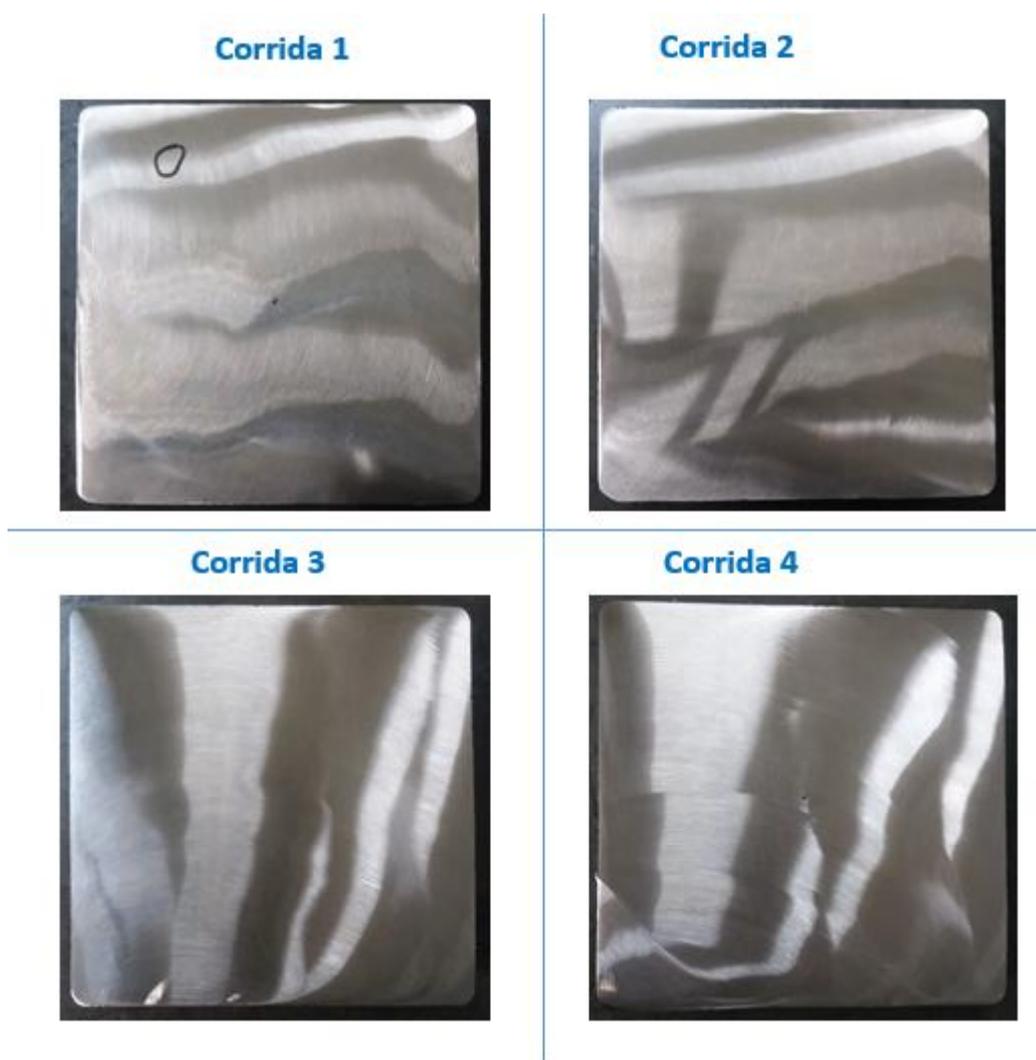


Figura 4.8: Macrografias para inspeção de macroinclusões e *pinholes*.

A tabela 4 mostra que, apenas um defeito referente às bolhas foi encontrado em todo o sequencial de quatro corridas testado. O *pinhole* foi detectado justamente na primeira corrida do sequencial, indicando que possíveis variações de vazão e pressão na primeira corrida podem trazer efeitos adversos. Na figura 4.8, pode-se observar a posição da bolha em destaque. Por se tratar de um defeito bem próximo à superfície do tarugo, este não ocasionará grandes problemas posteriores, pois na etapa de laminação ao ser transformado em sua bitola final, o grau de redução do tarugo fará com que esta bolha se feche, isentando a ocorrência de trincas.

Nota-se também, que nenhuma macroinclusão foi observada em nenhuma das amostras retiradas. Claramente indicando a limpeza das corridas.

Outra observação pode ser feita a respeito das imagens presentes na figura 4.8. Para as corridas 1 e 4 foram observadas pequenas porosidades centrais nos tarugos. Esta é uma

observação bastante comum e, diz respeito à segregação do aço no momento da solidificação. Da mesma forma que o *pinhole* detectado na primeira corrida, este defeito não é tão agressivo pois será preenchido no momento da laminação.

Sendo assim, pode-se concluir que, as configurações adotadas de vazão (30% do valor padrão adotado em N.L/min) e de pressão (pressão normal da rede medida em bar) foram adequadas o suficiente para que não se obtivesse macroinclusões nos tarugos e não ocasionassem na presença de *pinholes* e *blowholes* nos tarugos devido a elevada injeção de gás.

### 3.6 *Pick-up* de nitrogênio

A figura 4.9 mostra o comportamento típico do nitrogênio ao longo do processo, onde as provas X1, X2, X3 e XF se referem as amostras retiradas ao longo do processo: chegada ao forno-panela (X1), conferência de composição química no forno-panela (X2), prova após o vácuo (X3) e no distribuidor do lingotamento contínuo (XF).

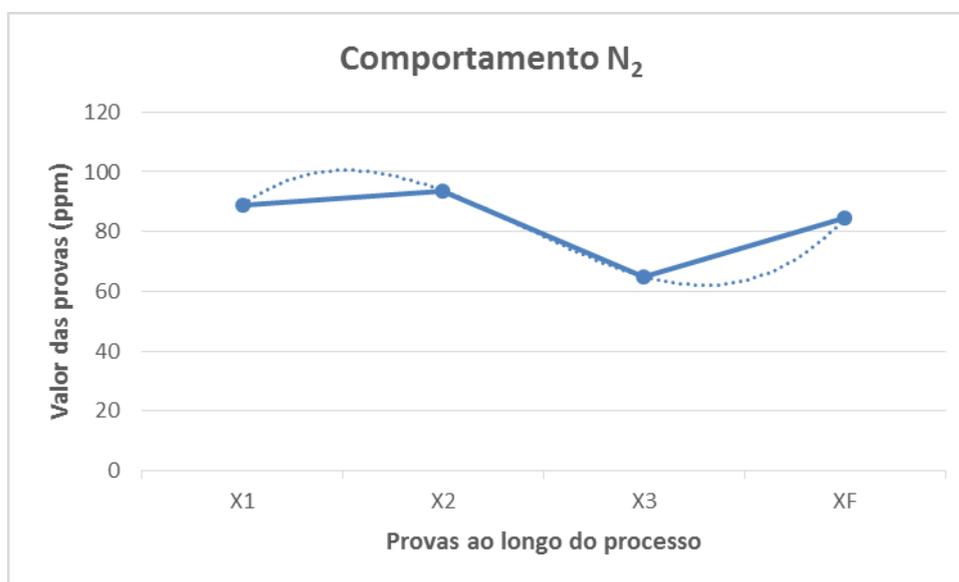


Figura 4.9: Comportamento do nitrogênio ao longo do processo. Média dos valores históricos da planta para o aço SAE 1045MOD.

Os dados obtidos na figura 4.9 referem-se à média de nitrogênio obtido ao longo do processo. Pode-se notar, que há uma elevação no teor na segunda prova (de X1 para X2) devido ao transporte ao forno panela e possível rinsagem com nitrogênio. Logo após, uma elevada queda no teor de nitrogênio é obtida pelo processo de vácuo (X3), por último, um aumento é observado devido à exposição do aço à atmosfera durante a flotação e transporte à torre do lingotamento contínuo (XF). A tabela 6 mostra os valores de *pick-up* obtidos em cada corrida do sequencial testado.

Tabela 6: Valores de nitrogênio encontrados em cada corrida.

Corrida	X3 (ppm)	XF (ppm)	<i>Pick-up</i> de N <sub>2</sub> (ppm)
1	70	78	8
2	63	70	7
3	62	71	9
4	36	55	19

Observa-se na tabela que, em nenhuma corrida o valor obtido na PF foi maior do que o permitido pela faixa máxima de nitrogênio (0,011% ou 110ppm). O cálculo prévio da média de valores históricos para este parâmetro revelou que, o valor médio de *pick-up* para esta qualidade é de **16ppm**, ou seja, os valores obtidos no teste foram em sua maioria, ainda menores do que a média histórica.

Com isso, pode-se afirmar que os valores utilizados de vazão e pressão de nitrogênio não são suficientes para causar um efeito adverso no acréscimo de nitrogênio ao aço. No entanto, para aços com faixa mais restrita de nitrogênio, novos testes deverão ser realizados, a fim de se observar o impacto da injeção de nitrogênio na composição química final do aço em questão.

#### 4.5 Quantidade, dispersão e tamanho de inclusões nas barras laminadas

Para a avaliação da presença de inclusões referentes ao teste, fez-se a comparação com um sequencial padrão de quatro corridas (A, B, C e D) observando-se o comportamento das inclusões após a laminação dos tarugos em barras.

A figura 4.10 mostra os resultados obtidos com relação à quantidade, dispersão e tamanho das inclusões geralmente encontradas na qualidade testada nos padrões normais de operação. Foram plotados os valores de composição química das inclusões em diagramas ternários de equilíbrio termodinâmico do tipo CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> onde, a diferenciação das inclusões por tamanho é dada em cores, conforme listado abaixo:

-  Inclusões maiores que 15 µm
-  Inclusões de 5 a 15 µm
-  Inclusões de 2,5 a 5 µm
-  Inclusões de 0,5 a 2,5 µm

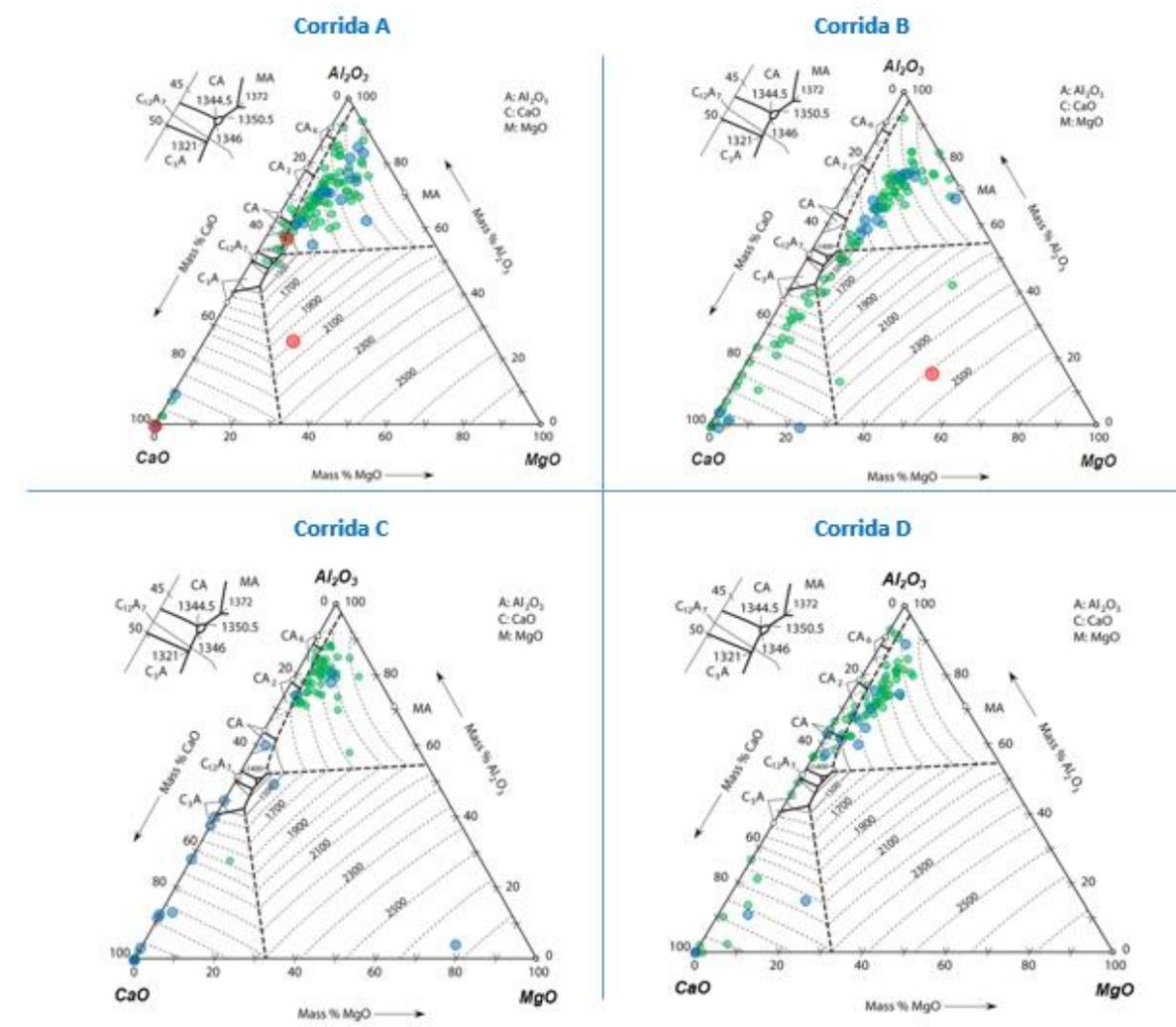


Figura 4.10: Análises de ASPEX para as corridas A, B, C e D do sequencial padrão.

Observa-se na figura 4.10, que para a primeira corrida, uma grande quantidade de inclusões de alumina é observada, sendo o aglomerado de inclusões reduzido ao longo dos sequenciais posteriores. No entanto, uma grande quantidade de inclusões ainda é percebida em todas as corridas do sequencial, onde pode-se notar que inclusões na direção de formação de cálcio aluminatos e  $CaO$  são bastante presentes. Algumas inclusões maiores do que  $15\ \mu m$  foram encontradas nas primeiras corridas, assim como de  $5$  a  $15\ \mu m$  e um grande número de inclusões de  $2,5$  a  $5\ \mu m$  foram identificadas.

A figura 4.11 mostra o mesmo tipo de análise para o sequencial de teste realizado, aqui, denominando-se as corridas como 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

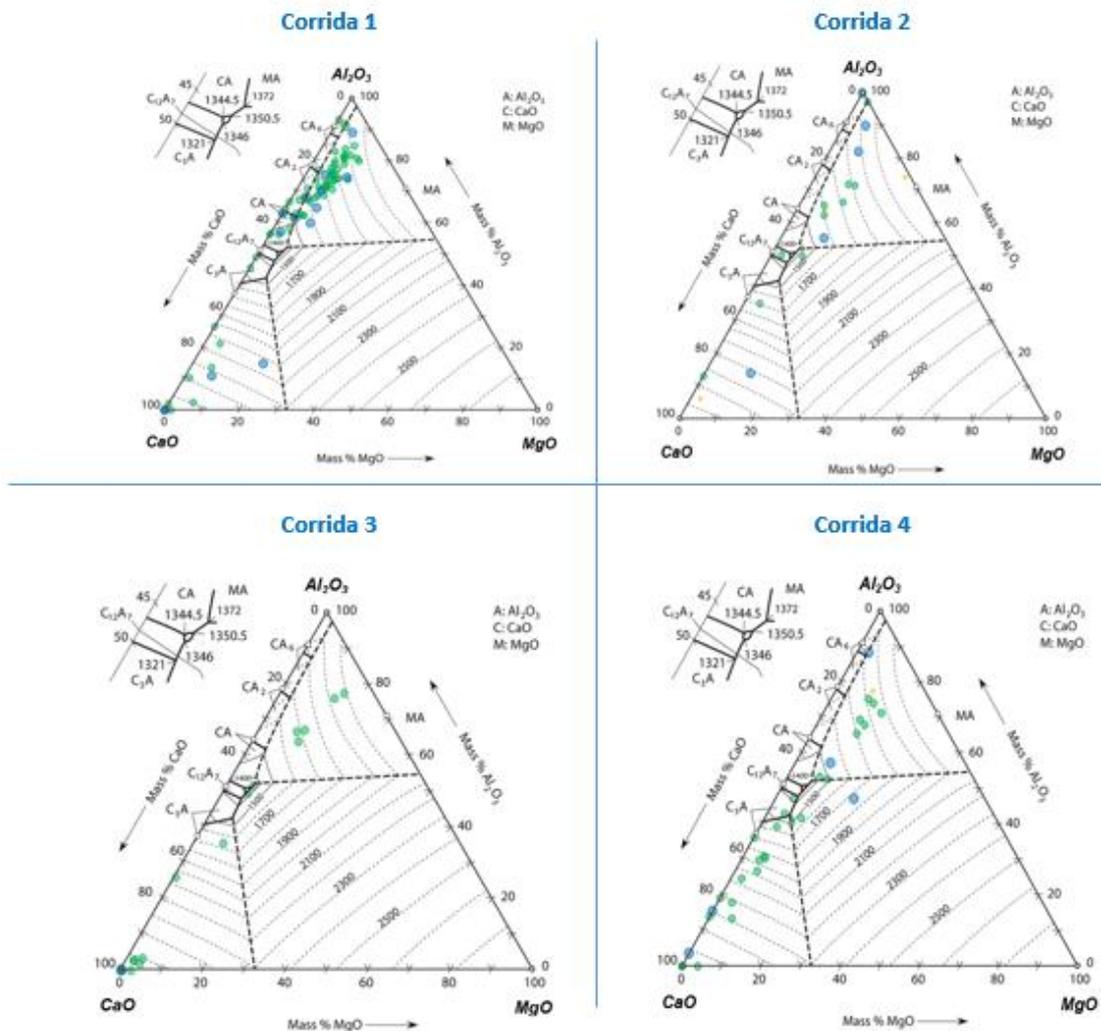


Figura 4.11: Análises de ASPEX para as corridas 1, 2, 3 e 4 do sequencial teste.

Pode-se observar na figura 4.11, que no geral, a quantidade de inclusões percebidas é bem menor quando comparada àquelas presentes no sequencial padrão. Além da quantidade reduzida, nenhuma inclusão maior do que  $15\mu m$  foi encontrada nas 4 corridas, e a maior quantidade de inclusões percebidas foram de  $2,5$  a  $5\mu m$ , com algumas menores e outras um pouco maiores.

Nota-se também que, na primeira corrida do sequencial uma quantidade maior de inclusões é percebida. Tal comportamento já era esperado, visto que as primeiras corridas de sequência são geralmente mais ricas em inclusões do que o restante do sequencial. Isto se deve ao fato de que, o aço líquido proveniente da panela deve chegar ao distribuidor até um nível suficiente para permitir a partida da máquina. Durante este período, o aço líquido pode reagir com o ar contido no distribuidor, gerando inclusões oriundas de reoxidação, que afetam a qualidade do material. A

abertura da panela também contribui para que ocorra reoxidação do aço na primeira corrida (CICUTTI, 2016). Para contornar estes efeitos e impedir que materiais com elevada quantidade de inclusões cheguem até o cliente, um método chamado “desponte inicial” é realizado. Neste processo, uma parte dos primeiros tarugos é sucateada a fim de evitar estes problemas.

Com o uso da planilha de adaptação dos dados elaborada pelo LaSid, pôde-se comparar quantitativamente os aspectos em termos de número de inclusões por faixa de tamanho, por área, quantidade total de inclusões e área afetada. Tais considerações são apresentadas nas figuras 4.12 a seguir.

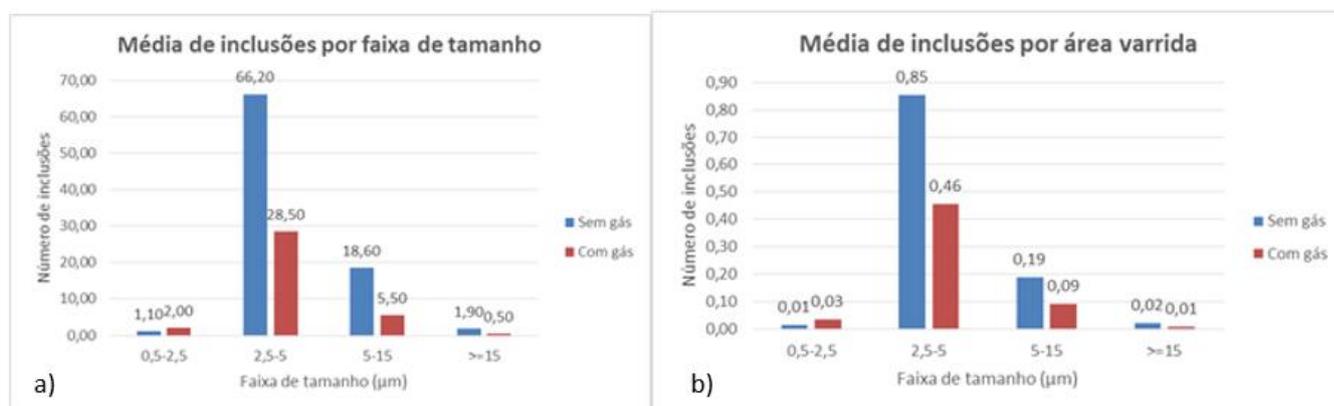


Figura 4.12: Média de inclusões obtidas por faixa de tamanho (a) e área varrida (b) para o aço SAE 1045MOD com e sem a utilização de gás nitrogênio pelos tampões.

A figura 4.12 a) mostra a média de inclusões obtidas por faixa de tamanho presente nas amostras obtidas dos sequenciais analisados. Da mesma forma, a figura 4.12 b) apresenta um gráfico com as médias de inclusões por  $\text{mm}^2$  obtidas por faixa de tamanho nas amostras analisadas com e sem a injeção de nitrogênio pelos tampões. As barras azuis mostram o resultado obtido para as corridas onde não foi utilizado nitrogênio pelos tampões. As barras vermelhas apresentam os resultados com a utilização de gás nitrogênio.

Pode-se observar que, para as inclusões na faixa de 0,5 a 2,5 $\mu\text{m}$  tem-se um número maior de inclusões presentes onde o nitrogênio foi utilizado, no entanto, para todas as outras faixas este valor é consideravelmente reduzido. A faixa mais abrangente em número, encontrada nas análises via ASPEX foi a de 2,5 a 5 $\mu\text{m}$ , onde a utilização de nitrogênio mostrou-se muito eficaz na remoção das mesmas. Assim como a média de inclusões presentes,

a densidade de inclusões por  $\text{mm}^2$  apresentou o mesmo comportamento, onde, o efeito mais visível se deu para a faixa de 2,5 a  $5\mu\text{m}$  de diâmetro.

A figura 4.13 mostra o número total de inclusões obtidas nas amostras analisadas, assim como a área ocupada por estas inclusões.

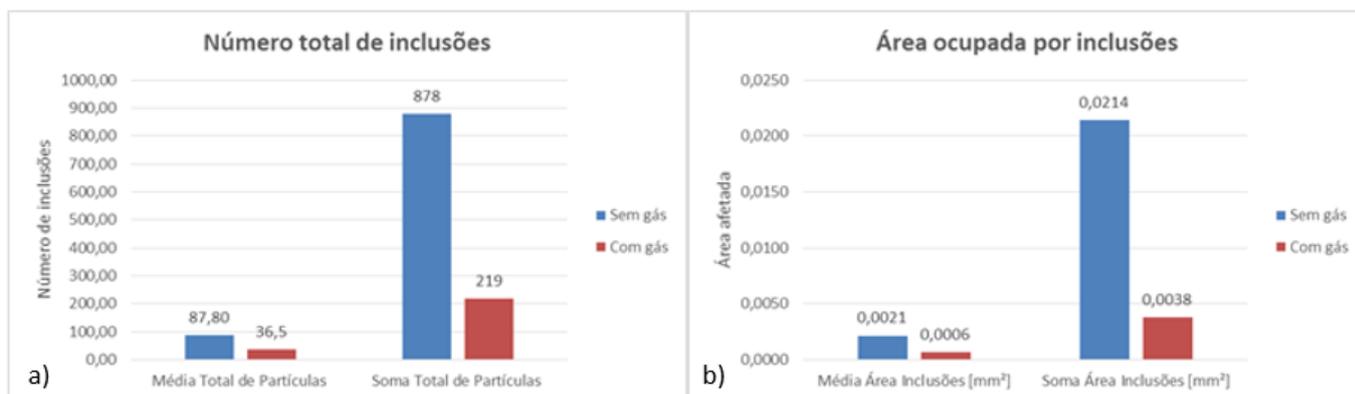


Figura 4.13: Número total de inclusões obtidas ao longo do sequencial (a) e área total ocupada pelas inclusões (b) para o aço SAE 1045MOD com e sem a utilização de gás nitrogênio pelos tampões.

A figura 4.13 a) mostra o número total de inclusões obtidas na média e na soma das amostras obtidas dos sequenciais analisados. Da mesma forma, a figura 4.13 b) apresenta um gráfico com a média e soma da área afetada por inclusões nas amostras analisadas com e sem a injeção de nitrogênio pelos tampões. As barras azuis mostram o resultado obtido para as corridas onde não foi utilizado nitrogênio pelos tampões. As barras vermelhas apresentam os resultados com a utilização de gás nitrogênio.

Pode-se observar que, o número de inclusões encontradas nas amostras onde o nitrogênio foi utilizado foi altamente menor do que naquelas onde o gás não foi utilizado. Assim como para o número de inclusões, a área afetada por inclusões também foi reduzida com a utilização de nitrogênio pelos tampões.

Sendo assim, é visto que, a injeção de gás nitrogênio pela ponta do tampão mostrou-se efetiva para a redução da quantidade de inclusões e da área afetada, além da melhora da lingotabilidade, conforme já citado. Isto indica que o gás restringe, de fato, o acúmulo de inclusões e evita a absorção das mesmas para dentro do molde e posteriormente, para tarugos e barras. Também pôde-se observar, que o tamanho das inclusões observadas foi menor (não

encontrando-se nenhuma inclusão maior do que 15  $\mu\text{m}$  em nenhuma das amostras) com relação aquelas vistas no sequencial padrão sem a utilização de gás pela ponta dos tampões. Indicando novamente, que a formação de clusters de inclusões é dificultada pela presença do gás.

## 4 CONCLUSÕES

Com base nas análises dos resultados obtidos, pode-se citar as seguintes conclusões:

- A lingotabilidade do aço é melhorada pela injeção de gás nitrogênio pela ponta dos tampões. Valores quantitativos não puderam ser obtidos devido ao baixo número de corridas testadas.
- Análises de caracterização do depósito das inclusões nas válvulas submersas mostraram que não há diferença na composição química presente nos depósitos referentes ao sequencial padrão e sequencial de teste.
- Análises visuais dos depósitos nas válvulas indicaram que o mesmo foi reduzido devido à utilização do gás nitrogênio. Valores quantitativos não puderam ser obtidos para esta análise.
- Cálculos dos valores de *pick-up* de nitrogênio mostraram que, a escolha da vazão e pressão utilizadas (30% do valor padrão em N.L/min e pressão da rede medida em bar, respectivamente) foram adequadas ao processo.
- As amostras de barras laminadas mostraram que um menor número de inclusões foi observado no sequencial de teste.
- O tamanho das inclusões observadas também foi menor, com relação aquelas vistas no sequencial padrão, indicando novamente que clusters de inclusões são dificultados.

Com base nas conclusões obtidas, pode-se então, afirmar que a utilização de nitrogênio pela ponta dos tampões é, de fato, efetiva no que diz respeito à melhora de lingotabilidade e controle de inclusões.

## 5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste trabalho, algumas hipóteses e questionamentos foram levantadas e não puderam ser comprovadas com base nas análises e resultados obtidos para o número de testes realizados. Tais questões abrem espaço para que novos trabalhos possam ser desenvolvidos, com base nos resultados obtidos neste estudo, para que se possa complementar as conclusões observadas.

Algumas sugestões para trabalho futuros são:

- Realização de mais sequenciais nas mesmas condições onde foram realizados estes testes, para qualidades diferentes, variando-se o teor de carbono;
- Realização de testes com configurações diferentes de injeção de gás para seções diferentes àquela adotada neste trabalho.
- Detalhamento da morfologia das inclusões da primeira corrida do sequencial para determinação de suas origens;
- Avaliação da eficácia de injeção de gás no colo das válvulas submersas variando a temperatura e a velocidade de lingotamento;
- Estudo da viabilidade econômica da utilização das válvulas tampão com injeção de gás inerte no processo;

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDERS, A. et al. **Inert Tundish Practice to Prevent Clogging**. p. 18–25.
- ARAÚJO, L.A., **Manual de Siderurgia**. Vol.1, 2ª edição, São Paulo, 2005.
- BANNENBERG, N.; HARSTE, K. **Improvements in Steel Cleanliness by Tundish Inertization**. *La Revue de Métallurgie*, p. 71–76, Janvier, 1993.
- BARTOSIAKI, B. G. **Caracterização de inclusões não metálicas de óxidos no aço SAE 52100**, Porto Alegre, 2013. Trabalho de Diplomação, Escola de Engenharia, Departamento de Metalurgia, UFRGS.
- BIELEFELDT W.V., **Estudo do Tratamento de Inclusões com Cálcio na Fabricação do Aço SAE 8620**. Porto Alegre, 2005. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Departamento de Metalurgia, UFRGS.
- BURTY, M.; PEETERS, L.; PERRIN, E.; MÜNZER, S.; COLUCCI, P.; SALVADORI, D.; SCHADOW, F.; VALCARCEL, J. M.; CLAES, J. **Some Keys to reach long-sequence casting**, *Conference*, Toronto, Canada, pp. 5-6, 1998
- CICUTTI, C.; CAPURRO, C. **Steel cleanliness evaluation techniques review. Application to different industrial cases**, 21ª conferencia del Acero IAS, Rosário, Argentina, 2016.
- CONTINI, A. C. **Estudo do fenômeno de clogging na região da válvula tampão por meio da dinâmica dos fluidos computacional**, Porto Alegre, 2011. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Departamento de Metalurgia, UFRGS.
- DEKKERS R.; ET AL.; **Non-metallic inclusions in aluminum killed steels**. *Ironmaking and Steelmaking*, v.29, n.6, p.437-444, 2002.
- FAULRING, G. M.; FARREL, J. W.; HILTY, D. C. **Steel Flow Through Nozzles: Influence of Calcium**. *Iron & Steelmaker*, vol. 7, nº2, p. 14–20, 1980.
- FERNANDES, P. C.; CELIBERTO, A. M.; BOSCHETTI, J. L. **Implantação do Sistema de Purga de Gás Inerte no Distribuidor da Gerdau Aços Especiais Piratini**. 16ª Conferência de Aciaria, IAS, Rosário – Argentina, 2007.
- FRUEHAN R.J.; **The making, shaping and treating of steel**. V.11, *Steelmaking and refining*, Ed. Pittsburgh, AISE, 1998.
- FUHR, F.; CICUTTI, C; **Relationship Between Nozzle Deposits and Inclusion Composition in the Continuous Casting of Steels**. *Iron and Steelmaker*, p. 53-58, 2003.

- GHOSH A.; **Secondary steelmaking – principles and applications**. CRC press LLC, 2001.
- HOLAPPA L.; HELLE A.S.L.; **Inclusion control in high-performance steels**. Journal of materials processing technology, v.53, p.177-186, 1995.
- HOLLAPA, L. **Treatise on Process Metallurgy, Secondary Steelmaking**, Chapter 1.6, pg: 301-345, 2014.
- INSTITUTO AÇO BRASIL; **Anuário Estatístico 2014**. 2016.
- KIESSLING R.; **Non Metallic Inclusions in steels**. The Institute of Materials, London, 1978.
- KLOSTERMANN, J.; CHAVES, H; SCHWARZE, R. **Investigation of the gas-liquid flow in a stopper rod controlled SEM**, Steel Research International, v. 78, n. 8, p. 595-601, 2007.
- MATIELLO, J. **Estudo das causas da variabilidade dos teores de FeO da escória de um forno elétrico a arco**, Porto Alegre, 2011. Trabalho de Diplomação, Escola de Engenharia, Departamento de Metalurgia, UFRGS.
- MOURÃO M.B., ET AL.; **Introdução à siderurgia**. ABM, São Paulo, 2011.
- RACKERS, K; THOMAS, B.G. **Clogging in continuous casting nozzles**. In: Steelmaking conference proceedings, 78., 1995, Nashville, Iron and Steel Society, Warrendale, PA, 1995, v.78, p. 723-734.
- REIS B.H.; ET AL.; **Investigation of the ability of secondary refining slags to absorb inclusions during steel production**. 19th IAS Steel Conference, Rosário, 2013.
- RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos siderúrgicos**. ABM, São Paulo, 2005
- RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos de lingotamento dos aços**, ABM, São Paulo, 2006.
- SCHEVCHENKO, V. P. et al.: **Ogneuporny**, 1970, vol. 35, no.10, pp 31-33, H.B. 8345.
- SERRA, J. G. **Modelagem da formação de porosidades na solidificação de tarugos pelo programa Thermo-Calc**, Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 8, n. 2, p. 99-108, abr.-jun. 2011.
- SENGUPTA, J.; CHUNG, S. D. **Impact of Argon Injection Through Tundish Upper Nozzle on Mold Fluid Flow at ArcelorMittal Dofasco's No. 1 Continuous Caster**, The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, Indianapolis, 2015
- Slag Atlas**, 2ª ed. Düsseldorf Verlag Stahleisen GmbH, 1995.
- SILVA, A.C.; MEI P.R.; **Aços e Ligas Especiais**. Editora Edgard Blücher, 2ª ed, 2006.

SILVA JUNIOR, W. G. **Verificação do efeito de injeção de gás através de válvulas submersas multiporos sobre a lingotabilidade e limpeza do aço**, Porto Alegre, 2009. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Departamento de Metalurgia, UFRGS.

SINGH, S. N. **Mechanism of alumina buildup in tundish nozzles during continuous casting of aluminum-killed steels**. *Metallurgical Transactions*, v. 5, n. 10, p. 2165-2178, 1974.

TRINDADE, L. B. **Modelamento matemático e físico do escoamento no distribuidor de lingotamento contínuo da Gerdau Aços Finos Piratini**, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindoia, SP, 1999.

VISSER, H. J. **Modelling of injection processes in ladle metallurgy**, Tata Steel Nederland Technology BV, Holanda, 2016.

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