

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

Departamento de Metalurgia

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES VAZÕES DE OXIGÊNIO E TEMPOS DE LANÇA
NOS PARÂMETROS DE PROCESSO DE UM FORNO ELÉTRICO A ARCO

João Paulo Vieira Bittencourt

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto Alegre
2015

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha irmã pelo apoio incondicional e valores transmitidos, também a todos os membros da minha família.

Aos amigos e colegas de curso pelos momentos de alegria que compartilhamos juntos e que nunca sairão da minha memória.

A todos os colegas do GES, em especial ao professor Alexandre da Silva Rocha pela experiência na área de pesquisa que me foi proporcionada durante a graduação, e a Juliana Zottis pelo aprendizado, companheirismo e fiel amizade.

A toda equipe da Aciaria da Gerdau Riograndense, e algumas pessoas que contribuíram de maneira especial na realização deste trabalho e no meu desenvolvimento como profissional e pessoa: Daniel Rossi por tornar possível a realização do teste e auxiliar na discussão dos resultados, Alexandre Libório John pelo auxílio na discussão dos resultados, Eduardo Lobo Virote pela ajuda na obtenção dos dados, e também aos colegas Luiz Pedro Kliemann, Henrique José Bortolotti Martins, e João Filipe de Sousa Nobrega pelos ensinamentos e pela sempre agradável convivência durante o estágio.

Ao professor Wagner Viana Bielefeldt pela orientação, disponibilidade e pela incansável dedicação em busca de um curso de graduação de melhor qualidade.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	I
SUMÁRIO.....	II
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	VII
RESUMO.....	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. PRINCIPAIS ROTAS DE PRODUÇÃO DO AÇO	2
2.2. ACIARIA ELÉTRICA.....	2
2.2.1. <i>Pátio de Sucata</i>	3
2.2.2. <i>Forno Elétrico a Arco</i>	5
2.2.2.1. Preparação do cestão e carregamento	7
2.2.2.2. Perfuração e fusão	8
2.2.2.3. Refino.....	10
2.2.3. <i>Forno-panela</i>	14
2.2.4. <i>Lingotamento contínuo</i>	16
2.3. ENERGÉTICOS UTILIZADOS NO FORNO ELÉTRICO A ARCO.....	17
2.3.1. <i>Energia elétrica</i>	18
2.3.2. <i>Energia química</i>	19

2.3.2.1.	Energia de queimadores	20
2.3.2.2.	Energia de redução	20
2.3.2.3.	Energia de oxidação	20
2.3.2.4.	Energia de pós-combustão	25
2.4.	INJEÇÃO DE OXIGÊNIO NO FEA	25
2.4.1.	<i>Injeção de oxigênio em modo lança com injetores supersônicos</i>	<i>26</i>
2.4.1.1.	Jato supersônico convencional	28
2.4.1.2.	Jato supersônico coerente	28
2.4.2.	<i>Influência da vazão do jato sobre o comprimento coerente.....</i>	<i>30</i>
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1.	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	31
3.2.	COLETA DE DADOS.....	34
3.3.	METODOLOGIA DE REALIZAÇÃO DO TESTE.....	36
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1.	VALIDAÇÃO DE DADOS	38
4.2.	PARÂMETROS DE PROCESSO DO FORNO ELÉTRICO A ARCO.....	39
4.3.	RESULTADOS POR COMPONENTE DO CONSUMO DE ENERGIA TOTAL.....	40
4.4.	CONSUMO DE OXIGÊNIO, CARBONO E FÓSFORO DE VAZAMENTO	42
5.	CONCLUSÕES	44
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
7.	REFERÊNCIAS.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: principais rotas de produção do aço.....	2
Figura 2.2: fluxograma de processo de uma aciaria elétrica.	3
Figura 2.3: representação esquemática do FEA.	6
Figura 2.4: representação esquemática das etapas do FEA: carregamento (a), fusão e formação da escória (b), refino e retirada da escória (c), vazamento (d).....	7
Figura 2.5: desenho esquemático das etapas da fusão da carga em um FEA.	9
Figura 2.6: relação entre índice de espumação e viscosidade efetiva.	11
Figura 2.7: influência do FeO, MgO e basicidade na efetividade da espumação da escória.	12
Figura 2.8: solubilidade do MgO para escórias com dupla saturação(CaO e MgO) a 1600 °C.....	13
Figura 2.9: ilustração esquemática de um forno-panela.....	15
Figura 2.10: desenho esquemático do processo de lingotamento contínuo.....	16
Figura 2.11: balanço energético em um FEA.	18
Figura 2.12: vista superior de um FEA mostrando regiões preferenciais de dissipação de calor pelos eletrodos (regiões quentes, em amarelo) e não preferenciais (regiões frias, em azul).....	19
Figura 2.13: diagrama de Ellingham.....	22
Figura 2.14: perfil de oxidação dos elementos ao longo de uma corrida no FEA. 23	
Figura 2.15: distribuição do oxigênio disponível versus teor de carbono no aço..	24
Figura 2.16: consumo de energia elétrica em kWh/t <i>versus</i> consumo de oxigênio em m ³ /t.	26

Figura 2.17: modelo de bocal supersônico convergente/divergente.	27
Figura 2.18: jato supersônico convencional e jato supersônico coerente.	27
Figura 2.19: regiões típicas de um jato supersônico convencional.	28
Figura 2.20: jato supersônico com chama de proteção.....	29
Figura 2.21: perfil de um jato coerente com chama <i>shroud</i>	29
Figura 2.22: efeito da vazão do jato no comprimento coerente.....	30
Figura 3.1: linhas de gases no bico do injetor de jato coerente.	33
Figura 4.1: cartas de controle de valores individuais do consumo de oxigênio total nos injetores multifuncionais.....	38
Figura 4.2: distribuição do consumo de energia total.	39
Figura 4.3: variação dos parâmetros de processo do forno no cenário TESTE comparativamente ao cenário BASE.	39
Figura 4.4: variação por componente do consumo de energia total no cenário TESTE comparativamente ao cenário BASE.	41
Figura 4.5: <i>power on versus</i> consumo de gás natural.....	42
Figura 4.6: variação no consumo de oxigênio dos injetores multifuncionais, carbono e fósforo de vazamento no cenário TESTE, comparativamente ao cenário BASE.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: reações químicas exotérmicas durante o refino no FEA.	21
Tabela 3.1: dados do forno elétrico a arco.	31
Tabela 3.2: dados do forno-panela.....	31
Tabela 3.3: dados do sistema de injeção (injetores multifuncionais).....	32
Tabela 3.4: dados do sistema de injeção (manipulador de lanças).....	32
Tabela 3.5: modos de operação do sistema de injeção.	33
Tabela 3.6: cenários testados.	36
Tabela 3.7: insumos e seus poderes caloríficos.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

°C	Graus celsius
°F	Graus fahrenheit
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Alumina
BOF	Basic oxygen furnace
C	Carbono
CaO	Óxido de cálcio
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Cr	Cromo
Cr ₂ O ₃	Cromita
D	Diâmetro
DOE	Design of Experiments
DRI	Direct reduced iron
Fe	Ferro
FEA	Forno elétrico a arco
FeO	Óxido de ferro
FP	Forno-panela
GN	Gás natural
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
K	Kelvin
kg	quilograma
kg/min	quilograma por minuto
kg/t	quilograma por tonelada

kV/cm	quilovolt por centímetro
kWh/Nm ³	quilowatt hora por normal metro cúbico
kWh/t	quilowatt hora por tonelada
LD	Linz-Donavitz
m	Metro
m/s	Metros por segundo
m ³	Metro cúbico
min/cor	Minuto por corrida
mm	Milímetro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MqO	Óxido de magnésio
MVA	Megavolt-ampere
MW	Megawatt
N ₂	Nitrogênio
Nm ³	Normal metro cúbico
Nm ³ /h	Normal metro cúbico por hora
Nm ³ /t	Normal metro cúbico por tonelada
O ₂	Oxigênio
P	Fósforo
Pa	Pascal
pCO ₂	Pressão de CO ₂
Si	Silício
SiO ₂	Sílica
t/m ³	Tonelada por metro cúbico
ΔG ^o	Energia livre de Gibbs no estado padrão

RESUMO

O cenário recente da indústria siderúrgica no Brasil se caracteriza pelo forte esforço das empresas em melhorar seu desempenho, visando tornar seus produtos competitivos no cenário mundial. Para tanto, algumas medidas precisam ser tomadas, como: aumento da produtividade, redução de custos e aumento na eficiência dos processos. Em aciarias elétricas, 30% do custo operacional total se dá pelo consumo de energéticos utilizados no forno elétrico a arco. Esses energéticos podem ser divididos em energia elétrica e química, caracterizando-se a química principalmente pela energia liberada na oxidação de alguns elementos. Neste estudo, foram feitas variações de parâmetros dos injetores multifuncionais responsáveis pelo fornecimento de oxigênio para o banho líquido. O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência nos principais parâmetros de processo de um forno elétrico a arco variando *setpoints* de vazão de oxigênio principal e tempos de injeção no chamado modo Lança + dos injetores multifuncionais. Para isso, foram criados dois cenários, um operando com menor vazão e maior tempo de injeção, e um segundo operando com maior vazão e menor tempo de injeção, de modo que se mantenha a mesma quantidade de oxigênio injetado no modo Lança +. Os resultados foram coletados e tratados estatisticamente no software Minitab 14 para avaliar a estabilidade do processo durante a realização do teste. O cenário que operou com maior vazão em menor tempo mostrou reduções significativas nos tempos de *Power On* (1,38% em média), o que levou a uma também considerável redução no consumo de gás natural (3,91%). Também se observou redução no consumo de coque (23,68%), mostrando um forte indício da influência da maior vazão na eficiência de espumação, podendo-se associar a maior agitação do banho, o que favorece a cinética das reações.

Palavras-chave: injeção de oxigênio, processo de FEA, escória espumante, energia total.

ABSTRACT

The recent scenario of the steel industry in Brazil is characterized by the strong efforts of companies in improving performance, in order to make their products competitive on the world stage. Therefore, some actions need to be taken, such as productivity optimization, costs reduction and improving process efficiency. In electric steelmaking, 30% of the total operating cost is through energy consumption used in the electric arc furnace. Such energy can be divided into electrical and chemical energy, which is characterized mainly by the chemical energy released in the oxidation of some elements. In this study, changes were made in parameters of oxygen injectors responsible for providing oxygen to the liquid bath. The object of this work was to evaluate the effect on the major process parameters of an electric arc furnace ranging main oxygen flow rate setpoints and injection times in an oxygen injector. For this there were two scenarios, one operating at lower flow rate and higher injection time, and a second operating with higher flow rate and shorter injection time in order to maintain the same amount of oxygen injected into the oxygen injector. The results were collected and statistically processed in Minitab 14 software to evaluate the process stability during testing. The scenario that operated at higher flow rate in shorter injection time showed significant reductions in power on times (1.38% on average), which also led to a considerable reduction in consumption of natural gas (3.91%). Also observed a reduction in the consumption of coke (23.68%), showing a strong indication of the influence of higher flow rate in foaming efficiency of slag, and may be associated with the greatest agitation of the bath, which favors the kinetics of reactions.

Keywords: oxygen injection, EAF process, foaming slag, energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

Segundo a World Steel Association (2015), a produção de aço via aciaria elétrica representou cerca de 23% de um total de 33,9 milhões de toneladas produzidas no Brasil em 2014.

O processo do forno elétrico a arco (FEA) é um processo intensamente energético, consumindo uma quantidade muito grande de recursos. Sua principal matéria-prima é a sucata ferrosa, a qual exige elevados aportes energéticos para fundir e ser processada na aciaria elétrica. Essa fusão é dada no FEA, utilizando-se de duas fontes principais de energia: elétrica e química. A energia elétrica é aplicada diretamente através dos eletrodos de grafita, e a química, através das reações de oxidação que ocorrem no banho líquido.

A máxima produtividade do Forno Elétrico a Arco é atingida com a obtenção do maior rendimento utilizando o mínimo de recursos. Para tanto, deve-se investigar até que parte a energia que entra no forno é consumida e o ponto em que passa a ser desperdiçada, causando perdas (OPFERMANN 2008).

Com o objetivo de entender melhor o comportamento de alguns dos principais parâmetros de processo de um forno elétrico a arco, foi realizado um teste aumentando o *setpoint* de vazão de oxigênio principal e diminuindo o tempo de injeção no modo Lança + dos injetores multifuncionais, de maneira a manter a mesma quantidade de oxigênio injetada. O resultado do teste foi mostrado através da variação dos principais parâmetros de processo no cenário TESTE comparativamente ao cenário BASE.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRINCIPAIS ROTAS DE PRODUÇÃO DO AÇO

A produção de aço no cenário mundial divide-se em duas rotas principais: usinas integradas com conversores a oxigênio (LD/BOF), onde se produz aço a partir do minério de ferro, e usinas semi-integradas com fornos elétricos a arco (FEA/EAF), onde a matéria-prima empregada é sucata ferrosa, ferro-gusa sólido e, havendo disponibilidade, ferro-esponja (DRI). Existem outras rotas como a de redução direta (RD), e de redução-fusão (RF) (Figura 2.1).

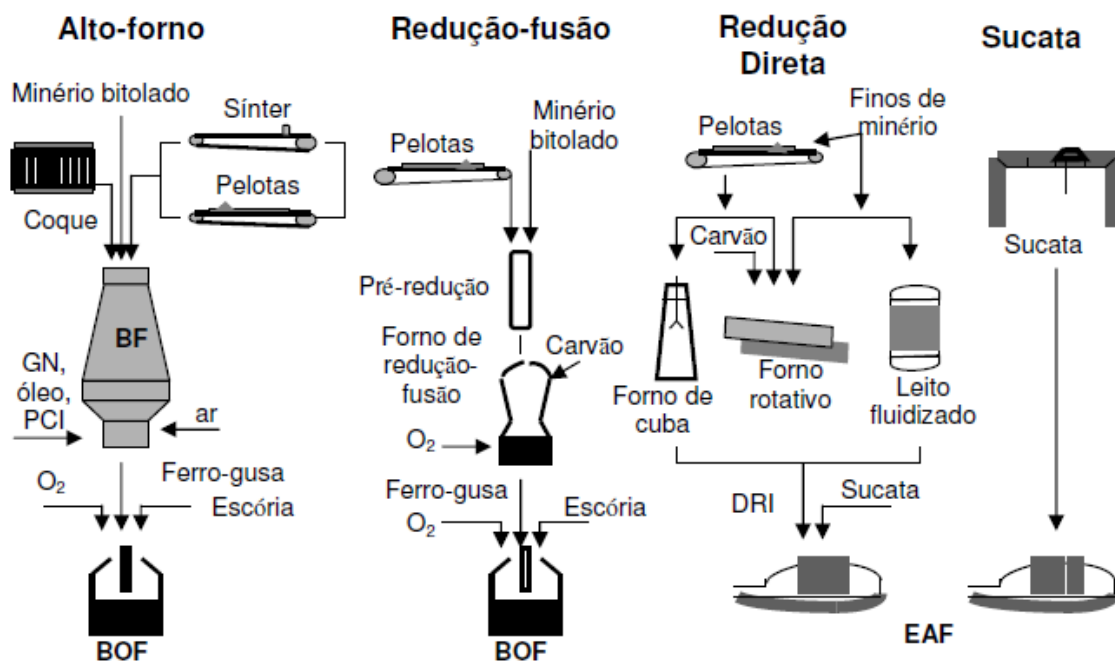


Figura 2.1: principais rotas de produção do aço.

Fonte: CGEE Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2008).

2.2. ACIARIA ELÉTRICA

A aciaria elétrica é o local onde se produz aço a partir da fusão de uma carga metálica ferrosa e fundentes em fornos elétricos a arco. Ela é geralmente composta pelo pátio de sucata, forno elétrico a arco, forno-panela (FP) e lingotamento contínuo (LC) (ROSSI, 2014). A figura 2.2 ilustra o fluxograma de processo de uma aciaria elétrica.

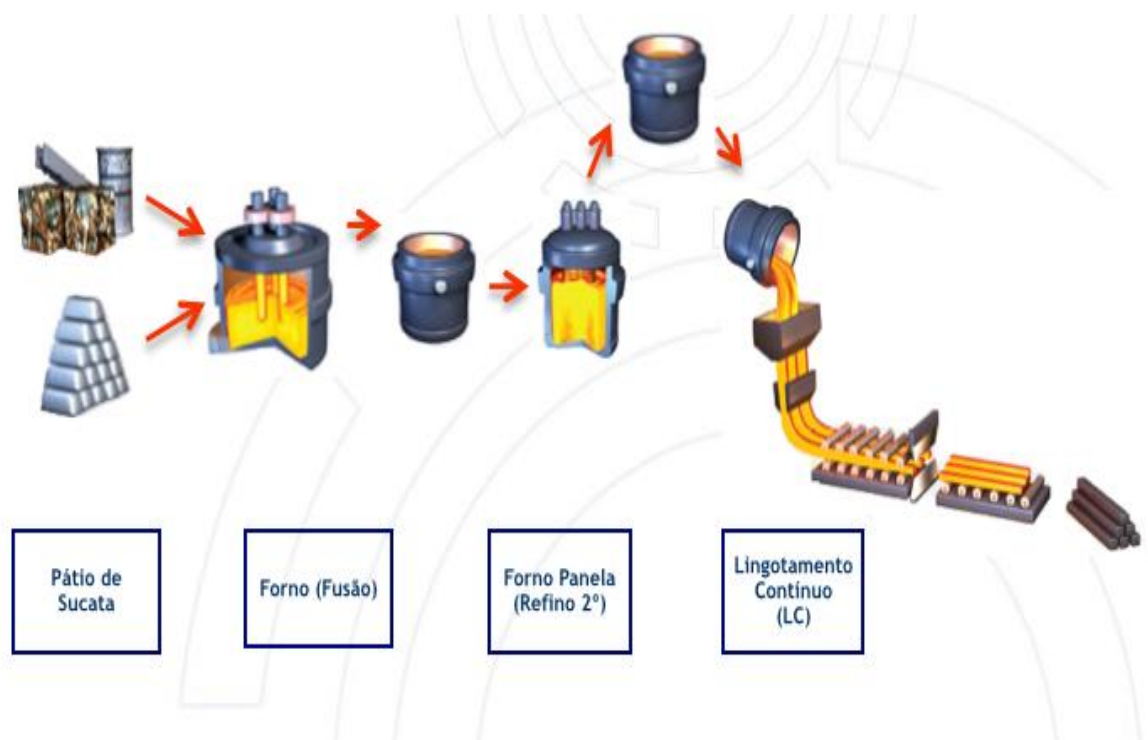


Figura 2.2: fluxograma de processo de uma aciaria elétrica.

Fonte: Gerdau (2015).

2.2.1. Pátio de Sucata

O processo de fabricação do aço em uma aciaria elétrica inicia no pátio de sucata, setor responsável pela classificação, processamento, e armazenamento das matérias-primas básicas (sucata ferrosa, ferro-gusa, e cales).

A norma ABNT NBR 16229:2013 estabelece os requisitos para encomenda, fornecimento e classificação exclusivamente dos diversos tipos de sucata de ferro e aço. As sucatas podem ser classificadas de acordo com os seguintes parâmetros:

- Origem
 - Industrial: sucata resultante de qualquer processamento industrial;
 - Obsolescência: Sucata resultante de todos os materiais considerados obsoletos e irrecuperáveis para o uso que se destinavam originalmente.

- Características físicas
 - Leve: densidade aparente inferior ou igual a $0,6 \text{ t/m}^3$;
 - Pesada: densidade aparente superior a $0,6 \text{ t/m}^3$.

- Composição química (elementos de liga)
 - Não ligada comum: sucata de aço cujos elementos residuais não excedam os seguintes teores: 0,10% Ni, 0,10% Cr, 0,10% Mo, 1,00% Mn, 0,04% P, 0,05% S, a soma de todos os demais elementos não pode ultrapassar 0,50%;
 - Não ligada especial: sucata de aço cujos elementos residuais não excedam os seguintes teores: 0,20% Ni, 0,20% Cr, 0,10% Mo, 1,65% Mn, 0,04% P, 0,05% S, a soma de todos os demais elementos não pode ultrapassar 0,50%;
 - Baixa liga: sucata de aço em que a soma dos teores dos elementos de liga não ultrapasse 5 %, devendo ser separada por qualidade específica de cada aço;
 - Alta liga: Sucata de aço em que a soma dos teores dos elementos de liga ultrapasse os 5 %, devendo ser separada por qualidade específica de cada aço.

Outra categoria de sucata é a de retorno interno (gerada pela própria usina). Nessa categoria incluem-se desde as sucatas provenientes da recuperação da escória e perdas de aço líquido durante o processo, até despontes do lingotamento, laminações e perdas em produtos acabados como barras, perfis e arames trefilados (ROSSI, 2014). Segundo John (2009), a disponibilidade desse tipo de sucata está em constante declínio em função da melhoria contínua que vem sendo obtida no processo da aciaria, gerando cada vez menos perdas.

Além de sucata, também é utilizado ferro-gusa sólido, considerado uma matéria-prima de suma importância no processo por elevar a produtividade e possibilitar a produção de aços mais nobres, porém, seu elevado custo é um fator

limitante a sua utilização. Suas principais características são: alta densidade, alto teor de carbono, e baixa quantidade de residuais metálicos.

Após a classificação, alguns tipos de sucata necessitam de processamento, de forma a aumentar sua densidade e retirar impurezas, viabilizando e/ou aperfeiçoando seu uso nos fornos elétricos a arco. Os principais tipos de processamento de sucata são:

- Shredder: equipamento robusto e de alta produtividade, composto por esteiras alimentadoras, moinho de martelos, grelhas, separadores por densidade e magnéticos, que tritura a sucata e atua na retirada de impurezas como materiais orgânicos e terra, além de materiais não ferrosos como o alumínio e o cobre;
- Prensa pacote: prensa utilizada para formar pacotes de sucata, elevando sua densidade.
- Prensa tesoura: semelhante à prensa pacote, podendo adicionalmente cortar a sucata através de uma tesoura hidráulica do tipo guilhotina, em alguns casos contém um sistema vibratório acoplado para remoção de impurezas.
- Tesoura móvel: implemento acoplado ao braço de máquinas escavadeiras, composto por duas mandíbulas (inferior e superior) e lâminas de corte.
- Oxicorte: utilizado para cortar sucatas de grandes dimensões através de uma chama oxidante, promovendo o corte da sucata através de sua oxidação catastrófica.

A sucata, ferro-gusa e cales, depois de estarem devidamente adequados e prontos para consumo, são separados e dispostos em locais específicos denominados baias no pátio de preparação do cestão (PPC). A separação nas baias é feita de acordo com seu tamanho, densidade, procedência e composição química.

2.2.2. Forno Elétrico a Arco

Equipamento responsável pela fusão da carga do cestão e refino primário (descarburação e desfosforação) do aço líquido. Composto por uma carcaça

metálica revestida com material refratário e painéis refrigerados, abóboda, sistema de basculamento e exaustão de gases, e eletrodos de grafita (figura 2.3). As etapas no processo de um forno elétrico a arco podem ser subdivididas nas seguintes etapas: preparação do cestão, carregamento, fusão, refino e vazamento (figura 2.4).

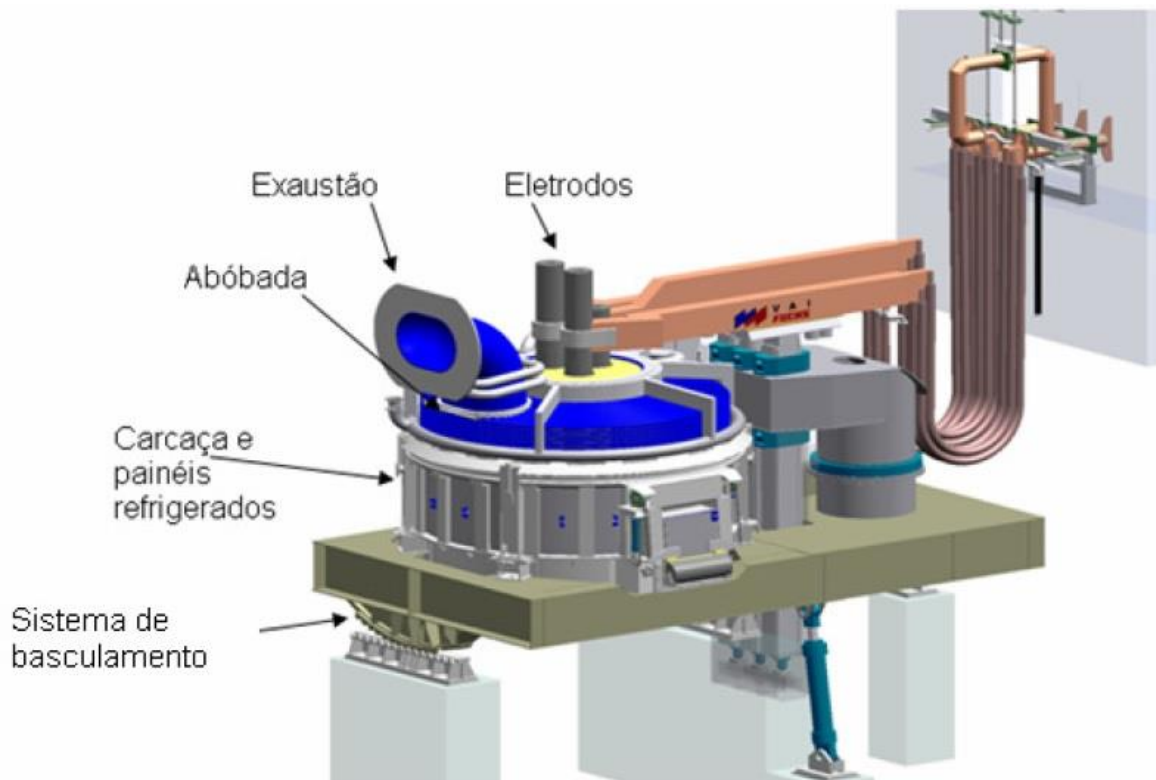


Figura 2.3: representação esquemática do FEA.

Fonte: Curso de Aciaria Elétrica ABM (2007).

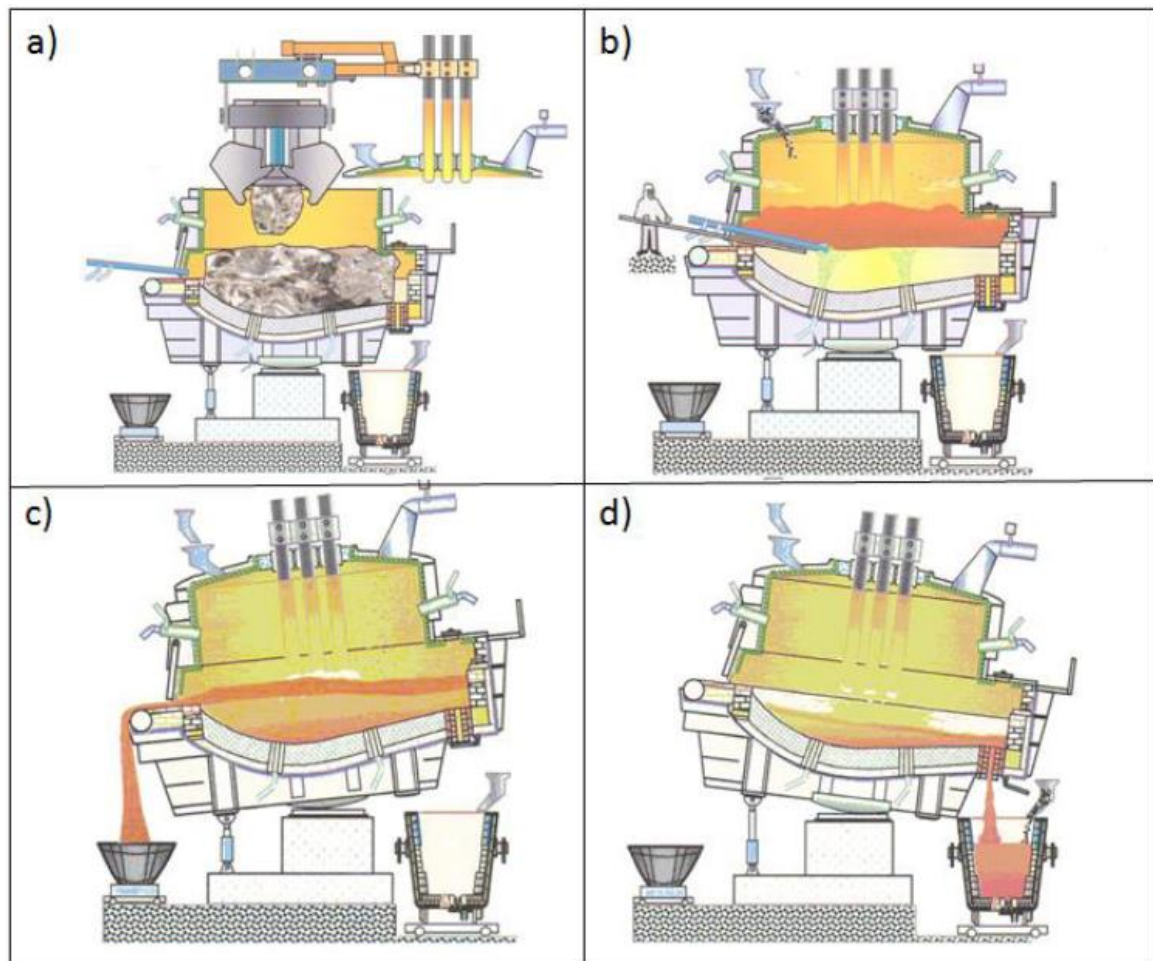


Figura 2.4: representação esquemática das etapas do FEA: carregamento (a), fusão e formação da escória (b), refino e retirada da escória (c), vazamento (d).

Fonte: RIZZO (2005).

2.2.2.1. Preparação do cestão e carregamento

A preparação do cestão é uma operação muito importante, não apenas para garantir a composição química do aço, mas também para proporcionar boas condições de fusão da carga e garantir maior segurança operacional e baixo custo no FEA (ROSSI, 2014). A sucata deve ser estratificada dentro do cestão de maneira que se obtenha a máxima produtividade sem danificar o equipamento.

Na camada inferior do cestão recomenda-se utilizar sucata leve (densidade entre 0,25 e 0,55 t/m³), a fim de amortecer o impacto da queda de toda a massa do cestão sobre a carcaça inferior do forno, assim, protegendo o material refratário da soleira. Esta camada sofrerá rápida fusão por ter grande relação área/volume e estar em contato com o fundo úmido (aço líquido + escória) da corrida anterior.

Acima dessa camada devem ser colocadas as sucatas pesadas (densidade acima de $1,1 \text{ t/m}^3$), compactando a camada inferior de sucata leve e aumentando a densidade de carregamento. A rápida fusão da primeira camada pode ocasionar em um arriamento súbito de grandes peças de sucata, provocando o deslocamento de toda a carga para baixo, o que, poderia levar a quebra de eletrodo. Outra justificativa para este arranjo é minimizar a baixa taxa de fusão da sucata pesada, devido à baixa relação área/volume torna-se difícil ou até mesmo incompleta a sua fusão durante toda a corrida.

Na terceira camada é colocado o ferro-gusa e os carburantes. Fortes et al (2011) analisaram taxas de fusão de diversos materiais utilizados no cestão e observou que apesar do ponto de fusão do ferro-gusa ser mais baixo que o da maior parte das sucatas, sua taxa de fusão é equivalente às taxas de sucatas pesadas pela sua alta densidade e pela possibilidade do fenômeno de encapsulamento, citado em Rossi (2014).

A quarta camada deve ser composta por sucatas de densidade média misturadas com pacotes, evitando o seu deslocamento durante a fusão (JOHN, 2009).

A última camada deve ser feita com sucata leve, de rápida fusão, visto que no início do processo é utilizado um arco curto de baixa potência para evitar que o calor por irradiação incida sob a abóbada e facilitar a penetração dos eletrodos. Rossi (2014) atenta para a presença de materiais isolantes (madeira e borracha) nessa camada, pois esses podem causar quebra de eletrodos por isolamento elétrico.

Os fundentes são normalmente carregados acima da sucata leve da camada da base do cestão, para que rapidamente atinjam o fundo úmido e acelerem sua dissolução (ROSSI, 2014).

Após a confecção do cestão o mesmo é transportado por meio de pontes rolantes próximo ao forno onde, após a elevação dos eletrodos e abertura da abóboda, o mesmo é centralizado acima do forno e carregado.

2.2.2.2. Perfuração e fusão

Após o carregamento, a etapa de perfuração (etapas 1 a 4 da figura 2.5) se inicia quando os eletrodos são baixados e o arco elétrico é aberto. Essa etapa é

caracterizada por intenso ruído devido à instabilidade do arco, sendo então realizada com potência reduzida e arco curto (JOHN, 2009).

Após suficiente penetração dos eletrodos na sucata, inicia-se o período de fusão e pode-se aumentar o comprimento do arco e sua potência sem gerar danos às paredes do forno e abóboda. Com um arco mais longo e vertical, o calor pode ser irradiado horizontalmente e a sucata fundida mais rapidamente (ROSSI, 2014). Essa evolução do período de fusão é mostrada entre as etapas 5 e 10 na figura 2.5.

A fusão segue até que haja espaço suficiente para receber a carga do segundo cestão, repetindo-se o processo até que o último cestão seja fundido e atinja-se uma condição de banho plano, iniciando-se a etapa de refino, que corresponde às etapas 11 e 12 da figura 2.5 a seguir .

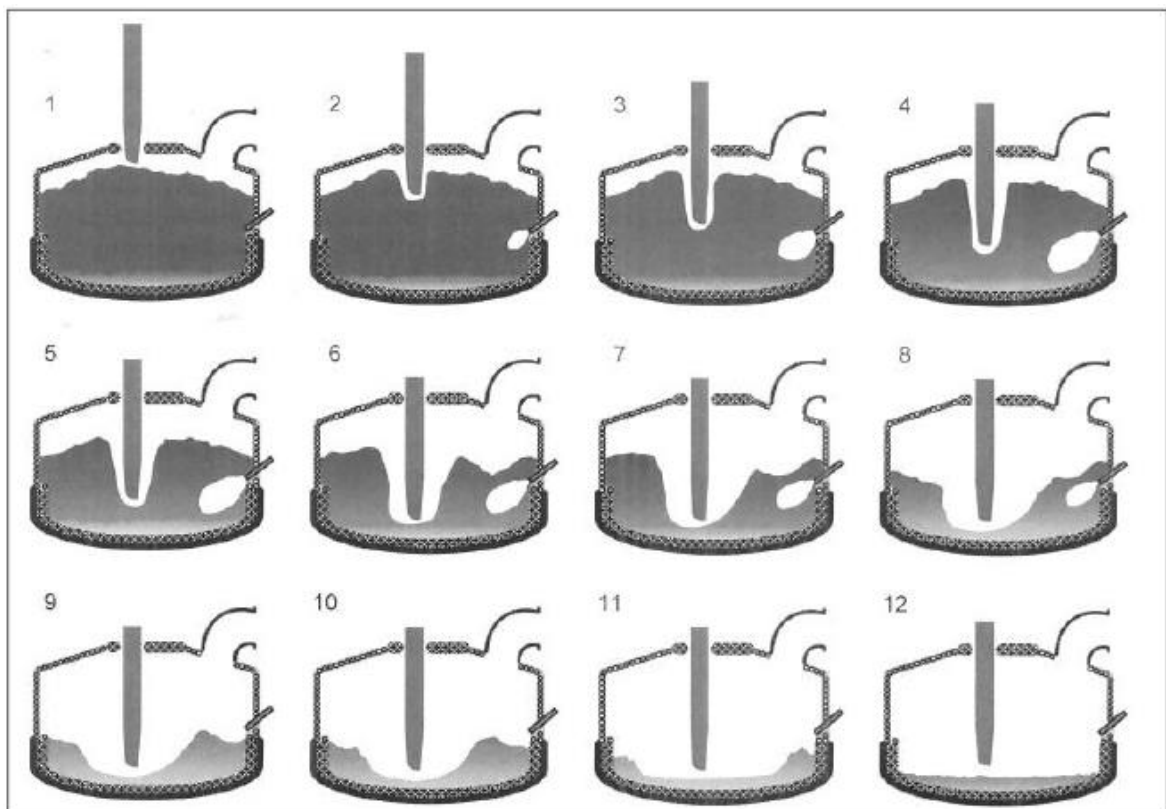


Figura 2.5: desenho esquemático das etapas da fusão da carga em um FEA.

Fonte: Gerdau (2013).

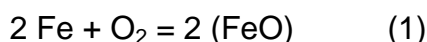
Durante toda corrida, ocorre à injeção de gases paralelamente à fusão gerada pelo arco elétrico, a qual gera energia química auxiliando no aquecimento

e fusão da carga. Esse assunto será explorado em maiores detalhes posteriormente nesse trabalho.

2.2.2.3. Refino

Após a etapa de fusão, teoricamente o banho já se encontra no estado líquido (banho plano), com a possível exposição das paredes e abóbada à irradiação do arco. A prática até meados da década de 80 era diminuir o comprimento de arco e, conseqüentemente, a potência para elevar o banho até a temperatura de vazamento, gerando perda de eficiência e produtividade. Dessa forma, foi desenvolvida a prática de escória espumante, que consiste em criar uma escória que envolva o arco elétrico, absorvendo sua irradiação e funcionando como uma barreira de proteção para os painéis refrigerados e refratários.

Para a formação da escória espumante é injetado oxigênio no banho de forma a promover a reação 1.



O FeO formado é incorporado pela escória juntamente com outros elementos oxidados (SiO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3), além do CaO e MgO com as cales. Para ocorrer a espumação dessa escória são injetados materiais carburantes como, por exemplo, finos de carvão, que reagem com o FeO segundo a reação 2.



Controlando a tensão superficial e a viscosidade da escória é possível reter o monóxido de carbono (CO) gerado no interior da mesma. Essa retenção de gás faz com que o volume da escória aumente, formando uma espuma que vai gradativamente envolvendo os eletrodos e o arco elétrico. A expansão da escória ocorre devido à dificuldade do gás em escoar através da mesma. A velocidade com que a bolha atravessa a camada de escória depende da força de empuxo, portanto, a capacidade de formação da escória espumante está diretamente ligada a essa força. Uma indicação da capacidade de formação de espuma da escória é o índice de espumação (ITO, 1989), expresso pela equação 3.

$$\text{Índice de espumação} = \text{cte} \times \eta / (\sigma \times \rho)^{1/2} \quad (3)$$

Onde:

η - viscosidade da escória;

σ - tensão interfacial;

ρ - densidade da escória;

cte - 570 (esse valor pode variar dependendo da fonte consultada).

Na figura 2.6 é possível observar a relação entre o índice de espumação e a viscosidade da escória. Conforme há o aumento da viscosidade, a escória passa de uma condição líquida para dura. Entre esses dois extremos, há um ponto ótimo onde ela possui aparência "fofa", que é a melhor condição para realizar a espumação.

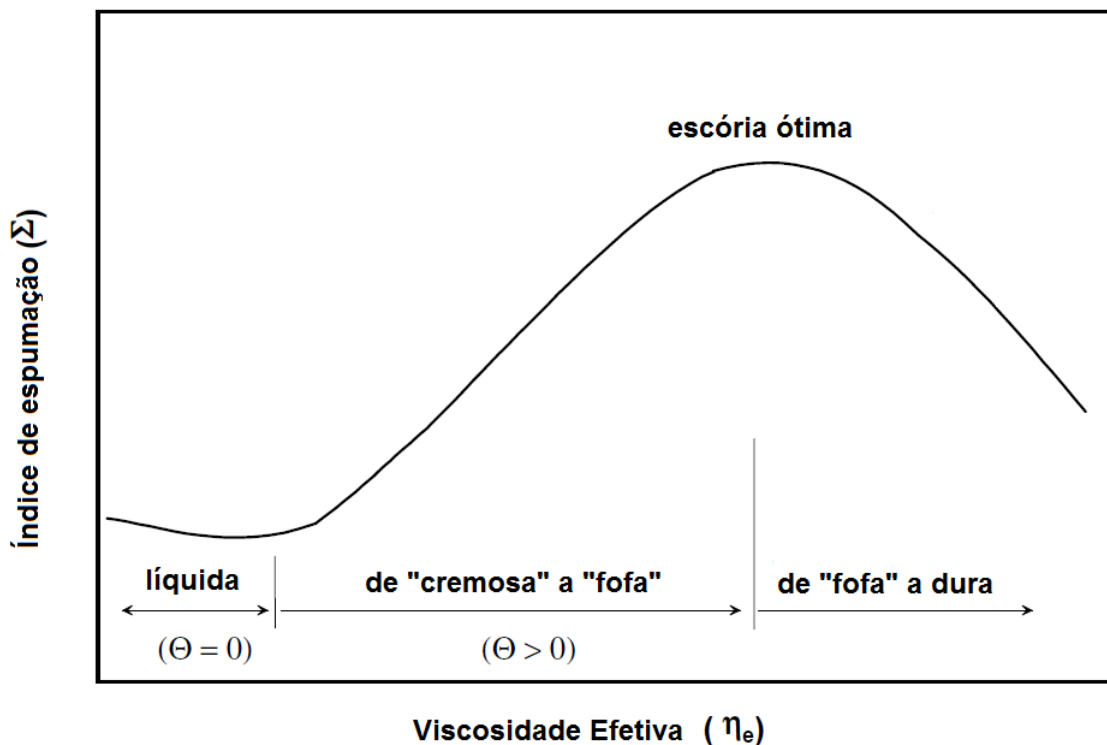


Figura 2.6: relação entre índice de espumação e viscosidade efetiva.

Fonte: Adaptado de Pretorius (1998).

Os principais elementos que exercem influência sobre as variáveis do índice de espumação e, portanto, modificam significativamente a capacidade

de espumação da escória são o FeO, a basicidade ternária (CaO, SiO₂, Al₂O₃) e o MgO presentes na mesma.

A figura 2.7 mostra a efetividade da espumação como função do teor de FeO e da basicidade ternária, enquanto na Figura 2.8 observa-se a solubilidade do MgO em função da basicidade. Quanto maior a basicidade, menor é o teor de MgO necessário para a saturação, condição que é fundamental para obter uma boa espumação e compatibilidade com o material refratário do forno, evitando sua erosão química. O teor de FeO também possui um papel muito importante na espumação, pois é determinante na geração de gás. Até certos níveis, o FeO melhora a espumação, porém, a medida que cresce, sua influência sobre a viscosidade predomina e a espumação diminui.

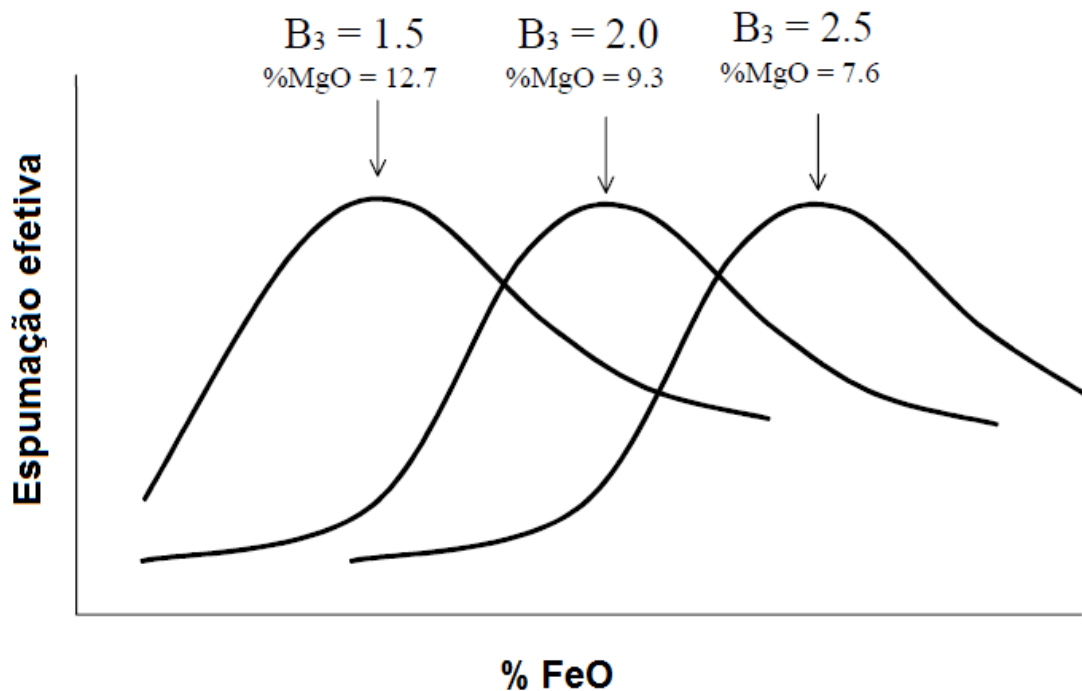


Figura 2.7: influência do FeO, MgO e basicidade na efetividade da espumação da escória.

Fonte: Adaptado de Pretorius (1998).

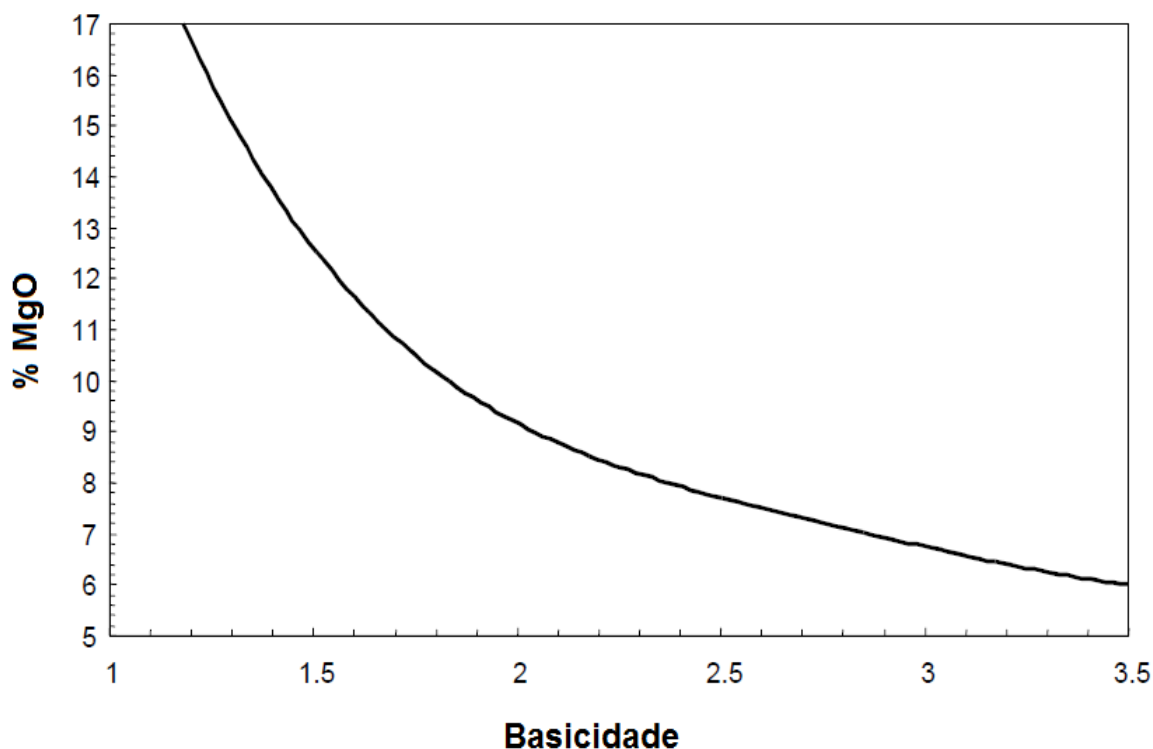


Figura 2.8: solubilidade do MgO para escórias com dupla saturação(CaO e MgO) a 1600 °C.

Fonte: Adaptado de Pretorius (1998).

A escória de aciaria tem um papel fundamental nas reações de refino, influenciando tanto na cinética das reações quanto na composição final do tarugo. A evolução de sua composição ao longo de uma corrida varia e deve seguir um caminho adequado, para que possibilite a correta formação da espuma e seja capaz de absorver as impurezas envolvidas no processo de fabricação do aço (GUMIERI, 2002).

Os principais objetivos da etapa de refino são a adequação dos teores de fósforo e carbono de vazamento do tipo de aço a ser fabricado e o aquecimento do aço até sua temperatura de vazamento.

Após atingir a temperatura ideal, o aço é vazado em uma panela. Durante o processo de vazamento é muito importante que seja controlada a passagem de escória do forno para a panela, uma vez que esta, apesar de proteger o banho líquido da absorção de gases e da perda excessiva de temperatura, é rica em FeO e P₂O₅, podendo gerar reversão de fósforo para o banho, além de elevar o consumo de desoxidantes e do refratário da panela. Em alguns casos é necessário remover o excesso de escória da panela, o que implica em perdas de tempo, térmicas e de aço durante a operação.

Após cada vazamento, há uma quantidade de aço líquido e escória remanescentes (fundo úmido) que permanecem dentro do FEA intencionalmente. Segundo John (2009), os principais benefícios dessa prática são:

- Aceleração da oxidação do carbono;
- Aceleração da desfosforação;
- Aceleração da taxa de dissolução das cales;
- Melhora nas condições de transferência de calor durante a fusão;
- Aumento na taxa de fusão dos materiais, especialmente sucatas pesadas e ferro-gusa;
- Proteção da soleira do forno contra o impacto da sucata durante o carregamento e da irradiação do arco elétrico durante a fusão da carga.

2.2.3. Forno-panela

Local onde se realiza a técnica de metalurgia de panela para o refino secundário do aço líquido proveniente do FEA. O objetivo do forno-panela (figura 2.9) é entregar o aço para o lingotamento na temperatura e composição química adequada. O ajuste de composição química é feito através da adição de ferroligas, e o ajuste de temperatura, através do aquecimento via arco elétrico. Ao contrário do FEA, o refino secundário é caracterizado por seu caráter redutor, o que promove a desoxidação do aço. A escória tem papel fundamental nesta etapa, pois é através dela que se promove a remoção do enxofre (dessulfuração). O aquecimento do banho metálico é realizado por eletrodos de grafita similares aos utilizados no FEA, porém, normalmente de menor diâmetro. Há também injeção de gases inertes pelo fundo da panela (rinsagem), garantindo boa homogeneização da temperatura e aceleração das reações que ocorrem no seio do banho.

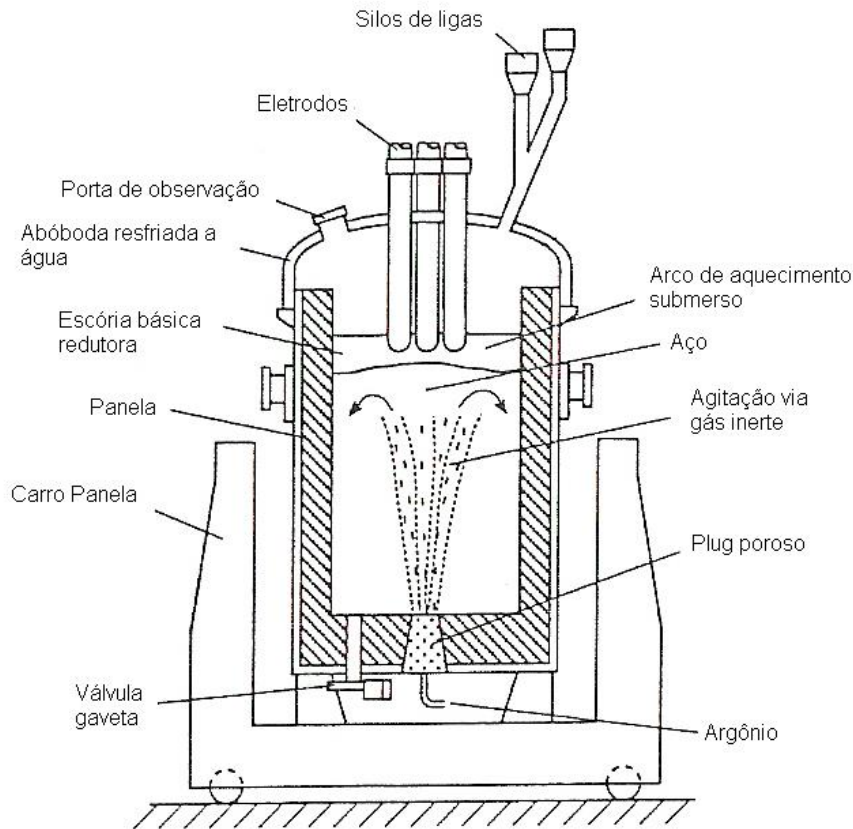


Figura 2.9: ilustração esquemática de um forno-panela.

Fonte: adaptado de Turkdogan (1996).

Segundo John (2009), os principais benefícios do forno-panela são:

- Aumento da produtividade do FEA por diminuir os tempos de refino no interior do forno; além de favorecer o vazamento a temperaturas mais baixas;
- Melhor ajuste de composição química, principalmente dos aços ligados;
- Melhor qualidade do aço pela remoção de gases como N_2 , H_2 e O_2 ;
- Aumento do rendimento das ligas adicionadas;
- Maior homogeneização de temperatura e composição química do aço líquido gerada pela rinsagem com gás inerte ou agitação eletromagnética, favorecendo também a remoção de inclusões indesejadas e a dessulfuração;
- A estação de forno-panela funciona como um pulmão no processo entre o FEA e o lingotamento.

2.2.4. Lingotamento contínuo

O lingotamento contínuo possibilitou grandes avanços em termos de qualidade do aço, aumento de produtividade e redução das perdas no processo produtivo no último século (FIGUEIRA, 2007). É a última etapa de fabricação do aço na aciaria elétrica e sua principal função é a solidificação contínua do aço líquido no molde em peças de determinado formato. A continuidade do processo é obtida pelo sequenciamento de corridas, onde o aço líquido da panela é transferido para um distribuidor e deste para os moldes nos veios (figura 2.10).

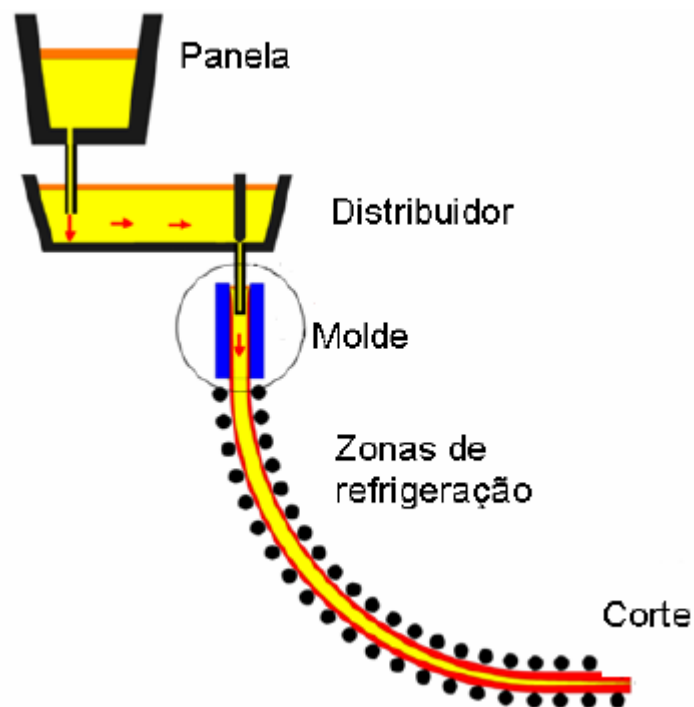


Figura 2.10: desenho esquemático do processo de lingotamento contínuo.

Fonte: Gerdau (2015).

A solidificação no molde possibilita a extração contínua de tarugos, placas, blocos ou tiras. Esse tipo de lingotamento requer um controle preciso dos tempos e temperaturas envolvidos na produção, para que interrupções sejam evitadas e, de fato, seja um processo contínuo e de alta produtividade (ROSSI, 2014).

2.3. ENERGÉTICOS UTILIZADOS NO FORNO ELÉTRICO A ARCO

Segundo Fortes et al (2008), a energia introduzida no forno elétrico a arco para fusão e aquecimento da carga é composta de energia elétrica mais uma parcela de energia química. A energia elétrica é introduzida através dos eletrodos pela formação do arco elétrico, como consequência da passagem de corrente quando estes são aproximados da carga. A energia química é gerada pela reação exotérmica de oxidação de alguns elementos presentes no processo, carregados junto à carga metálica, ou então, injetados como finos ou gás.

Segundo Rossi (2014), como nos fornos são empregados diferentes tipos de energia em diferentes proporções, faz mais sentido que se utilize o conceito de consumo total de energéticos, para que inclusive a eficiência do processo possa ser mais bem avaliada.

O diagrama de balanço energético (figura 2.11) mostra de forma estratificada as fontes energéticas de entrada em um FEA, tanto elétrica quanto química, e as fontes energéticas de saída, onde consta a parcela de energia que foi efetivamente utilizada para fundir e aquecer o aço e a parcela que foi perdida.

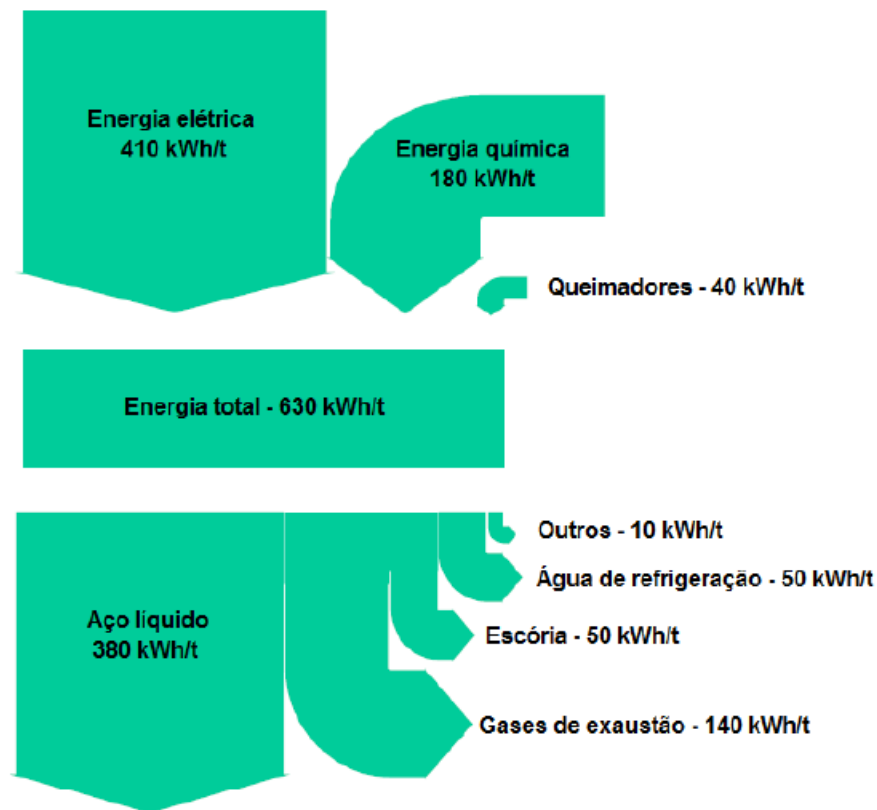


Figura 2.11: balanço energético em um FEA.

Fonte: adaptado de Sandberg (2005).

2.3.1. Energia elétrica

A introdução da energia elétrica no FEA como parte da energia para promover a fusão da carga ocorre através do arco elétrico, que é definido como a manifestação da passagem contínua de uma corrente elétrica entre um cátodo e um ânodo em um meio gasoso ionizado. A posição do eixo do arco e seu comprimento determinam a direção do fluxo de calor (DECKMANN, 2010). A tensão define o comprimento do arco, ou seja, quanto maior a tensão maior é o seu comprimento. Enquanto que a corrente define a seção transversal do arco, quanto maior a seção, maior é a corrente elétrica.

Segundo Bowman, citado em UCAR (2008), os arcos dos eletrodos tendem a se repelir e criar regiões quentes e regiões frias dentro do FEA. A figura 2.12 ilustra essas regiões. A repulsão dos arcos deve-se às forças eletromagnéticas provenientes da corrente dos outros dois arcos, da corrente dos eletrodos e da corrente passante pelo banho líquido.

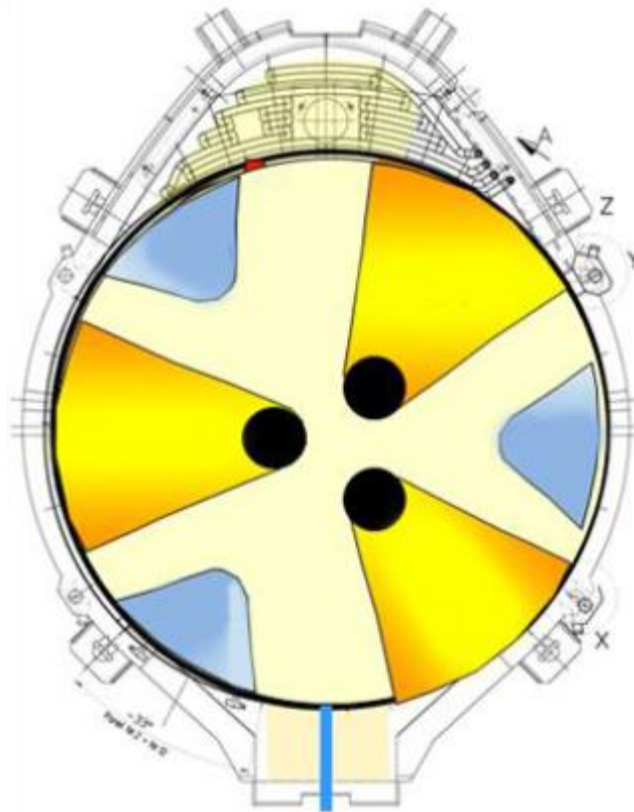


Figura 2.12: vista superior de um FEA mostrando regiões preferenciais de dissipação de calor pelos eletrodos (regiões quentes, em amarelo) e não preferenciais (regiões frias, em azul).

Fonte: Favaretto (2014).

2.3.2. Energia química

A energia química segundo Fortes et al (2008) é assim chamada por ser o resultado de característica exotérmica de determinados elementos químicos, que submetidos à reação de oxidação durante o processo, promovem a elevação da temperatura da carga. Estes elementos são carregados com a carga metálica ou injetados individualmente na forma de finos ou gás. Sua utilização visa principalmente:

- Formação da escória espumante: formadas por reações oriundas de parte da energia química fornecida ao FEA, visa aumentar a eficiência do arco e reduzir as perdas por irradiação para os elementos refrigerados e refratários. Para arcos longos, essa eficiência pode aumentar em até 27% (UCAR, 2001);
- Minimização do efeito dos pontos frios: formados nas regiões onde a incidência de irradiação do arco dos eletrodos é baixa e, conseqüentemente,

a taxa de fusão é lenta. A redução desses pontos propicia um aumento significativo na produtividade dos fornos (ROSSI, 2014).

Segundo Fortes et al (2011), as principais fontes de energia química em um forno elétrico são:

- Reações de oxidação dos elementos presentes na carga fria;
- Injeção e/ou carregamento de materiais carburantes;
- Combustão em queimadores de gases e/ou óleos;
- Queima de gases provenientes da combustão incompleta do carbono via injeção de oxigênio (pós-combustão).

2.3.2.1. Energia de queimadores

Provém da queima de materiais combustíveis, que combinados com o oxigênio, geram energia. Normalmente são utilizados óleos ou gases, e seu potencial de geração de energia no forno dependerá do poder calorífico associado a cada tipo de combustível.

2.3.2.2. Energia de redução

É a energia associada às reações de redução do óxido de ferro e demais elementos que normalmente possuem característica endotérmica. Esse tipo de energia é especialmente importante em fornos que utilizam *direct reduced iron* (DRI) ou ferro-esponja, que é um material que possui valores significativos de óxidos na sua composição (FeO acima de 5%).

2.3.2.3. Energia de oxidação

É a principal contribuição de energia química no forno elétrico a arco, para tanto é necessária a existência, na carga ou no banho, de elementos que possuam característica exotérmica e que reajam na presença de oxigênio.

Cada elemento presente na carga reage com o oxigênio de maneira diferente, logo, sua contribuição energética também difere de um para outro. A

tabela 2.1 mostra as contribuições de alguns dos elementos presentes no processo. Alguns dos elementos serão totalmente oxidados enquanto que outros sofrerão oxidação parcial.

Tabela 2.1: reações químicas exotérmicas durante o refino no FEA.

Reações químicas no aço líquido				Entalpia de reação	
Si	+	O ₂	→	SiO ₂	- 8.94 kWh/kg _{Si} - 11.20 kWh/m ³ O ₂
Mn	+	0.5 O ₂	→	MnO	- 1.93 kWh/kg _{Mn} - 9.48 kWh/m ³ O ₂
2 Cr	+	1.5 O ₂	→	Cr ₂ O ₃	- 3.05 kWh/kg _{Cr} - 9.42 kWh/m ³ O ₂
2 Fe	+	1.5 O ₂	→	Fe ₂ O ₃	- 2.05 kWh/kg _{Fe} - 6.80 kWh/m ³ O ₂
Fe	+	0.5 O ₂	→	FeO	- 1.32 kWh/kg _{Fe} - 6.58 kWh/m ³ O ₂
C	+	0.5 O ₂	→	CO	- 2.55 kWh/kg _C - 2.73 kWh/m ³ O ₂
2 Al	+	1.5 O ₂	→	Al ₂ O ₃	- 5.29 kWh/kg _{Al} - 13.84 kWh/m ³ O ₂
Mo	+	O ₂	→	MoO ₂	- 1.70 kWh/kg _{Mo} - 7.29 kWh/m ³ O ₂
S	+	O ₂	→	SO ₂	- 2.75 kWh/kg _S - 3.94 kWh/m ³ O ₂
2 P	+	2.5 O ₂	→	P ₂ O ₅	- 5.54 kWh/kg _P - 8.58 kWh/m ³ O ₂
Reações químicas na fase gás				Entalpia de reação	
C	+	O ₂	→	CO ₂	- 9.10 kWh/kg _C - 4.88 kWh/m ³ O ₂
CO	+	0.5 O ₂	→	CO ₂	- 7.01 kWh/m ³ O ₂
H ₂	+	0.5 O ₂	→	H ₂ O	- 5.99 kWh/m ³ O ₂

Fonte: Opfermann (2008).

A afinidade de cada elemento com o oxigênio e a ordem de preferência da reação podem ser lidas no diagrama de Ellingham, demonstrado na figura 2.13. O valor de ΔG° para uma reação de oxidação é medido pela afinidade química entre o metal e o oxigênio. Quanto mais negativo for este valor, mais estável é o óxido (GASKELL, 1973).

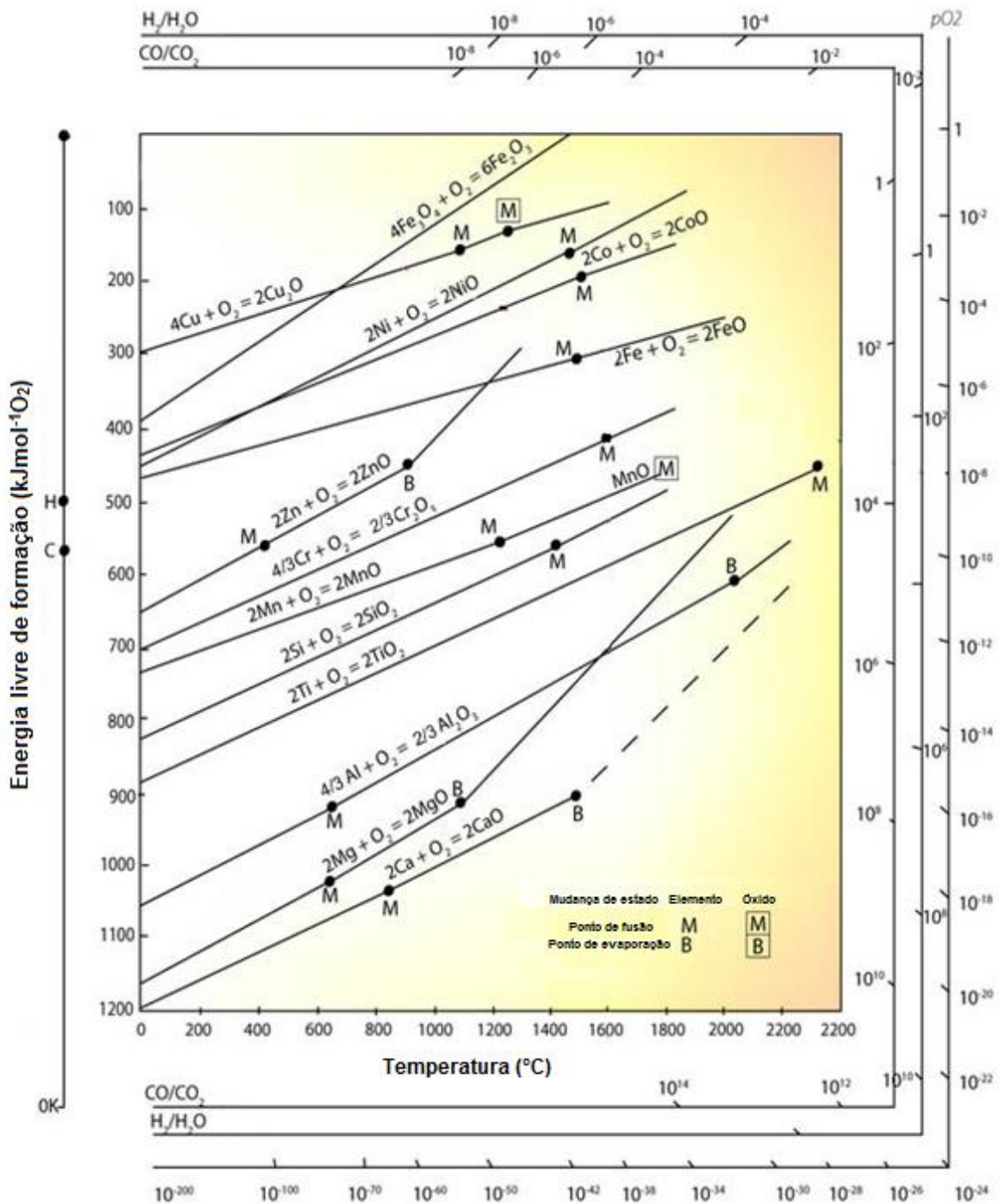


Figura 2.13: diagrama de Ellingham.

Fonte: Gaskell (1973).

Para determinado óxido, quando há mudança de fase, a relação entre o ΔG° e a temperatura é praticamente uma linha reta. Quando ocorre mudança de estado físico, a reação sofre influência do calor latente, que provoca alteração na inclinação da reta no gráfico, devido a mudanças na entalpia e na entropia entre as duas regiões da reta.

A figura 2.14 ilustra o perfil de oxidação ao longo de uma corrida no forno elétrico a arco. O silício é completamente oxidado nos primeiros minutos de injeção de oxigênio. Já no caso do fósforo, manganês, carbono e ferro, a oxidação ocorre em maior ou em menor grau ao longo do tempo de injeção. A oxidação do ferro demanda atenção especial, pois o teor de FeO tem grande importância na determinação do rendimento metálico.

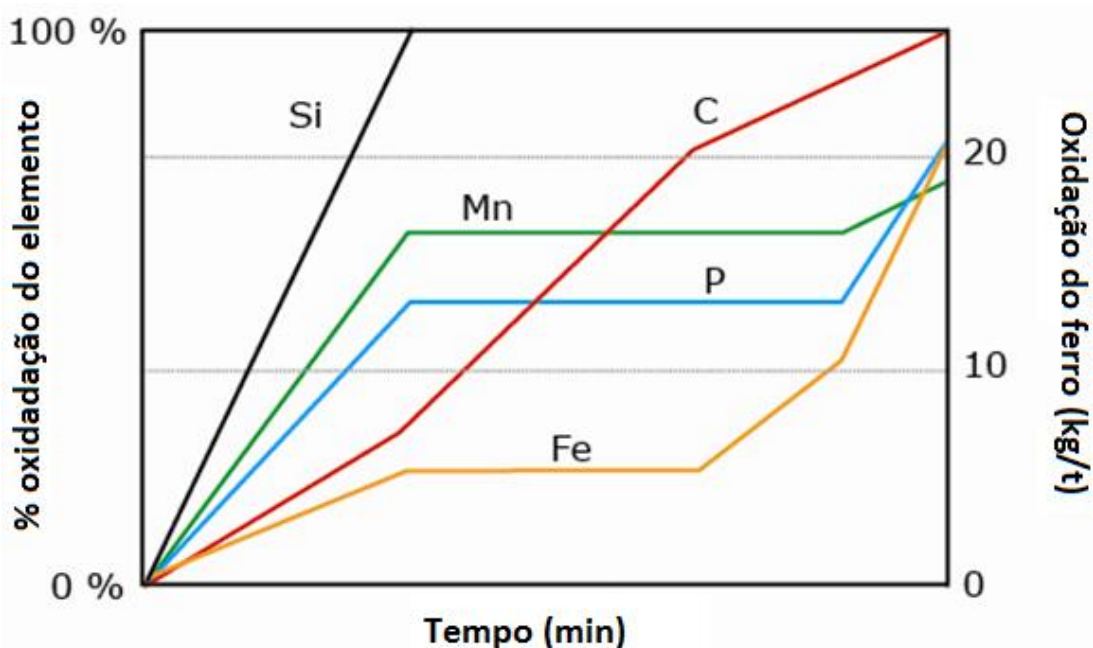


Figura 2.14: perfil de oxidação dos elementos ao longo de uma corrida no FEA.

Fonte: Lumar (2013).

Na prática industrial, o processo de oxidação está diretamente ligado à formação de escória. A oxidação do ferro não é favorecida pelas baixas temperaturas do início do processo. Entretanto, devido a grande quantidade deste elemento, sua oxidação começa juntamente com o silício, gerando óxido de ferro que é agregado à escória. A geração deste óxido na escória inicial é muito importante para a solubilização da cal e formação da $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. A formação deste composto e sua presença reduzem a atividade da sílica na escória, favorecendo a oxidação completa do silício.

Na sequência, são oxidados o manganês e o fósforo. Os teores finais destes elementos dependem da sua quantidade na carga, das características da escória formada e do nível de oxidação ao final da corrida.

Após a oxidação do silício e do manganês, inicia-se efetivamente a descarburização (oxidação do carbono), devido a maior disponibilidade de oxigênio para esta reação. A oxidação do carbono se inicia com a reação direta entre o oxigênio e o carbono formando CO, no entanto, também é aceita a teoria de que o oxigênio reage primeiramente com o ferro formando FeO na escória, que por sua vez é reduzido pela difusão do carbono formando CO (FORTES et al, 2008).

A cinética da descarburização é controlada por dois mecanismos principais: disponibilidade de oxigênio para reagir com o carbono e difusão do carbono (transferência de massa do carbono na fase líquida). Acima do teor de carbono crítico, a taxa de descarburização independe do teor de carbono e é limitada exclusivamente pela disponibilidade de oxigênio. Abaixo do teor de carbono crítico, a taxa de transferência de carbono diminui e nem todo FeO é reduzido, conforme mostra a figura 2.15. Dessa forma, a descarburização é controlada pela transferência de massa de carbono na fase líquida.

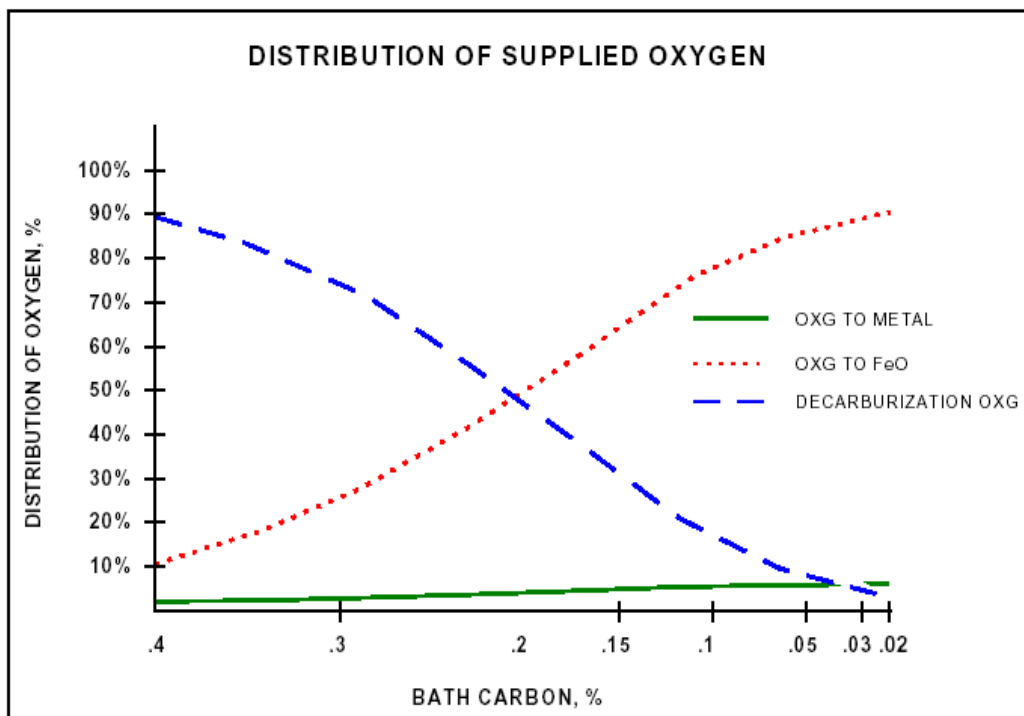


Figura 2.15: distribuição do oxigênio disponível versus teor de carbono no aço.

Fonte: UCAR (2008).

2.3.2.4. Energia de pós-combustão

A energia de pós-combustão resulta da queima de qualquer composto parcialmente oxidado. No caso do FEA pode-se citar o H_2 , e em especial o CO , que é o gás predominante nessa atmosfera. Normalmente, os gases são queimados nos sistemas de despoejamento, no entanto, podem ser queimados na atmosfera do forno quando o oxigênio é injetado intencionalmente para promover a pós-combustão destes elementos.

Termodinamicamente, a transformação de CO para CO_2 , no banho metálico é menos favorável. Logo, o fenômeno é alcançado pela injeção de O_2 em regiões mais altas do forno, e é mais efetivo se ainda houver sucata com baixa temperatura, capaz de absorver este calor. Caso contrário, grande parte da energia poderá ser perdida para os sistemas de exaustão, ou então, para os painéis refrigerados (JOHN, 2009).

A eficiência da transferência de calor de pós-combustão para a carga pode atingir um máximo de 65%, se ainda houver sucata sólida no forno, entretanto, na etapa de refino, quando praticamente toda carga já está líquida, a eficiência máxima atingida é na faixa de 20 a 30%. É importante que o O_2 não seja injetado em excesso, a ponto de aumentar excessivamente a oxidação do ferro, reduzindo o rendimento metálico (PFEIFER, 2005).

2.4. INJEÇÃO DE OXIGÊNIO NO FEA

Os grandes avanços alcançados em produtividade no FEA ao longo dos anos se devem principalmente ao aperfeiçoamento das práticas relacionadas ao emprego dos gases injetados. Dentre todos os gases empregados no processo destaca-se a injeção de oxigênio como alternativa energética ao consumo de energia elétrica, a figura 2.16 ilustra a redução do consumo de energia elétrica em virtude do emprego de oxigênio como fonte energética no FEA.

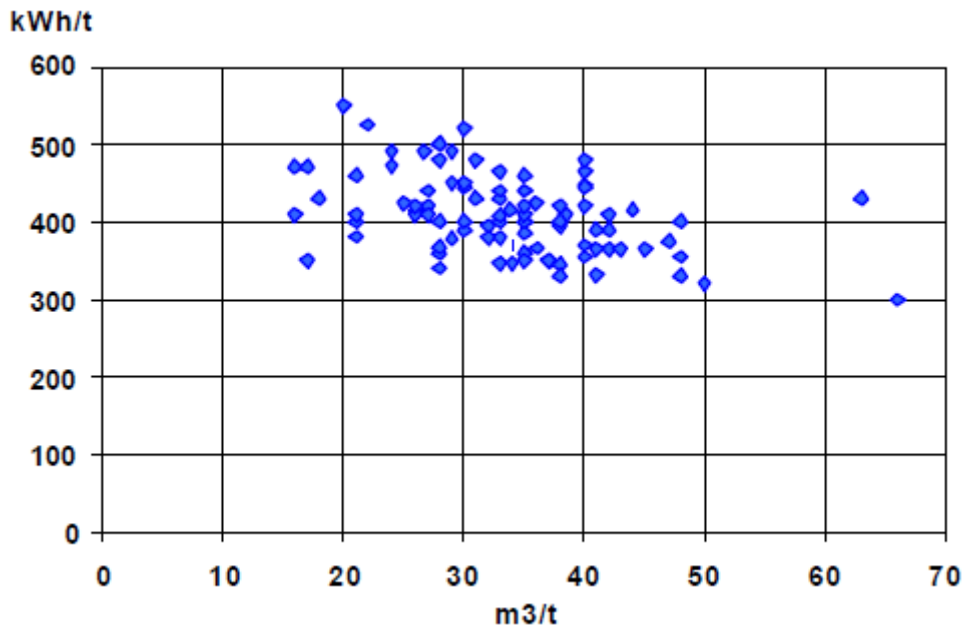


Figura 2.16: consumo de energia elétrica em kWh/t *versus* consumo de oxigênio em m³/t.
 Fonte: UCAR (2001).

2.4.1. Injeção de oxigênio em modo lança com injetores supersônicos

Segundo UCAR (2001) e citado em ROSSI (2014), a injeção de oxigênio através de jatos supersônicos em modo lança tem como principais objetivos:

- Oxidação dos elementos presentes na carga (Si, Al, Mn e P);
- Descarburação do banho quando são utilizados materiais carbonosos;
- Agitação do banho/escória;
- Espumação da escória com a injeção simultânea de carbono.

Para a fabricação de aço na indústria, os jatos supersônicos são utilizados preferencialmente frente aos subsônicos pela maior penetração que possuem no banho. Em geral, os bicos supersônicos consistem em uma entrada convergente, a qual conduz o gás para uma região de estrangulamento de menor área de seção transversal (garganta), seguido de uma seção divergente, como mostrado na figura 2.17. O modelo convergente/divergente é conhecido por “bocal de Laval”, desenvolvido pelo sueco Gustaf de Laval em 1890.

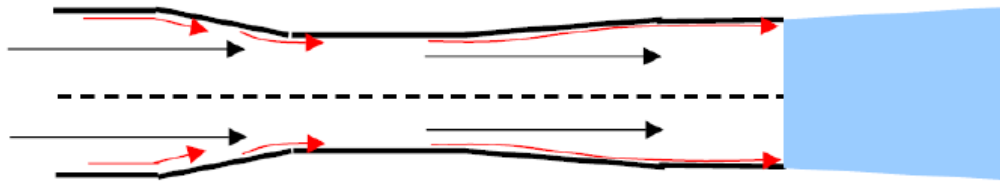


Figura 2.17: modelo de bocal supersônico convergente/divergente.

Fonte: Allemand (2001).

Os jatos podem ser classificados em dois tipos: supersônicos convencionais e supersônicos coerentes (figura 2.18). Define-se como jato supersônico coerente aquele que consegue manter aproximadamente a sua forma original desde a saída do bico do injetor. Já o jato supersônico convencional é mais suscetível a perder a sua forma inicial, diminuindo a sua velocidade. Segundo Rossi (2014), um jato sem coerência, quando atinge o banho, causa maior formação de respingos, aumenta a quantidade de oxigênio na atmosfera do banho e muitas vezes não é capaz de ultrapassar a escória. Por sua vez, o jato coerente penetra no aço líquido com eficiência sem gerar respingos e reage com os elementos dissolvidos no banho.

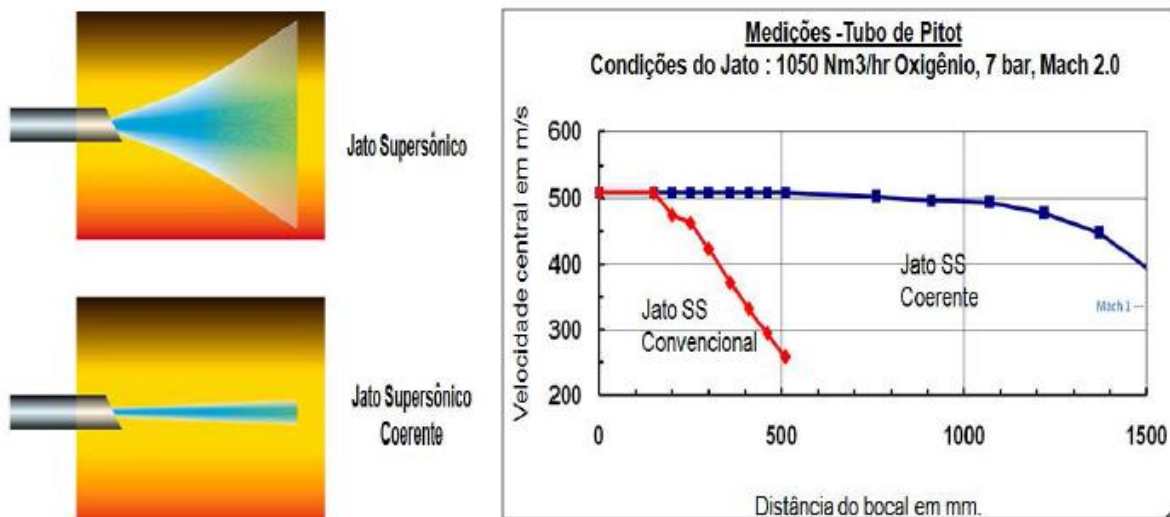


Figura 2.18: jato supersônico convencional e jato supersônico coerente.

Fonte: Mathur (2001).

2.4.1.1. Jato supersônico convencional

Segundo Mathur (2004) e citado em Rossi (2014), o perfil de um jato supersônico convencional ao sair de um bocal de laval pode ser classificado em três regiões (figura 2.19). Na primeira região, a velocidade do jato é muito próxima da velocidade de saída do bico, levemente superior a Mach 2 (número adimensional que representa uma relação entre a velocidade do fluido e a velocidade do som). Nessas condições, a coerência se mantém de 20 a 35 vezes o diâmetro da garganta, em temperatura ambiente e em condições no FEA, respectivamente. Na segunda região, denominada região de transição, o jato já sofre turbulência pelo gás ambiente e começa a expandir perdendo velocidade, porém essa se mantém supersônica. Na terceira região, a velocidade do jato diminui e o mesmo passa a ser subsônico, se expandindo 10° em relação ao eixo longitudinal.

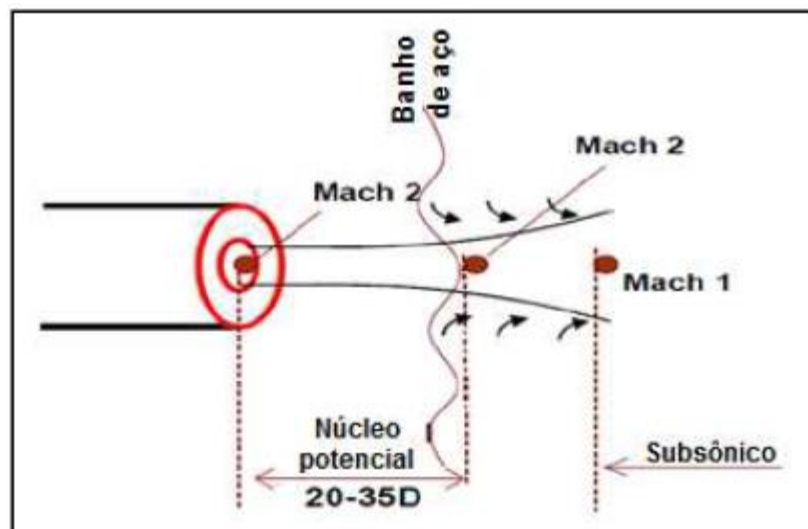


Figura 2.19: regiões típicas de um jato supersônico convencional.

Fonte: Mathur (2004).

2.4.1.2. Jato supersônico coerente

Um jato supersônico coerente possui uma chama de proteção denominada *shroud*, que atua de maneira a envelopar o jato principal, permitindo que o mesmo tenha seu comprimento coerente significativamente aumentado (figura 2.20).



Figura 2.20: jato supersônico com chama de proteção.

Fonte: Curso ABM de Aciaria Elétrica, Módulo Injeção de Gases (2007).

Segundo Mathur (2004), com uma configuração otimizada da chama, o núcleo potencial de um jato com *shroud* pode ser aumentado para até 70 vezes o diâmetro da garganta do bocal de laval (figura 2.21).

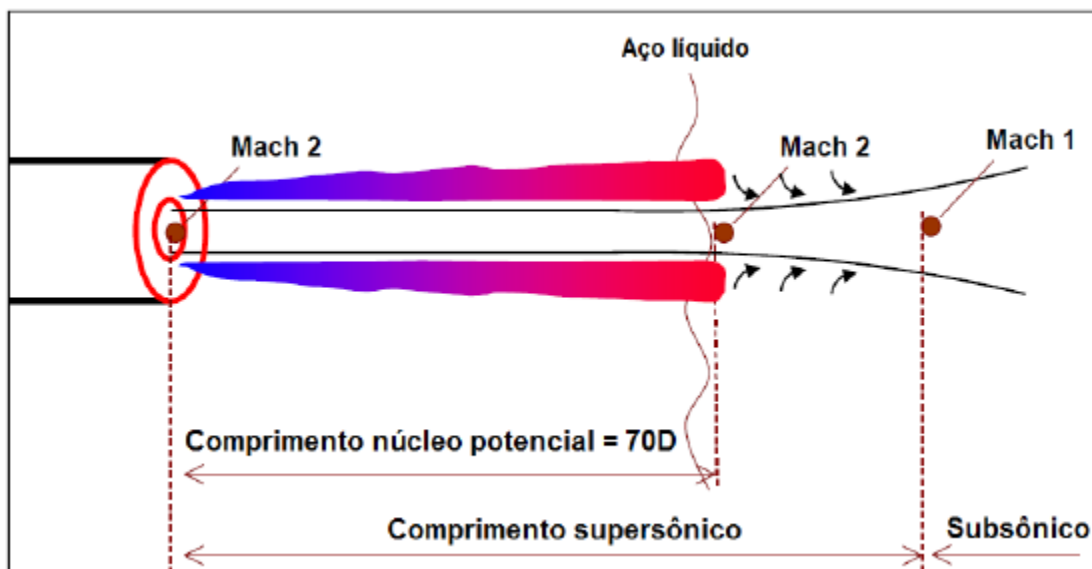


Figura 2.21: perfil de um jato coerente com chama *shroud*.

Fonte: Mathur (2004).

Em teoria, o jato deve ter comprimento coerente suficiente para penetrar no banho ainda dentro da região do núcleo potencial. Um atributo de jatos coerentes na fabricação do aço é a capacidade de entregar ao banho quantidades precisas

de gás em alta velocidade e pressão de impacto desde uma posição afastada do banho sem gerar respingos de aço e escória. Assim, ao atingir o aço líquido, o gás se dissipa em pequenas bolhas que garantem maior penetração e agitação.

2.4.2. Influência da vazão do jato sobre o comprimento coerente

Segundo Mahoney (2010), a penetrabilidade de um jato supersônico depende fundamentalmente da interação do gás do jato com o gás ambiente, que por sua vez depende da temperatura, composição, pressão e também de interações termodinâmicas.

Mantendo a temperatura do ambiente e pressão constantes, ao modificar a vazão deve-se modificar também o diâmetro da garganta do bocal para manter o mesmo número Mach. Uma vez que o comprimento coerente é diretamente proporcional ao diâmetro da garganta, este aumenta com o aumento da vazão de oxigênio (figura 2.22).

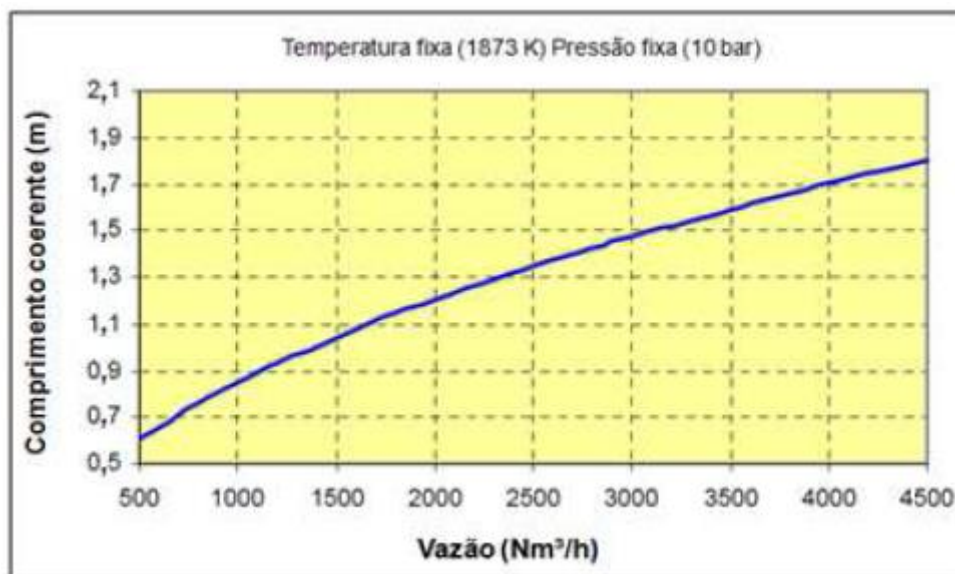


Figura 2.22: efeito da vazão do jato no comprimento coerente.

Fonte: Allemand (2001).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os principais dados do forno elétrico a arco utilizados no teste são apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: dados do forno elétrico a arco.

Peso médio de vazamento	21 t
Volume bruto	19,74 m ³
Potência do transformador	26 MVA
Diâmetro dos eletrodos	400 mm
Dimensões da porta de escória	1500 x 1500 mm
Diâmetro da carcaça	4,450 m
Diâmetro dos painéis refrigerados	3,423 m
Pureza do oxigênio injetado	92%

Fonte: Gerdau Riograndense.

Os principais dados do forno-panela utilizado no teste são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: dados do forno-panela.

Potência do transformador	16,5 MVA
Máxima corrente secundária	26,9 kA
Máxima tensão secundária	429 V
Diâmetro dos eletrodos	200 mm

Fonte: Gerdau Riograndense.

As tabelas 3.3 e 3.4 mostram as principais características do sistema de injeção do forno elétrico a arco utilizado no teste.

Tabela 3.3: dados do sistema de injeção (injetores multifuncionais).

Número de injetores	2 injetores de parede
Vazão de projeto do injetor	950 Nm ³ /h
Ângulo de posicionamento	40° com o eixo horizontal inferior

Fonte: Gerdau Riograndense.

Tabela 3.4: dados do sistema de injeção (manipulador de lanças).

Número de injetores	2 lanças de oxigênio + 1 lança de coque
Vazão de operador (oxigênio)	700 Nm ³ /h por lança
Vazão de operação (coque)	6 a 18 kg/min

Fonte: Gerdau Riograndense.

O sistema de injeção do forno é composto de injetores multifuncionais de parede e de manipulador de lanças, que são utilizados simultaneamente na produção das corridas.

O manipulador de lanças não possui função de fonte de oxigênio para oxidação do banho. Sua função principal é apenas limpar a região porta de escória para possibilitar a entrada da lança de coque para a espumação. O material utilizado para espumar a escória é o coque verde de petróleo.

Os injetores que são de fato utilizados para oxidação do banho são os injetores multifuncionais de parede. Estes estão localizados abaixo do quarto furo e entre a porta de escória e o cilindro de giro da abóbada. Para a operação otimizada desses injetores é imprescindível que os mesmos estejam posicionados com angulação adequada dentro do forno. Em termos de angulação horizontal, é importante que nunca estejam direcionados para os eletrodos. Normalmente posiciona-se o injetor no espaço existente entre as fases. Para o caso da angulação vertical, ângulos muito pequenos podem gerar desgaste excessivo no material refratário da soleira do forno. Ângulos maiores que o ideal podem gerar muitos respingos de aço/escória e perda de penetração (eficiência) do jato.

Os injetores multifuncionais possuem duas linhas de oxigênio (oxigênio principal e oxigênio de proteção) e uma linha de gás natural associadas ao equipamento, conforme foto do bico do injetor da figura 3.1. É através da queima do gás natural com o oxigênio de proteção que é criada a chama *shroud*.

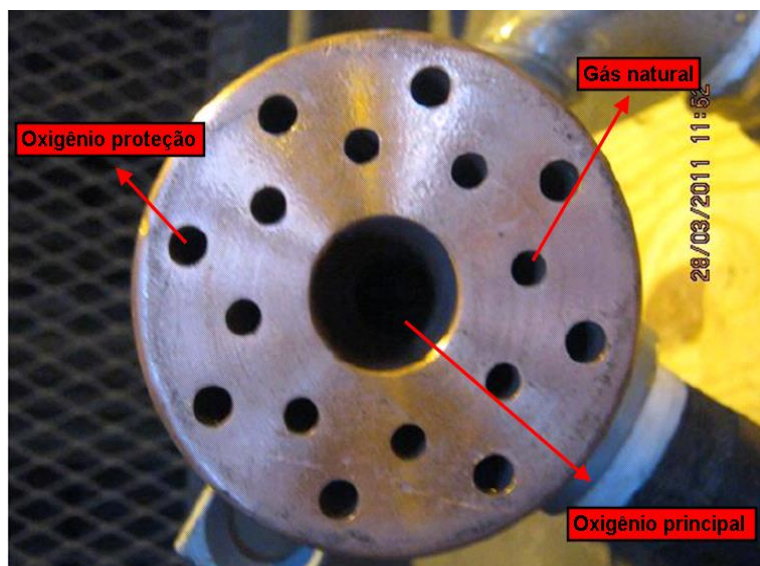


Figura 3.1: linhas de gases no bico do injetor de jato coerente.

Fonte: Gerdau Riograndense.

A injeção de gases no forno com esses injetores é feita através de oito modos, conforme a tabela 3.5.

Tabela 3.5: modos de operação do sistema de injeção.

Espera	Purga
Carga	Chama para carregamento
Queima	Queimador (chama de pré-aquecimento)
Queima +	Queimador (potência intermediária)
Queima ++	Queimador (maior potência)
Lança	Oxidação (vazão mínima)
Lança +	Oxidação (vazão de projeto)
Lança++	Oxidação (vazão máxima)

Fonte: Gerdau Riograndense.

O modo Espera é utilizado como purga para o sistema, ou seja, ele possui apenas vazão suficiente para que não ocorram entupimentos dos orifícios do bico injetor nos momentos em que não são utilizados os outros modos de injeção. O modo Carga é utilizado quando há carregamento do forno. Ele tem a mesma função do modo Espera, porém opera com vazões maiores em função da maior geração de respingos que podem mais facilmente entupir os orifícios durante os carregamentos. Nos modos Queima, Queima + e Queima ++ o injetor opera como

queimador com vazões crescentes. A potência do queimador em MW pode ser calculada como sendo sua vazão de gás natural em Nm³/h dividida por 100. As diferentes vazões utilizadas nesses modos se justificam pelas diferentes características encontradas ao longo da fusão de uma corrida, que requer diferentes perfis e potências de chama para promover uma fusão uniforme e otimizada da carga. Já nos modos Lança, Lança + e Lança ++, o injetor opera com jato coerente de alta penetração para a oxidação do banho. Normalmente se utiliza o modo de menor vazão na transição entre o último modo queimador e o primeiro modo lança a fim de evitar geração excessiva de respingos pela maior vazão do jato. Posteriormente, são utilizados os outros modos, conforme a velocidade de oxidação do banho desejada. Para haver a manutenção do jato coerente a vazão de operação do oxigênio principal deve ser de até 20% acima ou abaixo da vazão de projeto.

3.2. COLETA DE DADOS

Foram coletados e monitorados dados de processo de 71 corridas ao longo de três dias. Amostras de aço foram retiradas em todas as corridas para análise do teor de carbono de vazamento. Amostras de escória foram coletadas aleatoriamente de forma padronizada para análise por fluorescência de raios X.

O teor de carbono de vazamento foi escolhido para, como posteriormente será comentado nesse trabalho, avaliar o grau de oxidação ou queima de ferro das corridas. Não foi escolhido o FeO da escória pela variação que o mesmo pode sofrer em função da quantidade gerada de escória. Por exemplo, uma corrida com um menor percentual de FeO pode apresentar grau de oxidação maior se a quantidade de escória gerada nessa corrida também for maior. Sabe-se que para a avaliação do grau de oxidação da corrida o melhor parâmetro que poderia ser monitorado seria o oxigênio solúvel no aço, porém o forno estudado não possui esse recurso de medição.

Não foram contabilizadas corridas que apresentaram algum desvio ou problema de processo atípico, tais como:

- As duas primeiras corridas após a partida do forno em função do mesmo estar frio, pela maior temperatura de liberação no forno-panela e pela partida do lingotamento contínuo, que gera maiores perdas;
- Última corrida de cada dia, quando há secagem do distribuidor no lingotamento contínuo. Essas corridas possuem peso lingotado superior ao peso vazado;
- Corridas com power off maior que 15 minutos, independentemente do motivo;
- Voltas de aço;
- Corridas que apresentaram qualquer tipo de perda metálica não comum no forno-panela e lingotamento contínuo (ex: perfuração de veio, perda de sequenciamento).

O estudo da influência das modificações propostas nos parâmetros do FEA foi feito através da coleta de dados e análise dos seguintes parâmetros de processo:

- Consumo de energia elétrica de forno por corrida em kWh/t;
- Consumo de energia elétrica de forno-panela por corrida em kWh/t;
- Consumo de gás natural de forno por corrida em Nm³/t;
- Consumo de ferro-gusa por corrida em kg/t;
- Consumo de sucata por corrida em kg/t;
- Consumo de coque injetado por corrida em kg/t;
- Consumo de cal calcítica e cal dolomítica por corrida em kg/t;
- Consumo de oxigênio no manipulador de lanças por corrida em Nm³/t;
- Consumo de oxigênio no sistema de injeção multifuncional por corrida em Nm³/t;
- Teor de carbono de vazamento em %;
- Basicidade binária e teor de FeO da escória;
- Tap to tap (tempo total de corrida) em minutos/corrída;
- Power on (tempo de forno ligado) em minutos/corrída;
- Power off (tempo de forno desligado) em minutos/corrída.

3.3. METODOLOGIA DE REALIZAÇÃO DO TESTE

Foi realizado um teste para avaliar o impacto de diferentes *setpoints* de vazão de oxigênio principal na operação de um dos modos lança (Lança +). A alteração feita em relação à operação base foi:

- Aumento da vazão de oxigênio principal em 12,5% e redução do tempo de injeção em 11,1% no modo Lança + de forma a trabalhar com a mesma quantidade de oxigênio injetado.

Os cenários testados podem ser visualizados na tabela 3.6. Foram coletados dados de 55 corridas do cenário BASE e 16 corridas do cenário TESTE. Foi utilizado o software comercial Minitab 14 para o tratamento estatístico dos dados e apresentação dos resultados.

A regulagem elétrica e química do forno (exceto alterações do teste) foi igual para todos os cenários.

Tabela 3.6: cenários testados.

Cenário	Vazão de O ₂ principal no modo Lança +	Tempo de injeção no modo Lança +	Quantidade de O ₂ injetado no modo Lança +
BASE	Vazão	Tempo	Quantidade
TESTE	1,125 x Vazão	0,888 x Tempo	Quantidade

A carga fria utilizada e o aço produzido nos dois cenários foram os mesmos, composta por 6,5% de ferro-gusa e o restante por diferentes tipos de sucata metálica, essa pequena porcentagem de ferro-gusa na carga fria permitiu o aumento da vazão e realização do teste, diminuindo a possibilidade de ocorrência de rebotes de oxigênio ao chocar-se com ferro-gusa ainda sólido no banho. A fixação de uma carga fria constante é muito importante para a análise dos resultados, uma vez que exerce uma grande influência em praticamente todos os parâmetros de processo do forno. Pequenas modificações na carga fria, que muitas vezes nem mesmo são controláveis, causam mudanças importantes no comportamento e desempenho do forno.

Não houve precipitação pluviométrica durante o período de realização do teste.

No cálculo do consumo de energia total foi somado ao consumo de energia elétrica do FEA o consumo de energia elétrica do FP. Isso foi feito visando levar em consideração a influência da temperatura de vazamento. Como não há acesso confiável aos dados dessas temperaturas, optou-se por utilizar o consumo de energia do FP, uma vez que seu grau de correlação com a temperatura de vazamento é alto ($R^2 > 0,85$).

Para calcular o consumo de energia total foi utilizado o consumo dos insumos e o poder calorífico de cada um deles na conversão para a unidade de kWh/t (tabela 3.7). Nesse estudo, esse cálculo foi feito para os consumos de energia elétrica do FEA e FP, coque verde de petróleo, gás natural, sucata e ferro-gusa sólido, que foram os insumos utilizados no forno durante o teste. O somatório da contribuição energética individual de cada um desses insumos resulta no consumo de energia total do FEA + FP.

Tabela 3.7: insumos e seus poderes caloríficos.

Insumo	Fator de equivalência
Energia elétrica (kWh/t)	1,00
Coque verde de petróleo (kg/t)	8,37 (kWh/kg)
Gás natural (Nm ³ /t)	10,00 (kWh/Nm ³)
Sucata (kg/t)	0,09 (kWh/kg)
Ferro-gusa sólido (kg/t)	0,28 (kWh/kg)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido a cláusulas de confidencialidade acerca dos dados industriais e das informações contidas no teste, a apresentação de alguns dos resultados foi feita de modo comparativo, não utilizando valores reais de processo e/ou produção.

Os resultados do teste são apresentados de maneira comparativa, utilizando o cenário BASE como “zero” e mostrando a variação do cenário TESTE em relação ao BASE.

4.1. VALIDAÇÃO DE DADOS

Para avaliar a estabilidade do processo no forno elétrico a arco estudado foi avaliado o consumo de oxigênio injetado e consumo de energia total. Uma das premissas do teste é de que a quantidade de oxigênio injetado no modo Lança + fosse a mesma para os dois cenários. Porém, como não foi possível mensurar a quantidade real injetada somente neste modo, utilizou-se o valor de consumo total de oxigênio nos injetores multifuncionais, ou seja, a quantidade de oxigênio injetado nos injetores multifuncionais durante toda a corrida.

A figura 4.1 apresenta as cartas de controle criadas para os dois cenários. Como se pode observar, o consumo de oxigênio total nos injetores multifuncionais apresentou uma variabilidade natural nos dois cenários, com todos os valores individuais dentro dos limites inferior e superior de controle.

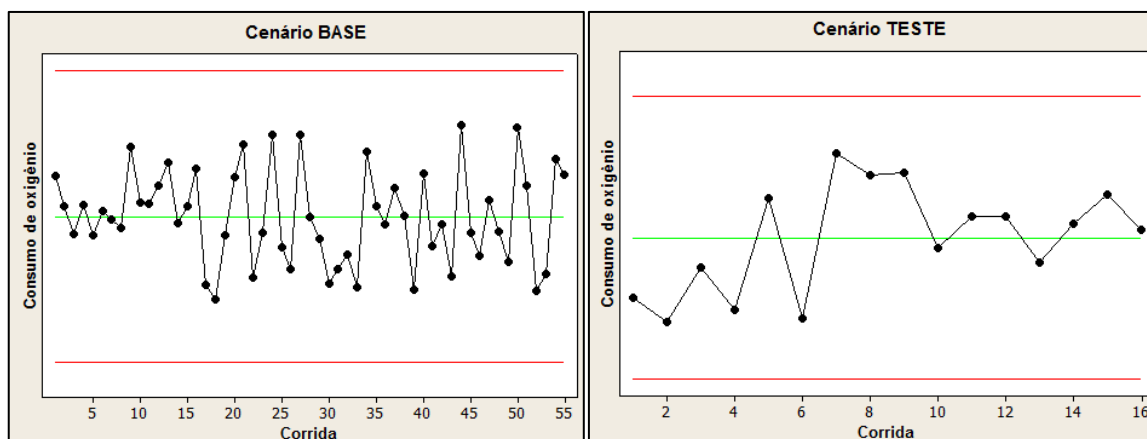


Figura 4.1: cartas de controle de valores individuais do consumo de oxigênio total nos injetores multifuncionais.

A figura 4.2 mostra a distribuição do consumo de energia total dentro de cada cenário. O valor de P-Valor maior que 0,1, mostra que, para um valor de confiança de 90%, os dados seguem uma distribuição normal dentro dos dois cenários.

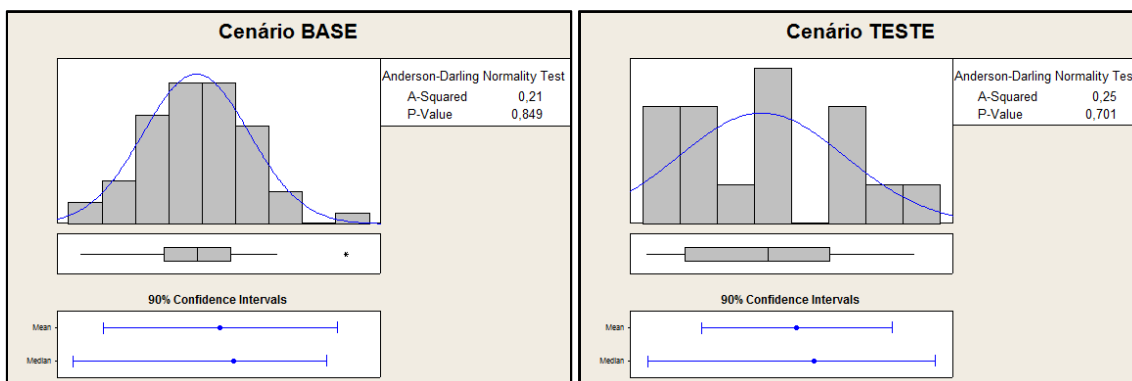


Figura 4.2: distribuição do consumo de energia total.

4.2. PARÂMETROS DE PROCESSO DO FORNO ELÉTRICO A ARCO

O gráfico da figura 4.3 mostra a variação de alguns dos principais parâmetros de processo do forno no cenário TESTE comparativamente ao cenário BASE.

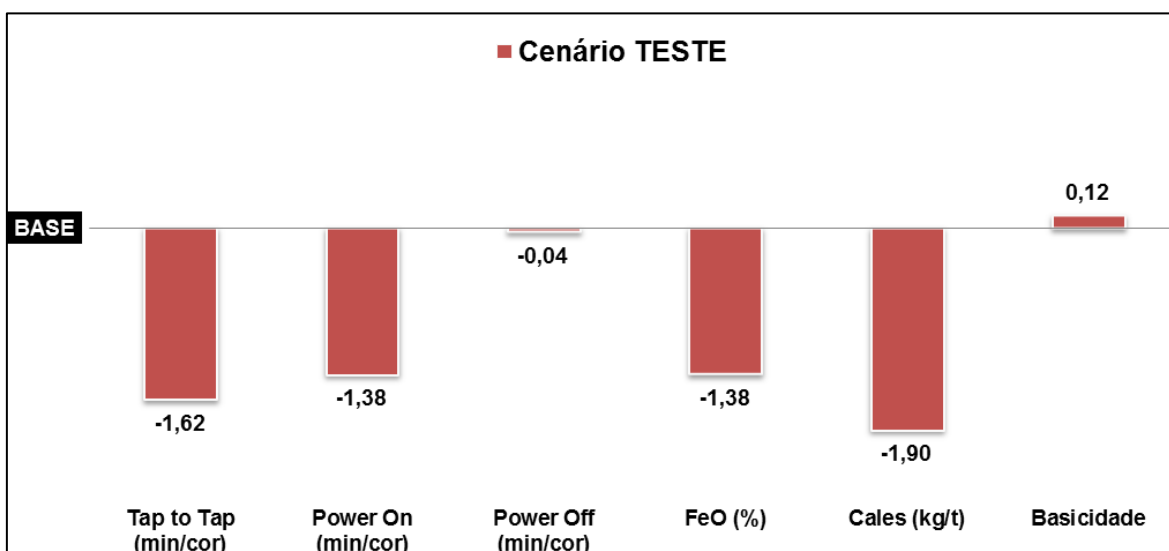


Figura 4.3: variação dos parâmetros de processo do forno no cenário TESTE comparativamente ao cenário BASE.

O tempo de *power off*, que é um importante indicador da estabilidade operacional do forno, apresentou uma redução de 0,04 minutos/corrída. Em aciarias elétricas, essa diferença pode ser considerada insignificante, não apresentando influência no processo do forno.

A redução de 1,38 minutos/corrída para o tempo de *power on* é significativa no processo do forno, porém, as variações de vazão e tempo de injeção de oxigênio no modo Lança + propostas neste trabalho, a princípio, não influenciam no desempenho desse indicador. O *power on* é basicamente função inversa da potência média em MW, e a aciaria em que foi realizado o teste opera com dois fornos elétricos a arco e dois fornos panela. Dessa forma, dependendo do sincronismo na operação desses quatro equipamentos, pode haver flutuações significativas na média tensão, levando a alterações de potência. Por exemplo, quando estão ligados todos os fornos e fornos panela, pode haver uma queda na média tensão e uma redução da potência média. Por outro lado, se houver apenas um forno ligado durante um determinado período de tempo pode haver aumento da média tensão e conseqüente aumento de potência.

O consumo de cales (calcítica + dolomítica) também não sofreu variação expressiva e apresentou redução de 1,90 kg/t.

O teor de FeO apresentou redução de 1,38% e a basicidade binária aumento de 0,12. Essas variações, positivas ou negativas, não foram intencionais e podem ser decorrentes de alterações em variáveis que afetam os parâmetros de processo do forno, tais como: nível de oxidação do banho, quantidade de escória gerada, teor de impurezas na sucata e composição química das cales.

4.3. RESULTADOS POR COMPONENTE DO CONSUMO DE ENERGIA TOTAL

A figura 4.4 mostra o resultado estratificado por componente do consumo de energia total no cenário TESTE, de forma percentual e comparativa em relação ao cenário BASE.

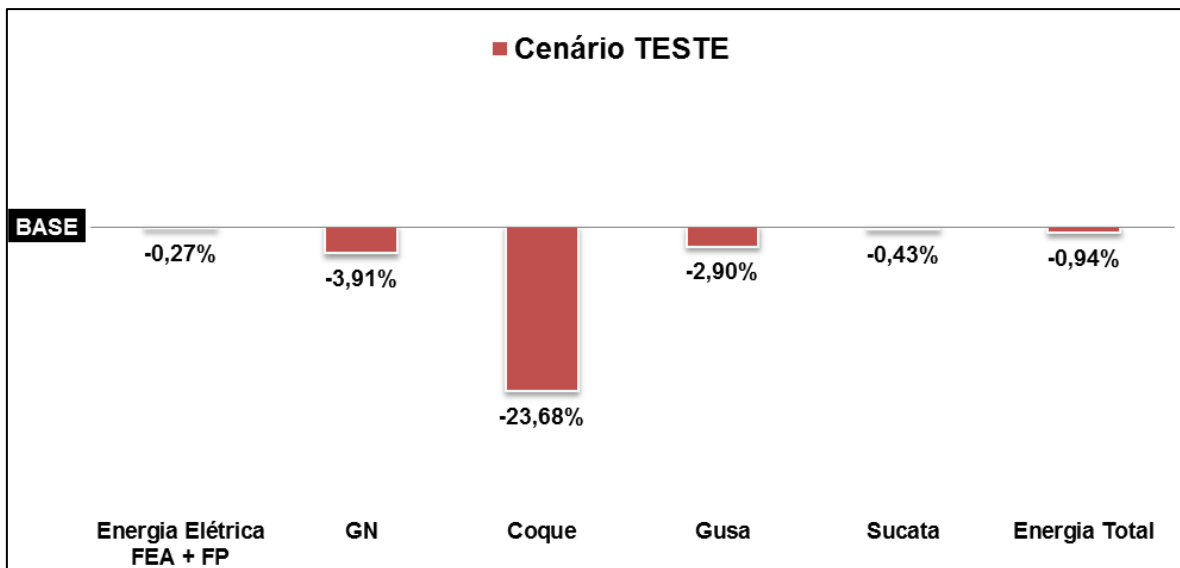


Figura 4.4: variação por componente do consumo de energia total no cenário TESTE comparativamente ao cenário BASE.

O principal resultado que pode ser atribuído à modificação proposta no cenário TESTE foi a redução em 23,68% no consumo de coque no forno elétrico a arco.

Esse resultado mostra que foi necessário uma menor quantidade de coque injetado para a formação de espuma na escória. Esse aumento na capacidade de formação de espuma da escória pode ser atribuído a redução do teor de FeO na escória, observado na figura 4.3. Segundo ITO (1989), a redução no teor de FeO tende a aumentar o tempo de permanência dos gases na escória espumante, devido ao aumento da viscosidade da escória. Esse aumento da eficiência de espumação com o aumento da viscosidade pode ser observado na figura 2.6. Adicionalmente, outro fator que reforça esse aumento na eficiência de espumação, é o aumento da basicidade observado na figura 4.3. Segundo Pretorius (1998), quanto maior a basicidade, menor é o teor de MgO necessário para a saturação, condição que é fundamental para obter uma boa espumação e compatibilidade com o material refratário do forno, evitando sua erosão química, essa relação entre o MgO de saturação e a basicidade pode ser observada na figura 2.8.

A redução de 3,91% no consumo de gás natural pode ser atribuída a redução do tempo de *power on*, ou seja, quanto menor o tempo de forno ligado, mais rápido se desenvolveram os modos de operação dos injetores multifuncionais durante a corrida, essa relação pode ser observada na figura 4.5

para ambos os cenários. Apesar de ser uma redução significativa, devido ao elevado custo desse insumo no Brasil, não deve ser atribuída somente à modificação proposta no teste.

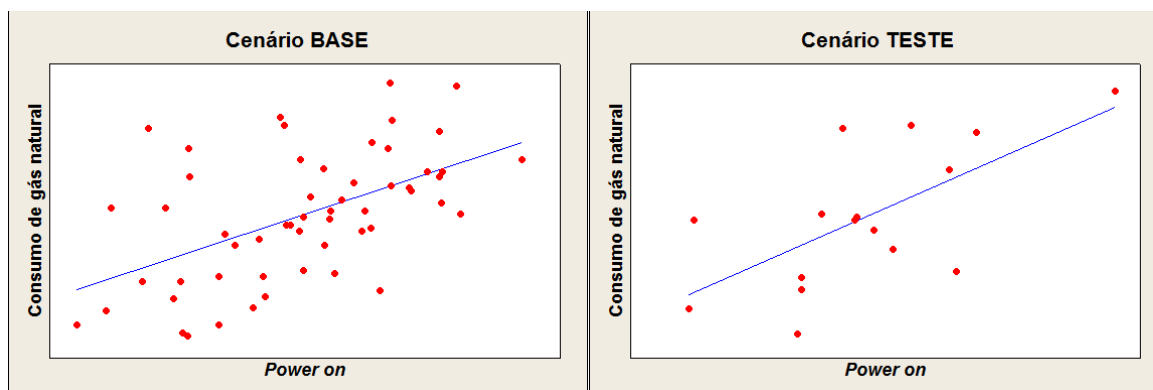


Figura 4.5: *power on* versus consumo de gás natural.

As reduções no consumo de energia elétrica de FEA + FP (0,27%), ferro-gusa (2,90%) e sucata (0,43%) não devem ser atribuídas somente à modificação proposta no teste. Elas são função de variações naturais na operação do forno e/ou qualidade da carga metálica.

Quando levadas em consideração as variações de todos os componentes do consumo de energia total no cenário TESTE, a redução foi de 0,94% em relação ao cenário BASE.

4.4. CONSUMO DE OXIGÊNIO, CARBONO E FÓSFORO DE VAZAMENTO

Um parâmetro especialmente importante monitorado no teste foi o carbono e o fósforo de vazamento. O gráfico da figura 4.6 ilustra as variações no consumo de oxigênio nos injetores multifuncionais, carbono e fósforo de vazamento no cenário TESTE, de forma percentual e comparativa ao cenário BASE.

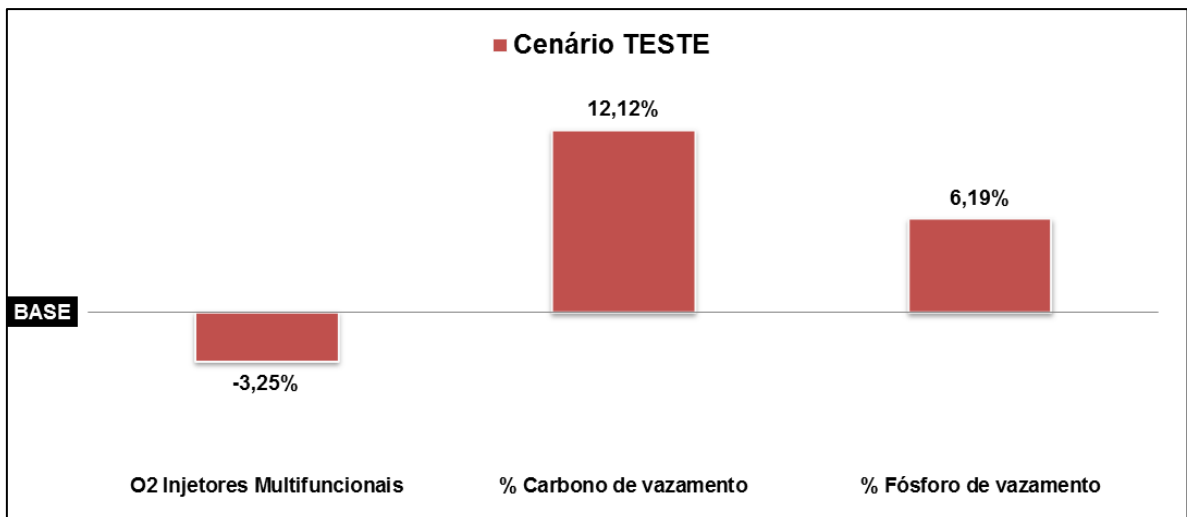


Figura 4.6: variação no consumo de oxigênio dos injetores multifuncionais, carbono e fósforo de vazamento no cenário TESTE, comparativamente ao cenário BASE.

O consumo de oxigênio reduziu em 3,25%, o carbono de vazamento aumentou em 12,12%, e o fósforo de vazamento aumentou em 6,19% no cenário TESTE em relação ao cenário BASE, o que é de se esperar, uma vez que o oxigênio é necessário para a descarburização e desfosforização. Uma das funções dos injetores multifuncionais é atuar na descarburização do banho líquido quando em modo Lança, como não se teve acesso aos dados de consumo de oxigênio somente no modo lança, não se pode atribuir qualquer relação desse resultado com as alterações propostas no teste.

5. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos no estudo foi possível concluir que:

- Os injetores multifuncionais apresentaram estabilidade durante os testes, sem aparente perda de coerência com o aumento em 12,5% da vazão de oxigênio principal.
- O processo apresentou estabilidade em termos de consumo de energia total para os dois cenários testados.
- O cenário TESTE, em comparação ao cenário BASE, apresentou redução em 23,68% no consumo de coque no forno elétrico a arco.
- Utilizando uma vazão maior de oxigênio principal e menor tempo de injeção no modo Lança + dos injetores multifuncionais obteve-se uma melhor espumação da escória com um menor consumo de coque injetado.
- As alterações propostas no cenário TESTE levaram a um menor teor de FeO e aumento da basicidade da escória, aumentando a viscosidade e diminuindo o MgO de saturação da mesma.
- Houve uma significativa redução no consumo de gás natural no cenário TESTE, onde se evidenciou a relação direta deste consumo com o tempo de *power on*.
- O consumo de energia total (elétrica + química) no cenário TESTE apresentou redução de 0,94% em relação ao cenário BASE.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar, por modelagem física e computacional, o comportamento do jato coerente e seu efeito na agitação do banho, variando a vazão de oxigênio principal.

Conduzir teste semelhante, avaliando a influência de diferentes vazões na eficiência de espumação da escória, levando em consideração a taxa de distorção harmônica global.

Realizar teste semelhante, analisando a eficiência da descarburização com a quantidade de oxigênio injetado somente no modo Lança para diferentes vazões de oxigênio principal.

7. REFERÊNCIAS

ADAMS, W. **Arc Furnace Technology**. Gerdau EAF Seminar, 2008.

ALLEMAND, B. et al. **Theoretical and experimental study of supersonic oxygen jets - Industrial application in EAF**. *Revue de Métallurgie*, v. 98, n. 6, p. 571-587, jun. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16229**: Sucata de ferro fundido e aço. Rio de Janeiro, 2013.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Estudo prospectivo do setor siderúrgico**. Brasília, 2008.

FAVARETTO, T.; **Estudo comparativo da influência da alteração de uma injetora de carbono convencional para uma injetora supersônica de carbono em um forno elétrico a arco**. Porto Alegre: UFRGS, 2014. Trabalho de diplomação, DEMET, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FIGUEIRA, R. M. **ACI-504: Operação do FEA**. Módulo Interno de Treinamento da Gerdau, 2007.

FORTES, R. A. F. O.; MATSUURA, H.; MANNING, C. P.; FRUEHAN, R. J. **Development of a Decarburization and Slag Formation Model for the Electric Arc Furnace**. *ISIJ International - Iron and Steel Institute of Japan*, v. 48, n. 9, p. 1197-1205, set. 2008.

FORTES, R. A. F. O.; D'ABREU, J. C.; AVILLEZ, R. R. **Melting rates of ferrous materials in the EAF**. In: FRUEHAN SYMPOSIUM ON PHYSICAL CHEMISTRY OF SUSTAINABLE METAL PROCESSING. 2011, Pittsburg. **Proceedings....** 2011, Pittsburg. Pittsburg: Carnegie Melon University, 2011. p. 107-127.

FRUEHAN, R. J.; MANNING, C. P. **Emerging Technologies for Iron and Steelmaking**. *JOM - The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, v. 53, n. 10, p. 36-43, out. 2001.

GASKELL, D. R. **Introduction to Metallurgical Thermodynamics**. 1st edition. Washington: McGraw- Hill Kogakusha, LTD, 1973.

ITO, K.; FRUEHAN, R. J. **Slag Foaming in Electric Furnace Steelmaking**. Iron and Steelmaker, v. 16, n. 8, p. 55-60, aug. 1989.

JOHN, A. L.; **Melhorias no desempenho dos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco**. Porto Alegre: UFRGS, 2009. Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MAHONEY, W. J. **Experimental Remarks on Supersonic Jet Behavior in High-temperature, Reactive Ambient in Connection to Steelmaking**. AISTech Proceedings, Pittsburgh, v. 1, p. 1071-1081, mai. 2010.

MATHUR, P. **Coherent Jets in Steelmaking: Principles and Learnings**. 43rd Annual Conference of Metallurgists of CIM, Hamilton, p. 251-265, ago. 2004.

MATHUR, P.; MESSINA, C. **Praxair CoJet Technology - Principles and Actual Results from Recent Installations**. AISE Steel Technology, v. 78, n. 5, p. 21-25, mai. 2001.

OPFERMANN, A.; RIEDINGER, D. **Energy Efficiency of Electric Arc Furnaces**. AISTech Proceedings, Pittsburgh, v. 1, p. 1-14, mai. 2008.

PFEIFER, H.; KIRSCHEN, M.; SIMOES, J. P. **Thermodynamic Analysis of EAF Electrical Energy Demand**. 8th European Electric Steelmaking Congress, Birmingham, v. 8, 211-232, mai. 2005.

PRETORIUS, B. E.; CARLISLE, R. C. **Foamy Slag Fundamentals and their Application to Electric Furnace Steelmaking**. 56th Electric Arc Furnace Conference, New Orleans, v. 56, p. 275-292, nov. 1998.

RIZZO E. M. S. **Curso de Introdução aos Processos Siderúrgicos**. São Paulo: ABM, 2005.

ROSSI, D.; **Influência da proporção entre as vazões de oxigênio de gás natural do sistema de injeção na eficiência energética de um forno elétrico a**

arco. Porto Alegre: UFRGS, 2014. Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SANDBERG, E. Energy and Scrap Optimisation of Electric Arc Furnaces by Statistical Analysis of Process Data. Luleå: 2005, Licentiate Thesis, Luleå University of Technology.

SILVA M. J. S. Redução do Consumo Específico de Eletrodos de Grafita nos Fornos Elétricos à Arco da Aciaria da Gerdau Riograndense. Porto Alegre: UFRGS, 2005. Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade federal do Rio Grande do Sul.

Seminário de Aciaria Elétrica UCAR, Rio de Janeiro: Gerdau Cosigua, 2008.

Seminário de Aciaria Elétrica LUMAR, Araçariçuama: Gerdau São Paulo, 2013.

THOMPSON, M. J. et al. Effect of oxyfuel burner ratio changes on energy efficiency in electric arc furnace at Co-Steel Lasco. Ironmaking and Steelmaking. v. 28, n. 3, p. 266-272, jun. 2001.

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

UCAR. Electric Arc Furnace Digest. Estados Unidos, UCAR, 2001.