

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

ANALISE DO DESEMPENHO DE UM CANAL DE VAZAMENTO
EXCÊNTRICO EM FORNO ELÉTRICO A ARCO

Leticia Gabriela Winck

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Coorientador: Professor Dr. Saulo Roca Bragança

Porto Alegre

2018

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Décio e Marilise, e à minha irmã Valeria pelo apoio e suporte incansável durante minha graduação, e por terem sido sempre meus maiores incentivadores.

Ao professor Wagner Viana Bielefeldt pela orientação e conselhos durante o desenvolvimento deste trabalho e ao longo da minha graduação.

Ao professor Saulo Bragança pela coorientação e conhecimentos transmitidos ao longo da realização deste trabalho.

Aos engenheiros Marcus Steffenon e Marcos Mattiello pela amizade, incentivo à realização deste trabalho e tempo investido para minha formação durante o período de estágio.

Aos colegas de trabalho Gustavo Frassini Pelisser e Jakson Mattiello pelo incentivo à realização deste trabalho e por toda ajuda durante o desenvolvimento deste.

À equipe do laboratório metalúrgico do TPP pela amizade e aprendizados, e em especial à Elidiane Jaques pela realização dos ensaios apresentados neste trabalho.

Aos colegas e amigos do LaSid pelo companheirismo e auxílio durante toda a graduação, e em especial ao Rodolfo Almeida pela ajuda nas simulações termodinâmicas apresentadas no trabalho.

Às minhas grandes amigas Bruna, Elisa, Kíssia, Ligia, Mariana, Tuane e Thayse por todo apoio, companheirismo e carinho em todos os momentos.

A todos que de alguma forma contribuíram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
AGRADECIMENTOS	II
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1. Pátio de Sucatas	4
2.2. Forno Elétrico a Arco	4
2.2.1. Preparação e Carregamento da Sucata e Fundentes.....	5
2.2.2. Perfuração e Fusão	6
2.2.3. Refino Oxidante	8
2.2.4. Vazamento	12
2.3. Forno-Panela.....	20
2.3.1. Escórias de Refino Secundário	20
2.3.2. Equilíbrio Químico Aço x Escória.....	22
2.3.3. Desoxidação	23
2.3.4. Rendimento dos Elementos Desoxidantes	29
2.4. Lingotamento Contínuo e Defeitos no Produto Final	30
2.5. Refratário do Canal EBT	34
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	36
3.1. Materiais	36
3.1.1. Aço Analisado.....	36
3.1.2. Ligas Adicionadas.....	36
3.2. Equipamentos Utilizados	37
3.3. Métodos	37

3.3.1.	Montagem do canal EBT	38
3.3.2.	Coleta de dados/amostras	39
3.3.3.	Análises Químicas de Aço e Escória	41
3.3.4.	Cálculo rendimentos de silício e manganês e da reversão de fósforo.	41
3.3.5.	Análises estatísticas.....	43
3.3.6.	Análise do canal EBT <i>Post Mortem</i>	44
3.3.7.	Simulação Termodinâmica	45
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Análises Estatísticas de Rendimentos e Reversão de Fósforo.....	46
4.2	Dados Coletados	50
4.2.1.	Produção, Consumos e <i>Power-Off</i>	50
4.2.2.	Temperatura de Vazamento	51
4.3.	Análise Química do Aço e Correlações com Vida de Canal	51
4.3.1.	Rendimentos e Consumos dos Elementos Desoxidantes.....	51
4.3.2.	%Mn/%Si	55
4.4.	Análise Química da Escória e Correlações com Vida de Canal	56
4.4.1.	%FeO + %MnO	56
4.4.2.	Reversão de Fósforo.....	57
4.5.	Dados Coletados e Correlações com Vida de Canal.....	59
4.6.	Análise do Refratário do Canal EBT <i>Post Mortem</i>	62
4.7.	Simulação termodinâmica.....	66
5.0	CONCLUSÕES	69
6.0	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	71
7.0	REFERÊNCIAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Rota de produção do aço considerada neste trabalho.....	3
Figura 2.2. Etapas de processamento do aço no FEA. a) carregamento da sucata e fundentes; b) fusão; c) retirada de escória; d) vazamento.....	5
Figura 2.3. Carregamento do FEA..	6
Figura 2.4. Representação da posição dos eletrodos e dos queimadores no FEA.....	8
Figura 2.5. Diagrama de Ellingham adaptado.....	9
Figura 2.6. Evolução da descarburização em função do consumo de oxigênio.....	11
Figura 2.7. Distribuição do oxigênio injetado no banho.....	12
Figura 2.8. Representação esquemática do vazamento por bica regular (esquerda) e por canal excêntrico (direita).....	13
Figura 2.9. a) escoamento vórtice; b) e escoamento dreno.....	15
Figura 2.10. Estágios da Formação de Vórtice.....	16
Figura 2.11. Velocidade de aço calculada (m /s) em corte vertical do canal. a) geometria cônica; b) geometria cilíndrica.....	17
Figura 2.12. Intensidade de turbulência relativa (%) calculada na seção transversal vertical do canal. a) geometria cônica; b) geometria cilíndrica.....	18
Figura 2.13. Arraste de escória no fim do vazamento.....	18
Figura 2.14. Diagrama binário ferro- oxigênio.....	23
Figura 2.15. Relação %C x ppm O no banho.....	25
Figura 2.16. Porcentagem de oxigênio versus porcentagem de manganês, para T= 1550, 1600 e 1700°C.....	26
Figura 2.17. Equilíbrio da desoxidação com silício e manganês a 1600°C.....	27
Figura 2.18. Teores de silício e manganês no aço em equilíbrio com sílica e silicatos de manganês em diferentes temperaturas.....	27
Figura 2.19. Relação entre %Mn/ %Si versus %O no aço para T= 1500, 1550 e 1600°C Fonte:.....	28
Figura 2.20. Relação entre oxigênio ativo e relação manganês silício de corridas ao final da etapa de refino secundário.....	29
Figura 2.21. Relação entre oxigênio ativo e rendimento de silício após desoxidação.....	30

Figura 2.22. Esquema da solidificação do aço na câmara de sprays.	31
Figura 2.23. Crescimento de dendritas na região líquido-sólida.	33
Figura 2.24. Forno elétrico a arco em corte e detalhe do canal EBT.	34
Figura 2.25. Representação esquemática da montagem das sedes e luvas.....	34
Figura 3.1. Fluxograma dos métodos utilizados.....	38
Figura 3.2. Luvas refratárias do canal EBT montadas em gabarito para inserção na carcaça.	39
Figura 3.3. Sedes refratárias montadas na carcaça com o conjunto de luvas inserido em seu orifício.	39
Figura 3.4. Ilustração da retirada de amostras de aço e escória.....	40
Figura 3.5. Retirada de amostra de aço no forno-panela.	40
Figura 3.6. Escória aderida em vara tubular durante amostragem no forno-panela.....	41
Figura 3.7. Representação das regiões de retirada de amostras para análise de composição química e fases presentes da luva externa do canal EBT.	44
Figura 4.1. Análises de normalidade dos dados de rendimentos de silício e manganês e reversão de fósforo.	46
Figura 4.2. Análises de capacidade dos dados de rendimentos de silício.	47
Figura 4.3. Análises de capacidade dos dados de rendimentos de manganês.....	48
Figura 4.4. Análises de capacidade dos dados de reversão de fósforo.	48
Figura 4.5. Análises de variância dos dados de rendimentos de silício e manganês e reversão de fósforo.....	49
Figura 4.6. Relação entre rendimento de silício e vida de canal.	52
Figura 4.7. Relação entre consumo de silício e vida de canal.	53
Figura 4.8. Relação entre rendimento de manganês e vida de canal.	54
Figura 4.9. Relação entre consumo de manganês e vida de canal.....	54
Figura 4.10. Relação entre relação %Mn/ %Si e vida de canal.....	55
Figura 4.11. Relação entre %FeO + %MnO e vida de canal.....	56
Figura 4.12. Relação entre reversão de fósforo e vida de canal.	57
Figura 4.13. Relação entre quantidade de aço produzida e vida de canal.	59
Figura 4.14. Relação entre <i>power-off</i> e vida de canal.	60
Figura 4.15. Aspecto de uma luva do canal EBT post-mortem. Fonte: Mattiello, 2016.....	61

Figura 4.16. Relação entre Temperatura de vazamento FEA – Temperatura de chegada FP e vida de canal.	62
Figura 4.17. Canal EBT; a) antes da operação; b) após operação.	63
Figura 4.18. Análise de difração de raios X para amostra retirada na parte externa da sede externa do refratário do canal EBT.....	64
Figura 4.19. Análise de difração de raios X para amostra retirada na parte interna da sede externa do refratário do canal EBT.....	65
Figura 4.20. Simulação termodinâmica da escória do FEA.	66
Figura 4.21. Simulação termodinâmica da escória do FP.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Principais óxidos encontrados em escórias. Fonte: Almeida, 2016.....	21
Tabela 3.1. Composição química do aço analisado, em porcentagem em massa.....	36
Tabela 4.1. Média e desvio padrão de elementos desoxidantes, produção total e power-off das corridas consideradas para os cálculos de rendimentos de silício e manganês e reversão de fósforo.....	50
Tabela 4.2 Média e desvio padrão das temperaturas de vazamento no FEA e chegada no FP das corridas consideradas para os cálculos de rendimentos de silício e manganês e reversão de fósforo.....	51
Tabela 4.3. Análises químicas das amostras de refratário do canal EBT, em porcentagem em massa.	64
Tabela 4.4. Composição química da fase líquida da escória do FEA, em porcentagem em massa.	67
Tabela 4.5. Composição da fase líquida da escória do FP, em porcentagem em massa.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ASTM – American Society for Testing and Materials

atm – Atmosfera

CO – Monóxido de carbono

EBT – Canal de vazamento excêntrico

FEA – Forno Elétrico a Arco

FP – Forno-Panela

LC – Lingotamento Contínuo

Ototal – Oxigênio Total

ppm – partes por milhão

SAE – Society of Automotive Engineers

SiC – Carbetto de Silício

RESUMO

O uso de canal excêntrico, EBT, no vazamento do aço líquido do forno elétrico a arco para a panela trouxe muitos benefícios ao processo, e entre eles, a redução da passagem de escória durante o vazamento do aço líquido para a panela siderúrgica. Entretanto, a passagem de escória ainda ocorre e parece ser dependente da geometria do canal, bem como da sua vida útil, sendo este um fator crítico na qualidade do produto final. Nesse trabalho, avaliou-se o desempenho de um canal EBT cilíndrico na produção de um aço baixo carbono na usina Gerdau Riograndense. Os objetivos específicos deste trabalho foram caracterizar a passagem de escória em um canal EBT cilíndrico com relação ao consumo e rendimentos de elementos desoxidantes e reversão de fósforo ao banho, e caracterizar o refratário do canal *post mortem* para entendimento de como o desgaste do canal influencia a passagem de escória. Para atingir estes objetivos, amostras de aço e escória foram retiradas nas etapas do processo de produção de um aço semelhante ao aço SAE 1023. As amostras de aço tiveram sua composição química determinada por espectrometria de emissão óptica e de escórias via fluorescência de raios X. Baseando-se nisso, pôde-se avaliar de que forma os rendimentos de elementos desoxidantes, a reversão de fósforo no forno-panela e oxidação da escória variam de acordo com a vida do canal. Além disso, realizou-se a caracterização do refratário do canal de vazamento após operação com relação à composição química via fluorescência de raios X e fases presentes via difratometria de raios X. Para avaliação da influência da escória no desgaste, realizaram-se simulações termodinâmicas utilizando-se o *software FactSage*, versão 6.3. Os resultados mostraram que existe uma vida ótima de canal EBT, na qual ocorre o maior rendimento de silício, o menor consumo de silício e a menor reversão de fósforo, evidenciando uma menor passagem de escória nesta condição.

ABSTRACT

The use of eccentric bottom tapping, EBT, channel in the tapping of liquid steel from the electric arc furnace (EAF) to the ladle brought many benefits to the process, among them, the reduction of slag passage during the tap. However, slag passage still occurs, and seems to be deeply related on the geometry of the channel and its life, this being a critical factor in the quality of the final product. On this work, was analyzed the performance of a cylindrical EBT channel in the production of a low carbon steel at Gerdau Riograndense mill. The specific objectives of this work are to characterize the slag passage in a cylindrical EBT channel associated to the consumption and yield of deoxidizing elements and phosphorus reversion, and to characterize the *post mortem* channel refractory to understand how the wear of the channel influence in the slag passage. For that, steel and slag samples were taken from various stages of the production process of SAE 1023 steel. The steel samples were analyzed by optical emission spectrometry and slag samples through X-ray fluorescence. Based on the results, it was possible to evaluate how deoxidants efficiency, phosphorus reversion in the ladle-furnace, and oxidation of slag change with the increase of the channel life. Furthermore, a characterization of the tapping channel refractory after the operation, related to chemical composition, by X-ray fluorescence, and phases, by X-ray diffraction. To evaluate the influence of the refractory degradation, thermodynamic simulations were performed using FactSage software, version 6.3. The results showed there is an optimum life of the EBT channel, which occurs the highest silicon yield, the lowest silicon intake and lower phosphorus reversion, evidencing a lower slag passage in this condition.

1.0 INTRODUÇÃO

Na maioria dos fornos elétricos a arco para a produção de aços, o vazamento do aço líquido para a panela é feito através de canal excêntrico, conhecido como EBT (Eccentric Bottom Tapping). Esse canal é constituído por luvas refratárias de magnésia-carbono, montadas em camadas, formando um canal que permite o fluxo de aço.

Algumas das vantagens do uso do canal EBT são: a redução da passagem de escória do forno para a panela, possibilidade de manter uma quantidade de aço no forno (fundo úmido), que auxilia na fusão da carga metálica, e maior segurança operacional. Além disso, o vazamento com canal EBT diminui o *pick-up* de nitrogênio, e o tempo de vazamento é menor, diminuindo o *power-off* e a perda de temperatura do aço pelo menor tempo de exposição à atmosfera sem proteção térmica da escória.

A redução da passagem de escória para a panela é fundamental para a qualidade do produto final, pois a escória de refino primário possui altos teores de óxidos de ferro e fósforo, o que causa reversão de fósforo da escória para o banho metálico. A passagem de escória também pode favorecer a formação de porosidades internas (*pin* e *blow-holes*) devido à alta quantidade de oxigênio dissolvido. A presença de porosidades em tarugos é bastante deletéria, visto que estas servem como nucleadores de trincas e concentradores de tensões, prejudicando etapas posteriores de conformação do material.

O aumento do consumo de desoxidantes e de refratário do canal de vazamento e da panela, juntamente com a diminuição do rendimento de agentes desoxidantes, também são consequências da passagem de escória. Além de diminuir a qualidade do produto final, elevam o custo do aço. Para aços desoxidados com manganês e silício, o rendimento de silício é um indicador do nível de oxidação do aço.

Este trabalho tem por objetivo analisar o desempenho de um canal EBT cilíndrico em uma aciaria elétrica de aços longos. Para isso, foram levados em conta os rendimentos de desoxidantes, a reversão de fósforo no forno-panela e a oxidação da escória. Além disso, caracterizou-se o refratário do canal após operação quanto ao desgaste, composição química

e fases presentes. Por último, para avaliação da influência da escória no desgaste, realizaram-se simulações termodinâmicas.

2.0 REVISÃO DA LITERATURA

A produção de aço pode ser feita através de dois grandes processos de fabricação: usinas integradas com conversores a oxigênio e usinas semi-integradas com forno elétrico a arco. Nas usinas integradas, o aço é obtido a partir do minério de ferro, que é reduzido a ferro-gusa no alto-forno e transformado em aço nos convertedores. Nas usinas semi-integradas, a produção é feita a partir de sucata metálica e não há a etapa de redução do minério. A produção inicia-se com o recebimento da sucata no pátio de sucatas, que é fundida em forno elétrico a arco e então se realiza o ajuste da composição química em forno-panela, findando a produção no lingotamento, conforme figura 2.1. (MOURÃO, 2007).

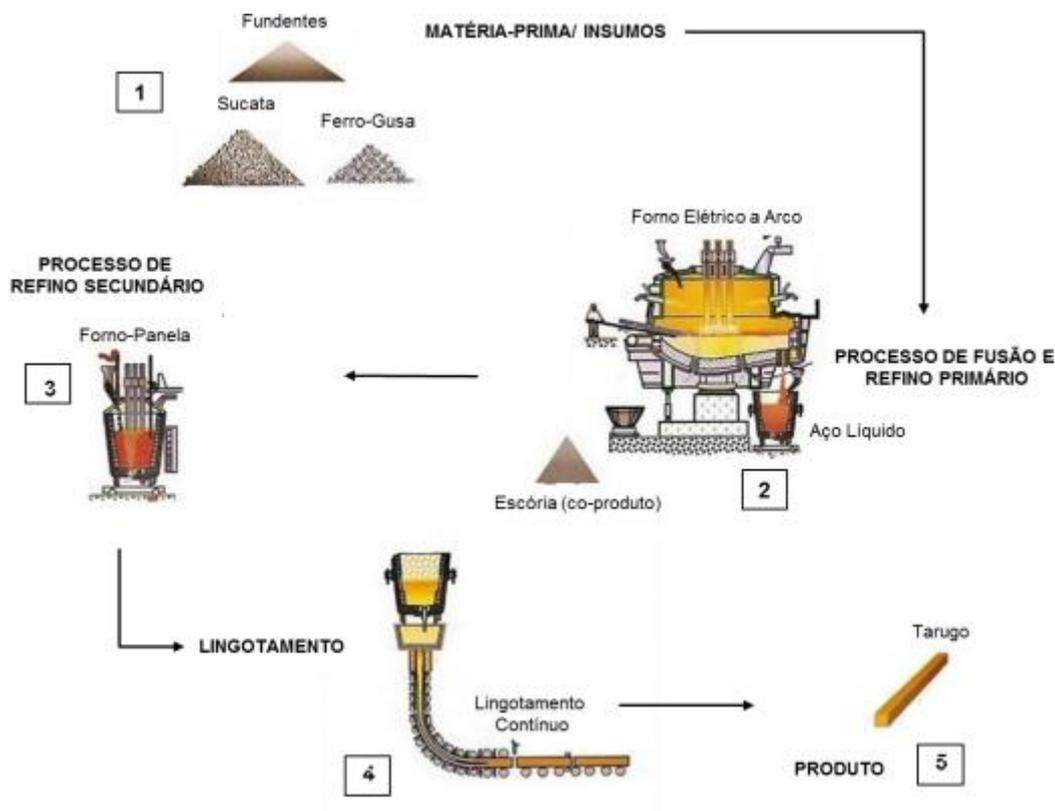


Figura 2.1. Rota de produção do aço considerada neste trabalho. Fonte: adaptado de Vieira, 2017.

2.1. Pátio de Sucatas

O pátio de sucatas é o local responsável pelo recebimento, classificação, processamento e disposição adequada das sucatas ferrosas e demais insumos que são utilizados para a produção do aço, além da confecção do cestão, que abastece o forno elétrico a arco.

A sucata é classificada de acordo com sua origem em três classes principais, a saber: retorno interno, industrial e obsolescência, e é processada de acordo com suas características, como densidade aparente, presença de impurezas e elementos residuais e composição química. O controle das matérias-primas a serem utilizadas no forno é essencial para que a qualidade do aço produzido seja garantida.

O processamento de sucatas, no que diz respeito à adequação de tamanho e densidade e no grau de limpeza, pode ser realizado no próprio pátio de sucatas. Para isso, podem ser utilizados equipamentos como prensas tesoura, prensas pacote, separadores magnéticos, tesouras móveis, oxicorte e Shredder. A sucata processada é armazenada em vãos para ser utilizada na confecção do cestão (MOURÃO, 2007).

2.2. Forno Elétrico a Arco

No forno elétrico a arco ocorre a fusão e o refino da carga do cestão. O forno é composto por uma carcaça metálica coberta por uma abóboda e é revestido internamente por material refratário.

A operação de um forno elétrico a arco compreende basicamente quatro etapas: carregamento da sucata e fundentes, fusão, refino oxidante (descarburização e desfosforação), retirada de escória e vazamento (ARAUJO, 2005), conforme a figura 2.2.

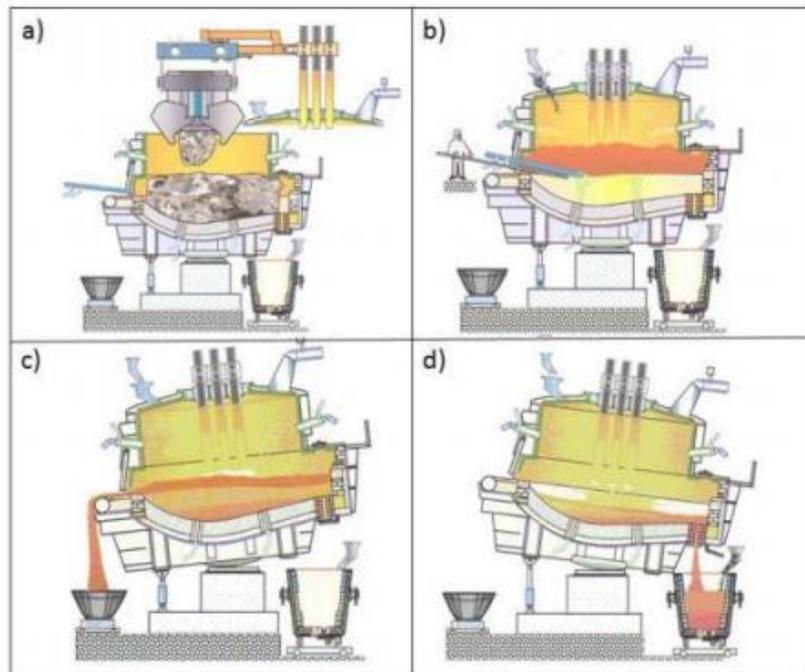


Figura 2.2. Etapas de processamento do aço no FEA. a) carregamento da sucata e fundentes; b) fusão; c) retirada de escória; d) vazamento. Fonte: Rizzo, 2006.

Após o carregamento da carga, a abóbada do forno é fechada e os eletrodos de grafita são baixados, por onde uma corrente elétrica, contínua ou alternada, é conduzida. Dentro do forno se estabelece um arco elétrico entre os eletrodos e a carga metálica, promovendo a fusão da carga.

As condições oxidantes, para que ocorram as reações de refino, são obtidas com a injeção de oxigênio no forno. Como a maioria das reações de refino são exotérmicas, ocorre também um fornecimento de energia química ao banho (ROSSI, 2014). Os produtos dessas reações são captados pela escória, que é retirada pela porta do forno, ou formam gases e poeiras, captados pelo sistema de despoejamento.

2.2.1. Preparação e Carregamento da Sucata e Fundentes

A preparação do cestão é uma operação muito importante para proporcionar boas condições de fusão da carga e maior segurança operacional, além de reduzir os custos no FEA. Segundo Rossi (2014), a sucata deve ser estratificada dentro do cestão de acordo com

sua densidade e tamanho, para promover uma fusão rápida no centro do forno enquanto protege os painéis e abóboda da irradiação do arco elétrico.

O cestão é preparado com sucata leve na parte inferior para servir como “colchão” para as sucatas pesadas e proteger o refratário e painéis do forno. Acima dessa camada são colocadas sucatas pesadas. Estas possuem baixa taxa de fusão, mas com a rápida fusão da sucata leve, logo entram em contato com o fundo úmido do forno, aumentando sua taxa de fusão e a eficiência do FEA. Na terceira camada do cestão são colocados os carburantes e o ferro-gusa, e acima destes são colocadas sucatas leves e pacotes. A última camada é composta de sucata leve, para facilitar a penetração dos eletrodos durante a perfuração. Os fundentes são carregados acima da sucata leve da camada de base do cestão, com o objetivo de que estas cheguem rapidamente ao fundo úmido e se dissolvam.

A operação de carregamento é realizada com o forno desligado eletricamente e com a abóboda aberta, conforme figura 2.3, sendo uma operação com alta perda energética e de produtividade. O carregamento do forno deve ser feito de forma mais rápida possível para que as perdas térmicas sejam mínimas. Como na etapa anterior ao carregamento o forno está em temperatura máxima, quanto mais cedo o forno for carregado, mais calor este transmite para a carga (GERDAU, 2012). A figura 2.3 mostra o carregamento de um forno elétrico a arco.



Figura 2.3. Carregamento do FEA. Fonte: Gerdau, 2012.

2.2.2. Perfuração e Fusão

A etapa de perfuração dos eletrodos inicia-se quando o arco elétrico é aberto. Nesta etapa, o ruído do forno é intenso, devido à instabilidade do arco. Por isso, o processo é

realizado com potência mais baixa e arco curto, com a movimentação dos eletrodos no sentido vertical, através das colunas de sustentação, visando diminuir a instabilidade do arco (JOHN, 2009).

A fusão da carga é a etapa da corrida que mais consome energia elétrica. O consumo depende, entre outros fatores secundários, da potência do transformador, da qualidade da carga e do revestimento das paredes do forno.

A fusão inicia-se após a completa penetração dos eletrodos. Nos primeiros instantes, o calor gerado pelo arco elétrico entre os eletrodos e a sucata funde somente a sucata que está em contato direto com o eletrodo. A voltagem é reduzida e o arco elétrico é curto, visando à formação de um fluxo de calor vertical que se propaga na sucata, e esta protege as paredes do forno da radiação. Assim, cada eletrodo forma uma poça de aço líquido ao seu redor, que aumenta gradativamente após a aplicação de máxima voltagem e baixa corrente. Isto resulta em um arco longo e fluxo de calor horizontal que acelera a fusão da carga e permite a formação de uma poça única de metal fundido. Nesse momento, diminui-se a tensão para que o arco não danifique a soleira do forno, visto que não há mais sucata protegendo-a da irradiação de calor. Quando a poça única se forma o forno está preparado para acomodar outro carregamento do cestão (RIZZO, 2006).

Além da diminuição da tensão no final da fusão, outro método utilizado para proteção das paredes e abóboda do forno no que diz respeito à irradiação de calor é a formação de uma escória espumante. A escória espumante envolve o arco elétrico, o que diminui a transferência de calor do arco, e reduz a flutuação de corrente e voltagem, diminuindo o ruído produzido pelo arco elétrico. Segundo Rizzo (2006), o principal benefício da escória espumante é a possibilidade de reter uma grande quantidade de energia, que pode ser revertida ao banho, aumentando a eficiência energética.

A operação no FEA demanda uma fusão homogênea da carga. Na prática, o emprego de energia elétrica via eletrodos gera pontos frios e pontos quentes no forno durante a operação de fusão. Para suprir a limitação energética no FEA, energia química é direcionada aos pontos frios, visando uma maior homogeneidade térmica no forno.

A energia química é empregada com o uso de um aparato que pode ser utilizado como queimador (oxigênio e gás combustível) e como lança de injeção (oxigênio puro ou oxigênio + carbono). Os queimadores permitem o aproveitamento dos gases gerados no próprio

processo de fusão, fornecendo energia das reações exotérmicas dos constituintes dos gases (GERDAU, 2012). A injeção de gases também auxilia no corte da sucata localizada próxima a porta de escória, facilitando a retirada desta durante a operação. A figura 2.4 mostra um esquema da posição dos queimadores no forno.

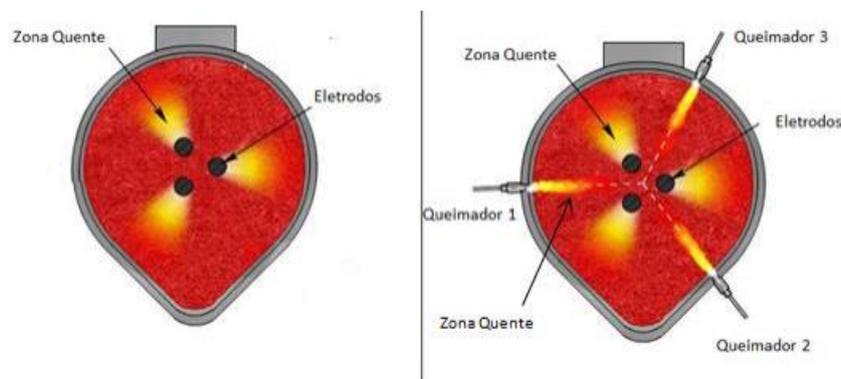


Figura 2.4. Representação da posição dos eletrodos e dos queimadores no FEA. Fonte: Vieira, 2014.

Nesta etapa também ocorre a injeção de carbono no forno para a geração de CO, que contribui para a formação da escória espumante e também evita a formação de FeO. A formação de FeO deve ser controlada, pois afeta o rendimento metálico do forno e a desfosforação, que será discutida no próximo item.

No momento em que toda a sucata está fundida e se atinge o banho plano, a corrida está pronta para passar para a etapa de refino oxidante.

2.2.3. Refino Oxidante

Na etapa de refino oxidante ocorre a adequação dos teores de fósforo e carbono de vazamento objetivado e aquecimento do banho até a temperatura de vazamento. No refino, alguns elementos presentes no banho são oxidados e incorporados à escória. Segundo Rizzo (2006), as reações químicas necessárias para a redução dos teores de fósforo e carbono dependem do teor de oxigênio presente, da homogeneização do banho, da interação entre metal e escória e da variação de temperatura do banho.

Desfosforação

É conhecido que o fósforo estabiliza a fase CCC do ferro, dissolvendo-se na ferrita, endurecendo o aço por solução sólida. Também, é muito suscetível à segregação para o contorno de grão e forma diversos fosfetos com o ferro. Pode causar, em aços de alto carbono, a redução da resistência ao choque ou redução da tenacidade. Essa influência é proporcional à quantidade de carbono no aço, ou seja, quanto maior o percentual de carbono, mais deletério é o efeito do fósforo. Por outro lado, nos aços baixo carbono, ele pode ser benéfico, pelo fato de aumentar a dureza e a resistência à tração (CHIAVERINI, 2008).

Geralmente, a origem do fósforo está no ferro-gusa. Como o minério de ferro contém fósforo e os óxidos deste elemento possuem estabilidade relativamente baixa, no alto-forno ocorre a redução dos mesmos, que se incorporam ao ferro-gusa.

Conforme o esquema da figura 2.5, a estabilidade do óxido de fósforo P_2O_5 é maior que a estabilidade do óxido de ferro FeO somente em temperaturas menores que $1000^\circ C$. Nas condições oxidantes do FEA não é possível a remoção de fósforo pela oxidação deste elemento, visto que o produto formado P_2O_5 não é estável.

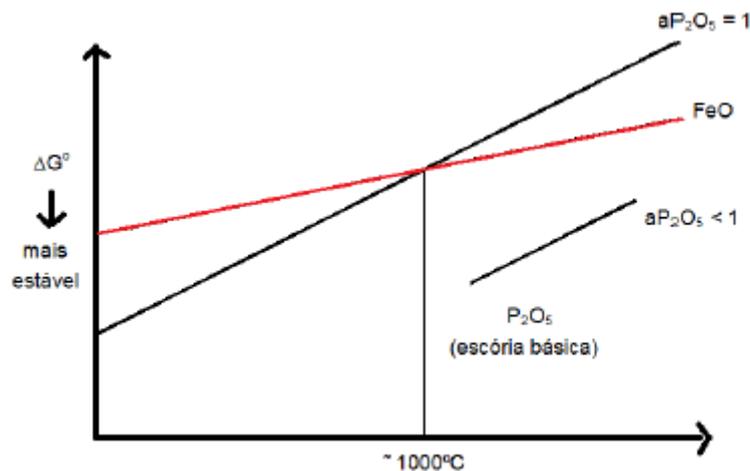
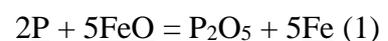


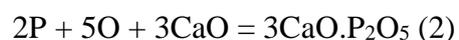
Figura 2.5. Diagrama de Ellingham adaptado. Fonte: Notas de Aula Siderurgia II, 2016.

A desfosforação inicia-se através da reação do fósforo com o óxido de ferro, formando P_2O_5 e liberando ferro para o banho, vide reação 1.



A reação (1) é altamente exotérmica e tende a ocorrer no início do refino, quando o banho possui baixa temperatura e elevado teor de FeO na escória. A reação predomina na sequência do processo quando é observado uma diminuição do teor de ferro da escória e aumento da temperatura (RIZZO, 2006).

Entretanto, em temperaturas próximas a 1600°C, devido a reatividade muito alta do composto P₂O₅, a reação 1 ocorre também em sentido contrário (redução do fósforo). Isto causa uma interrupção na desfosforação ou mesmo um aumento no teor do fósforo no banho. Para evitar a reversão de fósforo é adicionado cal no carregamento do forno, que irá fixar o P₂O₅ na forma de 3CaO.P₂O₅, conforme reação 2.

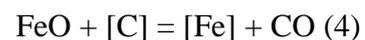
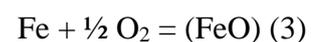


Além de ser necessário o contato com a escória, é requerida uma boa interação entre a escória e o aço: uma escória favorável à desfosforação deve ser fluída o bastante para permitir que as reações ocorram na interface aço-escória. Além disso, outro fator importante é a cinética do processo. O aumento da velocidade do transporte de massa através da agitação da escória favorece a reação de retirada de fósforo do banho.

A temperatura também influencia na desfosforação. Se a temperatura for baixa, a remoção do fósforo é favorecida. Como na descarbonização a temperatura aumenta, a desfosforação é desfavorecida. Para evitar a reversão de fósforo da escória para o banho adota-se a prática de retirar parte da escória do FEA durante o processo, eliminando-se boa parte do 3CaO.P₂O₅ presente.

Descarbonização

As reações que ocorrem durante a retirada de carbono do banho são apresentadas nas equações 3 e 4 a seguir.



Estas reações se iniciam quando o banho atinge a temperatura de 1550°C e a reação (3) é cineticamente mais rápida que a reação (4) (GERDAU, 2012).

Quando o teor de carbono no banho é muito alto, a velocidade de descarburização pode ser limitada pela quantidade de oxigênio disponível. Já para baixos teores de carbono no banho, a velocidade de descarburização é limitada pela transferência de carbono no banho.

A figura 2.6 apresenta a relação entre porcentagem de carbono no banho e consumo de oxigênio.

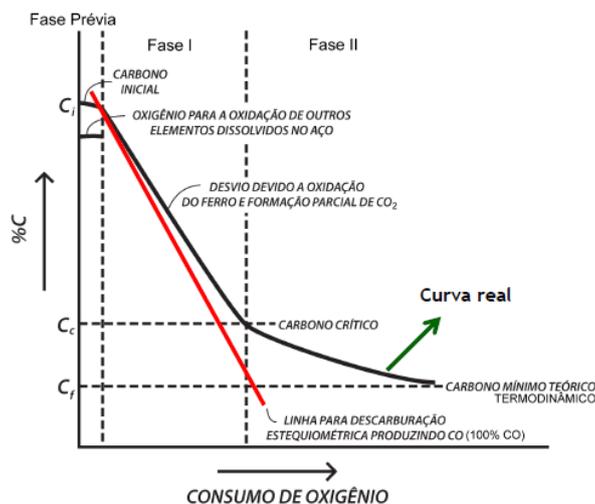


Figura 2.6. Evolução da descarburização em função do consumo de oxigênio. Fonte: Notas de Aula Siderurgia II, 2016.

No início do refino, o teor de carbono é alto e o oxigênio é consumido nas reações de oxidação outros elementos dissolvidos no banho preferencialmente ao carbono. Apesar de baixa, a taxa de descarburização é crescente. Esta fase é conhecida como fase prévia, e pode servir como fornecedora de energia química ao banho, visto que as reações de oxidação são exotérmicas.

A fase 1 da retirada de carbono tem como característica principal a alta taxa de descarburização, que é função da quantidade de oxigênio presente no banho.

A última fase, chamada fase 2, é aquela em que a taxa de descarburização é controlada pela difusão do carbono, sendo, portanto, independente do suprimento de oxigênio.

O oxigênio existente no banho é distribuído em três parcelas: oxigênio que reage na descarburização, oxigênio que reage para formar FeO e oxigênio dissolvido no banho (GERDAU, 2012). A figura 2.7 mostra que, quanto menor o teor de carbono que se deseja atingir no banho, menor é a eficiência da descarburização.

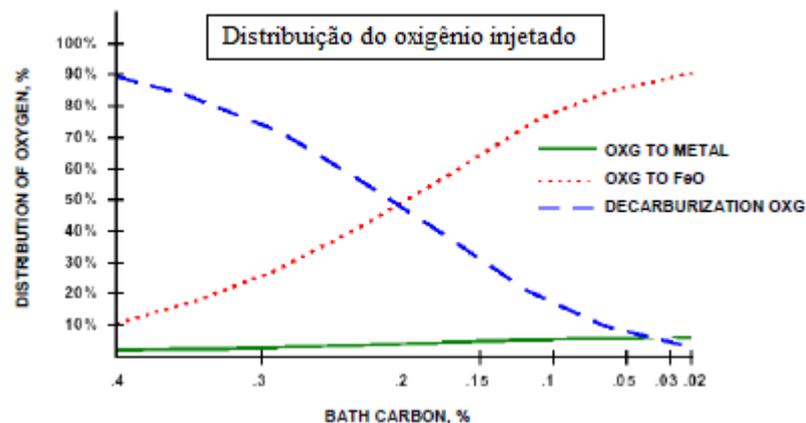


Figura 2.7. Distribuição do oxigênio injetado no banho. Fonte: Gerdau, 2012.

A injeção de oxigênio no aço líquido que ocorre durante a etapa de refino promove reações de oxidação do ferro e do carbono, com formação de FeO e liberação intensa de CO, fornecendo energia química. Já o carbono injetado na escória reage com o FeO, produzindo bolhas de gás CO. Estas bolhas promovem a formação da escória espumante, e devem ser pequenas e bem distribuídas para gerarem melhores resultados de espumação. Para uma espumação ainda mais efetiva é comum a injeção simultânea de carbono e oxigênio na escória.

Alguns dos benefícios da escória espumante são:

- Melhor transferência de energia para o banho;
- Proteção dos refratários do forno;
- Redução do ruído provocado pelo arco elétrico;
- Diminuição da perda de calor para as paredes do forno;
- Diminuição da incorporação de nitrogênio pelo banho.

2.2.4. Vazamento

Após atingir a temperatura ideal e os teores de carbono e fósforo objetivados, o aço é vazado em uma panela. O vazamento pode ser feito através de bica regular ou vazamento por canal excêntrico (EBT), conforme figura 2.8.

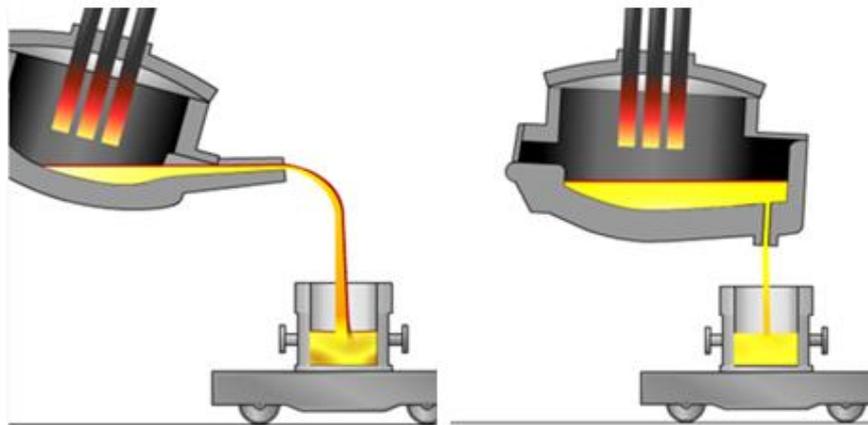


Figura 2.8. Representação esquemática do vazamento por bica regular (esquerda) e por canal excêntrico (direita). Fonte: Steel University, 2017.

No vazamento, é muito importante que seja controlada a passagem de escória do forno para a panela, pois esta, apesar de proteger o banho da absorção de gases e da perda térmica, contém teores muito elevados de FeO e P_2O_5 , podendo causar reversão de fósforo, além de elevar o consumo de desoxidantes e do refratário da panela. A passagem de escória também pode favorecer a formação de porosidades internas (pin e blow-holes) nos tarugos devido à alta quantidade de oxigênio dissolvido, que forma CO durante a solidificação do aço.

É importante salientar que a passagem de uma quantidade controlada de escória é fundamental para o processo de refino secundário, não apenas do ponto de vista de custos, pelo rendimento de ligas, pela interrupção do fluxo de produção e pela perda de aço na operação de remoção de escória, como também do ponto de vista da qualidade do produto (GERDAU, 2012).

A técnica mais usada para reduzir a passagem de escória é o vazamento por canal EBT. Algumas das vantagens do uso do canal EBT são a minimização da passagem de escória para a panela, aumento do volume útil do forno, aumento da superfície refrigerada das paredes do forno e conseqüente menor consumo de refratário, diminuição do *power-off*, aumento da produção, diminuição do *pick-up* de nitrogênio, possibilidade de manter o fundo úmido e maior segurança operacional.

Existem equipamentos que fazem a monitoração da passagem de escória e que podem controlar automaticamente o vazamento. Entretanto, mesmo com o uso destes equipamentos,

é necessário que algumas variáveis do FEA sejam controladas, como: manutenção do perfil original do forno; manutenção de um fundo úmido razoavelmente constante e manutenção do diâmetro das luvas do EBT dentro de limites conhecidos (GERDAU, 2012).

Durante o vazamento do aço do forno para a panela é comum a adição de ligas para o início do ajuste da composição química e para a desoxidação. Além das ligas, são adicionados fluxantes e formadores de escória sintética.

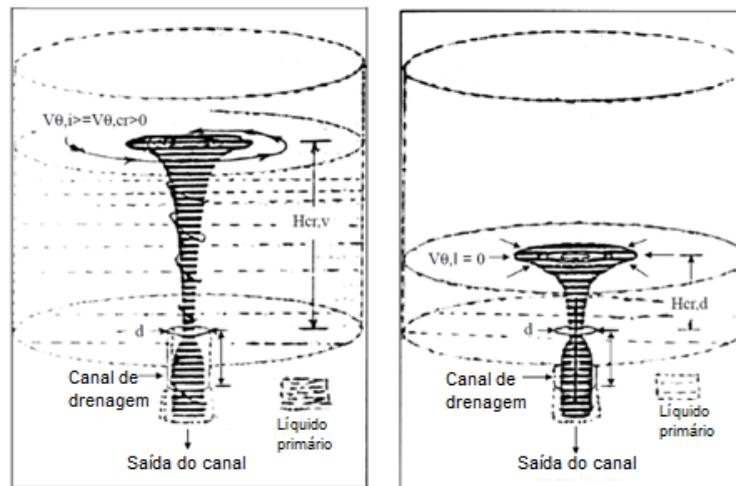
Uma prática muito comum é deixar uma quantidade de aço e escória remanescentes no fundo do forno, o fundo úmido, intencionalmente. Segundo John (2009), algumas vantagens do fundo úmido são: aceleração da oxidação do carbono; aceleração da desfosforação; aceleração da taxa de dissolução das cales e proteção da soleira do forno contra o impacto da sucata durante o carregamento e da irradiação do arco durante a fusão.

Após o vazamento, o canal EBT é preenchido por areia refratária cuja composição química é geralmente $MgO-SiO_2$. O sistema que mantém a areia no interior do canal é denominado de mecanismo de fechamento do canal, mais conhecido como raquete devido à forma da peça. Esse mecanismo pode se estender e retrair em um movimento linear ou rotacional para o lado.

O fluxo de saída do aço pelo canal EBT pode ser determinante no que diz respeito a passagem de escória, como será discutido no próximo item.

Escoamento no Canal EBT

De acordo com Ghosh (2001), o arraste de escória no vazamento de aço em canal EBT pode ocorrer em um escoamento tipo vórtice (para fluxo rotacional) e/ou em um escoamento tipo dreno (para fluxo irrotacional), conforme figura 2.9.



a) b)

Figura 2.9. a) Escoamento vórtice; b) e escoamento dreno. Fonte: Ghosh, 2001.

Na figura 2.9.a se pode observar que a altura crítica para formação de vórtice ($H_{cr,v}$) pode ser várias vezes maior que o diâmetro do orifício de saída (d). A figura 2.9 ilustra ainda que é necessário uma velocidade tangencial do líquido ($V_{\theta,i}$) maior que uma velocidade tangencial crítica ($V_{\theta,cr}$) para que o redemoinho se inicie e que posteriormente o vórtice se desenvolva completamente. O fluido sobrenadante tende a ser arrastado para a direção do orifício de saída em formato de espiral-hélice (SATO, 2007).

A figura 2.9.b mostra a altura crítica ($H_{cr,d}$) na qual o fluido sobrenadante é arrastado para o orifício de saída. Neste caso, o líquido não apresenta movimento rotacional e, normalmente, a altura crítica é da ordem do diâmetro do orifício de saída. Para este modo de escoamento, o fluido sobrenadante tende a ser arrastado para a saída sem movimento rotacional.

Sato (2007) relata que a formação do escoamento vórtice pode ser explicada em quatro estágios:

- Líquido está em nível alto e/ ou velocidade tangencial residual é baixa, apenas um pequeno redemoinho é formado na superfície.
- Nível do líquido decresce ou velocidade tangencial residual aumenta, redemoinho tende a se estender na direção do orifício de saída, formando vórtice na superfície.

- c) Vórtice formado na superfície tende a aumentar, apresentando maior velocidade tangencial próximo ao orifício de saída.
- d) Vórtice se desenvolve completamente e arrasta o fluído sobrenadante.

Uma representação dos estágios da formação de vórtice pode ser observada na figura 2.10.

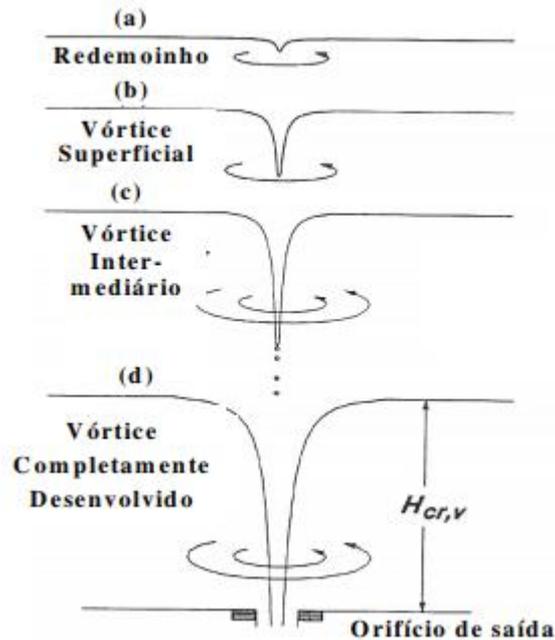


Figura 2.10. Estágios da Formação de Vórtice. Fonte: adaptado de Sato, 2007.

Kirsten et al (2008), simularam numericamente o escoamento de aço em canal EBT para duas geometrias distintas, cilíndrica e cônica. As distribuições de velocidade calculadas em seção transversal vertical através de canal de vazamento cônico e cilíndrico são mostradas na figura 2.11.

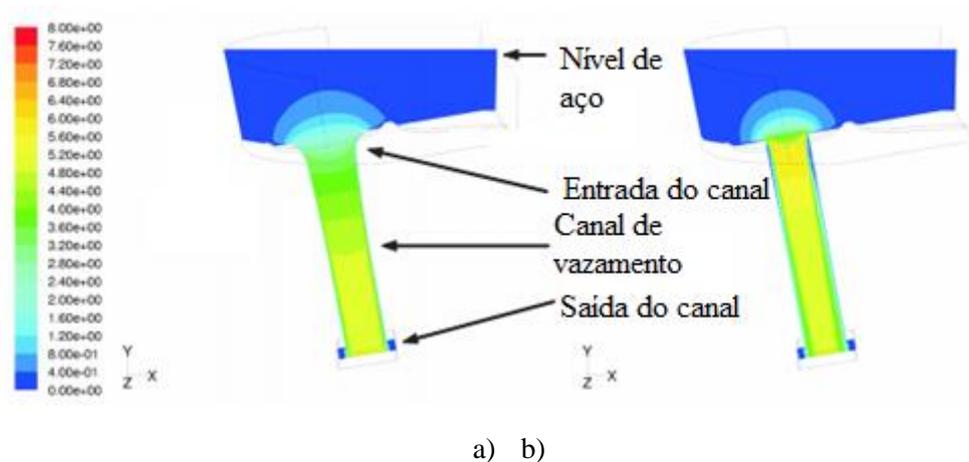


Figura 2.11. Velocidade de aço calculada (m/s) em corte vertical do canal. a) geometria cônica; b) geometria cilíndrica. Fonte: Kirsten et al, 2008.

Segundo os mesmos autores, para a geometria cilíndrica, a entrada de aço “aguda” causa uma separação do fluído na parede do canal, perto do orifício de entrada, e ocorre um preenchimento da zona de recirculação por uma fase gasosa. O que ocorre, de fato é a diminuição do diâmetro efetivo do canal para essa geometria. No entanto, usando o design cônico, a zona de separação de líquido de aço é completamente evitada.

Os autores ainda calcularam também a turbulência nas duas geometrias, como pode ser observado na figura 2.12. A região de separação de fluído da parede do canal com a geometria cilíndrica gera turbulência do fluxo de aço perto da parede do canal. Tanto a intensidade quanto o volume da região de fluxo turbulento foram maiores para as geometrias cilíndricas. Na saída do canal cilíndrico, a região de fluxo turbulento cobre aproximadamente metade do diâmetro, aumentando a transferência de massa e o potencial de erosão do refratário.

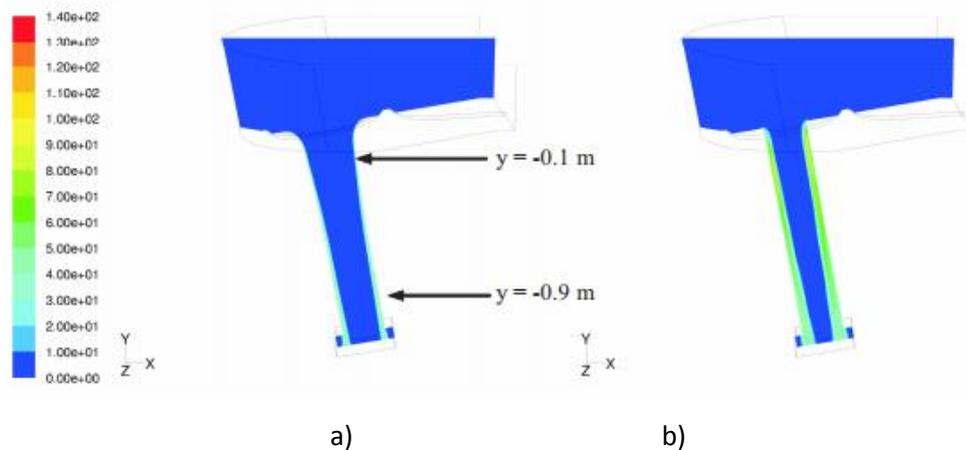


Figura 2.12. Intensidade de turbulência relativa (%) calculada na seção transversal vertical do canal. a) geometria cônica; b) geometria cilíndrica. Fonte: adaptado de Kirsten et al (2008).

Por fim, os mesmos autores avaliaram o arraste de escória em canal cilíndrico, como pode ser visto na figura 2.13.

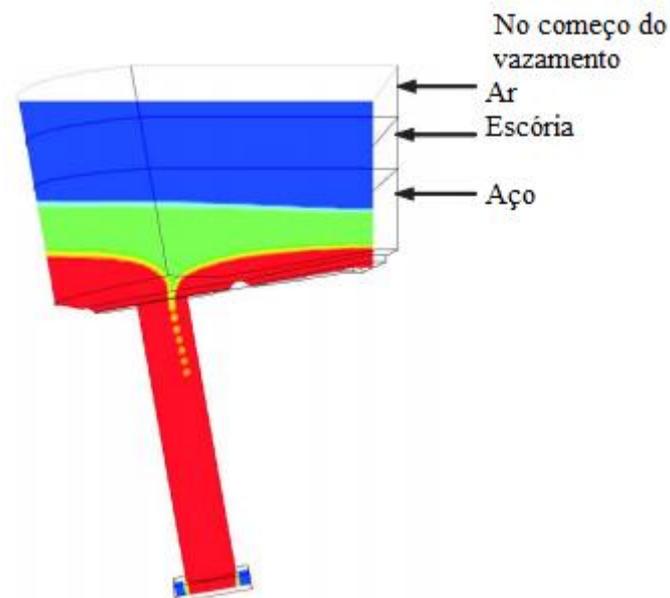


Figura 2.13. Arraste de escória no fim do vazamento. Fonte: adaptado de Kirsten et al (2008).

Conforme os autores, a uma certa altura de aço acima do orifício do canal a taxa de fluxo de massa no canal é maior do que a taxa de fluxo de massa que vai para a entrada do canal. Como resultado, a superfície do aço líquido é pressionada acima da entrada do canal.

Assim, o arraste de escória no canal de vazamento aumenta com o aumento do fluxo de massa no canal, ou seja, com o aumento do diâmetro do canal.

A partir da figura 2.11 se pode observar que para geometria de canal cilíndrica a velocidade de escoamento é praticamente constante. Já a figura 2.13 mostra o arraste de escória em canal cilíndrico. Para geometrias cônicas, a velocidade de escoamento no topo do canal é menor que nas demais regiões. Neste caso, não ocorre emulsificação da escória, o que diminui a quantidade passante para a panela.

Reações que Ocorrem Durante o Vazamento

Durante o vazamento, há uma entrada de bolhas de ar pelo canal EBT para o aço. Segundo Turkdogan (1996), a quantidade de ar arrastada para o aço aumenta com o aumento da altura de queda do aço do canal EBT para a panela. O arraste de ar pode causar problemas como o *pick-up* de nitrogênio e o *pick-up* de hidrogênio.

Outra reação que pode ocorrer durante o vazamento do aço caso haja passagem excessiva de escória é a reversão de fósforo. Segundo Kor (1998), a passagem de escória do forno elétrico para a panela ocasiona reversão de fósforo ao banho, especialmente quando o aço está totalmente desoxidado. A relação geral para o aumento do teor de fósforo no banho como resultado da passagem de escória é dada pela equação [1]:

$$\Delta[\%P] = (\%P) (W_{\text{fea}} - W_{\text{fp}}) \quad [1]$$

Onde W_{fea} e W_{fp} são as massas de escória de forno passante e massa da escória da panela, no refino secundário. Mesmo quando todas as medidas de precaução são tomadas, a quantidade de escória que passa do forno para a panela é, aproximadamente, 1% do aço vazado.

Ainda de acordo com Kor (1998), estudos observaram que a reversão de fósforo é mais provável quando a basicidade binária da escória passante é aproximadamente 2 ou inferior a esse valor, e seu teor de óxido de ferro é aproximadamente 17% ou menor. Para os teores de óxido de ferro de aproximadamente 25% ou mais, a reversão do fósforo é visivelmente menor, desde que a basicidade da escória seja maior que 2.

Como citado anteriormente, o fósforo é um elemento muito suscetível à segregação para o contorno de grão, atuando como endurecedor por solução sólida e reduzindo

propriedades como ductilidade e tenacidade, tornando o aço frágil à deformação a frio. Em aciarias de aços longos, o fósforo somente pode ser retirado do banho na etapa de refino oxidante, no forno elétrico a arco. A única forma de se evitar o aumento do teor de fósforo no forno panela, portanto, é evitando-se a reversão desse elemento da escória para o banho.

2.3. Forno-Panela

No forno-panela ocorre a etapa de refino secundário, também conhecida como metalurgia secundária, onde se realiza a desoxidação, a dessulfuração, a degaseificação e o ajuste final da composição química, da temperatura e da limpidez, no que diz respeito às inclusões não-metálicas. Segundo Rizzo (2005), os principais objetivos da etapa de refino secundário dos aços são:

- Redução do tempo de elaboração do aço, visto que o refino secundário no FEA demanda tempos altos de processamento;
- Maior flexibilidade operacional ou controle do sincronismo do processo;
- Controle da temperatura do aço;
- Ajuste da composição química;
- Aumento do grau de limpidez inclusionária.

Para manutenção e ajuste da temperatura, o forno-panela possui um sistema de eletrodos, similar ao do forno elétrico a arco, que fornece energia ao banho através de arco elétrico.

O forno-panela conta também com a injeção de gases inertes através de um plug poroso que se localiza no fundo da panela. Os principais objetivos desta prática são: homogeneização da composição química e temperatura, dissolução das ligas adicionadas e arraste das inclusões até a interface metal- escória.

2.3.1. Escórias de Refino Secundário

Segundo definição da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), a escória é um produto não metálico, que consiste em silicatos de cálcio e ferro, combinados com

óxidos de ferro, alumínio, cálcio e magnésio fundidos, que aparece como coproduto do aço resultante das atividades realizadas nas usinas integradas de aço ou nas usinas com forno elétrico a arco.

A escória é formada por um grande número de óxidos, e a sua composição química varia de acordo com as propriedades requeridas do aço a ser produzido. A saber, os principais compostos existentes na escória estão apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1. Principais óxidos encontrados em escórias. Fonte: Almeida, 2016.

Óxidos	Práticas mais usadas	Origem
CaO	Adicionado	<ul style="list-style-type: none"> - Cal (98% CaO). - Dolomita ($\approx 58\%$ CaO e 39% MgO). - Cálcio-Aluminatos ($\approx 45\%$ CaO e 53% Al_2O_3). - Refratários dolomíticos.
MgO	Adicionado	<ul style="list-style-type: none"> - Dolomita ($\approx 58\%$ CaO e 39% MgO). - Magnesia ($> 92\%$ MgO). - Refratários magnesianos e dolomíticos.
SiO ₂	Do processo ou da carga	<ul style="list-style-type: none"> - Oxidação do Si na carga ($\underline{Si} + O_2 = SiO_2$). - Desoxidação do aço ($2\underline{O} + \underline{Si} = SiO_2$). - Areia e terra. - Refratários sílico-aluminosos.
Al ₂ O ₃	Do processo ou adicionado (FP)	<ul style="list-style-type: none"> - Oxidação da carga ($2\underline{Al} + 3/2O_2 = Al_2O_3$). - Desoxidação do aço ($3\underline{O} + 2\underline{Al} = Al_2O_3$). - Escória sintética Cálcio-Aluminatos ($\approx 45\%$ CaO e 53% Al_2O_3). - Escória sintética Bauxita ($> 80\%$ Al_2O_3). - Refratários (Alta alumina).

O controle da composição química da escória é realizado por meio de três mecanismos: oxidação de elementos como silício, manganês e ferro na formação da escória; da evolução da composição química e da dissolução da cal na escória.

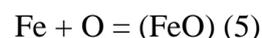
A escória é fundamental na dessulfuração na panela, melhora a transferência de energia do arco elétrico para o banho metálico, protege o aço da reoxidação pelo oxigênio do ar, protege contra incorporação de nitrogênio e hidrogênio, atua como isolante térmico do aço evitando perda de temperatura e captura inclusões e produtos da desoxidação, melhorando a qualidade do aço. Além disso, a escória interage com os refratários utilizados, por isso existe a necessidade de que a composição da escória seja compatível com os

refratários utilizados, visando controlar as interações físico-químicas entre estes (GERDAU, 2013). Por essas razões, é fundamental o entendimento do equilíbrio metal-escória.

2.3.2. Equilíbrio Químico Aço x Escória

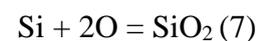
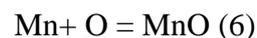
Segundo Mourão (2007), os elementos químicos presentes no aço líquido estão em permanente equilíbrio com os compostos presentes na escória, ou nas inclusões presentes no aço.

A reação que apresenta a relação entre oxigênio dissolvido no aço líquido (O), o ferro presente no aço líquido (Fe) e o óxido de ferro (FeO) presente na escória é a principal reação de equilíbrio químico entre aço e escória.

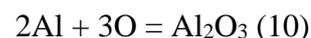
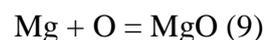


Quando o equilíbrio é deslocado para a esquerda, ou seja, quando a quantidade de FeO na escória é muito grande, ocorre a dissolução de oxigênio no aço. Já a ausência de FeO na escória, ou a presença de quantidades pequenas, desloca o equilíbrio para direita e a escória passa a absorver o oxigênio dissolvido no aço na forma de FeO.

Ainda segundo Mourão (2007), a equação 5 explica a necessidade de se minimizar a quantidade de óxidos de manganês e silício na escória, chamados de não estáveis, visto que possuem comportamento análogo ao óxido de ferro, conforme reações 6 e 7.



Já os óxidos de cálcio, magnésio e alumínio, conhecidos como óxidos estáveis, não apresentam o mesmo comportamento que o óxido de ferro. Para estes elementos, o equilíbrio está sempre deslocado no sentido da formação do óxido, vide reações 8, 9 e 10.



Como consequência, quando existe a presença de elementos formadores de óxidos estáveis e oxigênio dissolvido no aço líquido, a formação de óxido é preferencial, ocorrendo a remoção de oxigênio dissolvido do aço.

2.3.3. Desoxidação

Segundo Ghosh (2001), a fabricação do aço é um processo de oxidação seletiva de impurezas do aço líquido. Durante as reações de oxidação inerentes ao processo, parte do oxigênio acaba dissolvido no aço. O teor de oxigênio dissolvido depende do limite de solubilidade do mesmo no ferro líquido, que é função da temperatura. A solubilidade do oxigênio no aço pode ser visto no diagrama da figura 2.14.

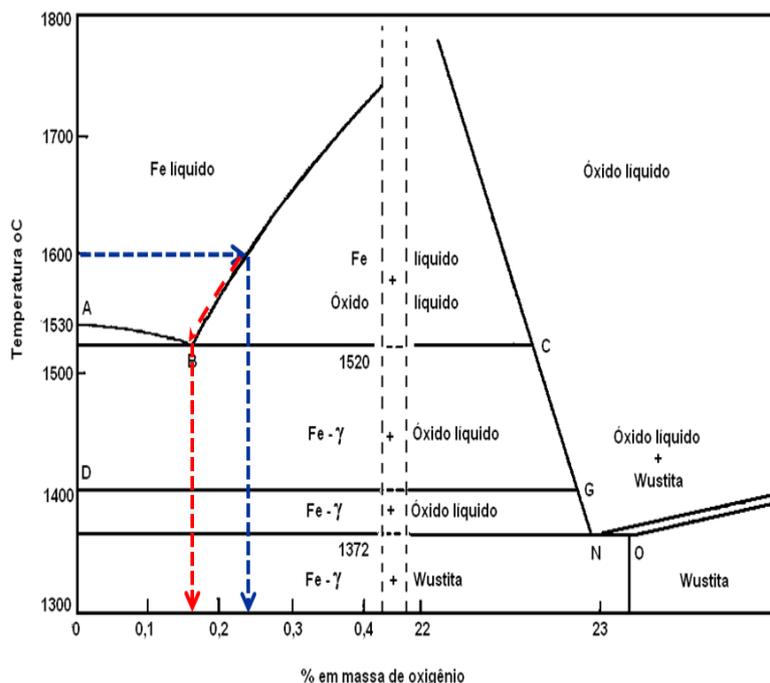


Figura 2.14. Diagrama binário ferro-oxigênio. Fonte: Notas de Aula Siderurgia II, 2016.

Em temperatura próxima a de processamento do aço no forno-panela, 1600°C, a solubilidade máxima de oxigênio é cerca de 2300 ppm. Na temperatura de solidificação do ferro puro, 1534°C, a solubilidade máxima cai para 1700 ppm. Mantendo-se a temperatura constante, em valores de oxigênio dissolvido maiores que o de saturação, ocorre a precipitação de FeO nos contornos de grão do ferro solidificado, na forma de inclusões. A precipitação de FeO é evitada com a redução do teor de oxigênio antes da solidificação, etapa denominada de desoxidação do aço líquido.

A reação de desoxidação ocorre quando elementos com maior afinidade com o oxigênio que o ferro se ligam, formando óxidos. A formação dos óxidos depende da

estabilidade do composto formado em função da temperatura. Na prática, a desoxidação ocorre pela adição de elementos como silício, manganês e alumínio ao banho, na presença de escória com baixos teores de FeO, MnO e SiO₂.

Finardi (1984), afirma que a desoxidação ocorre através de três mecanismos distintos: desoxidação primária, que se dá através da adição de elementos desoxidantes ao aço, que formam óxidos ou inclusões não metálicas; desoxidação secundária, que ocorre pela diminuição da temperatura, que causa queda da solubilidade do oxigênio e do elemento desoxidante; e desoxidação terciária, que ocorre pela precipitação de inclusões causada pela variação de solubilidade durante a desoxidação terciária.

A desoxidação também pode ser dividida sob o ponto de vista dos produtos formados. Neste caso, tem-se a desoxidação com produtos gasosos e a desoxidação com produtos sólidos ou líquidos.

Desoxidação com produtos gasosos

É descrita pela reação (11) a seguir.



Observa-se que o equilíbrio químico se dá entre o aço e a atmosfera, e com o equilíbrio deslocado para a direita ocorre a formação de CO e redução do oxigênio do banho.

A figura 2.15 mostra a curva de equilíbrio da solubilidade entre carbono e oxigênio com pressão parcial de CO igual a 1 e 1600°C.

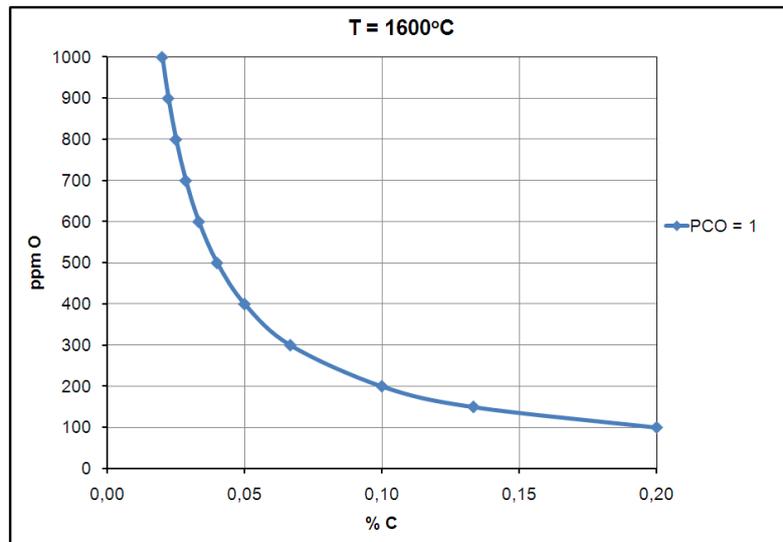


Figura 2.15. Relação %C x ppm O no banho. Fonte: Notas de Aula Siderurgia II, 2016.

A partir da imagem nota-se que quanto menor o teor de carbono no banho maior o teor de oxigênio solúvel. Na fabricação de aços longos o teor de carbono costuma ser baixo e, portanto, o oxigênio dissolvido tende a ser relativamente alto. A formação de CO pode ocorrer na solidificação do tarugo, formando porosidades no aço, sendo necessário o uso de desoxidantes mais fortes.

Desoxidação com produto sólido ou líquido

Neste caso, as principais reações que ocorrem são (6), (7), (8), (9) e (10).

O manganês é considerado um desoxidante fraco, visto que proporciona valores altos de oxigênio no aço, mesmo quando usado em elevadas concentrações, como mostra a figura 2.16.

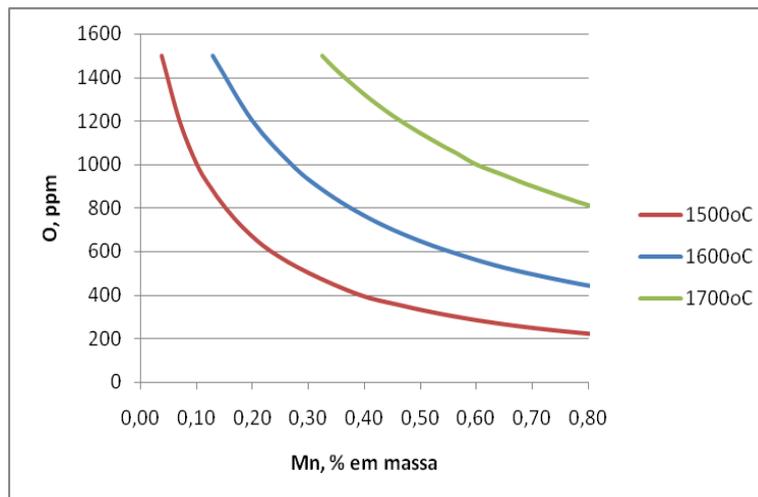


Figura 2.16. Porcentagem de oxigênio versus porcentagem de manganês, para T= 1550, 1600 e 1700°C. Fonte: Notas de Aula Siderurgia II, 2016.

A desoxidação com silício é mais efetiva, porém um dos produtos formados na reação resulta em inclusões sólidas (cristobalita $\text{SiO}_2(\text{S6})$) (TURKDOGAN, 1996). Estas inclusões possuem alta dureza e são inadequadas aos processos de transformação, segundo Scal (2010), visto que pode ocorrer desgaste acentuado das ferramentas ou quebra do arame durante a trefilação.

O uso de silício e manganês conjuntamente na desoxidação é mais eficiente que o uso isolado dos dois elementos. Segundo Mourão (2007), a maior eficiência se dá pela formação de silicato de manganês, que é líquido nas temperaturas de processamento do aço no forno-panela, e não forma inclusões e nem é absorvido pela escória. A contínua remoção do silicato de manganês se dá pela dissolução no aço líquido, aumentando a eficiência da desoxidação.

A figura 2.17 apresenta a relação entre %Si dissolvido no aço versus %O dissolvido no banho. Para um mesmo teor de silício, à medida que o teor de manganês aumenta, o oxigênio dissolvido diminui. Também, à medida que se aproxima da linha de saturação do $(\text{Fe, Mn})\text{O}$, aumenta-se consideravelmente o teor de manganês no aço. Por isso, para a maioria dos aços comerciais, tem-se teores de manganês de até 1%.

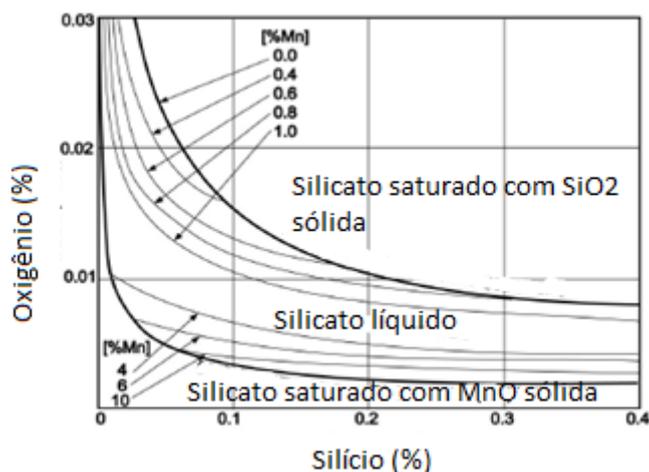


Figura 2.17. Equilíbrio da desoxidação com silício e manganês a 1600°C. Fonte: adaptado de Fruehan, 1985.

A figura 2.18 mostra os teores de silício e manganês em equilíbrio com a sílica e com o silicato de manganês líquido para várias temperaturas.

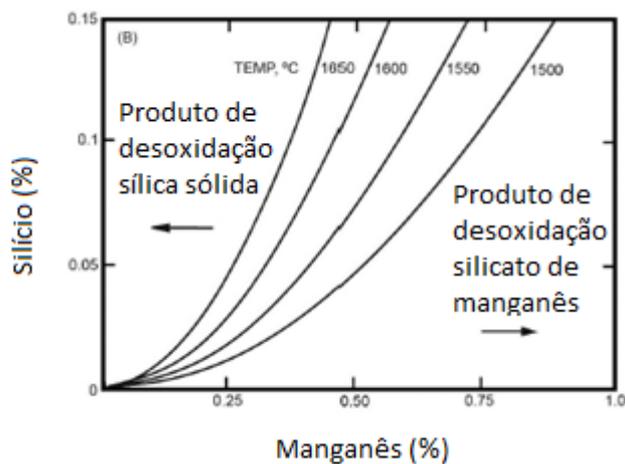


Figura 2.18. Teores de silício e manganês no aço em equilíbrio com sílica e silicatos de manganês em diferentes temperaturas. Fonte: adaptado de Turkdogan, 1996.

Para uma dada temperatura, na área acima da curva, o manganês não participa da reação de desoxidação, e o produto formado é sílica sólida. Nas regiões abaixo da curva, o produto é o silicato de manganês líquido. Pode-se observar que as curvas são funções quadráticas representadas por Mn^2/Si .

Com base nas curvas da figura 2.18, fixando a atividade da SiO_2 em um ($a_{\text{SiO}_2} = 1$) e utilizando as equações das constantes de equilíbrio K_{Si} [2] e K_{Mn} [3], segundo Ghosh (2001), com T e %O conhecidos, é possível calcular %Si e %Mn.

$$K_{\text{Si}} = \frac{[\% \text{Si}] \times [\% \text{O}]^2}{a_{\text{SiO}_2}}; \log K = \frac{-30110}{T} + 11,4 \quad [2]$$

$$K_{\text{Mn}} = \frac{[\% \text{Mn}] \times [\% \text{O}]}{a_{\text{MnO}}}; \log K = \frac{-11070}{T} + 4,536 \quad [3]$$

Para temperatura de 1660°C , K_{Mn} é igual a 0,041 e K_{Si} é igual a $2,11 \times 10^{-5}$. Com os valores calculados de %Si e %Mn, é possível obter a relação %Mn/%Si para diferentes teores de oxigênio dissolvido no banho, conforme figura 2.19.

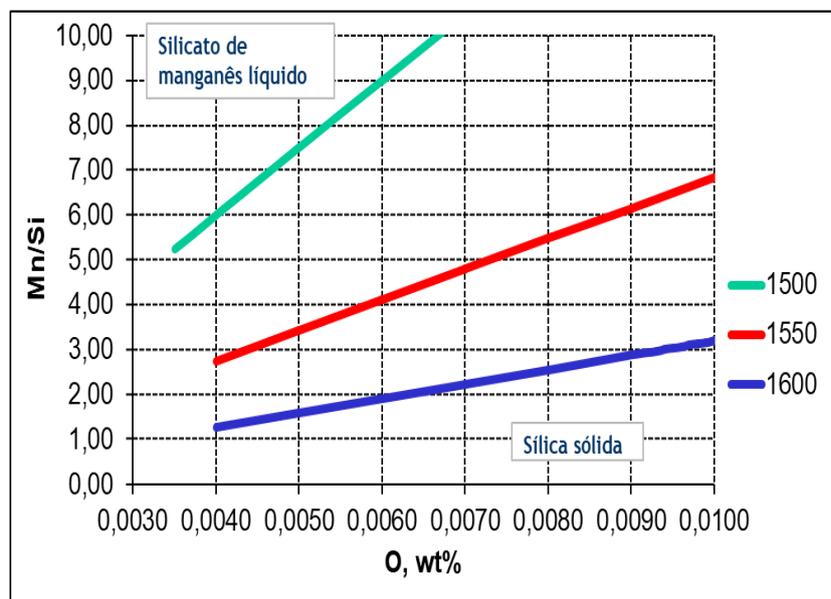


Figura 2.19. Relação entre %Mn/ %Si versus %O no aço para T= 1500, 1550 e 1600°C Fonte: Notas de Aula Siderurgia II, 2016.

Pode-se observar que, conforme a relação %Mn/%Si aumenta, o teor de oxigênio no banho também aumenta. Este comportamento também pode ser visto no trabalho de Huppés (2014), figura 2.20. Segundo Chemale (2015), este comportamento ocorre, pois, aumentando a relação %Mn/%Si, a relação % SiO_2 / %MnO nas inclusões diminui, ou seja, menos desoxidado está o aço.

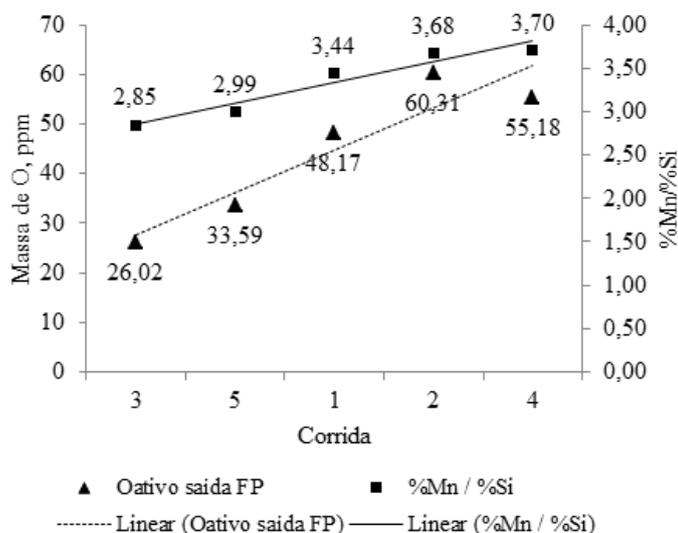


Figura 2.20. Relação entre oxigênio ativo e relação manganês silício de corridas ao final da etapa de refino secundário. Fonte: Huppés, 2014.

2.3.4. Rendimento dos Elementos Desoxidantes

Segundo Falconi (1980), um elemento de liga ao ser adicionado ao aço pode permanecer como liga ou formar um óxido. O óxido é o produto da reação do elemento com o oxigênio dissolvido no aço, com o $\text{FeO} + \text{MnO}$ da escória ou até pela reoxidação com o ar.

O rendimento de um elemento desoxidante pode ser definido pela equação [4]:

$$R(\%) = \frac{\text{Elemento no aço}}{\text{Elemento adicionado}} [4]$$

Para se obter rendimentos de desoxidante mais próximos a 100%, é necessário que o aço tenha sido desoxidado a tal nível que a liga adicionada não possua capacidade de reagir com o oxigênio e diminuir este teor, que a escória tenha sido totalmente reduzida e que a reoxidação com o ar tenha sido evitada.

Segundo Huppés (2014), em aços desoxidados com silício e manganês (*semi-killedsteels*), o rendimento do silício tem importância fundamental na interpretação do nível de oxidação da corrida. Como mostra a figura 2.21, existe uma tendência de diminuição dos teores de oxigênio à medida que o rendimento de silício é mais efetivo.

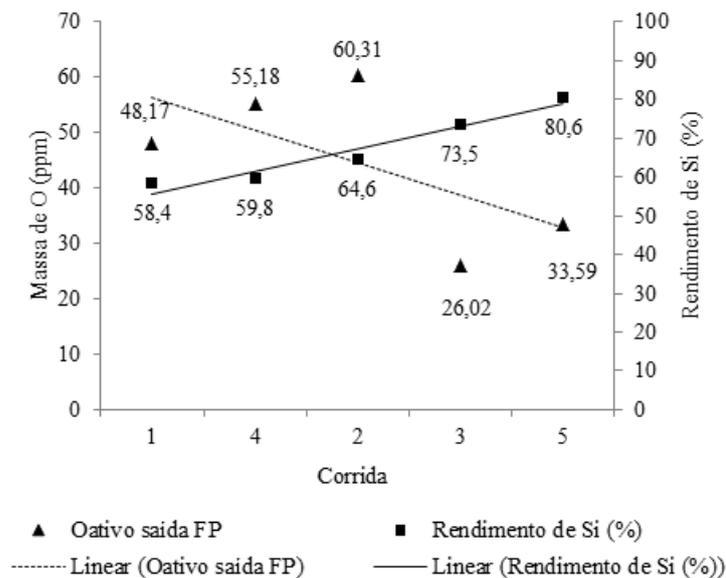


Figura 2.21. Relação entre oxigênio ativo e rendimento de silício após desoxidação. Fonte: Hupples, 2014.

Já Turkdogan (1996), afirma que com a passagem de escória, elementos desoxidantes tendem a reagir com óxidos menos estáveis presentes na escória (como o FeO e o MnO, por exemplo), diminuindo o rendimento dos desoxidantes utilizados.

2.4. Lingotamento Contínuo e Defeitos no Produto Final

O lingotamento contínuo é a última etapa onde se trabalha com aço líquido. O objetivo principal desta etapa é solidificar o aço na forma que se deseja para que possa ser utilizado nas próximas etapas da cadeia produtiva ou então vendido como produto semiacabado.

O aço é transportado à plataforma do LC e vazado da panela para o distribuidor através da abertura de um sistema de válvulas gaveta. Este equipamento é formado por uma carcaça metálica revestida internamente por refratários. As principais funções do distribuidor são armazenar uma quantidade de aço visando o controle da velocidade do processo e evitar a passagem de escória para os veios. A distribuição para os veios é feita por válvulas e o controle da velocidade é feito pelo diâmetro destas placas, que alimentam os moldes.

A solidificação do aço se inicia no molde de cobre, que é refrigerado externamente por água. Este é o resfriamento primário do aço e tem por objetivo conferir a forma desejada e formar uma camada de aço sólido que seja suficiente para suportar a pressão ferrostática após a saída do molde. A oscilação do molde e o tracionamento dos rolos extratores fazem com que o tarugo se movimente verticalmente para baixo, dentro da câmara de sprays.

Dentro da câmara de sprays ocorre o resfriamento secundário, no qual o tarugo é resfriado através de bicos que incidem água diretamente sobre sua superfície. Após a saída do tarugo da câmara de sprays ocorre o resfriamento terciário do tarugo na zona de radiação livre, onde o resfriamento é ao ar. Por fim, o aço solidificado é cortado no comprimento desejado. O corte pode ser realizado por tesouras mecânicas ou por oxicorte.

A figura 2.22 mostra uma representação dos principais componentes de uma máquina de lingotamento contínuo de tarugos.

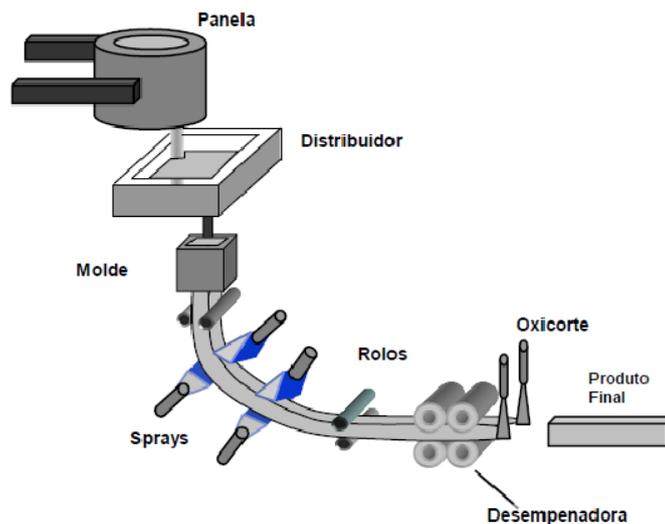


Figura 2.22. Esquema da solidificação do aço na câmara de sprays. Fonte: Adaptado de Gerdau, 2008.

Como citado por Huppés (2014), o processo de fabricação do aço é tão complexo que a produção de aços semiacabados completamente livres de defeitos é praticamente impossível. Todos os critérios para avaliação da qualidade do tarugo buscam quantificar e qualificar a presença de defeitos de solidificação no produto, e sua permanência dentro da estreita faixa aceitável aos processos de conformação mecânica posteriores.

Os defeitos de qualidade podem ser classificados em três diferentes classes, conforme Baptista (1970). A primeira classe diz respeito aos defeitos de superfície, e entre eles se pode citar: trincas na superfície, incrustação de escória, porosidade superficial, pele dupla e gota fria. Na segunda classe estão os defeitos internos: porosidade interna, macro inclusões, trincas e segregação. A última classe engloba os defeitos de forma, sendo os principais romboidade e achatamento na zona de corte.

Conforme mencionado anteriormente, a passagem de escória do forno elétrico para a panela pode favorecer a formação de porosidades internas (pin e blow-holes) nos tarugos. Por isso, este defeito será detalhado na próxima seção.

Porosidade Interna

A presença de porosidades no tarugo é extremamente prejudicial à qualidade do produto final por vários fatores, como a possibilidade dessas porosidades serem nucleadoras de trincas, concentradores de tensões e se estiverem oxidadas ao caldear na laminação, darão origem a defeitos superficiais tão severos a ponto do produto final ser sucateado.

Existem diversos modelos que permitem avaliar as condições para evitar a formação de porosidades durante o lingotamento do aço. Esses modelos baseiam-se, em sua maioria, no postulado que a formação de poros é uma consequência da segregação de soluto durante a solidificação dendrítica e a interação do soluto no líquido interdendrítico enriquecido por impurezas.

A pressão crítica para que uma bolha de gás se torne estável no aço líquido pode ser representada pela equação [5], onde P_A é a pressão atmosférica, P_F é a pressão ferrostática, σ é a tensão superficial no ferro líquido e r é o diâmetro da bolha.

$$P_{total} = P_A + P_F + \frac{2\sigma}{r} [5]$$

Sabe-se que para uma bolha de gás de 1 mm de diâmetro, a pressão devido à tensão superficial é de 0,02 a 0,03 atm. Como o tamanho médio das porosidades é muito menor que 1 mm, o efeito da tensão superficial é insignificante (SCAL, 2010).

Segundo Vidolin (2010), os solutos que contribuem para a formação de porosidades em aços lingotados sem injeção de argônio são hidrogênio, nitrogênio e monóxido de

carbono. Quando a soma das pressões parciais de equilíbrio destes solutos no líquido interdendrítico supera a pressão total, expressa na equação 4, ocorre a formação de bolhas de gás. Essas bolhas expulsam o líquido interdendrítico e geram poros, que ficam aprisionados e crescem.

A figura 2.23 é um esquema do processo de crescimento das dendritas na zona líquida-sólida. As áreas circuladas em vermelho indicam sítios preferenciais para a nucleação de bolhas de gás.

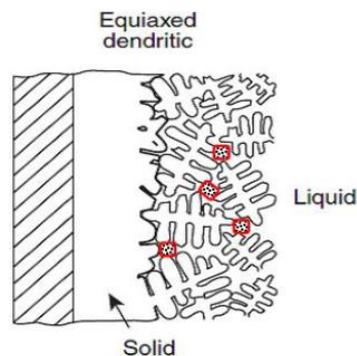


Figura 2.23. Crescimento de dendritas na região líquido-sólida. Fonte: Serra et al, 2011.

Conforme a fração solidificada aumenta, há um enriquecimento progressivo de soluto no líquido remanescente entre os braços das dendritas. Nestes pontos, a soma das pressões parciais dos gases pode superar a pressão total e ocorrer o surgimento das porosidades.

É sabido que a redução de porosidades em tarugos pode ser conseguida com desoxidação eficaz do aço no forno-panela. Esta, por sua vez, deve ser suficiente para evitar a formação de porosidade sem que ocorra a formação excessiva de inclusões sólidas ou parcialmente sólidas, que podem levar à obstrução de válvula da panela. Como já discutido anteriormente, a redução da passagem de escória é benéfica para o processo de desoxidação e, conseqüentemente, para evitar a formação de porosidades.

2.5. Refratário do Canal EBT

O canal EBT é composto por um conjunto de cinco peças refratárias segmentadas, chamadas de luvas. Essas luvas são montadas uma sobre as outras, formando um canal por onde ocorre o escoamento do aço líquido.

A figura 2.24 apresenta um corte transversal no desenho dos refratários do forno elétrico a arco, com foco no refratário do canal EBT.

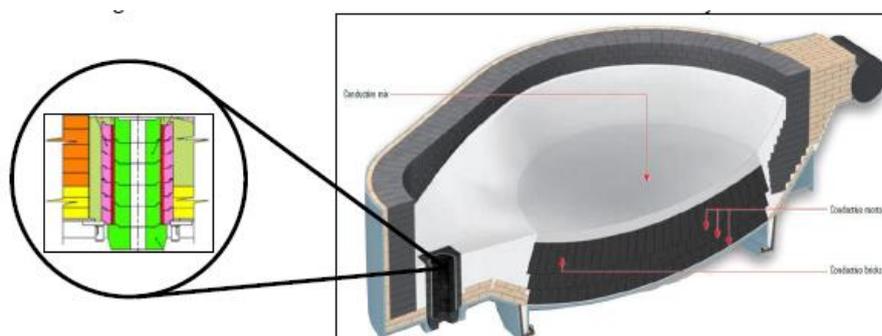


Figura 2.24. Forno elétrico a arco em corte e detalhe do canal EBT. Fonte: Mattiello, 2016.

Para acomodar o canal EBT na carcaça do forno, são instaladas sedes refratárias, peças quadradas com orifício circular, montadas uma sobre a outra e sistema de encaixe tipo macho/ fêmea. O canal EBT é inserido nas sedes e o último conjunto refratário permanece na parte de fora do forno. Para evitar infiltração de aço, o espaço entre as sedes e o canal é preenchido com massa refratária seca (MATTIELLO, 2016).

Uma ilustração da montagem do sistema de sedes e luva pode ser visto na figura 2.25.

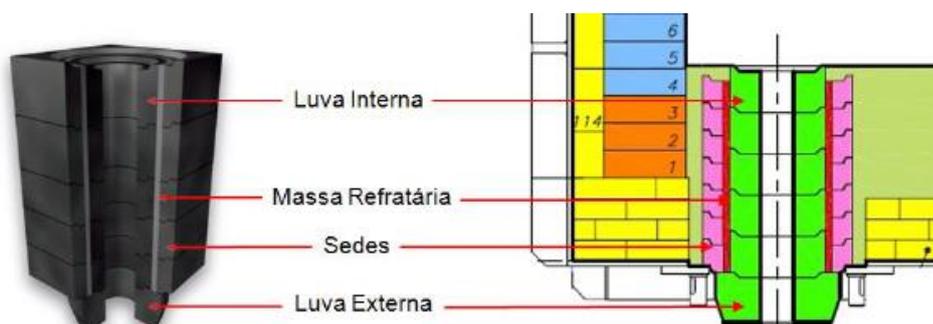


Figura 2.25. Representação esquemática da montagem das sedes e luvas. Fonte: Mattiello, 2016.

O material refratário utilizado no EBT de é magnésia-carbono, que é composto majoritariamente por óxido de magnésio (sinterizado e/ou eletrofundidos) e carbono

(normalmente grafite de alta pureza). Dependendo do fabricante, há adição de antioxidantes (Al, Si, SiC) e são resinados e curados.

O carbono é adicionado aos refratários de MgO por conferir baixo molhamento do refratário pela escória, alta estabilidade química no contato com escória, alta condutividade térmica e baixa expansão térmica, proporcionando maior resistência ao choque térmico.

Além do alto custo, a principal desvantagem destes refratários é a alta susceptibilidade à oxidação em alta temperatura. Como consequência, tem-se perda de resistência mecânica devido ao aumento da porosidade. Isso causa redução de resistência à penetração do aço e escória, aumentando a taxa de deterioração do refratário. A oxidação do refratário pode ocorrer através de duas formas: em temperaturas inferiores a 1400°C ocorre oxidação direta do carbono (reação com gás oxigênio). Já em temperaturas acima de 1400°C ocorre oxidação indireta (oxigênio do MgO reage com o carbono) (MATTIELLO, 2016).

Segundo o mesmo autor, a taxa de corrosão de um refratário é função de fatores como temperatura de processo, composição, densidade e viscosidade da escória, bem como do grau de agitação do meio. A corrosão é um mecanismo que se processa em três estágios:

- i. Oxidação do carbono, causando aumento da molhabilidade e favorecendo a infiltração de escória;
- ii. Dissolução do refratário na escória líquida;
- iii. Erosão, deixando o refratário exposto ao ataque pela escória.

Em termos de escória, a diferença de concentração de MgO com relação ao refratário, assim como o seu limite de solubilidade, tem relação direta com a taxa de corrosão do refratário, podendo ser utilizada como um parâmetro de avaliação do potencial de corrosão da escória para o refratário.

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a análise e caracterização do desempenho de um canal de vazamento excêntrico utilizaram-se os resultados de análises químicas elementares de aço e escória, retirados em diferentes etapas do processo de fabricação de uma qualidade de aço baixo carbono, em aciaria elétrica de aços longos. Os dados obtidos foram trabalhados a fim de serem utilizados em análises estatísticas e simulação computacional.

3.1. Materiais

3.1.1. Aço Analisado

Foram analisados dados de corridas de um aço cuja composição química é semelhante a um aço SAE 1023, referentes a uma campanha de um canal EBT. A composição química deste aço está apresentada na tabela 3.1.

Tabela 3.1. Composição química do aço analisado, em porcentagem em massa.

Teor (%)	C	Mn	Si	P	S
Mínimo	0,17	0,4	0,15	-	-
Máximo	0,23	0,7	0,3	0,035	0,045

3.1.2. Ligas Adicionadas

As ligas que foram adicionadas ao banho metálico e que serão consideradas para os cálculos dos rendimentos de silício e manganês tiveram sua concentração determinadas utilizando o método semiquantitativo de fluorescência de raios X, utilizando espectrômetro de fluorescência de raios X, modelo ARL ADVANT'X, no laboratório metalúrgico da Gerdau Riograndense. Este método fornece a concentração aproximada de elementos químicos em amostras desconhecidas e que não possuem padrão primário para curva de comparação.

3.2. Equipamentos Utilizados

O forno elétrico a arco no qual as corridas foram produzidas é trifásico, possui capacidade de 24 toneladas e volume bruto de 19,74 metros cúbicos e a potência do transformador é de 26 mega voltampere. Mais informações sobre o forno podem ser encontradas nos trabalhos de John (2009) e Rossi (2014).

O forno-panela também é trifásico, possui capacidade de 23 toneladas e a potência do transformador é de 16,5 mega voltampere. Mais informações podem ser encontradas no trabalho de Bruch (2012).

O lingotamento contínuo opera com dois veios e distribuidor que possuiu capacidade de 4,8 toneladas. O comprimento metalúrgico é de 11 metros e o raio de 4,5 metros. Opera com velocidade entre 1,9 e 2,8 metros por minutos. Mais informações podem ser encontradas no trabalho de Kliemann (2012).

3.3. Métodos

Inicialmente acompanhou-se a montagem do canal EBT no qual se realizou a coleta de dados durante a produção do aço SAE 1023. Os dados foram então tratados e analisados via análises estatísticas. O refratário do canal EBT foi analisado *post mortem* no que diz respeito à composição química e fases presentes. Por fim, realizaram-se simulações termodinâmicas para análise do desgaste do refratário.

O fluxograma da figura 3.1 apresenta a sequência de etapas dos métodos utilizados. Todas estas etapas serão descritas nas seções seguintes.

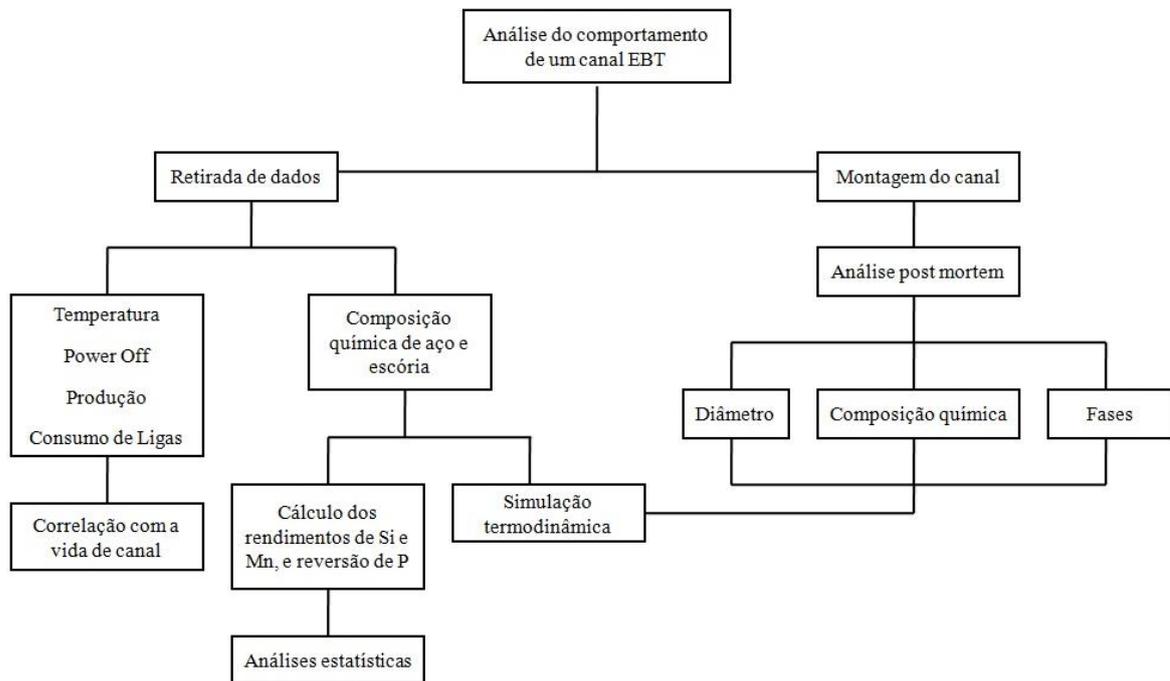


Figura 3.1. Fluxograma dos métodos utilizados.

3.3.1. Montagem do canal EBT

Para análise do desempenho do canal EBT, foi acompanhada o desempenho de um canal cilíndrico de 120 mm de diâmetro. O canal foi montado em carcaça de forno nova, nessa condição o controle da passagem de escória é maior, pois a rampa do vazamento não está desgastada. Nas figuras a seguir estão apresentadas imagens da montagem das luvas, figura 3.2, e das sedes na carcaça, figura 3.3.



Figura 3.2. Luvras refratárias do canal EBT montadas em gabarito para inserção na carcaça.



Figura 3.3. Sedes refratárias montadas na carcaça com o conjunto de luvas inserido em seu orifício.

De acordo com as especificações do fornecedor, é composto por tijolo refratário de magnésia-carbono, com 13% de carbono, à base de grafita lamelar e magnésia eletrofundida, com adição de antioxidante, ligado a resina e curado.

3.3.2. Coleta de dados/amostras

Os dados de composição química de aço e escória foram obtidos retirando-se amostras durante a produção do aço em questão. As amostras de composição química de aço foram retiradas no forno elétrico a arco, antes do vazamento, no forno-panela, antes da liberação da corrida para o lingotamento, e no lingotamento contínuo, aos 15 minutos. As amostras de escória foram retiradas no forno elétrico a arco, antes do vazamento, e no forno-

panela, antes da liberação para o lingotamento. A figura 3.4 ilustra como foi realizada a amostragem.

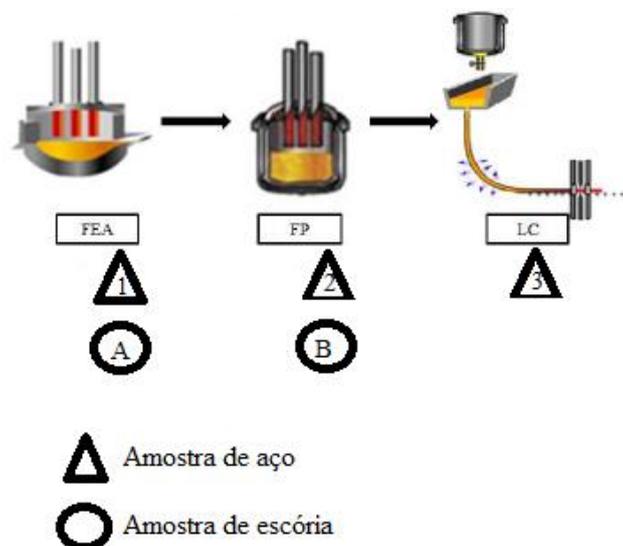


Figura 3.4. Ilustração da retirada de amostras de aço e escória.

Para a retirada das amostras de aço foi utilizado um amostrador de imersão. A figura 3.5 mostra a retirada de amostra no forno-panela.



Figura 3.5. Retirada de amostra de aço no forno-panela.

As amostras de escória foram obtidas inserindo uma vara tubular no banho, e retirando a escória aderida. A figura 3.6 mostra a escória aderida na vara tubular na amostragem feita no forno-panela.



Figura 3.6. Escória aderida em vara tubular durante amostragem no forno-panela.

Os dados de temperatura do aço foram obtidos na mesma amostragem dos dados de composição química.

3.3.3. Análises Químicas de Aço e Escória

As análises da composição química do aço foram realizadas durante a produção do aço utilizando um Espectrômetro de Emissão Óptica, modelo ARL 3460-AES.

As análises para determinação da composição química das escórias foram realizadas no setor de Tecnologia de Processo e Produto (TPP) da usina Gerdau Riograndense, utilizando um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X, modelo ARL ADVANT'X, após preparação prévia das amostras.

3.3.4. Cálculo dos rendimentos de silício e manganês e da reversão de fósforo

Para o cálculo do rendimento de silício, utilizou-se a equação 6, que leva em consideração os teores de silício no aço, a quantidade de silício adicionada através de ferroligas, o teor de silício nas ferroligas e a massa de aço.

$$R_{Si} = \frac{((\%Si_{LC} - \%Si_{FEA}) \times M_{aço vazado}) \times 1000}{(M_{ligaA} \times t_{ligaA} + M_{ligaB} \times t_{ligaB} + M_{ligaC} \times t_{ligaC} + M_{ligaD} \times t_{ligaD} + M_{ligaE} \times t_{ligaE})} \quad [6]$$

Onde:

- R_{Si} – Rendimento de silício;
- $\%Si_{FEA}$ – Teor de silício na amostra do FEA;
- $\%Si_{LC}$ – Teor de silício na amostra do LC;
- $M_{aço vazado}$ – Massa de aço líquido vazado na corrida;
- M_A – Massa da liga A adicionada;
- M_B – Massa da liga B adicionada;
- M_C – Massa da liga C adicionada;
- M_D – Massa da liga D adicionada;
- M_E – Massa da liga E adicionada;
- t_{ligaA} – Teor de silício na liga A;
- t_{ligaB} – Teor de silício na liga B;
- t_{ligaC} – Teor de silício na liga C;
- t_{ligaD} – Teor de silício na liga D;
- t_{ligaE} – Teor de silício na liga E.

Para o cálculo do rendimento de manganês, utilizou-se a equação 7, que leva em consideração os teores de manganês no aço, a quantidade de manganês adicionada através de ferroligas, o teor de manganês nas ferroligas e a massa de aço.

$$R_{Mn} = \frac{((\%Mn_{LC} - \%Si_{FEA}) \times M_{aço vazado}) \times 1000}{(M_{ligaA} \times t_{ligaA} + M_{ligaB} \times t_{ligaB} + M_{ligaC} \times t_{ligaC} + M_{ligaD} \times t_{ligaD})} \quad [7]$$

Onde:

- R_{Mn} – Rendimento de manganês;
- $\%Mn_{FEA}$ – Teor de manganês na amostra do FEA;
- $\%Mn_{LC}$ – Teor de manganês na amostra do LC;
- $M_{aço vazado}$ – Massa de aço líquido vazado na corrida;
- M_A – Massa da liga A adicionada;
- M_B – Massa da liga B adicionada;
- M_C – Massa da liga C adicionada;
- M_D – Massa da liga D adicionada;
- t_{ligaA} – Teor de manganês na liga A;
- t_{ligaB} – Teor de manganês na liga B;
- t_{ligaC} – Teor de manganês na liga C;
- t_{ligaD} – Teor de manganês na liga D.

A reversão de fósforo da escória para o banho foi determinada pela equação 8, que leva em conta o teor de fósforo na escória, a massa de escória na panela e a massa de aço.

$$\text{Reversão de P (kg/t)} = \frac{\%P_{\text{escória}} \times \text{Massa da escória na panela}}{\text{Massa da corrida}} \quad [8]$$

Onde:

- Reversão de P – Reversão de fósforo da escória para o aço;
- $\%P_{\text{escória}}$ – Porcentagem de fósforo na escória do forno-panela;
- Massa da corrida – Massa total de aço lingotado.

A massa de escória da panela foi determinada através de balanço de massa das cales utilizados, e as perdas de aço por balanço de massa entre vazamento e tarugo bons.

3.3.5. Análises estatísticas

Para entender o comportamento do rendimento de silício e de manganês, bem como a reversão do fósforo durante o vazamento foram calculados a capacidade destes dados, que visa determinar se os processos estão satisfazendo um determinado requerimento. Nestes casos, foram valores mínimos aceitáveis de rendimento e reversão de fósforo, de acordo com as práticas operacionais do processo analisado.

Como a capacidade de um processo pode ser estimada somente se o processo está sob controle estatístico, isto é, possui comportamento previsível (caracterizado por uma distribuição normal), os dados foram testados inicialmente quanto a sua normalidade, utilizando o teste de normalidade de Anderson-Darling.

Por último, foi realizada análise de variância dos dados de rendimento de silício e manganês e da reversão de fósforo, que fundamentalmente visa verificar se existe diferença significativa entre as médias dos dados e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. A partir do resultado desta análise é possível determinar se as diferenças amostrais observadas são causadas por diferenças significativas nos dados observados ou se são decorrentes apenas da variabilidade amostral.

As análises estatísticas foram realizadas no programa estatístico MINITAB, versão 17.

3.3.6. Análise do canal EBT *Post Mortem*

Para caracterização do refratário do canal EBT após operação determinou-se a composição química do refratário, as fases presentes e o diâmetro final.

O diâmetro final foi determinado utilizando-se paquímetro analógico da marca Mitutoyo de 150 mm.

A determinação da composição química e das fases presentes foi realizada em amostras retiradas em dois locais distintos da sede mais externa do canal EBT. A figura 3.7 mostra uma representação dos pontos de retirada de amostra. A saber, um ponto com contato direto com aço líquido e escória, e um ponto da região externa do canal.



Figura 3.7. Representação das regiões de retirada de amostras para análise de composição química e fases presentes da luva externa do canal EBT.

A composição química foi determinada via fluorescência de raios X, no setor de Tecnologia de Processo e Produto (TPP) da usina Gerdau Riograndense, utilizando um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X, modelo ARL ADVANT'X, após preparação prévia das amostras, com exceção da determinação do teor de carbono, que foi feita utilizando-se Espectrômetro de Emissão Atômica, modelo ICP Espectro Flame, após calcinação das amostras em forno mufla.

As fases presentes foram determinadas via difração de raios X, utilizando um difratômetro de raios X da marca Philips, modelo X'Pert, e as fases foram identificadas com o auxílio do software X'PertHighScore. Este difratômetro opera com uma fonte monocromática com radiação $K\alpha$ em tubo de cobre, nas condições de 40 kV e 40 mA.

3.3.7. Simulação Termodinâmica

A simulação termodinâmica é uma ferramenta que permite avaliar diversos fenômenos que ocorrem durante a produção dos aços, como por exemplo, as reações que ocorrem na interface metal/ escória e escória/ refratário. No que diz respeito à interface escória/ refratário, as simulações permitem compreender os fenômenos envolvidos na corrosão dos refratários de forma bastante satisfatória.

As simulações partem de uma série de cálculos realizados com base em um banco de dados. Segundo Cruz (2016), os cálculos são baseados na minimização da energia livre do sistema, e assim é possível deduzir a natureza das fases sólidas, líquidas e gasosas, e sua composição química e reação na condição de equilíbrio. Ademais, é possível prever o ponto de saturação da escória e definir o componente óxido mais adequado que deve ser adicionado ao banho metálico.

Neste trabalho, para as simulações termodinâmicas, utilizou-se o módulo *Equilib* do *software* comercial *FactSage*, versão 6.3. Mais informações sobre o programa e seu funcionamento podem ser encontrados no trabalho de Bielefeldt (2009).

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de rendimentos e consumos dos elementos desoxidantes, da reversão de fósforo do aço para escória, da oxidação da escória e do tempo de *power-off* com relação a vida de canal. Será apresentado também a caracterização do refratário do canal EBT e simulações termodinâmicas da composição química das escórias do forno elétrico a arco e do forno-panela.

4.1 Análises Estatísticas de Rendimentos e Reversão de Fósforo

Os resultados do teste de normalidade de Anderson-Darling para rendimentos de silício e manganês e reversão de fósforo estão apresentados na figura 4.1.

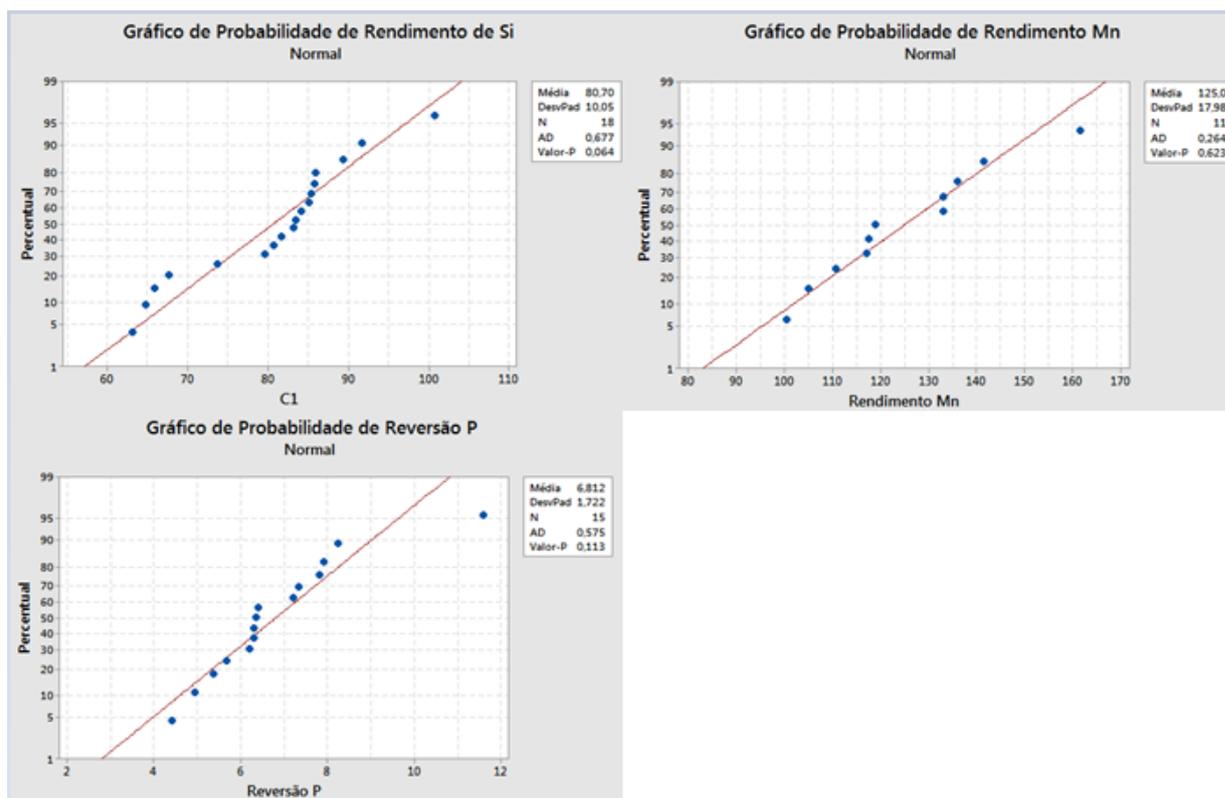


Figura 4.1. Análises de normalidade dos dados de rendimentos de silício e manganês e reversão de fósforo.

Com um nível de 95% de confiança, se pode afirmar que os dados seguem uma distribuição normal. Sendo assim, estes dados possuem comportamento previsível e são caracterizados por uma distribuição normal, como pode ser visto na figura 4.1.

A análise mostra que o P valor dos dados de rendimento de silício foi 0,064, dos dados de rendimento de manganês foi 0,623 e de reversão de fósforo foi 0,115. Apesar do P valor dos dados de rendimento de silício ser baixo, estes dados são caracterizados por uma distribuição normal.

As figuras 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam os resultados de capacidade dos processos de rendimento de silício e manganês e do rendimento de fósforo.

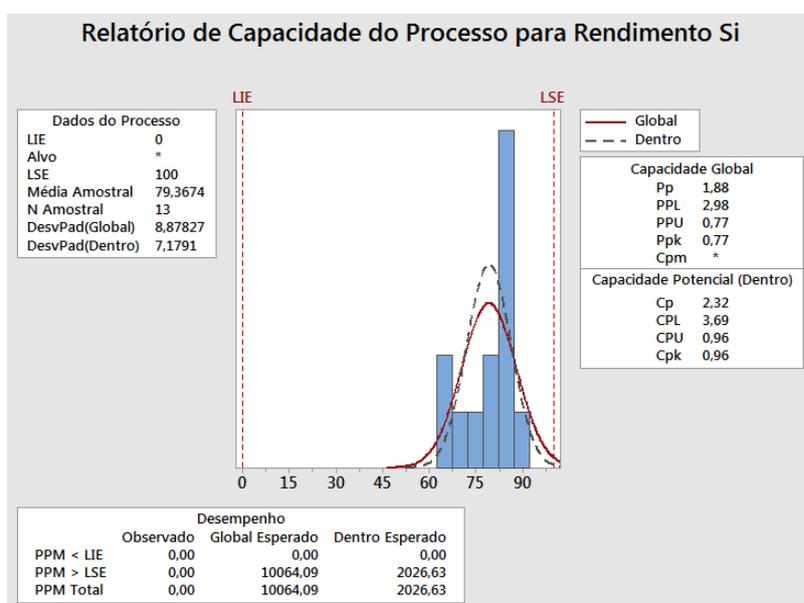


Figura 4.2. Análises de capacidade dos dados de rendimentos de silício.

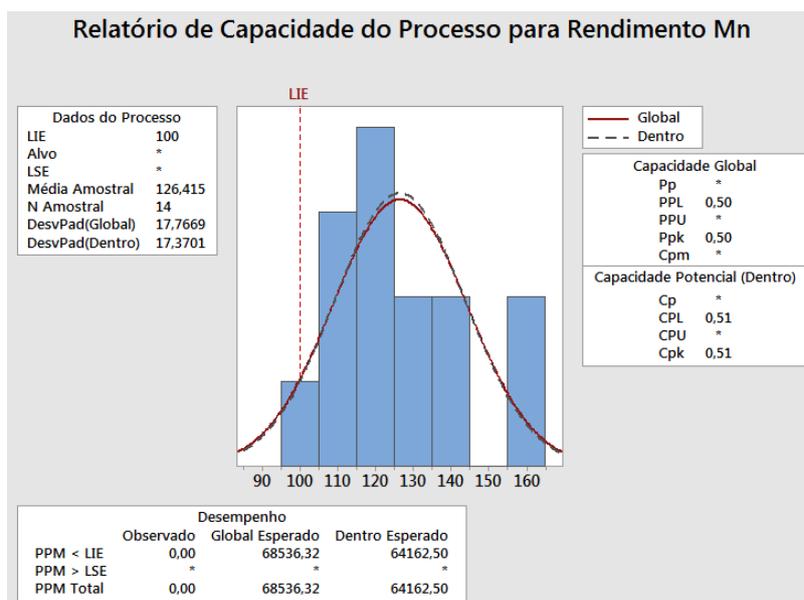


Figura 4.3. Análises de capacidade dos dados de rendimentos de manganês.

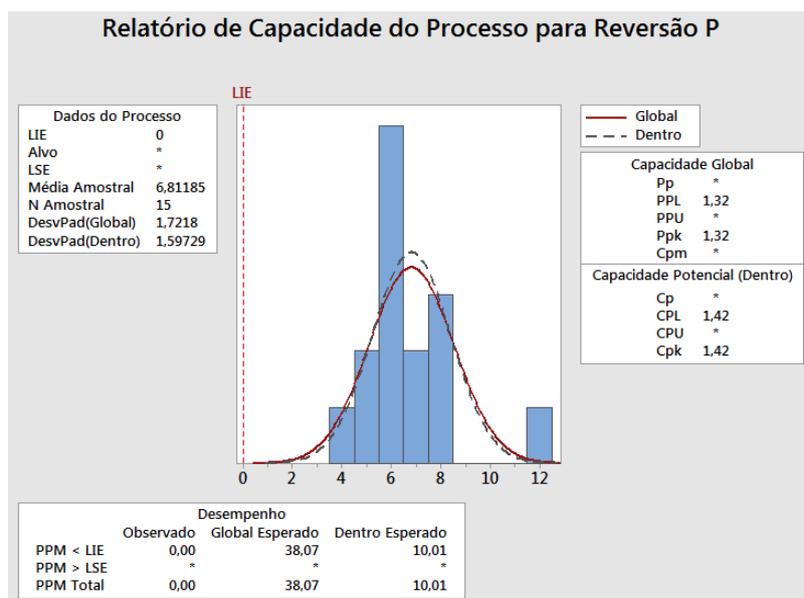


Figura 4.4. Análises de capacidade dos dados de reversão de fósforo.

Conforme a figura 4.2 e 4.3 os rendimentos de silício e manganês não estão sob controle estatístico e apresentam c_{pk} de 0,96 e 0,51, respectivamente. A análise de capacidade do processo mostra que somente a reversão de fósforo apresentou-se como capaz, isto é, possui c_{pk} de 1,42, como mostra a figura 4.4. Apesar de não centralizado, o processo está sob controle estatístico.

A figura 4.5 apresenta a análise de variabilidade para os dados de rendimento de silício e manganês e reversão de fósforo.

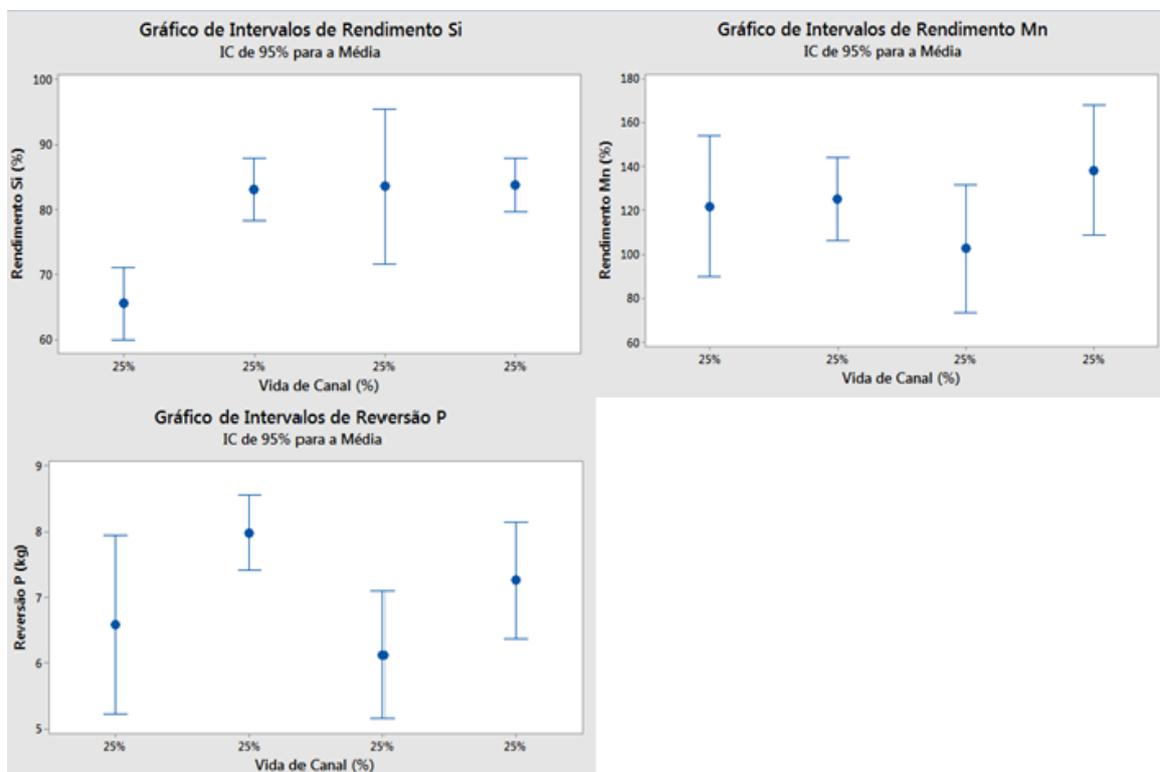


Figura 4.5. Análises de variância dos dados de rendimentos de silício e manganês e reversão de fósforo.

A análise de variância para rendimento de silício e reversão de fósforo com intervalos de dados de 25% de vida de canal resultou em um P valor de 0,001 para rendimento de silício e 0,002 para reversão de fósforo. Isso mostra que, nos dois casos, com uma confiabilidade de 95%, ao menos um dos intervalos de confiança não se sobrepõe aos demais. Sendo assim, existe diferença significativa quando o rendimento de silício e reversão de fósforo são comparados com a vida canal, como observado na figura 4.5.

Para rendimento de silício, a análise de variância indica diferença entre as médias para os intervalos de 25% e 50% de vida de canal. Já para reversão de fósforo a diferença entre as médias é notada para os intervalos de 50% e 75% de vida de canal.

4.2 Dados Coletados

A seguir serão apresentados resumos dos dados de produção, consumos de elementos desoxidantes, *power-off* e temperatura de vazamento.

4.2.1. Produção, Consumos e Power-Off

A média e desvio padrão da quantidade de aço produzida no lingotamento (em toneladas), bem como o *power-off* (em minutos por corrida) e os consumos de ferro ligas (em quilogramas) no canal estudado neste trabalho estão apresentados na tabela 4.1.

Neste trabalho não serão apresentados os valores individuais para preservação de dados industriais.

Tabela 4.1. Média e desvio padrão de elementos desoxidantes, produção total e power-off das corridas consideradas para os cálculos de rendimentos de silício e manganês e reversão de fósforo.

	Desoxidantes (kg)	Produção (t)	Power Off (min/corrida)
Média	183,8	21,4	7,8
Desvio Padrão	23,5	1,5	1,8

Observa-se na tabela 4.1 que a quantidade de aço produzida tem variação, porém não significativa. Esse fato deve-se à prática operacional de cada operador durante o processo, que busca otimização dos parâmetros de produção do FEA.

Nota-se também variações nas quantidades de desoxidantes utilizadas, que mudam de acordo com a condição de vazamento do aço, mas estão de acordo com os padrões de fabricação, que dizem que a quantidade mínima a ser adicionada deve ser em torno de 195 kg para que a composição química atinja a faixa média do padrão.

O *power-off* apresentou alta variação, porém não significativa, sendo influenciado por muitos fatores não relacionados à vida de canal (como tempo de espera por panela no vazamento, tempo de enchimento de areia no canal EBT e tempo de espera por pontes, entre outros).

4.2.2. Temperatura de Vazamento

A tabela 4.2 apresenta as médias e desvios padrões das temperaturas de vazamento e de chegada no forno-panela das corridas consideradas nos cálculos de rendimentos de elementos desoxidantes e da reversão de fósforo.

Tabela 4.2 Média e desvio padrão das temperaturas de vazamento no FEA e chegada no FP das corridas consideradas para os cálculos de rendimentos de silício e manganês e reversão de fósforo.

	T vazamento (°C)	T chegada (°C)
Média	1662	1588
Desvio Padrão	15	18

Pode-se observar na tabela 4.2 que apesar dos altos desvios padrões, tanto a média quanto os valores mínimos com relação ao desvio padrão estão dentro da faixa de temperatura do padrão de operação para este aço, que é de 1640 a 1670°C.

Segundo Christ (2001) e Bruch (2012), a queda na temperatura do aço, entre o vazamento do FEA e a chegada ao FP, é influenciada pela perda de calor por condução para a parede interna da panela em contato com o aço juntamente com a perda por radiação da escória para a parede, que são determinadas pelo gradiente de temperatura entra as mesmas. Huppés (2014), cita ainda que além dos fatores acima, devem ser levados em conta também a adição de ligas e a exposição do aço durante o vazamento no FEA.

4.3. Análise Química do Aço e Correlações com Vida de Canal

4.3.1. Rendimentos e Consumos dos Elementos Desoxidantes

Os resultados de rendimento de silício estão apresentados na figura 4.6 a seguir. Neste trabalho não serão apresentados os valores de escala dos gráficos para preservação de dados industriais.

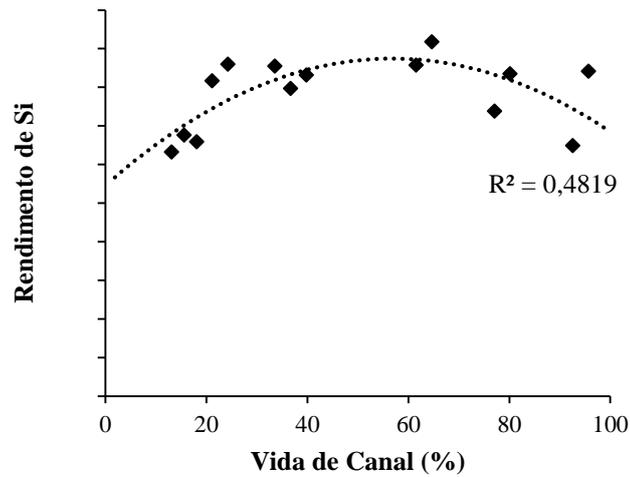


Figura 4.6. Relação entre rendimento de silício e vida de canal.

Pode-se observar na figura 4.6 que o rendimento de silício alcança os valores mais altos para uma vida de canal de aproximadamente 50%, o aumento no rendimento para essa vida de canal é de 28,5%. A regressão entre rendimento de silício e vida de canal tem aderência de 48%, ou seja, 48% é a quantidade de variabilidade do rendimento de silício devido à vida de canal.

Como mostrado por Huppés (2014), em seu trabalho, existe uma relação inversa entre oxigênio ativo no banho e rendimento de silício, isto é, quanto maior o oxigênio ativo, menor o rendimento de silício.

A figura 4.7 apresenta o consumo de silício com relação a vida de canal.

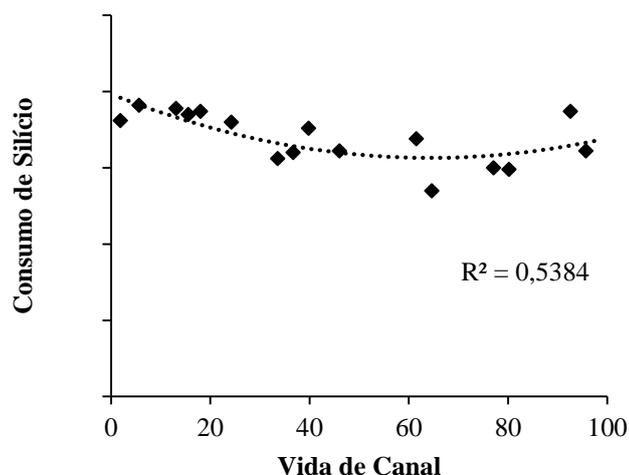


Figura 4.7. Relação entre consumo de silício e vida de canal.

Como mostra a figura 4.7, os maiores consumos de silício ocorreram em corridas com canal novo ou no início de operação, e em canais no final de sua vida útil. Também é notável que existe um consumo menor de silício para canais com meia vida útil, aproximadamente. A diminuição no consumo para meia vida de canal é de 25,4%. A regressão entre consumo de silício e vida de canal tem aderência de 53,8%, sendo este um fator preponderante para o consumo.

O menor consumo de silício, em corridas com canais em meia vida, indica que corridas vazadas nessa condição apresentam menor oxigênio dissolvido no banho, visto que, além do menor consumo de silício, o rendimento desse elemento é maior para canal nesta condição.

As figuras 4.8 e 4.9 apresentam o rendimento de manganês e o consumo de manganês, respectivamente.

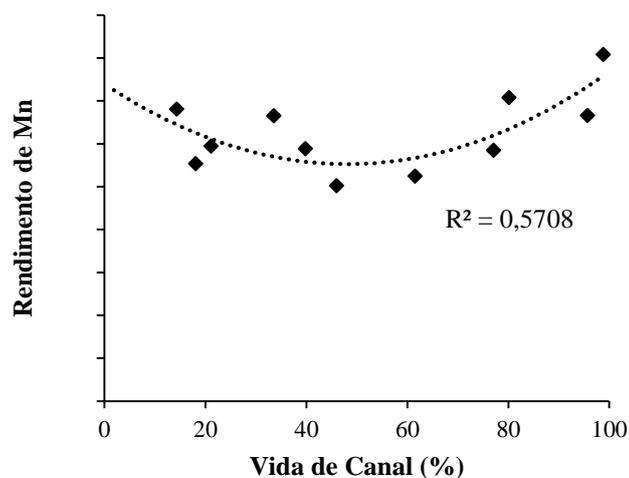


Figura 4.8. Relação entre rendimento de manganês e vida de canal.

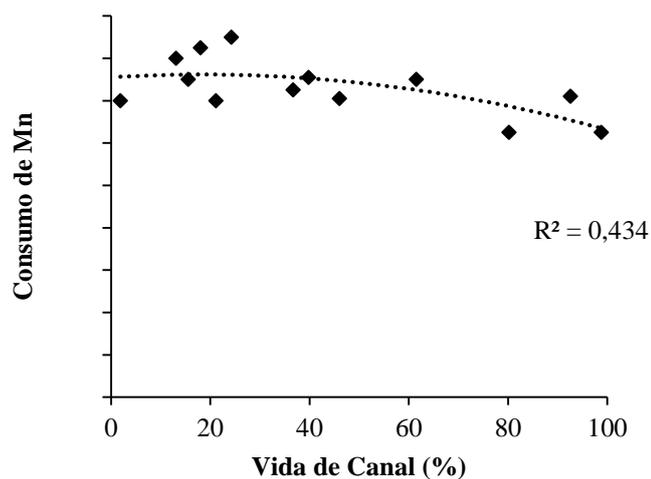


Figura 4.9. Relação entre consumo de manganês e vida de canal.

Ao contrário do rendimento de silício, o rendimento de manganês apresentou os valores mais elevados para canal no início e final de vida útil, como observado na figura 4.8. A diminuição do rendimento de manganês para meia vida do canal foi de 26,5%, com 57% de aderência entre os dois fatores.

O consumo de manganês, de acordo com a figura 4.9, apresentou os maiores valores para baixas vidas de canal. A diminuição do consumo de manganês no final da vida do canal foi de 14,7%, com aderência da regressão de 43,4%.

O manganês do banho metálico pode reduzir o FeO da escória formando MnO, que se incorpora à escória, diminuindo o teor desse elemento no aço e, conseqüentemente, seu rendimento.

No entanto, o comportamento esperado ao longo do processo do forno-panela, é a redução dos compostos da escória e reversão de grande parte do MnO para Mn. Assim, obtém-se valores de rendimento desse elemento maiores que 100%. A reversão de manganês da escória para o banho é possível e ocorre quando há uma passagem significativa de escória do forno para a panela durante o vazamento.

4.3.2. %Mn/%Si

A figura 4.10 apresenta a relação manganês sobre silício do aço versus a vida do canal.

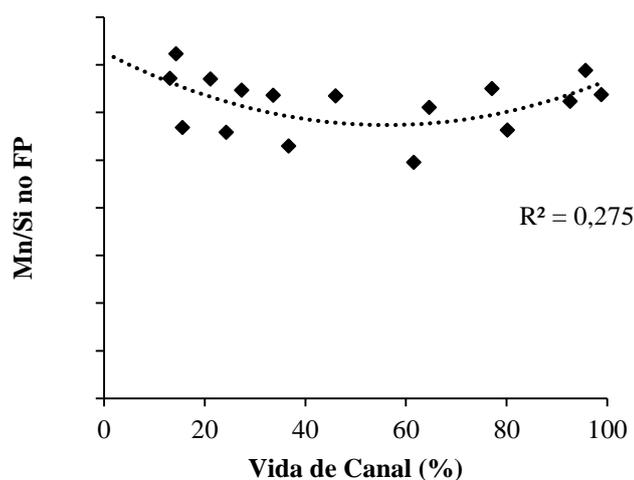


Figura 4.10. Relação entre relação %Mn/ %Si e vida de canal.

A figura 4.10 mostra que os menores valores de %Mn/%Si são obtidos para meia vida de canal, comportamento semelhante ao rendimento de silício. A diminuição na relação para meia vida de canal, com relação ao início da vida, foi de 31,6%. A variabilidade da relação %Mn/%Si devido à vida de canal foi de 27,5%, mostrando que esse parâmetro é bastante influenciado por outras variáveis.

Como discutido em seções anteriores, a relação $\%Mn/\%Si$ é um indicativo do nível de oxidação do aço, pois um aumento na relação $\%Mn/\%Si$, representa uma diminuição na relação $\%SiO_2/\%MnO$ das inclusões, ou seja, menos desoxidado está o aço (vide figuras 2.19 e 2.20).

4.4. Análise Química da Escória e Correlações com Vida de Canal

4.4.1. $\%FeO + \%MnO$

A relação $\%FeO + \%MnO$ versus a vida de canal está apresentada na figura 4.11.

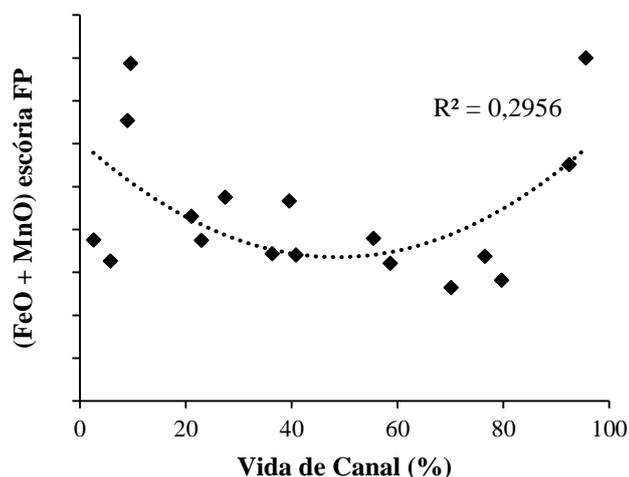


Figura 4.11. Relação entre $\%FeO + \%MnO$ e vida de canal.

A figura 4.11 mostra que os maiores valores de $\%FeO + \%MnO$ ocorreram em corridas vazadas com canal no início e final de vida útil. Os menores valores, por outro lado, ocorreram em corridas vazadas com canal em meia vida, e a diminuição da relação $\%FeO + \%MnO$ na metade da vida do canal foi de 50,7% em relação ao início da operação. A aderência à regressão entre $\%FeO + \%MnO$ e vida de canal foi de 29,6%, sendo a relação influenciada por outros fatores como qualidade da escória do forno e tempo de rinsagem.

Os óxidos de ferro e manganês são facilmente reduzidos da escória para o banho metálico visto que possuem baixa estabilidade, de acordo com o diagrama de Ellingham. Sendo assim, quanto menores forem os teores de $\%FeO + \%MnO$ na escória, menores serão

as probabilidades de oxidação dos elementos contidos no aço líquido. Ou seja, quanto menor a relação $\%FeO + \%MnO$, mais desoxidado está o aço. Assim, têm-se um indicativo de corridas vazadas com canal em meia vida apresentaram menor oxigênio no banho, elevando-se o rendimento de silício e diminuindo-se a relação $\%Mn/\%Si$ do aço e a relação $\%FeO + \%MnO$ da escória do forno-panela.

4.4.2. Reversão de Fósforo

Caso haja passagem excessiva de escória do forno elétrico a arco para a panela, uma provável consequência é a reversão de fósforo da escória para o banho metálico.

A figura 4.12 apresenta a reversão de fósforo versus a vida do canal.

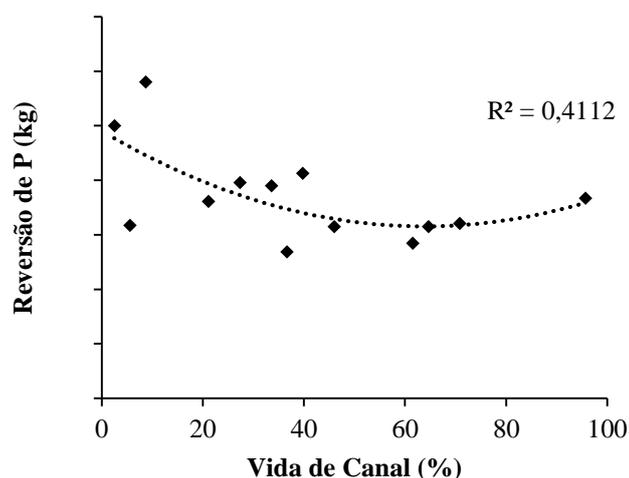
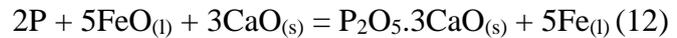


Figura 4.12. Relação entre reversão de fósforo e vida de canal.

Ao analisar a figura 4.12, observa-se que a menor reversão de fósforo ocorre para meia vida de canal, e que no início da vida de canal a reversão de fósforo ocorreu com mais intensidade. A diminuição da reversão de fósforo foi de 53,4% com 41% de variabilidade da reversão de fósforo devido à vida de canal. A reversão de fósforo é dependente também da atividade do FeO , como será explicado a seguir.

A reversão de fósforo da escória para o aço ocorre devido a diminuição da atividade do FeO durante o processo de desoxidação no forno-panela, conforme reação 12 e equação

8 abaixo. Onde $\%P_{eq}$ é o teor de fósforo no equilíbrio e f_P é o coeficiente de atividade do fósforo.



$$\%P_{eq} = \frac{a_{P_2O_5 \cdot 3CaO}^{1/2} x_{Fe}^{5/2}}{K^{1/2} x_{P} x_{FeO}^{5/2} x_{CaO}^{3/2}} \quad [8]$$

Nota-se que a passagem de escória do forno elétrico para a panela ocasiona reversão de fósforo ao banho principalmente quando o aço está totalmente desoxidado, ou seja, apresenta menor atividade de FeO.

No processo analisado por este trabalho não há nenhuma contramedida para evitar a reversão de fósforo em corridas onde ocorre passagem de escória do forno elétrico a arco para a panela. Torna-se evidente que a menor reversão de fósforo para meia vida de canal deve-se à menor passagem de escória nessa condição.

A menor reversão de fósforo para canal em meia vida, concomitantemente com o maior rendimento de silício e menores relações $\%Si/\%Mn$ do aço e $\%FeO + \%MnO$ da escória, indicam que para essa condição a oxidação das corridas foi menor. Como observado nas figuras 4.7 e 4.9 (consumos de silício e manganês), não se notou um acréscimo nos consumos de elementos desoxidantes para essas corridas. Pelo contrário, os maiores consumos de silício foram observados para canal no início e final de operação, e o consumo de manganês apresentou os maiores valores para baixas vidas de canal.

Uma prática comum na usina onde este trabalho foi realizado é o reparo do canal EBT, para restauração da geometria do mesmo. Este reparo é realizado utilizando-se um cano cilíndrico com a mesma dimensão do canal, que é preenchido por areia refratária internamente e externamente é circundado por massa refratária. Essa prática aumenta a vida do canal pois recupera sua geometria já bastante desgastada. O primeiro reparo do canal estudado foi realizado com canal apresentando 74% de sua vida útil. Este é um dos fatores que explicam a maior dispersão dos dados no final da campanha do canal. Também, é mais um indicativo de que a oxidação não é menor para corridas vazadas em canal com geometria totalmente cilíndrica (canal novo ou recém reparado).

4.5. Dados Coletados e Correlações com Vida de Canal

A figura 4.13 mostra a relação entre a quantidade de aço produzida e a vida de canal.

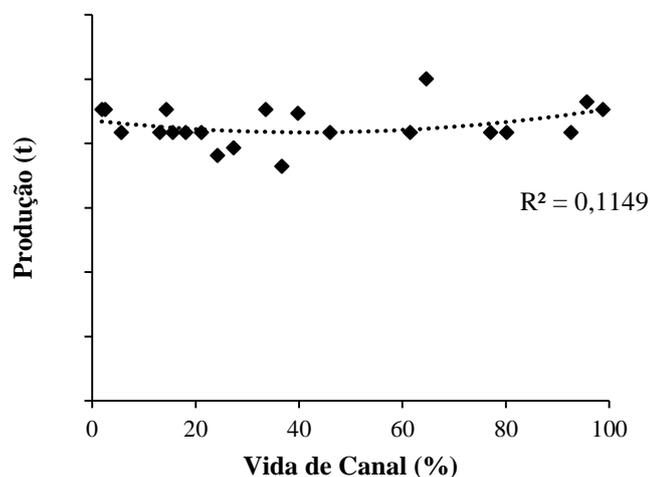


Figura 4.13. Relação entre quantidade de aço produzida e vida de canal.

Ao analisar a figura 4.13, nota-se que não há uma aderência relevante entre a massa de aço produzida e a vida de canal. A produção média das corridas analisadas foi de 21,4 toneladas com desvio padrão de 1,5, valores que estão de acordo com a prática operacional observadas nesse processo.

Como observado no trabalho de Kirschen et al (2008), para canais cilíndricos ocorre arraste de escória no canal de vazamento, fazendo com que a visualização da passagem de escória pelo operador responsável pelo vazamento ocorra somente quando uma grande quantidade de escória já tenha sido vazada emulsificada com o aço líquido. Com isso, uma prática comum é o operador do forno elétrico finalizar o vazamento com base no peso vazado, que geralmente não varia, e não pela visualização da passagem de escória.

Observa-se também que apesar da quantidade de aço não variar significativamente, a adição de elementos desoxidantes é maior para canais no início e final de vida útil, evidenciando que a concentração de oxigênio nessas corridas é maior.

A figura 4.14 apresenta a relação entre o *power-off* das corridas analisadas e a vida de canal.

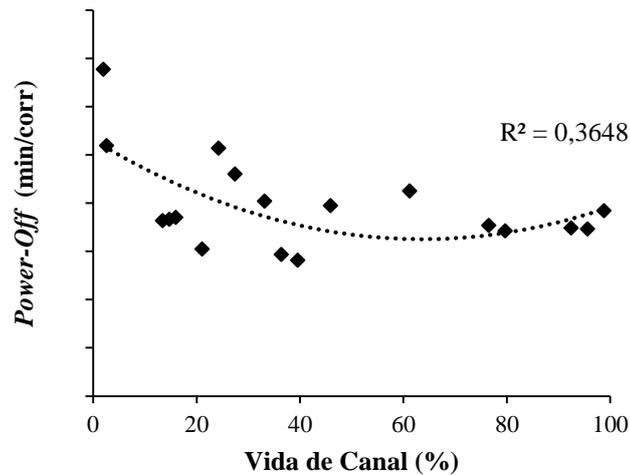


Figura 4.14. Relação entre *power-off* e vida de canal.

Observa-se na figura 4.14 que o *power-off* é maior para canal no início de operação e apresenta redução de 52% para meia vida de canal e volta a aumentar no final da vida do canal. Apesar de ser um parâmetro que tem muitas influências externas, a geometria do canal tem influência de 36% no *power-off* devido às diferenças principalmente no tempo de vazamento. Nas corridas consideradas para este estudo não houve nenhuma interrupção significativa fora da rotina normal de produção.

De acordo com Kirschen et al (2008), para geometrias de canal cilíndricas, ocorre uma separação do fluído na parede do canal devido a uma entrada de aço com ângulos “agudos”. Essa separação diminui o diâmetro efetivo do canal, aumentando o tempo de vazamento para essa geometria. Isso não é observado em canais com geometria cônica. Assim, tem-se um indício de que o canal em meia vida está sofrendo um desgaste que torna sua geometria semelhante à geometria cônica, principalmente no orifício de entrada do canal. Essa alteração na geometria pode ser observada na figura 4.15, retirada do trabalho de Mattiello (2016), que estudou o desgaste de canal EBT na mesma aciaria na qual foi realizado o presente estudo.



Figura 4.15. Aspecto de uma luva do canal EBT post-mortem. Fonte: Mattiello, 2016.

Segundo Mattiello (2016), em relação ao desgaste durante a operação, mesmo quando submetida ao limite de vida padrão da aciaria, a luva teve desgaste uniforme. Pode-se observar na figura 4.15 que tanto a parede das luvas quanto o canal de vazamento mantiveram-se íntegros. Porém, como também pode ser observado na figura 4.15, o canal teve sua forma alterada, notando-se que houve abaulamento de suas bordas, leve inclinação para o centro do mesmo e aumento do seu diâmetro, alterando sua forma ao longo das corridas. Essa alteração na geometria diminui ou até mesmo elimina a separação de fluido na parede no canal, aumentando os tempos de vazamento.

A figura 4.16 apresenta a relação entre a perda de temperatura do aço líquido entre o vazamento no forno elétrico a arco e a vida de canal.

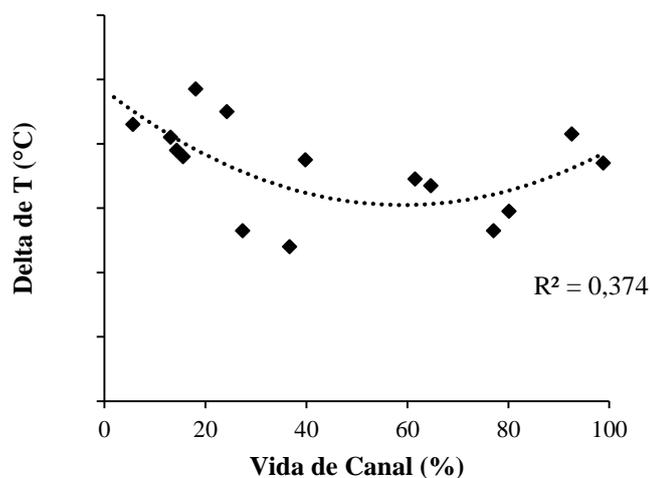


Figura 4.16. Relação entre Temperatura de vazamento FEA – Temperatura de chegada FP e vida de canal.

A figura 4.16 permite observar que para meia vida de canal a perda de temperatura é 39,9% menor em comparação com corridas vazadas em canal no início de vida, com 37% de aderência à regressão. Para essa análise, foram excluídos dados de corridas vazadas com painéis paradas, visando minimizar influência de outros fatores na correlação com a vida do canal.

Como mencionado anteriormente, a geometria de canal influencia no tempo de vazamento. Para canais em início de vida ou recém reparados, a zona de separação de fluido na parede do canal é maior, aumentando o tempo de vazamento. Com maiores tempos de vazamento pode ocorrer maior exposição do aço líquido à atmosfera sem a proteção térmica da escória, acarretando em maiores perdas de temperatura.

4.6. Análise do Refratário do Canal EBT *Post Mortem*

Após a operação, o refratário foi analisado visualmente, para fins de observação do desgaste. A figura 4.17 mostra o canal EBT antes de entrar em operação e após sua saída.



a)

b)

Figura 4.17. Canal EBT; a) antes da operação; b) após operação.

A análise visual da luva externa do canal EBT mostra que o desgaste foi uniforme e a luva não apresentou mudança na geometria. Como mostra a figura 4.15, é esperado que as luvas internas apresentem mudança na geometria e desgaste mais acentuado nas bordas superiores.

O canal apresentou diâmetro de 138 mm após operação, como mencionado anteriormente, o diâmetro inicial do canal é 120 mm. Considerando o número elevado de dias de operação, o desgaste foi considerado bom.

Com bases nas informações da literatura, infere-se que os principais mecanismos de desgaste do EBT foram: erosão pelo aço fundido, que causa uma corrosão forte e abrasão a quente devido a vazão do aço, a oxidação do aço também tem influência, porém menor; e corrosão pela escória à alta temperatura.

Análise Química

A análise química do refratário do canal EBT foi realizada em dois lugares diferentes do canal, conforme explicado na seção 3.2.6. Cada amostra foi analisada duas vezes e os resultados aqui apresentados são da média dos valores obtidos. Os resultados da análise química, em porcentagem, estão apresentados na tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3. Análises químicas das amostras de refratário do canal EBT, em porcentagem em massa.

Parte	MgO (%)	C (%)	Outros (%)
Externa	80,6	19,0	0,4
Interna	80,3	18,6	1,1

Pela análise da tabela 4.3 é possível notar que o teor de carbono desta luva foi acima do teor mínimo especificado pelo fornecedor do refratário, que é 13%. A presença de outros elementos na parte interna pode ter ocorrido devido à presença de elementos de SiO₂, Al₂O₃ e CaO, além de contaminações na amostra retirada. A presença maior de outros elementos na parte interna do canal, em princípio é pouco significativa, mas indica uma perda de MgO e grafite nesse local, também visível na difração de raios X.

Difração de Raio X

A análise de difração de raio X foi realizada em dois pontos distintos do canal EBT, como explicado nos métodos deste trabalho. As figuras 4.18 e 4.19 apresentam os resultados desta análise.

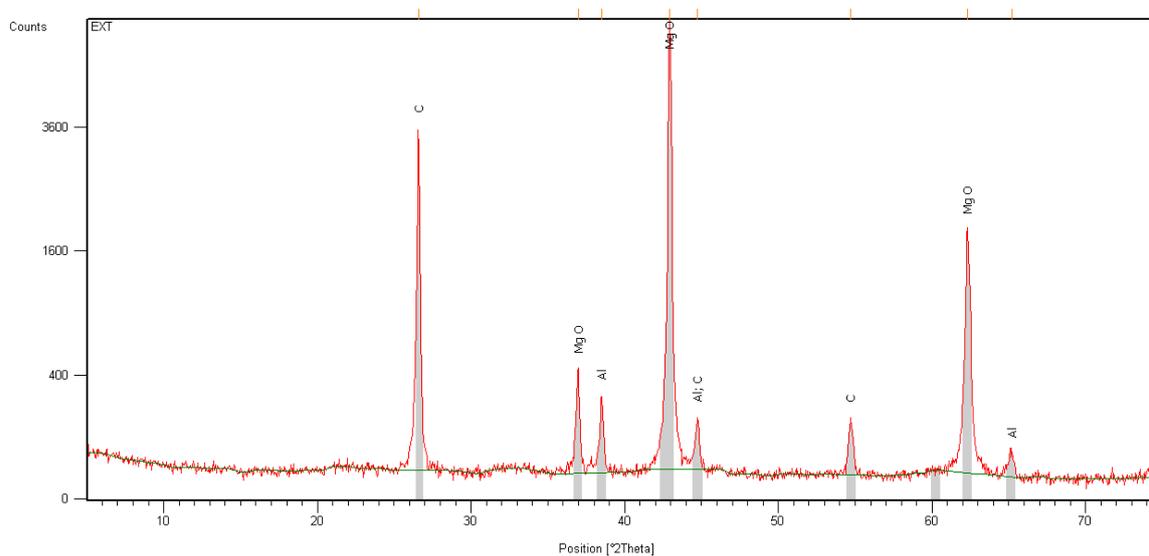


Figura 4.18. Análise de difração de raios X para amostra retirada na parte externa da sede externa do refratário do canal EBT.

Na região externa do canal, figura 4.18, a análise mostra um material de boa pureza, sem presença de contaminantes. Não houve mudanças de fases no refratário, e as fases presentes são magnésia, grafite e antioxidante de alumínio. Caracteriza-se por ser um refratário que resiste à penetração de escórias básicas, e a presença de grafite diminui a molhagem do MgO pelo silicato líquido.

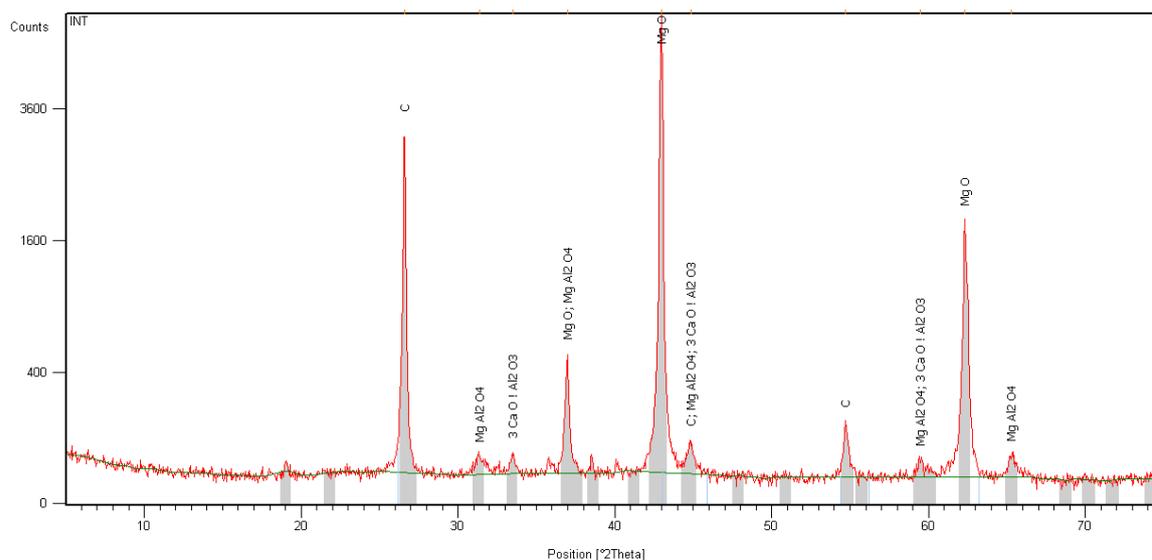


Figura 4.19. Análise de difração de raios X para amostra retirada na parte interna da sede externa do refratário do canal EBT.

A região interna do canal, como mostra a figura 4.19, por outro lado, apresentou mudança de fases devido à exposição às altas temperaturas do aço e escória. As fases presentes são magnésia, grafite, espinélio de aluminato de magnésio. A presença de espinélio está de acordo com o que se espera para esse tipo de refratário, como pode ser visto no trabalho de Mattiello (2016).

O espinélio provém da reação da magnésia com o alumínio, que é adicionado por atuar como antioxidante. Esta fase fornece propriedades interessantes aos refratários magnésínicos: não expande com a variação de temperatura, aumenta a resistência ao impacto e aumenta a resistência às escórias. Também, aumenta a resistência ao choque térmico, além de bloquear os poros à entrada de oxigênio.

A principal impureza encontrada foi CaO, que formou compostos com o Mg e Al. A solubilização do CaO no cristalito de MgO altera a razão CaO/ SiO₂, levando à formação de líquidos nos interstícios da estrutura do refratário.

Como visto na análise química das amostras, o teor de outros elementos na amostra interna do refratário foi maior que na amostra externa, mostrando que os dois resultados convergem.

4.7. Simulação termodinâmica

A fim de compreender como a escória influencia no desgaste que ocorreu no refratário do canal EBT, foram realizadas simulações termodinâmicas da escória utilizada no refino primário. Foram realizadas simulações também da escória de refino secundário para avaliação desta, no que diz respeito ao ataque às panelas, visto a influência que a passagem de escória do FEA para a panela causa nas escórias do forno-panela. A figura 4.20 abaixo mostra as porcentagens de fases versus a temperatura para uma composição química de escória do FEA.

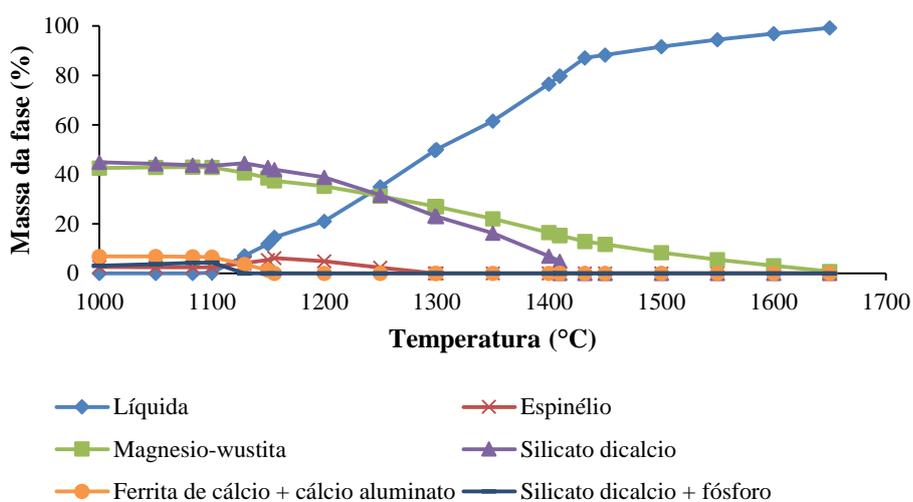


Figura 4.20. Simulação termodinâmica da escória do FEA.

A figura 4.20 mostra que o primeiro líquido se forma a 1100°C. As fases sólidas presentes são espinélio, até a temperatura de 1250°C, silicato dicálcico, até a temperatura de 1409°C, um composto de ferrita de cálcio e cálcio aluminato, até a temperatura de 1150°C, um composto de silicato dicálcico com fósforo, até a temperatura de 1100°C, e magnésio-wustita, que aparece em todas as temperaturas simuladas.

Nas temperaturas usuais de vazamento, acima de 1600°C, as fases presentes são líquido e magnésio-wustita. A composição da magnésia-wustita muda com a variação de temperatura. Em temperaturas mais baixas, o teor de FeO é mais alto e a proporção de MgO aumenta em temperaturas mais altas. Este é um comportamento típico de compostos que resultam em sistemas isomorfos.

A presença de magnésio-wustita indica a saturação de MgO da escória de forno elétrico a arco. A saturação indica que o ataque químico da escória ao refratário é minimizado.

A composição química da escória líquida está apresentada na tabela 4.4.

Tabela 4.4. Composição química da fase líquida da escória do FEA, em porcentagem em massa.

CaO (%)	FeO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)
33,81	26,38	16,41	6,72	5,42	5,26

A composição da fase líquida, vide tabela 4.4, mostra uma escória com bom nível de oxidação, indicando que o desgaste do refratário ocorreu mais preponderantemente por erosão causada pelo aço líquido.

A figura 4.21 mostra as porcentagens de fases versus a temperatura para uma composição química de escória do forno-panela.

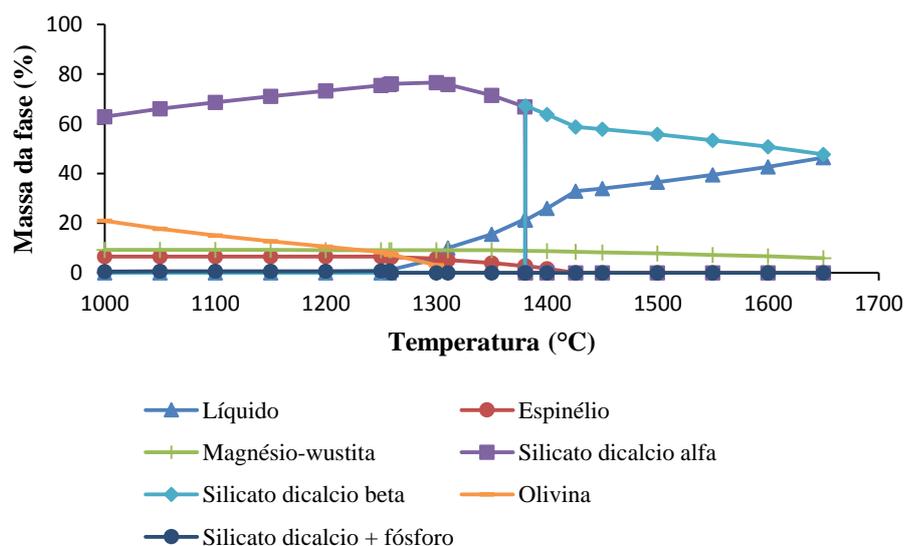


Figura 4.21. Simulação termodinâmica da escória do FP.

A figura 4.21 mostra que o primeiro líquido se forma a 1259°C. As fases sólidas presentes são espinélio, até a temperatura de 1400°C, silicato dicalcio alfa, até a temperatura de 1380°C, olivina, até a temperatura de 1300°C, silicato dicálcico beta, que se forma a partir de 1380°C, um composto de silicato dicálcico com fósforo, até a temperatura de 1257°C, e magnésio-wustita, que aparece em todas as temperaturas simuladas. A diferença entre os silicatos dicálcicos alfa e beta são apenas de estrutura cristalina.

Nas temperaturas usuais de trabalho no forno-panela, em torno de 1550°C, a simulação mostra que a escória é composta por uma fase líquida, que representa 39% do total das fases, silicato dicálcico, que representa 53%, e 8% de magnésio-wustita.

A presença preponderante de silicato dicálcico indica que a camada de *coating* formada protege o refratário da panela contra o desgaste.

A composição da fase líquida a 1550°C está apresentada na tabela 4.5 abaixo.

Tabela 4.5. Composição da fase líquida da escória do FP, em porcentagem em massa.

Al₂O₃ (%)	SiO₂ (%)	CaO (%)	FeO (%)	MgO (%)	MnO (%)
11,25	27,77	40,20	3,78	10,94	5,41

Conforme tabela 4.5, a fase líquida possui basicidade binária de 1,44, considerada boa de acordo com as práticas operacionais da aciaria. O nível de oxidação, interpretado pela soma do FeO e MnO, entretanto, é alto, e pode ter sido influenciado pela passagem de escória do FEA.

5.0 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos neste trabalho foi possível concluir:

- De acordo com os resultados obtidos notou-se que corridas vazadas com canal em meia vida de operação apresentaram menores valores de oxigênio dissolvido;
- As análises de rendimento de silício mostraram um aumento no rendimento para meia vida de canal de 28,5%, o rendimento de manganês apresentou os melhores valores quando o canal estava no início e final de operação e diminuição do rendimento de manganês para meia vida do canal foi de 26,5%;
- O consumo de silício foi 25,4% menor para canal em meia vida de operação, enquanto que o consumo de manganês foi 14,7% menor para canal na metade da vida em operação;
- A relação %Mn/ %Si do aço e a relação %FeO + %MnO da escória do forno-panela apresentaram os melhores comportamentos para corridas vazadas com canal em meia vida de operação. A relação %Mn/ %Si diminuiu 31,6% e a relação %FeO + %MnO diminuiu 50,7% para corridas vazadas nessa condição;
- A reversão de fósforo da escória para o aço apresentou diminuição de 53,4% para meia vida do canal;
- Não houve influência da vida do canal na quantidade de aço produzida, sendo este parâmetro controlado pelo peso médio vazado e não pela passagem de escória pelo canal EBT;
- A geometria cilíndrica de canal influencia no *power-off* da aciaria. Para meia vida de canal, o *power-off* apresentou diminuição de 52% devido ao menor tempo de vazamento, que está relacionado com o desgaste das luvas internas do canal. Esse desgaste também afeta a perda de temperatura que ocorre entre o vazamento e a chegada da panela no forno-panela, que apresentou os melhores resultados para canal em meia vida;
- A melhor condição de trabalho em canais cilíndricos não é em canais no início da vida e nem em canais reparados, devido ao perfil de desgaste apresentado por essa geometria de canal;

- O desgaste apresentado pelo refratário da luva externa do EBT foi uniforme e baixo. O refratário apresentou as fases esperadas na análise de difração de raios X;
- A escória do FEA apresentou bom nível de oxidação, e apesar de as fases da corrosão serem levadas pelo aço, tem-se uma indicação de que o desgaste do refratário ocorreu mais preponderantemente por erosão causada pelo aço líquido;
- A escória do FP está adequada para proteção do refratário, apesar de a fase líquida desta apresentar alto nível de oxidação;
- A oxidação da fase líquida da escória do FP pode ter sido influenciada pela passagem de escória do FEA;
- Existe uma faixa de trabalho ótima entre 40% e 60% da vida do canal. Nessa condição a passagem de escória é minimizada, e com isso têm-se um aumento do rendimento de liga e diminuição de riscos de defeitos por porosidade em tarugos.

6.0 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, afim de complementar e aprofundar este estudo, sugere-se:

- Avaliar a qualidade dos tarugos produzidos ao longo da campanha do canal EBT no que diz respeito a porosidades;
- Aprofundar os estudos do desgaste do refratário do canal;
- Avaliar o desempenho de canal EBT cônico com relação aos parâmetros avaliados neste trabalho;
- Realizar simulação matemática para entender a passagem de escória em canal EBT cônico.

7.0 REFERENCIAS

ALMEIDA, R. A. M. **Estudo de escórias de refino primário de aços com vistas a redução do consumo energético em fornos elétricos a arco.** Dissertação de mestrado - Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS, Porto Alegre, 2016. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/152746/001012847.pdf?sequence=1>> Acesso em: 23 de dez. 2017.

BAPTISTA, L. A. S. **Curso de Solidificação.** Apostila não publicada, 1970.

BRUCH, R. **Estudo das perdas térmicas de panelas entre o vazamento no forno elétrico a arco e o transporte para o forno-panela.** Dissertação de mestrado - Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS, Porto Alegre, 2012. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/60805/000859367.pdf?sequence=1> > Acesso em: 27 de dez. 2017.

CHRIST, F. S. **Melhorias no aquecimento de panelas de aço de uma aciaria elétrica.** Dissertação de mestrado - Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1801/000308633.pdf?sequence=1>> Acesso em: 27 de dez. 2017.

BIELEFELDT, W. V. **Tratamento de Inclusões Não-Metálicas com Cálcio nos Aços SAE 1141 e SAE 8620.** Tese de Doutorado - Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS, Porto Alegre, 2009. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10183/17027>> Acesso em: 02 de dez. 2017.

CHEMALE, I. T. **Desoxidação no forno-panela frente aos parâmetros de agitação do aço líquido.** 46º Seminário de Aciaria, ABM Week, Rio de Janeiro, 2015.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

CRUZ, R. T. **Avaliação da camada protetora de silicato Dicálcico em refratários doloma-c empregados na produção de aço**. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS, Porto Alegre, 2016. Disponível em:

<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/142479/000993674.pdf?sequence=1>>

Acesso em: 02 de dez. 2017.

FALCONI, V.C. **Tecnologia de Fabricação de Aço Líquido**. UFMG, 1980.

FINARDI, J. **Inclusões em aços: seu efeito e seu controle**. Apostila não publicada, 1984.

FRUEHAN, R.J. **Ladle Metallurgy Principles and Practices**. Iron and Steel Society, 1985.

GERDAU - **Aciaria ACI-513 Processo em Forno Elétrico a Arco**. Sistema de Capacitação Industrial, Revisão 2 09/02/2012.

GERDAU- **Aciaria ACI-512 Fundamentos de Escórias**. Sistema de Capacitação Industrial, Revisão 3 30/08/2013.

GERDAU – **Aciaria ACI-508 Lingotamento Contínuo**. Sistema de Capacitação Industrial, Revisão 0, 29/08/2008.

GHOSH, A. **Secondary Steelmaking – Principles and Applications**. CRC Press LLC, 2001.

HUPPES, R. M.; **Estudo de Alternativas para a Identificação e Controle da Desoxidação do Aço no Forno-Panela**. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola de Engenharia, Departamento de Metalurgia, UFRGS. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/156008/001013476.pdf?sequence=1>> Acesso em: 04 de nov. 2017.

KOR, G. J. W. et al. **The Making, Shaping and Treating of Steel**. AISE Steel Foundation, Pittsburgh, 1998.

KIRSCHEN, M.; RAHM, C.; HACKL, G. **Steel flow characteristics in CFD improved EAF bottom tapping systems**. Archives of Metallurgy and Materials. 2008; v. 53: p365-371.

KLIEMANN, L. P. **Estudo da formação de trincas transversais faciais em aços peritéticos produzidos no lingotamento contínuo**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/85031/000905433.pdf?sequence=1>>

MATTIELLO, J. **Estudo de caracterização e análise de desempenho operacional dos principais componentes refratários utilizados em fornos elétricos a arco**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/148670/001002538.pdf?sequence=1>> Acesso em: 04 de nov. 2017.

MOURÃO, M. B et al. **Introdução a Siderurgia**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

RIZZO, E. M. S. **Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Fornos Elétricos a Arco**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

ROSSI, D. **Influência da proporção entre as vazões de oxigênio e gás natural do sistema de injeção de um forno elétrico a arco no consumo de energia total**. 45º Seminário de Aciaria- Internacional, Porto Alegre, 2014.

SATO, C. T. **Simulação do comportamento escória / aço durante o esgotamento da panela através de modelagem física**. Dissertação de Mestrado- Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. UFMG, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MAPO-7R5NH7/cezar_sato.pdf?sequence=1> Acesso em: 04 de nov. 2017.

SCAL, M. W. **Porosidades (pin e blowholes) em Tarugos**. Informe Técnico Processo Aciaria, Cosigua, 2010.

SERRA J.G, SCAL M.W, FERREIRA F. **Modelagem da Formação de Porosidades na Solidificação de Tarugos pelo Programa THERMO-CALC**. Tecnologia Metalúrgica, Materiais e Mineração, São Paulo, 2011, 99-108.

TURKDOGAN E.T. **Fundamentals of Steelmaking**. The Institute of Materials, Londres, 1996.

VIDOLIN R.L, SOUZA B.R.M. **Defeitos em Tarugos** – Apostila sobre Defeitos em Tarugos Lingotados. Gerdau Araçariguama, São Paulo, 2010.

VIEIRA, D. **Estudo de escórias de refino primário visando reduzir o consumo energético do forno elétrico a arco**. Porto Alegre, 2014. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola de Engenharia, Departamento de Metalurgia, UFRGS. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/114476/000953385.pdf?sequence=1>> Acesso em: 04 de nov. 2017.

VIEIRA, D. **Análise comparativa da composição química de aço e escória e rendimento metálico de um fea entre parâmetros de carregamento e injeções distintos**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS, Porto Alegre, 2017. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/165264/001027546.pdf?sequence=1> > Acesso em: 23 de dez. 2017.

—. “Notas de Aula - Siderurgia II.” Desoxidação. Porto Alegre: UFRGS, 2016.