

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

INFLUÊNCIA DA PROPORÇÃO ENTRE AS VAZÕES DE OXIGÊNIO E GÁS
NATURAL DO SISTEMA DE INJEÇÃO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM
FORNO ELÉTRICO A ARCO

Daniel Rossi

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2014

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

INFLUÊNCIA DA PROPORÇÃO ENTRE AS VAZÕES DE OXIGÊNIO E GÁS
NATURAL DO SISTEMA DE INJEÇÃO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM
FORNO ELÉTRICO A ARCO

Daniel Rossi
Engenheiro Metalúrgico

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa.

Porto Alegre
2014

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela - PPGE3M/UFRGS

Dr. Raimundo Augusto Ferro de Oliveira Fortes - Gerdau/RJ

Dr. Leonardo Barboza Trindade - STE/RS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

“Nada é impossível para aquele que persiste.”

Alexandre Magno

Aos meus pais Adir e Heloisa e ao meu irmão Franco, que foram as pessoas que me apoiaram e me incentivaram ao longo de toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e meu irmão por sempre acreditarem na minha capacidade.

À minha namorada Gabriella pelo incentivo, carinho e companheirismo.

Ao professor Wagner Viana Bielefeldt pelo estímulo e orientação.

Ao professor Antônio Cezar Faria Vilela por guiar meus passos acadêmicos desde a época da graduação.

À Gerdau Riograndense e, em especial, ao engenheiro Tiago Alliatti Beleza, por acreditarem nas minhas ideias e possibilitarem a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	11
RESUMO	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1. PRINCIPAIS ROTAS DE PRODUÇÃO DO AÇO.....	15
2.2. PRODUÇÃO DE AÇOS EM USINAS INTEGRADAS COM CONVERSORES LD/BOF.....	16
2.3. PRODUÇÃO DE AÇOS EM USINAS SEMI-INTEGRADAS	16
2.4. ACIARIA ELÉTRICA	18
2.4.1. <i>Pátio de Sucatas</i>	18
2.4.2. <i>Forno Elétrico a Arco - refino primário</i>	19
2.4.2.1. Preparação do cestão e carregamento.....	20
2.4.2.2. Perfuração e fusão	22
2.4.2.3. Refino	24
2.4.3. <i>Forno-Panela - refino secundário</i>	27
2.4.3. <i>Lingotamento</i>	29
2.5. ENERGÉTICOS UTILIZADOS NO FORNO ELÉTRICO A ARCO	30
2.5.1. <i>Energia elétrica e o arco elétrico</i>	31
2.5.2. <i>Energia química</i>	36
2.5.2.1. Energia de queimadores.....	36
2.5.2.2. Energia de redução	36
2.5.2.3. Energia de oxidação	37
2.5.2.4. Energia de pós-combustão.....	40
2.6. INJEÇÃO DE GASES NO FEA.....	41
2.6.1. <i>Injeção de gás natural com queimadores oxi-combustível</i>	41
2.6.2. <i>Injeção de oxigênio em modo lança com injetores supersônicos</i>	43

2.6.2.1. Jato supersônico convencional.....	44
2.6.2.2. Jato supersônico coerente.....	46
2.6.3. <i>Principais fatores com influência sobre o comprimento coerente do jato.</i>	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	52
3.2. COLETA DE DADOS	55
3.3. METODOLOGIA DE REALIZAÇÃO DO TESTE.....	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.1. DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA TOTAL POR CENÁRIO	61
4.2. PARÂMETROS DE PROCESSO DO FORNO ELÉTRICO A ARCO	61
4.3. RESULTADOS POR COMPONENTE DO CONSUMO DE ENERGIA TOTAL	63
4.4. CONSUMO DE OXIGÊNIO E CARBONO DE VAZAMENTO	67
4.4. BALANÇO DE MASSA.....	69
5. CONCLUSÕES.....	72
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais rotas de produção do aço.	15
Figura 2: Representação esquemática do FEA.....	20
Figura 3: Desenho esquemático das etapas da fusão da carga em um FEA.....	23
Figura 4: Relação entre índice de espumação e viscosidade efetiva.....	25
Figura 5: Influência do FeO, MgO e basicidade ternária na efetividade da espumação da escória.....	26
Figura 6: Solubilidade do MgO para escórias com dupla saturação (CaO e MgO) a 1600 °C.	26
Figura 7: Ilustração esquemática de um forno-panela.	28
Figura 8: Balanço energético em um FEA.....	31
Figura 9: Sistema elétrico do FEA.....	32
Figura 10: Características do arco elétrico no FEA.	33
Figura 11: Vetores de força eletromagnética entre 100 e 120 Hz.	34
Figura 12: Formação de pontos quentes e frios com fusão por arco elétrico.	34
Figura 13: Característica do fluxo de calor do arco elétrico conforme variação da corrente.	35
Figura 14: Diagrama de Ellingham.....	38
Figura 15: Evolução do teor de carbono dissolvido e da taxa de descarburização durante o processo.....	40
Figura 16: Eficiência de queimadores no período de fusão.	42
Figura 17: Eficiência térmica e perdas pelos gases de exaustão.....	42
Figura 18: Jato supersônico convencional e jato supersônico coerente.	44
Figura 19: Modelo de bocal supersônico convergente-divergente.	45
Figura 20: Comportamento de gases dentro do bocal de laval.	45
Figura 21: Regiões típicas de um jato supersônico convencional.	46
Figura 22: Jato supersônico com chama de proteção.....	47
Figura 23: Perfil de um jato coerente com chama <i>shroud</i>	47
Figura 24: Efeito da pressão de entrada do oxigênio no comprimento coerente.....	48
Figura 25: Efeito da temperatura ambiente no comprimento coerente.....	49
Figura 26: Efeito da temperatura do O ₂ de entrada no comprimento coerente.	49
Figura 27: Efeito da vazão do jato no comprimento coerente.	50
Figura 28: Comparação do comprimento do jato em diferentes ambientes.	50

Figura 28: Efeito do teor de gás combustível em jatos de oxigênio (Mach 2).	51
Figura 29: Linhas de gases no bico do injetor de jato coerente.	54
Fonte: Gerdau Riograndense	54
Figura 31: Distribuição do consumo de energia total por cenário.....	61
Figura 32: Variação dos parâmetros de processo do forno em cada cenário comparativamente ao cenário 1 (base).	62
Figura 33: Resultado comparativo estratificado do cenário 2.....	63
Figura 34: Resultado comparativo estratificado do cenário 3.....	65
Figura 35: Resultado comparativo estratificado do cenário 4.....	66
Figura 36: Resultado gráfico do DOE.....	67
Figura 37: Variação do consumo de oxigênio em relação ao cenário 1 (base).....	68
Figura 38: Carbono de vazamento em cada cenário do teste	68
Figura 39: Teste estatístico para avaliar significância da diferença entre os carbonos de vazamento.....	69
Figura 40: Balanço de massa do cenário 1 com PCR =0,25/0,10.....	70
Figura 41: Balanço de massa do cenário 4 com PCR=0,45/0,25.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reações químicas exotérmicas durante o refino no FEA.....	37
Tabela 2 - Dados do forno elétrico a arco	52
Tabela 3 - Dados do forno-panela.....	52
Tabela 4 - Dados do sistema de injeção (injetores multifuncionais).....	52
Tabela 5 - Dados do sistema de injeção (manipulador de lanças).....	53
Tabela 6 - Modos de operação do sistema de injeção.....	54
Tabela 7 - Cenários testados no DOE.....	57
Tabela 8 - Insumos e seus poderes caloríficos	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Símbolo/Abreviatura	Descrição
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
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	Óxido de cromo (III)
DOE	Design of Experiments
DRI	Direct reduced iron
Fe	Ferro
FEA	Forno elétrico a arco
FeO	Óxido de ferro (Wustita)
FP	Forno-panela
GN	Gás natural
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
LD	Linz-Donawitz
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MgO	Óxido de magnésio
N ₂	Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
P	Fósforo
Si	Silício
SiO ₂	Óxido de silício

RESUMO

Independentemente do nível de verticalização ou da sua escala de produção, a redução de custos e o aumento de produtividade têm sido os principais focos internos das empresas da indústria do aço. Dois fatores controlam fundamentalmente o custo de produção do aço: o preço e o consumo dos insumos e matérias-primas. O primeiro depende fortemente do poder de barganha da empresa e das condições de mercado e, muitas vezes, não é possível exercer grande controle sobre ele. Sendo assim, é através da diminuição do consumo específico dos insumos e matérias-primas que a empresa pode obter sucesso na sua missão, internamente, de maximizar seu lucro.

Em aciarias elétricas, o consumo dos insumos tem impacto importante na composição do custo final do aço, dos quais se destaca o consumo de energéticos utilizados no forno elétrico a arco, que pode representar até 30% do custo operacional desse tipo de aciaria. Para quantificar o aporte desses diferentes tipos de energia no forno, normalmente é utilizado o indicador de consumo de energia total, que utiliza o poder calorífico de cada tipo de energético na transformação para a unidade de kWh/t.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o impacto na eficiência energética do forno, medida através do consumo de energia total, da redução da vazão de gás natural nos modos lança e da modificação da proporção entre oxigênio e gás natural (O_2/GN) em um dos modos queimador do sistema de injeção de um forno elétrico a arco. Para tanto, foi realizado um teste estatístico dividido em quatro cenários no formato de projeto de experimentos (DOE).

O cenário em que as modificações no modo queimador e nos modos lança foram aplicadas conjuntamente apresentou a maior redução no consumo de energia total (2,50%), impulsionada principalmente pelas reduções no consumo de gás natural (16,94%) e no consumo de energia elétrica de forno e forno-panela (-1,90%). Através da análise do carbono de vazamento de todas as corridas não foi possível afirmar que os ganhos em consumo de energia elétrica foram provenientes de uma maior oxidação de ferro da carga nas corridas.

Palavras-chave: energia total; eficiência energética; injeção de gases; processo de FEA.

ABSTRACT

Companies have been extensively focusing on cost reduction and productivity optimization in the last few years, independently of their levels of production or verticalization. The cost of production is basically controlled by two factors: the price and the consumption of raw and input materials. The price depends on the current conditions of the market and the capacity of the company to deal with its suppliers about the price to be paid. Due to that, it is very difficult to control this factor and for this reason, through the reduction in raw material and inputs consumption that companies can achieve their mission of becoming more profitable.

In electric steelmaking, consumption of inputs plays an important role on the final billet cost, with particular emphasis to the energy consumption in the electric arc furnace, which can represent up to 30% of the operational cost in a melt shop. To quantify the contribution of different types of energy in the furnace, it is used the performance indicator of total energy consumption, which associates the heat of combustion of each type of energetic in order to use the unit kWh/t.

The aim of this study was to evaluate the impact on the energy efficiency of the furnace, measured by the total energy consumption, reducing the flow of natural gas in lance modes and modifying the ratio between oxygen and natural gas (O_2/NG) in one of the burner modes of the injection system in an electric arc furnace. Thus, a statistical test divided into four scenarios in the format of design of experiments (DOE) was conducted.

The scenario in which the burner mode and lance mode modifications were applied together resulted in the greatest reduction in total energy (2,50%), driven especially by reductions in natural gas consumption (16,94%) and electrical energy consumption of furnace and ladle furnace (1,90%). Through the analysis of tapping carbon of all heats it was not possible to assert that gains in electrical energy were due to a higher oxidation of iron contained in the blend charged.

Key words: total energy, energy efficiency, gas injection, EAF process.

1. INTRODUÇÃO

O processo do forno elétrico a arco (FEA) consome uma quantidade muito grande de recursos, tais como, energia elétrica, energia química (oxigênio, gás natural, materiais carbonosos e óleos) e altos volumes de água de refrigeração para fundir a carga metálica e aquecê-la até sua temperatura de vazamento. Pode-se dizer que é um processo intensamente energético. Dessa forma, um dos maiores desafios dentro de aciarias elétricas é fazer com que, dentro de determinadas condições, consiga-se aperfeiçoar o processo de um forno para que tenha alta produtividade e baixo custo, utilizando a menor quantidade possível de recursos.

Segundo Opfermann (2008), a máxima produtividade pode ser atingida utilizando a maior quantidade de energia elétrica e química disponível, uma vez que quanto maior a potência (elétrica e química) de um forno, mais rapidamente o metal será fundido. No entanto, o que muitas vezes se questiona é quanto dessa potência que está sendo disponibilizada está realmente fundindo o metal e quanto está sendo perdida, pois para ser eficiente, um processo necessita ter baixas perdas.

Desde os anos 60 a evolução na operação dos fornos elétricos tem resultado em grandes avanços no consumo de insumos e aumento de produtividade, porém há muito trabalho ainda a ser realizado no campo de redução de perdas, uma vez que a eficiência energética média de um FEA normalmente está entre 55 a 65%.

Este trabalho tem como objetivo geral melhorar a eficiência energética de um forno elétrico a arco através da realização de um teste estatístico no formato de projeto de experimentos (DOE) alterando as vazões dos gases do sistema de injeção do forno.

Os objetivos específicos do trabalho são avaliar a influência da redução da vazão de gás natural nos modos lança e da modificação da proporção de O_2 /GN em um dos modos queimador do sistema de injeção de gases do FEA no consumo de energia total, além de correlacionar e avaliar o impacto das modificações propostas nos parâmetros de processo do forno, bem como dos parâmetros de processo nos resultados do teste.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. PRINCIPAIS ROTAS DE PRODUÇÃO DO AÇO

A tecnologia de produção do aço segue duas linhas principais: usinas integradas com conversores a oxigênio (LD/BOF) e usinas semi-integradas, onde se produz aço através de fornos elétricos a arco (Figura 1). Aproximadamente dois terços da produção mundial anual de cerca de 1,6 bilhão de toneladas são fabricados em conversores LD/BOF e um terço em fornos elétricos a arco. Existem também processos como o de redução direta (RD), redução-fusão (RF) e EOF (Energy Optimizing Furnace), porém estes são responsáveis por um menor volume de produção no cenário mundial.



Figura 1: Principais rotas de produção do aço.

Fonte: Site institucional da Gerdau (2014)

2.2. PRODUÇÃO DE AÇOS EM USINAS INTEGRADAS COM CONVERSORES LD/BOF

A rota de fabricação via grandes altos-fornos a coque e conversores LD/BOF é viável em plantas com larga escala de produção, variando entre duas e dez milhões de toneladas ao ano, pois o capital investido por tonelada de aço produzido é bastante elevado (BADIA, 2012).

O processo se inicia no alto-forno, que é um reator metalúrgico de contra corrente, onde a carga (mínério de ferro, fundentes, coque ou carvão vegetal) é carregada pela extremidade superior do equipamento e, ao descer, reage com os gases ascendentes oriundos da injeção de ar em altas temperaturas por ventaneiras na região inferior do alto-forno. Como combustíveis auxiliares também são injetados finos de carvão e/ou gás natural. O ar quente injetado gaseifica o coque, produzindo o gás redutor (monóxido de carbono) e grande quantidade de calor, que sobem em direção ao topo em contracorrente à descida da carga, proporcionando o aquecimento, a redução e a fusão da carga metálica. O produto do alto-forno é o ferro-gusa líquido depositado no cadinho, que será utilizado como matéria-prima básica e passará por um processo de refino em reatores conhecidos como conversores ou convertedores, em aciarias a oxigênio. Nesses equipamentos a carga, constituída basicamente por ferro-gusa líquido, sucata sólida e fundentes será fundida e terá sua composição química e temperatura ajustadas através da injeção de oxigênio feita por uma lança refrigerada. As principais vantagens do processo LD/BOF são os altos índices de produtividade (até 600 toneladas por hora) e a possibilidade de fabricação de diversos tipos de aço (GUMIERI, 2002). Maiores detalhes sobre altos-fornos e processo LD/BOF podem ser consultados em Rizzo (2005).

2.3. PRODUÇÃO DE AÇOS EM USINAS SEMI-INTEGRADAS

Usinas semi-integradas operam em apenas duas fases do processo siderúrgico: refino e laminação. Possuem um fluxo de produção mais curto que as usinas integradas, pois não realizam as atividades de coqueificação, sinterização e produção de ferro-gusa via alto-forno. Utilizam normalmente ferro-gusa sólido, ferro-esponja e sucata metálica como matérias-primas.

Nas usinas semi-integradas surgiu o conceito de *Mini Mills*, que são usinas que utilizam fornos elétricos a arco e que operam com menores escalas de produção, o que determina o direcionamento ao atendimento de mercados locais mesmo quando instaladas em países com dimensões continentais.

As origens do FEA remontam a 1878, quando W. Von Siemens patenteou um forno com dois eletrodos dispostos horizontalmente que criavam um arco indireto aquecendo a carga por irradiação. No entanto, esta invenção só começou a trilhar uma trajetória ascendente na produção de aço no século XX, quando os custos com a energia elétrica e a disponibilidade de sucata começaram a viabilizar o uso desta tecnologia (ANDRADE, 2000).

A primeira instalação industrial de um forno elétrico a arco foi nos Estados Unidos em 1907. Até a Segunda Guerra Mundial, o FEA era utilizado para a produção apenas de aços especiais altamente ligados, devido à sua capacidade de aquecer o metal a altas temperaturas, condição necessária para adições de grandes quantidades de liga. Após a Segunda Guerra Mundial, a Europa era um terreno fértil para implantação de usinas baseadas em fornos elétricos, impulsionada pela alta demanda de aço, grande disponibilidade de sucata e, principalmente, escassez de capital, tendo em vista a prioridade dos investimentos voltada para a reconstrução dos países devastados. Assim, a expansão das aciarias elétricas ocorreu principalmente na Europa, com a criação de novas siderúrgicas de pequeno porte para concorrer com grandes empresas americanas e, posteriormente, nos Estados Unidos, com usinas americanas em contraposição à expansão das usinas européias no mercado americano. Nos anos 70 e 80 as crescentes restrições ambientais e elevado custo de mão de obra levaram várias usinas integradas a substituir seus equipamentos por fornos elétricos a arco e, ao final dos anos 80, houve sua consolidação com o início da produção de aços planos via processo elétrico (FIGUEIRA, 2007).

Conforme Fruehan (2001), as principais vantagens do processo utilizando fornos elétricos frente ao processo LD/BOF são:

- Maior flexibilidade no uso de matérias-primas;
- Maior flexibilidade na utilização da energia (química e/ou elétrica);
- Melhor eficiência térmica;
- Menor investimento inicial;

- Menor impacto ambiental.

2.4. 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). O leitor interessado poderá obter maiores detalhes sobre o tema consultando a bibliografia dos autores (URQUIZA, 1995) e (TURKDOGAN, 1996).

2.4.1. Pátio de Sucatas

O processo de fabricação do aço inicia no pátio de sucatas, que é o local onde são armazenadas, processadas e transportadas as matérias-primas básicas da aciaria elétrica, correspondendo a aproximadamente 70% do custo final do tarugo. Em locais como o Brasil, por exemplo, onde a capacidade das empresas de fornecer sucatas processadas para as usinas é baixa, o papel do pátio de sucatas é fundamental na transformação e adequação do material recebido para o uso no forno elétrico.

A sucata é separada, classificada e processada de acordo com seu tamanho, densidade, procedência e composição química. Materiais não ferrosos e impurezas são segregados, pois não são utilizados no processo.

As sucatas podem ser classificadas em três categorias principais:

- Sucata de retorno interno: é 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. Segundo John (2009), a disponibilidade desse tipo de sucata está em constante declínio em função da melhoria contínua que vem sendo obtida nos processos da aciaria, gerando cada vez menos perdas;

- Sucata industrial: proveniente da transformação do aço em produto acabado, que gera materiais como: sobras de estamparia, retalhos de chaparia, etc. O fator gerador desse tipo de sucata é altamente dependente da atividade das diversas indústrias que utilizam o aço;

- Sucata de obsolescência: comumente chamada de “ferro-velho”, corresponde à sucata que chega à usina após quinze anos ou mais da sua produção original.

Além de sucata, também é comum, especialmente no Brasil, a utilização de ferro-gusa sólido, que ocorre principalmente em função da escassez de sucata no mercado brasileiro. As indústrias aproveitam esse material como fonte energética para elevar a produtividade de seus fornos, pelo seu alto teor de carbono, além de possibilitar a produção de aços mais nobres, pela baixa quantidade de residuais metálicos dessa matéria-prima. Outro material que também pode ser utilizado como carga metálica é o ferro-esponja, porém sua utilização é menos frequente.

Após a classificação, muitas sucatas que chegam a usina necessitam de processamento, de forma a viabilizar e/ou otimizar seu uso nos fornos elétricos. Os principais métodos utilizados no processamento de sucatas nos pátios são:

- Prensa tesoura: prensa e corta a sucata através de uma tesoura do tipo guilhotina, podendo conter um sistema vibratório para remoção de impurezas;
- Shredder: equipamento composto por moinho e grelhas, que tritura a sucata e promove a retirada de impurezas como material orgânico e terra, além da separação de materiais não metálicos como o alumínio e cobre;
- Prensa pacote: prensa utilizada para formar pacotes de sucata, geralmente utilizado em embalagens metálicas (latas de alimentos descartadas).
- Oxicorte: utilizado para cortar sucatas de grandes dimensões como navios, blocos de máquinas industriais, engrenagens de grandes dimensões, etc.

Após processadas e prontas para o consumo interno, as sucatas de diferentes tipos são dispostas em áreas específicas denominadas baias e carregadas no cestão, juntamente com fundentes, como as cales calcítica e dolomítica, e em alguns casos materiais carburantes como o coque de petróleo, por exemplo.

2.4.2. Forno Elétrico a Arco - refino primário

É nos fornos elétricos a arco (Figura 2) que ocorre a fusão e refino da carga do cestão. Estes equipamentos possuem uma carcaça metálica coberta por uma abóbada e têm seu interior revestido com material refratário e painéis refrigerados. No caso de fornos de corrente alternada, possuem três colunas de eletrodos de

grafita que servem como meio condutor da corrente elétrica para promover a fusão da carga.

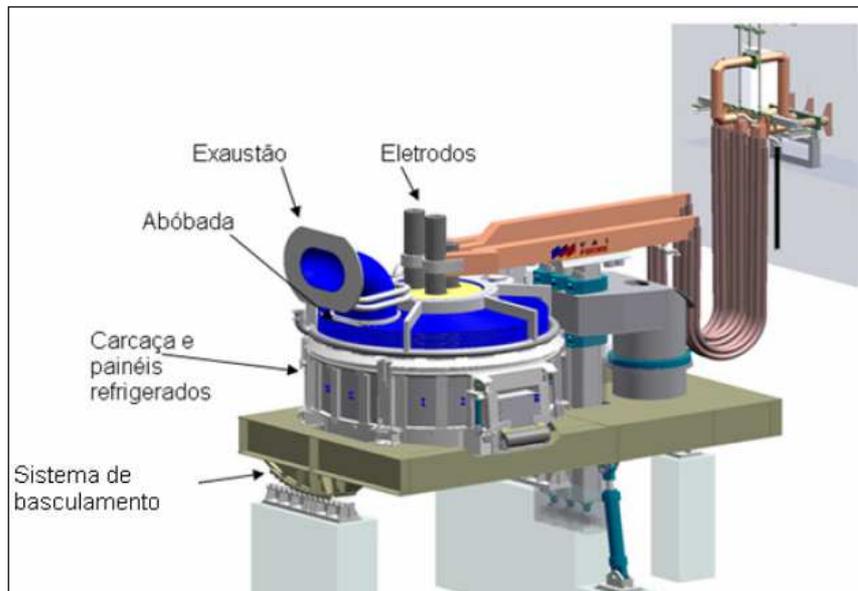


Figura 2: Representação esquemática do FEA.

Fonte: Curso de Aciaria Elétrica ABM (2007)

A operação em um forno elétrico a arco pode ser subdividida nas seguintes etapas: preparação do cestão, carregamento, fusão, refino e vazamento.

2.4.2.1. 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. 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 a abóbada da irradiação do arco elétrico.

Na camada inferior do cestão recomenda-se utilizar sucata leve (densidade entre 0,25 e 0,55 t/m³) para servir como um “colchão” para as sucatas pesadas que são colocadas acima, protegendo o material refratário da carcaça inferior do forno e os painéis refrigerados de danos causados por impacto mecânico.

Acima dessa camada devem ser colocadas as sucatas pesadas (densidade acima de 1,1 t/m³), diminuindo o risco de quebra de eletrodos por queda de sucata, que podem ocorrer quando elas são colocadas acima no cestão. Há um efeito positivo na compactação da carga gerado pelo amassamento da sucata leve pela

sucata pesada acima. Com a rápida fusão da carga da base do cestão, a sucata de maior densidade logo entra em contato com o fundo úmido, fazendo com que sua taxa de fusão seja acelerada significativamente. Esse tipo de sucata muitas vezes tem seu emprego limitado no forno, pois possui taxas de fusão tão baixas quando comparado com sucatas mais leves, que é comum encontrar peças que ficam sólidas ao longo de todo refino até o final da corrida, gerando riscos de rebotes por oxigênio que causam danos aos painéis refrigerados.

Na terceira camada é colocado o ferro-gusa e carburantes. Em seu trabalho analisando taxas de fusão de diversos materiais utilizados no cestão, Fortes (2011) 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. Nesse fenômeno, cria-se uma casca sólida ao redor da peça de gusa, fazendo com que ao final da corrida a parte interna esteja fundida enquanto a casca sólida permanece intacta. Nesse momento, em que já se trabalha com altas temperaturas, quando houver o extravasamento desse líquido interno encapsulado que possui alto teor de carbono para o banho, podem ser geradas reações muito fortes em função da sua rápida reação com o oxigênio. Dessa forma, para teores de ferro-gusa sólido na carga acima de 20% em massa, o fundo úmido exerce papel fundamental na taxa de fusão do mesmo, portanto seu controle é muito importante.

Acima do ferro-gusa recomenda-se utilizar sucatas de densidade média e pacotes envoltos nas mesmas, para que evitem seu deslocamento durante a fusão. Não se recomenda utilizar os pacotes no topo dessa camada, uma vez que apresentam risco de quebra de eletrodos.

No topo do cestão utilizam-se sucatas leves, que facilitem a rápida penetração dos eletrodos durante a perfuração, minimizando a exposição da abóbada ao arco elétrico e posteriormente, servindo como proteção para a abóbada durante o período de fusão. Nessa camada não deve haver presença de materiais isolantes, tais como, madeira e borracha, 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.

Essa sequência de carregamento irá também aumentar a densidade de carga devido à penetração de pequenos pedaços de sucata leve nos interstícios da sucata média, e essa, nos interstícios da sucata pesada, favorecendo a redução do número de cestões e aumentando a estabilidade do arco elétrico.

Depois de confeccionado o cestão os eletrodos são levantados, a abóbada é aberta e o forno é carregado por meio de pontes rolantes. O número de cestões necessários para produzir uma corrida de aço é função principalmente do volume do forno, volume do cestão e densidade da sucata. Alguns fornos modernos já são projetados para operar com apenas um carregamento, aumentando significativamente sua produtividade e reduzindo perdas energéticas. Fornos do tipo Consteel operam com aquecimento da carga através dos gases gerados no forno. Neste processo, o forno opera com a abóbada fechada, sem a necessidade de utilizar carregamento com cestões. A sucata é carregada através de esteiras que estão localizadas dentro do túnel do sistema de despoeiramento, pelo qual passam os gases quentes oriundos do forno. Esta combinação garante alta produtividade e custos reduzidos, além de diminuir os impactos ambientais.

2.4.2.2. Perfuração e fusão

Após o carregamento, a etapa de perfuração 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, obtido com a redução da tensão no secundário do transformador do forno e ajustando o reator para limitar a corrente (JOHN, 2009). O tempo de perfuração raramente ultrapassa três minutos e corresponde às etapas de 1 a 4 no desenho esquemático da Figura 3.

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 abóbada. Com um arco mais longo e vertical, o calor pode ser irradiado horizontalmente e a sucata é fundida mais rapidamente. Essa é a etapa da corrida onde é utilizada a potência máxima permitida pelo transformador do forno. Cada um dos eletrodos forma uma pequena poça líquida, que gradativamente aumenta ao longo da fusão até que uma poça única seja formada, estabilizando o arco e aumentando a potência média. Essa evolução do período de fusão é mostrada entre as etapas 5 e 10 na Figura 3.

Uma vez que a sucata do carregamento foi suficientemente fundida para acomodar a carga do próximo cestão, o forno é carregado novamente e o processo se repete até que o último cestão seja fundido e atinja-se uma condição de banho plano, que é quando se inicia a etapa de refino, que corresponde às etapas 11 e 12 da Figura 3.

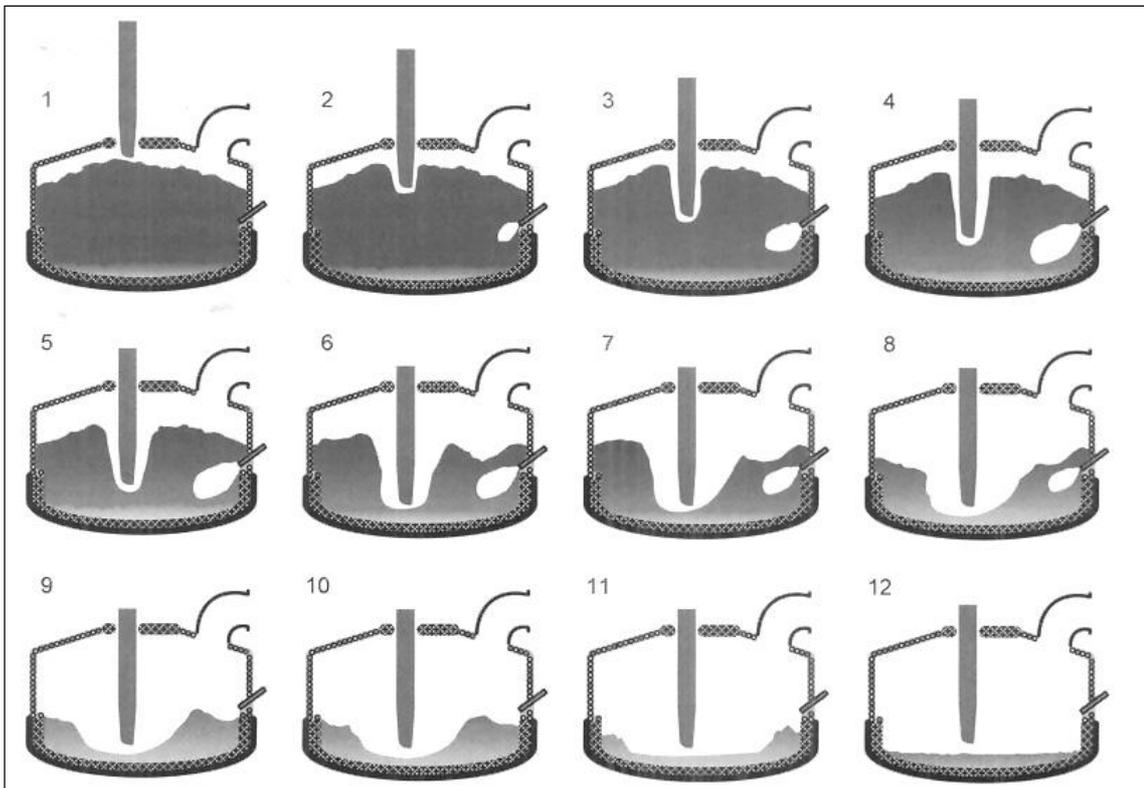


Figura 3: Desenho esquemático das etapas da fusão da carga em um FEA.

Fonte: Gerdau (2013)

Segundo John (2009), se a opção for carregar o cestão seguinte com toda a carga fundida, conforme o nível de sucata sólida vai sendo reduzido há um aumento da exposição das paredes e abóbada à irradiação do arco. Neste caso, é necessário reduzir o comprimento do arco, que leva a redução na taxa de fusão e na produtividade. Se a opção for realizar o carregamento seguinte com alguma sucata ainda não fundida, não é necessária a redução da potência e, dessa forma, podem ser obtidos ganhos importantes em produtividade, desde que este procedimento não exija o carregamento de um cestão adicional ou a utilização de sucatas de maior densidade.

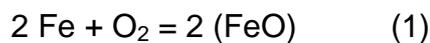
Durante toda corrida, paralelamente à fusão gerada pelo arco elétrico, ocorre o aquecimento e fusão da carga através de aporte de energia química proveniente

da injeção de gases, que pode ser feita por diversos dispositivos em um forno elétrico. Esse assunto será explorado em maiores detalhes posteriormente nesse trabalho.

2.4.2.3. 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 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 (FRUEHAN, 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 4 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.

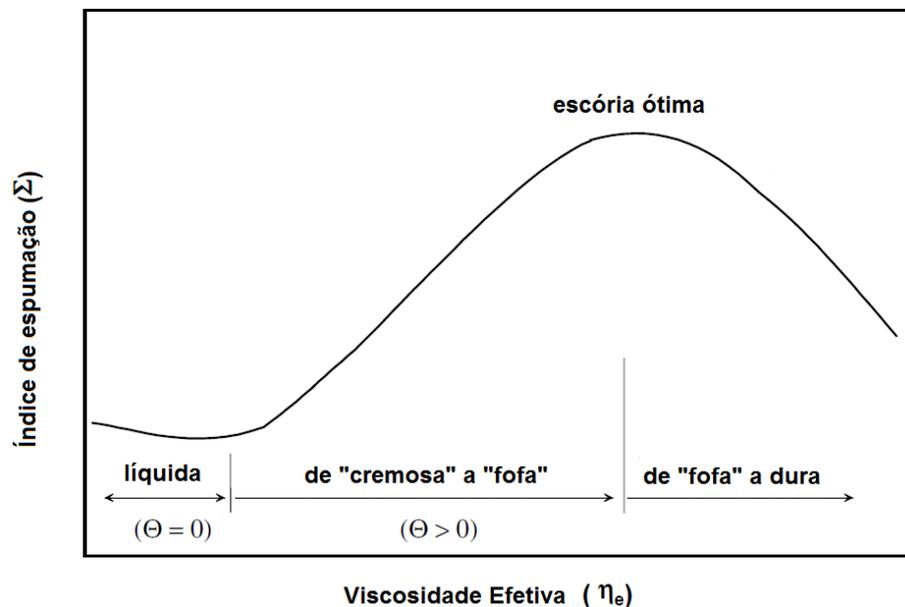


Figura 4: Relação entre índice de espumação e viscosidade efetiva.

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 (CaO, SiO₂, Al₂O₃) e o MgO presentes na mesma.

A Figura 5 mostra a efetividade da espumação como função do teor de FeO e da basicidade ternária, enquanto na Figura 6 observa-se a solubilidade do MgO em função da basicidade binária. A basicidade binária é a razão entre os teores de óxido de cálcio e de óxido de silício na escória. Já a basicidade ternária é a razão entre o teor de óxido de cálcio e a soma dos teores de óxido de silício e de óxido de alumínio. Quanto maior forem os dois tipos de 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.

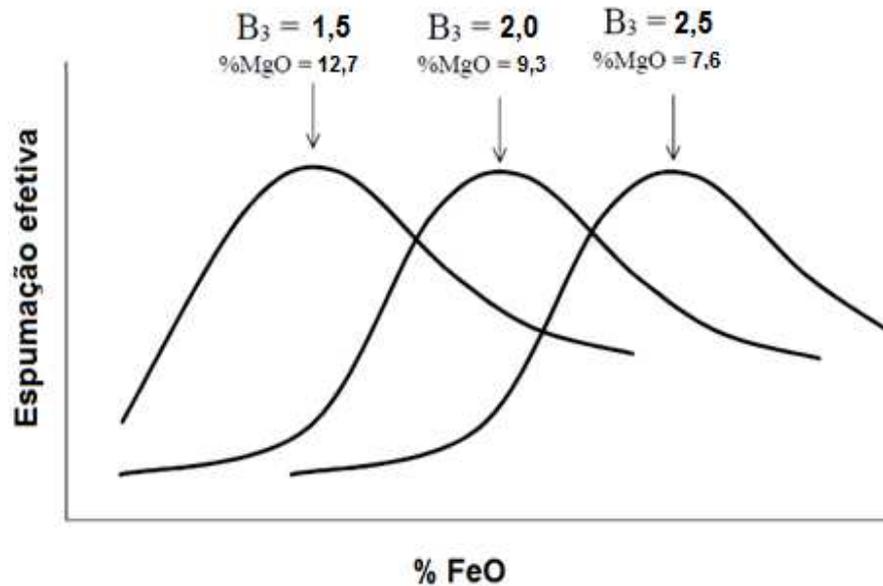


Figura 5: Influência do FeO, MgO e basicidade ternária na efetividade da espumação da escória.

Fonte: Adaptado de Pretorius (1998)

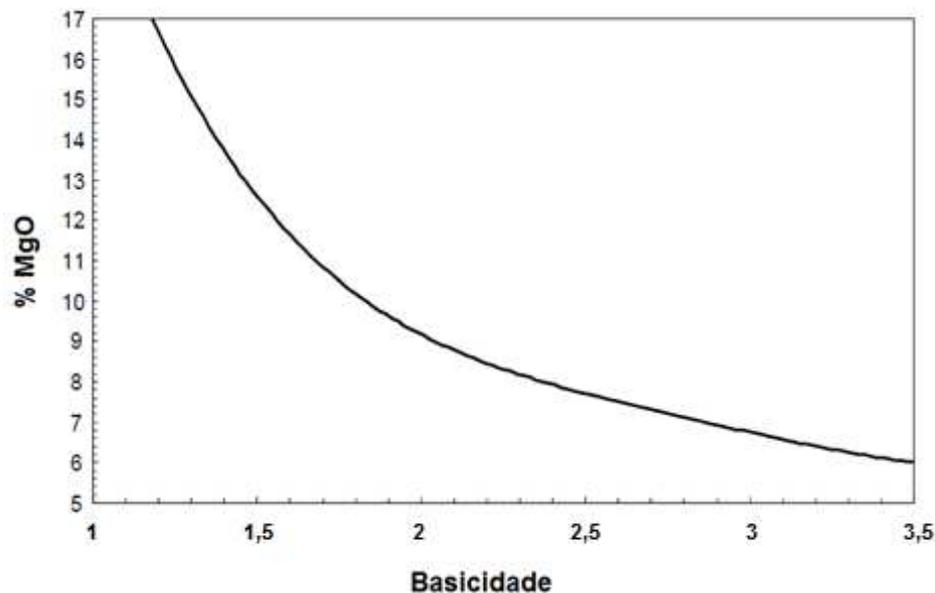


Figura 6: Solubilidade do MgO para escórias com dupla saturação (CaO e MgO) a 1600 °C.

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.

2.4.3. Forno-Panela - refino secundário

Grande parte das aciarias modernas utiliza a técnica de metalurgia de panela para a execução do refino secundário das corridas.

No forno-panela (Figura 7), como sugere o nome, a própria panela é utilizada como reator e nela são ajustadas a composição química do aço, através da adição de ferroligas, e a temperatura, através do aquecimento via arco elétrico. Além disso, são feitos ajustes na escória para garantir uma eficaz remoção do enxofre (dessulfuração) e um menor consumo dos refratários das panelas. Essa etapa também é conhecida como refino redutor, por ser aquela onde há a desoxidação do aço. O aquecimento do banho metálico é realizado por eletrodos de grafita similares aos utilizados no forno elétrico, porém, normalmente de menor diâmetro. Para garantir boa homogeneização da temperatura e aceleração das reações que ocorrem no seio do banho, é feita a agitação do mesmo com a injeção de gases inertes pelo fundo da panela (rinsagem).

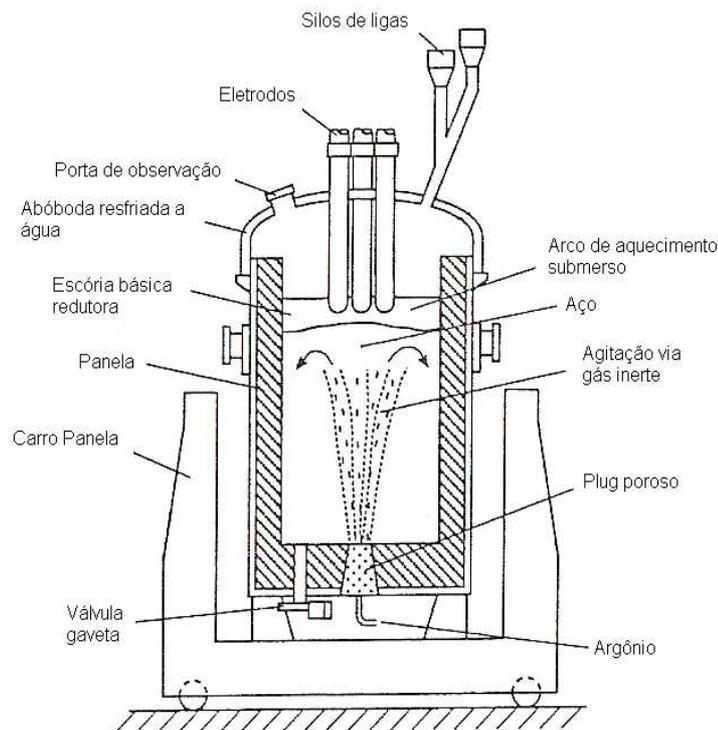


Figura 7: Ilustração esquemática de um forno-panela.

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 FP funciona como um “pulmão” no processo entre o FEA e o LC.

Quando o aço atinge as especificações adequadas de temperatura e de composição química a panela é transferida para o LC.

Em aciarias de aços especiais é comum a utilização de processos como o VD (Vacuum Degassing) ou VOD (Vacuum Oxygen Decarburization) após o forno-panela e antes do lingotamento. Esses equipamentos possibilitam a redução dos gases dissolvidos no aço líquido através da exposição do mesmo ao vácuo.

O processo de VD possui na sua função principal reduzir os teores de hidrogênio no metal líquido. Este equipamento mantém a panela de aço à atmosfera de baixa pressão parcial desse gás, gerando sua extração. O processo VOD é aplicado em aços inoxidáveis que, além de gerar a desgaseificação, reduz o teor de carbono pelo sopro de oxigênio, pois não seria possível reduzir em pressão atmosférica o teor de carbono sem interferir na oxidação do cromo, que deve permanecer no aço (ARAUJO, 2008).

2.4.3. Lingotamento

O aço estará pronto para ser solidificado quando estiver com temperatura, composição química, teor de gases e inclusões adequadas. Sua solidificação poderá ser feita de duas maneiras:

- Lingotamento convencional;
- Lingotamento contínuo.

O lingotamento convencional consiste na solidificação do aço da panela em moldes individuais na forma de lingotes, que posteriormente devem ser desmoldados antes de servirem de matéria-prima para processos posteriores. Este método atualmente é empregado principalmente na produção de blocos de grandes dimensões e na fabricação de alguns aços especiais.

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. 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 envolvidas na produção, para que interrupções sejam evitadas e, de fato, seja um processo contínuo e de alta produtividade.

Segundo John (2009), as principais vantagens do lingotamento contínuo sobre o convencional são:

- Redução do tempo e etapas de lingotamento;
- Maior facilidade no processo pela redução do número de equipamentos e mão de obra;
- Obtenção de aços de qualidade estrutural superior e com menor variabilidade em função das taxas de refrigeração mais elevadas;
- Obtenção de acabamento superficial melhor e mais regular pela eliminação de defeitos como gotas frias, escamas e dobras;
- Excelente rendimento com aproveitamento quase total do aço devido à continuidade do processo.

2.5. ENERGÉTICOS UTILIZADOS NO FORNO ELÉTRICO A ARCO

A energia é consumida por um forno elétrico a arco de diferentes formas. Apesar do consumo de energia elétrica ainda ser, na maioria dos casos, o maior componente no consumo total de energéticos, a utilização de fontes de energia alternativas têm crescido substancialmente, possibilitando às aciarias traçar melhores estratégias para obter aumento de produtividade e/ou redução de custos. Dessa forma, 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 energética do processo possa ser mais bem avaliada.

Através de um diagrama de balanço energético (Figura 8), é possível visualizar a composição média do consumo total de energia em um forno elétrico a arco convencional. O diagrama 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.

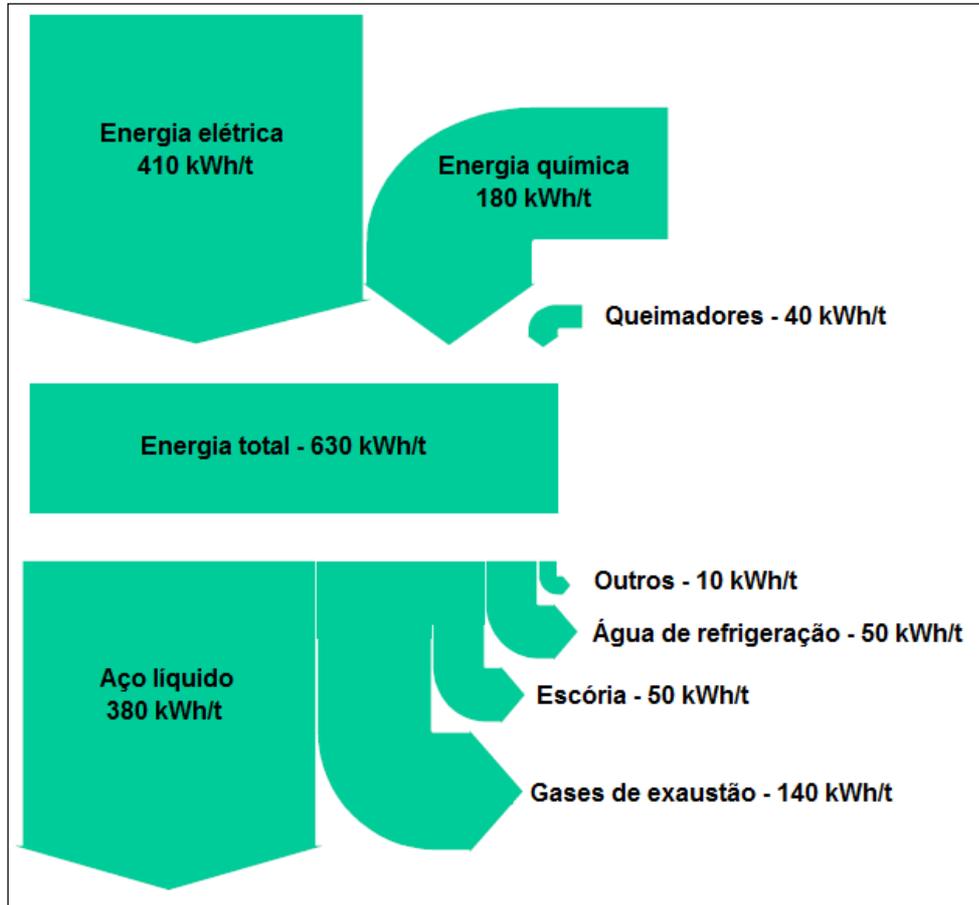


Figura 8: Balanço energético em um FEA.

Fonte: Adaptado de Sandberg (2005)

2.5.1. Energia elétrica e o arco elétrico

A energia elétrica é a principal fonte de energia utilizada em fornos elétricos a arco e pode representar de 35% a 75% do consumo de energia total de uma corrida, dependendo do tipo de matéria-prima, infraestrutura, disponibilidade e dos custos relativos das diversas fontes energéticas. Ela provém de uma rede de corrente alternada de alta tensão e chega ao forno através de um circuito elétrico composto por: uma linha de entrada de alta tensão; um transformador que baixa de alta tensão para média tensão; um transformador onde a média tensão é baixada para a tensão utilizada no forno; e um circuito elétrico, que é a continuação do secundário do transformador e termina nos eletrodos (Figura 9). As grandes quantidades de

corrente geradas fluem através de cabos refrigerados até os braços dos eletrodos e, posteriormente, aos cabeçotes, onde o eletrodo é preso pelo sistema de cunhas (URQUIZA, 1995). Para maiores informações sobre as questões relacionadas ao arco elétrico e ao sistema elétrico do forno recomendam-se as bibliografias dos autores Urquiza (1995), Ries (2001) e Adams (2008).

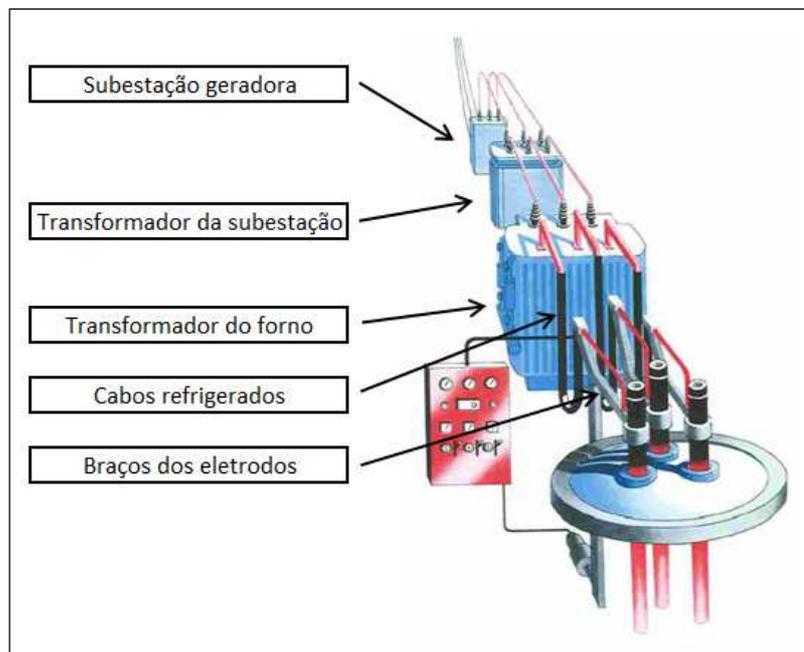


Figura 9: Sistema elétrico do FEA.

Fonte: Ucar (2008)

A energia elétrica é introduzida no forno através do arco elétrico. O arco elétrico é definido como a manifestação da passagem contínua de uma corrente elétrica entre um cátodo e um ânodo em um meio gasoso ionizado. O estabelecimento do arco ocorre pela passagem da corrente entre o cátodo e o ânodo postos próximos um ao outro e submetidos a potenciais elétricos diferentes. O cátodo, aquecido pela passagem da corrente, emite elétrons que se dirigem até o ânodo sob o efeito do campo elétrico que se cria entre os dois. As moléculas de gás se ionizam pela passagem dos elétrons, tornando-se condutoras e assegurando a passagem da corrente elétrica mesmo que o cátodo e o ânodo estejam separados. As moléculas ionizadas, aceleradas pelo campo elétrico, chocam-se contra o cátodo e o aquecem, gerando uma maior emissão de elétrons (SILVA, 2005). Diferentemente de um condutor sólido, a diferença de tensão entre esses dois pontos não é linear e há, então, uma queda de tensão. A maior parte dessa queda ocorre próxima aos extremos do arco, isto é, na ponta do eletrodo e na superfície da

sucata ou do banho metálico. Segundo Ries (2001), estima-se uma queda de tensão entre 100 e 300 kV/cm nessas regiões. Esse elevado gradiente de tensão cria condições para a passagem da corrente elétrica e ocasiona uma distribuição da energia não homogênea, concentrando-se na maior parte nesses pontos, denominados pontos quentes. O restante da energia é transferido para a carga a partir da coluna do arco por irradiação muito intensa, que é proporcional à temperatura do arco elevada à quarta potência. A figura 10 mostra um desenho esquemático com as principais características do arco.

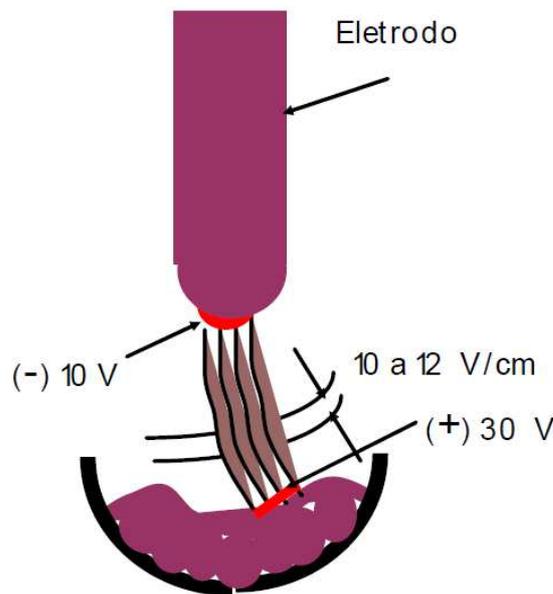


Figura 10: Características do arco elétrico no FEA.

Fonte: Ries (2001)

O arco elétrico é um condutor elétrico “gasoso” e, portanto, flexível. Em um forno trifásico de corrente alternada, a interação dos campos elétricos e magnéticos resultantes da passagem de elevadas correntes elétricas nos barramentos e eletrodos provoca o aparecimento de forças eletromagnéticas que defletem o arco em direção às paredes e abóbada e, portanto, possuem importância significativa no processo. Essas mesmas forças também têm importância na movimentação do banho líquido, homogeneizando a temperatura (evitando a presença de pontos superaquecidos sob os eletrodos) e a composição química (FIGUEIRA, 2007).

Segundo Bowman, citado em UCAR (2008), o arco elétrico movimenta-se de acordo com forças eletromagnéticas, como ilustram os vetores na Figura 11 para um forno de corrente alternada. Estes vetores indicam a direção preferencial para onde

ocorre o maior e mais rápido aquecimento da carga durante o processamento da corrida.

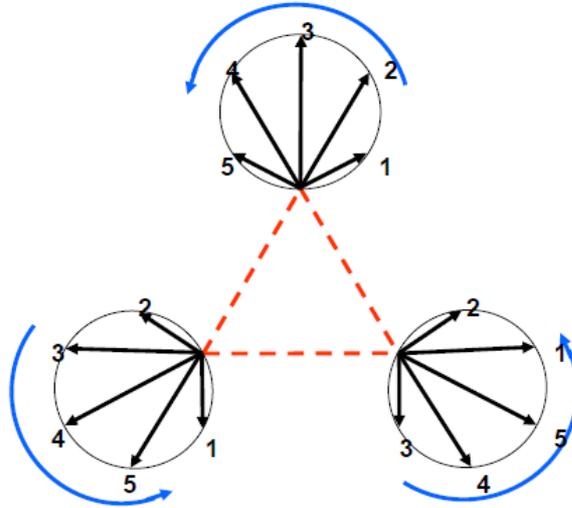


Figura 11: Vetores de força eletromagnética entre 100 e 120 Hz.

Fonte: Ucar (2008)

A Figura 12 ilustra as regiões no interior do forno onde a sucata é fundida utilizando somente energia proveniente do arco elétrico, com base na teoria referente aos vetores de força eletromagnética. A região de cor marrom ilustra os locais onde há sucata remanescente após a atuação do arco elétrico. Esses locais são chamados de pontos frios do forno e é neles que normalmente são instalados sistemas capazes de gerar energia química.

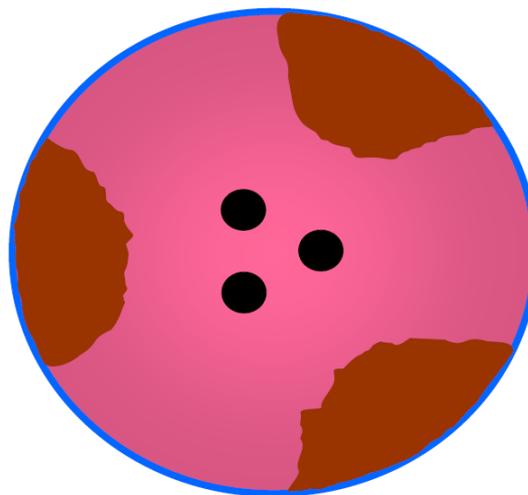


Figura 12: Formação de pontos quentes e frios com fusão por arco elétrico.

Fonte: Ucar (2008)

O volume do arco (diâmetro e comprimento) determina a quantidade de energia gerada pelo mesmo e depende principalmente de parâmetros elétricos. A tensão do arco determina seu comprimento e, dentro de certos limites, a corrente determina a seção transversal. Devido à resistência elétrica e à reatância dos condutores, transformadores, reatores, linha de alta tensão e outros elementos do circuito elétrico limitando a corrente elétrica, a dimensão do arco é limitada pela corrente capaz de circular no sistema.

A potência emitida pelo arco é controlada a partir da tensão no transformador e posicionando-se o eletrodo a distâncias variáveis da sucata ou do banho. Para um determinado tap (tensão no transformador), a corrente depende da posição do eletrodo. Aumentando-se essa distância, reduz-se a corrente (reduzindo a potência) e vice-versa. Segundo Fonseca (1989), é importante observar que a posição do arco sob o eletrodo, ou seja, a deflexão do arco, depende do nível de corrente. Arcos curtos, onde a corrente é mais elevada e, conseqüentemente, a força eletromagnética é maior, sofrem maior deflexão se posicionando mais horizontalmente. Como a irradiação de calor ocorre na direção perpendicular ao eixo do arco, a maior parte da energia concentra-se sob os eletrodos. De modo contrário, o eixo do arco longo se posiciona quase que verticalmente devido à menor corrente (e conseqüentemente, menor deflexão) e a irradiação de calor é mais dispersa e no sentido horizontal (Figura 13).

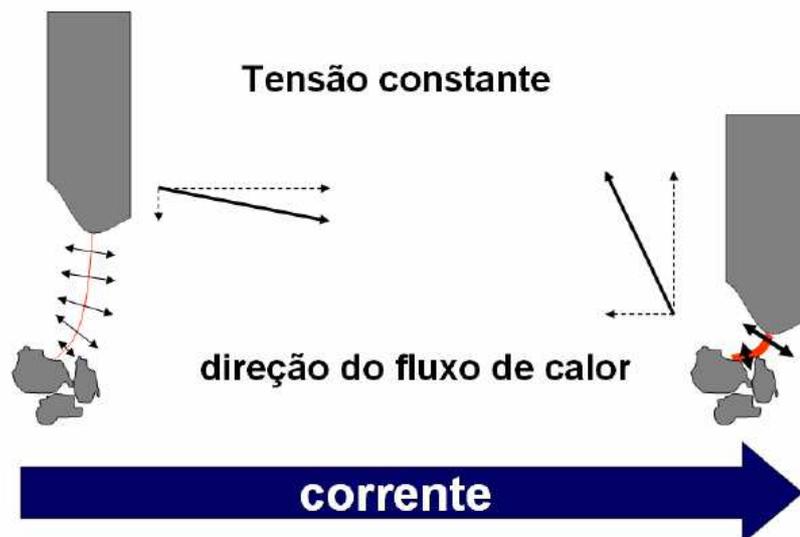


Figura 13: Característica do fluxo de calor do arco elétrico conforme variação da corrente.

Fonte: John (2009)

2.5.2. Energia química

Com o avanço tecnológico nas operações com fornos de ultra-alta potência (UHP), que operam com altos comprimentos de arco, o uso de fontes de energia química tornou-se popular, visando principalmente:

- Formação da escória espumante: formada 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.

Segundo Fortes (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).

2.5.2.1. Energia de queimadores

É a energia obtida através da queima de materiais combustíveis que, combinados com o oxigênio, geram energia. Normalmente nos queimadores são utilizados óleos ou gases. Dependendo do combustível utilizado, haverá um determinado poder calorífico associado a ele, que resultará em um potencial diferente de geração de energia no forno.

2.5.2.2. Energia de redução

É a energia associada às reações de redução do óxido do ferro e demais elementos que normalmente possuem característica endotérmica. Esse tipo de energia é especialmente importante em fornos que utilizam DRI, que é um material que possui valores significativos de óxidos na sua composição.

2.5.2.3. Energia de oxidação

Para que energia química seja gerada no interior do forno elétrico a arco devem existir elementos na carga ou no banho que possuam característica exotérmica e que reajam com a presença de oxigênio. De maneira geral, segundo Opfermann (2008), ganhos de energia elétrica na ordem de 5 kWh/Nm³ de oxigênio injetado podem ser obtidos, justificando seu emprego no processo. Também podem ser utilizados outros valores, normalmente entre 3,2 kWh/Nm³ e 6,8 kWh/Nm³, sendo essa variação basicamente devida a diferenças na carga metálica de cada FEA e ao modo como o oxigênio é injetado no forno, sua eficiência e seu rendimento na conversão para energia fornecida para o aço. Para uma eficiência térmica de 70%, por exemplo, considera-se uma energia fornecida de 5,2 kWh/Nm³ (UCAR, 2008).

Cada um dos elementos presentes na carga (C, Si, Fe, Mn, Cr, etc) possui uma capacidade energética diferente, ou seja, ao reagir com o oxigênio, cada um gerará uma quantidade de energia diferente. Logo, o teor de cada elemento presente no processo é fundamental para a definição da quantidade de energia capaz de ser gerada.

A Tabela 1 mostra as principais reações que ocorrem em um processo de forno elétrico a arco. Alguns dos elementos descritos nessa tabela serão oxidados até seus valores residuais (Si, P e Cr) enquanto outros elementos sofrerão apenas oxidação parcial (C, Fe e Mn). O que definirá a ordem preferencial das reações será a afinidade de cada um desses elementos com o oxigênio.

Tabela 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)

Segundo Gaskell (1973), a afinidade de cada elemento com o oxigênio e a ordem de preferência da reação podem ser lidas no diagrama de Ellingham (Figura 14). 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.

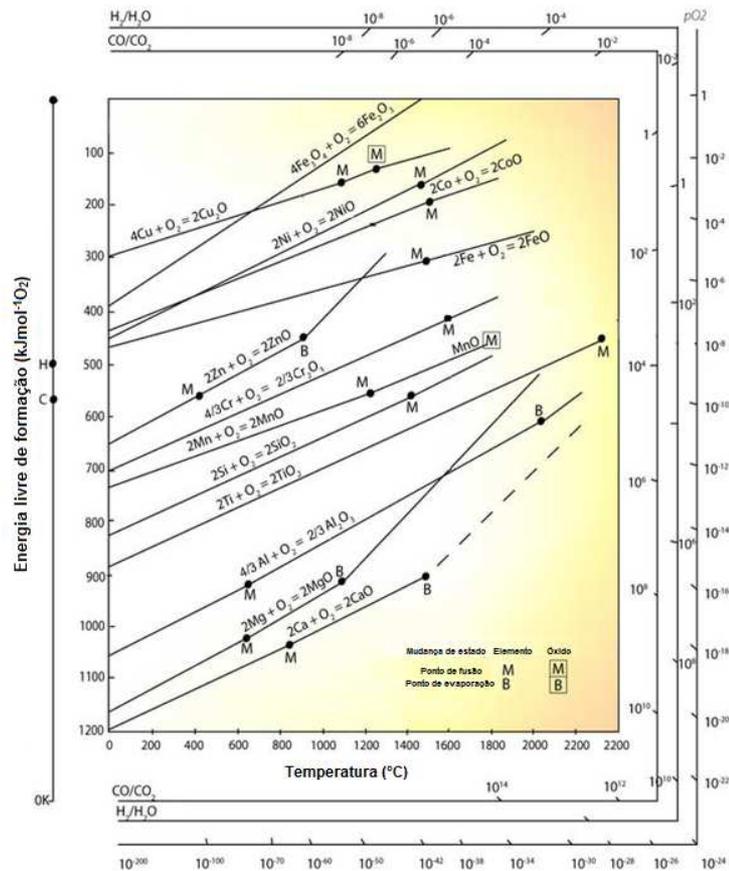


Figura 14: Diagrama de Ellingham.

Fonte: Site institucional da Universidade de Cambridge (2014)

Para determinado óxido, quando não há mudança de fase, a relação entre ΔG° e a temperatura é praticamente uma linha reta. Quando ocorre a mudança de estado a reação sofre a interferência do calor latente, que provoca a alteração da entropia da fase e, conseqüentemente, uma mudança na inclinação da reta no gráfico.

Cada elemento contido no banho possui um perfil de oxidação próprio ao longo de uma corrida. O silício é oxidado até seus valores residuais nos primeiros minutos de injeção de oxigênio. Já no caso do fósforo, manganês, carbono e ferro, a oxidação desses elementos ocorre, em maior ou menor grau, ao longo de todo o

período de injeção, com atenção especial ao último, pois o controle da formação do FeO é muito importante para o rendimento metálico e custo de um forno elétrico.

Na prática industrial, o processo de oxidação está diretamente relacionado à formação da escória. A oxidação do ferro não é favorecida pelas baixas temperaturas do início do processo. No entanto, a grande massa presente deste elemento faz com que sua oxidação se inicie juntamente com a do silício, gerando óxido de ferro que é agregado à escória. A geração desse óxido na escória inicial é muito importante para a solubilização da cal e a formação do $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. A presença deste silicato reduz a atividade da sílica na escória, favorecendo a oxidação completa do silício. Em geral, oxida-se de 10 kg/t a 30 kg/t de ferro no processo de forno elétrico, dependendo da intensidade no uso de oxigênio.

Em seguida são oxidados o manganês e o fósforo. Seus teores finais dependerão das quantidades desses elementos introduzidas no forno através da carga, das características da escória formada e do nível de oxidação ao final da corrida.

Segundo Fortes (2008), a descarburização ou oxidação do carbono se inicia com a reação direta entre carbono e oxigênio formando CO, porém também é aceita a teoria de que o oxigênio primeiramente reage com o ferro formando o FeO na escória, que por sua vez é reduzido pela difusão do carbono produzindo CO.

A cinética de descarburização é dividida em três estágios, conforme o gráfico da Figura 15. No primeiro estágio, a maior parte do oxigênio injetado no forno reage com o Si, P, Fe e Mn da carga e, conseqüentemente, a taxa de descarburização é baixa. Durante o segundo estágio, a taxa de descarburização é praticamente constante e é limitada somente pela disponibilidade de oxigênio para reagir com o carbono. Nessa etapa, praticamente todo o oxigênio é consumido pela reação de descarburização. Quando o teor de carbono é reduzido abaixo de determinado teor, denominado teor de carbono crítico, inicia-se o terceiro estágio, onde o processo de descarburização começa a ser controlado pela difusão do carbono (transferência de massa do carbono na fase líquida), reduzindo a taxa de descarburização e aumentando a oxidação do ferro. Segundo John (2009), nesta etapa, qualquer meio que possa aumentar a turbulência do banho aumenta a velocidade de transferência do carbono. Assim, por exemplo, o jato coerente ou supersônico de oxigênio acelera o processo de descarburização, minimizando a oxidação de ferro.

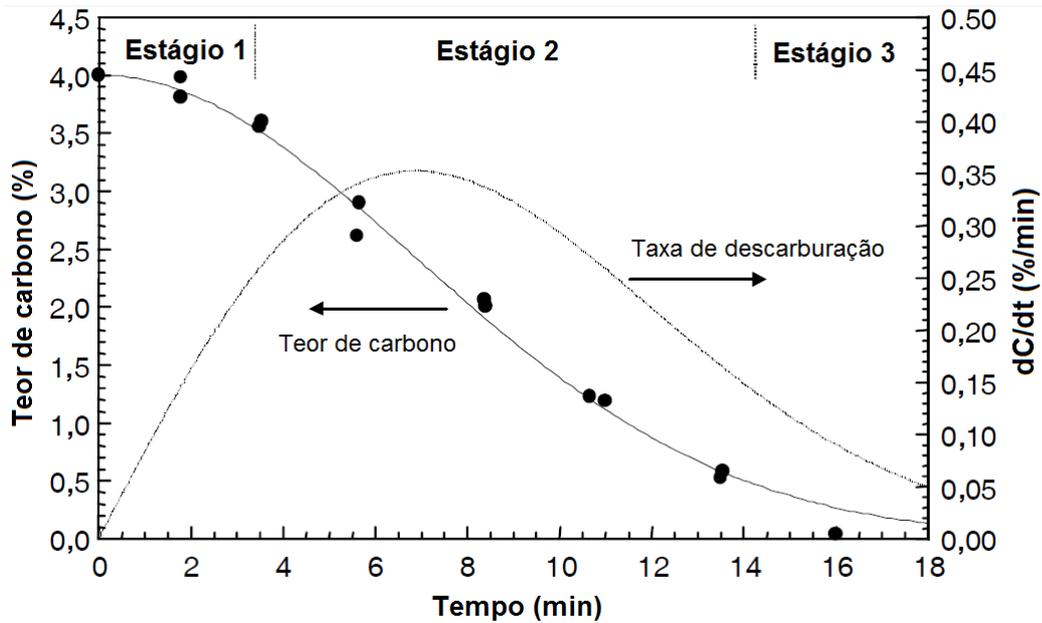


Figura 15: Evolução do teor de carbono dissolvido e da taxa de descarburização durante o processo.

Fonte: Adaptado de Cicutti (2002)

2.5.2.4. Energia de pós-combustão

A energia de pós-combustão resulta da oxidação de qualquer composto parcialmente oxidado. No caso do FEA, pode-se citar o H_2 e, principalmente, o CO , que é o gás predominante na atmosfera do forno. Tipicamente, esses gases são oxidados no sistema de despoeiramento, porém isso pode ser feito dentro da atmosfera do forno quando há disponibilidade de oxigênio para reagir e promover a pós-combustão desses elementos. Segundo Grant (2000), podem ser obtidos ganhos em energia elétrica de 6 a 11% e reduções no tempo de corrida de 3 a 11%, dependendo das condições de processo e de operação.

Outros benefícios associados à realização de pós-combustão dentro do forno são a redução das emissões para o sistema de despoeiramento, da temperatura dos gases de exaustão e de picos de temperatura associados com a rápida evolução de monóxido de carbono (CANTACUZENE, 2006).

Grant (2000) cita que a maior parte dos sistemas de pós-combustão instalados em fornos derivam do mesmo princípio: queimar o CO e H_2 acima do nível do banho quando ainda há sucata sólida presente na parte superior do forno. É nesse momento que a transferência térmica entre os gases de combustão e a sucata sólida é mais eficiente, pois a sucata está a menores temperaturas e sua grande área superficial promove a transferência de calor por convecção.

Os injetores de pós-combustão devem ser posicionados em alturas baixas o suficiente dentro do forno de forma que aumentem o tempo de retenção do CO na região onde há sucata sólida para que a transferência de calor seja maior. As vazões de oxigênio para essa função devem ter baixa velocidade, para que promova a mistura com os gases do forno e evite a oxidação do banho e rebote nos painéis refrigerados. Os injetores também devem ser muito bem refrigerados, pois essas regiões podem apresentar sobreaquecimento (CANTACUZENE, 2010).

Segundo Pfeifer (2005), a eficiência da transferência do calor de pós-combustão para a carga pode chegar a um máximo de 65% enquanto houver sucata sólida no forno. Na etapa de refino, quando praticamente toda carga está líquida, a eficiência máxima alcançada dificilmente ultrapassa os 30%.

2.6. INJEÇÃO DE GASES NO FEA

Os grandes avanços alcançados em produtividade no FEA ao longo dos anos se devem principalmente ao avanço das práticas relacionadas ao emprego dos gases injetados. Diversas empresas têm se especializado nesse tema, criando equipamentos que permitem uma injeção de gases cada vez maior e mais eficiente. O consumo de oxigênio, por exemplo, que nos primeiros fornos era de 8 Nm³/t, hoje pode ultrapassar os 40 Nm³/t (UCAR, 2001).

2.6.1. *Injeção de gás natural com queimadores oxi-combustível*

Segundo Pfeifer (2005), queimadores oxi-combustível são normalmente utilizados para:

- Aumento da produtividade do forno no período de fusão pela energia adicional de combustíveis;
- Aumento da simetria térmica em fornos de corrente alternada;
- Melhora energética do período de fusão;
- Redução do consumo de energia elétrica.

Esses equipamentos são em geral instalados nas paredes dos fornos para acelerar a fusão da sucata, especialmente nos pontos frios entre os eletrodos. A transferência térmica da chama do queimador para a sucata ocorre principalmente por convecção e irradiação. Enquanto a chama está próxima da sucata, sua eficiência é alta, porém à medida que há menos sucata na região próxima do

queimador sua eficiência cai significativamente (UCAR, 2001). Em geral, a eficiência de um queimador é maior que 50% apenas no primeiro terço da fusão da carga durante a corrida (Figura 16).

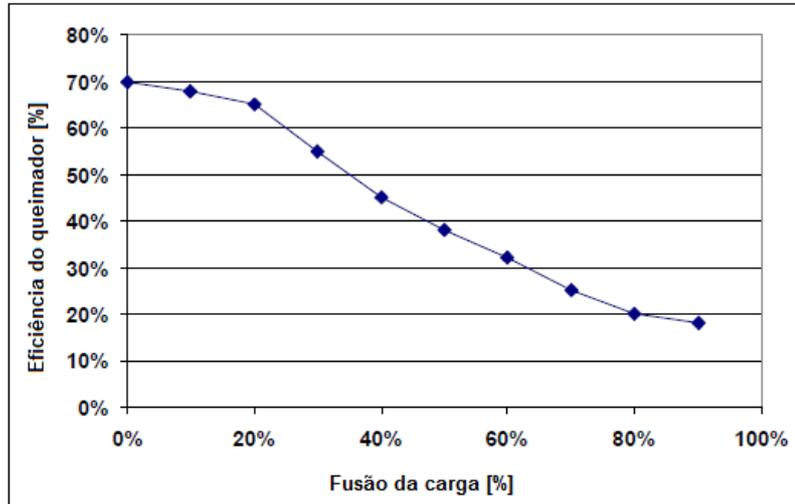


Figura 16: Eficiência de queimadores no período de fusão.

Fonte: Opfermann (2008)

Na Figura 17 é possível observar o aumento significativo do calor fornecido para os gases da exaustão à medida que a eficiência do queimador diminui, uma vez que, por não encontrar sucata sólida próxima, a chama aquece principalmente a região dos eletrodos, do miolo e os gases presentes no forno, que saem pelo quarto furo.

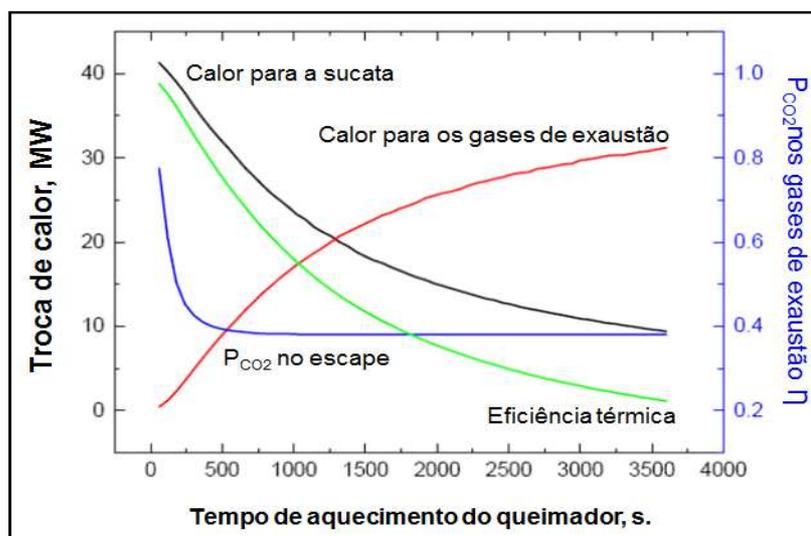
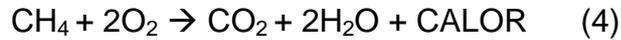


Figura 17: Eficiência térmica e perdas pelos gases de exaustão.

Fonte: Guo (2006)

Para queimadores que utilizam gás natural como combustível, a queima desse pode ocorrer com a injeção simultânea de oxigênio ou ar atmosférico, no entanto, a eficiência quando oxigênio é utilizado é significativamente maior (PFEIFER, 2005). A queima do gás natural ocorre segundo a reação 4:



Grande parte dos fornos modernos utiliza a tecnologia de injetores multifuncionais, que funcionam tanto como queimadores quanto como injetores de oxigênio em modo lança para descarburização. Esses equipamentos possuem três linhas de gases associadas: uma linha de oxigênio principal, uma linha de oxigênio secundário e uma linha de gás natural. O oxigênio utilizado para a queima do gás natural pode ser dividido entre as duas linhas.

A razão entre o somatório das vazões de oxigênio pela vazão de gás natural no injetor podem ser alteradas. Para vazão total de oxigênio igual a duas vezes a vazão de gás natural, é formada uma chama denominada estequiométrica. Quando se aumenta a razão entre essas vazões, pode-se obter uma chama oxidante. Quando a vazão de oxigênio for menor que duas vezes a vazão de gás natural, poderá então ocorrer queima apenas parcial do gás natural.

Com relação à razão entre as vazões de oxigênio principal e oxigênio secundário em modo queimador, segundo Opfermann (2008), é possível obter diferentes formas de chama sem alterar a potência do queimador. Isso é especialmente interessante quando se deseja adequar a chama do queimador a diferentes etapas do processo sem alterar o consumo total dos gases.

2.6.2. Injeção de oxigênio em modo lança com injetores supersônicos

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

- Oxidação dos elementos presentes na carga (Si, Al, Mn e P);
- Descarburização 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. São obtidos através de um bocal de Laval (convergente-divergente),

desenvolvido pelo sueco Gustav de Laval em 1890 para a conversão eficiente da energia potencial e térmica do gás em energia cinética.

Os jatos podem ser classificados em dois tipos: supersônicos convencionais e supersônicos coerentes (Figura 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. 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.

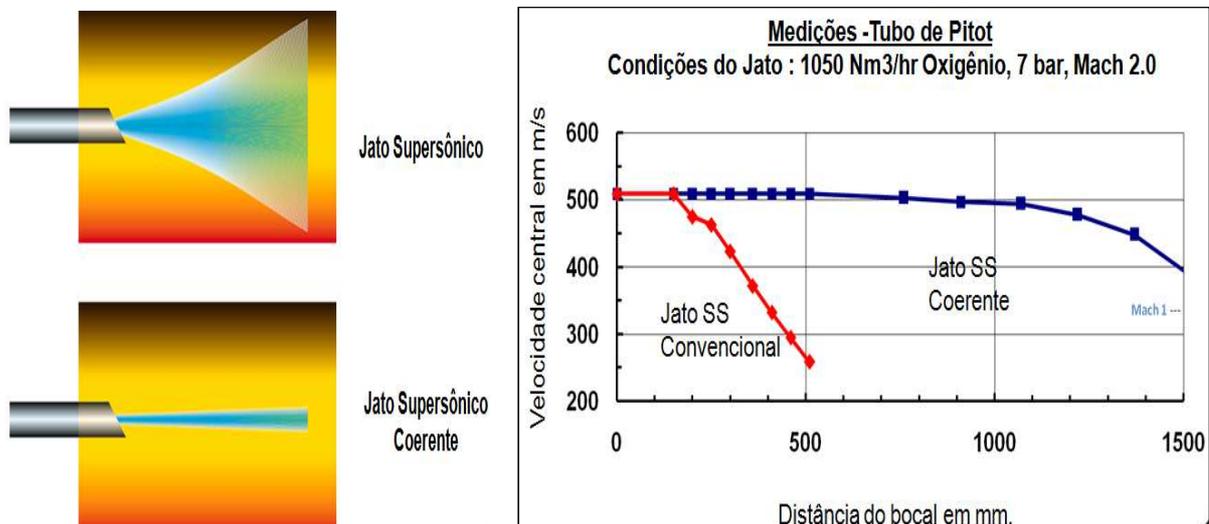


Figura 18: Jato supersônico convencional e jato supersônico coerente.

Fonte: Mathur (2001)

2.6.2.1. Jato supersônico convencional

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 (Figura 19). A velocidade do gás na garganta é igual a velocidade do som, de onde ele se expande para a região divergente acelerando para velocidades supersônicas. Para a representação deste modelo de velocidade, adotou-se o número adimensional de Mach (M), que representa uma relação entre a velocidade do fluido e a velocidade do som (JOHN, 2009).

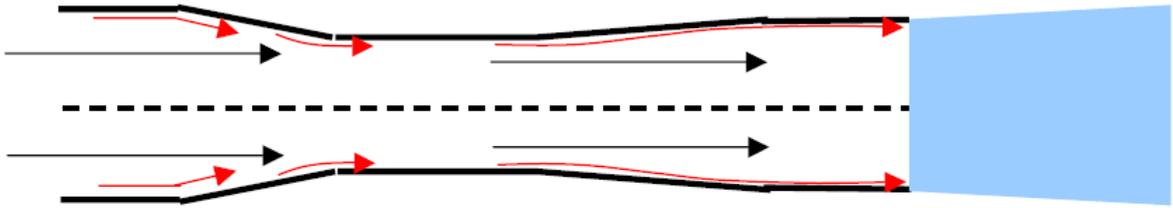


Figura 19: Modelo de bocal supersônico convergente-divergente.

Fonte: Allemmand (2002)

No interior do bocal supersônico o gás sofre alterações na sua temperatura, pressão e velocidade (Figura 20).

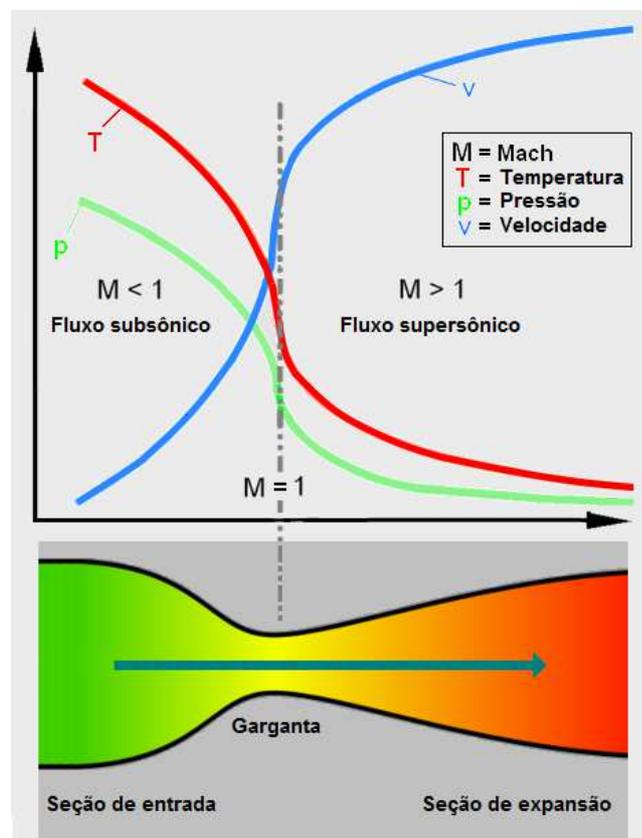


Figura 20: Comportamento de gases dentro do bocal de laval.

Fonte: Adaptado de Beychok (2010)

O jato de gás ao sair do bico se espalha como um jato submerso, resultado do arraste provocado pelo contato com o gás do ambiente. Isso resulta em uma troca de momento entre o jato e o meio, fazendo com que o jato resultante tenha uma taxa de fluxo de massa maior do que o original. O arraste implica no aumento do tamanho do jato e na redução de sua velocidade à medida que este se afasta do bico. Desta maneira, a força de impacto no diâmetro original do jato reduz à medida que a distância do bico aumenta.

Teoricamente, é possível criar um fluxo supersônico com qualquer vazão de entrada de gás, desde que a pressão disponível seja suficientemente alta. A pressão de entrada mínima necessária para que se obtenha um fluxo supersônico é chamada de pressão crítica. Assim, a eficiência de um bocal está altamente relacionada com o seu projeto de desenvolvimento e produção.

Segundo Mathur (2004), o perfil de um jato supersônico convencional ao sair de um bocal de laval pode ser classificado em três regiões (Figura 21). Na primeira região, a velocidade do jato é muito próxima da velocidade de saída do bico, levemente superior a Mach 2. 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 e momento do jato diminuem e o mesmo passa a ser subsônico, se expandindo 10° em relação ao eixo longitudinal.

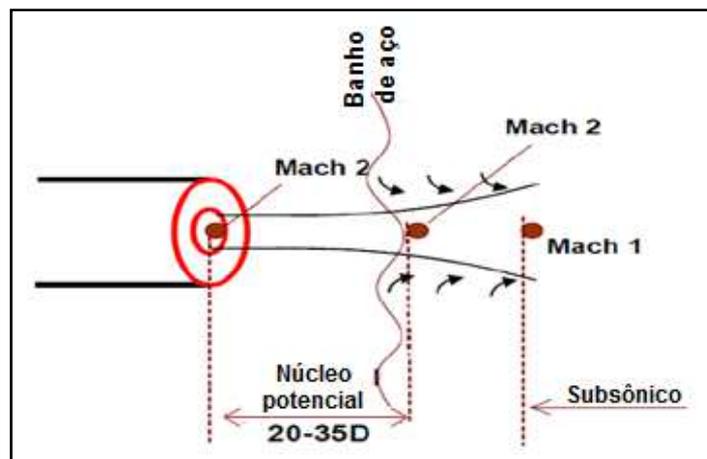


Figura 21: Regiões típicas de um jato supersônico convencional.

Fonte: Mathur (2004)

2.6.2.2. Jato supersônico coerente

A região do núcleo potencial de um jato supersônico pode ser significativamente aumentada utilizando um envelopamento do jato central com uma chama de proteção denominada *shroud*, obtendo dessa forma um jato coerente. Essa chama é criada utilizando um gás combustível e um gás oxidante. A queima do gás combustível cria um meio de baixa viscosidade que envolve o jato principal de

oxigênio, permitindo que o mesmo tenha seu comprimento coerente significativamente aumentado (Figura 22).

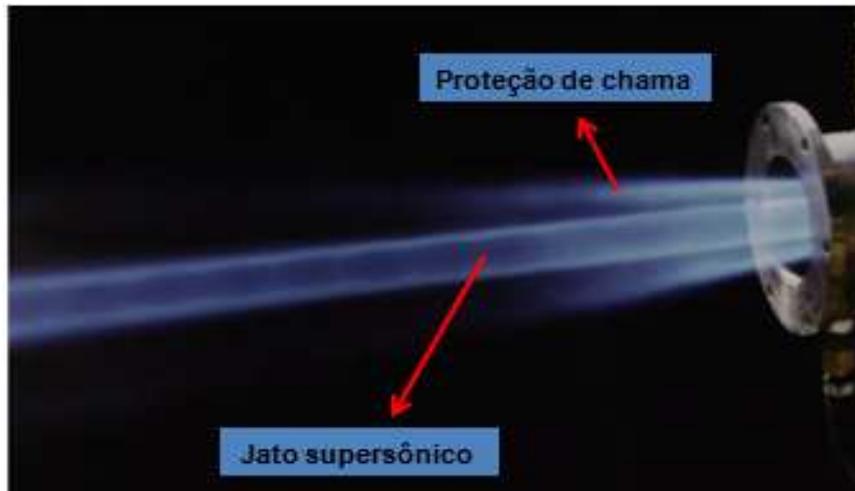


Figura 22: Jato supersônico com chama de proteção.

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

As condições de operação no injetor podem ser alteradas de forma a produzir um jato em que o comprimento coerente pode ser variado, sendo inclusive possível de ser produzido um jato supersônico convencional. 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 23).

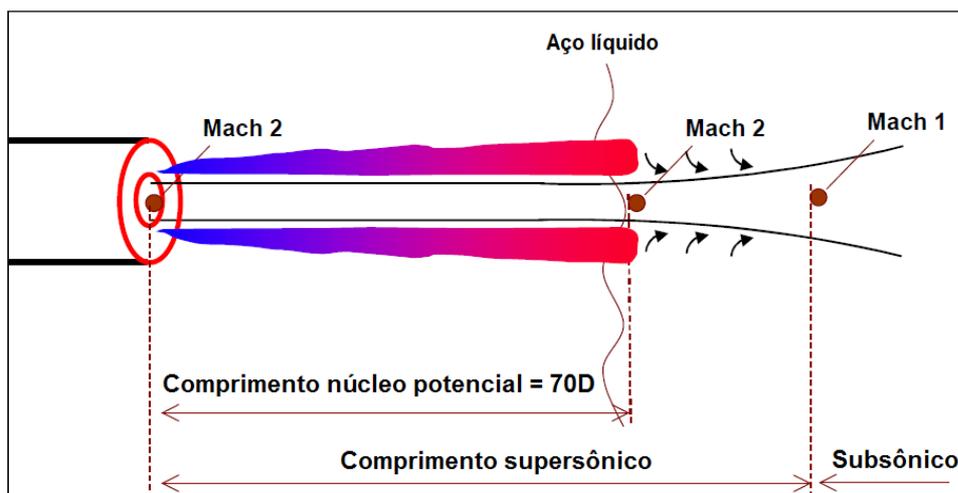


Figura 23: Perfil de um jato coerente com chama *shroud*.

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 fundamental 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.

2.6.3. Principais fatores com influência sobre o comprimento coerente do jato

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 aerodinâmicas.

- Pressão de entrada do oxigênio: para condições de vazão de gás e temperatura do banho constantes, com o aumento da pressão de entrada do oxigênio há um aumento do comprimento coerente (Figura 24). No entanto, para um pequeno ganho de comprimento coerente pode ser necessário um aumento muito grande de pressão, podendo inviabilizar o método na prática industrial;

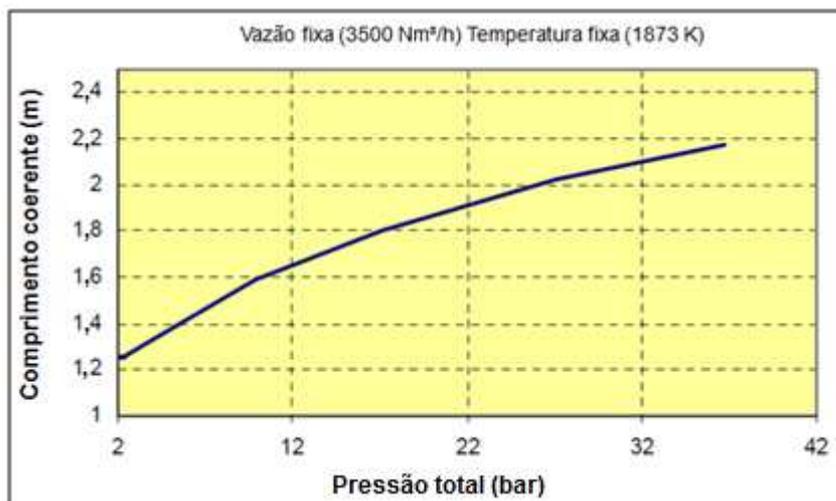


Figura 24: Efeito da pressão de entrada do oxigênio no comprimento coerente.

Fonte: Allemand (2002)

- Temperatura ambiente: para condições de vazão de gás e pressão de entrada constantes, um acréscimo na temperatura ambiente aumenta o comprimento coerente. Isso ocorre devido à redução da densidade dos gases no entorno do jato (Figura 25);

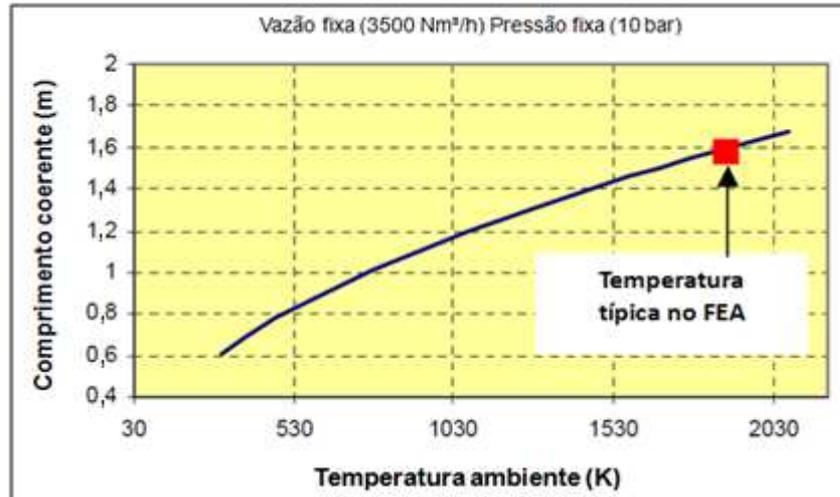


Figura 25: Efeito da temperatura ambiente no comprimento coerente.

Fonte: Allemand (2002)

- Temperatura de entrada do oxigênio: uma vez que a velocidade do som aumenta quando a temperatura aumenta, é necessário aumentar a velocidade do jato para manter o mesmo número Mach. Dessa forma, ao aumentar a temperatura do oxigênio haverá um efeito negativo no comprimento coerente do jato (Figura 26);

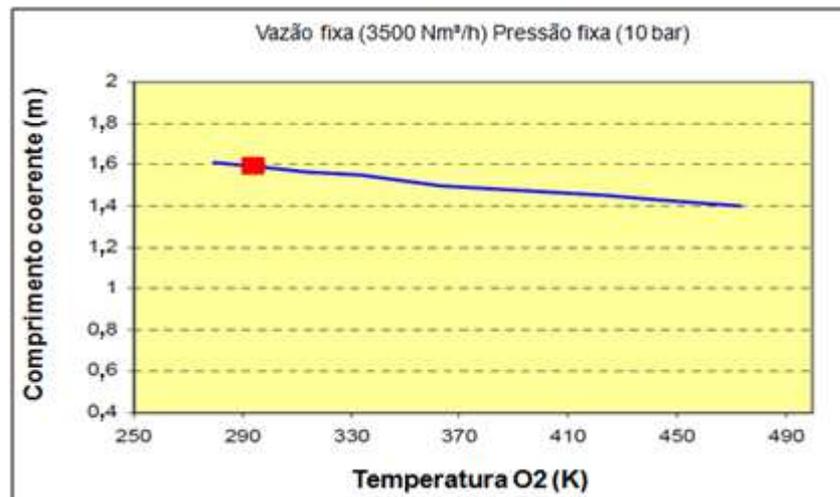


Figura 26: Efeito da temperatura do O₂ de entrada no comprimento coerente.

Fonte: Allemand (2002)

- Vazão do oxigênio: 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 do oxigênio (Figura 27);

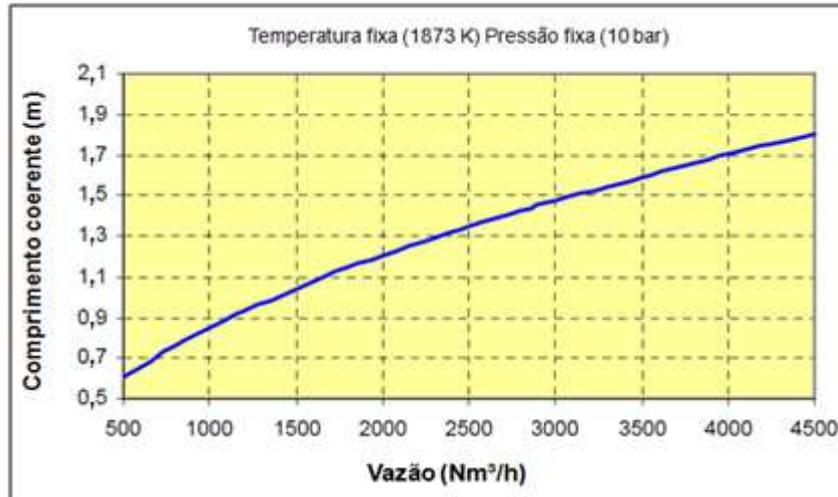


Figura 27: Efeito da vazão do jato no comprimento coerente.

Fonte: Allemand (2002)

- Composição da chama de proteção: segundo Mahoney (2010), a concentração de elementos como o hidrogênio ou monóxido de carbono na chama de proteção afeta a penetrabilidade do jato (Figura 28).

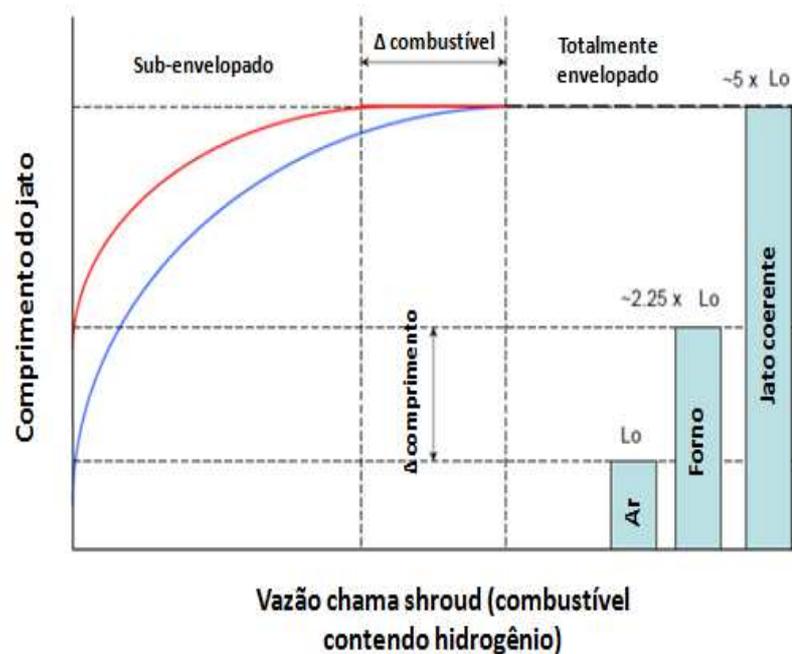


Figura 28: Comparação do comprimento do jato em diferentes ambientes.

Fonte: Mahoney (2010)

A concentração de hidrogênio, mensurada através da vazão do gás combustível que contenha hidrogênio na sua composição, é o fator que mais impacta no comprimento coerente do jato. Com baixas vazões de gás combustível, é formada uma camada subprotetora onde o comprimento coerente é diretamente

proporcional à vazão do combustível. A partir de certa vazão de gás combustível (10% do valor da vazão do jato de oxigênio principal), forma-se um regime de proteção completa onde o comprimento coerente não é mais dependente da vazão de combustível (Figura 28).

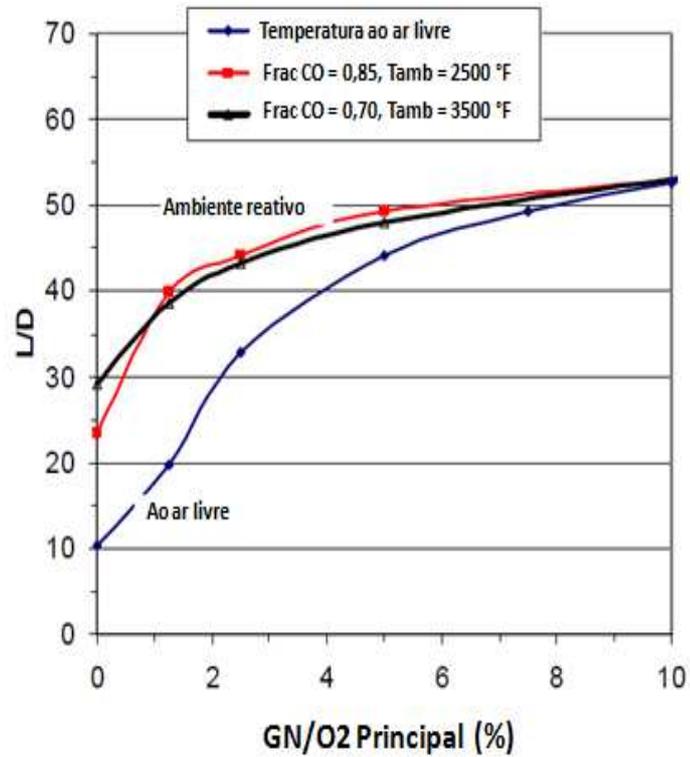


Figura 28: Efeito do teor de gás combustível em jatos de oxigênio (Mach 2).

Fonte: Mahoney (2010)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os principais dados do forno elétrico a arco utilizado nos testes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - 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 500 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-painel utilizado nos testes são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados do forno-painel

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 4 e 5 mostram as principais características do sistema de injeção do forno elétrico a arco utilizado nos testes.

Tabela 4 - 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 5 - Dados do sistema de injeção (manipulador de lanças)

Número de injetores	2 lanças de oxigênio + 1 lança de coque
Vazão de operação (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. Dessa forma, o sucesso na utilização de um injetor está intimamente ligado com seu projeto levando em consideração as características de cada forno elétrico.

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 29. É através da queima do gás natural com o oxigênio de proteção que é criada a chama *shroud*, mencionada e explicada anteriormente na revisão bibliográfica desse trabalho.

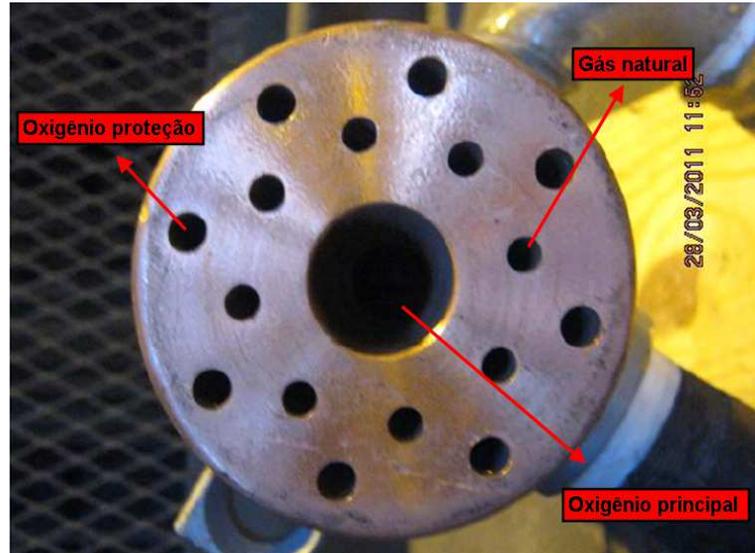


Figura 29: Linhas de gases no bico do injetor de jato coerente.

Fonte: Gerdau Riograndense

A injeção de gases no forno com esses injetores é feita através de oito modos, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - 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 rebotes nos painéis refrigerados pelo contato do jato com sucatas pesadas e/ou ainda sólidas. 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 240 corridas ao longo de duas semanas. Amostras de aço foram retiradas em todas as corridas para análise do teor de carbono de vazamento. Amostras de escória foram coletadas a cada 5 corridas 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 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 no consumo de energia total do FEA + FP 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 no formato de projeto de experimentos (DOE) para avaliar o impacto de diferentes *setpoints* de vazão de gás natural na operação de um dos modos queimador (queima ++) e nos três modos lança. Para tanto, foi feito um fatorial de 3 variáveis a 2 níveis, totalizando 8 condições com as réplicas.

As alterações feitas em relação à operação base foram:

- Redução da vazão de gás natural em 30% e aumento da vazão total de oxigênio do modo queima ++ de forma a trabalhar com relação O_2/GN de 3,5:1. Esse foi o modo escolhido por ser aquele que opera com maior vazão e onde haveria o maior potencial de ganhos com a redução de consumo de GN;

- Modificação das vazões de gás natural nos modos lança para 5% da vazão do oxigênio principal. Esse valor foi proposto em função do trabalho de Mahoney (2010) que, conforme o gráfico da Figura 28, mostra que para vazões de GN entre 10 e 5% da vazão de oxigênio principal, a perda de coerência em altas temperaturas é baixa. A partir de 5%, a penetração do jato reduz rapidamente.

Os cenários testados no DOE podem ser visualizados na Tabela 7.

O cenário 1 foi chamado de cenário base e nele operou-se com todos os modos queimador com razão O_2/GN de 2:1 (chama estequiométrica) e com vazão de gás natural nos modos lança de 10% da vazão do oxigênio principal.

No cenário 2, em relação ao cenário base, foi alterada a vazão de gás natural nos modos lança para 5% da vazão de oxigênio principal.

No cenário 3, em relação ao cenário base, foi reduzida a vazão de gás natural no modo queima ++ em 30% e a vazão de oxigênio foi ajustada para uma razão O_2/GN de 3,5:1, ou seja, passou-se de uma chama estequiométrica para um chama oxidante.

No cenário 4, foram feitas as modificações propostas nos cenários 2 e 3, simultaneamente.

Tabela 7 - Cenários testados no DOE

Cenário	Vazão de GN no modo Queima ++	Razão O_2/GN no modo Queima ++	Vazão de GN nos modos lança
1	base	2:1	0,10 x vazão O_2 principal
2	base	2:1	0,05 x vazão O_2 principal
3	0,7 x base	3,5:1	0,10 x vazão O_2 principal
4	0,7 x base	3,5:1	0,05 x vazão O_2 principal

Foram testadas 30 corridas em cada cenário e mais 30 corridas de réplica, conforme a metodologia estatística, formando 8 blocos de 30 corridas cada que

foram testados aleatoriamente. Com a exclusão das corridas que apresentaram desvios, restaram 26 corridas por bloco, totalizando 208 corridas. Foi utilizado o software comercial Minitab 16 para o tratamento estatístico dos dados e obtenção dos resultados.

A vazão total de oxigênio foi igualmente distribuída entre as linhas principal e secundária de cada injetor.

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

A carga fria utilizada em todos os cenários foi a mesma, composta por 10% de ferro-gusa e o restante por diferentes tipos de sucata metálica. 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.

Todos os aços produzidos durante o teste pertencem à mesma classe e tem composição química parecida, bem como consumo de ligas.

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 de 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 8).

A contribuição energética de cada insumo é obtida através da multiplicação do consumo desse insumo pelo seu poder calorífico. Por exemplo, se o consumo de gás natural de um forno elétrico é de 10 Nm³/t e, observando na Tabela 8 que seu poder calorífico é de 10 kWh/Nm³, podemos concluir que a contribuição energética do gás natural para esse forno é de 100 kWh/t.

Nesse estudo, esse cálculo foi feito para os consumos de energia elétrica de FEA e FP, coque verde de petróleo, sucata e gusa sólido, que foram os insumos utilizados no forno durante os testes. O somatório da contribuição energética individual de cada um desses insumos resulta no consumo de energia total de FEA + FP.

Tabela 8 - Insumos e seus poderes caloríficos

Insumo	Poder calorífico
Energia elétrica (kWh/t)	1,00
Carvão vegetal (kg/t)	8,14 (kWh/kg)
Coque verde de petróleo (kg/t)	8,37 (kWh/kg)
Gás de alto-forno (Nm ³ /t)	1,10 (kWh/Nm ³)
Gás de aciaria LD (Nm ³ /t)	2,02 (kWh/Nm ³)
Gás de refinaria (Nm ³ /t)	10,47 (kWh/Nm ³)
Gás natural (Nm ³ /t)	10,00 (kWh/Nm ³)
GLP (kg/t)	13,95 (kWh/kg)
Óleo pesado (kg/t)	11,05 (kWh/kg)
Pneus (kg/t)	7,64 (kWh/kg)
Sucata (kg/t)	0,09 (kWh/kg)
Ferro-gusa líquido (kg/t)	0,52 (kWh/kg)
Ferro-gusa sólido (kg/t)	0,28 (kWh/kg)
Ferro-esponja (kg/t)	0,04 (kWh/kg)

Na aciaria em que os testes foram realizados, a construção de um balanço de massa completo das corridas não foi possível devido a limitações internas e dificuldades para a pesagem da escória e do pó gerado, que são fundamentais para realizá-lo. Dessa forma, o balanço de massa foi feito utilizando um software de simulação e otimização de forno elétrico a arco de propriedade da empresa onde os testes foram realizados. Nesse software, o forno é calibrado todos os meses com valores reais de medições de praticamente todos os parâmetros operacionais e de processo. Há ainda parâmetros de entrada do forno que não são medidos e que necessitam ser ajustados para fazer a calibração, como a razão de pós-combustão (PCR), por exemplo.

No balanço de massa, as perdas de massa (pó, escória e gases de exaustão) não foram medidas durante o período de testes, porém mensalmente são realizadas medições (exceto gases de exaustão) para que sejam feitas as calibrações do forno. Foi feito também o balanço de energia para os cenários, porém esses dados não puderam ser divulgados por questões de confidencialidade.

Foram feitas duas simulações: uma simulação de um forno calibrado com os dados reais de processo medidos no cenário 1 e PCR na fusão de 0,25 e no refino de 0,10; outra simulação com o forno calibrado com os dados reais do cenário 4 e PCR de 0,45 na fusão e de 0,25 no refino.

Os parâmetros utilizados para calibrar a simulação foram:

- Consumo de cales;
- Consumo de gás natural;
- Consumo de oxigênio;
- Consumo de energia elétrica de FEA;
- PON;
- Consumo de coque injetado;
- Carga fria carregada e peso vazado;
- Rendimento metálico;
- Consumo de eletrodos;
- Geração de escória;
- Geração de pó.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido ao caráter confidencial 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 DOE são apresentados sob a forma de quatro diferentes cenários, conforme visto anteriormente na Tabela 7.

4.1. DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA TOTAL POR CENÁRIO

Para avaliar a estabilidade do processo no forno elétrico a arco estudado em termos de consumo de energia total, a Figura 31 mostra a distribuição desse consumo dentro de cada cenário. O valor de P-Valor maior que 0,1 mostra que, para um intervalo de confiança de 90%, os dados seguem uma distribuição normal dentro de todos os cenários.

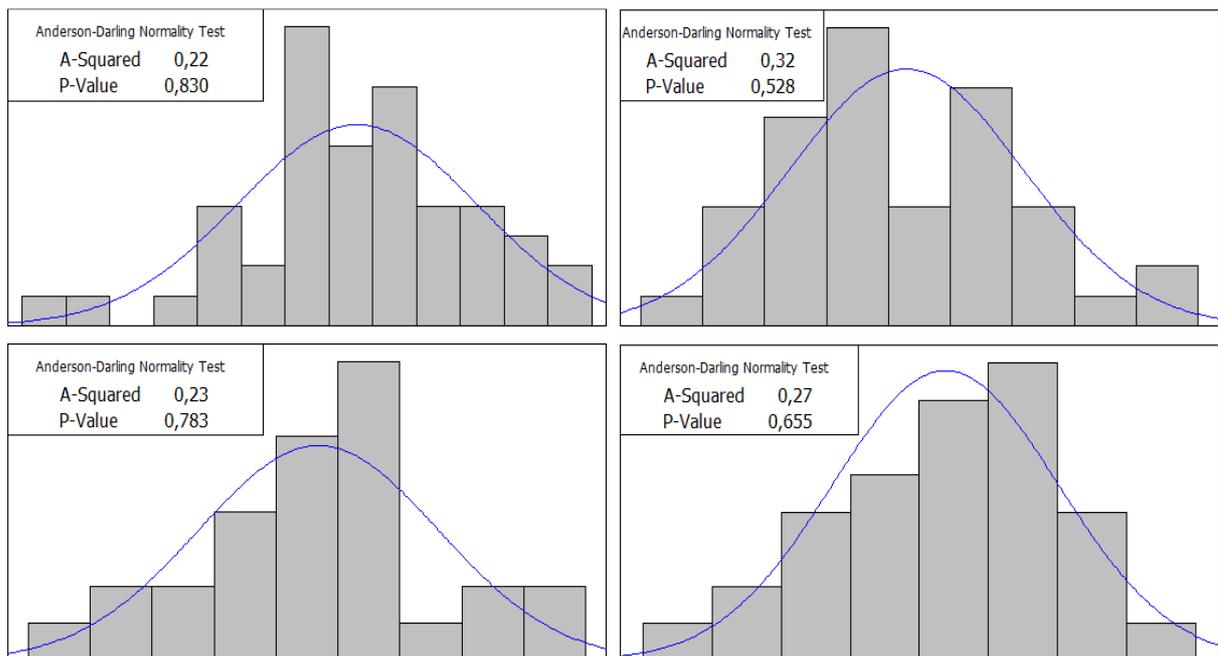


Figura 31: Distribuição do consumo de energia total por cenário. Cenário 1 (esquerdo superior); cenário 2 (direito superior); cenário 3 (esquerdo inferior); cenário 4 (direito inferior).

4.2. PARÂMETROS DE PROCESSO DO FORNO ELÉTRICO A ARCO

O gráfico da Figura 32 mostra a variação de alguns dos principais parâmetros de processo do forno em cada cenário comparativamente ao cenário 1 (base).

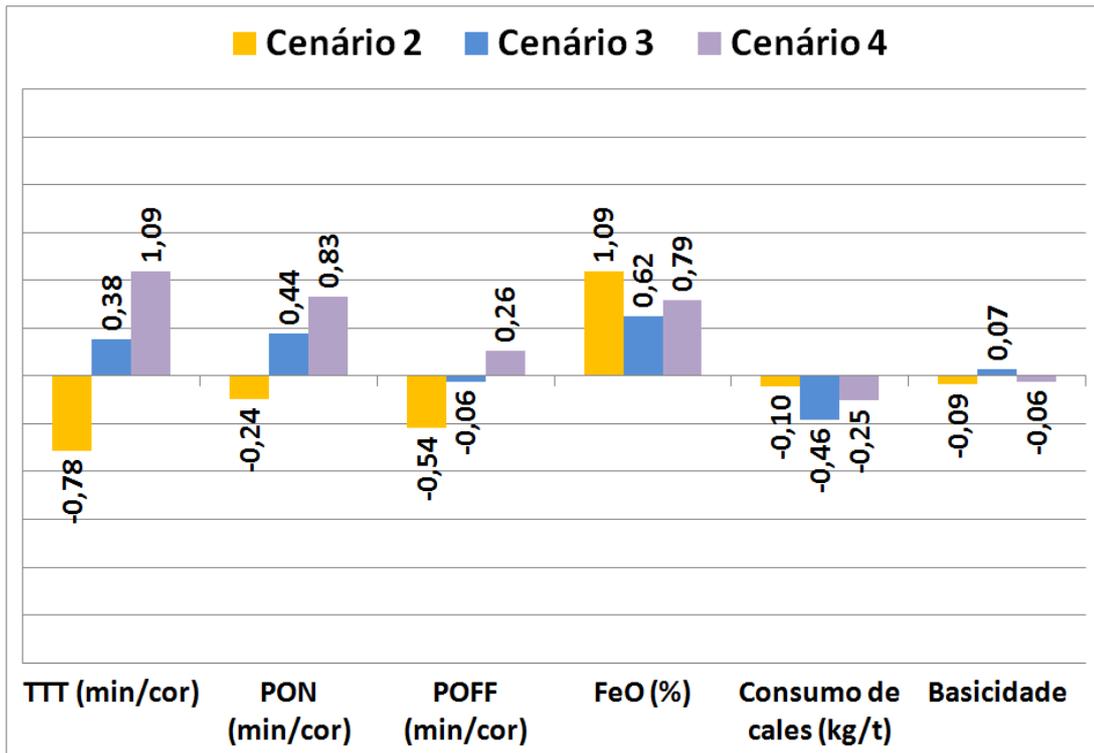


Figura 32: Variação dos parâmetros de processo do forno em cada cenário comparativamente ao cenário 1 (base).

O tempo de *power off*, que é um importante indicador da estabilidade operacional do forno, apresentou uma diferença máxima de 0,54 minutos/corrida no cenário 2 quando comparado ao cenário 1. Em aciarias elétricas, essa diferença pode ser considerada baixa e com pouca influência no processo do forno.

As diferenças encontradas para o tempo de *power on* entre os cenários são basicamente função do consumo de energia elétrica de FEA realizado em cada um deles e da potência média em MW. A aciaria em que foram realizados os testes opera com dois fornos elétricos 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 variações expressivas e apresentou diferença máxima de 0,46 kg/t no cenário 3 quando comparado ao cenário base.

O teor de FeO da escória foi maior em todos os cenários comparativamente ao cenário base, no entanto, a diferença máxima encontrada foi de 1,09 % no cenário 2 e a basicidade binária não apresentou variação superior a 0,10 em todos os cenários. 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 33 mostra o resultado estratificado por componente do consumo de energia total no cenário 2, de forma percentual e comparativa em relação ao cenário 1 (base).

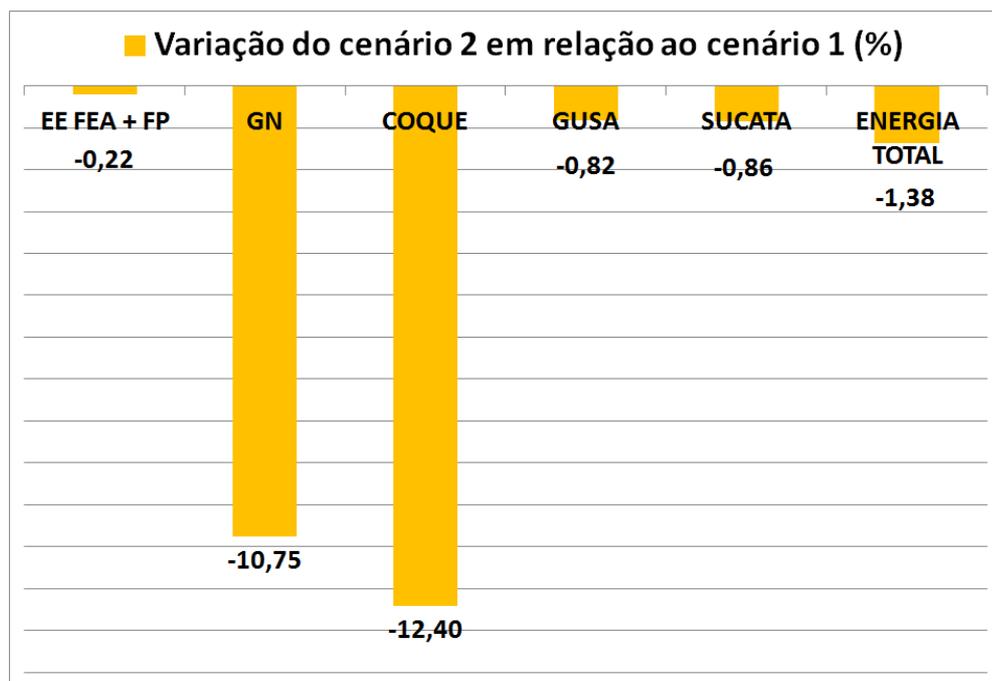


Figura 33: Resultado comparativo estratificado do cenário 2.

O principal resultado que pode ser atribuído à modificação proposta nesse cenário foi a redução em 10,75% no consumo de gás natural no forno elétrico.

Essa modificação ocorreu sem aparente perda significativa de coerência do jato, pois não houve geração anormal de respingos de aço/escória na abóboda, miolo refratário, eletrodos e/ou painéis. Esses parâmetros foram checados visualmente durante as paradas diárias do forno no horário de ponta de energia e também após a saída das carcaças superiores para troca a cada 21 dias.

Adicionalmente, outro fator que reforça a manutenção da coerência do jato foram os níveis de descarburização obtidos, que se mantiveram constantes. Isso pôde ser evidenciado pela baixa variação do teor de carbono das amostras retiradas antes do vazamento em todas as corridas (Figura 38). Se houvesse uma menor eficiência na descarburização, por exemplo, seria esperado que, com o mesmo consumo de oxigênio ou programa químico, houvesse um aumento no teor de carbono ao final da corrida. Segundo Mahoney (2010), a perda de penetração em ambientes a alta temperatura quando se utiliza vazão de gás natural igual a 5% da vazão de oxigênio principal é pequena se comparada com a penetração máxima alcançada com 10% da vazão de oxigênio principal. No entanto, em termos de consumo de gás natural, quando se utiliza uma situação ou outra, a redução desse insumo se provou significativa, bem como a redução do custo de energéticos, já que o preço desse insumo é elevado no Brasil. No FEA, os modos lança são utilizados no final do primeiro carregamento e durante o refino, ou seja, em momentos em que a maior parte da carga já está líquida e onde a temperatura dentro do forno é suficientemente alta (acima de 1300 °C) para que a coerência seja mantida com uma menor dependência da chama *shroud*.

As variações nos consumos de energia elétrica de FEA + FP (-0,22%), coque injetado (-12,40%), ferro-gusa (-0,82%) e sucata (-0,86%) não devem ser atribuídas à modificação proposta no teste, uma vez que a simples redução na vazão de gás natural da chama *shroud* não afetaria nem o rendimento metálico do forno, nem as quantidades necessárias de injeção de carvão. Elas são atribuídas às variações naturais na operação do forno e/ou qualidade da carga metálica.

Apesar da redução percentual bastante significativa na injeção de coque nesse cenário, o impacto no consumo de energia total foi baixo (-0,33%), pois o forno onde foram realizados os testes apresenta consumo específico de coque muito baixo quando comparado com consumos praticados em outros fornos com processo semelhante.

As reduções no consumo de sucata e gusa somadas representaram uma redução de 0,16% no consumo de energia total do cenário.

Quando levadas em consideração as variações de todos os componentes do consumo de energia total no cenário 2, a redução foi de 1,38% em relação ao cenário base.

A Figura 34 mostra o resultado estratificado por componente do consumo de energia total no cenário 3.

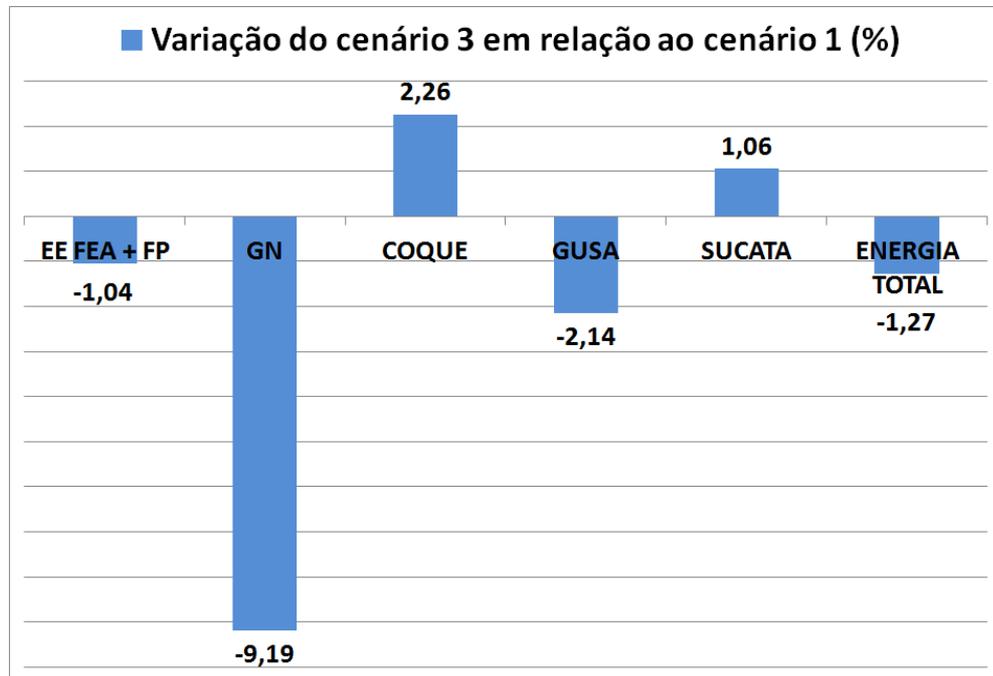


Figura 34: Resultado comparativo estratificado do cenário 3.

Houve redução significativa no consumo de gás natural (-9,19%), o que era esperado em função da redução da vazão em um dos modos queimador. Outro fator que pode ter relação com o aumento da proporção O_2 /GN nesse cenário foi a redução de 1,04% no consumo de energia elétrica. Thomson et al. (2001) também obtiveram redução no consumo de energia elétrica quando testaram relação de O_2 /GN de 8:1 em comparação a uma base de 3:1. No teste, foi utilizado um forno equipado com analisador de gases e concluiu que a redução no consumo de energia elétrica foi atribuída, principalmente, a uma maior combustão dos gases presentes dentro do forno pelo oxigênio em excesso injetado através dos queimadores, que acelerou a fusão, formação da escória espumante e o aumento da temperatura do banho. Foi evidenciado um aumento na taxa de pós-combustão nas corridas, menores níveis de queima parcial de metano e redução da entrada de ar falso, sem haver redução do rendimento metálico ou alteração da composição química da escória.

Em fornos que utilizam sucata de menor densidade e operam completamente “preenchidos” após os carregamentos, como é o caso do forno estudado, o

fenômeno de pós-combustão pode ser mais eficientemente convertido em ganhos de energia elétrica.

As alterações nos consumos de coque de petróleo injetado (+2,26%), ferro-gusa (-2,14%) e sucata (+1,06%) não foram intencionais e devidas a variações naturais do processo e/ou qualidade da carga metálica. Quando somadas, as contribuições desses três insumos geraram um aumento de apenas 0,11% no consumo de energia total do cenário.

A redução na energia total considerando todos os componentes foi de 1,27% nesse cenário em relação ao cenário 1.

A Figura 35 mostra o resultado estratificado por componente do consumo de energia total no cenário 4, onde foram somadas a modificação dos modos lança do cenário 2 e a modificação do modo queimador do cenário 3.

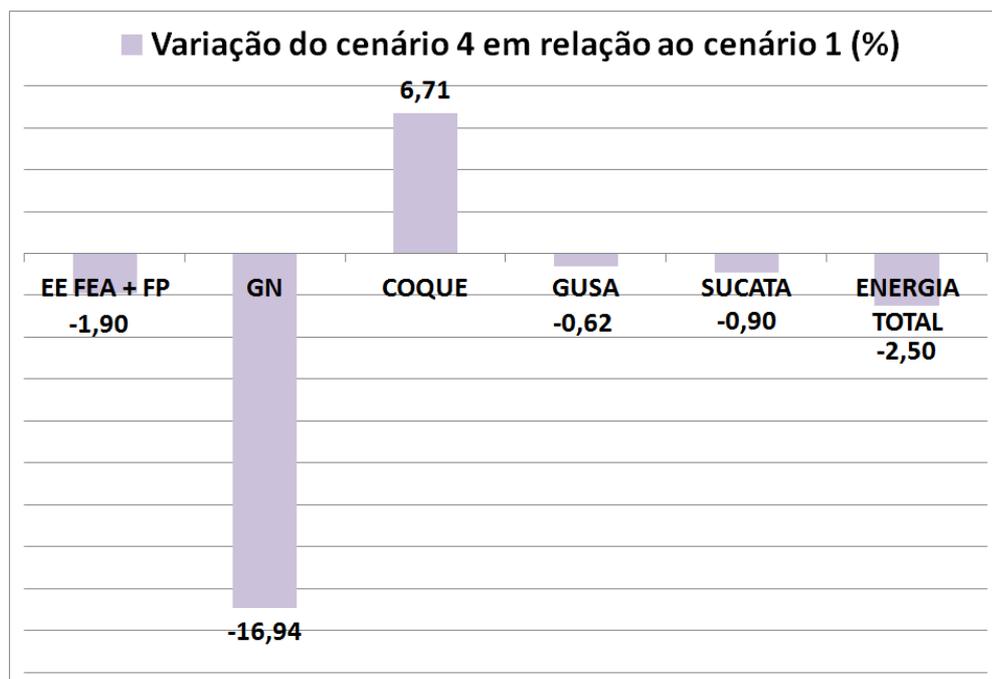


Figura 35: Resultado comparativo estratificado do cenário 4.

Foi evidenciada uma importante redução no consumo de gás natural de 16,94%. Da mesma forma que foi visto no cenário 3, também houve redução no consumo de energia elétrica (-1,90%).

O somatório das contribuições dos consumos de coque de petróleo injetado (+6,71%), ferro-gusa (-0,62%) e sucata (-0,90%) resultou em um aumento de 0,03% no consumo de energia total do cenário. Essas alterações não foram intencionais e decorreram de variações naturais do processo e/ou qualidade da carga metálica.

A redução no consumo de energia total considerando todos os componentes foi de 2,50% nesse cenário em relação ao cenário 1, sendo esse, então, o cenário que apresentou a maior redução desse consumo.

Na Figura 36 é mostrado o resultado do teste estatístico DOE de forma gráfica. É possível visualizar, separadamente, a influência das modificações no modo queimador e nos modos lança no consumo de energia total. A reta da esquerda mostra que o menor consumo de energia total foi encontrado na situação em que se operou com proporção 3,5:1 e vazão de gás natural igual a 70% da vazão no cenário base. Já para o caso dos modos lança (reta da direita), a situação que resultou em menor consumo de energia total foi quando se operou com vazão de gás natural igual a 5% da vazão de oxigênio principal.

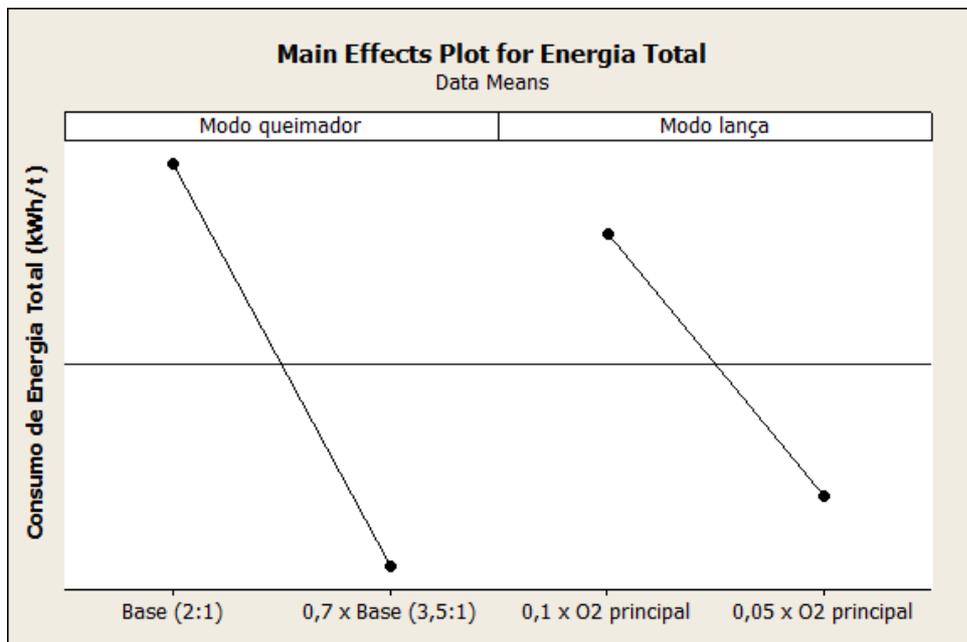


Figura 36: Resultado gráfico do DOE.

4.4. CONSUMO DE OXIGÊNIO E CARBONO DE VAZAMENTO

Um parâmetro especialmente importante monitorado nos testes foi o carbono de vazamento. Através de sua medida, procurou-se identificar se os ganhos em consumo de energia elétrica vieram de uma melhor fusão da sucata e/ou de uma queima maior e mais eficiente dos gases dentro do forno, e não da oxidação de ferro do banho, uma vez que o consumo de oxigênio aumentou quando foi utilizada razão O_2/GN de 3,5:1, conforme gráfico da figura 37.

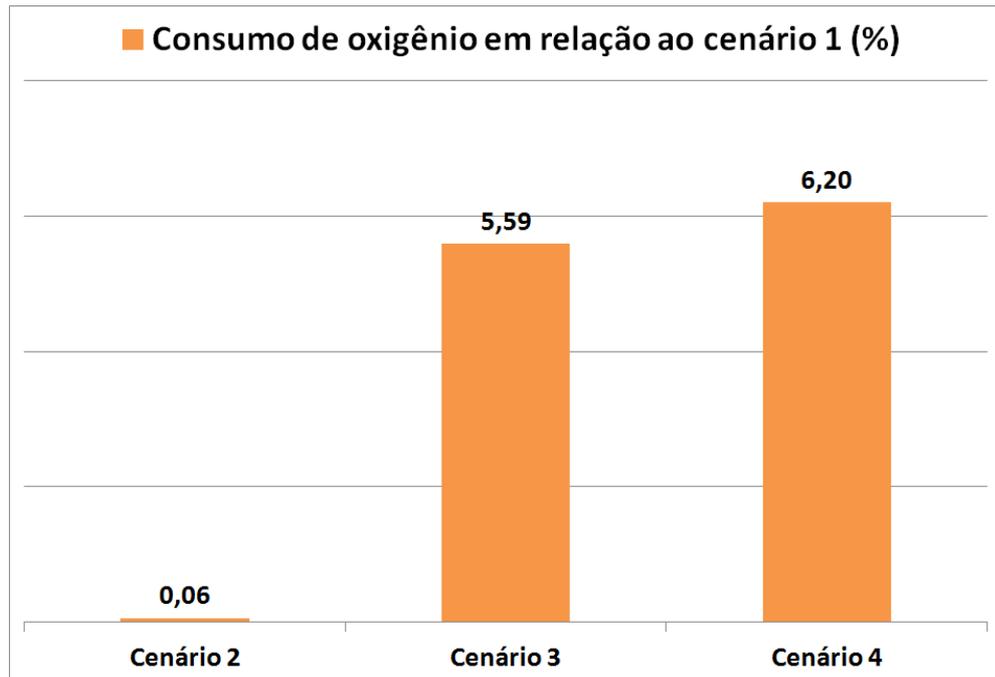


Figura 37: Variação do consumo de oxigênio em relação ao cenário 1 (base).

Os valores obtidos para o carbono de vazamento em cada cenário são mostrados no gráfico da Figura 38.

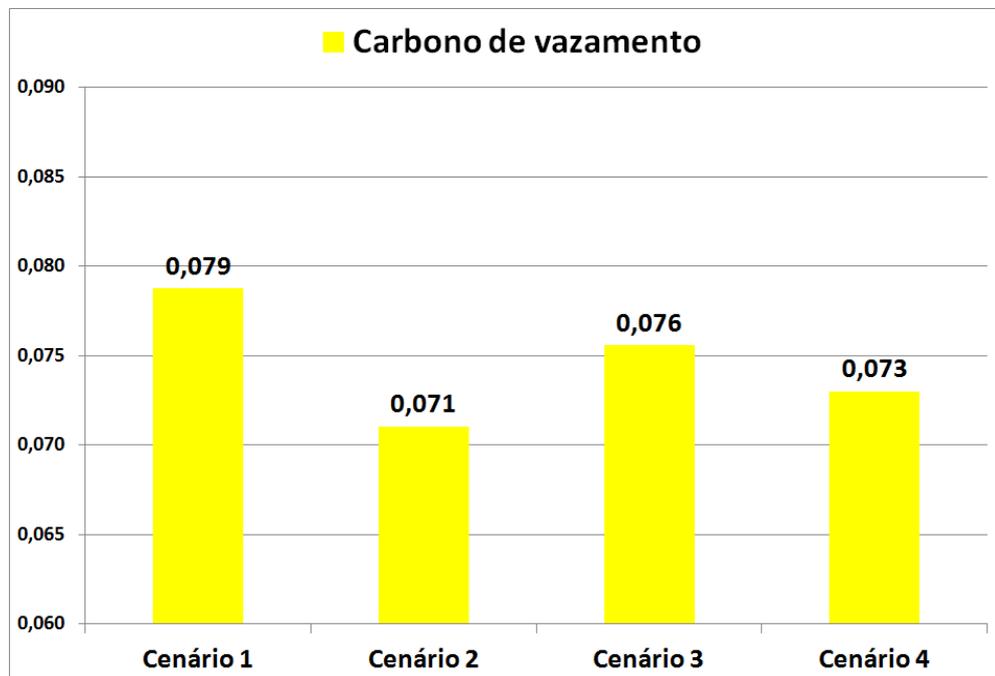


Figura 38: Carbono de vazamento em cada cenário do teste

No cenário 1 obteve-se um carbono de vazamento levemente maior que nos outros cenários, no entanto, conforme teste estatístico da Figura 39, não pode-se afirmar que há diferença significativa entre os valores de cada cenário para um nível

de confiança de 90% (valor de P maior que 0,1 e a sobreposição das retas tracejadas).

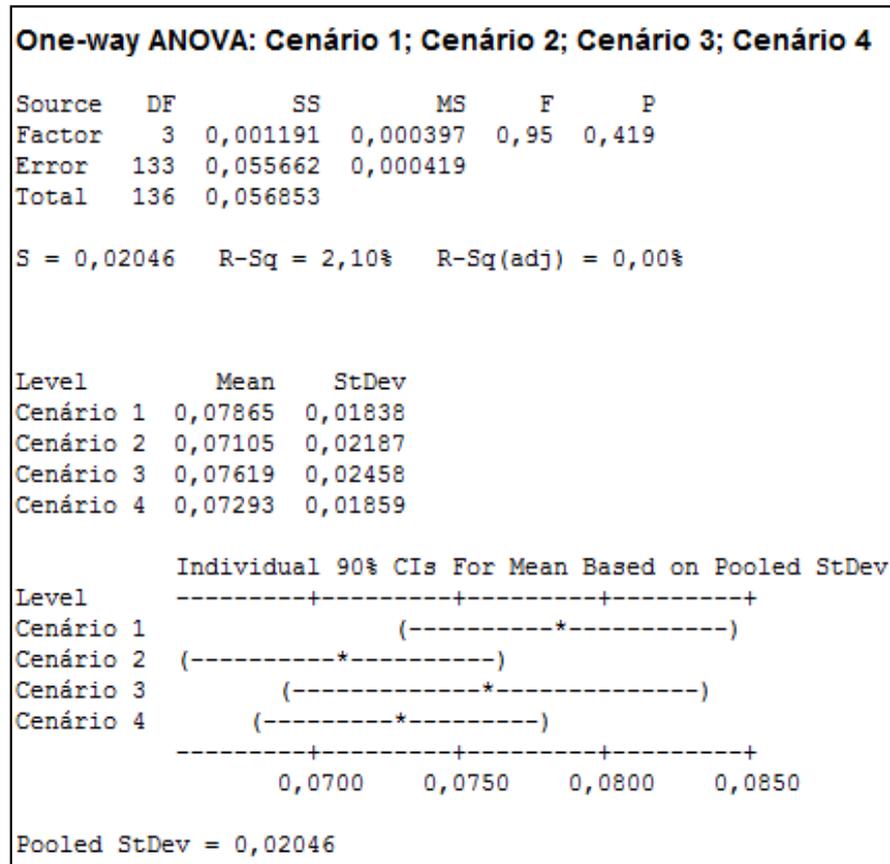


Figura 39: Teste estatístico para avaliar significância da diferença entre os carbonos de vazamento.

4.4. BALANÇO DE MASSA

Nas Figuras 40 e 41 são mostrados os balanços de massa dos cenários 1 e 4 com as alterações propostas no PCR, respectivamente. Os dados de entrada do diagrama das figuras refletem os valores reais obtidos em cada cenário. Na parte inferior do diagrama, constam os dados de saída do balanço, também conhecidos como perdas de massa.

No cenário 4, a geração de escória foi 0,8 kg/t e as perdas pelos gases de combustão 2,7 kg/t maiores em comparação ao cenário 1, correspondendo a uma diferença de cerca de 1% em ambos os casos. A geração de pó foi 0,1 kg/t maior no cenário 4.

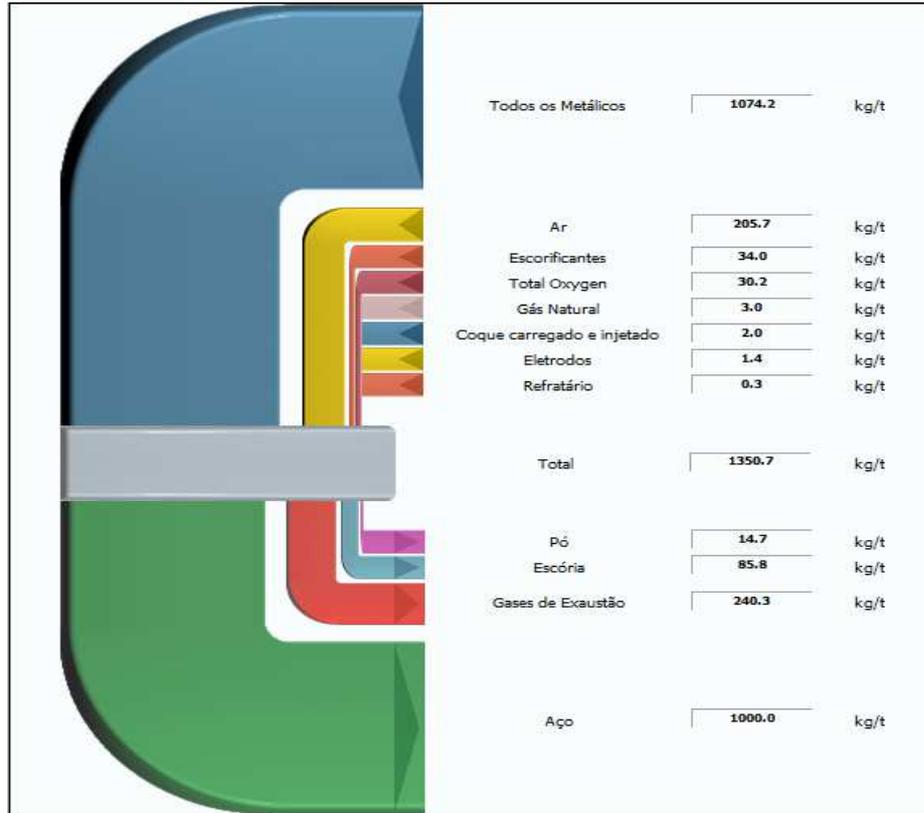


Figura 40: Balanço de massa do cenário 1 com PCR = 0,25/0,10.

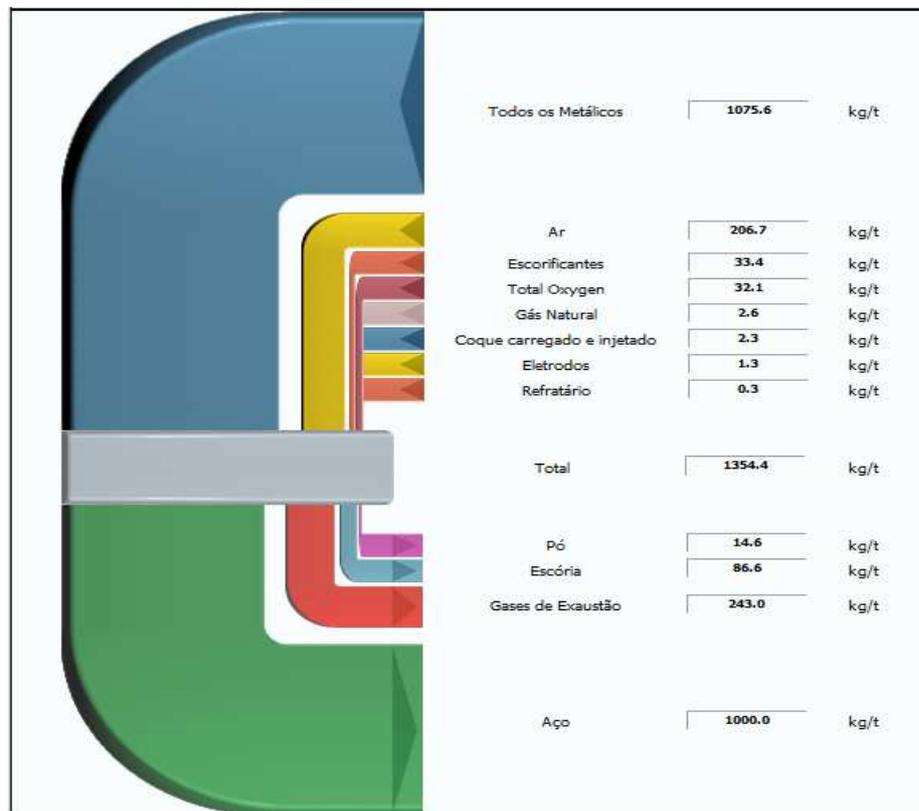


Figura 41: Balanço de massa do cenário 4 com PCR=0,45/0,25.

A Tabela 9 mostra um resumo da oxidação dos principais elementos presentes na carga fria e dos materiais adicionados no forno, da energia química gerada pela oxidação desses elementos e do volume de oxigênio necessário para essas reações nos dois cenários. Esses dados também foram obtidos através do software de simulação.

Tabela 9 - Oxidação por elemento químico nos cenários 1 e 4

	Resumo Cenário 1			Resumo Cenário 4		
	Quantidade	Energia	Volume de O ₂	Quantidade	Energia	Volume de O ₂
	kg/t	kWh/t	m ³ /t	kg/t	kWh/t	m ³ /t
C Total	10,1	95,3	18,9	10,7	100,2	19,9
Si	2,4	19,3	1,9	2,4	19,8	1,9
Fe	12,7	16,8	2,6	13,4	17,7	2,7
Mn	5,1	10,3	1,0	5,1	10,4	1,0
P	0,2	1,5	0,2	0,2	1,5	0,2
O	0,4	0,0	0,3	0,4	0,0	0,3
Total		143,3	25,1		149,6	26,3
Oxidação Primária			15,7			16,4
Pós Combustão			9,5			9,9

No cenário 4 houve uma oxidação de ferro 0,7 kg/t maior que no cenário 1, proporcionando uma redução no consumo de energia elétrica de 0,9 kWh/t. Dessa forma, pode-se afirmar que somente 10% da redução no consumo de energia elétrica do cenário 4 em relação ao cenário 1 foi devido a oxidação desse elemento. Os outros 90% de redução podem ser atribuídos principalmente ao aumento das reações de pós-combustão.

5. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos no estudo foi possível concluir que:

- O cenário 4, onde foram aplicadas as duas modificações propostas no teste, apresentou a maior redução no consumo de energia total (2,50%). Dessa forma, pode-se afirmar que houve uma melhor eficiência energética no forno;
- Os principais fatores que contribuíram para a redução do consumo de energia total foram as reduções no consumo de gás natural (16,94%) e no consumo de energia elétrica (1,90%);
- O aumento da relação O_2/GN de 2:1 para 3,5:1 resultou em redução no consumo de energia elétrica maior que 1% nos dois cenários em que foi testada;
- Com a redução da vazão de gás natural ao utilizar relação O_2/GN de 3,5:1, houve redução de 9,19% no consumo de gás natural;
- Utilizando vazão de gás natural nos modos lança igual a 5% da vazão de oxigênio principal, houve redução de 10,75% no consumo de gás natural e não foi evidenciada perda significativa de coerência do jato;
- Nos cenários em que foi aumentada a relação O_2/GN , o consumo de oxigênio foi maior, porém as alterações no carbono de vazamento não foram significativas estatisticamente;
- Utilizando software de simulação de forno, a perda de ferro no cenário 4 foi 0,71 kg/t maior em relação ao cenário 1, gerando redução de 0,9 kWh/t no consumo de energia elétrica. Foi estimado um aumento da PCR de 0,20 na fusão e 0,15 no refino nesse cenário.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conduzir teste semelhante em forno que possua analisador de gases no quarto furo para avaliar quantitativamente o impacto das alterações propostas no fenômeno de pós-combustão e/ou em fornos em que se tenham plenas condições de realizar balanço de massa completo.

Testar cenários em que o consumo de oxigênio total no modo lança seja igual, porém entre cada cenário variar a vazão de oxigênio principal e os tempos de lança para entender se é mais vantajoso operar com menor vazão por mais tempo ou com maior vazão por menos tempo.

Testar distribuição do oxigênio entre as linhas principal e secundária diferenciadas nos modos queimador, avaliando mudança no perfil da chama e impacto na operação do forno.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS W. et al. **Total energy consumption in arc furnaces**. MPT International - Metallurgical Plant and Technology, v. 25, n. 6, p. 44-50, dez. 2002.

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.

ANDRADE, M. L. A; CUNHA, L. M. S; GANDRA, G. T. **A ascensão das mini-mills no cenário siderúrgico mundial**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro: v.6, n.12, p. 51-76, set. 2000.

ARAUJO, L. A. **Manual de Siderurgia Vol. 1**. São Paulo: Arte e Ciência, 2008.

BADIA, A. **Utilização de Carepas como Componente da Carga de um Forno Elétrico a Arco**. Porto Alegre: UFRGS, 2012. Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BEYCHOK, M. **De Laval Nozzle**, 2010. Disponível em: <http://en.citizendium.org/wiki/File:De_Laval_nozzle_2.png>. Acesso em: 20 jun. 2014.

CANTACUZENE, S. et al. **Advanced EAF oxygen usage at Vallourec-Mannesmann Saint Saulve steelworks**. La Revue de Métallurgie - CIT, p. 537-545, dez. 2006.

CICUTTI, C. et al. **Analysis of slag foaming during the operation of an industrial converter**. Latin American Applied Reserach. Bahía Blanca, v. 32, n. 3, jul. 2002.

Ellingham Diagram. Site institucional da Universidade de Cambridge. Disponível em: <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ellingham_diagrams/ellingham.php>. Acesso em: 5 mai. 2014.

Etapas da produção do aço em uma usina siderúrgica. Site institucional do Grupo Gerdau. Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br>>. Acesso em: 5 fev. 2014.

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.; AVILLETZ, 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.

FONSECA, M. A. P. **Fornos Elétricos a Arco**. Belo Horizonte: Editora Tecno Vídeo Produções, 1989.

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

GUMIERI, A. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. Tese de Doutorado, PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GUO, D.; IRONS, G. A. **Modeling of Gas Flow and Burner Heating in an Electric Arc Furnace**. AISTech Proceedings, Cleveland, v. 2, p. 424-433, mai. 2006.

GRANT, M. G. **Principles and Strategies of EAF Post-Combustion**. 58th Electric Furnace Conference, Orlando, p. 15-28, nov. 2000.

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.

RIES, W. **Fornos a Arco: Análise e Projeto do Sistema Elétrico.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2001.

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

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, Araçariguama: Gerdau São Paulo, 2013.

STORY, S.R.; FRUEHAN, R. J. **Modeling Post Combustion in the EAF**. Materials 98: Proceedings of the Biennial Materials Conference of the Institute of Materials Engineering, Wollongong, p. 77-82, jul. 1998.

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.

UNAMUNO, I. **Melting and Refining**. Módulo Interno de Treinamento da Gerdau, 2013.

URQUIZA, J. A. **Hornos de Arco para Fusion de Acero – Teoria, cálculo y aplicaciones**. Madrid: McGraw-Hill, 1995.