

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

Departamento de Metalurgia

ESTUDO COMPARATIVO DA INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO DE UMA  
INJETORA DE CARBONO CONVENCIONAL PARA UMA INJETORA  
SUPERSÔNICA DE CARBONO EM UM FORNO ELÉTRICO A ARCO

**Tiago Favaretto**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto alegre  
2014

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Sergio Favaretto, e minha mãe, Lovani Bagatini, pelo sempre presente apoio, pelo suporte sem medida de esforços, pelo amor e pela educação que puderam me proporcionar. Ao meu irmão Lucas Favaretto pela amizade e companheirismo.

À minha namorada Deisi Vieira pela paciência, compreensão, carinho e inspiração.

Aos colegas e amigos Vinicius da Rocha, Lucas Travi, Pedro Dick, Cesar Biasi, William Nunes, Victor Trevisan, Marcelo Refatti e Jéssica Grünhauser pela companhia e divertimento durante a graduação.

Ao professor Wagner Bielefeldt pela orientação.

Aos colegas de trabalho Sandro Machado, Vitor Hugo da Silva, Douglas Lilge, Marco Antonio Auad e Filipi Jukoski pela cooperação na realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	II
AGRADECIMENTOS .....	III
SUMÁRIO.....	IV
LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABELAS .....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	IX
RESUMO .....	X
ABSTRACT .....	XI
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 O processo siderúrgico – aciaria elétrica .....	3
2.2 Forno elétrico a arco .....	6
2.2.1 Estrutura e equipamentos.....	6
2.2.2 Processo operacional .....	8
2.3 Energia no FEA .....	10
2.3.1 Energia elétrica.....	11
2.3.2 Energia química.....	14
2.4 Espumação .....	16
2.5 Jato supersônico e injeção de material carburante .....	22
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	27
3.1 Características do FEA, padrões de carga fria utilizados e descrição das injetoras de carbono.....	27
3.2 Variáveis do FEA analisadas .....	35

3.3	Análise da variância dos resultados (ANOVA) .....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
4.1	Operação da injetora TSCi e consumo de material carburante.....	39
4.2	Variáveis do FEA.....	43
4.3	THD .....	49
5	CONCLUSÕES.....	53
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	55
7	REFERÊNCIAS .....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Ilustração das etapas de redução e refino do processo siderúrgico. Fonte: Adaptado de MOREIRA, 2012.....	4
Figura 2.2	Diagrama esquemático do processo de produção de aços via aciaria elétrica. Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005. ....	6
Figura 2.3	Ilustração dos equipamentos do FEA. Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005. ...	8
Figura 2.4	Exemplo de receita elétrica e química de um FEA produzindo uma corrida de dois cestões.....	9
Figura 2.5	Vista superior de um FEA mostrando regiões preferenciais de dissipação de calor pelos eletrodos (regiões quentes, em amarelo) e não preferenciais (regiões frias, em azul) devido à repulsão dos arcos. ....	12
Figura 2.6	Exemplo de sinal contendo harmônicas e as frequências fundamentais. Fonte: Adaptado de SCHNEIDER ELECTRIC, 2014. ....	13
Figura 2.7	Vista superior de um FEA mostrando as regiões principais de aquecimento pelos eletrodos e pelas injetoras.....	14
Figura 2.8	Contribuição de energia média total devido às reações de oxidação e redução durante o refino no processo Tenaris-Dalmine. Fonte: Adaptado de MEMOLI (2004).....	15
Figura 2.9	Esquema mostrando a formação de escória espumante. Fonte: RAHMAN, 2010.....	16
Figura 2.10	Relação entre o índice de espumação e a viscosidade efetiva. Fonte: Adaptado de PRETORIUS (1998).....	18
Figura 2.11	Esquema demonstrando os passos da reação entre o carvão e a escória. Fonte: Adaptado de JI (2004). ....	20
Figura 2.12	Balço de carbono em experimento de injeção. Temperatura: 1691°C; Porcentagem em massa de FeO: 35,41wt%; Taxa de injeção de carvão: 0,0098 mol C /s . kg de escória. Fonte: Adaptado de JI (2004).....	21

Figura 2.13	Modelo de boca supersônico convergente/divergente. Fonte: JOHN, 2009. 23	
Figura 2.14	Jato supersônico protegido por um jato auxiliar. Fonte: JOHN, 2009.....	24
Figura 2.15	Modelo de jato sobre expandido na saída do bocal. Fonte: adaptado de MAIA (2007). .....	24
Figura 3.1	Bloco refrigerado que suporta as injetoras Co-Jet e de carbono.....	28
Figura 3.2	Injetora de carbono convencional utilizada no FEA.....	31
Figura 3.3	Injetora de carbono modelo Tallman Supersonic Carbon Injector (TSCi) ..	32
Figura 3.4	(a) Vista da ponta da injetora de carbono TSCi em detalhe. O jato principal é expelido por dentro do tubo interno, enquanto que o jato secundário é expelido pelo espaçamento entre o tubo interno e o tubo externo. (b) Estrangulamento do canal (1) em detalhe. ....	33
Figura 3.5	Silo que armazena o material carburante e alimenta as injetoras. ....	34
Figura 4.1	Imagem da injetora TSCi em sua posição de trabalho.....	39
Figura 4.2	Em detalhe a ponta da injetora TSCi após seis meses em operação. ....	40
Figura 4.3	Boxplot demonstrando os valores de consumo de material carburante para o período com as duas injetoras convencionais e para o período de testes com uma injetora convencional e uma TSCi, para cada padrão de carga. Os valores de consumo de carburante estão em kg/t.....	41
Figura 4.4	Boxplot dos resultados de teor de P no aço para cada período de teste e para cada padrão de carga. ....	46
Figura 4.5	Relação entre o teor de P no aço e o teor de FeO na escória para a carga A, para os dois períodos de teste.....	47
Figura 4.6	Relação entre o teor de P no aço e o teor de FeO na escória para a carga B, para os dois períodos de teste.....	48
Figura 4.7	Evolução da THD com o tempo para uma das corridas de dois cestões testadas.....	49
Figura 4.8	Relação entre THD média e o teor de FeO na escória, para o padrão de carga A, nos dois períodos de testes. Os valores estão em porcentagem para a THD e em porcentagem em massa para o teor de FeO.....	51
Figura 4.9	Relação entre THD média e o teor de FeO na escória para o padrão de carga B. Os valores estão em porcentagem para a THD e em porcentagem em massa para o teor de FeO. ....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Porcentagem em massa de Ferro-gusa e de sucata empregados em cada padrão de carga.....	29
Tabela 3.2	Composição química média das provas de aço e de escória dos padrões de carga estudados. Os valores estão em porcentagem em massa. ....	30
Tabela 3.3	Faixa de composição química do material carburante segundo o fornecedor. Os valores estão em porcentagem em massa .....	35
Tabela 3.4	Faixas de granulometria do material carburante segundo o fornecedor. Os valores estão em porcentagem em massa. ....	35
Tabela 3.5	Quantidade de corridas analisadas. ....	37
Tabela 4.1	Valores de consumo de material carburante e resultado da avaliação ANOVA. Os valores estão em kg/t.....	42
Tabela 4.2	Análise química do material carburante. Os dados estão em porcentagem em massa. ....	43
Tabela 4.3	Resultados das variáveis do FEA para o padrão de carga A.....	44
Tabela 4.4	Resultados das variáveis do FEA para o padrão de carga B. ....	45
Tabela 4.5	Média da THD durante o refino estratificada por período, por eletrodo e as médias gerais. ....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\Sigma$	Índice de espumação
$\eta$	Viscosidade
$\eta_e$	Viscosidade efetiva
$\theta$	Fração de fases sólidas
$\sigma$	Desvio padrão
ANOVA	ANALYSIS OF VARIANCE (Análise de Variância)
ArCOS	Arc Control Optimization System (Sistema de otimização do controle do arco)
$B_2$	Basicidade binária
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão para Normatização)
EBT	Eccentric Bottom Tapping (Vazamento excêntrico pelo fundo)
FEA	Forno Elétrico a Arco
FP	Forno Panela
GN	Gás Natural
LC	Lingotamento Contínuo
LD	Linz-Donawitz
$R^2$	Coefficiente de determinação
THD	Total Harmonic Distortion (Distorção harmônica total)
TSCi	Tallman Supersonic Carbon injector
$V_1$	Tensão eficaz da fundamental
$V_h$	Tensão eficaz da ordem harmônica h
VD	Vaccum Degasser (Desgaseificador a vácuo)

## RESUMO

O cenário recente da indústria siderúrgica no mundo se caracteriza pela busca de aumento da eficiência dos processos, objetivando aumento da qualidade, redução dos custos e aumento da produtividade. Os materiais e equipamentos disponíveis no mercado devem ser testados e seus desempenhos medidos. O objetivo deste trabalho é avaliar o impacto no processo do Forno Elétrico a Arco (FEA) por um destes equipamentos: a injetora de carbono. Para isso, neste trabalho foi avaliada a influência da mudança de uma injetora convencional para uma injetora supersônica de carbono no consumo de material carburante de um FEA, para dois padrões de carga diferentes, em uma aciaria de produção de aços especiais. Em um padrão de carga foram avaliadas 24 corridas, e no outro foram avaliadas 38 corridas. Além disso, variáveis do FEA foram monitoradas durante o período de testes para analisar o impacto da mudança da injetora no processo. Em adição, a estabilidade do arco elétrico durante o refino foi avaliada através dos valores de distorção harmônica total (THD) e foi realizada uma análise química do material carburante injetado. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para verificação da significância estatística. O consumo de carburante médio apresentou uma redução estatisticamente significativa em ambos os padrões de carga, de 27,44% e 22,25%. As demais variáveis não apresentaram variação significativa, exceto o teor de P em um dos padrões de carga, que diminuiu de 0,014% para 0,011% em massa. Uma relação polinomial de ordem dois entre o teor de P no aço e o teor de FeO na escória foi encontrada. A faixa de FeO que resultou em menor teor de P foi entre 30% e 40% em massa. O valor médio da THD aumentou 13,32% em um padrão de carga e reduziu 3,78% no outro. A THD e o teor de FeO mostraram uma relação polinomial de ordem dois, indicando um teor ótimo de FeO de 35% para o valor mínimo de THD.

Palavras-chave: Injeção de carbono, escória espumante, estabilidade do arco elétrico, eficiência energética no refino.

## ABSTRACT

The recent scenario of the siderurgical industry in the world is characterized by the pursuit of higher efficiency of processes, aiming better quality, reduction of costs and higher productivity. The materials and equipments available on the market might be tested and their performance quantified. The objective of this work is to evaluate the impact on the Electric Arc Furnace (EAF) process by one of these equipments: the carbon injector. In this work, the influence of changing from a conventional carbon injector to a supersonic carbon injector on the consumption of carburizing material of an Electric Arc Furnace (EAF) was evaluated, for two different charge patterns, in a specialty steels melt shop producer. On one charge pattern was evaluated 24 heats and on the other charge was evaluated 38 heats. Furthermore, EAF variables during the testing period were monitored to analyze the impact of the injector change in the process. In addition, the electric arc stability during the refine period was evaluated through Total Harmonic Distortion (THD) values and was realized a chemical analysis of the carburizing material. The results obtained were applied to an analysis of variance (ANOVA) for checking of the statistical significance. The mean of the consumption of carburizing material presented a statistically significant reduction on both charge patterns, of 27,44% and 22,25%. The others variables did not present significant variation, except the content of P in one charge pattern, which reduced from 0,014% to 0,011% in weight. A second order polynomial relation between content of P in steel and content of FeO in the slag was found. The range of FeO which resulted in lower P content was between 30% and 40% in weight. The mean value of THD raised 13,32% in one charge pattern and reduced 3,78% in the other, after de injector change. The THD and the content of FeO showed a second order polynomial relation, indicating an optimum content of FeO of 35% to the minimum level of THD.

Keywords: Carbon injection, foaming slag, electric arc stability, energetic efficiency on refining.

# 1 INTRODUÇÃO

O recente cenário da indústria siderúrgica no mundo se caracteriza pelo excesso de capacidade de produção de aço (SINDUSCON-RS, 2014). Com base nesse panorama, as empresas precisam investir cada vez mais em aumento da eficiência de seus processos para se manterem competitivas no mercado. O mercado brasileiro se encontra em situação semelhante. Portanto, as novas tecnologias disponíveis para aumento da eficiência precisam ser testadas e avaliados os possíveis ganhos.

Segundo a World Steel Association (2013), trinta por cento do peso de aço produzido atualmente é fabricado pelo processo de Forno Elétrico a Arco (FEA), no qual a principal matéria-prima é a sucata ferrosa. O FEA usa basicamente duas formas de energia em seu processo: energia elétrica, aplicada diretamente através dos eletrodos de grafita, e energia química, através das reações de oxidação que ocorrem no banho líquido. Algumas tecnologias tentam substituir uma parcela de energia elétrica por energia química, devido ao elevado custo da primeira. A injeção de gás natural, oxigênio e material carburante, por lanças e injetoras é uma tecnologia bem conhecida e difundida que, atualmente, está presente na grande maioria dos fornos. Há no mercado vários fabricantes e modelos de lanças que serão comentados neste trabalho.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o impacto no processo do FEA quanto à mudança de uma injetora convencional para uma injetora supersônica de material carburante, em uma empresa siderúrgica. Para tal, foram analisadas corridas antes e depois da troca da injetora, através de instrumentação presente no forno, indicadores de controle e relatórios de consumo. Os parâmetros avaliados foram o consumo de material carburante injetado por corrida, o consumo de energia elétrica por corrida, o rendimento da corrida, o teor de FeO na escória, o oxigênio ativo no banho, o teor de carbono e fósforo no aço, os tempos de *Power on* e *Power off* e a taxa de distorção harmônica total da tensão.

Estes parâmetros foram avaliados, pois são os que podem sofrer mais influência com a mudança da injetora. É esperada uma redução significativa no consumo de material

carburante e também outros efeitos benéficos ao processo do FEA, apesar de menos intensos, como redução do consumo de energia elétrica, diminuição do valor médio da THD e maior controle sobre a oxidação da escória.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 O processo siderúrgico – aciaria elétrica

O processo de produção de aços pode ser dividido em três principais etapas: redução, refino e conformação mecânica.

Na etapa de redução, o óxido de ferro é reduzido a ferro metálico no processo de alto-forno ou redução direta. O alto-forno produz ferro primário líquido com alto teor de carbono, denominado ferro-gusa, enquanto que a redução direta produz ferro primário no estado sólido, denominado ferro esponja ou DRI. O ferro primário passa então para etapa de refino na aciaria. Alternativamente ao ferro primário, pode ser empregada sucata de aço reciclado como fonte de ferro na aciaria, através dos processos de conversor LD ou forno elétrico a arco. Ainda na aciaria, o aço passa pelo refino secundário e é solidificado na forma de produtos semi-acabados. Estes produtos passam então pela etapa de conformação mecânica na qual tomam a forma final do produto (RIZZO, 2005). As etapas de redução e refino com seus principais equipamentos e matérias-primas estão ilustradas na Figura 2.1. Destacado em azul, pode-se observar a rota de produção da aciaria na qual foi desenvolvido o trabalho.

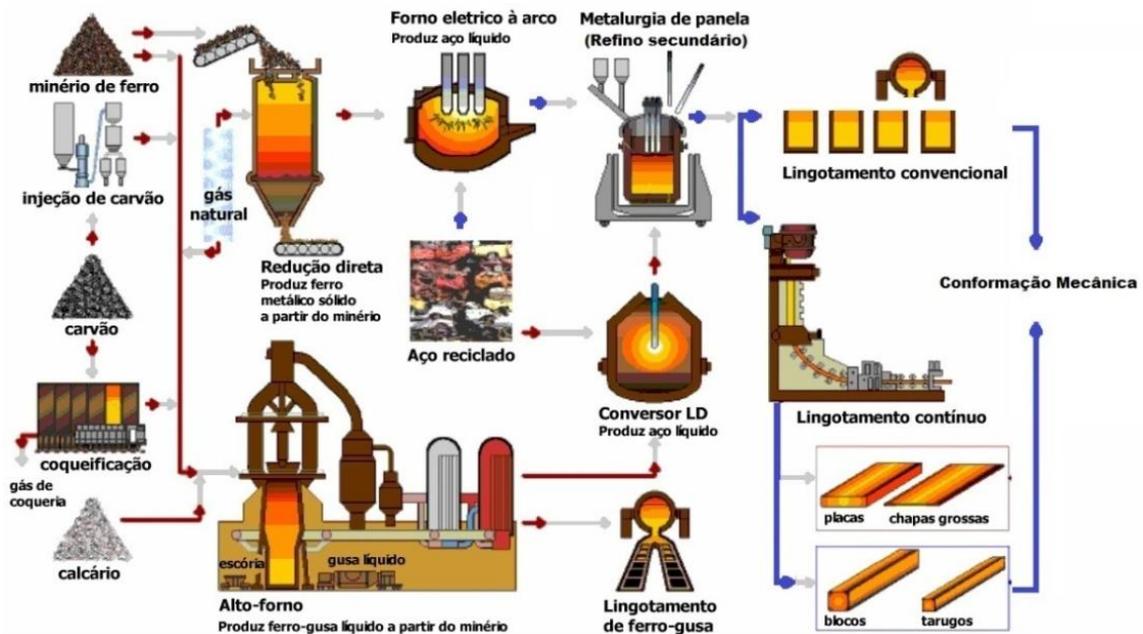


Figura 2.1 Ilustração das etapas de redução e refino do processo siderúrgico. Fonte: Adaptado de MOREIRA, 2012.

As usinas siderúrgicas podem ser divididas em três grupos, de acordo com os processos que estas realizam, a saber:

- Usinas integradas: realizam as três etapas do processo siderúrgico;
- Usinas semi-integradas: realizam duas etapas do processo siderúrgico, em sua maioria realizam as etapas de refino e conformação mecânica;
- Usinas não-integradas: realizam apenas uma etapa do processo siderúrgico, em sua maioria a etapa de redução ou a de conformação.

O processo de aciaria elétrica para produção de aços especiais é dividido em cinco etapas de produção: pátio de sucatas, forno elétrico a arco (FEA), forno panela (FP), degaseificador a vácuo (VD) e lingotamento contínuo (LC).

#### Pátio de Sucatas

Os processos de produção que utilizam a eletricidade como principal fonte de energia para fundir e refinar o aço apresentam a vantagem de utilizar uma elevada quantidade de sucata como matéria-prima, contribuindo para a reciclagem destes materiais, reduzindo a exploração de recursos naturais e diminuindo o custo de produção.

No pátio de sucatas a sucata é classificada e processada (se necessário), e então é entregue nas baias da aciaria. De acordo com a origem da sucata ela pode ser classificada em sucata de retorno interno, obsolescência e industrial (CHEVRAND, 2007). Cada pátio de sucatas possui subclassificações que se adaptam às realidades locais de disponibilidade e qualidade de sucatas.

#### Forno elétrico a arco (FEA)

O forno elétrico a arco é a primeira etapa do refino. Seus principais objetivos são a fusão da carga, a descarburização e a desfosforação. A maior parte da energia para a fusão é transmitida através de um arco voltaico estabelecido entre a carga metálica e os eletrodos de grafita do forno, sendo o restante da energia proveniente das diversas reações químicas atuantes. Durante esta etapa ocorre a injeção de oxigênio para criar uma condição oxidante. O aço líquido é então vazado do forno para uma panela siderúrgica com revestimento refratário para dar seguimento ao processo (MOURÃO, 2007). O processo do FEA será detalhado no capítulo 2.2 deste trabalho.

#### Forno-Panela (FP)

No processo do FP, o aço sofre um refino que busca a desoxidação e a dessulfuração através de uma escória redutora. Sua composição química e a temperatura objetivada para solidificação são ajustadas. Também ocorre a correção da composição química da escória (RIZZO, 2005). Esta etapa é mais complexa na produção de aços especiais do que aços longos comuns devido à notável maior diversidade de composições químicas que a primeira produz.

#### Desgaseificador a vácuo (VD)

O processo VD é responsável pela desgaseificação, ou seja, gases que se dissolvem na forma monoatômica (principalmente hidrogênio e nitrogênio) no aço são retirados através da diminuição da pressão. Além disso, ocorre o tratamento das inclusões com CaSi e ajustes finos na composição química (RIZZO, 2005).

#### Lingotamento Contínuo (LC)

A máquina de lingotamento contínuo (LC) é responsável pela etapa de solidificação do aço na forma de produtos semi-acabados chamados de tarugos. A panela é posicionada acima do distribuidor que recebe o aço e o distribui nos moldes para ocorrer efetivamente a

solidificação. O distribuidor atua de forma intermediária com o objetivo de tornar o processo contínuo. O molde, que é feito de cobre e resfriado à água, extrai o calor pelos lados do tarugo, criando, inicialmente, uma casca fina, que passa para um resfriamento através da projeção de água na superfície, e então para o resfriamento de irradiação livre (MOURÃO, 2007) (RIZZO, 2005).

A Figura 2.2 exemplifica os equipamentos da aciaria considerada.

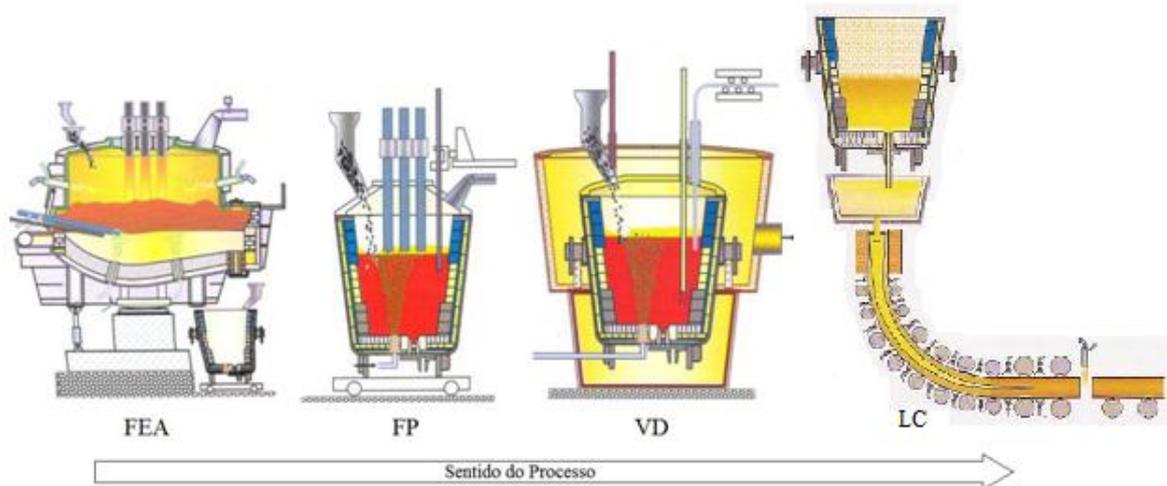


Figura 2.2 Diagrama esquemático do processo de produção de aços via aciaria elétrica. Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005.

## 2.2 Forno elétrico a arco

### 2.2.1 Estrutura e equipamentos

A Figura 2.3 ilustra os equipamentos e a estrutura de um FEA no estágio de banho plano. A estrutura do FEA consiste basicamente por uma carcaça metálica revestida por material refratário na metade inferior e por painéis refrigerados na metade superior. Esta carcaça é recoberta pela abóboda, através da qual descem os eletrodos de grafita, que são os condutores de eletricidade responsáveis pela formação do arco elétrico e pela transferência da energia elétrica para a sucata a fim de promover a sua fusão (ARAUJO, 2009).

Na parte inferior da carcaça é acoplado o sistema de basculamento, pelo qual é possível inclinar o FEA para auxiliar nas operações de retirada de escória e vazamento. Esta última operação é realizada através do canal refratário EBT (vazamento excêntrico pelo fundo, em inglês). Ainda na carcaça é possível que tenham-se *plugs* porosos, através

dos quais é injetado um gás inerte (tipicamente  $N_2$ ) com o objetivo de homogeneizar a temperatura e a composição química do banho (ARAUJO, 2009).

Para realizar o refino oxidante e auxiliar na fusão e derrubada da sucata, são fixadas, na parte superior da carcaça, injetoras de gases, tipicamente de  $O_2$  e GN, que variam a relação das vazões dos gases de acordo com a etapa do processo. A quantidade e posição das injetoras variam para cada instalação de FEA. A tecnologia empregada nessas injetoras é geralmente a CoJet, na qual o jato central principal supersônico de  $O_2$  é circundado por um jato de GN, o qual é novamente circundado por um jato de proteção de  $O_2$ . Esse design faz com que o jato permaneça concentrado por uma distância maior, aumentando a temperatura e o alcance do jato (MATHUR, 2001).

Juntamente às injetoras CoJet, podem ser colocadas injetoras de carbono na forma de carvão, grafita ou coque de petróleo, para promover a formação de escória espumante durante o refino e a redução dos óxidos da escória. A injeção de carbono será detalhada nos próximos capítulos.

A operação de retirada de escória é realizada através da porta de escória, do lado esquerdo da Figura 2.3. Antes da retirada da escória, a porta de escória é limpa através de injetoras de  $O_2$  ou  $N_2$ , que podem ser manuais ou automatizadas. Além disso, há equipamentos para a retirada de amostra, que, quando ativados, imergem no aço líquido e retiram amostra de aço e de escória (JOHN, 2009).

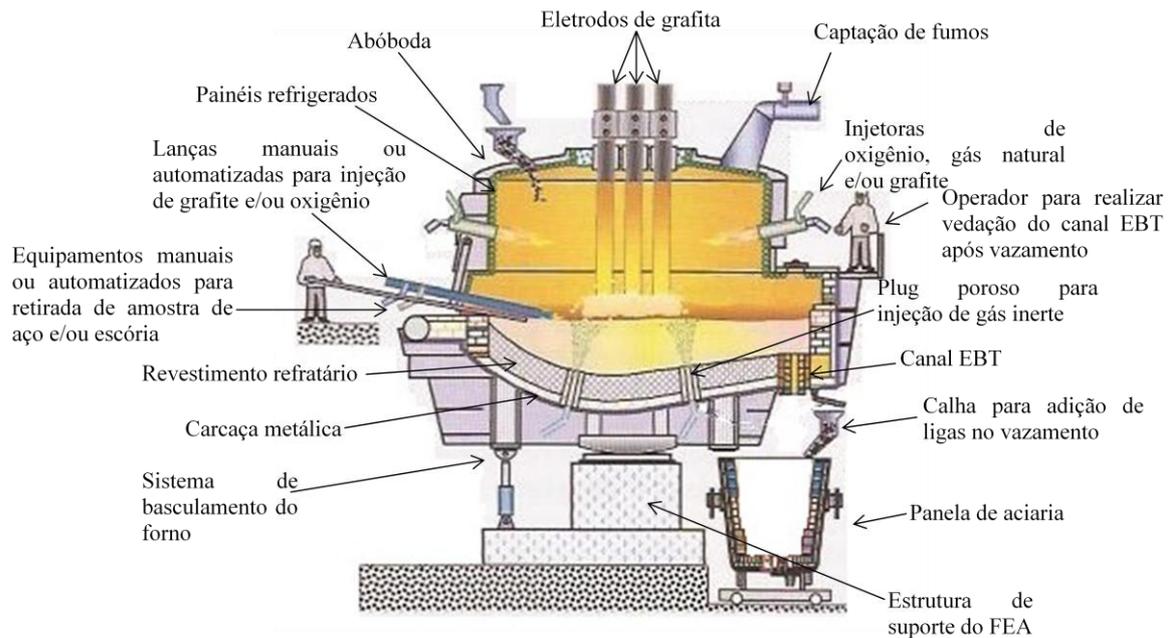


Figura 2.3 Ilustração dos equipamentos do FEA. Fonte: Adaptado de RIZZO, 2005.

O FEA recebe a carga metálica geralmente no estado sólido e entrega para a etapa seguinte respeitando determinadas características de qualidade, que são ajustadas durante o processo operacional.

### 2.2.2 Processo operacional

As etapas do processo do FEA, desde o recebimento da carga metálica até a entrega final do aço líquido podem ser divididas em:

- Carregamento
- Fusão
- Refino oxidante
- Retirada de escória
- Vazamento

O carregamento é realizado através da abertura da parte inferior do cestão sob o FEA com a abóboda aberta. O forno então recebe a sucata, fecha-se a abóboda e o processo de fusão pode ser iniciado.

Segundo Chevrand (2007), a sucata, dependendo de sua origem, apresenta densidade e formas diferentes. Esta densidade pode variar entre  $0,6t/m^3$  para as sucatas leves não industrializadas, até  $1,5 t/m^3$  para as sucatas mais pesadas e que, geralmente, passaram por algum processo para aumentar a densidade e a limpeza.

A densidade da sucata define basicamente a quantidade de carregamentos necessários no forno para uma corrida. Um carregamento adicional pode gerar o custo da perda de tempo, menor rendimento metálico (devido à oxidação), maior consumo de eletrodos e de energia elétrica. Sucatas de densidade entre  $0,8$  e  $1,0 t/m^3$  necessitam geralmente dois carregamentos segundo Brito (2008), citado em John (2009). Barker et al (1998) estimam que para cada carregamento,  $10-20 kWh/t$  adicional é gasto, e que, atualmente, as operações objetivam realizar de 2 a 3 carregamentos por corrida.

Assim que a abóboda é fechada, os eletrodos descem em direção à sucata e inicia-se o primeiro período de fusão, denominado perfuração. Na perfuração, a tensão (TAP) é reduzida para que não haja um superaquecimento nos painéis refrigerados, reduzindo assim o risco de vazamento de água no forno, como pode ser visto na Figura 2.4 (BARKER et al, 1998).

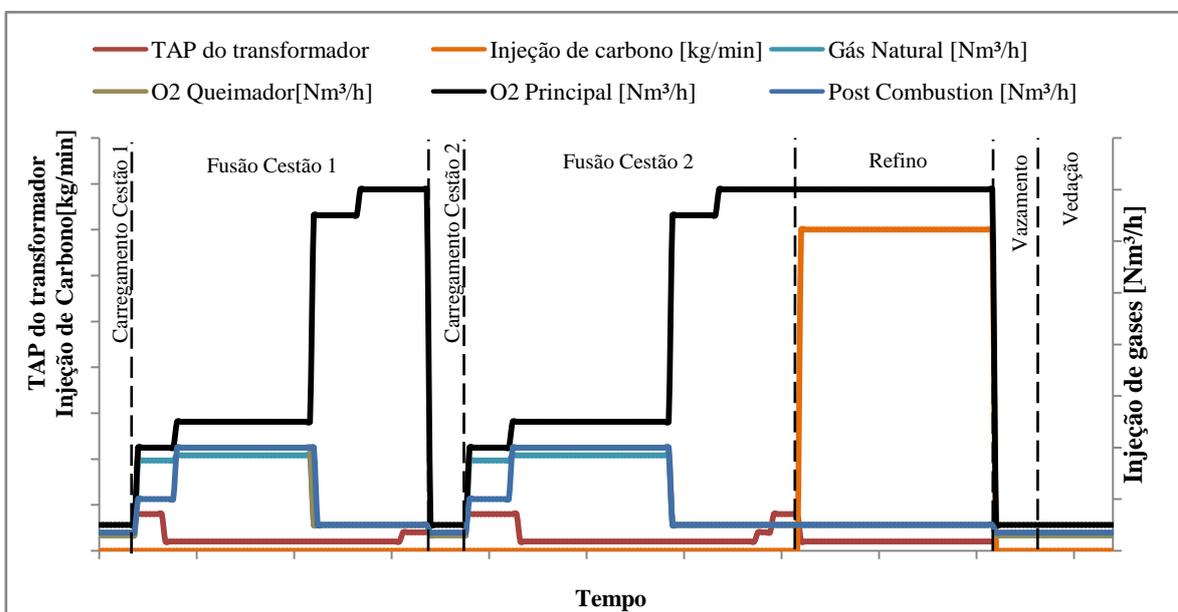
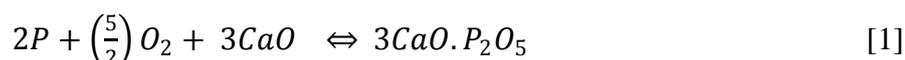


Figura 2.4 Exemplo de receita elétrica e química de um FEA produzindo uma corrida de dois cestões.

Logo após a perfuração, a potência máxima permitida pelos equipamentos do forno é aplicada, e o arco elétrico tende a se estabilizar conforme a poça de aço fundido aumenta.

A fusão segue até que quase toda a carga de sucata esteja fundida. A carga não é fundida por completo, ela é interrompida quando houver espaço suficiente para receber a carga do segundo cestão. Além disso, nos instantes finais de fusão, o arco fica desprotegido, diminuindo a eficiência energética do FEA. A eficiência energética do FEA é importante, pois o custo com energia elétrica representa a maior parcela do custo de operação do FEA (ARAÚJO, 2009).

Quando inicia a etapa do refino oxidante, a prática de escória espumante inicia simultaneamente. Nesta etapa o principal objetivo é promover a descarburização e a desfosforização através da oxidação. O produto da oxidação do carbono é o monóxido de carbono, que é eliminado do forno através do sistema de captação de pós. Porém o fósforo fica retido na escória, necessitando então da prática de remoção de escória do forno durante o refino, preferencialmente nos momentos iniciais do refino, pois a reação de desfosforização [1] é favorecida por baixas temperaturas (BARKER et al, 1998).



A composição química do aço e da escória são então verificadas através de análise *online* via espectrômetro. Assim que a temperatura objetivada no banho é alcançada, é realizada a operação de vazamento, na qual o aço do forno passa para a panela através de uma bica ou de um canal EBT. No momento do vazamento são adicionados ferroligas, desoxidantes e fluxantes. O ajuste fino de composição química e temperatura é executado no FP, como já citado no capítulo 2.1.1.

### 2.3 Energia no FEA

De acordo com Barker et al (1998), para fundir a sucata e alcançar a temperatura de vazamento é teoricamente necessário 350-370 kWh/t de energia. Porém, FEAs desempenham eficiências energéticas na faixa de 55-65%, resultando numa energia total 560-680 kWh/t, geralmente. Essa energia pode ser fornecida na forma de eletricidade, queimadores oxi-gás e reações químicas do banho. O uso das energias é fortemente dependente dos custos locais, porém, tipicamente, são distribuídas da seguinte forma: 60-65% por eletricidade, 5-10% por queimadores e 30-40% por reações. Entretanto, Memoli (2004) constatou que, no período de refino de um FEA, a energia química contribui com 26,45% da energia total e os 73,55% restantes foram provenientes da energia elétrica.

Em geral, procura-se utilizar as energias no momento em que as mesmas apresentam maior eficiência. Energia elétrica é mais eficiente quando se tem maior proporção de carga sólida. A energia química é mais eficiente quando se tem maior proporção de carga fundida.

### 2.3.1 Energia elétrica

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

Segundo Bowman (2009), os arcos dos eletrodos tendem a se repelir e criar regiões quentes e regiões frias dentro do FEA. A Figura 2.5 ilustra essas regiões. A repulsão dos arcos deve-se às forças eletromagnéticas provenientes da corrente dos outros dois arcos, da corrente dos eletrodos e da corrente passante pelo banho líquido.

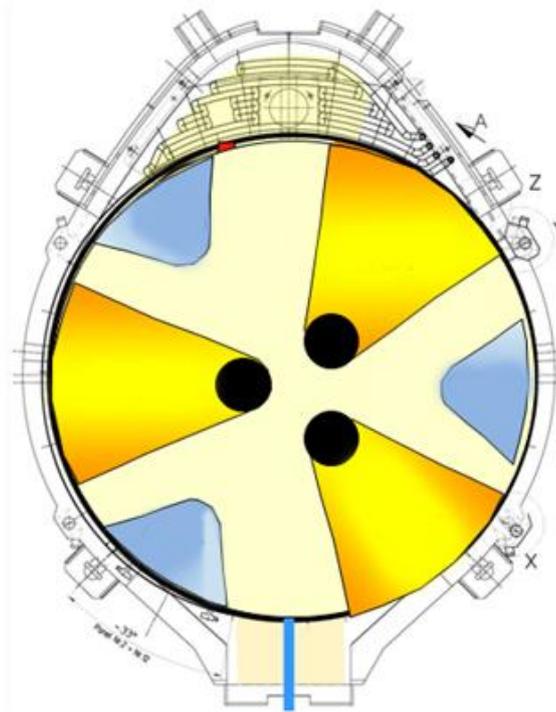


Figura 2.5 Vista superior de um FEA mostrando regiões preferenciais de dissipação de calor pelos eletrodos (regiões quentes, em amarelo) e não preferenciais (regiões frias, em azul) devido à repulsão dos arcos.

A potência que entra no sistema é definida como potência aparente, que por sua vez possui uma componente que não é utilizada devido a perdas no sistema elétrico e outra componente que é a potência efetivamente utilizada na fusão, definidas como potência reativa e potência ativa, respectivamente. A razão entre a potência ativa e potência aparente é definida como fator de potência, o qual está relacionado com a eficiência elétrica do sistema (RIZZO, 2005).

Um fator que aumenta a potência reativa é a distorção harmônica. Uma distorção de forma de onda é dita harmônica quando a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo de frequência fundamental, ou seja, seu espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental. A Figura 2.6 representa um sinal de corrente com interferência de harmônicas. No caso dos fornos elétricos, o arco elétrico é um grande gerador de distorções harmônicas devido à relação bastante não-linear entre tensão e corrente característica de determinados componentes da rede, como o transformador, cujo núcleo ferromagnético é sujeito à saturação (DECKMANN, 2010). Na Figura 2.6 está demonstrado um sinal de corrente ao qual está somado à frequência fundamental a terceira, quinta, sétima e nona harmônica.

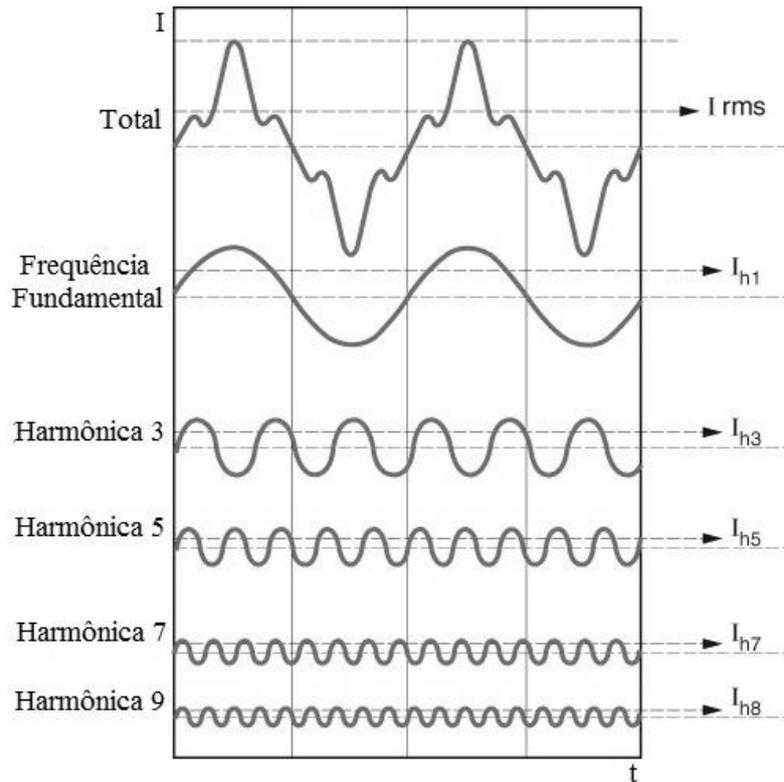


Figura 2.6 Exemplo de sinal contendo harmônicas e as frequências fundamentais. Fonte: Adaptado de SCHNEIDER ELECTRIC, 2014.

Segundo Schneider Electric (2014), o principal indicador para medir a qualidade de um sinal elétrico é a taxa de distorção harmônica global (THD), pois traduz através de uma só grandeza a deformação da onda em tensão ou corrente. A THD para tensão pode ser definida como (equação [2]):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1} \quad [2]$$

onde  $V_1$  é a tensão eficaz da fundamental e  $V_h$  é a tensão eficaz da ordem harmônica  $h$ . O somatório dos valores de  $V_h$  são limitados em 50 pois harmônicas acima da 50 podem ser desprezadas sem perdas significativas de resultado. Schneider Electric (2014) demonstra que quanto maior o valor de THD de um sinal, menor é o fator de potência desse sistema.

Grandhare (2007) analisou as variáveis elétricas do sistema de um FEA e observou que a THD do FEA é significativamente maior durante o início da fusão, quando o arco elétrico entra em contato com a sucata fria. Conforme a fusão progride e o banho fica plano, os valores de THD diminuem e ficam estáveis.

### 2.3.2 Energia química

A energia química segundo Fortes (2008) é assim chamada por ser o resultado de característica exotérmica de determinados elementos químicos, que submetidos à reação de oxidação durante o processo, promovem a elevação da temperatura da carga. Estes elementos são carregados com a carga metálica ou injetados individualmente na forma de finos ou gás. A injeção é realizada através de injetoras que estão detalhadas no capítulo 2.4 deste trabalho.

A energia química é então concentrada nos pontos frios demonstrados na Figura 2.5, tornando o FEA mais homogêneo em temperatura, como demonstrado na Figura 2.7. As chamas representam injetoras e a seta azul representa uma lança automatizada.

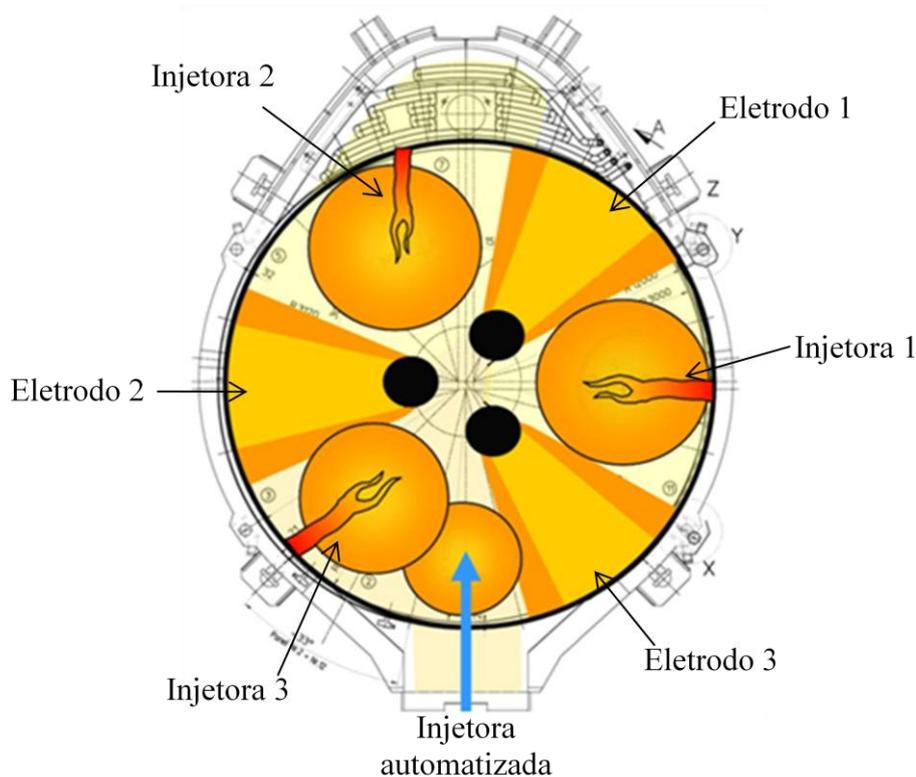


Figura 2.7 Vista superior de um FEA mostrando as regiões principais de aquecimento pelos eletrodos e pelas injetoras.

As vazões dos gases nas injetoras variam de acordo com a etapa do processo, como pode ser visto na Figura 2.4. No início, a sucata está fria e se uma alta vazão fosse imposta, o jato seria rebatido e poderia promover um furo de painel refrigerado. Portanto, na primeira metade da fusão, as injetoras atuam aquecendo a sucata com vazão de oxigênio limitada. A seguir, a vazão principal de oxigênio é aumentada, o gás gera um jato que atua

como uma chama de corte oxigênio, cortando a sucata para auxiliar na fusão, e ainda promove as reações de oxidação na poça líquida durante o refino.

Os principais elementos que geram reações exotérmicas são carbono, silício, ferro, manganês, cromo e alumínio. Em Barker (1998), o autor mostra a entalpia de reação de oxidação para cada elemento citado. Destaca-se o silício formando sílica com a maior capacidade de gerar calor e o carbono formando monóxido de carbono com a menor capacidade de gerar calor dentre os elementos citados. Na avaliação de um FEA por Memoli (2004), foi estabelecida a contribuição final de cada elemento para a energia química durante o refino de um FEA, que pode ser conferida na Figura 2.8. Verifica-se que o ferro é o responsável por mais da metade da energia, seguido por cromo, manganês, carbono, alumínio e silício.

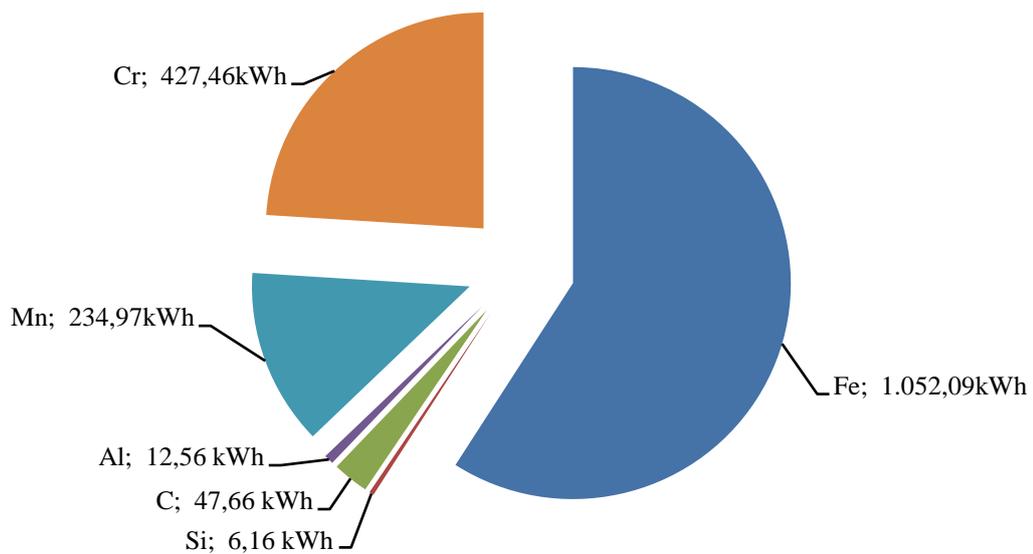


Figura 2.8 Contribuição de energia média total devido às reações de oxidação e redução durante o refino no processo Tenaris-Dalmine. Fonte: Adaptado de MEMOLI (2004).

Megahed et al (2010) demonstraram os benefícios energéticos de um sistema de injetoras com bom desempenho. Após modernização do sistema de injetoras, foi notado uma redução do consumo de energia elétrica em 64 kWh/t, redução no consumo de refratário em 48% e aumento na produtividade do forno em 30%.

Gaskell (1973) constatou que o processo de oxidação está diretamente relacionado à formação de escória. No início do processo a oxidação do ferro não é termodinamicamente favorecida, porém a grande massa deste elemento faz com que sua oxidação se inicie juntamente com a do silício, formando uma escória composta por FeO, SiO<sub>2</sub> e pelo CaO. A geração desta escória inicial é muito importante, pois proporciona um grande aumento na eficiência da transferência da energia radiante do arco para o banho de metal, além disso promove a solubilização da cal e proteção do banho metálico.

## 2.4 Espumação

Segundo Zhu (2011), a espumação da escória traz vários benefícios à operação do FEA: proteção dos refratários do FEA, diminuição das perdas de calor, diminuição do consumo de eletrodos, inibe o ruído durante o processo, entre outros.

A formação de escória espumante pode ser dividida em três etapas, como demonstrado na Figura 2.9. Na primeira etapa, o oxigênio é injetado no banho e reage com o carbono e o ferro, produzindo, inicialmente, bolhas de CO e FeO, respectivamente. Na segunda etapa é injetado o material carburante, o qual produz mais bolhas de CO e simultaneamente reduz o FeO da escória, aumentando o rendimento do FEA. Na terceira etapa o oxigênio injetado interage com a escória, enquanto se mantém a injeção simultânea de material carburante, possibilitando assim uma boa estabilidade da espumação.

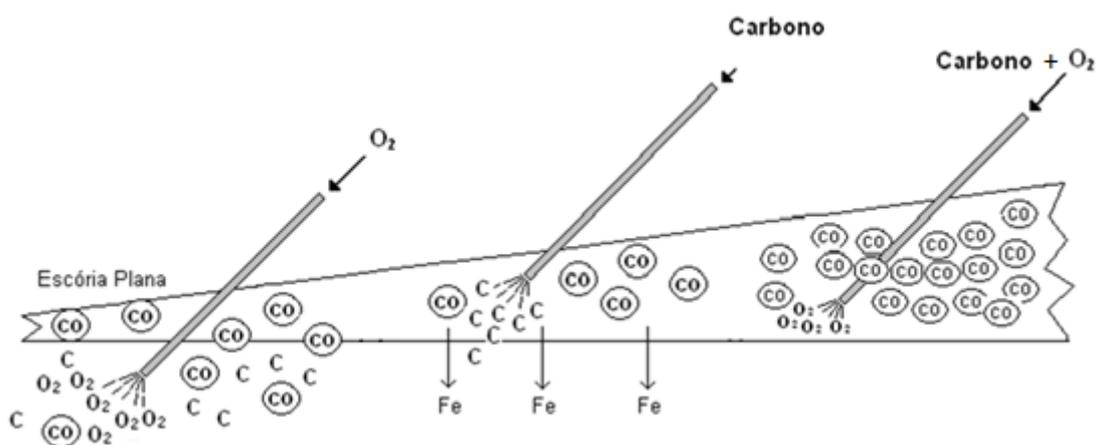


Figura 2.9 Esquema mostrando a formação de escória espumante. Fonte: RAHMAN, 2010.

O processo de espumação necessita a formação de bolhas de monóxido de carbono na interface metal-escória em uma escória adequada. Uma escória adequada, segundo

Pretorius (1998), é aquela que demonstra boas propriedades para espumação, ou seja, uma consistência (fluidez) que está entre o estado “cremoso” e “fofo”, saturada em CaO e MgO e com partículas de segunda fase presentes. As partículas de segunda fase atuam como locais para nucleação de bolhas, favorecendo a espumação.

O termo viscosidade efetiva foi definido para relacionar a quantidade de partículas de segunda fase com a escória e a viscosidade:

$$\eta_e = \eta(1 - 1,35\theta)^{-5/2} \quad [3]$$

onde  $\eta_e$  é a viscosidade efetiva da escória,  $\eta$  é a viscosidade da escória fundida e  $\theta$  é a fração de fases sólidas precipitadas.

Para avaliar quantitativamente a espumação, Ito (1989), citado em Pretorius (1998), definiu o parâmetro índice de espumação ( $\Sigma$ ), o qual depende da taxa de vazão de gás, altura da espumação e tempo de sustentação da espumação.

A Figura 2.10 relaciona o índice de espumação com a viscosidade efetiva da escória. Aumentando a viscosidade efetiva da escória, o tempo de residência das bolhas de gás na escória é prolongado, estendendo a estabilidade e, conseqüentemente, a vida da espumação. Entretanto, há uma quantidade máxima de partículas de segunda fase que beneficiam a estabilidade. Assim que este ponto é excedido, a viscosidade da escória torna-se excessiva e o índice de espumação decresce.

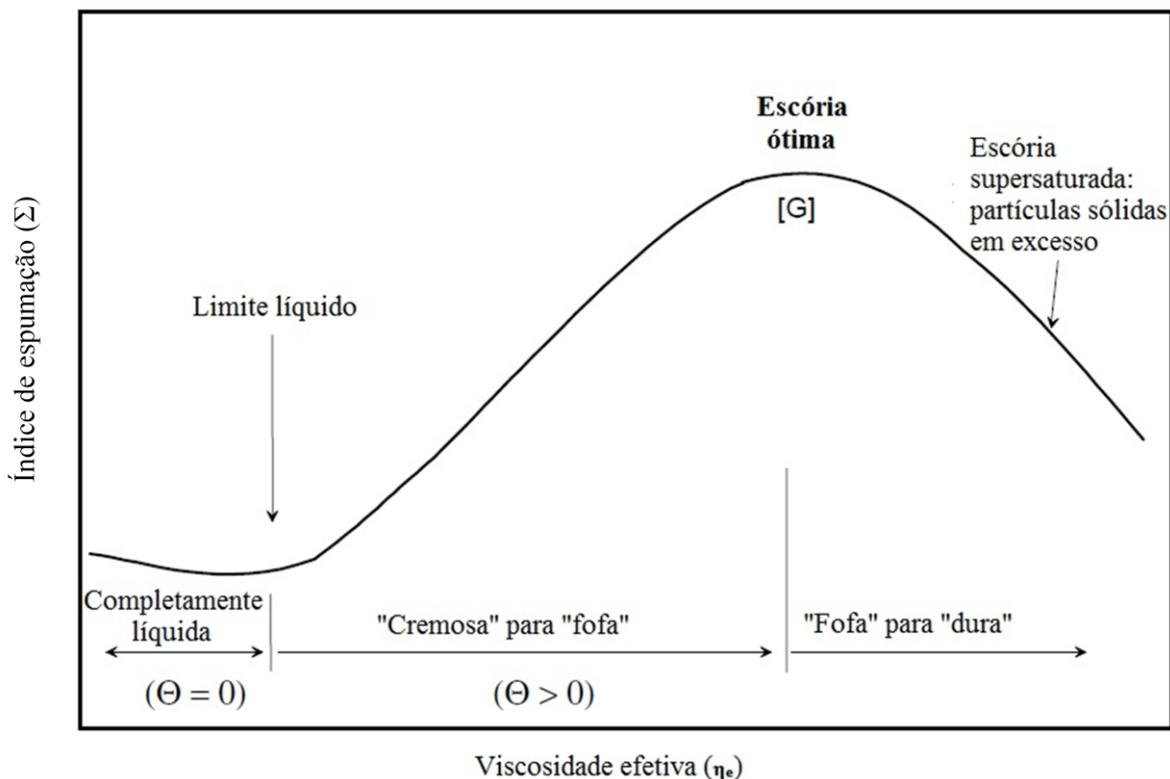


Figura 2.10 Relação entre o índice de espumação e a viscosidade efetiva. Fonte: Adaptado de PRETORIUS (1998).

Os óxidos predominantes nas escórias de FEAs são CaO, SiO<sub>2</sub>, FeO e MgO. O CaO e MgO são considerados óxidos refratários e são adicionados objetivando teores acima da composição liquidus, pois aumentam a viscosidade efetiva, enquanto que os outros óxidos são considerados óxidos fluxantes. Deseja-se saturação dos óxidos refratários, pois assim contribuem para a diminuição do desgaste dos refratários do FEA. Os óxidos fluxantes aumentam a fluidez da escória. Atingir o ponto ótimo de escória se torna complexo, pois apesar de se ter controle da quantidade de CaO e MgO adicionados no FEA, os outros óxidos são produtos das reações de oxidação, podendo variar seu teor conforme a qualidade da sucata utilizada.

A basicidade é um conceito importante que tenta definir um balanço entre os óxidos refratários e os óxidos fluxantes. A expressão mais utilizada para a basicidade, devido a sua simplicidade, é a basicidade binária:

$$B_2 = \frac{\%massa\ CaO}{\%massa\ SiO_2} \quad [4]$$

Além das propriedades físico-químicas da escória, para se obter uma boa escória espumante, deve-se promover a geração de bolhas de gases e a sustentação delas na escória. A espécie gasosa predominante é o CO, com pequenas quantidades de CO<sub>2</sub>.

O CO é geralmente produzido de acordo com duas reações químicas a seguir (BARKER et al, 1998):



O carbono presente nas reações tem duas origens: o carbono dissolvido no banho e, principalmente, o carbono do material carburante injetado durante o refino.

A reação [6] pode ser separada em quatro passos, conforme ilustrado na Figura 2.11(JI, 2004):

1. Transporte de cátions de ferro da escória líquida para a interface escória-gás;
2. CO reage com o oxigênio da escória formando CO<sub>2</sub> e ferro metálico;
3. Transporte de CO<sub>2</sub> da interface escória-gás para a interface carvão-gás;
4. CO<sub>2</sub> reage com C formando CO;

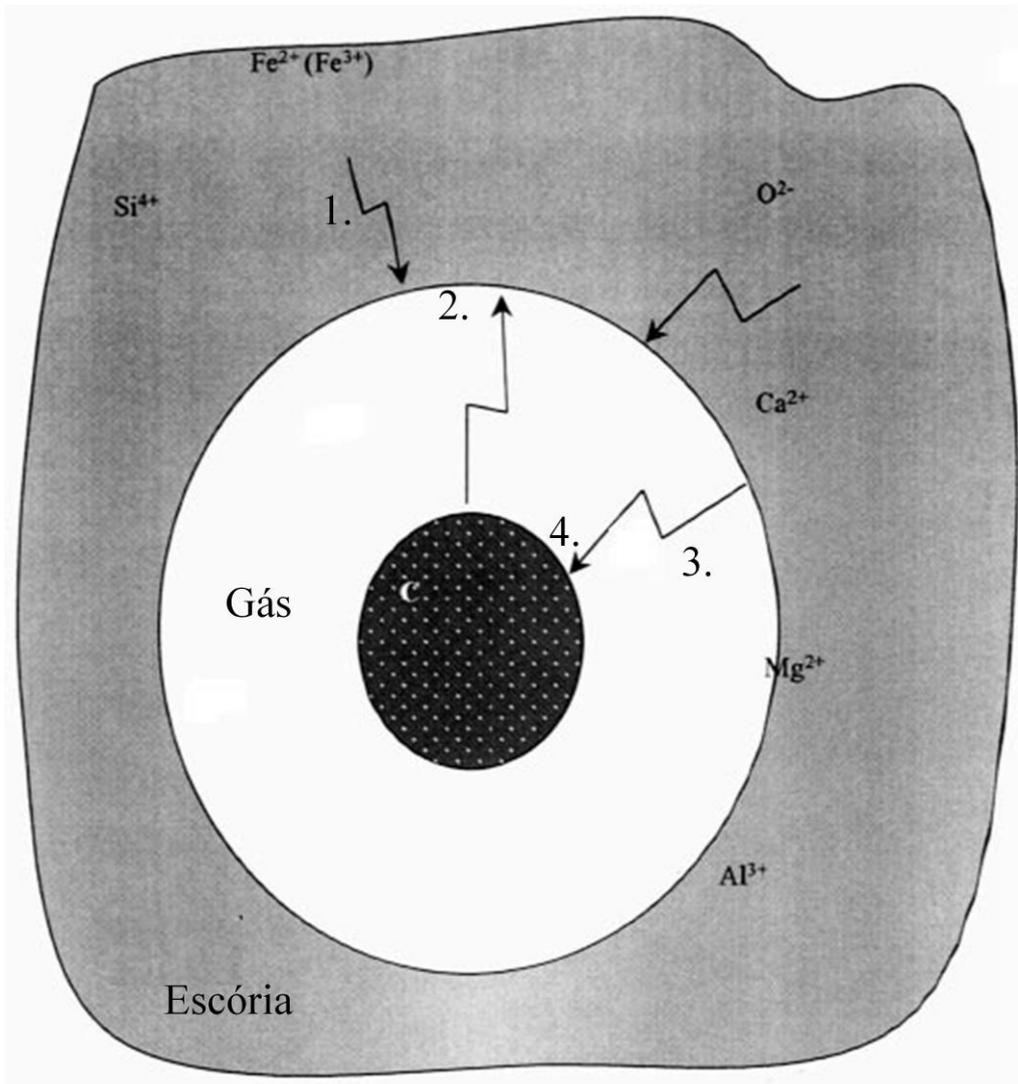


Figura 2.11 Esquema demonstrando os passos da reação entre o carvão e a escória.  
 Fonte: Adaptado de Ji (2004).

As reações dos passos 2. e 4. da Figura 2.11 são controladas pelas pressões de CO e CO<sub>2</sub>. A pressão parcial de CO<sub>2</sub> para a reação escória-gás é função da temperatura e atividade do ferro na escória, enquanto que na reação gás-carvão a pressão parcial de CO<sub>2</sub> é constante para uma dada temperatura e material carburante. Ji (2004) conduziu experimentos em escala laboratorial para estudar a cinética de espumação. Pode-se observar nos resultados da Figura 2.12 que 2 minutos depois de cessada a injeção de material carburante a gaseificação do carbono é completada. A taxa máxima de gaseificação de C na escória foi de 0,006-0,011 mol de C / s . kg de escória.

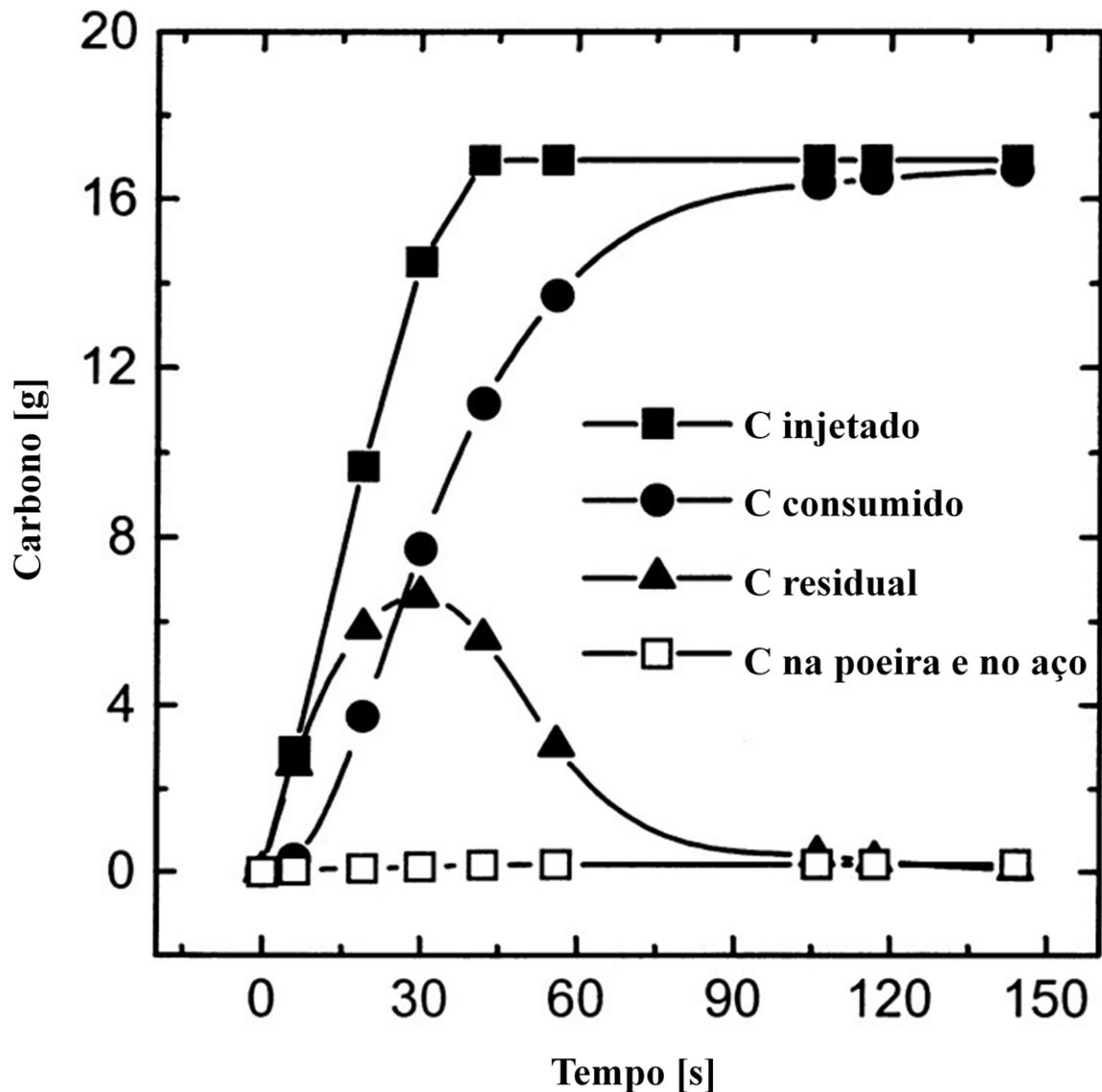


Figura 2.12 Balanço de carbono em experimento de injeção. Temperatura: 1691°C; Porcentagem em massa de FeO: 35,41wt%; Taxa de injeção de carvão: 0,0098 mol C / s . kg de escória. Fonte: Adaptado de JI (2004).

A geração de CO no nível do banho líquido geralmente conduz a uma melhor espumação do que o CO formado na própria escória, pois o CO vindo do banho líquido consiste de pequenas bolhas que são quase uniformemente distribuídas (PRETORIUS, 1998). Devido a isso, é importante que a injeção seja eficiente, fazendo com que o material carburante atravessasse a escória e atinja a interface entre a escória e o metal.

A injeção de oxigênio sozinha promove uma espumação de má qualidade, pois aumenta significativamente a temperatura da escória através das reações de oxidação, diminuindo, assim, sua viscosidade (PRETORIUS, 1998).

O FeO é o componente fluxante com maior teor na escória e que fortemente influencia a viscosidade efetiva, ou seja, as propriedades da escória. Portanto, controlar o seu teor é fundamental. O teor de FeO formado é uma competição entre a oxidação do ferro pela injeção de oxigênio e sua redução pela equação [6]. Nesse ponto, as receitas químicas de cada FEA atuam tentando balancear essas reações. Valores de FeO acima de 35% são considerados excessivos e resultam em baixo rendimento metálico (CONEJO, 1999).

## 2.5 Jato supersônico e injeção de material carburante

Atualmente, em fornos metalúrgicos, materiais particulados, como carvão pulverizado, são injetados no banho em velocidades subsônicas, através de uma injetora que consiste apenas de um cilindro vazado conectado ao fornecimento de material. Com tal injetora, uma grande parte do material particulado é sugada pelo despoeiramento e então perdido. Através da injeção do material por um jato supersônico têm-se maior eficiência de injeção do material e então uma redução de custo (STRELBISKY, 2010). A eficiência de injeção pode ser entendida como a razão entre a quantidade de material realmente utilizado para as reações no FEA sobre a quantidade de material total injetado.

Segundo Meidane (2004), em geral os bicos supersônicos consistem em uma entrada convergente, a qual conduz o gás para uma região de estrangulamento de menor área de seção transversal, seguido de uma seção divergente, como demonstrado na Figura 2.13. A velocidade do gás na garganta é igual à velocidade do som, por exemplo, de onde ele se expande para a região divergente acelerando para velocidades supersônicas. O modelo convergente/divergente é conhecido por “bico de Laval”, devido à primeira aplicação desse modelo por Laval (1889) em turbinas a vapor.

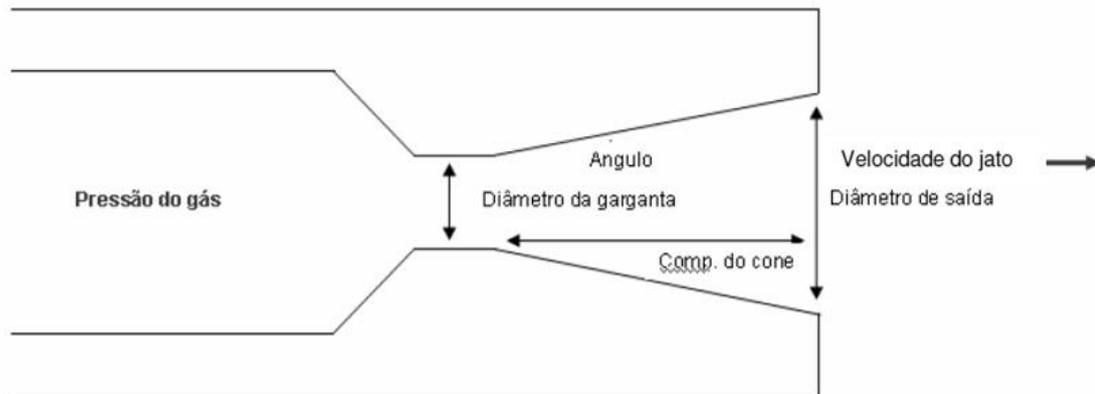


Figura 2.13 Modelo de boca supersônica convergente/divergente. Fonte: JOHN, 2009.

O jato de gás ao sair do bico se espalha como um jato submerso, resultado do arraste provocado no contato entre o jato e o gás do ambiente. No eixo central do jato, a velocidade supersônica persiste a uma distância que depende da velocidade de saída na região do bico. O arraste, provocado pelo contato entre o jato e o gás ambiente, resulta no aumento do tamanho do jato e a redução de sua velocidade à medida que este se afasta do bico. De maneira geral, o jato, no intervalo onde é percebido o núcleo supersônico, se espalha em um ângulo de  $12^\circ$ , e a partir deste ponto tende a aumentar para até  $18^\circ$  (MEIDANE, 2004).

Como as lanças geralmente são instaladas a uma distância de segurança do banho para evitar sua erosão mecânica e química, certa quantidade de gás da atmosfera do forno é arrastada pelo jato, reduzindo a sua concentração. Para minimizar este problema foi desenvolvido um sistema, demonstrado na Figura 2.14, que consiste em envelopar o jato principal com um jato protetivo de gás, trazendo os seguintes benefícios (MATHUR, 2001) (MEIDANE, 2004) (JOHN, 2009):

- O núcleo coerente do jato é mantido por maiores distâncias;
- O arraste do gás ambiente pelo jato supersônico é substancialmente menor;
- O espalhamento do jato é menor;
- A força do jato é maior, provocando maior pressão de impacto;



Figura 2.14 Jato supersônico protegido por um jato auxiliar. Fonte: JOHN, 2009.

Vários são os fatores que interferem na qualidade do jato. Em bicos onde a expansão é ideal, o atrito na camada limite não é significativo e não ocorre a formação de ondas de choque. Porém, quando o gás é sobre expandido, ondas de choque são criadas no sentido do fluxo do gás e o momento efetivo do jato é reduzido, como indica a Figura 2.15.

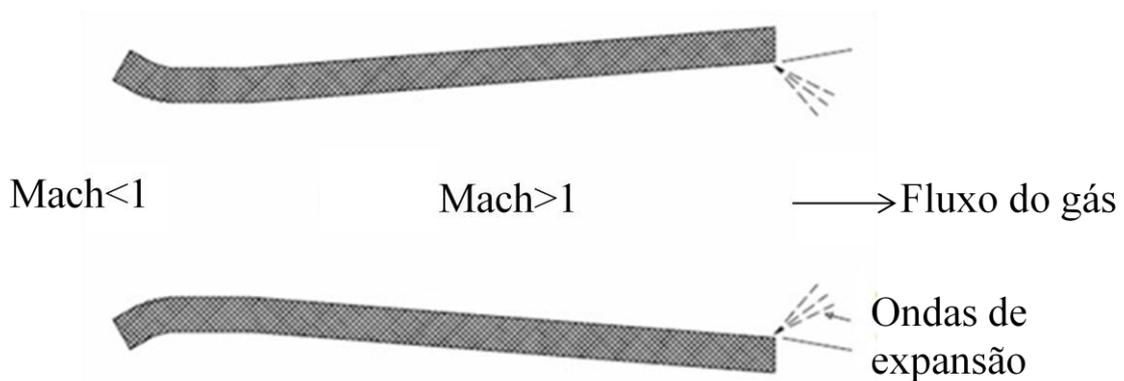


Figura 2.15 Modelo de jato sobre expandido na saída do bocal. Fonte: adaptado de MAIA (2007).

Maia (2007) cita que nos escoamentos compressíveis subsônicos ( $Mach < 1$ ) o escoamento é “avisado” do obstáculo à frente e as linhas de corrente se ajustam para que o escoamento contorne o obstáculo de forma suave. No caso supersônico ( $Mach > 1$ ) as ondas sônicas não conseguem “avisar” o escoamento supersônico da presença de um

obstáculo. Assim, a natureza cria uma onda de descontinuidade, denominada ondas de expansão.

Glass e Smith (1976), citado em Maia (2007), definem ondas de expansão como superfícies de descontinuidade nas propriedades do fluxo. A pressão, temperatura e densidade aumentam quando o fluxo passa através da onda de choque, enquanto a velocidade do gás diminui.

Atualmente, no mercado existem vários fabricantes de lanças supersônicas para FEAs, tanto de oxigênio, como de carvão. A Air Products (2014) mostra um exemplo no qual após a instalação da tecnologia JetBOx™ em um FEA, os seguintes resultados foram obtidos: possibilidade de redução de corrente elétrica devido à melhor espumação; diminuição do custo com energia elétrica em 6%; diminuição do consumo de oxigênio em 25,7%; diminuição do carbono injetado em 33%; aumento de rendimento do FEA em 1,6%.

O fabricante More (2014) oferece o M-ONE, injetora multi-propósito pela lateral do FEA. Este sistema promete, além de benefícios no consumo de energia elétrica, consumo de carbono injetado e aumento de rendimento, diminuição no *tap to tap* e no *power on* em 10%. Campolo et al (2007) combinaram um modelo fluidodinâmico com um complexo modelo químico de partículas de carvão para avaliar a eficiência de injeção de material carburante em um FEA, aplicando-o no sistema *Hi-Jet Power Injector* da fabricante More s.r.l.. Foi constatado que devido à redução da dispersão radial das partículas de carvão, a volatilização e oxidação das partículas de carvão começam apenas no último milissegundo do trajeto, resultando em um tempo muito curto para produzir significativa queima de carvão. Assim, a queima do carvão antes do contato com a escória foi estimada em 0,02% a 0,10% da massa total. Ainda é constatada uma dependência da distribuição granulométrica com a dispersão radial. Quanto maior a granulometria média, menor a dispersão radial.

Memoli (2005) realizou um estudo de *benchmarking* nas empresas que instalaram o sistema KT Injection System da empresa Techint Technologies. O estudo compreendeu 66 FEAs em todo o mundo. O valor médio de consumo de carbono injetado foi de 13kg/t, com valor mínimo em 4kg/t e máximo em 31kg/t. O consumo de energia elétrica médio foi de 433kWh/t, com valor mínimo de 318kWh/t e máximo de 525kWh/t. Em outro trabalho sobre o mesmo sistema, Memoli (2004) constatou uma melhor estabilização da escória

espumante devido à maior homogeneidade da oxidação da escória espumante, ou seja, a concentração mais uniforme dos óxidos de ferro. A concentração mais uniforme inibe a formação de regiões com alta concentração de óxidos, que podem colapsar a coluna de espuma de escória. Na prática, o sistema promoveu uma redução de 2,6% no consumo de energia elétrica em relação às injetoras supersônicas convencionais. Guan (2007), usando o mesmo sistema obteve ainda um aumento no rendimento metálico de 2%.

Memoli (2004) também afirma que o ângulo de injeção é muito importante. Se muito vertical, o jato causa um excessivo consumo de refratários, enquanto que um jato muito horizontal resulta em excessiva projeção de aço e escória nas paredes opostas do FEA. Um bom ângulo está entre 41° a 44° graus em relação à vertical para as injetoras de oxigênio. Porém, Megahed (2010) atesta que obteve os melhores resultados de eficiência para injetoras de oxigênio entre 45° a 49° graus em relação à vertical. Para a injetora de material carburante Megahed (2010) obteve os melhores resultados entre 55° e 59° graus em relação à vertical.

A empresa Tallman Bronze Company também possui um modelo de injetora à venda para injeção de carbono no FEA, a Tallman Supersonic Carbon Injector (STRELBISKY, 2010).

Nos quatro modelos de lanças citados, o princípio fundamental é o mesmo: o uso do bocal de Laval para aumentar a velocidade do jato. Porém, os modelos se diferenciam pelos designs finais das lanças e também pelo *layout* de injetoras aplicado nos FEAs.

Diversos estudos buscam simular e modelar as injetoras de oxigênio e material carburante com o objetivo de otimizar as receitas elétricas e químicas de cada FEA, buscando redução de custos e aumento de produtividade. Na prática, os modelos quando calibrados podem estimar os efeitos de qualquer mudança nos parâmetros operacionais: o posicionamento das injetoras no FEA; a pressão e a temperatura do jato de oxigênio; um bocal com design diferente (MEMOLI 2004 (b)).

A vazão e a composição química do material carburante a ser injetado normalmente não são divulgadas nos trabalhos. Conejo (1999) utilizou vazão na ordem de 60-150 kg/min e ainda constatou que abaixo destes valores ocorreu o entupimento das lanças, enquanto acima destes valores ocorreu o aparecimento de chamas intensas que desgastaram excessivamente as lanças.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os testes foram realizados substituindo-se uma das duas injetoras convencionais de carbono presentes no FEA pela injetora TSCi. A alteração se deu na posição da injetora 1 da Figura 2.7. Não foi feito um estudo técnico para avaliar uma melhor posição para a troca da injetora. Ela se deu nesta posição devido à maior viabilidade operacional. Os outros parâmetros do forno foram mantidos inalterados. Os parâmetros analisados estão descritos a seguir.

#### 3.1 Características do FEA, padrões de carga fria utilizados e descrição das injetoras de carbono

O *layout* do FEA que os experimentos foram desenvolvidos é idêntico ao da Figura 2.7, ou seja, bica excêntrica de vazamento (EBT), três injetoras Co-Jet e uma injetora de oxigênio automatizada pela porta. Além destes equipamentos, o FEA ainda é equipado com três injetoras de oxigênio do tipo *Post-Combustion*, duas injetoras de carbono e três plugs porosos de injeção de gás inerte. As injetoras de carbono estão posicionadas nos pontos 1 e 3 da Figura 2.7, no mesmo bloco refrigerado das injetoras Co-Jet. A Figura 3.1 mostra um bloco refrigerado no qual as injetoras são posicionadas. A vista da Figura 3.1 é do lado interno no forno. A injetora de carbono é posicionada no furo da esquerda, enquanto que a injetora Co-Jet é posicionada no furo da direita.



Figura 3.1 Bloco refrigerado que suporta as injetoras Co-Jet e de carbono.

O FEA tem capacidade máxima de 72t e opera com lastro de 10t. Em cada corrida é vazado 62t de aço, em média. O material refratário utilizado no forno é do tipo MgO-C. A produção da aciaria consiste desde aços ao carbono e baixa liga, até aços alta liga, aços ferramenta e aços inox. Para cada grupo de composições químicas de aços, é usado um padrão de carga fria diferente. Neste trabalho serão estudados dois padrões de carga, doravante chamados de padrão de carga A e padrão de carga B. Os padrões de carga A e B foram escolhidos, pois são os padrões de carga que menos sofreram alterações durante o período dos testes. Além disso, o padrão de carga A é produzido em dois cestões, enquanto que o padrão de carga B é produzido em três cestões.

O padrão de carga A é utilizado na produção de aços ao carbono e aços baixa liga (Mn e Cr principalmente) em geral, enquanto que o padrão de carga B é utilizado na produção de aços com teores máximos de elementos residuais mais restritos, como o teor de S, Cu, Ni, Cr, Mo e W. Para obter um menor teor de residuais, o padrão de carga B emprega sucatas de maior limpeza. Atrelado à maior limpeza está uma menor densidade e um maior preço da sucata, justificando a utilização dos três cestões somente quando realmente necessário. A quantidade de ferro-gusa e de sucata, classificada de acordo com

sua origem, para cada carga fria, pode ser visto na Tabela 3.1. Pode-se observar uma maior utilização de sucata industrial no padrão de carga B, conferindo-lhe a maior limpeza citada.

Tabela 3.1 Porcentagem em massa de Ferro-gusa e de sucata empregados em cada padrão de carga.

<b>Origem da sucata</b>	<b>Padrão de carga</b>	
	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>Obsolescência</b>	32%	30%
<b>Industrial</b>	40%	54%
<b>Retorno interno</b>	10%	0%
<b>Ferro-gusa</b>	18%	16%

A composição química média do aço e da escória, do período anterior ao início dos testes, para cada padrão de carga, pode ser conferida na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Composição química média das provas de aço e de escória dos padrões de carga estudados. Os valores estão em porcentagem em massa.

Elemento	Padrão de carga		Componente	Padrão de carga	
	A	B		A	B
<b>Al</b>	0,309	0,306	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,931	6,588
<b>As</b>	0,004	0,004	<b>CaF<sub>2</sub></b>	0,352	0,237
<b>Bi</b>	0,001	0,001	<b>CaO</b>	32,41	31,452
<b>C</b>	0,067	0,070	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,684	1,084
<b>Ca</b>	0,001	0,001	<b>FeO</b>	29,23	28,799
<b>Co</b>	0,008	0,008	<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,024	0,024
<b>Cr</b>	0,090	0,063	<b>MgO</b>	6,028	6,439
<b>Cu</b>	0,184	0,169	<b>MnO</b>	6,181	6,077
<b>Mn</b>	0,054	0,053	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,154	0,155
<b>Mo</b>	0,028	0,015	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,630	0,575
<b>Nb</b>	0,002	0,002	<b>S</b>	0,077	0,064
<b>Ni</b>	0,097	0,066	<b>SiO<sub>2</sub></b>	16,583	15,554
<b>P</b>	0,014	0,013	<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,712	0,951
<b>S</b>	0,033	0,029	<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,217	0,180
<b>Sb</b>	0,003	0,002	<b>B<sub>2</sub></b>	1,954	2,022
<b>Se</b>	0,001	0,001			
<b>Si</b>	0,005	0,005			
<b>Sn</b>	0,012	0,011			
<b>Te</b>	0,002	0,002			
<b>Ti</b>	0,001	0,001			
<b>V</b>	0,001	0,001			
<b>W</b>	0,006	0,006			
<b>Zn</b>	0,017	0,017			

Pode-se observar que o padrão de carga B efetivamente possui teor de elementos residuais como Cr, Cu, Mo, Ni, S, Sb e Sn menores do que o padrão de carga A, em média. O padrão de carga B ainda apresenta maior basicidade binária e menor teor de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

concordando com o menor teor de Cr no aço. Os equipamentos e procedimentos de retirada de prova de escória e aço serão detalhados no capítulo 3.2.

Exemplos de aços produzidos com o padrão de carga A são: DIN 41Cr4, DIN 16MnCr5 H e DIN 20MnCrS5. Os aços produzidos pelo padrão de carga B não possuem norma internacional específica, porque possuem teor de elementos residuais especificados conforme grupo de clientes.

Uma ilustração da injetora de carbono convencional utilizada no FEA pode ser conferida na Figura 3.2.



Figura 3.2 Injetora de carbono convencional utilizada no FEA.

A injetora de carbono convencional é composta basicamente por um tubo, com um flange para conexão ao sistema de alimentação de material carburante em uma das extremidades. Ela possui também uma haste para a fixação da injetora no bloco refrigerado.

A injetora de carbono utilizada nos testes é patente da empresa Tallman Bronze Company, com sede no Canadá, modelo Tallman Supersonic Carbon Injector (TSCi) (STRELBISKY, 2010). Uma imagem da injetora nova pode ser conferida na Figura 3.3.

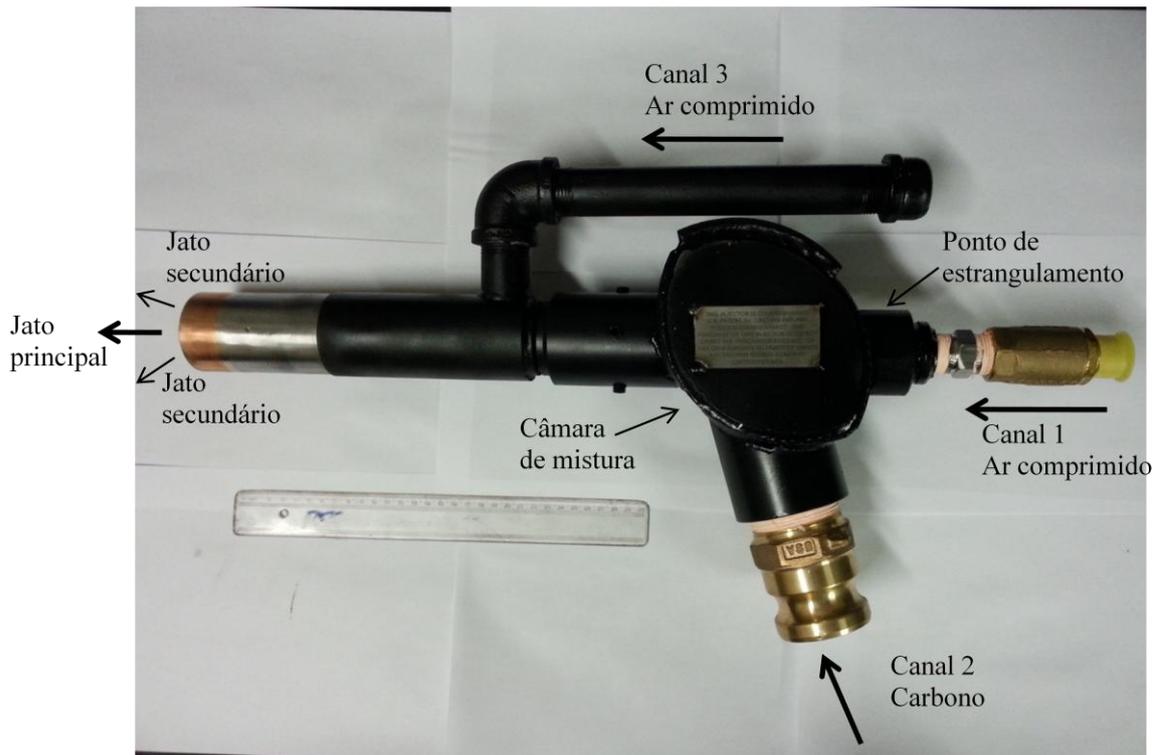


Figura 3.3 Injetora de carbono modelo Tallman Supersonic Carbon Injector (TSCi)

Como se pode observar na Figura 3.3, a injetora TSCi possui três canais de entrada e um de saída. O canal (1) é alimentado com ar comprimido a 4,5 bar de pressão, o qual passa por um estrangulador do tipo convergente/divergente de Laval e atinge velocidades supersônicas, em detalhe na Figura 3.4-(b). O canal (2) possui diâmetro maior que o (1) e é responsável pela alimentação do carbono. Os dois canais se misturam na câmara de mistura. O carbono é arrastado pelo jato do canal (1) e expelido na extremidade oposta da injetora, por dentro do tubo interno, formando o jato principal. O canal (3) também é alimentado com ar comprimido e é responsável pelo envelopamento do jato principal e pelo resfriamento da ponta da injetora, caracterizando um jato secundário. O jato secundário não entra em contato com o jato principal dentro da injetora, ele é expelido pela ponta da injetora de forma radial, através de um espaçamento entre o tubo interno e externo, em detalhe na Figura 3.4-(a). A taxa de carbono instantânea injetada no banho é controlada através da alimentação no canal (2) por meio do sistema de alimentação de material.

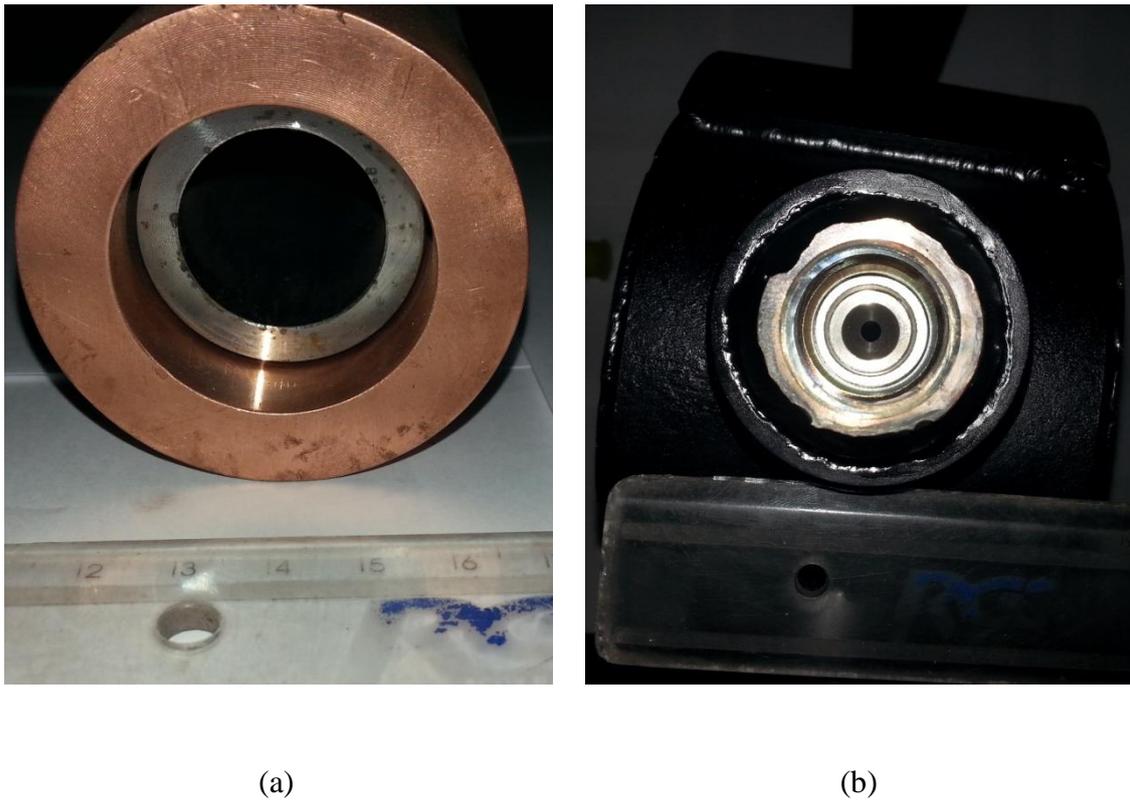


Figura 3.4 (a) Vista da ponta da injetora de carbono TSCi em detalhe. O jato principal é expelido por dentro do tubo interno, enquanto que o jato secundário é expelido pelo espaçamento entre o tubo interno e o tubo externo. (b) Estrangulamento do canal (1) em detalhe.

O principal objetivo da instalação da injetora TSCi é o aumento da eficiência de injeção de carbono. A eficiência de injeção de carbono pode ser entendida como a razão entre a quantidade de carbono que efetivamente reagiu na interface metal/escória através das reações [5] e [6] para gerar escória espumante sobre a quantidade total de carbono que foi injetado. Alguns dos fatores para a diminuição da eficiência de injeção são: sucção do material particulado pelo sistema de despoeiramento; escória atua como barreira física para a penetração do material; queima do carbono antes do contato com o banho líquido; alto teor de cinzas, matéria volátil e umidade no material carburante (JI, 2004). A injetora TSCi atua sobre os três primeiros fatores através do aumento da velocidade de projeção do material até velocidades supersônicas (STRELBISKY, 2010).

O consumo de material carburante é o principal indicador da eficiência de injeção. O consumo é medido através do monitoramento do peso do silo que alimenta as injetoras. Ao final de cada corrida, a massa consumida migra para o banco de dados da aciaria e fica

registrada. A Figura 3.5 demonstra um dos dois silos que armazenam o material carburante.

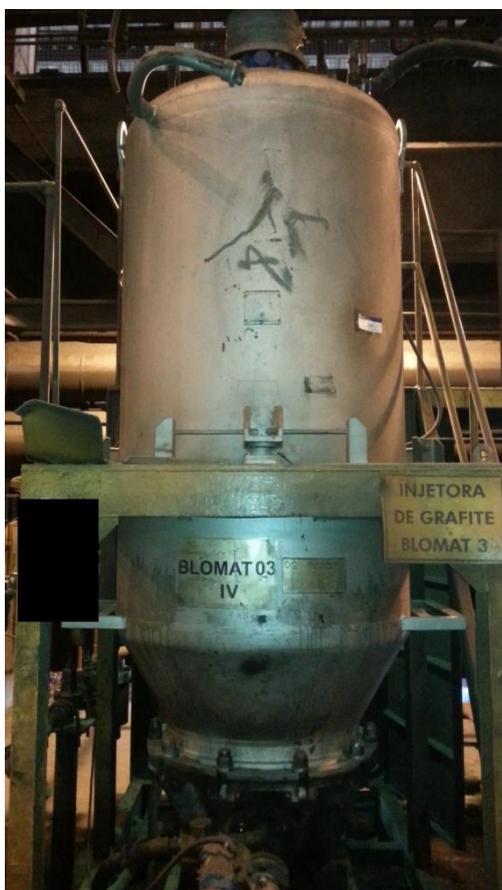


Figura 3.5 Silo que armazena o material carburante e alimenta as injetoras.

Para a caracterização do material carburante foi realizada uma análise química imediata do teor de S, cinzas, matéria volátil e umidade. O teor de S foi obtido através do analisador de C e S da marca LECO modelo LS-444CS. O teor de cinzas e de matéria volátil foram obtidos através de recozimento a 800°C durante 3 horas e 950°C durante 7 minutos, respectivamente, em forno Sanchis modelo 12x15x20. A umidade foi determinada através de recozimento a 105°C durante 3 horas em Estufa de Recozimento Heraeus modelo D198. Todos os equipamentos se encontram no laboratório químico da empresa siderúrgica.

Segundo o fornecedor, o material carburante é produzido a partir do coque verde de petróleo e passa por um processo de secagem para diminuição da umidade abaixo de 1%, sem alterar o restante da composição química. As especificações de composição química e

de granulometria garantidas pelo fornecedor estão na Tabela 3.3 e Tabela 3.4, respectivamente.

Tabela 3.3 Faixa de composição química do material carburante segundo o fornecedor. Os valores estão em porcentagem em massa

<b>Análise Química</b>	
<b>Descrição</b>	<b>Faixa</b>
<b>Umidade total</b>	Máx 1,00%
<b>Cinza</b>	Máx 1,00%
<b>Matéria volátil</b>	Máx 11,00%
<b>Enxofre</b>	Máx 0,80%
<b>Carbono fixo</b>	Mín 88,00%

Tabela 3.4 Faixas de granulometria do material carburante segundo o fornecedor. Os valores estão em porcentagem em massa.

<b>Análise Granulométrica</b>	
<b>Descrição</b>	<b>Faixa</b>
<b>Maior que 4 mm</b>	Máx 5,00%
<b>Maior que 3 mm</b>	Máx 10,00%
<b>Maior que 1 mm</b>	Mín 25,00%
<b>Menor que 1 mm</b>	Máx 60,00%

### 3.2 Variáveis do FEA analisadas

Algumas variáveis do FEA foram escolhidas para monitorar se a troca da injetora impacta de alguma forma no processo do FEA, além do consumo de carburante. As variáveis do FEA que foram analisadas são: consumo de energia elétrica; oxidação do banho através do oxigênio ativo, do teor de FeO na escória e teor de C no aço; teor de P no aço; rendimento das corridas; tempos de *Power on* e *Power off* e a THD do sistema elétrico.

O consumo de energia elétrica, a THD do sistema elétrico, o teor de P no aço e o rendimento das corridas foram analisados porque são indicadores importantes do FEA e são influenciados pela qualidade da espumação da escória. A oxidação do banho foi analisada, pois está intimamente relacionada com a injeção de material carburante através das equações [5] e [6]. Os tempos de *Power on* e *Power off* são indicadores importantes relacionados com a produtividade do FEA.

O consumo de energia elétrica é medido através do sistema elétrico do FEA e, após cada corrida, o consumo é salvo no banco de dados da aciaria.

A oxidação do banho foi medida através do teor de FeO presente na escória, do oxigênio ativo no banho e do teor de carbono no banho.

O teor de FeO foi analisado através de amostragem de escória realizada durante a etapa de remoção de escória no refino do FEA. As amostras foram retiradas no meio do período de refino através de amostrador automatizado pela porta do FEA, e foram analisadas em um espectrômetro de raios-x da marca Philips modelo PW 2600.

O teor de carbono no aço foi analisado através de amostragem automatizada de aço realizada simultaneamente à amostragem de escória. As amostras de aço foram analisadas por espectrômetro de emissão ótica da marca Thermo Scientific modelo ARL-4460. O amostrador automatizado é do tipo Samp-O-Line BSEB do fabricante Hereaus Electro-Nite. Mais informações sobre o amostrador podem ser conferidas em Bielefeldt (2005).

O oxigênio ativo no aço foi medido através de medidor automatizado marca Hereaus Electro-Nite modelo CELOX, em até dois minutos antes de vaziar a corrida.

O teor de fósforo no aço foi medido através da mesma amostra e mesmo equipamento no qual o teor de carbono foi analisado.

O rendimento das corridas foi calculado através da equação:

$$Rendimento = 100 * \frac{Massa\ de\ aço\ vazado\ (t)}{Massa\ da\ carga\ fria\ (t)} \quad [7]$$

A massa de aço vazada é obtida através de uma balança acoplada ao carro de vazamento que sustenta a panela no momento do vazamento. A massa da carga fria é obtida através de uma balança acoplada ao carro que movimenta o cestão que carrega o

forno. Na massa da carga fria são descontadas as quantidades de cal calcítica, cal dolomítica e carburante que são adicionadas ao cestão.

Os tempos de *Power on* e *Power off* são, respectivamente, o tempo de arco ligado e o tempo de arco desligado durante uma corrida. Eles são obtidos através de contador presente no sistema do FEA.

A distorção harmônica total foi obtida através do sistema que controla as posições dos eletrodos para otimização do arco, ou seja, obtenção de alta taxa de transferência de calor para a carga metálica com baixo consumo de eletrodos. O sistema é da marca Siemens VAI FUCHS modelo Arc Control Optimization System (ArCOS). O sistema ArCOS recebe informações de corrente e tensão a partir de bobinas Rugowski e do transformador de potencial do FEA que atuam como medidores de grandezas físicas (corrente e tensão). A amostragem do sistema é cada 10ms e é realizada uma média a cada 100 medições através da equação [2], resultando em um dado por segundo.

A quantidade de corridas analisadas pode ser conferida na Tabela 3.5. O período de obtenção dos dados durou 30 dias, sendo que a injetora TSCi foi instalada no décimo quinto dia. O período de testes não foi estendido para diminuir variações normais do processo de aciaria, como a qualidade da sucata, qualidade do material carburante, qualidade da cal calcítica e dolomítica, qualidade do refratário do FEA, entre outros.

Tabela 3.5 Quantidade de corridas analisadas em cada padrão de carga.

	<b>Padrão de carga fria</b>	<b>THD</b>	<b>Demais variáveis</b>	
<b>Injetora convencional</b>	<b>A</b>	20	24	↑ 15 dias
	<b>B</b>	20	38	
<b>Injetora TSCi</b>	<b>A</b>	20	24	↓ 15 dias
	<b>B</b>	20	38	

### 3.3 Análise da variância dos resultados (ANOVA)

Os resultados obtidos foram submetidos ao método de análise de variância – ANOVA, o qual consiste em um modelo estatístico onde a variância amostral é particionada em diversos componentes, devido a diferentes fatores (variáveis), que nas aplicações estão associadas a um processo. Através desta partição, a ANOVA estuda a

influência destes fatores na característica de interesse. Este é um método amplamente difundido e atualmente aplicado em áreas diversas. Em virtude da farta literatura disposta para o tratamento do tema, e dos muitos softwares comerciais utilizados para a aplicação deste método, neste trabalho não serão abordadas ou deduzidas as equações descritivas do modelo estatístico. Guimarães (2007) apresenta de forma muito clara os conceitos e a aplicação da ANOVA. Neste trabalho apenas será abordado o conceito de significância estatística para maior compreensão dos resultados obtidos.

A significância estatística de um resultado é uma medida estimada do seu grau de veracidade, no sentido de que este traduza com fidelidade os efeitos impostos sobre uma população, sempre no sentido de exprimir a “representatividade” do mesmo. De forma técnica, o valor do nível-p representa um índice decrescente da confiabilidade de um resultado. Quanto mais alto o nível-p, menos se pode acreditar que a relação observada entre as variáveis na amostra é um indicador confiável da relação entre as respectivas variáveis na população. Especificamente, o nível-p representa a probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido, isto é, como “representativo da população”. Por exemplo, um nível-p de 0,05 indica que há 5% de probabilidade de que a relação entre as variáveis encontrada na amostra seja “obra do acaso”. Em outras palavras, assumindo que não haja relação entre aquelas variáveis na população e que o experimento de interesse seja repetido várias vezes, se pode esperar que, em aproximadamente 20 realizações do experimento, haveria apenas uma em que a relação entre as variáveis seria igual ou mais forte do que a observada naquela amostra anterior. Em muitas áreas de pesquisa, o nível-p de 0,05 é costumeiramente tratado como um “limite aceitável” de erro, este foi o fator considerado na interpretação de resultados. Para que uma variável estudada neste trabalho seja considerada estatisticamente representativa e influente sobre o resultado, o valor do nível-p deverá ser menor do que 0,05. O software utilizado nas análises é o OriginPro 9.1 da empresa OriginLab (2013).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O capítulo 4 está organizado da seguinte forma: inicialmente será relatado o desempenho da injetora TSCi do ponto de vista operacional e os resultados obtidos para o consumo de carburante, em cada período de testes. Em seguida serão apresentados e discutidos os resultados para as variáveis do FEA analisadas. Por fim estão os resultados obtidos para a THD e sua relação com as variáveis do FEA.

### 4.1 Operação da injetora TSCi e consumo de material carburante

Na Figura 4.1 pode-se observar a injetora TSCi em sua posição de trabalho e suas conexões, que foram descritas na Figura 3.3. As outras mangueiras aparentes são para alimentação da injetora Co-Jet e refrigeração do bloco.



Figura 4.1 Imagem da injetora TSCi em sua posição de trabalho.

A presença das outras mangueiras inviabiliza a prática da manutenção de girar a injetora 180° graus quando ela apresentar desgaste em sua ponta.

A Figura 4.2 apresenta em detalhe a ponta da injetora TSCi após seis meses de operação contínua.



Figura 4.2 Em detalhe a ponta da injetora TSCi após seis meses em operação.

Pode ser observado na Figura 4.2 que a injetora TSCi apresentou baixíssimo desgaste em sua ponta mesmo após seis meses de operação contínua. É possível observar a adesão de material entre o tubo interno e o externo da injetora. Este material pode ser composto de aço, escória, material carburante ou uma mistura deles, devido a projeções desses materiais de dentro do FEA. Segundo o fabricante, a limpeza da injetora deve ser feita apenas com ar comprimido para não danificá-la e o material aderido tende a dissolver com o tempo. A injetora apresentou operação estável durante o período de testes.

Na análise do consumo de material carburante deve-se ter em mente que há uma receita química padronizada para o momento de início de injeção de carburante e taxa de

injeção de carburante ao longo do refino. Porém, o operador do forno pode aumentar ou diminuir a taxa de injeção de carburante deliberadamente, de acordo com a sua experiência em avaliar visualmente a espumação da escória e a necessidade de mudar a taxa de injeção. Além disso, a injeção de material carburante é utilizado não apenas com o objetivo de promover a escória espumante, como também para diminuir a oxidação do banho, visto que há uma faixa de oxigênio ativo específica para liberação da corrida para o FP. No FEA estudado não há injeção de alumínio para esta operação. A medição do oxigênio ativo no banho é realizada no final do refino.

A Figura 4.3 demonstra, na forma de um *boxplot*, os valores de consumo de material carburante para o período com as duas injetoras convencionais e para o período de testes, com uma injetora convencional e uma injetora TSCi, para cada padrão de carga. Assim como a Figura 4.3, as próximas figuras apresentarão os resultados em unidades da variável sobre tonelada de aço vazado na corrida, com o objetivo de padronizar a apresentação dos resultados.

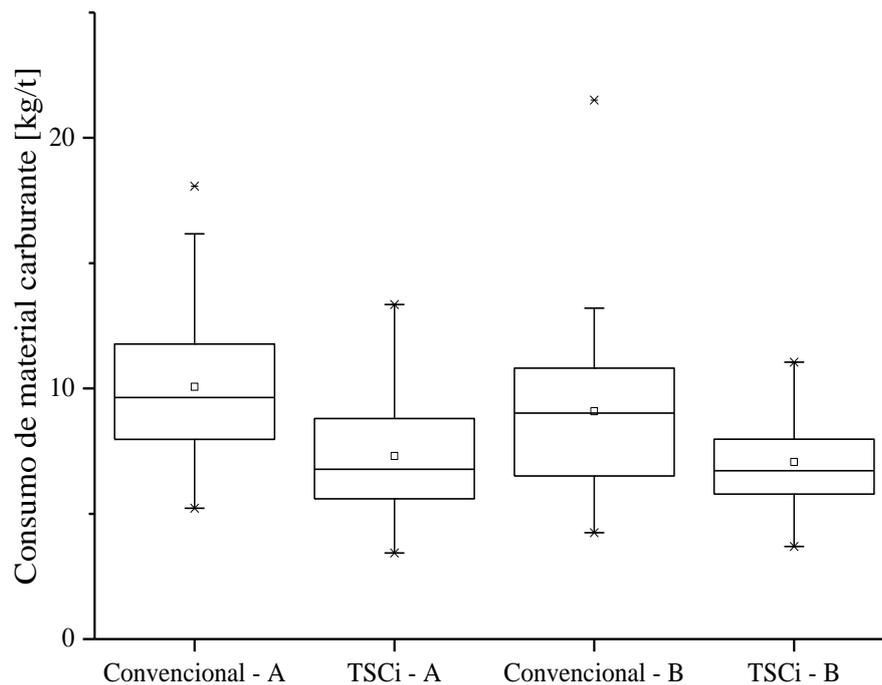


Figura 4.3 *Boxplot* demonstrando os valores de consumo de material carburante para o período com as duas injetoras convencionais e para o período de testes com uma injetora convencional e uma TSCi, para cada padrão de carga. Os valores de consumo de carburante estão em kg/t.

A Tabela 4.1 demonstra as médias e desvios padrões ( $\sigma$ ) do consumo de material carburante, a variação das médias e o resultado da avaliação ANOVA através do valor-p. Na horizontal os valores-p para cada carga fria com diferentes injetoras e, na vertical, os valores-p para cada injetora em diferentes cargas frias.

Tabela 4.1 Valores de consumo de material carburante e resultado da avaliação ANOVA. Os valores estão em kg/t.

	Injetora convencional		Injetora TSCi		Variação da média	ANOVA	
	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$		Valor-p	Significância estatística
<b>Carga Fria</b>							
<b>Carga A</b>	10,06	3,02	7,30	2,56	-27,44%	0,018	Sim
<b>Carga B</b>	9,08	3,09	7,06	1,68	-22,25%	0,000686	Sim
<b>Valor-p</b>	0,22		0,65				
<b>Singnificância estatística</b>	Não		Não				

Primeiramente, pode-se observar que o padrão de carga B possui um consumo de material carburante médio menor do que o padrão de carga A, apesar de não apresentar significância estatística. Possivelmente devido às diferentes qualidades de sucata empregadas e às diferenças entre receitas químicas referente à utilização de dois ou três cestões. Este resultado não era esperado já que o tempo de refino dos dois cestões é o mesmo.

A variação das médias de consumo de material carburante da Tabela 4.1 evidencia uma redução significativa no consumo. Além disso, a redução se demonstra consistente pelos dois valores de redução semelhantes. A avaliação ANOVA resultou em valores-p bem abaixo do valor-p crítico de 0,05, ou seja, a mudança de injetora promoveu uma mudança no comportamento do consumo de carburante estatisticamente significativa. A redução do  $\sigma$  dos dados é positivo para o processo do FEA, pois indicam um maior controle e reprodução do processo.

O resultado da análise química do material carburante pode ser conferido na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Análise química do material carburante. Os dados estão em porcentagem em massa.

<b>Análise Química</b>	
<b>Descrição</b>	<b>Teor</b>
<b>Umidade total</b>	0,37 %
<b>Cinza</b>	0,77 %
<b>Matéria volátil</b>	9,18 %
<b>Enxofre</b>	0,68 %
<b>Carbono fixo</b>	89,00 %

Comparando-se os resultados da Tabela 4.2 com a especificação da Tabela 3.3, pode-se observar que a amostra analisada atende às faixas de especificação.

#### 4.2 Variáveis do FEA

As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram os resultados encontrados para o consumo de carburante, oxigênio ativo, energia elétrica consumida, rendimento, porcentagem de FeO na escória, porcentagem de C e P no aço, *Power on* e *Power off* para os padrões de carga A e B, respectivamente. Assim como na Tabela 4.1, nas Tabelas 4.3 e 4.4 são apresentadas as médias e o desvio padrão para cada período, a variação da média e a análise ANOVA dos dados.

Tabela 4.3 Resultados das variáveis do FEA para o padrão de carga A.

Padrão de carga A							
Variável	Injetora convencional		Injetora TSCi		Variação da média	ANOVA	
	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$		Valor-p	Significância estatística
<b>Consumo de carburante [kg/t]</b>	10,06	3,02	7,3	2,56	-27,44%	0,01	Sim
<b>O<sub>2</sub> ativo [ppm]</b>	604,6	110	675	64	11,64%	0,09	Não
<b>Energia elétrica [KWh/t]</b>	366,2	18,85	363,08	8,64	-0,85%	0,91	Não
<b>Rendimento [%]</b>	90,68	2,69	90,37	1,09	-0,34%	0,96	Não
<b>FeO [% em massa]</b>	28,99	4,81	28,74	4,46	-0,86%	0,84	Não
<b>%C [% em massa]</b>	0,069	0,015	0,07	0,013	1,45%	0,92	Não
<b>%P [% em massa]</b>	0,012	0,003	0,013	0,008	8,33%	0,97	Não
<b>Power On [min]</b>	41,33	1,41	41,62	1,07	0,71%	0,82	Não
<b>Power Off [min]</b>	17,29	7,44	19,66	8,25	13,73%	0,55	Não

Tabela 4.4 Resultados das variáveis do FEA para o padrão de carga B.

Variável	Padrão de carga B					ANOVA	
	Injetora convencional		Injetora TSCi		Variação da média	Valor-p	Significância estatística
	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$			
<b>Consumo de carburante [kg/t]</b>	9,08	3,09	7,06	1,68	-22,25%	0,0006	Sim
<b>O<sub>2</sub> ativo [ppm]</b>	642,69	123,29	645,87	110,71	0,49%	0,90	Não
<b>Energia elétrica [KWh/t]</b>	363,99	16,74	362,42	15,68	-0,43%	0,67	Não
<b>Rendimento [%]</b>	90,05	2,12	90,08	1,86	0,03%	0,95	Não
<b>FeO [% em massa]</b>	29,01	5,47	32,04	6,66	10,44%	0,11	Não
<b>%C [% em massa]</b>	0,068	0,017	0,073	0,035	7,35%	0,47	Não
<b>%P [% em massa]</b>	0,014	0,005	0,011	0,004	-21,43%	0,04	Sim
<b>Power On [min]</b>	41,26	1,28	41,79	1,41	1,28%	0,67	Não
<b>Power Off [min]</b>	20,94	8,18	18,50	6,10	-11,68%	0,38	Não

Primeiramente, pode-se observar que, das duas tabelas, a única variável que apresentou significância estatística segundo a avaliação ANOVA, além dos consumos de carburante já comentados, é o teor de P no padrão de carga B. A diminuição de 21,43% no teor de P médio indica uma otimização do processo de desfosforação que, entretanto, não foi observada no padrão de carga A. Apesar de não ter apresentado significância estatística, a média do teor de FeO na escória do padrão de carga B apresentou aumento de 10,44%, o que explicaria em parte a melhora do processo de desfosforação. O FeO tem forte influência no processo de desfosforação visto que age como fornecedor de oxigênio para a oxidação do P (equação [1]) e ele compõe cerca de um terço da massa da escória (Tabela 3.2) (MOURÃO, 2007) (BARKER et al, 1998). O padrão de carga A não apresentou diminuição de P nem aumento do FeO da escória. A Figura 4.4 apresenta o resultado do teor de P para cada período de testes e por padrão de carga, na forma de um *boxplot*.

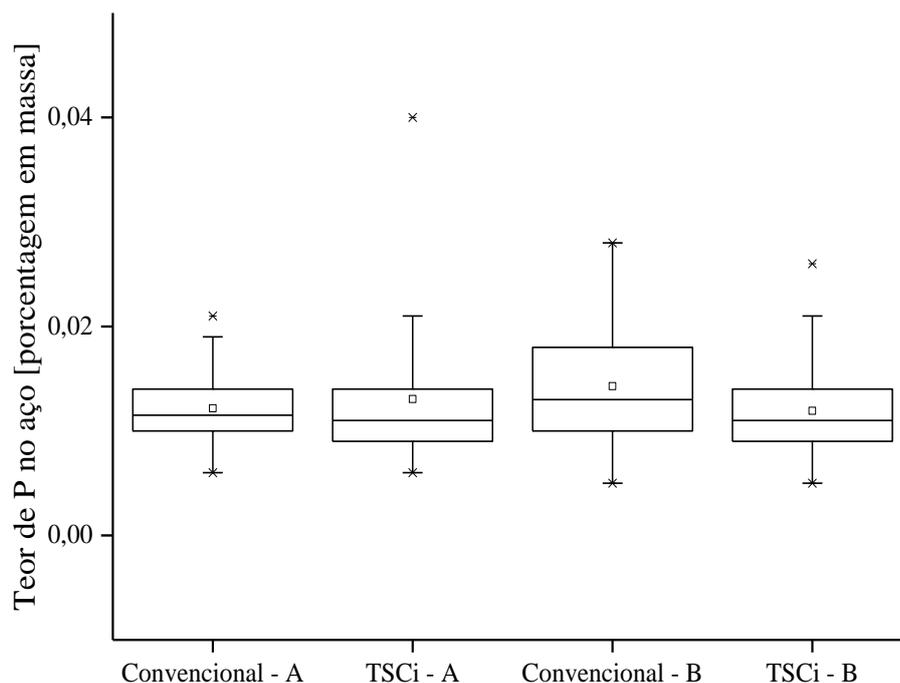


Figura 4.4 *Boxplot* dos resultados de teor de P no aço para cada período de teste e para cada padrão de carga.

Pode-se observar na Figura 4.4 que, após a mudança da injetora, o teor de P no padrão de carga B mudou para o mesmo patamar do padrão de carga A, tanto em média quanto em desvio.

Apesar de não apresentar significância estatística, ainda pode-se observar, nas Tabelas 4.3 e 4.4, que o consumo de energia elétrica sofreu uma pequena redução em ambos os casos. A injetora de carbono não tem como função principal fornecer energia, porém, neste caso, pode ter contribuído para o aumento da parcela de energia química através das reações [5] e [6]. O rendimento da carga B apresentou-se menor do que o da carga A, o que é um resultado não esperado visto que a carga B utiliza sucatas de maior qualidade, como comentado no Capítulo 3.1. A diminuição do rendimento no padrão de carga A pode ser explicado pelo aumento do valor do *power off* das corridas. Quanto maior o valor do *power off*, mais tempo as corridas ficam expostas à atmosfera, oxidando a escória e o banho. Esta oxidação está evidenciada pelo aumento no valor de  $O_2$  ativo na carga A. Também é gerado mais regiões de heterogeneidades química e térmica no banho durante o tempo de forno desligado, visto que o arco elétrico e o fluxo das injetoras são interrompidos, diminuindo a agitação do banho. A tendência do  $O_2$  ativo pode se diferir da tendência do teor de FeO pois estas variáveis são medidas em momentos diferentes do banho: o  $O_2$  ativo é medido no final do refino, enquanto que o teor de FeO é medido no

meio do refino. Os resultados de O<sub>2</sub> ativo, rendimento e consumo de energia elétrica, no padrão de carga B, apresentaram pouca variação. Os operadores do FEA observaram uma maior dificuldade para diminuir o O<sub>2</sub> ativo no final da corrida após a mudança da injetora, quando esse se apresentava acima da faixa objetivada para o vazamento. Isso pode ser explicado pela diminuição do consumo de material carburante, que diminuiu a quantidade de C disponível para a redução do valor de O<sub>2</sub> ativo no banho.

Como comentado anteriormente, o teor de FeO na escória e o teor de P no aço podem estar relacionados. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram a relação entre estas duas variáveis para a carga A e B, respectivamente, antes da mudança da injetora e depois da mudança. Os valores estão em porcentagem em massa. As linhas sólidas são as linhas de tendência encontradas para a regressão polinomial de ordem dois dos dados.

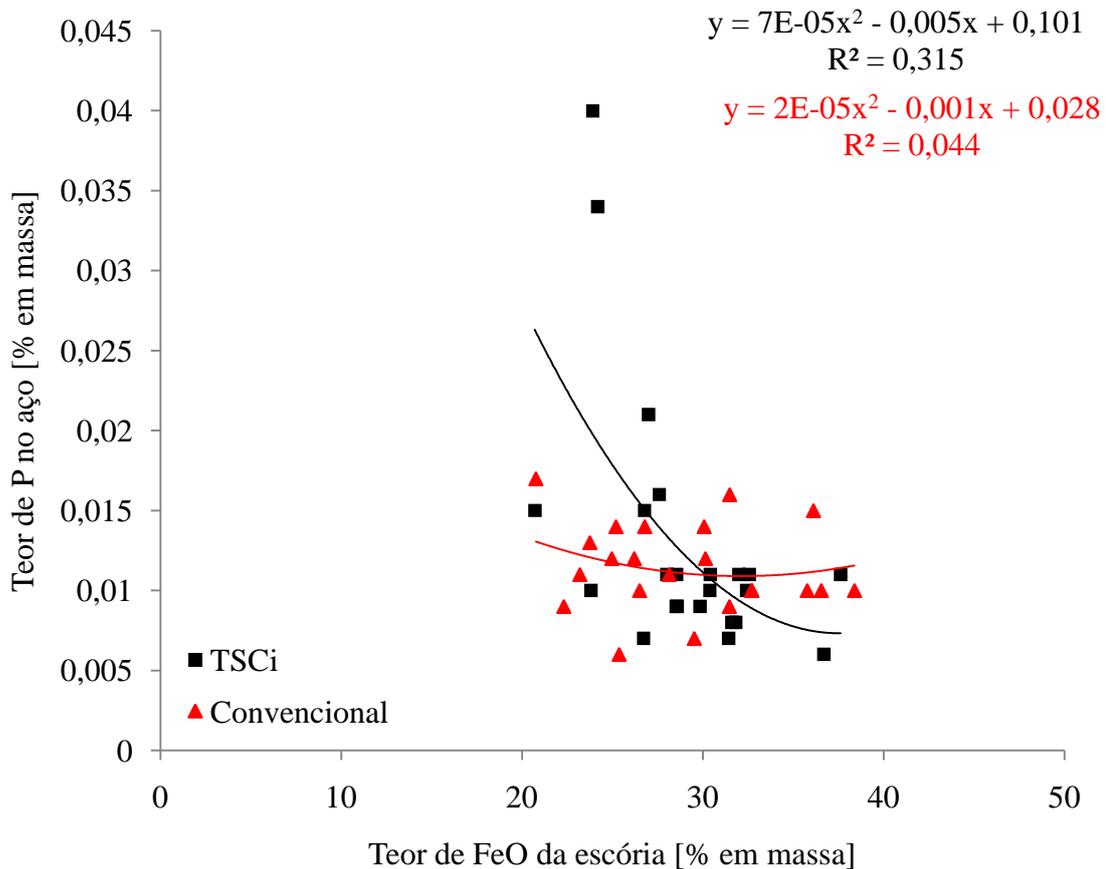


Figura 4.5 Relação entre o teor de P no aço e o teor de FeO na escória para a carga A, para os dois períodos de teste.

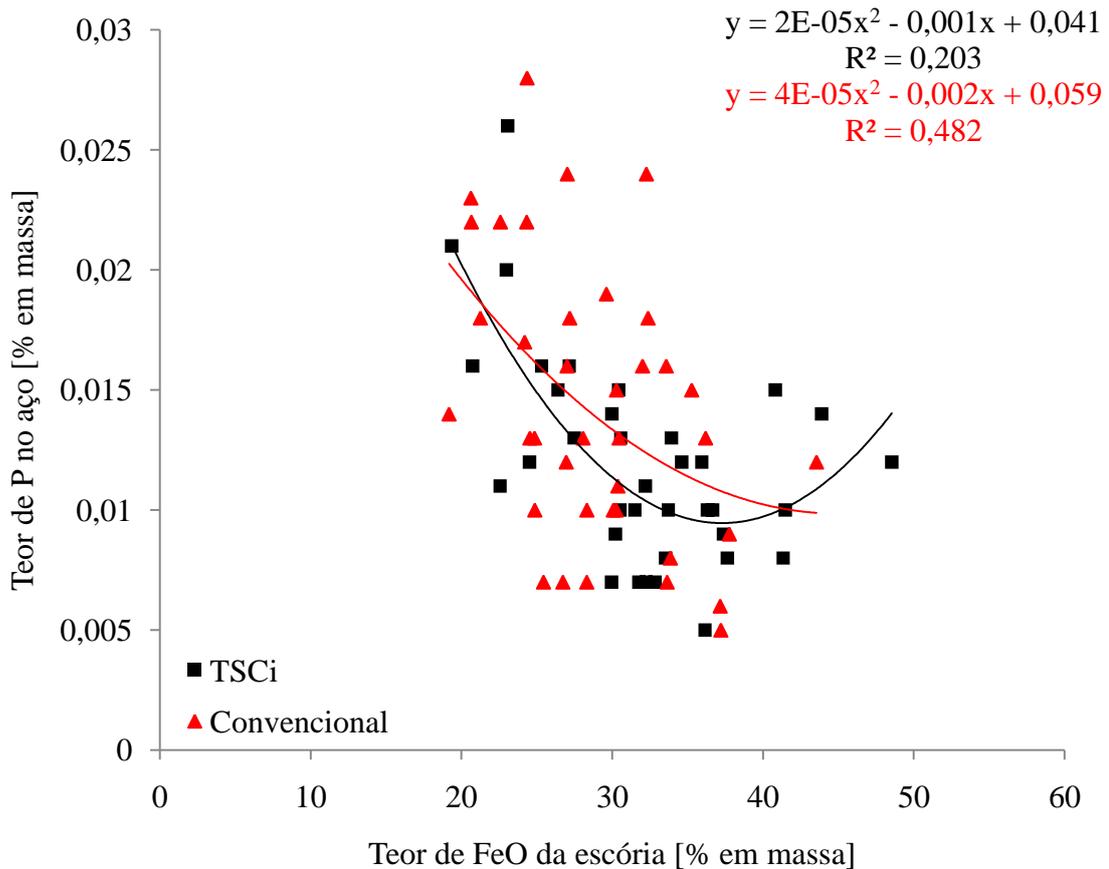


Figura 4.6 Relação entre o teor de P no aço e o teor de FeO na escória para a carga B, para os dois períodos de teste.

Pode-se observar nas Figuras 4.5 e 4.6 que há uma faixa ótima de FeO para reduzir o teor de P no aço. Nos resultados obtidos, a faixa está entre 30% a 40% em massa. Borovsky (2010) realizou um estudo da influência de cada componente da escória na desfosforação, encontrando uma faixa ótima de 27% a 33% de FeO. Portanto, os resultados obtidos neste trabalho apresentam tendência semelhante à literatura, mas com certa discrepância entre os valores. O que pode ser resultado de características específicas de cada processo. O  $R^2$  do período da injetora convencional da carga A é muito baixo para ser considerada uma relação entre as variáveis. Se uma maior quantidade de dados fosse coletada, poder-se-ia ter maior assertividade na tendência da relação.

O teor de FeO não está só relacionado com o teor de P, mas também com a THD, como será comentado no capítulo 4.3.

### 4.3 THD

Na Figura 4.7 é possível observar um exemplo da evolução da THD obtida ao longo de uma corrida de dois cestões.

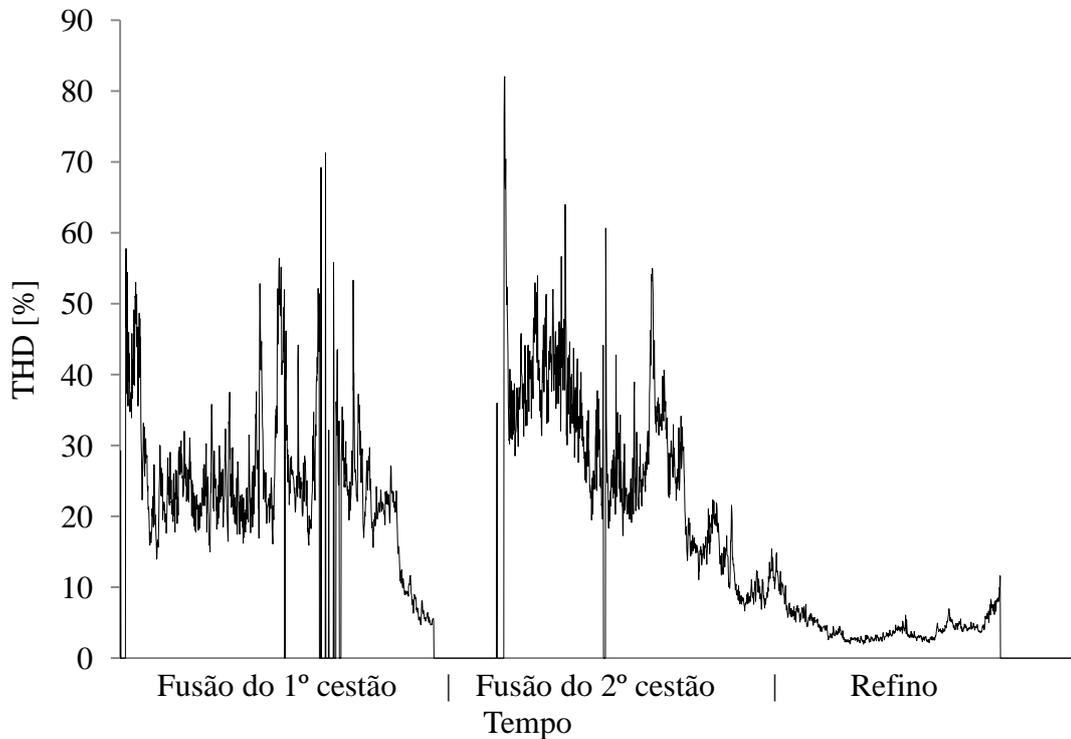


Figura 4.7 Evolução da THD com o tempo para uma das corridas de dois cestões testadas.

Na Figura 4.7 é possível observar que os valores de THD são expressivamente mais altos durante os dois períodos de fusão quando comparados ao refino, demonstrando assim a importância da escória espumante para estabilização do arco no FEA. Fatores operacionais como o basculamento do FEA e a mudança da taxa de injeção de material carburante podem causar variações na THD durante o refino, mesmo com a prática de escória espumante. Nos resultados e na discussão mostrados a seguir é válido lembrar que foi considerada apenas a THD durante o período de refino.

Na Tabela 4.5 podem ser conferidos os resultados médios da THD estratificado por período e por eletrodo, e as médias gerais. Os eletrodos 1, 2 e 3 estão posicionados no FEA de acordo com a Figura 2.7.

Tabela 4.5 Média da THD durante o refino estratificada por período, por eletrodo e as médias gerais.

Injetora	Carga fria A				Carga fria B			
	Média THD por eletrodo			Média geral	Média THD por eletrodo			Média geral
	Eletrodo				Eletrodo			
1	2	3	1	2	3			
<b>Convencional</b>	5,929	5,739	5,685	5,784	6,089	5,911	5,841	5,947
<b>TSCi</b>	6,712	6,648	6,305	6,555	5,957	5,733	5,476	5,722
<b>Variação</b>	13,21%	15,84%	10,91%	13,33%	-2,17%	-3,01%	-6,25%	-3,78%

Primeiramente pode-se observar na Tabela 4.5 que, nos dois casos, o eletrodo 3 apresenta uma THD média ligeiramente menor do que os outros dois eletrodos. Este resultado supõe que na área de atuação do eletrodo 3 (entre as duas injetoras de carbono) há uma melhor espumação durante o refino. A distribuição não equidistante das injetoras de carbono no FEA realmente pode gerar uma escória espumante não homogênea em todo o FEA.

No padrão de carga A houve um aumento da média geral da THD entre o período da injetora convencional e TSCi. Porém, no padrão de carga B, houve uma diminuição na média geral da THD. Este resultado se mostra contraditório visto que houve um mesmo padrão de diminuição de consumo de material carburante nos dois padrões de carga, como já comentado anteriormente. Possivelmente, o padrão de carga A não tinha tanta possibilidade de diminuição de consumo de carburante quanto o padrão B, excedendo o limite benéfico e resultando em prejuízo para a estabilidade do arco.

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram a relação obtida entre a THD média e o teor de FeO na escória das corridas para os padrões de carga A e B, respectivamente, em cada período de testes. As linhas sólidas são as linhas de tendência encontradas para a regressão polinomial de ordem dois dos dados.

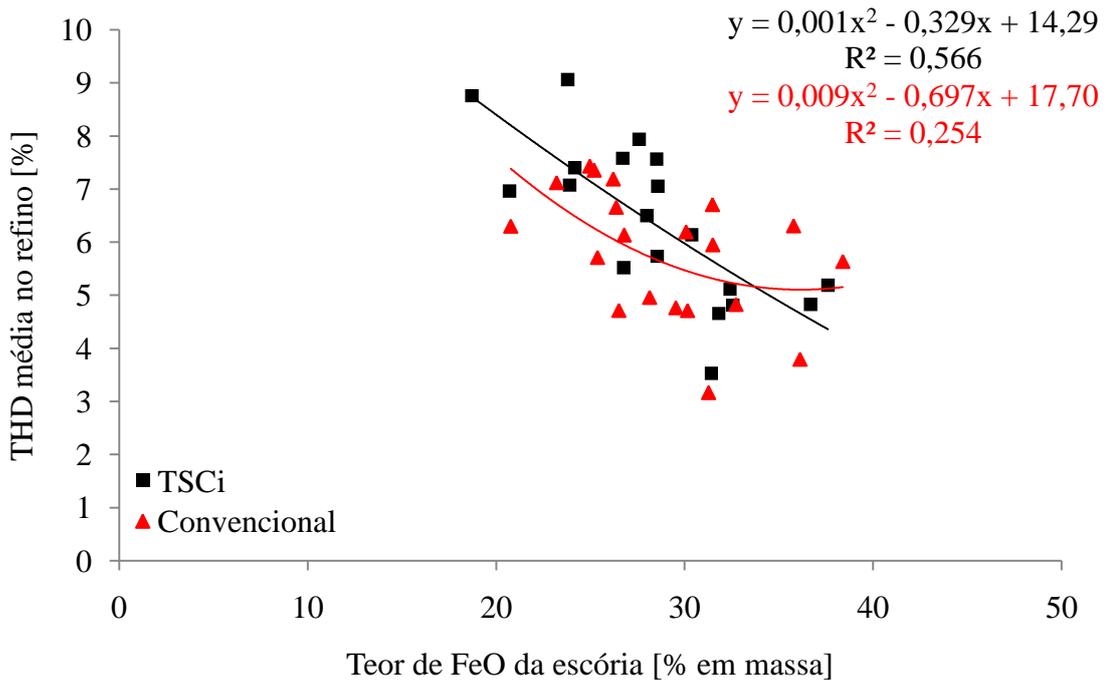


Figura 4.8 Relação entre THD média e o teor de FeO na escória, para o padrão de carga A, nos dois períodos de testes. Os valores estão em porcentagem para a THD e em porcentagem em massa para o teor de FeO.

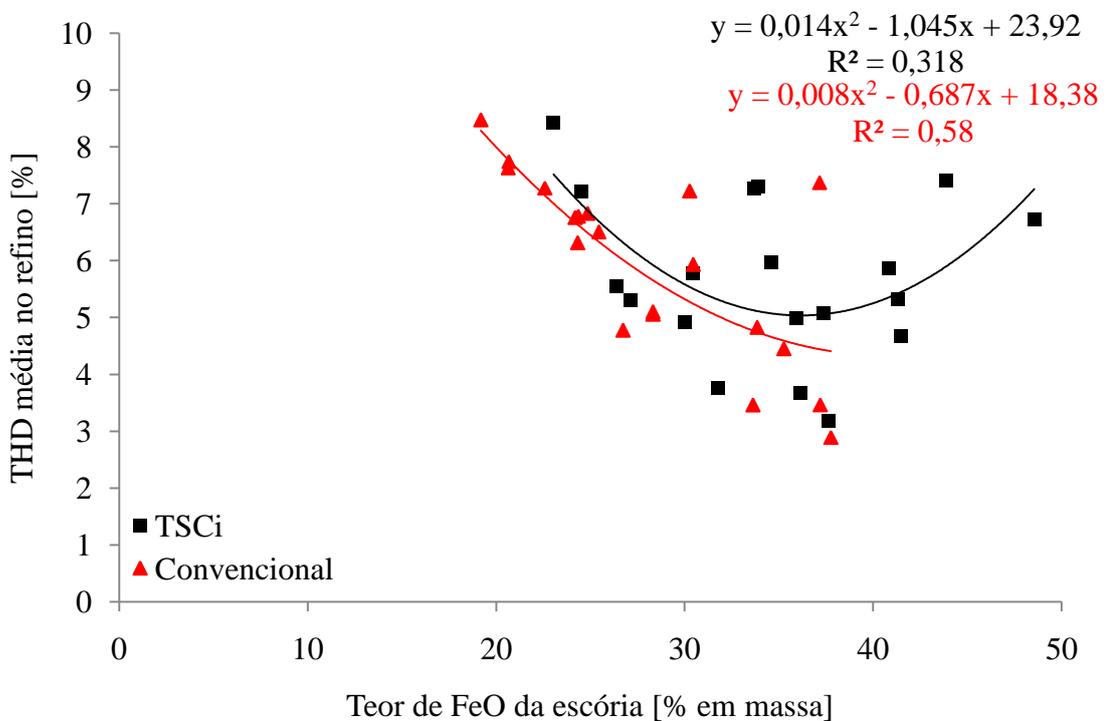


Figura 4.9 Relação entre THD média e o teor de FeO na escória para o padrão de carga B. Os valores estão em porcentagem para a THD e em porcentagem em massa para o teor de FeO.

Estudos (LANDA et al, 2008) apresentam uma relação entre a THD instantânea e a taxa de injeção de material de combustível. Outros estudos (BARKER et al, 2008) (ZHU, 2011) (GANDHARE, 2007) apresentam a relação entre propriedades elétricas do arco do FEA, a altura da escória espumante e índices da qualidade da escória espumante. Porém há pouca literatura relacionando diretamente a THD com a composição química da escória. Como se pode observar na Figura 4.8 e na Figura 4.9, foi encontrada uma relação polinomial de ordem dois entre a média da THD durante o refino e o teor de FeO na escória nos dois padrões de carga. A relação indica que existe um ponto ótimo de FeO na escória no qual é obtido o menor valor de THD durante o refino. Como comentado no capítulo 2.4, o FeO é um óxido fluxante, ou seja, influencia na viscosidade da escória. A viscosidade, por sua vez, está relacionada com o índice de espumação através da relação apresentada por Pretorius (1998) na Figura 2.10. Portanto, é plausível afirmar que um teor ótimo de FeO resulta em um teor ótimo da média da THD durante o refino através das relações dessas variáveis com a viscosidade e o índice de espumação. Para os dados obtidos, o teor ótimo de FeO encontrado é cerca de 35% em massa.

Ainda pode-se observar a relação entre os valores médios de THD com o  $R^2$  da curva de regressão. Para o período de testes que apresentou maior THD média, maior foi o  $R^2$  da curva de regressão, para os dois padrões de carga. Isso indica que valores mais altos de THD possuem relação mais dependente do teor de FeO na escória.

Além das possíveis fontes de erro já comentadas (variações normais no processo e na qualidade dos materiais e intervenções dos operadores) também deve-se considerar que não foi feito nenhum tipo de controle diferenciado do lastro úmido do FEA durante os períodos de avaliação, foi feito apenas o procedimento normal da prática industrial. Além disso, interrupções no processo da aciaria que não concernem ao processo do FEA também podem gerar variação dos resultados.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliada a influência da mudança de uma injetora convencional de carbono para uma injetora modelo TSCi no consumo de material carburante de um FEA. Além disso, foram monitoradas as variáveis do FEA durante o período de testes para analisar o impacto da mudança no processo do FEA. Como resultado complementar, foi avaliada a estabilidade do arco elétrico durante o refino através dos valores de THD e foi realizada uma análise química do material carburante que é injetado. A partir dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

- O consumo de material carburante apresentou redução significativa nos dois padrões de carga. O padrão de carga A apresentou redução de 27,44% e o padrão de carga B apresentou 22,25% de redução. Em ambos os casos a análise ANOVA apresentou valores-p (0,018 e 0,000868) bem abaixo do valor-p crítico (0,05).
- A análise química do material carburante está de acordo com as especificações apresentadas pelo fornecedor.
- O padrão de carga B apresentou redução de 21,43% no teor de P no aço, entretanto o padrão de carga A não apresentou redução no teor de P.
- Em geral, a mudança da injetora resultou em pouca variação do processo do FEA.
- Há uma relação polinomial de ordem dois entre o teor de FeO na escória e o teor de P no aço. A faixa de FeO que resulta em teor de P mais baixo é entre 30% e 40% de FeO em massa.
- A estabilidade do arco durante o refino não é equivalente nos três eletrodos do FEA, sendo o eletrodo 3 o eletrodo que apresentou menor valor de THD.

- O ponto ótimo de 35% do teor de FeO na escória gera o menor valor de THD no refino.
- A injetora TSCi apresentou operação estável e baixo desgaste da ponta durante o período de testes.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Relacionar a estabilidade do arco com o padrão de carga fria e sucata utilizada durante o período de fusão do FEA.
- Utilizar a metodologia proposta neste trabalho para comparar diferentes padrões de carga fria do FEA.
- Avaliar a influência da mudança de injetoras com outros parâmetros de estabilidade de arco, como variação da corrente e tensão elétrica e medições acústicas emitidas pelo arco.
- Estudar, por modelagem física e computacional, a agitação do banho promovida pelas injetoras de carbono.
- Caracterizar o material carburante utilizado no FEA, investigar possíveis substitutos e seus custos.

## 7 REFERÊNCIAS

Air Products – **Comparing oxygen/carbon injection in a twin shell furnace.** <<http://www.airproducts.com/~media/Files/PDF/industries/metals-comparing-oxygen-carbon-injection-twin-shell-furnace>> Acesso em 28/09/2014.

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia.** Arte & Ciência: São Paulo, 2009.

BARKER, K. J. et al **The making, shaping and treating of steel: steelmaking and refining volume.** The AISE Steel Foundation: Pittsburgh, 1998.

BIELEFELDT, W. V. **Estudo do tratamento de inclusões com cálcio na fabricação do aço SAE 8620.** Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2005.

BOROVSKY, T., KIJAC, J., DOMOVEC, M. **The slag composition influence on the dephosphorization and on the lifetime of electric arc furnace hearth refractory lining.** Acta Metallurgica Slovaca, Vol. 16, p. 165-171, 2010.

BOWMAN, B., KRÜGER, K. **Arc Furnace Physics.** Stahleisen Communications: Düsseldorf, 2009.

CAMPOLO, M. et al **Modelling of a multiphase reacting turbulent jet: application to supersonic carbon injection in siderurgic furnaces.** Chemical Engineering Science, Vol. 62, p. 4439-4458, 2007.

CHEVRAND, L. J. S. **Aciaria elétrica.** Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração: São Paulo, 2007.

CONEJO, A. N., TORRES, R., CUELLAR, E. **Análisis industrial de la reducción del óxido de hierro mediante la inyección de finos de carbón al horno eléctrico de arco.** Revista de Metalurgia Madrid, Vol. 35, p. 111-125, 1999.

DECKMANN, S. M., POMILIO, J. A. **Avaliação da qualidade da energia elétrica.** Universidade estadual de Campinas: Campinas, 2010.

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

GRANDHARE, W. Z., LULEKAR, D. D. **Analyzing electric power quality in arc furnaces**. International Conference on Renewable Energies and Power Quality: Sevilla, 2007.

GUAN, L. F. **The practice of carbon injection and post combustion in order to achieve a metallic yield recovery in the electric arc furnace: the experience of Amsteel Mills (Malaysia)**. AIST Proceedings: AISTech, 2007.

JI, F. Z. et al **A kinetic study of carbon injection into electric arc furnace slags**. VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.

JOHN, A. L. **Melhorias no desempenho dos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco**. Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2009.

LANDA, S. et al **Dynamic control of slag foaming at Sidenor Basauri meltshop**. Archives of Metallurgy and Materials, Vol 53, p. 419-424, 2008.

LAVAL, C. G. P., inventor. Steam-Turbine. England No. 7143, 29 de abril de 1889.

MAIA, B. T. **Efeito da configuração do bico da lança na interação jato-banho metálico em convertedor LD**. Dissertação. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

MATHUR, P., MESSINA, C. **Praxair CoJet™ technology – principles and actual results from recent installations**. AISE Steel Technology, Vol. 28, p. 21-25, 2001.

MEGAHED, G. M. et al **Improving EAF performance by chemical energy optimization at Ezz flat steel**. Institute of Materials, Minerals and Mining, Vol. 37, p. 445-451, 2010.

MEIDANI, A. R. N. et al, **Modelling shrouded supersonic jets in metallurgical reactor vessels**. ISIJ International, Vol.44, p. 1639-1645, 2004.

MEMOLI, F., KOESTER, V. K., GIAVANI, C. **Benchmark study of the EAF plants using KT injection system**. La metallurgia italiana, Vol 11-12, p. 39-45, 2005.

MEMOLI, F. et al **Evaluation of the energy developed by a multipoint side-wall burner-injection system during the refining period in a EAF**. ISIJ International, Vol. 44, p. 1511-1516, 2004.

MEMOLI, F. et al **Simulation of oxygen penetration and decarburization in EAF using supersonic injection system**. ISIJ International, Vol. 44, p. 1342-1349, 2004 (a).

More – **M-One A new era in EAF sidewall injection technology**. <<http://www.more-oxy.com/sites/default/files/downloads/hl13.pdf>> Acesso em 28/09/2014.

MOREIRA, M. F. **Apostila de siderurgia**. Rio de Janeiro, 2012.

MOURÃO, M. B. et al **Introdução à siderurgia**. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração: São Paulo, 2007.

OriginLab – **Algorithms one-way ANOVA**. OriginPro 9.1 Help, 2013.

PRETORIUS, E. B., CARLISLE, R. C. **Foamy slag fundamentals and their practical application to electric furnace steelmaking**. EAF Conference, York, United States of America, 1998.

RAHMAN, M. M. **Fundamental investigation of slag/carbon interactions in electric arc furnace steelmaking process**. Tese de doutorado. The University of South Wales, 2010.

RIZZO, E. **Introdução aos processos siderúrgicos**. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração: São Paulo, 2005.

Schneider Electric – **Definition of harmonics**. <[http://www.electrical-installation.org/enw/index.php?title=Definition\\_of\\_harmonics&oldid=15097](http://www.electrical-installation.org/enw/index.php?title=Definition_of_harmonics&oldid=15097)> Acesso em 14/09/2014.

Sinduscon-RS – **Excesso de oferta é o maior problema da indústria siderúrgica**. <<http://www.sinduscon-rs.com.br/excesso-de-oferta-e-o-maior-problema-da-industria-siderurgica/>> Acesso em 30/09/2014.

STRELBISKY, M. J., BALKOS, A. T., ZEIEN, T., inventores, A.H. TALLMAN BRONZE COMPANY, LIMITED, cessionária. **Injector for injecting particulate material into metallurgical furnaces**. United States patent US 007641849B2, 5 de janeiro de 2010.

ZHU, T. X. **Carbon injection into arc furnace slags**. Dissertação. School of Graduate Studies: Mc Master University, 2011.

World Steel Association – **World Steel in Figures 2013**.  
<<https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/Word-Steel-in-Figures-2013/document/World%20Steel%20in%20Figures%202013.pdf>> Acesso em 30/09/2014.