



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA METALÚRGICA

“REMOÇÃO DE INCLUSÕES EM PANELAS DE AÇO”

Moisés da Silva Ferreira

Ouro Preto, Novembro 2022

Moisés da Silva Ferreira

“Remoção de Inclusões em Panelas de Aço”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalurgista

Orientador: Prof. Carlos Antonio da Silva

Ouro Preto, Novembro de 2022



FOLHA DE APROVAÇÃO

Moises da Silva Ferreira

REMOÇÃO DE INCLUSÕES EM PAINÉIS DE AÇO

Monografia apresentada ao Curso de Metalurgia da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Aprovada em 07 de novembro de 2022

Membros da banca

PhD. Prof. Carlos Antonio da Silva - Orientador (DEMET/EM Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Prof. Johnne Jesus Mol Peixoto (DEMET/EM Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Prof. Antonio Marlon Barros Silva (IFMG - Ouro Branco)

Carlos Antonio da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Antonio da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/11/2022, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0426453** e o código CRC **B0091BBB**.

RESUMO

A aciaria é responsável pelo refino do metal, transformando o gusa líquido em aço no forno elétrico a arco (FEA) ou convertedor LD e em seguida promovendo o ajuste fino de composição química nas operações de metalurgia secundária visando a adequação de temperatura, redução das concentrações de gases como oxigênio (O), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) e tratamento de remoção de inclusões. Neste trabalho se apresenta uma revisão da literatura, sobre os mecanismos utilizados para a agitação do aço nos processos de refino secundário, mencionando equipamentos utilizados no refino secundário do aço, bem como a origem das inclusões e os métodos empregados para a remoção das mesmas. O desempenho e eficiência dos processos de remoção de inclusão são comparados, empregando os valores finais de oxigênio total. Este tema é de muita relevância no ambiente siderúrgico, pois se trata de uma das etapas onde mais se agrega qualidade ao aço. Inclusões podem ser removidas em processos com agitação por injeção de gás inerte ou por agitação eletromagnética, proporcionando propriedades mecânicas superiores para o cliente final.

Palavras - Chaves: Metalurgia Secundária. Aciaria. Produtos siderúrgicos. Aço. Inclusão. Desoxidação. Oxigênio Total. Agitação eletromagnética.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Produção de aço no primeiro trimestre de 2022-----	4
Figura 3.2 Comparativo por rota metalúrgica e o tipo de lingotamento-----	5
Figura 3.3 Processo siderúrgico completo-----	6
Figura 3.4 Representação de uma instalação de borbulhamento por gás inerte de refino secundário-----	8
Figura 3.5 Representação de uma instalação de borbulhamento por gás inerte com selagem -----	9
Figura 3.6 Representação de uma instalação de borbulhamento com panela tampada----	10
Figura 3.7 Representação de uma instalação do tipo IR UT-----	10
Figura 3.8 Representação de uma instalação de injeção de finos-----	11
Figura 3.9 Representação de uma instalação de injeção de arames -----	12
Figura 3.10 Representação de uma instalação de desgaseificação RH-----	13
Figura 3.11 Representação de uma instalação de desgaseificação RH com injeção de oxigênio -----	13
Figura 3.12 Representação de uma instalação de desgaseificação do tipo DH-----	14
Figura 3.13 Representação de uma instalação de desgaseificação VD -----	15
Figura 3.14 Representação de uma instalação de desgaseificação com aquecimento elétrico	15
Figura 3.15 Representação de uma instalação de vácuo com injeção de oxigênio -----	16
Figura 3.16 Representação de uma instalação AOD -----	17
Figura 3.17 Tipos de produtos lingotados -----	19
Figura 3.18 Máquina de lingotamento-----	19
Figura 3.19 Diagrama de Ellingham-----	21
Figura 3.20 Forma das inclusões -----	23
Figura 3.21 Formato de uma inclusão exógena e os picos de composição química desta-	24
Figura 3.22 Mecanismo de reoxidação do aço pelo olho de argônio -----	25
Figura 3.23 Camada de escória aderida a parede da panela -----	26
Figura 3.24 Reação entre aço líquido e refratário na panela -----	27
Figura 3.25 Plugue Poroso-----	29
Figura 3.26 Processo de adesão Inclusão/Bolha-----	30
Figura 3.27 Formação de Bolhas-----	31

Figura 3.28 Evolução da Concentração de Oxigênio em uma Corrida-----	32
Figura 3.29 Oxigênio Total entre Amostras no mesmo aço-----	32
Figura 3.30 Oxigênio total versus tempo de agitação pneumática-----	33
Figura 3.31 Densidade populacional de inclusões versus tempo de flotação. Comparativo da configuração do número de plugues porosos adotados em painéis de aço-----	34
Figura 3.32 Etapas de refino com agitação eletromagnética-----	35
Figura 3.33 Tempo de agitação eletromagnética x oxigênio total -----	36
Figura 4.1 Comparativo de oxigênio total e perda de alumínio entre agitação pneumática e eletromagnética -----	39
Figura 4.2 Comparativo do número de inclusões por agitação -----	40
Figura 4.3 Comparativo de oxigênio total por agitação -----	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Produção de aço na América Latina em 2022 -----	3
Tabela 3.2 Produção de aço no mundo em 2022 -----	4
Tabela 3.3 Produção das siderúrgicas brasileiras -----	5
Tabela 3.4 Principais inclusões encontradas nas etapas de elaboração do aço-----	21

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo Geral	2
2.2 Objetivos Específicos.....	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Produção de Aço no Brasil e no Mundo.....	3
3.2 Processo Siderúrgico	6
3.3 Refino Secundário.....	7
3.3.1 Forno Panela.....	7
3.3.2 Borbulhamento por Gás Inerte.....	8
3.3.3 SAB (<i>Sealed Argon Bubbling</i>).....	8
3.3.4 CAB (<i>Capped Argon Bubbling</i>).....	9
3.3.5 IR-UT (<i>Injection Refining-Up Temperature</i>).....	10
3.3.6 Injeção de finos.....	10
3.3.7 Injeção de arames ou fios.....	11
3.3.8 RH (<i>Rheinstahl-Heraeus</i>).....	11
3.3.9 RH-OB (<i>RH-Oxygen Blowing</i>).....	12
3.3.10 DH (<i>Dortmund Holder Huttenunion</i>).....	13
3.3.11 VD (<i>Vacuum Degassing</i>).....	14
3.3.12 VAD (<i>Vacuum Arc Degassing</i>).....	14
3.3.13 VOD (<i>Vacuum Oxygen Descarburization</i>).....	15
3.3.14 AOD (<i>Argon Oxygen Descarburization</i>).....	15
3.4 Máquinas de Lingotamento Contínuo.....	16
3.5 Controle do Grau de Oxidação.....	19
3.6 Inclusões.....	20
3.6.1 Origem das inclusões.....	21
3.6.2 Reoxidação.....	23
3.6.3 Vida de Painéis.....	25
3.6.4 Interação Aço Líquido-Revestimento Refratário.....	26
3.7 Mecanismos de agitação e Controle da Limpidez.....	27

3.7.1 Injeção de gás inerte.....	27
3.7.2 Influência da injeção de gás inerte na redução do oxigênio total.....	30
3.7.3 Problemas na flotação das inclusões	32
3.7.4 Agitação Eletromagnética.....	33
3.7.5 Flotação de Inclusões.....	35
3.7.6 Influência da Escoria na Limpeza do Aço.....	36
4 DISCUSSÃO.....	38
5 CONCLUSÕES.....	41
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de obtenção do aço líquido apresentam um grande avanço ano a ano, o que resultou em redução das impurezas no aço (GEN *et al.*, 2010). A etapa de refino secundário na aciaria é responsável pela adequação da qualidade intrínseca do aço, e engloba o processamento do aço no forno panela. Conforme os requisitos e exigências de qualidade, o aço pode ser desgaseificado para se obter teores baixíssimos de impurezas dissolvidas como o caso do hidrogênio, com valores abaixo de 2ppm.

Alem dos gases dissolvidos, têm-se as inclusões presentes no aço que são motivo de estudo devido ao seu efeito deletério e nocivo às propriedades mecânicas deste, como tenacidade, ductilidade, resistência a corrosão, resistência a fadiga e usinabilidade. Contudo a definição de aço limpo depende do produto considerado suas práticas industriais na elaboração e por normas específicas (BROILO, 2011). O que torna necessário analisar os mecanismos de remoção destas inclusões.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo da literatura, relativo à geração e remoção de inclusões no processo de refino do aço na metalurgia secundária, apresentando os equipamentos críticos para se obter uma operação eficiente na flotação destas inclusões.

2.2 Objetivos Específicos

- Descrever os mecanismos de geração de inclusões no aço durante o refino do aço na metalurgia secundária, caracterizando tais inclusões e discutindo resultados de agitação em panelas de aciaria e/ou modelos laboratoriais;
- Apresentar os equipamentos de agitação empregados em refino de aço, suas características construtivas e operacionais das agitações pneumática e a agitação eletromagnética, mostrando as características peculiares de cada sistema de agitação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Produção de Aço no Brasil e no Mundo

Segundo o Instituto Aço Brasil a indústria siderúrgica brasileira alcançou uma produção de 36 milhões de toneladas de aço bruto em 2021, contudo a produção de produtos acabados atingiu 25,2 milhões de toneladas nesse mesmo ano. A produção de aço na América Latina destaca o Brasil concentrando mais da metade da produção do continente, com 55,8% da produção com acumulado trimestral em leve alta de 0,7% neste ano, comparando o mesmo período em 2021 conforme mostra a Tabela 3.1:

Tabela 3.1- Produção de aço na América Latina em 2022.

País	1º Trimestre			Acumulado até o trimestre			Participação 2022 (%)
	Janeiro	Fevereiro	Março	2022	2021	(%)	
Brasil	2,928	2,713	2,988	8,630	8,692	(0,7)	55,8
<i>México</i>	1,542	1,490	1,534	4,566	4,482	1,9	29,5
Argentina	354	319	417	1,089	1,125	(3,2)	7,0
<i>Peru</i>	101	90	107	298	298	0,1	1,9
Colômbia	101	87	106	294	339	(13,2)	1,9
Chile	87	57	122	266	321	(17,1)	1,7
<i>Equador</i>	52	53	51	155	154	0,8	1,0
Guatemala	26	25	23	75	74	0,4	0,5
Cuba	19	18	17	53	53	0,4	0,3
El Salvador	9	9	8	25	25	0,6	0,2
<i>Uruguai</i>	7	3	4	14	14	0,8	0,1
<i>Venezuela</i>	2	2	2	6	7	(11,2)	0,0
<i>Paraguai</i>	2	1	1	4	4	0,8	0,0
TOTAL	5,230	4,867	5,380	15,476	15,588	(0,7)	100,0

Fonte: Instituto Aço Brasil.

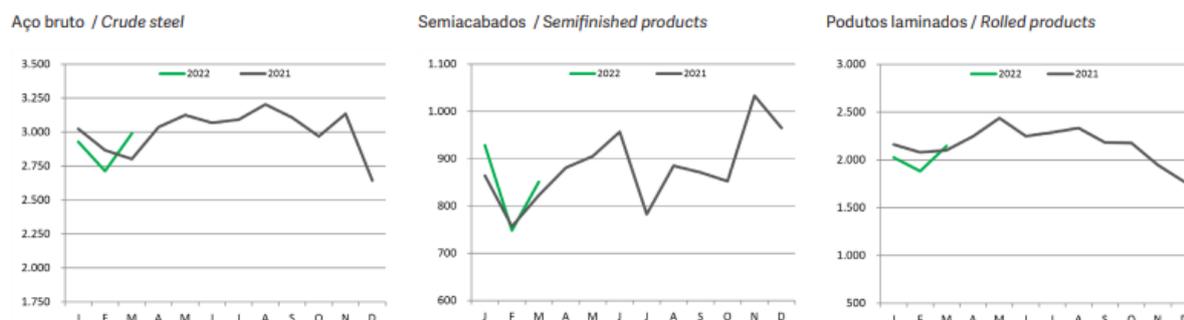
A Tabela 3.2 mostra a produção pelo tipo de produto semi-acabado, como blocos, placas e tarugos, a partir dos quais são fabricados as chapas, tubos, perfis, vergalhões. Nota-se um forte aumento na produção de semi-acabados neste ano comparado ao mesmo período em 2021.

Tabela 3.2- Tipos de Produtos das siderúrgicas brasileiras

Produto	1º Trimestre			Acumulado até o trimestre			Últimos 12 meses
	Janeiro	Fevereiro	Março	2022	2021	(%)	
Aço Bruto	2.928,4	2.713,2	2.988,3	8.629,9	8.691,8	(0,7)	36.009,2
Semiacabados para Venda/	928,0	748,2	851,2	2.527,4	2.443,2	3,4	10.658,9
Placas	870,8	676,8	740,9	2.288,6	2.369,1	(3,4)	9.803,4
Lingotes, Blocos e Tarugos	57,2	71,4	110,3	238,9	74,0	222,6	855,5
Laminados	2.023,9	1.881,2	2.143,6	6.048,6	6.338,8	(4,6)	25.673,4
Planos	1.230,4	1.092,8	1.238,2	3.561,5	3.716,1	(4,2)	15.203,7
Longos	793,4	788,3	905,4	2.487,1	2.622,7	(5,2)	10.469,7
Ferro-Gusa	2.296,6	2.101,7	2.255,9	6.654,2	6.871,4	(3,2)	28.312,6

Fonte: Instituto Aço Brasil.

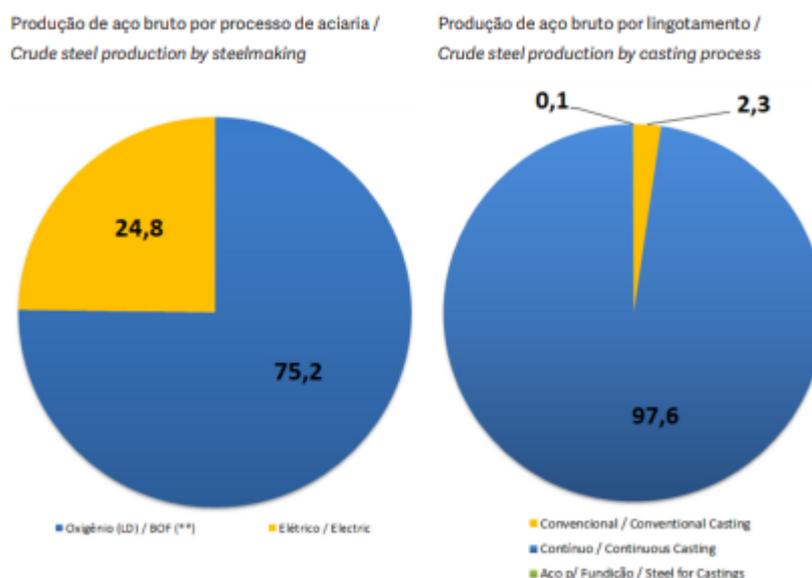
Nos três primeiros meses deste ano houve uma ligeira melhora na produção de aço bruto bem como a produção de semi-acabados no mês de março com uma discreta evolução na produção de acabados, conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 - Produção de aço no primeiro trimestre de 2022.

Fonte: Instituto Aço Brasil.

As rotas metalúrgicas do aço podem ser mencionadas a partir dos dados analisados, sendo que maior parcela de produção está com o conversor por oxigênio, correspondendo a 75% e 25 % para a produção em fornos elétricos a arco. A Figura 3.2 mostra essas proporções bem como o tipo de lingotamento utilizado para a produção.

Figura 3.2- Comparativo por aciaria e o tipo de lingotamento.



Fonte: Instituto Aço Brasil.

Com esse desempenho de produção em 2022, o Brasil ocupa a 9ª posição com um acumulado de 8,630 milhões de toneladas de aço produzidos, conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Produção de aço no mundo em 2022.

País	1º Trimestre			Acumulado até o trimestre			Participação 2022 (%)
	Janeiro	Fevereiro	Março	2022	2021	(%)	
China	82,996	74,964	88,300	246,260	269,849	(8,7)	53,6
Índia	10,905	10,079	10,936	31,920	30,128	5,9	6,9
Japão	7,757	7,301	7,955	23,013	23,710	(2,9)	5,0
Estados Unidos	6,971	6,370	6,981	20,322	20,394	(0,4)	4,4
Rússia	6,198	5,941	6,580	18,720	18,940	(1,2)	4,1
Coréia do Sul	6,071	5,157	5,691	16,919	17,594	(3,8)	3,7
Alemanha	3,259	3,215	3,327	9,801	10,176	(3,7)	2,1
Turquia	3,161	2,951	3,323	9,434	9,903	(4,7)	2,1
Brasil	2,928	2,713	2,988	8,630	8,692	(0,7)	1,9
Irã	2,400	2,200	2,300	6,900	7,215	(4,4)	1,5
Itália	1,821	2,045	2,113	5,979	6,294	(5,0)	1,3
Vietnã	1,875	1,835	2,030	5,739	5,996	(4,3)	1,2
Formosa / Taiwan	1,846	1,840	2,040	5,726	5,677	0,9	1,2
México	1,542	1,490	1,534	4,566	4,482	1,9	1,0

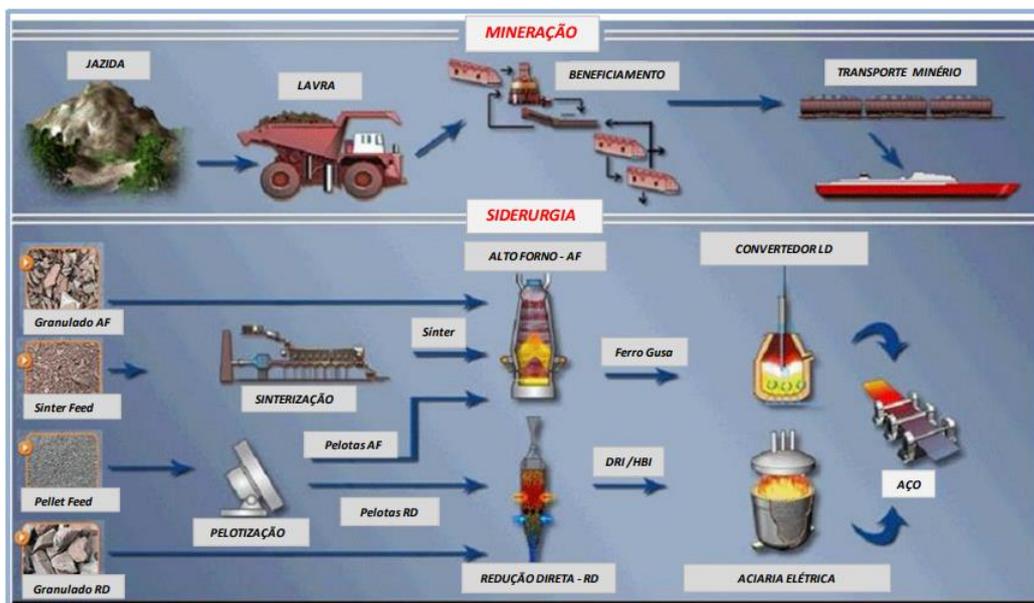
Fonte: Instituto Aço Brasil.

3.2 Processo Siderúrgico

O processo de obtenção do ferro inicia-se fora das usinas com a seleção, transporte e compra de todos os materiais necessários. No pátio de matérias-primas dispõe-se o minério e o carvão em pilhas, podendo este último ser de origem vegetal ou mineral, garantindo o abastecimento de processos de preparação de carga do alto-forno: aglomeração de minérios por pelotização/sinterização e coqueificação do carvão nos casos de alto forno a coque. O alto-forno é um reator vertical que trabalha a contracorrente, ou seja, a carga a ser reduzida carbotermicamente entra pelo topo deste, e os gases redutores sobem da base para o topo do forno, mantido em regime permanente.

A aciaria é o setor da usina siderúrgica onde o gusa é refinado, obtendo-se o aço. O processo consagrado nas usinas integradas, atualmente, a conversão do gusa pelo processo a oxigênio, ou processo LD, no qual o gusa é oxidado, controladamente, por um fluxo de oxigênio lançado diretamente à superfície do banho, por meio de uma lança, por onde o fluxo de oxigênio atinge a velocidade do som. Existe também uma segunda alternativa na rota de produção do aço que são os fornos elétricos a arco (FEA) que se originam da fusão de sucata metálica por arco elétrico empregando eletricidade obtendo assim o aço. (ARAUJO, 2005). A Figura 3.3 exemplifica o processo siderúrgico a partir da extração do minério até a obtenção do produto semi-acabado.

Figura 3.3- Processo siderúrgico completo.



Fonte: Adaptado de (MOURÃO, 2022).

3.3 Refino Secundário

São todas as operações de metalurgia de panela após a fusão e refino nos fornos primários na aciaria e antecedem o Lingotamento Contínuo (LC). A escolha do tipo de instalação depende de alguns fatores específicos de refino, da produtividade desejada, volume de aço a ser processado e o valor do investimento que se pode fazer e seu retorno. No processo de elaboração de aço, as práticas de refino secundário expandiram-se ao longo dos anos, e praticamente todas as aciarias possuem uma instalação de refino secundário. Araujo (2005) menciona que para obter aços com necessidades de aplicações mais severas, reduzir custo de produção e fabricação, fez-se necessário desenvolver os processos de refino secundário.

3.3.1 Forno Panela

O forno panela surgiu com a premissa de produzir aços de alta qualidade, evitando tempos longos de processo que diminuem a produtividade da aciaria. Diante disto havia a necessidade de ajustar as temperaturas de lingotamento para produção desses tais aços. Com a implementação dos fornos panela pode-se alcançar um aumento de produtividade de até 20% comparado com o fluxo direto do forno primário para o lingotamento, aumento da vida do revestimento refratário e um melhor controle de qualidade do aço líquido (ABM, 2007).

O forno panela é um equipamento cujas as características propiciam a execução de uma série de operações como (RIZZO, 2006):

- Controle de temperatura;
- Ajuste de composição química;
- Desoxidação;
- Homogeneização de composição química e temperatura;
- Controle da morfologia e remoção de inclusões não metálicas;

As etapas de operação em um forno panela no refino secundário são listadas a seguir:

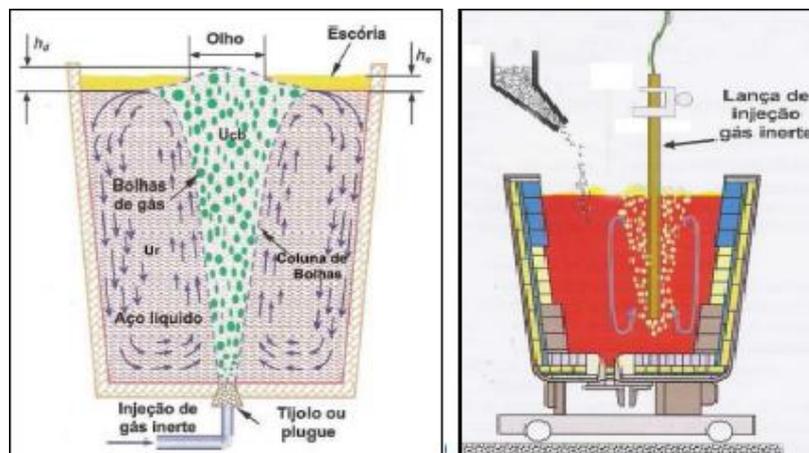
- a. Recebimento da panela contendo o aço líquido;
- b. Adição de fundentes (escoria sintética e cal calcítica) e medição de temperatura;
- c. Amostragem para análise de composição química e desoxidação de necessário;
- d. Ajuste da composição química a partir da adição de ferro ligas a base de manganês, silício, molibdênio, vanádio, etc.
- e. Ajuste de temperatura do banho;

- f. Amostragem e ajuste fino de composição química;
- g. Acerto de ligas em fios (Al, C, Ti, B e em alguns casos S);
- h. Adição de Ca para mudança de morfologia de inclusões;
- i. Flotação de inclusões;
- j. Verificação de temperatura;
- k. Liberação da panela para lingotamento;

3.3.2 Borbulhamento por Gás Inerte

É o processo de refino secundário utilizado em quase todas as aciarias. É utilizado em praticamente todas as operações de refino por auxiliar na aceleração das reações metalúrgicas. Consiste na injeção de gases inertes (Ar, N₂), normalmente realizada pelo fundo da panela por um ou mais plugues porosos e em alguns casos lança de emergência (RIZZO, 2006). A injeção dos gases, segundo de Sá (2014), propicia a aceleração do misturamento do metal promovendo dissolução de ligas e escorificantes, melhorando a uniformização térmica e composicional; aceleração das reações químicas, principalmente na interface metal-escória e na interface metal/bolhas. O processo é esquematizado conforme Figura 3.4.

Figura 3.4 – Representação de uma instalação de borbulhamento por gás inerte.



Fonte: Adaptado de: (RIZZO, 2006).

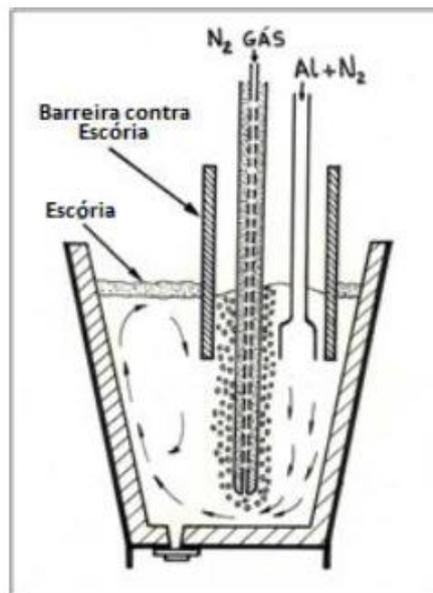
3.3.3 SAB (*Sealed Argon Bubbling*)

O borbulhamento selado com argônio é uma variante do borbulhamento comum, porém a exposição do aço líquido à atmosfera é evitada por um cilindro de material refratário imerso na

região livre de escória, resultando em uma adição de ligas e desoxidantes mais eficiente. Também conhecido como CAS (ABM, 2007). Segundo Rizzo (2006), este processo era destinado a economia de ligas, caso do alumínio, contudo foi adaptado para realizar o aquecimento por meio da injeção de oxigênio.

Segundo Araujo (2005), a área livre de escória é conseguida promovendo uma agitação com gás inerte pelo fundo da panela, permitindo assim a descida do *snorkel*, e obtendo assim melhor rendimento do processo de ajuste químico. Rizzo (2006), afirma que a dessulfuração é promovida graças a agitação intensa no interior do *snorkel* somando-se adição de escória sintética no processo.

Figura 3.5 - Representação de uma instalação de borbulhamento por gás inerte com selagem.

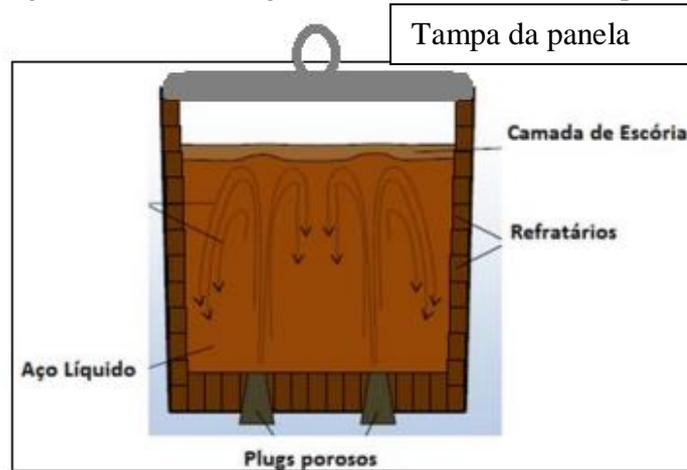


Fonte: Adaptado de: (PEIXOTO, 2015).

3.3.4 CAB (*Capped Argon Bubbling*)

Outra variável do borbulhamento comum, o borbulhamento com argônio é feito com a panela tampada. Possibilita maior área de reação devido a proteção permitindo maior mistura (ABM, 2007). De acordo com Araujo (2005), é utilizado injeção de gás inerte para melhorar o nível inclusionário do aço.

Figura 3.6 - Representação de uma instalação de borbulhamento com panela tampada

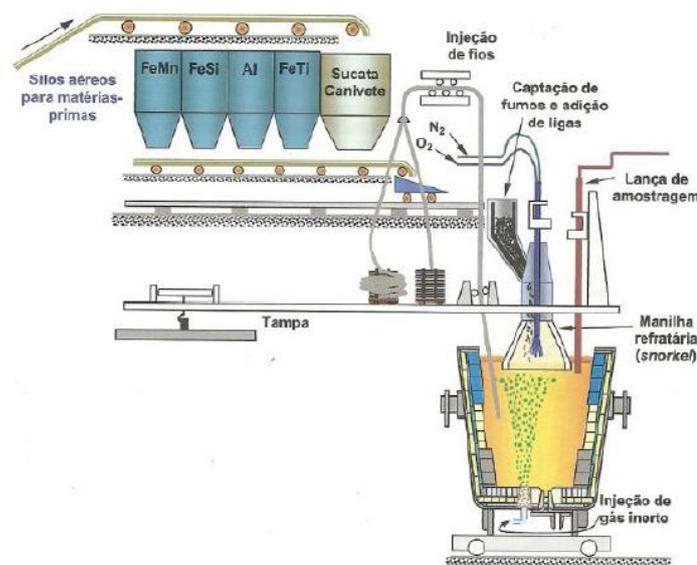


Fonte: Adaptado de: (de SÁ, 2015).

3.3.5 IR-UT (*Injection Refining-Up Temperature*)

O aquecimento do aço líquido é obtido pelas reações exotérmicas de oxidação de Si e Al adicionados. Um ou ambos elementos são adicionados e oxigênio é soprado na superfície do aço por uma lança refrigerada conforme exemplificado na Figura 3.7. O aço tratado contém um número maior de inclusões de sílica e alumina (ABM, 2007). Nessa unidade de refino secundário é possível realizar aquecimento e ajuste fino de composição química do aço para atendimento ao processo de lingotamento contínuo (MARCHESI, 2019).

Figura 3.7 - Representação de uma instalação do tipo IR UT.

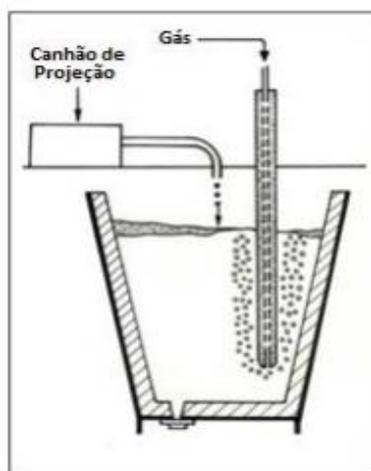


Fonte: (MARCHESI, 2019).

3.3.6 Injeção de finos

Consiste na injeção pneumática (com Ar ou N₂) de materiais pulverizados no aço com auxílio de lança refratária, conforme a figura 3.8. Dentre os materiais pulverizados, possíveis de serem injetados, estão o grafite, alumínio, CaO, CaSi, CaC₂, etc (ABM, 2007). Rizzo (2006) menciona que este processo é conveniente onde se deseja evitar a reoxidação e facilitar a dissolução de elementos de liga. Ainda segundo Rizzo (2006) a dessulfuração é realizada com a injeção de pó (CaSi, CaC₂).

Figura 3.8 - Representação de uma instalação de injeção de finos.

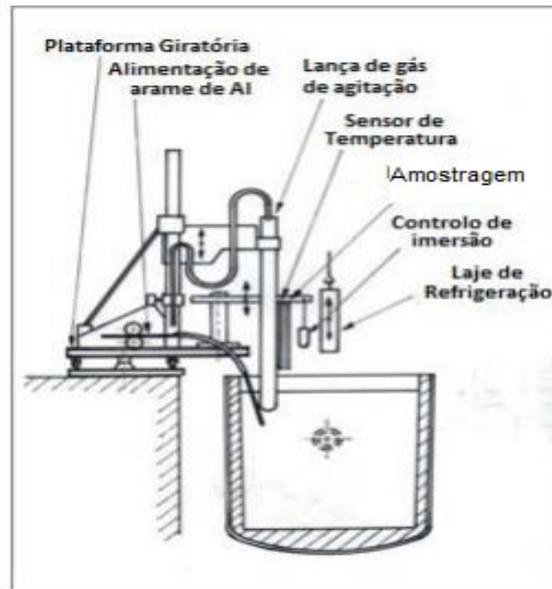


Fonte: Adaptado de: (PEIXOTO, 2015).

3.3.7 Injeção de arames ou fios

Consiste na injeção de arames recheados com material pulverizado, que evita o contato com a escória. É um processo simples e de baixo custo (ABM, 2007). Para Araujo (2005), é possível realizar a desoxidação do aço, tratar as inclusões, mudando sua morfologia e em alguns casos o teor de oxigênio, e um processo de alta reprodutibilidade elevado rendimento e permite elaborar ligas nobres com precisão. Segundo Rizzo (2006), a velocidade de injeção é um parâmetro primordial para o sucesso da operação, pois velocidades altas o fio emerge no topo sem fundir. A figura 3.9 mostra um esquema deste processo.

Figura 3.9 - Representação de uma instalação de injeção de arames



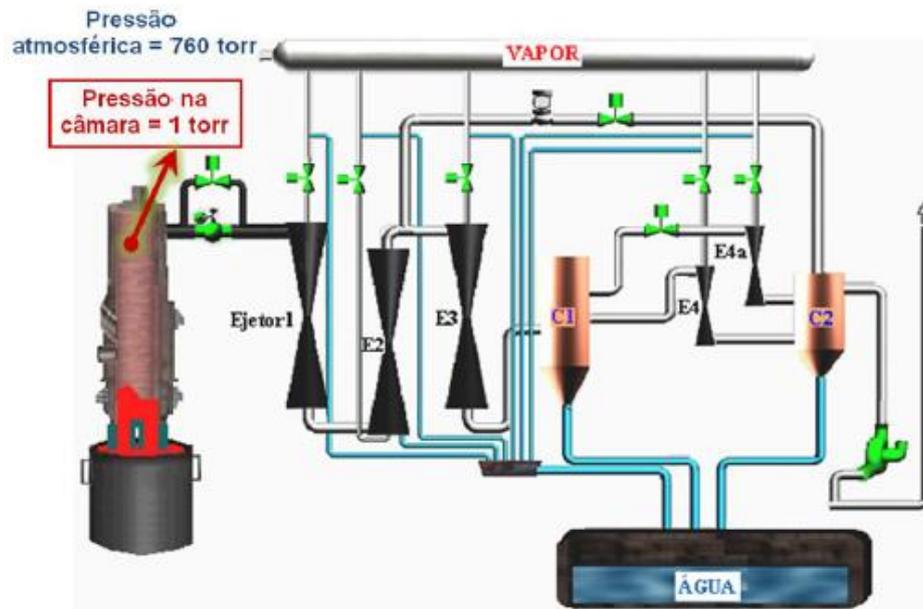
Fonte: Adaptado de: (PEIXOTO, 2015).

3.3.8 RH (*Rheinstahl-Heraeus*)

O desgaseificador RH é formado por um conjunto de bombas de vácuo (sistema de evacuação) e o reator denominado vaso de RH, local onde ocorrem as reações de desgaseificação (TRINDADE, 2017). Consiste de um grande vaso onde se faz vácuo em seu interior, tem suas pernas mergulhadas no aço líquido. Em uma das pernas é injetado gás inerte, provocando vigorosa circulação do aço (ABM, 2007).

A circulação do aço entre o vaso e a panela ocorre através das pernas, denominadas perna de subida, região onde o aço entra no vaso e a perna de descida que é a região onde o aço retorna para a panela (RIZZO, 2006) conforme Figura 3.10. Além da remoção de gases dissolvidos, como H e em menor extensão N, pode promover a descarburização, pela reação com o oxigênio dissolvido e a remoção de inclusões. A adição de ligas e desoxidantes é feita sob vácuo, livre de contato com a escória (ARAUJO, 2005).

Figura 3.10 - Representação de uma instalação de desgaseificação RH.

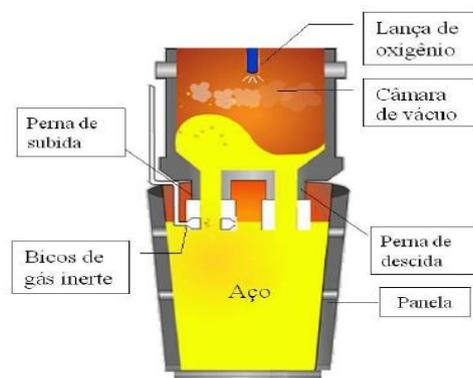


Fonte: (SILVA, 2010).

3.3.9 RH-OB (RH-Oxygen Blowing)

Com o mesmo conceito do RH, este possui uma lança refrigerada que sopra oxigênio no aço líquido conforme Figura 3.11, possibilitando a descarburização e o aquecimento do metal por aluminotermia (ABM, 2007). O tratamento para descarburização caracteriza-se pela reação do carbono dissolvido no aço com o oxigênio produzindo gás CO, que é retirado pelo sistema de vácuo (SILVA, 2010). Segundo Silva (2010), são produzidos aços com teores de carbono menores que 0,003%. A reação de descarburização se baseia numa reação dependente da pressão.

Figura 3.11 - Representação de uma instalação de desgaseificação RH com injeção de oxigênio.



Fonte: (SILVA, 2010).

3.3.10 DH (*Dortmund Holder Huttenunion*)

Este sistema opera pela subida e descida em uma perna única conforme Figura 3.12. Segundo Araujo (2005) O reator consiste em um vaso revestido por refratário, um sistema de vácuo composto por bombas, dutos de exaustão, condensadores e ejetores, sistema hidráulico para elevar a panela ou o vaso. A variação da pressão no interior do vaso provoca a subida e descida do aço no vaso. Também promove a remoção de H, N e C, além de inclusões (ABM, 2007).

Figura 3.12 - Representação de uma instalação de desgaseificação do tipo DH.



Fonte: (ARAUJO, 2005).

3.3.11 VD (*Vacuum Degassing*)

A panela é colocada em um tanque lacrado onde se faz vácuo. Pode-se usar somente uma abobada especial que se ajusta à borda da panela (ARAUJO, 2005). Segundo Ferreira (2011), a panela é posicionada num tanque onde se reduz a pressão para que seja estabelecido um novo estado de equilíbrio Aço/Atmosfera. O mesmo autor ainda afirma que é possível realizar as reações de dessulfuração, desgaseificação (remoção de nitrogênio e hidrogênio) e acerto de composição química. A Figura 3.13 exemplifica o processo no VD.

Figura 3.13 - Representação de uma instalação de desgaseificação VD.

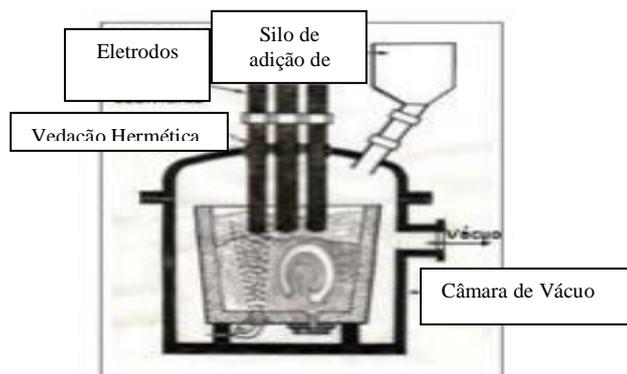


Fonte: Adaptado de: (FALSETTI, 2021).

3.3.12 VAD (*Vacuum Arc Degassing*)

Em síntese, é um Forno Panela onde pode-se fazer vácuo, somando as vantagens de ambos conforme Figura 3.14. É um equipamento caro usado principalmente para a fabricação de aços especiais. Os processos de desgaseificação ocorrem separadamente do processo de adição de ligas. Para Toledo (2018), no VAD os dois processos (adição de ligas e desgaseificação) são realizados em um único equipamento, compensando as perdas térmicas para a desgaseificação e ajustes de composição química (RIZZO, 2006). Ainda segundo Rizzo (2006) este equipamento é empregado no refino de aços inoxidáveis.

Figura 3.14 - Representação de uma instalação de desgaseificação com aquecimento elétrico.

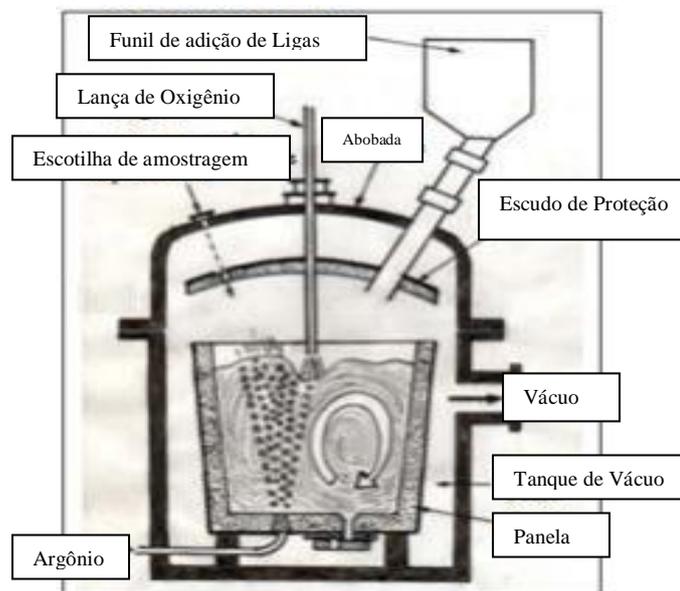


Fonte: Adaptado de: (PEIXOTO, 2015).

3.3.13 VOD (*Vacuum Oxygen Descarburization*)

A reação de descarburização é favorecida pela injeção de oxigênio sobre a superfície do aço na panela (Figura 3.15). É utilizado para fabricação de aços inoxidáveis, uma vez que em condições oxidantes e sob vácuo, a reação do carbono com o oxigênio tem preferência sobre a oxidação do cromo (RIZZO, 2006). Esse processo nada mais é do que o processo VD porem com injeção de oxigênio. Nele utiliza a injeção de oxigênio para realizar de descarbonetação sem grandes alterações a quantidade de cromo presente no aço líquido (TOLEDO, 2018). Segundo a autora, um processo similar ao anterior, o VCD usa o oxigênio presente no aço líquido para remover o carbono através da formação de CO a uma pressão de 20 mbar.

Figura 3.15 - Representação de uma instalação de vácuo com injeção de oxigênio.

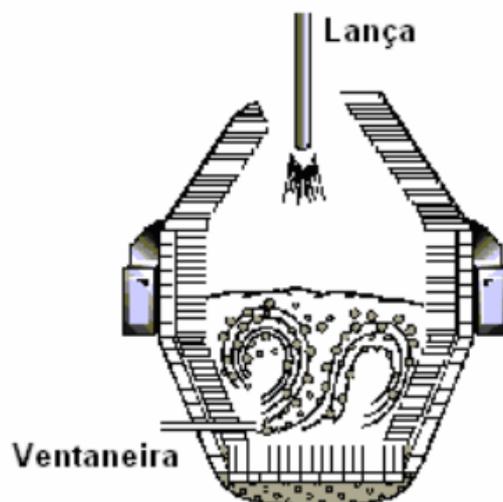


Fonte: Adaptado de: (PEIXOTO, 2015).

3.3.14 AOD (*Argon Oxygen Descarburization*)

Neste processo, injeção de argônio ou nitrogênio, juntamente com o oxigênio promove o abaixamento da pressão parcial do CO. O refino é conduzido em um reator especial (e não na panela), onde os gases são soprados em ventaneiras laterais, conforme ilustrado na Figura 3.16. Como o anterior, é empregado na fabricação de aços inoxidáveis (ABM, 2007). A variação nestes conversores está relacionada ao fluxo de gás injetado e depende dos parâmetros do processo como, geometria do vaso, altura de enchimento de metal, tipo de gás de processo e taxa de sopro, ângulo de inclinação do vaso, e disposição dos bicos de parede lateral bem como a geometria, número de bicos (ODENTHAL *et al*, 2010).

Figura 3.16 - Representação de uma instalação AOD



Fonte: (FILHO, 2009).

3.4 Máquinas de Lingotamento Contínuo

Para Braga (2019), o processo de lingotamento contínuo é a principal rota de solidificação de aço líquido da atualidade. As máquinas de lingotamento são constituídas de uma torre giratória onde são posicionadas as placas a serem lingotadas, o que permite a permuta das mesmas mantendo a produção em grandes sequências sem parar a máquina (ARAÚJO, 2005).

O equipamento responsável por receber o metal líquido, é denominado distribuidor (localizado entre a placa e o molde) e consiste em um reservatório revestido de refratário, que tem seu nível alterado durante trocas de placa, conciliando o processo em batelada de refino do aço com uma solidificação contínua (RIZZO, 2006).

Na produção de aços de alta qualidade a operação adequada do distribuidor é crucial. Contudo essa é a última oportunidade de se tratar metalurgicamente o aço líquido, como a flotação de inclusões não metálicas. Por outro, a contaminação do aço deve ser evitada a todo custo nessa etapa, pois não há oportunidade para correção do produto antes da solidificação (BRAGA, 2019). Possui também a função de alimentar os veios com uma vazão controlada para o molde que é responsável por resfriar o metal e iniciar a solidificação das barras lingotadas (RIZZO, 2006).

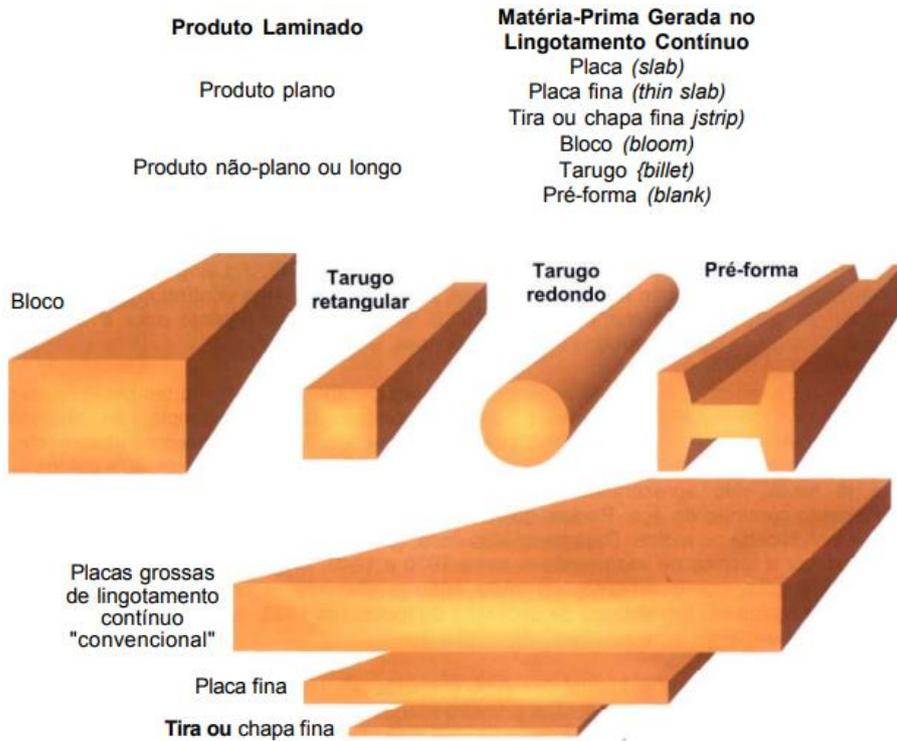
O objetivo é criar uma casca com espessura mínima de 15 a 20% da área do tarugo que resista a pressão metalostática e as tensões no processamento sem aparecimento de trincas ou fratura (SILVA e SHIBATA, 2013). Segundo Silva e Shibata (2013), os moldes das máquinas de lingotamento possuem um sistema de oscilação vertical que reduz o atrito, a lubrificação das paredes é feita depositando uma camada de pó fluxante sobre a superfície do metal, o qual se funde, retém as inclusões e forma uma capa térmica na superfície de metal, e se infiltra no *gap* entre a casca e as paredes do molde, impedindo aderência e aliviando as tensões de extração. O molde é confeccionado em cobre eletrolítico usinado em bloco inteiriço podendo ser recoberto por uma camada de cromo duro (ARAUJO, 2005).

O nível de metal deve ser controlado para evitar o transbordo ou o esvaziamento em demasia. Os sistemas de controle automático de nível de aço no molde melhoram a qualidade do material produzido, reduzindo o número de trincas transversais e longitudinais na superfície das placas, aprisionamento de inclusões e pó fluxante, e menor índice de esfoliação no produto final (BARCELOS E SILVA, 2005). Barcelos e Silva (2005) mencionam ainda que o sistema permite, maior estabilidade na transferência de calor no molde e na lubrificação em altas velocidades de lingotamento, influenciando a produtividade e qualidade do processo, minimizando colamentos, com possíveis o rompimento de pele (“break-out”). Ainda segundo os autores, as variações de nível e as oscilações do molde favorecem o aparecimento de inclusões de escória e porosidades, também regiões com depressões que são preenchidas com pó lubrificante, causam defeitos superficiais como trincas longitudinais e transversais no produto.

No resfriamento secundário a água é lançada diretamente sobre a superfície, através de bicos injetores sendo promovendo a solidificação total do aço a ponto de resistir as tensões mecânicas provocadas pelo endireitamento como também retirar calor de forma contínua e uniforme do veio (ARAUJO, 2005). O tarugo pré-solidificado no molde é suportado por rolos o objetivo da solidificação final do poço líquido no interior do tarugo, antes da região de corte.

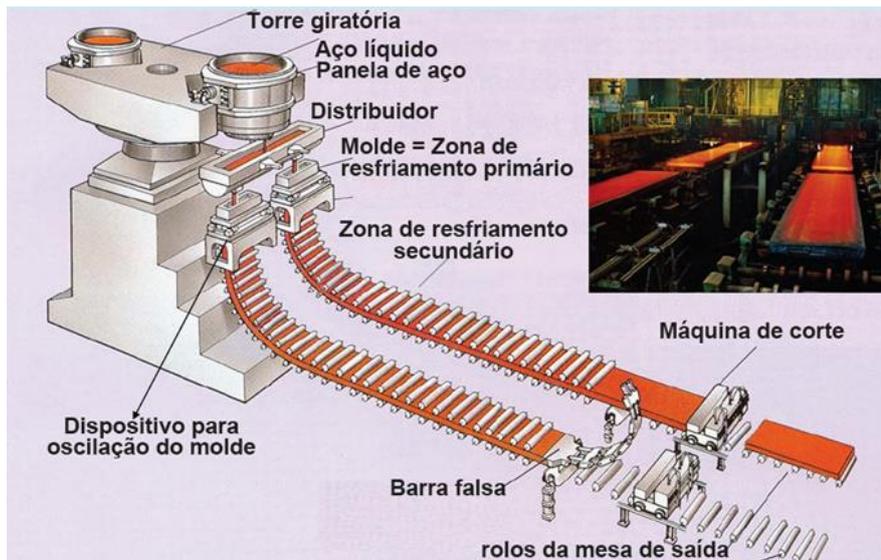
Ainda segundo (RIZZO, 2006), maçaricos ou guilhotinas realizam o corte das placas, tarugos, blocos ou pré-formas (produtos de lingotamento contínuo são exemplificados na Figura 3.17) e dispositivos realizam a marcação, rebarbação e transporte das peças cortadas, conforme esboço da Figura 3.18.

Figura 3.17 – Tipos de produtos lingotados.



Fonte: (RIZZO, 2006).

Figura 3.18 - Máquina de Lingotamento Contínuo.



Fonte: (RIZZO, 2006).

3.5 Controle Do Grau De Oxidação

O aço obtido nos fornos primários pode apresentar um alto teor de oxigênio contido, podendo variar de 0,04% a 0,10% (400ppm a 1000ppm). O controle desta oxidação tanto do banho metálico quanto da escoria de panela deve ser continuado na metalurgia secundária, evitando assim a formação de inclusões indesejáveis no metal, redução do rendimento das ligas adicionadas, seja pela oxidação do metal ou escoria com a formação de FeO e MnO, (RIZZO, 2006). O desoxidante mais utilizado na metalurgia secundária geralmente é o Alumínio, podendo ainda serem utilizados Si, Mn, ou combinados destes (desoxidação complexa).

A desoxidação pelo alumínio pode ocorrer de acordo com diversos mecanismos, como (BARTOSIAKI *et.al*,2014):

- Desoxidação por nucleação homogênea: necessita de supersaturação de alumínio. As inclusões são de aglomerados dispersos de corundum.
- Desoxidação por nucleação heterogênea sobre um pequeno núcleo: resultam da presença de uma inclusão oriunda do arraste de escória, refratário (exógenas), que atuam como sítio para a reação desoxidante. Não necessita de supersaturação de alumínio. Inclusões com composição e morfologia bastante variadas.
- Desoxidação formando inclusões de grandes dimensões: inclusões grandes podem ser formadas por nucleação homogênea nos locais onde há a introdução de alumínio ao banho e portanto elevada supersaturação dos reagentes.

Como citado por (ADABA, 2019), estudos realizados em plantas siderúrgicas e laboratório, as inclusões são alteradas devido a origem das inclusões preexistentes, ou seja, as que são geradas na desoxidação inicial, bem como o tempo e método aplicado na desoxidação, seja somente com alumínio ou complexa (multicomponentes).

Os desoxidantes atuam reduzindo o potencial de oxigênio, tornando o aço adequado para o processamento posterior, pois um potencial de oxigênio inadequado favorece a formação de inclusões não-metálicas. Uma desoxidação incorreta poderá deixar o material propício a defeitos durante o lingotamento, devido à baixa solubilidade do oxigênio no aço com o decréscimo da temperatura, gerando a formação de gases e conseqüentemente poros no produto lingotado, problemas na máquina de lingotamento contínuo como rompimento da pele e interrupção de produção da máquina de lingotamento (RIZZO, 2006).

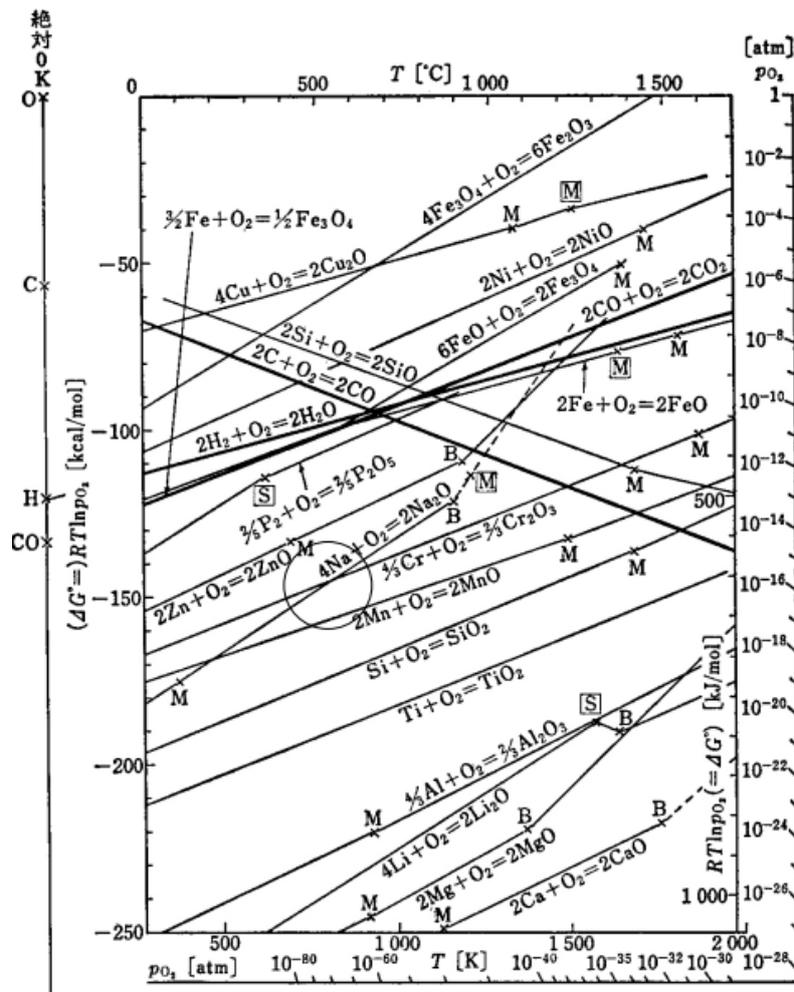
A desoxidação pode ser dividida em dois grupos:

a) desoxidação primária, que são as reações entre os elementos desoxidantes e o oxigênio dissolvido no aço. Este grupo produz inclusões endógenas primárias;

b) desoxidação secundária: acontece durante o decréscimo de temperatura, na qual a solubilidade do oxigênio cai, formando novos produtos de desoxidação, resultando em inclusões endógenas secundárias (LEAO, 2018).

Utiliza-se como desoxidantes, elementos com maior estabilidade dos respectivos óxidos, de acordo com o diagrama de Ellingham (Figura 3.19), que são os elementos na porção inferior do diagrama, casos de Mg, Ca e Al, além do Mn e Si, cujas energias livres de formação de óxidos são menores que a energia livre de formação de FeO.

Figura 3.19- Diagrama de Ellingham.



Fonte: (RIZZO, 2006).

3.6 Inclusões

As inclusões podem ser óxidos, sulfetos, fluoretos e até fosfetos.

No grupo dos óxidos incluem a alumina, sílica, cálcioaluminatos, espinélios, silicatos de manganês e alumínio, óxidos de manganês, ferro, e óxidos mistos (MORAES, 2009). A Tabela 3.4 apresenta as características de algumas inclusões inerentes ao sistema em que são analisadas.

Tabela 3.4- Principais inclusões encontradas nas etapas de elaboração do aço (MORAES, 2009).

Classe	Tipo de Inclusão	Descrição
1	Al ₂ O ₃	Inclusão de Alumina
2	CA	Aluminato de Cálcio
3	CA-CaS	Aluminato de Cálcio com Sulfeto de Cálcio
4	CA-(Ca,Mn)S	Aluminato de Cálcio com Sulfeto de Cálcio-Manganês
5	MgO.Al ₂ O ₃	Espinélio de Magnésio
6	MnO.Al ₂ O ₃	Espinélio de Manganês
7	Mn-Silicato	Silicato de Manganês
8	Al-Silicato	Silicato de Alumínio
9	Mn-Al-Silicato	Silicato de Manganês e Alumínio
10	CaO-CaS	Oxido de Cálcio ou Oxido de Cálcio com Sulfeto de Cálcio
11	(Mn,Fe)S	Sulfeto de Manganês e Ferro
12	TiS	Sulfeto de Titânio
13	(Mn,Fe,Ti)S	Sulfeto de Manganês-Ferro-Titânio
14	CaS	Sulfeto de Cálcio
15	(Mn,Fe,Ca,Ti,Mg)S	Sulfeto de Manganês-Ferro-Cálcio-Titânio-Magnésio
16	OS	Oxissulfeto (Oxido endógeno com sulfeto)
17	OCN	Oxicarbonitreto
18	OCN-S	Oxicarbonitreto com sulfeto
19	CN	Carbonitreto
20	CN-S	Carbonitreto com Sulfeto
21	Exógena+Na	Inclusão exógena contendo Sódio
22	Exógena	Inclusão exógena
23	Desconhecida	Partícula não classificada

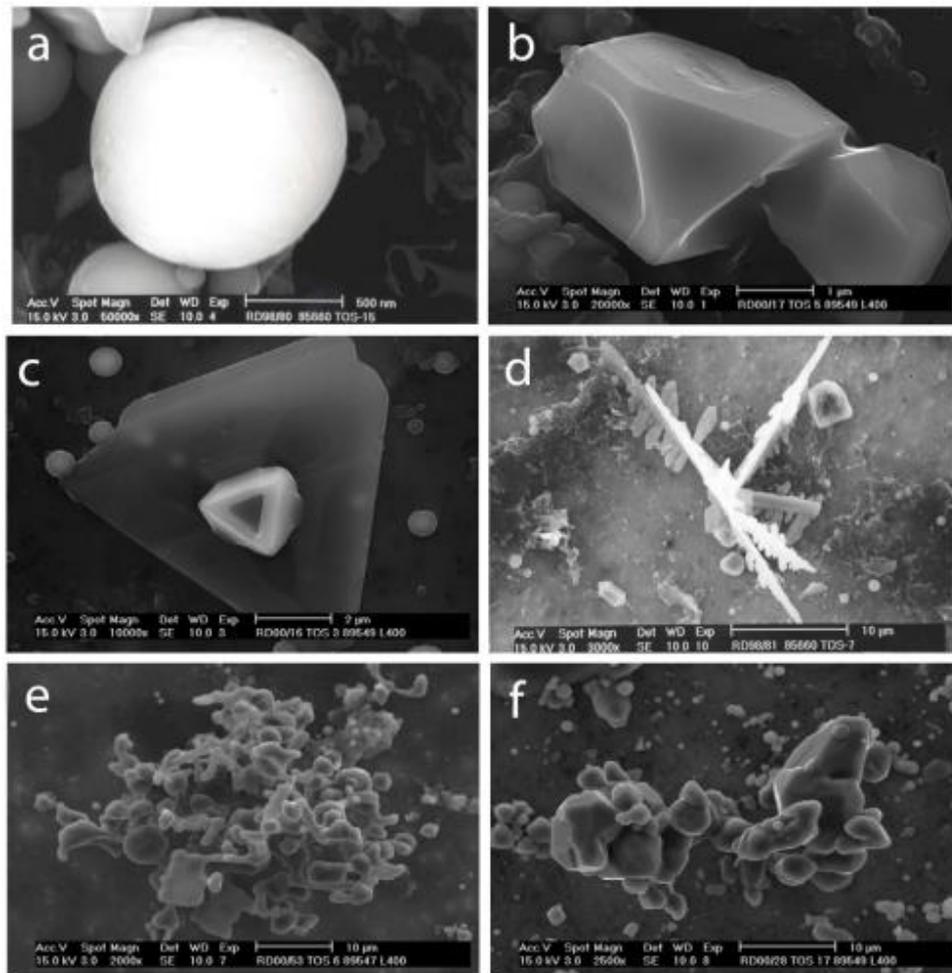
Fonte: (MORAES, 2009).

3.6.1 Origem das Inclusões

As inclusões são de dimensões variadas podendo ser de alguns milímetros até menores que um micron 0,001mm (RIZZO,2006). São partículas não metálicas presentes na matriz de metais e ligas (MORAES, 2009), podendo ser gasosas ou sólidas. As inclusões sólidas podem se apresentar em seis formas típicas, segundo a Figura 3.20 (BROILLO, 2011):

- 1- Inclusões Esféricas a);
- 2- Inclusões Facetadas b) e c);
- 3- Inclusões Dendriticas d);
- 4- Inclusões Aglomeradas e);
- 5- Inclusões Agregadas f);

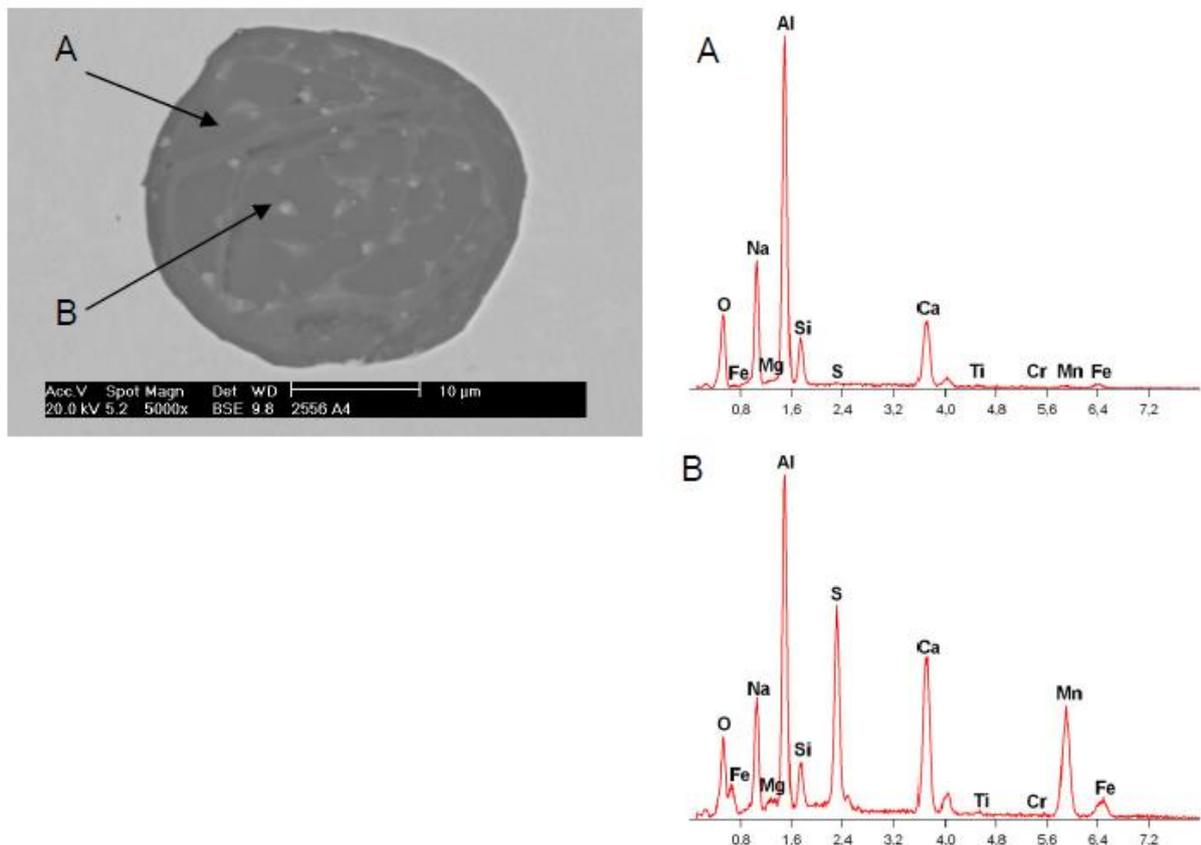
Figura 3.20– Formas das inclusões.



Fonte: (SILVA, 2018).

As inclusões formadas a partir das reações de desoxidação são as inclusões endógenas, sendo em geral microscópicas. As grandes inclusões são modo geral exógenas, Figura 3.21. As inclusões exógenas são produtos da interação do metal com o revestimento refratário, interação com a atmosfera (reoxidação), interação com escórias (SILVA, 2018).

Figura 3.21 - Formato de uma inclusão exógena e os picos de composição química desta.



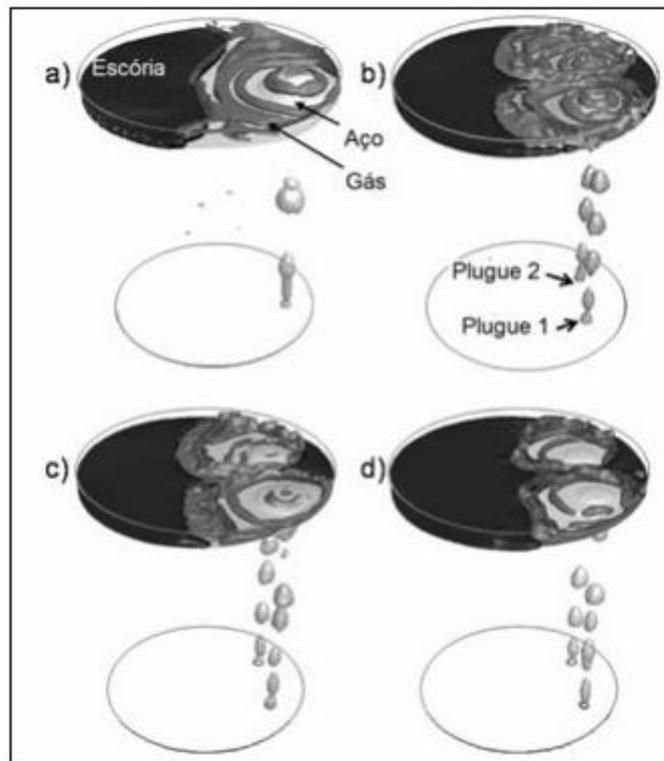
Fonte: (MORAES, 2009).

3.6.2 Reoxidação

A reoxidação dos elementos já incorporados ao banho líquido ocorre devido a exposição do mesmo à atmosfera e o transporte do oxigênio propriamente dito para o seio do metal. Pode ocorrer devido a paradas repentinas no lingotamento e/ou na aciaria, bem como algum outro problema em que o tempo de permanência do aço na panela extrapole certo valor crítico, e seja necessário o basculamento do metal em outra panela, para que o processo continue, com segurança. Pode ocorrer também devido a não passagem de gás na panela. De Sá (2015) menciona que um descontrole operacional durante as etapas de refino com a abertura do olho de argônio fora da etapa correta pode acarretar neste problema principalmente na etapa de flotação. Outro aspecto de grande relevância é o controle da abertura do “olho” da pluma na

superfície do aço coberta por escória. Através deste, podem vir a ocorrer indesejáveis reações de reoxidação tornando-se uma fonte de inclusões e de perda de calor para o ambiente durante a agitação. O descontrole operacional durante as etapas de refino com a abertura do olho de argônio fora da etapa correta pode ocasionar este problema (esquemas a, c e d), principalmente na etapa de flotação, que requer uma abertura de olho de argônio mínima (esquema b) conforme ilustra a Figura 3.22 (De SÁ, 2015).

Figura 3.22 - Mecanismo de reoxidação do aço pelo olho de argônio: a) abertura moderada de olho/ b) abertura mínima/ c) e d) abertura excessiva.



Fonte: (De SÁ, 2015)

Estudos realizados com a adição de alumínio, elemento chave na reoxidação, sugerem a formação de inclusões maiores que 20 microns, sendo as características destas inclusões alteradas como composição química, forma e tamanho (J.TAL, 2017). Estudos realizados por Pistorius *et al.*(2020) afirmam que as inclusões são alteradas de acordo com o sistema de reações envolvidas, sendo estas realizadas entre aço, escoria, refratário e o ar atmosférico. O mesmo afirma também que espinélios são formados da conversão da alumina formada da transferência de magnésio para o aço na reoxidação do aço, e as adições de cálcio durante o tratamento alterando o espinélios para um cálcio aluminato líquido.

A reoxidação pode também ser observada quando da não abertura de panela no lingotamento contínuo. Além de provocar interrupções na máquina de lingotamento, com a extrapolação do tempo estipulado de processo, um repanelamento se torna necessário por medidas de segurança do revestimento refratário e mecanismo de válvula gaveta. O tempo médio estipulado com permanência de metal é de 5 horas (FLECHA, 2017).

3.6.3 Vida de panelas

Durante a etapa de drenagem da panela no LC a paredes da mesma podem ser recobertas com uma camada de escória, conforme mostrado na Figura 3.23. Além da adesão do filme ocorre também a penetração de escória nos poros e fissuras dos tijolos refratários. Porções desta escória e partículas não metálicas podem ficar retidas no aço líquido na forma de inclusões (MORAES,2009).

Figura 3.23 - Camada de escória aderida a parede da panela.



Fonte: (MORAES, 2009).

Quando a panela é novamente preenchida com aço líquido pode ocorrer ainda a refusão desta camada aderida, contribuindo para os mais variados tamanhos e quantidades de inclusões.

(TRIPHATI, NZOTTA, SANDBERG & DU SICHEN, 2004) analisaram amostras de aço coletadas em panelas em diferentes estágios do ciclo de vida. O número total de inclusões aumentou com a idade da panela antes da desoxidação e ao final do tratamento. Segundo o estudo, numa panela com 18 corridas, o aumento no número de inclusões foi substancial, sendo que as inclusões de tamanhos menores contribuíram grandemente para esse aumento. Tanto os

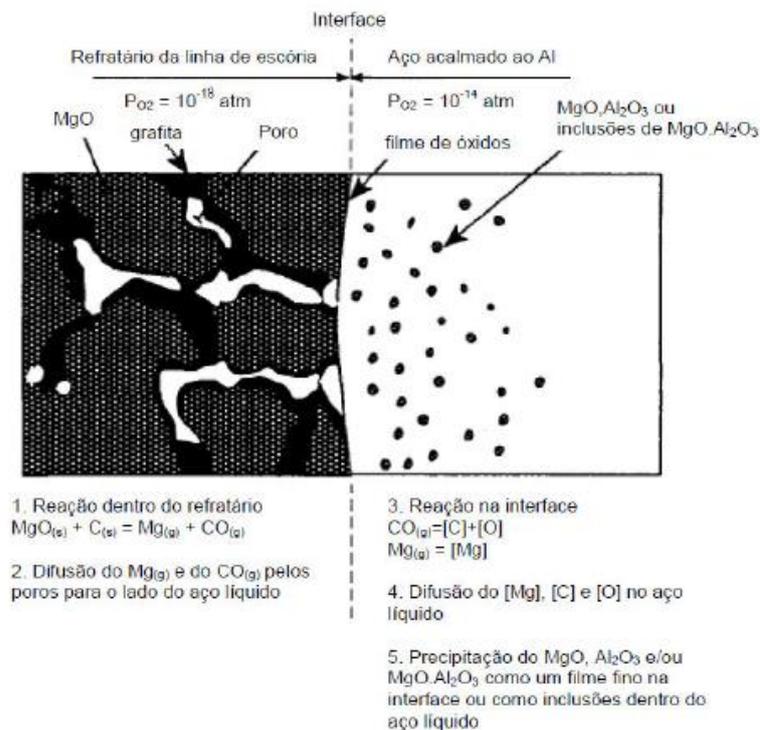
teores de oxigênio total bem como o teor de oxigênio dissolvido nas amostras de aço mostraram um aumento com a idade da panela.

3.6.4 Interação aço líquido-revestimento refratário

Os refratários utilizados na panela são de MgO-C, na linha de escória onde ocorre o contato entre revestimento e escória. Este material apresenta grande resistência termomecânica, adequada à severidade térmica da região.

A grafita reduz o molhamento do refratário pelo aço e protege os cristais de magnésia. No interior do refratário carbono e magnésia podem reagir formando, entre outros produtos, $Mg_{(g)}$ que se difunde na direção da face quente do tijolo. No caso de desoxidação com alumínio o potencial de oxigênio no aço acalmado é superior ao potencial de equilíbrio com o $Mg_{(g)}$. Decorre disto a reoxidação do Mg, com a formação de uma densa camada de MgO junto à face quente do tijolo, o que contribui para proteger o revestimento. A aplicação de vácuo modifica o equilíbrio de formação de $Mg_{(g)}$ no sentido dos produtos, o que permite a incorporação de Mg no metal, sendo favorecido pela redução da pressão local no reator. A presença de alumínio em excesso favorece a formação de $MgO.Al_2O_3$ de acordo com a Figura 3.24.

Figura 3.24 - Reação entre aço líquido e refratário na panela.



Fonte: (MORAES, 2009).

3.7 Mecanismos de Agitação e Controle da Limpidez

Para (PAL, 2012), no refino em panelas, as etapas de dissolução de ligas, remoção de inclusões, são reforçadas pela agitação do banho, sendo esta por força gravitacional ou por força eletromagnética. Na primeira técnica, pela injeção de gás e nesta última por interação do aço com campos eletromagnéticos. Cada uma tem seus méritos, a agitação excessiva favorece a desgaseificação e a dessulfuração, porém em casos onde se exige um controle rigoroso evitando a reoxidação a agitação por indução é a mais adequada devido a estabilidade da escória cobrindo o metal. Contudo, para a obtenção de aços cada vez mais limpos e com o menor número de inclusões não metálicas, é de fundamental importância que maior número possível de inclusões seja removido no menor intervalo de tempo após o acerto químico e térmico (ABM,2007). A escolha do equipamento para promover o refino deve se basear primordialmente da capacidade produtiva a ser instalada na siderúrgica bem como o capital dispendido para o mecanismo de agitação a ser instalado no refino (RIZZO, 2006).

Na agitação eletromagnética o equipamento é mais caro devido à complexidade do sistema elétrico e a chapa metálica das panelas deve ser em aço inox, dispende energia elétrica para funcionamento. A agitação pneumática tem a vantagem de poder utilizar chapa em aço carbono específico, com valor bem mais baixo comparando com o aço inox (ABM, 2007). A demanda por mão de obra passa a ser um ponto observado pois as preparações de panelas são mais frequentes e com um tempo maior devido a necessidade de trocas de componentes refratários com mais frequência, há ainda o dispêndio de argônio necessário para as operações metalúrgicas.

3.7.1 Injeção de Gás Inerte

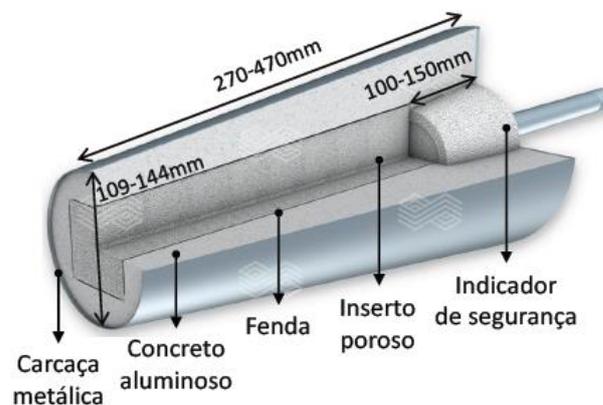
O emprego correto do borbulhamento com gás inerte pode afetar de forma decisiva a operação do forno panela ou desgaseificador a vácuo, pois o descontrole do fluxo de argônio na superfície pode acarretar em perda de temperatura bem como reoxidar o aço exposto (ABM, 2007).

Em seu trabalho (De SÁ *et al.*,2015) menciona que a prática de borbulhamento de gás inerte, em panela de refino secundário do aço,tem como objetivo a uniformização térmica e composicional; aceleração das reações químicas, principalmente nas interfaces metal-escória e metal-bolhas estimular a coalescência, flotação e remoção de inclusões não-metálicas. O mesmo afirma também que na região de saída do fluxo ocorrem interações químicas indesejáveis entre o aço, escória e atmosfera, tais como: absorção de nitrogênio, hidrogênio;

reoxidação e aprisionamento de partículas de escória e são influenciados pela vazão, número e arranjo de orifícios de borbulhamento do gás; propriedades físicas da escória e do aço; bem como geometria da panela.

Segundo Rizzo (2006) o gás utilizado nesta etapa pode ser o argônio ou nitrogênio (o mais utilizado é o argônio, por não interagir com o metal). Este gás é injetado através de plugues porosos e até mesmo por tijolos nas laterais da panela. Os plugues possuem geometria normalmente cônica e para a injeção de gás, estes plugues podem ser de material poroso no centro ou mesmo de fendas e anéis capilares (*slots*) conforme a ilustra a Figura 3.25:

Figura 3.25 - Plugue Poroso.



Fonte: (FALSETTI, 2021).

As características operacionais dependem muito do processo de cada aciaria. Quanto à confiabilidade do sistema, como estanqueidade, controle e segurança operacional das panelas de aço, os plugues se destacam por fornecerem controles de baixas vazões tendo como consequência a formação de bolhas menores e em maior quantidade.

A nucleação das bolhas ocorre após atingirem um diâmetro crítico graças aos sítios de nucleação. Estas se destacam da face do plugue e ascendem no metal devido diferença de densidade entre o gás e o metal (PERÈZ, 2012).

Para Betega (2022) a injeção de gás inerte tem que ser controlada, porque a eficiência do processo depende de fatores como vazão e pressão do gás inerte, tempo de injeção, tamanho das bolhas e das inclusões e a altura da coluna de metal na panela. Caso a mistura for extremamente intensa, pode causar separação e/ou destruição de agregados previamente formados e, assim, piorar o processo de remoção.

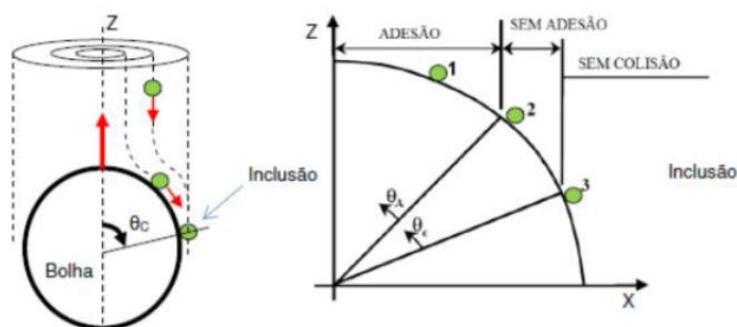
Observa-se um processo de arraste, no qual as partículas grudam na bolha devido a tensão superficial, e todo o sistema inclusão–bolha, que possui menor densidade do que o metal, flutua até a escória no topo.

Ainda segundo Betega (2022) as inclusões podem se mover com maior rapidez até a escória quando não estão aderidas na bolha, graças ao fluxo ascendente criado pela injeção do gás que deixa um rastro no metal líquido e faz com as inclusões sejam aceleradas mesmo se não estiverem presas às bolhas. O grau de molhabilidade entre inclusão e o aço é um dos fatores determinantes para que uma partícula seja aderida ou arrastada. No caso de partículas não molháveis estas grudam nas bolhas do gás. O ângulo de colisão entre inclusão e bolha é importante, pois este define a condição a partir da qual não ocorre adesão ou colisão no sistema inclusão-bolha.

Segundo Perez (2012), a remoção eficiente de inclusões por bolhas de gás pode ser por colisão das bolhas com as inclusões que atingem maior velocidade que uma inclusão flotando sozinha, ou porque a pluma gerada transporta as inclusões para o topo promovendo ainda mistura turbulenta na escoria. De acordo com Perez (2012) a remoção de inclusões é diretamente proporcional ao fluxo de gás, e tem influência na remoção, o tamanho da inclusão bem como a probabilidade de adesão e colisão da inclusão na bolha. Ainda que, a anexação da inclusão à bolha não é influenciada pela taxa de injeção de gás, mas o é pelo tamanho da inclusão.

Quando a colisão se dá com ângulos menores que θ_A , há tempo de contato suficiente entre a inclusão e a bolha para adesão. Para ângulos maiores que θ_A e menores que θ_C , o tempo para o contato é insuficiente, porém ocorre a colisão sem a posterior adesão: a partícula pode ser arrastada pelo fluxo de gás conforme Figura 3.26. Quando o ângulo de colisão é maior que θ_C não ocorre contato.

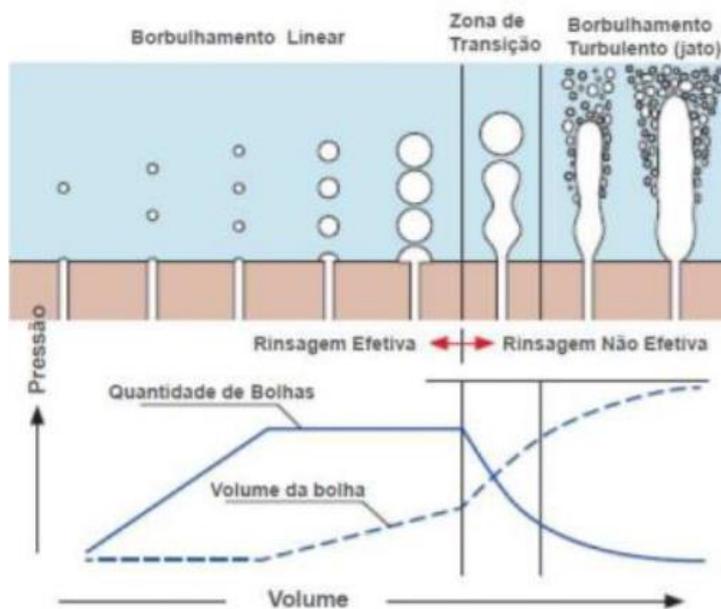
Figura 3.26 – Processo de adesão Inclusão/Bolha.



Fonte: (BETEGA, 2022)

A probabilidade de colisão é potencializada quando tem bolhas menores em grande quantidade. Quanto maior a vazão/pressão de injeção, maior o número de bolhas no sistema e maior a eficiência da remoção das inclusões. Mas pode ocorrer o indesejável, quando vazões/pressões excessivas são aplicadas, que geram borbulhamento excessivo, causando vários problemas, como, reoxidação do aço e arraste da escória para o interior do aço. A Figura 3.27 apresenta um esboço o qual sugere que altas vazões são fundamentais para que ocorra considerável formação de bolhas; entretanto, a partir de um valor crítico de vazão e com o consequente aumento do volume, estas bolhas coalescem e formam bolhas maiores prejudicando o processo de remoção, devido ao decréscimo no número de bolhas.

Figura 3.27 - Formação de Bolhas

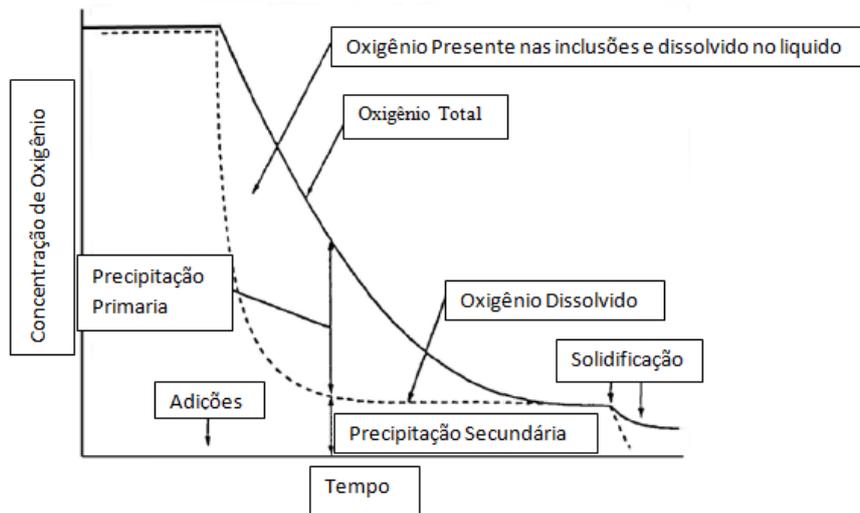


Fonte: (BETEGA, 2022).

3.7.2 Influência da Injeção de Gás Inerte na Redução do Oxigênio Total

Segundo O'maley (2017), a concentração de oxigênio no banho evolui conforme mostrado na Figura 3.28. O oxigênio dissolvido somado ao oxigênio presente nos óxidos é denominado Oxigênio Total, e através deste que é possível deduzir o nível inclusionário de um aço. Como se nota, ao longo do processo, a diferença entre Oxigênio Total e oxigênio dissolvido diminui, indicando a remoção das inclusões.

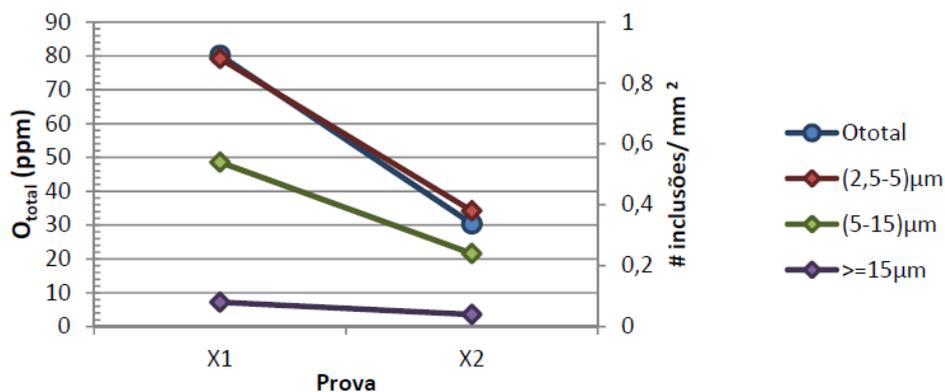
Figura 3.28 – Evolução da Concentração de Oxigênio em uma Corrida



Fonte: (O'MALEY, 2017).

Bartosiaki *et.al.* (2014) compara duas amostras de aço, sendo a amostra X1 retirada após o tratamento do aço na panela e a amostra X2 retirada após o tratamento no forno panela. Observa-se na figura 3.29 que ocorre uma redução no oxigênio total entre amostras, e remoção das inclusões formadas devido a agitação do banho. Supõe-se que ocorrem colisões entre inclusões, que flutam devido ao empuxo exercido sobre elas. Bartosiaki *et.al.* (2014) também menciona que após o tratamento no forno panela as inclusões tendem a enriquecer com teores de CaO e MgO, este último originário da interação aço/refratário, pelo fato destas inclusões estarem tendendo a composição de equilíbrio com fases líquidas. Bartosiaki *et.al.* (2014) afirma também que espinélios podem ser formados.

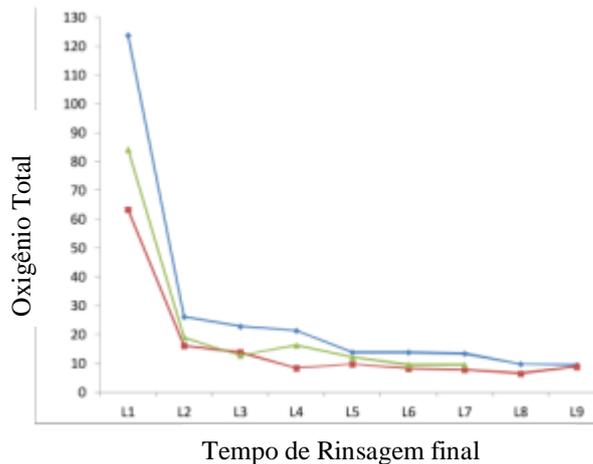
Figura 3.29–Oxigênio total entre amostras no mesmo aço.



Fonte: (BARTOSIAKI, *et.al.* 2014).

Um estudo realizado por (O'MALEY, 2017), mostra que a injeção de argônio é benéfica na redução do oxigênio total conforme a Figura 3.30. Esta Figura mostra um tempo total de 45 minutos com intervalos de 5 minutos entre amostras:

Figura 3.30 Oxigênio total versus tempo de rinsagem Final

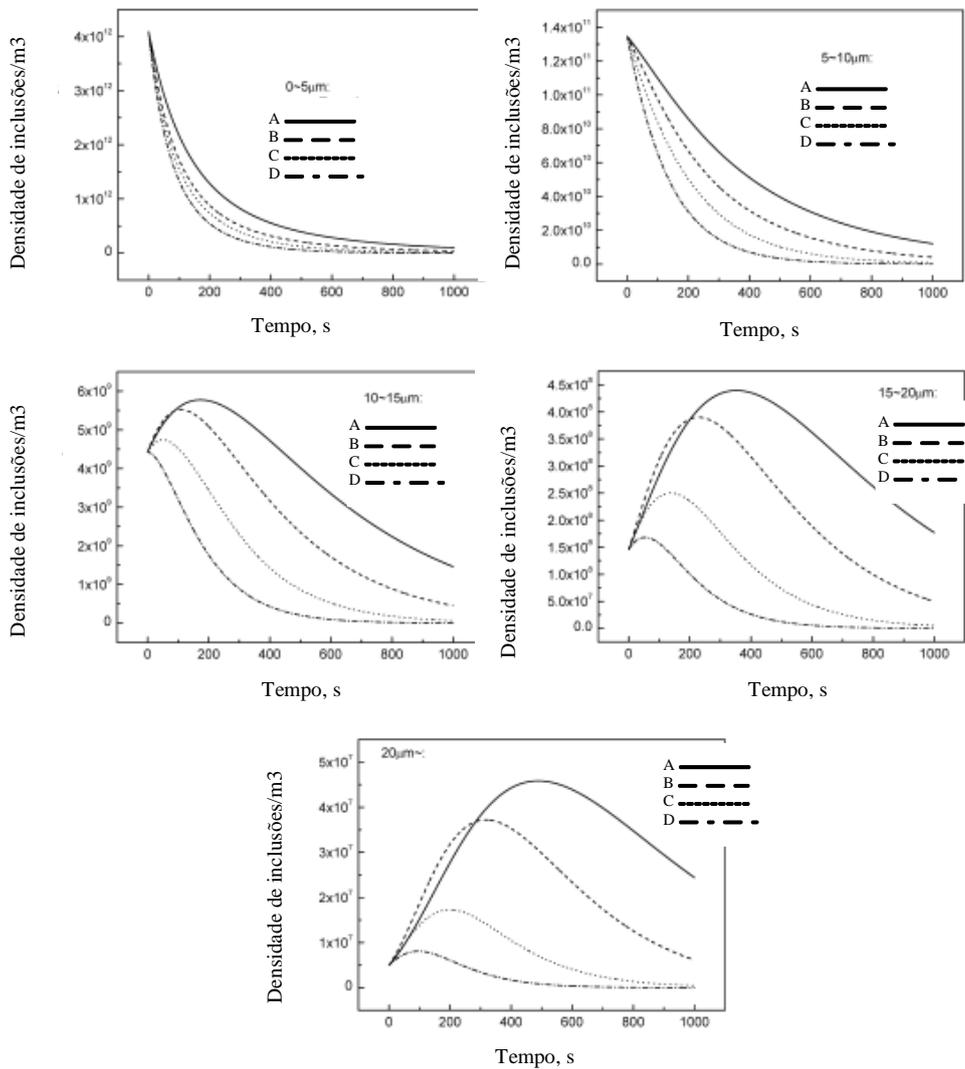


Fonte: Adaptado de (O'MALEY, 2017).

3.7.3 Problemas com Passagem de Argônio

Os principais problemas operacionais relacionados aos plugues são a não rinsagem ou deficiência de rinsagem, os quais levam a dificuldades nas operações metalúrgicas e perdas de produtividade. Esses fatores podem estar relacionados a falhas de limpeza da face do plugue, queda de pressão no gás de rinsagem e trincas decorrentes de choque térmico. Os plugues podem falhar por entupimento e/ou surgimento de trincas, as quais podem levar à infiltração de aço e posterior entupimento, ou a variações na pressão de rinsagem. Estas podem estar relacionadas também a falhas nas tubulações, nos reguladores de pressão, conexões, etc. (da CRUZ *et al.*, 2014) afetando os resultados operacionais. Geng. *et al.*, (2010) concluíram que o índice de inclusões presentes na população por frações de tamanhos, está relacionado com o tempo de flotação e a configuração de plugues na panela. As configurações cujos resultados são exemplificados na Figura 3.31 consistem de um plugue deslocado do centro (Configuração A), um plugue central (configuração B), dois plugues (Configuração C) e três plugues (Configuração D), mostrando que na configuração com três plugues se tem maior eficiência na remoção de inclusões, independente do tamanho de inclusão comparado.

Figura 3.31– Densidade populacional de inclusões versus tempo de flotação. Comparativo da configuração do número de plugues na panela.



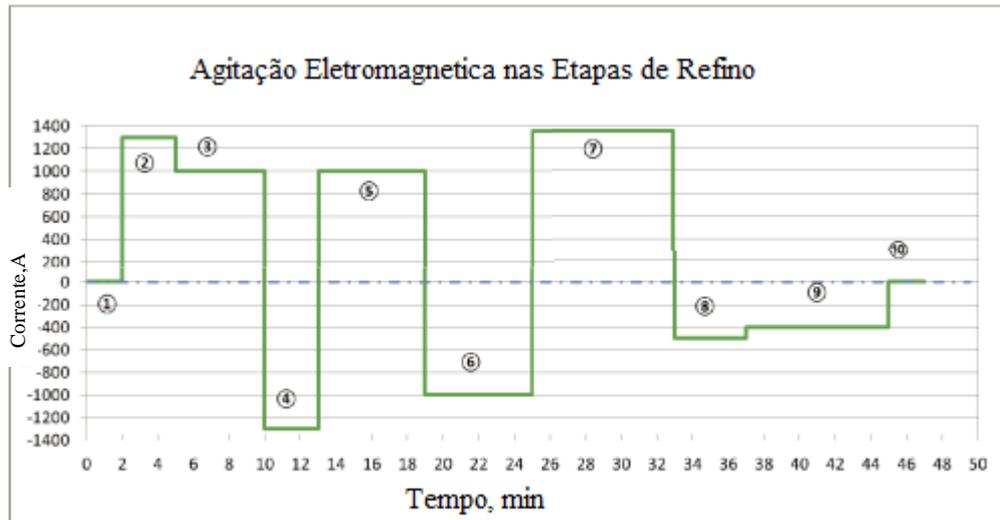
Fonte: Adaptado de (GENG. *et al.*, 2010).

3.7.4 Agitação Eletromagnética

Concebido na década de 30, o agitador eletromagnético realiza a agitação de metais pela ação de um campo magnético alternado, gerado a partir de tensões e correntes induzidas em uma bobina. O metal realiza um fluxo tangencial às paredes da panela na direção vertical. Este fenômeno só é possível graças a um campo magnético móvel, obtido pela regulação da intensidade de corrente na bobina. Devido a possibilidade de inversão do fluxo de aço, este sistema reduz a perturbação na camada limite escória/ metal reduzindo incorporação de gases e reoxidação do banho (ABM, 2007). As etapas de operação (como aquecimento, homogeneização, adição e fusão de ligas granuladas e arames recheados, dessulfuração e

remoção de inclusões) de um forno panela são perfeitamente atendidas, conforme mostrado na Figura 3.32, quando este sistema de agitação está embarcado na instalação (RIZZO, 2006).

Figura 3.32 - Etapas de refino com agitação eletromagnética.



Fonte: Etapas: 1- Preparação/ 2- quebra da escoria/ 3- Aquecimento/ 4- dissolução das cales/ 5 e 6- acerto químico/ 7 e 8-acerto químico final e flotação/ 9- Flotação/ 10- Liberação da panela.

Adaptado de (TENG, 2017).

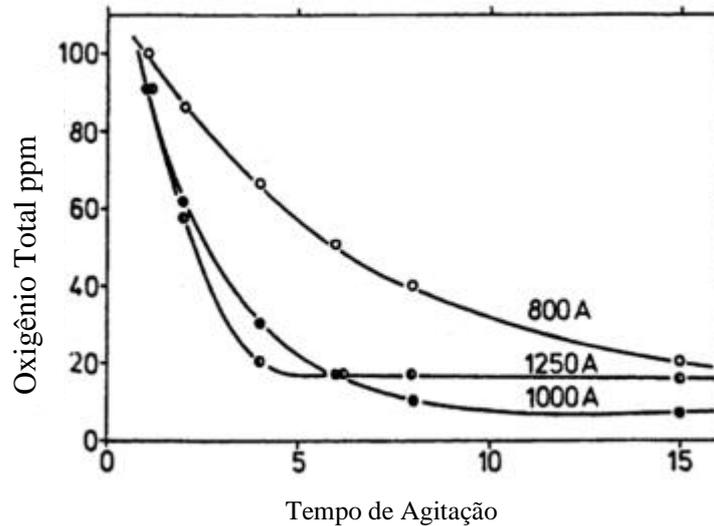
A operação é caracterizada pelo baixo custo de agitação, por não utilizar gás inerte e prescindir da troca de plugues porosos, pela segurança operacional, por reduzir riscos de infiltração e possibilitar a produção de aços de alta qualidade, devido a estabilidade de funcionamento do equipamento (TENG, 2017).

A operação apresenta grande flexibilidade devido à possibilidade de se alternar a direção de agitação do banho. Para Oborin *et.al*, (2014) a inversão do sentido de agitação facilita a dissolução de ligas devido à redução significativa no tempo de reação e à manutenção de uma camada de escória evitando a exposição do aço. Os efeitos de *pick up* de carbono, oxigênio total e incorporação de hidrogênio e nitrogênio são reduzidos devido a cobertura de escória. Contudo é possível gerar uma superfície descoberta para a adição de ligas e escórias inerentes ao refino. A Figura 3.33 mostra a relação entre oxigênio total e o tempo de flotação associado ao controle da intensidade de agitação eletromagnética empregando diferentes valores de intensidade de corrente.

A energia turbulenta na agitação eletromagnética é maior que na agitação por gás inerte possibilitando um processo mais homogêneo. Por outro lado, a agitação por gás inerte é mais

eficaz permitindo maior interação entre aço e escória, promovendo a dessulfuração do aço. É possível utilizar nas etapas de refino, sistemas com agitação conjugada, que se complementam.

Figura 3.33 - Agitação eletromagnética x Oxigênio total



Fonte: (O'MALEY, 2017).

3.7.5 Flotação de Inclusões

Em uma panela de aciaria, a remoção das inclusões ocorre pela flotação natural das partículas, associada a flotação forçada, ou seja, aquela resultante dos efeitos de agitação e à capacidade que uma escória tem de incorporar inclusões (De SÁ, 2015).

O mesmo autor afirma também que inclusões presentes no aço são dependentes de alguns fatores operacionais, como a situação do revestimento refratário da panela, tempo de residência de metal nas panelas, vida de panelas. Deve-se considerar que os produtos de desoxidação são inicialmente constituídos de inclusões pequenas, que não são de fácil remoção. A nucleação e crescimento das inclusões são parâmetros importantes para que as inclusões sejam removidas durante o processo (BARTOSIANKI, *et.al*, 2014).

Na flotação natural, graças a diferença de tamanhos, partículas maiores flutam com mais facilidade, o que leva a mesma a colidir com partículas menores, e com a agitação do banho a pluma de gás gera um fluxo ascendente no metal que carrega estas inclusões para o topo. Broillo (2011) cita também que uma agitação excessiva destrói os conglomerados prejudicando a remoção.

Um estudo realizado por Teng (2017) sobre os dois mecanismos de agitação e também a combinação de ambos em plantas com rota metalúrgica composta de FEA/AOD/FP/CC e FEA/FP/VD(VOD)/CC, verificou – se que com o mecanismo de agitação eletromagnética, houve uma melhora significativa na remoção de inclusões comparando com agitação pneumática e que para a agitação pneumática é possível conseguir baixos teores de oxigênio.

3.7.6 Influência da escória na limpeza do aço

Para Dutra (2018), no processo de refino secundário, a escória fornece uma cobertura para a proteção do aço, prevenindo a reoxidação, e a incorporação de elementos como nitrogênio e hidrogênio, minimizando o desgaste do revestimento refratário de painéis. Reduz ainda as perdas de calor e promove a remoção de inclusões.

As escórias de aciaria são soluções complexas de fase única no estado líquido e no estado sólido fases multicristalinas, que se separam da fase metálica em virtude da diferença de densidade e de sua insolubilidade. Podem ser projetadas para alta capacidade de remoção de enxofre. A escória consiste basicamente de CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃, óxidos de ferro e outros elementos. Para eficiência do processo de refino, onde inclusões são removidas do aço, as propriedades da escória devem ser controladas, tais como: composição química, viscosidade, ponto de fusão, densidade, tensão superficial e grau de oxidação.

Um dos exemplos de controle das características da escória é o resultante da dissolução de óxidos metálicos na sílica líquida, que em um primeiro momento reduz a viscosidade da escória, por quebrar a cadeia polimérica de sílica. Em um segundo momento, a adição de óxidos como CaO e MgO acima do limite de saturação destes na escória, aumenta a viscosidade por precipitação de partículas sólidas (PRETORIUS,2015).

A escória é um componente importante na produção de aço, realizando o refino nas diversas etapas de elaboração. Segundo Neves, *et. al*,(2014) a remoção de inclusões não metálicas a partir do aço líquido, pode ser conseguida por meio de vários mecanismos diferentes, casos da agitação eletromagnética e injeção de gás inerte. Por exemplo, devido à diferença entre as densidades das inclusões não metálicas e do aço. Caso um grande intervalo de tempo fosse estabelecido entre as etapas de desoxidação e o lingotamento contínuo, as inclusões flotariam naturalmente até a superfície.

Para Leão (2018) a escória exerce influência determinante em várias etapas na remoção de inclusões do aço líquido, sendo que a temperatura, composição química da escória e das inclusões, além da morfologia das mesmas, definem a capacidade de absorção da inclusão pela

escória. Adicionalmente, o processo é influenciado pela intensidade de agitação do banho. As etapas de remoção são:

1. Transporte da inclusão para uma interface.
2. Separação da inclusão da interface.
3. Remoção da inclusão da interface.

Para Broillo (2011) a posição da inclusão em relação a interface metal/escoria mostra como esta interage com o metal, podendo ser: Permanentes, quando estão posicionadas antes da interface e então solubilizadas no seio do metal; Oscilantes, apresentam intermitência entre o metal e a escória; e as Passantes, de maior interesse da engenharia de inclusões, que atravessam a interface e são solubilizadas na escória.

Portanto, sem uma escória com propriedades adequadas as inclusões podem não ser removidas efetivamente.

De acordo com Neves *et. al*, (2014) a composição química da escória com a capacidade de remover de forma eficiente as inclusões é aquela que promove reação com a inclusão, pois as inclusões devem juntar-se e dissolver-se na fase de escória. A força de fixação (reatividade) entre a inclusão e a escória pode ser caracterizada pela molhabilidade da escória em relação às inclusões. Quando a força motriz é maior para a aglomeração de pequenas partículas do que as forças turbulentas do aço líquido, as partículas se aglomeram e flutam para a superfície.

Os parâmetros de maior influência na transferência da inclusão para a escória são a viscosidade da escória e a tensão interfacial. Uma escória de refino é aquela para a qual a viscosidade é adequada para favorecer a dissolução das cales, bem como possibilitar a interação com metal (RIZZO, 2006). A viscosidade está relacionada com as estruturas iônicas presentes na escória, a presença de óxidos básicos como o caso do CaO, aumenta a fluidez da escória, por ruptura das cadeias dos íons silicatos.

4-DISCUSSÃO

Os processos de flotação são em grande maioria, realizados após as etapas de refino.

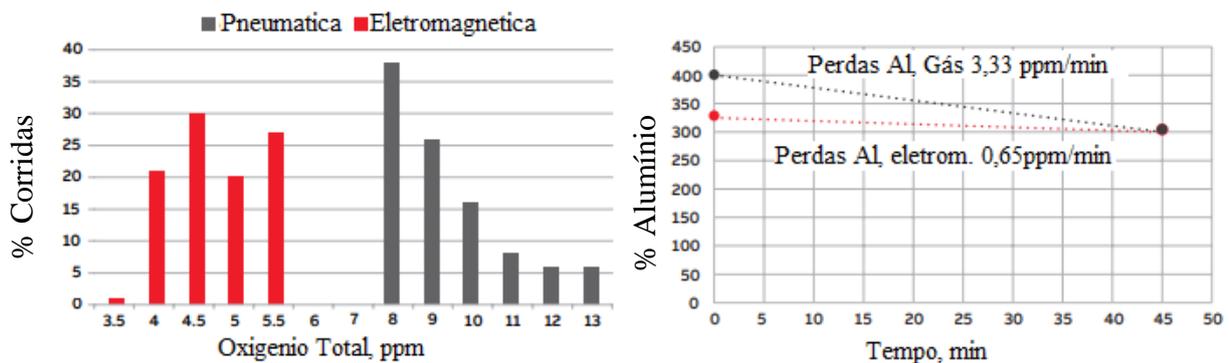
Como visto anteriormente alguns mecanismos acarretam em oxidação de elementos adicionados no metal, como também o descontrole na etapa de flotação acarreta em geração de inclusões não metálicas extremamente deletérias às propriedades mecânicas do metal.

Os tipos de revestimentos utilizados nas placas contribuem de forma considerável seja na mudança de morfologia como também na carga inclusional presente no metal. Portanto, é importante analisar as variáveis peculiares aos processos de remoção de inclusões por agitação pneumática ou eletromagnética,

Estudos realizados pela ABB fornecedora de equipamentos metalúrgicos mostram um comparativo entre a agitação pneumática e eletromagnética (ASEA BROWN BOVERI, 2009). De acordo com este trabalho a agitação eletromagnética conduz a corridas agrupadas em um nível de oxigênio total abaixo de 5,5 ppm, resultados melhores que na agitação pneumática (conforme Figura 4.1). Onde se nota uma maior distribuição do oxigênio total, sendo notória a maior dispersão dos resultados.

O tempo de processo é um fator que exerce influência na efetividade do processo, sendo que com agitação pneumática a perda por oxidação do alumínio é 80% maior que no mecanismo de agitação eletromagnética.

Figura 4.1 - Comparativo de oxigênio total e perda de alumínio entre agitação pneumática e eletromagnética.

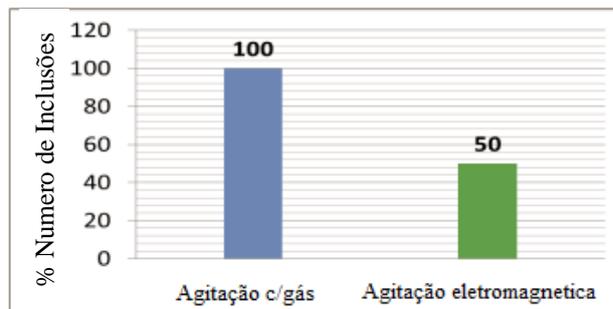


Fonte: (ASEA BROWN BOVERI, 2009).

Em consequência da baixa exposição do aço à atmosfera circundante durante o refino no processo eletromagnético, a escória permanece cobrindo o metal, evitando a reoxidação e pick-up de gases atmosféricos.

Teng, 2017, estudou os dois mecanismos de agitação e também a combinação de ambos em plantas com rota metalúrgica composta de FEA/AOD/FP/CC e FEA/FP/VD(VOD)/CC. Verificou que na rota onde utilizou-se o mecanismo de agitação eletromagnética, houve uma melhora significativa na remoção de inclusões. Os resultados mostraram um incremento na remoção de inclusões entre 30 e 50% conforme Figura 4.2. O que se justifica, pois a constante de desoxidação é proporcional à energia turbulenta, propiciando a mistura e promovendo a colisão e carreamento das inclusões para a escória e paredes da panela.

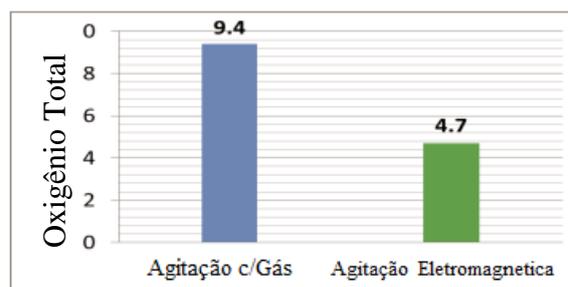
Figura 4.2 – Comparativo do número de inclusões por agitação.



Fonte: (TENG, 2017).

Verificou-se também na agitação eletromagnética que ocorre uma homogeneidade da velocidade de recirculação no topo e no fundo da panela, reduzindo zonas mortas no fundo da panela, o que favorece a mistura de desoxidantes/ligas, o que melhora a desoxidação do aço e consequente remoção de inclusões (que apresentam maiores tamanhos e por diferença de densidade flutam com mais facilidade) o que reduz os teores de oxigênio total conforme exemplificado na Figura 4.3.

Figura 4.3–Comparativo de oxigênio total por agitação.



Fonte: (TENG, 2017).

A reoxidação na agitação eletromagnética é reduzida devido ao fácil controle de agitação e pelo fato da mistura ocorrer em todo o metal, sem abertura do olho de argônio, o que evita a incorporação de gases como o oxigênio e o nitrogênio para o metal. O controle de abertura do olho de rinsagem pode ser realizado com a utilização de escórias com espessuras de até 10 cm. O controle de processo na agitação eletromagnética é mais consistente devido a estabilidade da agitação, o que assegura maior repetibilidade do processo e ganhos em qualidade, presenciados no aço.

5 - CONCLUSÕES

Apartir do tema abordado neste trabalho pode-se entender como uma inclusão não metálica surge no aço e como suas características são primordiais para entender o processo de remoção desta do metal e aderência à escória, bem como esta comporta nas etapas de refino. Ressaltou-se também como os processos de refino secundário são de primordial importância para a qualidade final do produto. A remoção de inclusões apresenta algumas peculiaridades no que se refere o mecanismo de agitação empregado nas etapas do refino secundário. Conclui-se também que escórias tem um comportamento determinante na limpidez do aço, pois sem a mesma a captura da inclusão seria impossível.

A escolha do equipamento para promover o refino deve se basear primordialmente da capacidade produtiva a ser instalada na siderúrgica bem como o capital dispendido para o equipamento. Com a agitação eletromagnética, a obtenção de aços mais limpos é possível, devido aos resultados significativos nos valores de oxigênio total, e no número de inclusões, como também a segurança operacional que este sistema oferece e baixo custo de operação. Porém o investimento financeiro é alto, se comparado ao processo de injeção pneumática.

6 -REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADABA, O.M. **Oxide Inclusion Evolution And Factors That Influence Their Size And Morphology A Dissertation**. Faculty of the Graduate School of the MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY 2019. Missouri, USA.

ARAÚJO, A.L **Manual de Siderurgia Vol. 1 e 2** São Paulo: ARTE E CIENCIA, 2005.

ASEA BROWN BOVERI, ABB. **Eletrromagnetic Stirring (LF-EMS)** Disponível em: <https://new.abb.com/metals/abb-in-metals/offering/products/metallurgy-products/electromagnetic-stirrers-and-brakes-for-steel/lf-ems-for-ladle-furnace-operation>.

Acesso em: 10 de Outubro 2022.

Associação Brasileira de Metalurgia, ABM. **Refino Secundário dos Aços**, Serie Capacitação Profissional, São Paulo, 2007.

BARCELOS, G.C., SILVA L.C. **Estudos dos Registros de Manutenção de Segmentos das Maquinas de Lingotamento Contínuo da CST**. 2005. 68 páginas. Graduação em Engenharia Mecânica. UFES Universidade Federal do Espírito Santo, Vitoria, Espírito Santo.

BARTOSIAKI, B.G. **Estudo de inclusões Não Metálicas em Aços Após a Desoxidação e Durante Tratamento em Forno Panela**. Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, ABM. 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

BETEGA, K. **Avaliação da influência de injeção de argônio sobre a ocorrência de inclusões não metálicas no refino secundário do aço ASTM A148 Grau 90-60** 2022. 90 folhas. Trabalho de conclusão de curso, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, Santa Catarina, SC.

BRAGA, B.M. **Aprimoramento de técnicas de Simulação de Fenômenos de Escoamentos do Aço para Distribuidores de Lingotamento Contínuo**. 2019. 179 folhas. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia –, UFMG Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BROILLO L.R, **Caracterização de inclusões no aço SAE 1050 Modificado**. Porto Alegre, 2009. Escola de engenharia, Departamento de Metalurgia, UFRGS.

CRUZ, R.T.; BRAGANÇA, S.R.; MATTIELO, J.; MARQUES L.R.; PELISSER G.F.; **Caracterização de Plugues Refratários Utilizados Na Homogeneização de Aço Em Aciaria** CONGRESSO ABCERAM, CONGRESSO BRASILEIRO DE CERAMICA,58. 2014, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil, ABCERAM.

DE SÁ, P.A. **Comportamento escória/Metal em panela de refino de Aço Agitada por Borbulhamento de Gás Inerte** 2015. 84 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia

metalúrgica e de Materiais) – REDEMAT –, UFOP Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

DUTRA, J.R. **Otimização da escória de refino secundário do aço silício com grão orientado**. 2018. 105 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia –, UFMG Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Estatísticas da Siderurgia Steel Statistics, INSTITUTO AÇO BRASIL. 2022, Rio de Janeiro. Disponível em: <[https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/06/Estatistica-da-Siderurgia_1o TRI 2022](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/06/Estatistica-da-Siderurgia_1o_TRI_2022)> Acesso em: 06 de 2022.

FALSETTI, L.O.Z. **Aspectos Termodinâmicos e Cinéticos do Uso de Plugues Porosos para Remoção de Partículas Cerâmicas por Bolhas Inteligentes** 2021. 118 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia –, UFSCAR Universidade São Carlos, São Carlos, SP.

FERREIRA, F.B. **Análise e Verificação de Variáveis do processo Como Causas para o Sucateamento por Macro inclusões em uma Aciaria de Aços Especiais**. Porto Alegre, 2011. Graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de engenharia Departamento de metalurgia. UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

FLECHA, R.Q **INTEGRANDO HUMANOS E DISPOSITIVOS TÉCNICOS: O caso da coordenação das atividades entre a aciaria e o lingotamento contínuo**. 2017 126 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia –, UFMG Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

GENG, D-Q.; LEI, H., JC. HE, **Numerical Simulation for Collision and Growth of Inclusions in Ladles Stirred with Different Porous Plug Configurations**, ISIJ International, 2010, p. 1597-1605.

JIA TAN, **Inclusion Changes During Reoxidation**, Carnegie Mellon University, 149 páginas. Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Materials Science and Engineering. Pittsburgh, 2017.

LEÃO, P.B.P. **Caracterização de inclusões não metálicas de aços peritéticos produzidos com diferentes técnicas de desoxidação** 2018. 171 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Centro de Tecnologia –, UFCE Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

MARCHESI, A.O. **Análise de Falhas em Lanças de Um Desgaseificador a Vácuo**. Dissertação de Especialização em Engenharia Elétrica – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica-, UTFP Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná.

MOURÃO, J.M. **Aspectos Conceituais Relativos a Pelotização de Minérios de Ferro**. 2ª edição, Vitória, Espírito Santo: ABM, 2022. 250p

MORAES, L.A.B. **Caracterização macro e micro de inclusões em aços acalmados ao Alumínio produzidos por lingotamento contínuo** 2009. 180 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica –, USP Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

NEVES, E.G. **Previsão da Limpidez do Aço A partir da Composição Química da Escória**. Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, ABM. 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

NN TRIPATHI, M. NZOTTA, A. SANDBERG & DU SICHEN (2004) **Effect of ladle age on formation of non-metallic inclusions in ladle treatment**, Ironmaking & Steelmaking, 31:3, 235-240.

OBORIN, P.A. **Influence Of Conventional And Reverse Travelling Magnetic Fields On Liquid Metal Stirring In on Asymmetric Cavity**. Institute of Continuous Media Mechanics, Russia, Perm. MAGNETOHYDRODYNAMICS. Vol. 50, No. 3, pp. 291–301, 2014.

ODENTHAL, Hans-Juergen et al. **Simulation of fluid flow and oscillation of the argon oxygen decarburization (AOD) process**. Metallurgical and Materials Transactions B, v. 41, n. 2, p. 396-413, 2010. Duesseldorf, Alemanha.

O'MALEY, R.J. **Inclusion Evolution And Removal in Ladle Refining** 2017. Materials Science e Engineering. MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY 2017. Missouri, USA.

PAL, M. **Modeling of induction stirred ladles** 2012. (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology). Estocolmo, Suécia.

PEIXOTO, H.F.F. **Injeção de Gás e Pós Reativos em Aço Líquido**. 2015. 76 folhas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola de engenharia, Universidade do Minho, Braga, Portugal.

PEREZ, J. **Inclusion Control Model in The Ladle Metallurgy Furnace** 2012. 131 pages. Thesis Degree Master of Science. Materials Science and Engineering, McMaster University. Hamilton, Ontario, Canadá.

RIZZO, E.M.S. **Introdução aos processos de refino secundário dos aços** São Paulo: ABM, 2006. 102 p.

RIZZO, E.M.S **Introdução aos processos de Lingotamento dos aços** São Paulo: ABM, 2006. 102 p.

SILVA, P.H. **Análise da remoção de inclusões do aço durante o esgotamento da panela após injeção de gás inerte através de modelamento físico**2018. 135 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia –, UFMG Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SILVA, L. A.; SHIBATA, D. **Lingotamento Contínuo**. Artigo. USP Universidade de São Paulo, Lorena, São Paulo.2013.

TENG, L.**Effect of EMS on Inclusion Removal in Ladle Furnace for Specialty Steel Production**2017.ABB Metallurgy Products, Industrial Automation, ABB AB, AISTech 2017 Proceedings.

TOLEDO, B.M. **Tratamento de degaseificação a Vácuo**. 2018. 40 folhas. Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, SP.

TRINDADE, L.C. **Estudo Sobre a Influência da Obstrução de Bicos de Injeção de Gás na Taxa de Circulação de Aço no Degaseificador RH**.2017. 82 folhas. Dissertação de mestrado em Engenharia Química, UFSJ, Universidade Federal de São Joao Del Rei, Ouro Branco, MG.

WEBLER, B.A., PISTORIUS, P.C. **A Review of Steel Processing Considerations for Oxide Cleanliness**. Metal Mater Trans B 51, 2437-2452, 2020.