

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

MELHORIAS NO DESEMPENHO DOS INJETORES SUPERSÔNICOS EM  
OPERAÇÃO EM UM FORNO ELÉTRICO A ARCO

Alexandre Liborio John  
Eng. Mecânico

Dissertação para obtenção do título de  
*Mestre em Engenharia Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia*

Porto Alegre  
2009

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

MELHORIAS NO DESEMPENHO DOS INJETORES SUPERSÔNICOS EM  
OPERAÇÃO EM UM  
FORNO ELÉTRICO A ARCO

Alexandre Liborio John  
Engenheiro Mecânico

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre  
2009

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Antônio Cezar Faria Vilela

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes

Prof. Dr. Luis Augusto Colembergue Klujszo

Prof. Dr. Wagner Bielefeldt

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, novembro de 2009

Dedico este trabalho à Daniela pelo apoio e compreensão.  
Aos meus pais, pela educação que me deram, e seu apoio nos momentos difíceis.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha namorada Daniela pelo amor, compreensão e disposição.

Ao professor Dr. -Ing Antônio Cezar Faria Vilela pela orientação, pelo aprendizado e pela paciência com que me ajudou na realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Helio Masuyama pela confiança e amizade.

A toda equipe do setor de Recursos Humanos da GERDAU Riograndense, pela disposição e apoio em todo processo formal do trabalho.

À GERDAU Riograndense, pela oportunidade de realização do trabalho, em especial ao Engenheiro Tiago Alliatti Beleza pela motivação e orientação.

Aos colegas da manutenção mecânica da Aciaria da Gerdau Riograndense, em especial ao Engenheiro Antonio Netto Rosa e ao Facilitador Aníbal Aodezert.

A toda equipe da Aciaria da Gerdau Riograndense, em especial para equipe de operação do Forno 3 e seu facilitador de Rotina Mário José Silveira da Silva, pelo apoio durante os experimentos.

Ao colega da Gerdau Barão de Cocais, Breno Totti Maia, pelo auxílio técnico.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>X</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 MERCADO SIDERÚRGICO .....	3
2.1.1 Consumidores do Aço.....	3
2.1.2 Produção Mundial de Aço.....	4
2.1.3 Principais Empresas Produtoras .....	6
2.2 ROTAS DE PRODUÇÃO DO AÇO.....	8
2.2.1 A base de minério de ferro .....	9
2.2.2 Rota à base de sucata .....	11
2.2.2.1 Sucata .....	11
2.2.2.2 Forno Elétrico a Arco (FEA).....	13
2.2.2.3 Refino secundário (refino redutor) .....	27
2.2.2.4 Lingotamento.....	30
2.3 ENERGIA UTILIZADA NO FEA.....	33
2.3.1 Energia Elétrica .....	34
2.3.1.1 Arco Elétrico.....	35
2.3.1.2 Fornos de corrente contínua e corrente alternada.....	39
2.3.2 Energia química .....	39
2.3.2.1 Energia de redução .....	40
2.3.2.2 Energia de queimadores.....	40
2.3.2.3 Energia de dissolução .....	40
2.3.2.4 Energia de calcinação .....	41
2.3.2.5 Energia de oxidação.....	41
2.4 INJEÇÃO DE OXIGÊNIO.....	46
2.4.1 Injeção por tubos consumíveis .....	46
2.4.2 Sistema de jato coerente.....	47
2.4.3 Sistema Multi Point Double Flow (MPDF).....	51

2.5 TEORIA DO JATO SUPERSÔNICO.....	52
2.5.1 Projeto do bico supersônico.....	55
2.5.1.1 Jato ideal.....	55
2.5.1.2 Jato sobre expandido.....	56
2.5.1.3 Jato subacelerado.....	57
2.5.1.4 Conceitos básicos utilizados no dimensionamento de um bico supersônico....	58
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>66</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS DO FORNO 3.....	66
3.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE OXIGÊNIO DO FORNO ELÉTRICO 3.....	67
3.3 METODOLOGIA DO PROCESSO NO FEA.....	70
3.4 TESTES NO MODO PURGA.....	74
3.5 TESTES NO MODO ALTA VAZÃO.....	74
3.6 TESTES COM O NOVO INJETOR.....	74
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>76</b>
4.1 PARÂMETROS DO MODO PURGA.....	76
4.1.1 Entupimentos de bicos.....	76
4.1.2 Influência do modo purga na oxidação do banho e escória.....	77
4.2.1 Vazão mínima.....	80
4.2.2 Vazão máxima.....	81
4.3 RESULTADOS COM O NOVO MODELO DE BICO SUPERSÔNICO.....	82
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>85</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>87</b>
<b>7 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais aplicações do aço na sociedade. ....	4
Figura 2 – Produção mundial de aço bruto 1950 à 2008 (mmt). ....	5
Figura 3 – Etapas de produção do aço em uma usina siderúrgica. ....	8
Figura 4 – Representação esquemática do FEA. ....	14
Figura 5 – Potência dos Foros Elétricos e sua capacidade produtiva por corrida. ....	15
Figura 6 – Produtividade dos Foros Elétricos a Arco. ....	16
Figura 7 – Modelo de estratificação da carga no cesto para carregamento no Forno. ....	18
Figura 8 – Influência do FeO na efetividade da espumação da escória no FEA. ....	21
Figura 9 – Influência do FeO, basicidade e MgO na capacidade de espumação da escória ....	22
Figura 10 – Influência do FeO, MgO e basicidade na efetividade da espumação da escória no FEA. ....	23
Figura 11 – Modelo de esgotamento de forno com o princípio de bica convencional. ....	25
Figura 12 – Modelo de esgotamento de forno com o princípio. ....	26
Figura 13 – Imagem representando furo de corrida EBT (vista lateral). ....	26
Figura 14 – Esquema representativo de construção do Forno Panela. ....	28
Figura 15 – Características em relação a capacidade dos Foros Painelas em operação no Brasil e Japão. ....	29
Figura 16 – Desenho esquemático do processo de Lingotamento Contínuo. ....	31
Figura 17 – Consumo médio de energia elétrica por tonelada de aço produzido relacionado com a produtividade do Forno elétrico a arco em toneladas por hora. ....	35
Figura 18 – Característica do fluxo de calor do arco elétrico. ....	37
Figura 19 – Vetores da força eletromagnética entre 100 e 120 Hz. ....	37
Figura 20 – Regiões onde a sucata é fundida no interior do forno, utilizando energia somente do arco elétrico. ....	38
Figura 21 – Consumo de energia elétrica <i>versus</i> consumo de Oxigênio. ....	42
Figura 22 – Diagrama de Ellingham. ....	44
Figura 23 - Manipulador de lança consumível. ....	47
Figura 24 – Modelamento do forno com e sem posicionamento de queimadores em pontos frios, que não são devidamente aquecidos pelo arco elétrico gerado através dos eletrodos. ....	48
Figura 25 – Sistema <i>co-jet</i> convencional (esquerda) e <i>jetbox</i> (direita). ....	50
Figura 26 – Gráfico do percentual de eficiência do queimador. ....	51
Figura 27 – Injetor <i>Multi Point Double Flow</i> (MPDF). ....	52
Figura 28 – Modelo de bocal supersônico convergente-divergente. ....	53
Figura 29 – Imagem ilustrativa comparando um modelo de jato supersônico convencional e um jato supersônico cojet. ....	54

Figura 30 – Jato supersônico protegido por um jato auxiliar de gás natural e oxigênio, caracterizando o sistema cojet. ....	55
Figura 31 – Modelo ideal de jato na saída do bocal, onde a pressão de saída ( $P_e$ ) é igual ..... a pressão do Forno ( $P_a$ ). ....	56
Figura 32 – Modelo de jato sobre expandido na saída do bocal, onde a pressão de saída ( $P_e$ ) é maior que a pressão do Forno ( $P_a$ ). ....	57
Figura 33 – Modelo de jato subacelerado na saída do bocal, onde a pressão de saída ( $P_e$ ) é menor que a pressão do Forno ( $P_a$ ). ....	58
Figura 34 – Esquema representativo da vazão mássica.....	61
Figura 35 – Esquema do fluxo de gás por um bocal convergente-divergente.....	62
Figura 36 – Injetor MPDF instalado em dois pontos do forno.....	68
Figura 37 – Injetor convencional instalado em dois pontos do forno. ....	68
Figura 38 – Posicionamento dos injetores de oxigênio no forno elétrico 3 .....	69
Figura 39 – Novo modelo de lança supersônica com diâmetro de garganta 8,6 mm.....	70
Figura 40 – Ciclo de injeção de oxigênio do FEA3 para cada unidade de injetor. ....	71
Figura 41 – Montagem da injetora MPDF no refratário antes de partir o forno. ....	73
Figura 42 – Teor de FeO da escória do forno 3, no período de pressão de purga abaixo e acima de $1,1 \text{ kgf/cm}^2$ . ....	77
Figura 43 – Consumo específico de $\text{O}_2$ na corrida com pressão no modo purga abaixo e acima de $1,1 \text{ kgf/cm}^2$ .....	78
Figura 44 – Consumo de energia elétrica do forno 3, no período de pressão de purga abaixo e acima de $1,1 \text{ kgf/cm}^2$ . ....	79
Figura 45 – Injetor <i>Multi Point Double Flow</i> (MPDF) com erosão no bico, causado pelo jato subacelerado, na pressão abaixo de $9,0 \text{ kgf/cm}^2$ . ....	80
Figura 46 – Desgaste do refratário na região da injetora, após a operação de 27 corridas com pressão superior a $9,5 \text{ kgf/cm}^2$ no bico supersônico.....	81
Figura 47 – Consumo de $\text{O}_2$ entre as duas condições de diâmetro da garganta da lança supersônica. ....	82
Figura 48 – Rendimento metálico entre as duas condições de diâmetro da garganta da lança supersônica. ....	83
Figura 49 – Consumo de energia elétrica entre as duas condições de diâmetro da garganta da lança supersônica.....	84

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Os dez maiores produtores de aço do mundo em 2008. ....	6
Tabela 2 – Maiores produtores de aço do mundo nos anos de 2007 e 2008 (Milhões de toneladas de aço bruto produzido).....	7
Tabela 3 – Classificação dos Fornos Elétricos a Arco .....	15
Tabela 4 – Reações químicas exotérmicas durante o refino no forno elétrico a arco. ....	43
Tabela 5 – Dados do forno elétrico .....	66
Tabela 6 – Dados das dimensões do forno elétrico .....	66
Tabela 7 – Dados referentes ao sistema de injeção de oxigênio. ....	67

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

Símbolo	Descrição
A	Área da seção transversal
A*	Área da seção transversal da garganta
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
$\Delta G^0$	Energia livre de Gibbs no estado padrão
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina
BOF	Basic Oxygen Furnace
°C	Graus centígrados
°C/min	Graus centígrados por minuto
C	Carbono
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Cu	Cobre
Cr	Cromo
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
C <sub>p</sub>	Capacidade térmica do gás a pressão constante
C <sub>v</sub>	Capacidade térmica do gás a volume constante
DRI	Direct reduced iron
EUA	Estados Unidos da América
EBT	Eccentric Bottom Tapping
FeO	Oxido de ferro
FEA	Forno elétrico a arco
FP	Forno panela

GLP	Gás liquefeito de petróleo
GN	Gás natural
h	Entalpia
Hz	Hertz
J	Joule
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
kgf/cm <sup>2</sup>	Kilograma força por centímetro quadrado
kVA	Quilovolt-ampere
kWh/cm <sup>3</sup>	Quilowatt hora por centímetro cúbico
kWh/t	Quilowatt hora por tonelada
kWh/Nm <sup>3</sup>	Quilowatt hora por normal metro cúbico
kWh/m <sup>3</sup>	Quilowatt hora por metro cúbico
K	Kelvin
kJ/mol	Quilojoule por mol
km	Quilômetro
kg	Quilograma
kg/t	Quilograma por tonelada
LC	Lingotamento contínuo
MPDF	Multi point double flow
M ou Ma	Mach
MW	Megawatt
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetros
M	Vazão mássica
MgO	Oxido de magnésio
MVA/t	Megavolt-ampere por tonelada
Mn	Manganês
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
Nm <sup>3</sup> /h	Normal metro cúbico por hora
O <sub>2</sub>	Oxigênio
P	Pressão

Pe	Pressão de entrada
Pa	Pascal
PCR	Post combustion relation
PCE	Post combustion efficiency
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pentóxido de difósforo
P	Fósforo
S	Enxofre
Sn	Estanho
Si	Silício
t/ha/ano	Tonelada por hectare por ano
T	Temperatura em K
t	Tonelada
US\$/t/ano	Dólar norte-americano por tonelada por ano
t/h	Tonelada por hora
t/m <sup>3</sup>	Tonelada por metro cúbico
v	Velocidade
VCO	Volume de monóxido de carbono
VCO <sub>2</sub>	Volume de dióxido de carbono
V <sub>s</sub>	Velocidade do som
V	Vanádio
%	Percentual
γ	Constante adiabática do gás
ρ	Densidade

## RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo para verificar as melhores condições de vazão das atuais lanças supersônicas utilizadas no forno elétrico a arco 3 da Siderúrgica Riograndense. Também foi realizado um teste comparativo entre o modelo de lança supersônica atual e um novo modelo de injetor proposto.

Para determinar as melhores condições de vazão das injetoras atuais, avaliou-se parâmetros como o consumo de oxigênio, energia elétrica, teor de FeO da escória, condições de desgaste do refratário e erosão dos bicos injetores. Para os testes comparativos com o novo modelo de injetores, foram usinados dois bicos de cobre com menor diâmetro de garganta. As novas pressões e vazões de oxigênio, tanto para o trabalho no modo alta vazão como para o modo purga, foram estabelecidas com base em estudos das características dos bicos utilizados atualmente. Os testes foram realizados em caráter comparativo no próprio forno 3.

Nos atuais modelos de injetores utilizados, verificou-se que a pressão no modo purga deve variar entre 0,9 e 1,1 kgf/cm<sup>2</sup> na rede de oxigênio. Assim, a vazão de O<sub>2</sub> varia entre 65 e 75 Nm<sup>3</sup>/h, intervalo no qual foi observada a melhor eficiência na operação, considerando principalmente o controle do FeO da escória e a ocorrência de entupimento dos bicos supersônicos. Na alta vazão foram definidas pressões entre 9,0 e 9,5 kgf/cm<sup>2</sup>, onde as vazões variam entre 350 e 375 Nm<sup>3</sup>/h por bico. Estes valores foram definidos avaliando-se principalmente o controle do consumo de refratário na região do injetor e o desgaste dos bicos causado por jato subacelerado.

Os injetores com diâmetro de garganta menor possibilitaram a operação com vazões de O<sub>2</sub> menores na purga em relação ao modelo atual. Assim, foi possível operar com vazão em torno de 50 Nm<sup>3</sup>/h a uma pressão de 0,9 kgf/cm<sup>2</sup>, sem a ocorrência de entupimentos. Porém no modo alta vazão, para garantir a vazão mínima de 350 Nm<sup>3</sup>/h, a pressão no bico foi elevada para 12,5 kgf/cm<sup>2</sup>. Com este novo modelo de injetor, os consumos médios de oxigênio e de energia elétrica reduziram 0,8 Nm<sup>3</sup>/t e 12,9 kWh/t, respectivamente, em relação ao injetor atual, e verificou-se o aumento de 0,92% no rendimento metálico.

**Palavras-chave:** Injetor supersônico, energia química, produção de aço, aciaria elétrica

## ABSTRACT

In this work, a study to verify the best conditions of oxygen flow to operate the supersonic injectors currently used in the Electric Arc Furnace 3 (EAF 3) of Siderúrgica Riograndense was carried out. Also, a comparative study between the supersonic injector model currently used and a new proposed model was made.

To determine the best flow conditions of current injectors, parameters such as oxygen and electricity consumption, and slag FeO content were evaluated. Moreover, refractory wear conditions and copper lance tips erosion were analyzed.

For the comparative tests with the new model, two copper lance tips have been machined, with a smaller throat diameter. The new oxygen pressure and oxygen flow (high and low flow operating modes) were established based on studies of features of the currently used lance tips. The tests were carried out comparatively in the same EAF 3.

For the currently used injector models, it was verified that the pressure in the low flow mode must be kept between 0.9 and 1.1 kgf/cm<sup>2</sup> in the oxygen system. Thus, the O<sub>2</sub> flow varies between 65 and 75 Nm<sup>3</sup>/h, interval in which the best efficiency in the operation was observed, considering mainly the control of FeO of the slag, and the occurrence of clogging of the supersonic lance tips. High flow pressures were defined between 9.0 and 9.5 kgf/cm<sup>2</sup>, where the flow varies between 350 and 375 Nm<sup>3</sup>/h per lance tip. These values were defined evaluating mainly the control of the refractory wear in the region of the injector, and the erosion of the lance tips caused by under-blown jet.

The new lance tips with smaller throat diameter made it possible to operate with smaller O<sub>2</sub> flow, 50 Nm<sup>3</sup>/h with pressure of 0.9 kgf/cm<sup>2</sup>, without clogging in low flow steps. However, in the high flow, to guarantee the minimum flow of 350 Nm<sup>3</sup>/h, the pressure in the lance tips was raised to 12.5 kgf/cm<sup>2</sup>. With this new model of injector, the average consumption of oxygen was lowered by 0.8 Nm<sup>3</sup>/h compared to the current injector and an increase of 0.92% was verified in the metallic yield. Furthermore, there was a reduction of 12.9 kWh/t in the consumption of electric energy.

**Keywords:** Supersonic lance tips, Chemical energy, Supersonic jets.

## 1 INTRODUÇÃO

Na indústria de produção do aço, é constante o esforço para melhorias do processo, com o intuito de reduzir os custos, aumentar a produtividade e segurança da operação.

Este trabalho é direcionado para a Aciaria Elétrica, que segundo Figueira (2007), é responsável pela produção de 1/3 de todo aço consumido no mundo na atualidade. Este processo possui um papel importante na sociedade, pela grande capacidade de utilizar materiais ferrosos obsoletos como uma das principais matérias primas da produção.

Porém, um eficiente controle de processo, para estabilizar e reduzir o consumo de insumos e matéria-prima, é fundamental para manter o produto competitivo no mercado, garantindo a lucratividade do negócio.

Segundo Jones (1998), os grandes ganhos alcançados em produtividade da Aciaria Elétrica ao longo dos anos devem-se, principalmente, ao avanço das práticas relacionadas ao emprego do oxigênio no forno elétrico a arco (FEA). Porém, segundo Bihel et al (2006), os resultados com o emprego do oxigênio realmente são satisfatórios se determinados pontos forem respeitados. Estes pontos estão relacionados as particularidades que devem ser observadas durante o projeto de instalação dos injetores, assim como aos parâmetros operacionais utilizados durante a produção da corrida.

Os estudos deste trabalho foram realizados na Gerdau Riograndense, que é uma planta semi-integrada no conceito *mini mill*, operando com uma Aciaria Elétrica composta por dois FEA de 460.000 t/ano de capacidade. Localizada no município de Sapucaia do Sul no estado do Rio Grande do Sul, é uma das Usinas do grupo Gerdau, considerado o 12º maior produtor de aço do mundo, mantendo operações em todas as Américas, Europa e Índia.

O objetivo principal do estudo é determinar os melhores parâmetros de pressão e vazão de operação dos atuais injetores supersônicos *multi point double flow* (MPDF) utilizados no Forno 3. Para verificar a eficiência destes parâmetros, será avaliado o teor de

FeO da escória, consumo de oxigênio, consumo de energia elétrica, erosão do bico injetor, desgaste do refratário e as ocorrências de entupimento dos bicos.

Será também testado um injetor com redução do diâmetro de garganta do bico. Neste experimento, será comparado o consumo de oxigênio, rendimento metálico e consumo de energia elétrica entre o injetor atual de diâmetro de garganta 9,85 mm e o modelo novo com diâmetro de garganta 8,60 mm.

Os temas buscados na literatura para embasamento teórico abordam assuntos referentes ao mercado siderúrgico na atualidade e as rotas de produção do aço a base de minério de ferro e de sucata. Além disto, serão descritos conhecimentos voltados as energias empregadas em forno elétrico a arco para a fusão da sucata, assim como as técnicas relacionadas a injeção de oxigênio e espumação da escória.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são abordados alguns temas relacionados à produção do aço, como o panorama do mercado siderúrgico atual, rotas de fabricação, utilização de energias e aplicação das técnicas relacionadas ao emprego de oxigênio.

### **2.1 MERCADO SIDERÚRGICO**

Mesmo com o desenvolvimento de novos materiais com as mais variadas características ao longo dos anos, o aço continua sendo um produto importante na economia mundial, consumido em larga escala por grande parte da população.

#### *2.1.1 Consumidores do Aço*

Apesar de o aço perder espaço para materiais produzidos a partir de petróleo ou cerâmica, continua largamente empregado nas indústrias de automóvel, construção civil, máquinas industriais e variados tipos de produtos metálicos. Pode-se ver na Figura 1 as principais aplicações do aço.

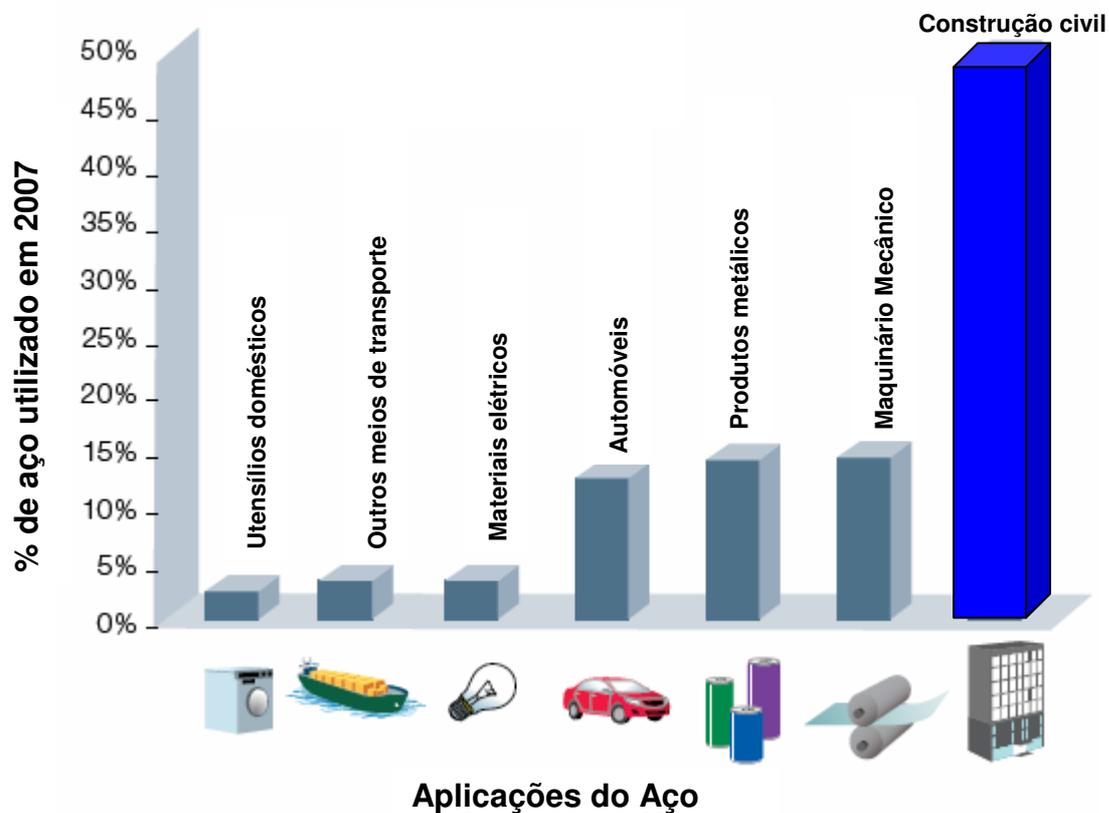


Figura 1 – Principais aplicações do aço na sociedade.

Fonte: World Steel Association (2008)

### 2.1.2 Produção Mundial de Aço

Um motivo importante pelo qual o aço garante seu espaço no mercado mundial é que as suas características mecânicas podem sofrer inúmeras adequações de acordo com a necessidade de emprego. Estas características podem ser alcançadas tanto com a alteração em sua composição química como por tratamentos térmicos, químicos ou mecânicos. Na Figura 2 observa-se a produção de aço ao longo das últimas décadas.

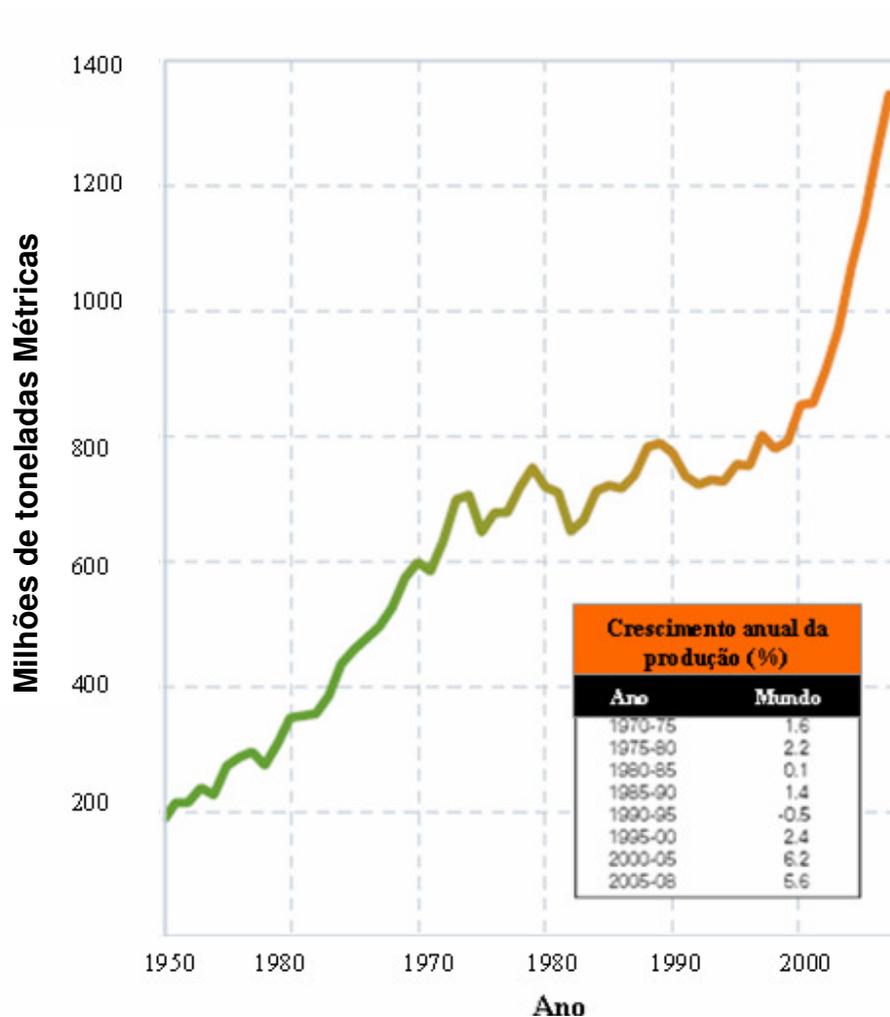


Figura 2 – Produção mundial de aço bruto 1950 à 2008 (mmt).

Fonte: World Steel Association (2009).

Outro motivo importante que mantém o aço em uma posição favorável no mercado é o preço. A evolução e aprimoramento da indústria siderúrgica ao longo das décadas, com o contínuo investimento em novas tecnologias, garante uma melhoria nos processos produtivos, refletindo na redução de custo e melhoramentos da qualidade do produto oferecido aos clientes.

Apesar da grande expansão da produção de aço nas últimas décadas, o setor foi bastante afetado pela recente crise econômica internacional. Verificou-se uma queda na produção entre os anos 2007 e 2008 de 1.351,3 para 1.326,5 milhões de toneladas.

A grande queda de produção foi verificada principalmente no segundo semestre do ano de 2008. O primeiro semestre de 2009 vem apresentando uma redução de aproximadamente 22% na produção mundial, se comparada ao mesmo período do ano anterior.

As expectativas para o mercado nos próximos anos, segundo World Steel Association (2009), é de que a produção de aço volte a crescer, impulsionada pela grande demanda dos países em desenvolvimento. É esperado que a indústria do aço se torne mais competitiva e eficiente quando a economia mundial se recuperar.

Como pode ser visto na Tabela 1, China, Japão e EUA são os três maiores produtores de aço no mundo na atualidade. O Brasil ocupa a nona posição.

Tabela 1 – Os dez maiores produtores de aço do mundo em 2008.

<b>Nº</b>	<b>Pais/Região</b>	<b>Produção de Aço Bruto (Milhões de toneladas métricas)</b>
<b>1</b>	China	500,5
<b>2</b>	Japão	118,7
<b>3</b>	Estados Unidos	91,4
<b>4</b>	Rússia	68,5
<b>5</b>	Índia	55,2
<b>6</b>	Corréia do Sul	53,6
<b>7</b>	Alemanha	45,8
<b>8</b>	Ucrânia	37,1
<b>9</b>	Brasil	33,7
<b>10</b>	Itália	30,6

Fonte: World Steel Association (2009).

### 2.1.3 Principais Empresas Produtoras

Nos últimos anos, os movimentos de mercado mostram que a indústria siderúrgica passou por um processo de fusões das grandes companhias, que estão concentrando grande parte da produção mundial em um número pequeno de produtores. Isto confere às empresas grandes vantagens competitivas, como por exemplo, na aquisição de insumos e matérias-primas, diluição de custo fixo e domínio do mercado consumidor. Apesar desta década ser marcada pelo processo de grandes fusões, estes movimentos também foram bastante afetados durante a crise internacional que iniciou no ano de 2008. A crise causou uma grande descapitalização das empresas, provocada pela redução drástica da demanda internacional de aço. Na Tabela 2 apresenta-se a composição dos principais produtores de aço no mundo.

Tabela 2 – Maiores produtores de aço do mundo nos anos de 2007 e 2008 (Milhões de toneladas de aço bruto produzido)

	2008	2007		2008	2007		2008	2007	
1	101.6	1	116.4	ArcelorMittal <sup>1</sup>	41	6.9	41	7.3	Salzgitter <sup>5</sup>
2	37.5	2	35.7	Nippon Steel	42	6.9	43	6.9	voestalpine
3	35.4	6	28.6	Baosteel Group	43	6.8	45	6.6	Panzhuhua Steel
4	33.3	4	31.1	Hebei Steel Group	44	6.5	38	7.8	Jianlong Group
5	32.4	3	34.0	JFE	45	6.5	44	6.8	BlueScope
6	31.7	5	31.1	POSCO	46	6.4	46	6.4	Metallinvest
7	27.7	11	20.2	Wuhan Steel Group	47	6.4	47	6.4	Beitai Steel
8	24.4	7	26.5	Tata Steel <sup>2</sup>	48	6.1	58	5.2	Guofeng Steel
9	23.8	8	23.8	Shandong Steel Group	49	6.1	50	6.1	SSAB
10	23.2	10	21.5	US Steel	50	6.0	56	5.4	Erdemir
11	20.4	12	20.0	Nucor	51	5.9	53	5.9	AK Steel
12	20.4	13	18.6	Gerdau	52	5.9	51	6.1	Mechel
13	19.2	15	17.3	Severstal	53	5.7	52	6.0	Nanjing Steel
14	19.2	9	22.9	Jiangsu Shagang Group	54	5.6	42	7.0	Ilyich
15	17.7	17	16.2	Evrz	55	5.4	59	5.0	Tonghua Steel
16	16.9	14	17.9	Riva	56	5.3	54	5.6	Xinyu Steel
17	16.0	18	16.2	Anshan Steel	57	5.2	55	5.5	HKM <sup>6</sup>
18	15.9	16	17.0	ThyssenKrupp <sup>3</sup>	58	5.1	63	4.5	Sanming Steel
19	15.0	19	14.2	Maanshan Steel	59	5.0	57	5.3	CSN
20	14.1	21	13.8	Sumitomo Metal Ind	60	4.7	61	4.6	HADEED
21	13.7	20	13.9	SAIL	61	4.5	66	4.4	Tianjin Tiantie Group
22	12.2	24	12.9	Shougang Group	62	4.4	71	4.0	Hebei Jinxi Group
23	12.0	22	13.3	Magnitogorsk	63	4.3	60	5.0	Steel Dynamics
24	11.3	30	9.7	Novolipetsk	64	4.3	68	4.1	Pingxiang Steel
25	11.3	26	11.1	Hunan Valin Group	65	4.3	64	4.5	Ezz Group
26	11.0	27	10.9	China Steel Corporation	66	4.0	70	4.1	Nisshin
27	10.4	23	13.1	Techint <sup>4</sup>	67	4.0	69	4.1	Tianjin Steel
28	10.0	28	10.1	IMIDRO	68	3.9	62	4.6	Zaporizhstal
29	9.9	25	11.6	Industrial Union of Donbass	69	3.8	81	3.0	JSW Steel
30	9.9	29	10.0	Hyundai Steel	70	3.7	72	4.0	Lion Group
31	9.8	34	8.8	Baotou Steel	71	3.7	74	3.5	AHMSA
32	9.2	31	9.3	Taiyuan Steel	72	3.7	83	3.0	ICDAS
33	9.0	33	9.0	Anyang Steel	73	3.6	67	4.3	SIDOR <sup>7</sup>
34	8.2	32	9.1	Metinvest	74	3.6	76	3.5	Hangzhou Steel
35	8.2	36	8.1	Celsa	75	3.5	91	2.7	Hebei Jingye Steel
36	8.1	37	8.1	Kobe Steel	76	3.5	75	3.5	Chongqing Steel
37	8.0	35	8.7	Usiminas	77	3.4	93	2.7	Commercial Metals
38	7.5	49	6.2	Rizhao Steel	78	3.4	73	3.6	Essar Steel
39	7.4	39	7.6	Berxi Steel	79	3.4	77	3.5	Tokyo Steel
40	7.0	40	7.4	Jiuquan Steel	80	3.1	79	3.2	Vizaa Steel

Fonte: World Steel Association (2009)

A Gerdau ao longo dos anos vem apresentando um constante processo de expansão, e atualmente ocupa a 12<sup>a</sup> posição no mercado mundial.

## 2.2 ROTAS DE PRODUÇÃO DO AÇO

A produção mundial de aço segue basicamente por duas rotas:

- A base de minério de ferro;
- A base de sucata.

Na Figura 3 pode-se observar um desenho ilustrativo das rotas produtivas para produção de aços longos.

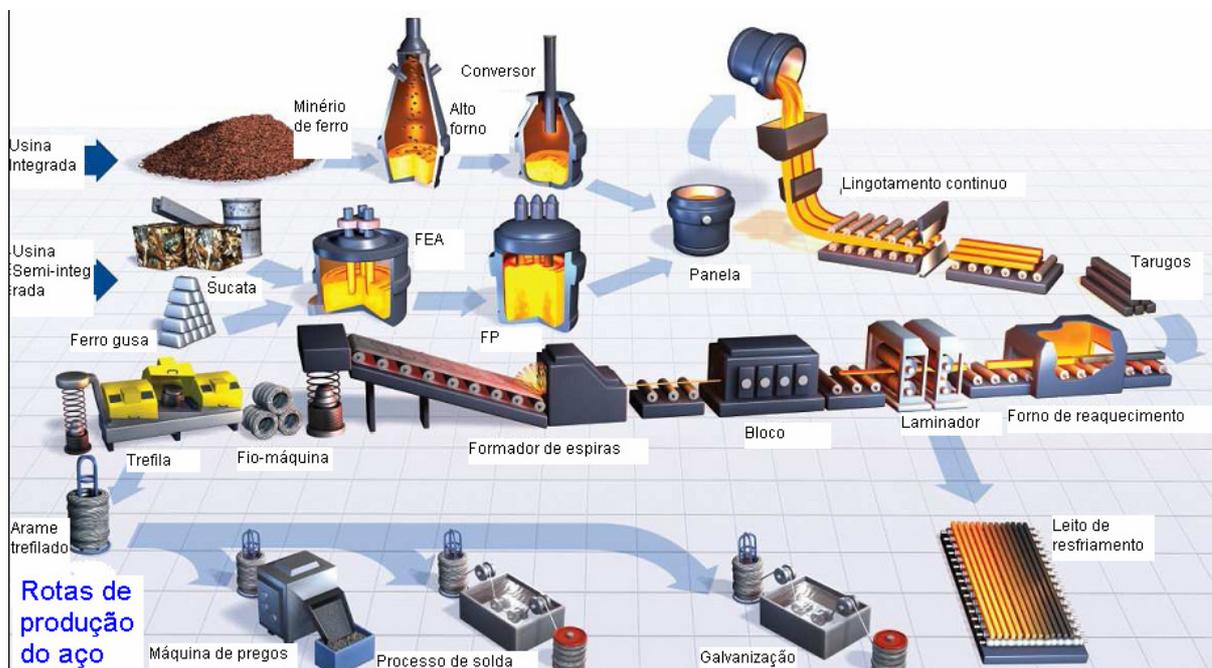


Figura 3 – Etapas de produção do aço em uma usina siderúrgica.

Fonte: site institucional do Grupo Gerdau ([www.gerdau.com.br](http://www.gerdau.com.br)) – (2008)

No topo da Figura 3, é ilustrado o fluxo de produção de uma usina integrada composta por minério de ferro, alto-forno, convertedor e panela.

No segundo fluxo, é caracterizado o processo semi-integrado, composto a base de sucata metálica, forno elétrico a arco e forno panela.

Ambos os processos culminam no lingotamento contínuo para a solidificação do aço.

### 2.2.1 A base de minério de ferro

Segundo Sandberg (2005), esta rota caracteriza-se pelo uso de alto-forno e convertedor a oxigênio. É o processo responsável por 2/3 de toda a produção de aço no mundo, já no Brasil a sua parcela é ainda maior, onde corresponde a ¾ de toda a produção. Segundo Figueira (2007), esta rota é viável em plantas de larga escala de produção, variando de 2 a 10 milhões de toneladas ano, isto porque o capital investido por tonelada de aço produzido é muito elevado.

#### 2.2.1.1 Alto-forno

Esta rota de produção começa no aquecimento e redução do minério de ferro em um equipamento chamado de alto-forno. O produto do alto-forno é o ferro reduzido com teor de 4 a 5% de carbono a uma temperatura de aproximadamente 1450<sup>0</sup> C, que é conhecido como ferro gusa. O processo de alto-forno possui um sistema de carregamento contínuo, onde pelo topo são carregadas as matérias primas como minério de ferro, sinter e/ou pelotas, coque e formadores de escória. Já em sua base é injetado combustível e ar aquecido através de ventaneiras, que em contato com o material do topo produzem gases, escória e o ferro gusa líquido.

Maiores detalhes sobre alto-forno poderão ser consultados em Rizzo (2005).

#### 2.2.1.2 Convertedor a oxigênio (LD)

A segunda etapa desta rota de produção é a transferência do ferro-gusa líquido para o LD, onde o objetivo é reduzir o teor de carbono de 4 para cerca de 0,05%, já que o ferro é tecnicamente chamado de aço quando possui teores de carbono inferior a 2%. A redução do carbono é alcançada pela injeção de oxigênio através de uma lança pelo topo, ou então, com ou sem o auxílio de injetoras pela base. Neste processo além do carbono, elementos como o Si, Mn, S e P também são oxidados, gerando com isto muito calor. Por este

motivo, há a necessidade de carregar até 30% da carga do convertedor com sucata ou minério de ferro, a fim de refrigerar o banho.

O produto desta etapa anterior é o aço bruto oxidado, que então é transferido para panela, onde na etapa do refino secundário é ajustada, através da adição de ferroligas, a composição química da corrida. A temperatura também é ajustada nesta etapa, já que a grande maioria destes processos é equipado com um sistema de eletrodos de grafita, ligados a energia elétrica do forno-panela e que promovem o aquecimento do banho. Equipamentos de desgaseificação também são utilizados em alguns casos. Concluído este processo o aço está pronto para ser solidificado.

Maiores detalhes sobre LD poderão ser consultados em Rizzo (2005).

### 2.2.1.3 Particularidades da rota de produção do aço via minério de ferro

Segundo Sakamoto (1999), o consumo total de energia para produção de aço bruto via minério de ferro é 2,6 vezes superior se comparada com aciaria elétrica (utiliza maior parte da carga de ferro já reduzido). Isto porque 62% de toda energia consumida neste processo é utilizada na fabricação de coque, sinter e redução do minério de ferro, sendo que 98,9% da energia é obtida do carvão. Isto reflete em grande impacto ambiental pela grande geração de gases como CO e CO<sub>2</sub>, responsáveis pelo efeito estufa. Medidas governamentais no Brasil forçaram todas as empresas que utilizam alto-forno e carvão vegetal a plantarem a suas próprias florestas. Isto provocou um enorme avanço tecnológico na área agrícola, aumentando o desempenho produtivo de cada hectare plantado de 9 para 13 t/ha/ano.

Estão sendo desenvolvidos também processos de redução direta que consistem em reduzir o minério de ferro com redutor sólido, geralmente carvão mineral não coqueificável, ou então por meio gasoso através de gás natural. Assim, eliminando etapas de coqueria, sinterização e alto forno. O produto deste processo é o ferro-esponja (DRI), que ainda não conquistou um volume elevado no mercado, quando comparado com o ferro-gusa. Outro processo ainda em desenvolvimento é o chamado de TECNORED. Este processo utiliza como carga aglomerados auto-redutores e um combustível bitolado. Estes aglomerados são reduzidos e fundidos num forno de geometria retangular, onde é soprado ar quente na cuba inferior e ar frio na cuba superior.

### 2.2.2 Rota à base de sucata

As aciarias elétricas são responsáveis por 1/3 da produção de aço bruto em todo mundo e não exigem as etapas de redução de ferro, isto porque a sua principal matéria-prima é sucata metálica ferrosa.

#### 2.2.2.1 Sucata

Segundo Sandberg (2005), a sucata pode ser classificada em aproximadamente 20 tipos para aços ao carbono comuns, e em mais de 100 tipos quando se trata de aços especiais. Esta classificação é realizada com base na origem, fornecedor, composição química, impurezas, grau de oxidação, energia específica para fusão e distribuição das dimensões.

Atualmente, os custos de matérias primas representam entre 50 e 70% do custo total de produção do aço semi-acabado em aciaria elétrica.

As principais fontes geradoras de sucata segundo Chevrand (2007) são:

- Sucata de retorno interno

A sucata de retorno interno no mundo ocidental representa de 10 a 60 kg/t na aciaria e até 150 kg/t na usina como um todo. O seu valor econômico é muito alto e deve ser comparado com as melhores sucatas do mercado, porém seu custo é mínimo e a composição química corresponde a média produzida na Usina. A disponibilidade deste tipo de sucata está em constante declínio, pela melhoria generalizada dos processos das usinas siderúrgicas.

- Sucata industrial

O fator gerador de sucata é altamente dependente da força relativa das várias indústrias que usam o aço. A indústria automobilística tem um fator gerador de 26 a 30% de retorno de sucata por tonelada de aço processado, enquanto a indústria de construção civil possui um fator gerador de sucata de 4 a 7%. O fator gerador totalizado varia entre 13 a 16 % do consumo aparente de aço na indústria no mundo. A composição química desta sucata é boa, já que 2/3 de toda produção mundial de aço é de aciaria a oxigênio, panorama que deve mudar nos próximos anos com o aumento da produção via FEA.

- Sucata de Obsolescência

Segundo Chevrant (2007), produtos fabricados pela indústria de processamento têm uma vida média de 50 a 80 anos para uma ponte, algumas semanas para uma lata de indústria alimentícia, ou então, aproximadamente 11 anos para um automóvel. No Japão em 1990, a vida média de um produto fabricado a partir de aço era em torno de 14,5 anos. Alguns estudos americanos mostram que, tecnicamente, 70% de todo aço produzido poderia ser reciclado, porém estimativas mostram um índice de 35 a 40% na Europa e nos EUA.

O preço da sucata é extremamente ligado às condições de mercado, regulado basicamente com base na oferta e procura, e flutuações dos ciclos econômicos.

Segundo Chevrant (2007), no Brasil a utilização do ferro gusa é muito importante na composição da carga. Geralmente é utilizado 330 kg/t de carga contra valores médios de 43 kg/t no mundo ocidental. Isto se deve ao fato da enorme carência de sucata no mercado brasileiro, e as indústrias se aproveitam do carbono do ferro-gusa como uma fonte energética capaz de elevar a produtividade dos fornos, além de produzir aços mais nobres pela baixa quantidade de impurezas da carga. A alta densidade do ferro-gusa também é uma característica que favorece o seu uso.

Com mercado estável, as variações de custo de sucata estão ligadas ao transporte, e correspondem a aproximadamente 10 a 35% do custo do preço original. Isto se aplica mesmo dentro do país, já que, para atravessar um oceano, o custo não é mais caro do que o transporte via terrestre, em distâncias entre 1.000 e 1.200 km. O comércio internacional de sucata é cada vez menos praticado, com algumas exceções na Europa.

Ao chegar à planta industrial, a sucata é encaminhada ao pátio de sucata, que possui a função de preparar e fornecer a sucata para o processo seguinte que é o forno elétrico a arco. Em alguns casos, a sucata é processada para viabilizar o seu transporte entre o fornecedor e a planta. A preparação de sucata consiste em processar a carga metálica previamente, a fim de remover impurezas, adequar as dimensões e aumentar a sua densidade. A classificação da sucata é muito importante, porque além dos resultados de processo, a qualidade do aço produzido pela aciaria depende muito do tipo de carga metálica carregada no forno. Entende-se como resultado de processo a qualidade de escória, do aço e emissões de gases, assim como o rendimento metálico e consumo energético.

Na qualidade do aço, o reflexo do tipo de sucata carregada é percebido na composição química através do percentual de elementos residuais e nocivos às propriedades do aço (Cu, Sn, S, P). Pode também influenciar no tipo de inclusões não metálicas, muitas

vezes prejudiciais no processo de transformação do aço quando presentes em quantidade elevada, como por exemplo, nas forjarias.

Os principais métodos utilizados no processamento da sucata são os seguintes:

- Prensa tesoura – Prensa a sucata, e em seguida, através de uma tesoura tipo guilhotina corta a sucata. E em alguns casos esta sucata é transferida para um sistema vibratório para remover terra ou qualquer outro tipo de impureza.
- *Shredder* – Equipamento composto por moinho e grelhas, que promovem além da retirada de material orgânico e terra, a retirada de material não metálico como o alumínio, cobre etc.
- Prensa pacote – Prensa responsável em gerar pacotes de sucata, geralmente utilizado em embalagens metálicas (latas de alimentos descartadas).
- Oxicorte – Equipamento utilizado para cortar sucatas de grandes dimensões como navios, blocos de máquinas industriais, engrenagens de grandes dimensões, etc.

Geralmente a carga metálica carregada no FEA não é totalmente de sucata, ou seja, ferro-esponja ou ferro-gusa podem ser utilizados no cestão, ou como em alguns casos, carregados continuamente. São carregados também com a carga metálica os materiais fundentes (cales) e carburantes (carvão ou coque).

Segundo Chevrand (2007), devido ao uso sempre crescente de isótopos radioativos na indústria e na medicina, é possível a incorporação destes materiais na carga metálica. Isto quando acontece, gera um caro processo de descontaminação.

A maioria das fontes de irradiação está enclausurada em containeres de chumbo, por isto a detecção exige equipamentos muito sensíveis, capazes de aumentar a confiabilidade dos controles da sucata na entrada na usina. Equipamentos mais baratos instalados nos espectrômetros ou no sistema de despoeiramento alarmam somente quando a contaminação já aconteceu.

#### 2.2.2.2 Forno Elétrico a Arco (FEA)

A primeira patente de FEA foi concedida ao Sir William Siemens em 1878. A primeira planta industrial foi instalada por Paul Héroult nos Estados Unidos em 1907, e todas as plantas até a II Guerra Mundial fabricavam somente aços especiais.

Segundo Figueira (2007), o processo de FEA iniciou sua expansão na Europa após a II Guerra Mundial, onde havia na época uma grande demanda por aço para a reconstrução, e por outro lado uma grande disponibilidade de sucata gerada durante a guerra. Outro ponto que favoreceu esta expansão foi a menor necessidade de capital investido neste tipo de planta, se comparado às usinas integradas (aciaria elétrica: 140-200 US\$/t/ano – integradas: 1000 US\$/t/ano)

Em 1969, a NUCOR, que atualmente é uma das maiores produtoras de aço dos Estados Unidos e a 11ª do mundo, inaugurou a primeira “mini mill” baseada em forno elétrico a arco. O grande sucesso da NUCOR foi devido a flexibilidade de produtos e a capacidade de atender as demandas regionais de um país de dimensões continentais, além de consumir sucata gerada também regionalmente. A partir deste modelo de sucesso, este processo (FEA + mercado local) se expandiu para todo o mundo.

O FEA como mostra a Figura 4, consiste em equipamento composto basicamente por uma carcaça metálica revestida por material refratário e painéis refrigerados. Esta carcaça é coberta pela abóbada, através da qual descem eletrodos de grafita, que são condutores de eletricidade responsáveis pela formação do arco elétrico, e pela transferência da energia para a sucata a fim de promover a sua fusão.

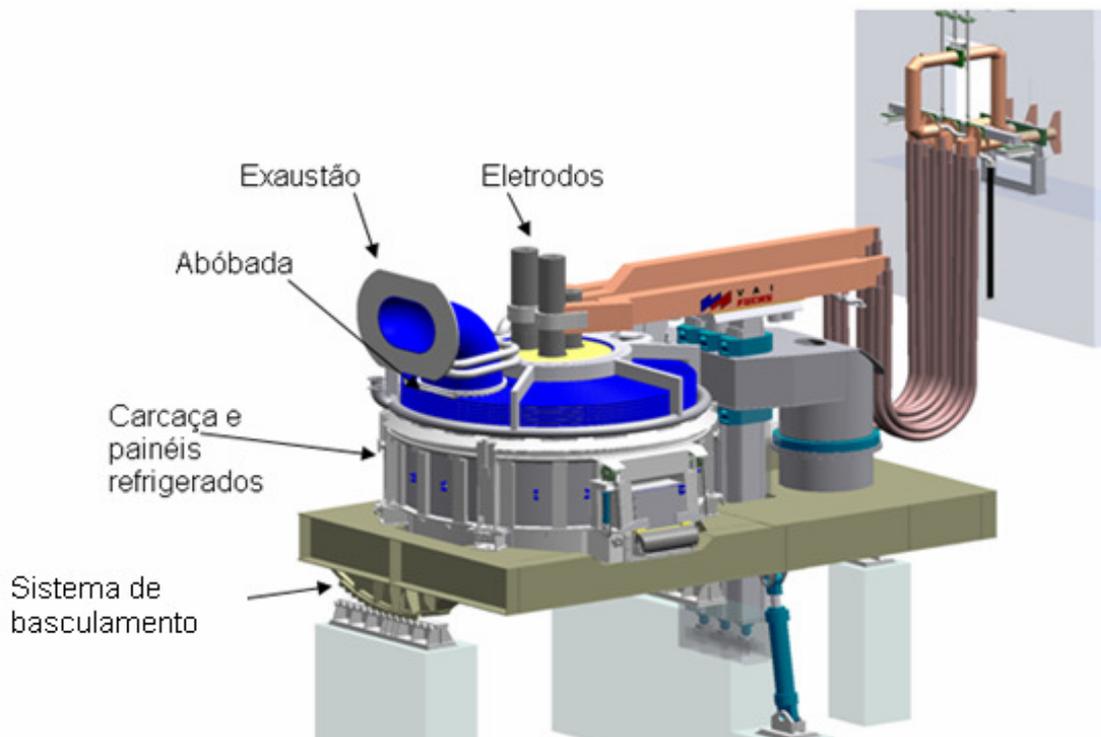


Figura 4 – Representação esquemática do FEA  
Fonte: Curso de Aciaria Elétrica ABM (2007)

Com a forte demanda mundial de aço e a grande competitividade, a tendência dos fornos é de aumentar sua potência ao máximo, assim como o seu máximo peso de vazamento por corrida. Segundo Figueira (2007), o limite de tensão utilizado nos FEAs é de 1200 V, devido a capacidade de isolamento dos condutores. Com este fator limitante, para aumento de produtividade, foram desenvolvidas outras tecnologias, como por exemplo, métodos de injeção de combustíveis pela carcaça para gerar energia química.

Os FEAs com base em sua potência podem ser classificados conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação dos Fornos Elétricos a Arco

Potência específica (kVA/t)	Classificação
< 200	Baixa potência
200 – 400	Média potência
400 – 700	Alta potência
>700	Ultra Alta Potência

Fonte: Operação de Forno Elétrico a Arco, Figueira (2007)

A Figura 5 mostra o panorama mundial de potência do FEAs em relação à capacidade por corrida.

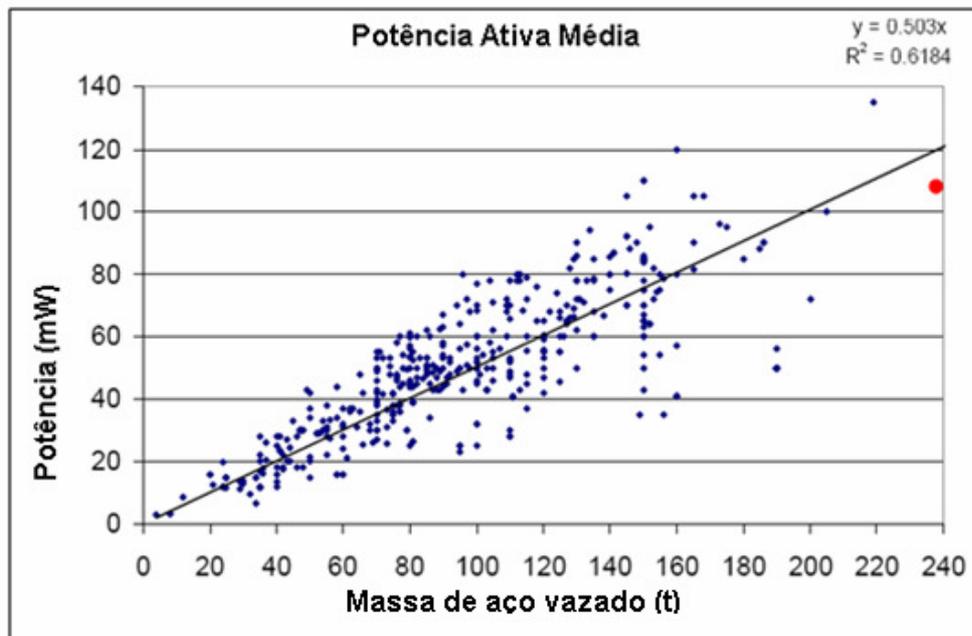


Figura 5 – Potência dos Fornos Elétricos e sua capacidade produtiva por corrida.

Fonte: EAF Current & Future Trends, Terry Wells, UCAR (2008)

A Figura 6 mostra a produtividade dos FEAs em nível mundial, relacionando o tamanho de corrida com a produção horária, onde a tendência é de que fornos de tamanho maior possuam maior capacidade de produção horária, isto se houver potência disponível, como visto na Figura 5. A linha vermelha representa o limite de produção característico, limitado pela potência disponível dos fornos.

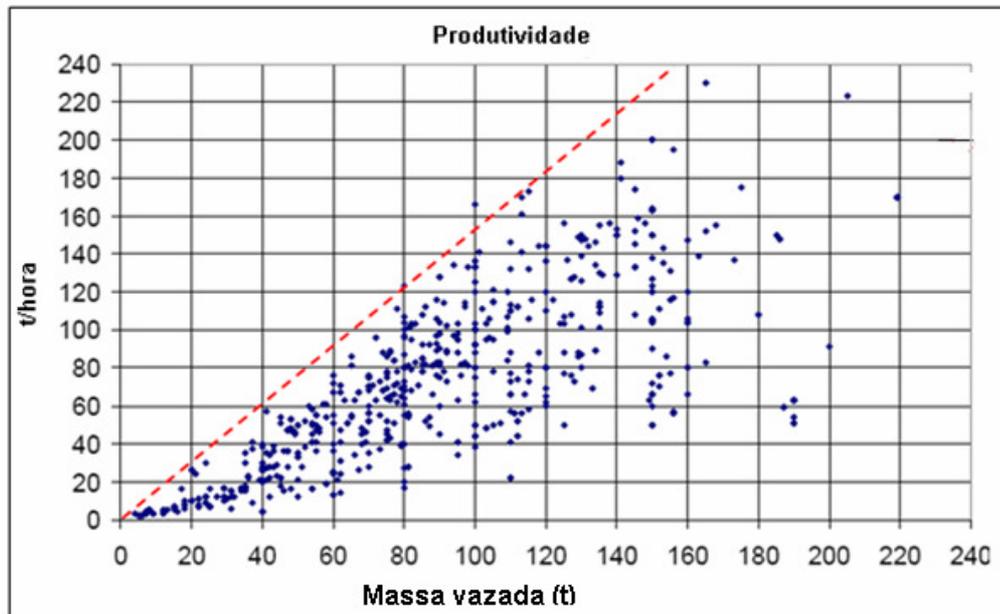


Figura 6 – Produtividade dos Fornos Elétricos a Arco  
 Fonte: EAF Current & Future Trends, Terry Wells, UCAR (2008)

Esta etapa do processo da aciaria elétrica recebe a carga metálica geralmente no estado sólido. Pode também receber o ferro gusa no estado líquido se disponível na usina, ou então, como acontece em algumas plantas, a carga é pré-aquecida por gases quentes oriundos de outro processo ou até mesmo do próprio sistema de exaustão do FEA.

O forno elétrico entrega o metal líquido para o processo seguinte, respeitando determinadas características de qualidade, como a faixa ideal de temperatura, composição química do aço e da escória.

As etapas deste processo, entre o recebimento da carga e a entrega do aço líquido, podem ser divididas em:

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

O carregamento se realiza posicionando-se os eletrodos na posição superior permitida pelas instalações físicas e abrindo-se a abóbada do forno. Em algumas aciarias a sucata é previamente aquecida pelos gases de exaustão e pode ser carregada de forma contínua pela lateral do forno por meio de esteiras.

Segundo Memoli (2009), está em fase de instalação no Brasil, para operar em 2010, a usina da V&M em parceria com a Sumitomo do Japão, em MG. Esta planta vai utilizar o processo *Consteel*, que constitui um FEA com aquecimento prévio da carga através dos gases que deixam o forno e com carregamento de gusa sólido e líquido de até de 80% da carga. Neste processo o forno irá operar com a abóbada fechada, sem a necessidade de utilizar carregamento com cestões. A sucata será carregada através de esteiras que estarão dentro do túnel do sistema de despoeiramento, pelo qual passam os gases quentes oriundos do forno. Esta combinação garantirá alta produtividade e custos reduzidos, além de diminuir os impactos ambientais. Os consumos médios de energia elétrica deverão variar entre 335 e 355 kWh/t, uma vez que, a carga de sucata deve chegar a uma temperatura ente 300 e 400° C previamente em contato com os gases da exaustão. Como neste tipo de processo, o forno não abre para efetuar o carregamento e o sistema de exaustão possui dutos de seção maior em relação aos dutos de quarto furo convencionais, partículas maiores do pó cairão sobre a sucata retornando ao forno, reduzindo desta maneira 20 a 30% do total de pó produzido pela Aciaria.

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

A densidade da sucata basicamente define a quantidade de carregamentos necessários no forno para uma corrida. O custo adicional de cada carregamento no FEA equivale ao custo de cerca de 3 minutos no tempo da corrida, menor rendimento (mais oxidação), além de aumentar o consumo de eletrodos e de energia elétrica. Sucatas de densidade entre 0,8 e 1,0 t/m<sup>3</sup> necessitam geralmente dois carregamentos segundo Brito (2008).

As dimensões da sucata variam conforme o tamanho do forno, mas de forma geral é limitada em peças de até 1 metro de comprimento. Pedacos maiores podem causar cargas muito altas e que dificultam o fechamento da abóbada, assim como podem danificar os painéis refrigerados, seja por colisão, seja por arco elétrico.

Segundo Ribeiro e Granado (2007), a forma de como a sucata é estratificada no cestão interfere muito no desempenho do FEA, tanto na segurança como no custo da operação.

Os autores sugerem a estratificação conforme Figura 7.

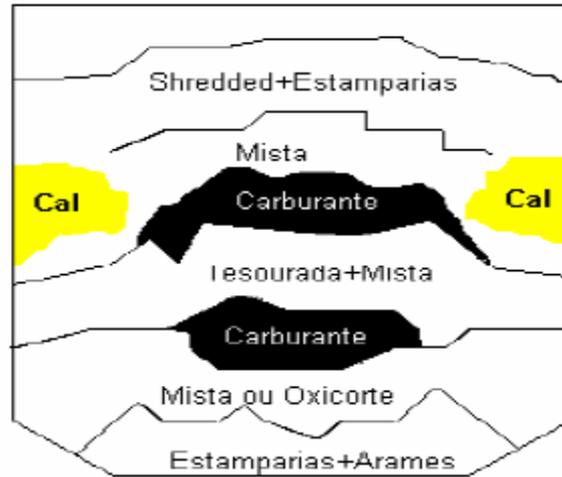


Figura 7 – Modelo de estratificação da carga no cestão para carregamento no Forno.

Fonte: Curso de Aciaria Elétrica, Ribeiro e Granado (2007).

Na base do cestão a camada deve ser de sucata leve, isenta de umidade e de óleo, e ocupar até 10% de todo o volume do cestão. Sucatas muito pesadas nesta região agredem o refratário da soleira do FEA durante o seu carregamento. Sucata úmida ou com óleo aumenta os riscos de explosão, já que é esta a primeira sucata a entrar em contato com o aço líquido ou escória dentro do forno.

Na segunda camada do cestão é recomendado posicionar sucatas pesadas, ou seja, de alta densidade. A principal justificativa para este posicionamento é de que sucatas muito pesadas posicionadas em regiões superiores podem gerar quedas e conseqüentes quebras de eletrodos durante a etapa de fusão da carga. É recomendado um volume de até 15% da carga.

Na terceira camada é indicada a colocação do ferro-gusa e dos carburantes, isto favorece a descida dos eletrodos e inibe a formação de cascões.

A quarta camada deve ser composta de pacotes envolvidos com sucata média, que evita o seu deslocamento durante a fusão.

A camada superior deve ser composta por sucata leve, que possibilite a rápida penetração dos eletrodos evitando irradiação sobre a abóbada e o miolo refratário.

No contorno do cestão é recomendado o carregamento de fundentes, que distancia este material do contato direto com os eletrodos, e conseqüentemente evitando isolamentos. A

colocação da cal na base do cestão pode provocar o aumento do nível da soleira, assim como, se carregado juntamente com o cavaco pode gerar uma massa difícil de fundir, com forte possibilidade de aderir nas paredes e gerar fervuras.

Segundo Figueira (2007), o posicionamento de sucatas leves nesta região favorece a penetração da chama do queimador, ou até mesmo evita rebotes dos gases para os painéis refrigerados, caso o jato venha a colidir na sucata pesada de difícil fusão nesta posição. Sucata de fácil penetração do jato aumenta a velocidade de fusão da carga, melhorando também a produtividade do forno, além de diminuir possíveis desgastes de refratário. Sucata de difícil fusão na região da porta de escória também dificulta a utilização do oxigênio.

Logo após o carregamento do forno os eletrodos são baixados em direção à sucata e inicia-se o primeiro período de fusão, denominada perfuração. Neste período, caracterizado por intenso ruído, os três arcos são muito instáveis gerando elevada cintilação e harmônicos bastante intensos. A perfuração é realizada com potência reduzida, para tanto se diminui a tensão no secundário do transformador do forno e ajusta-se o reator para limitar a corrente. Durante a perfuração, o arco elétrico se forma muito próximo à abóbada do forno, podendo gerar um superaquecimento se não estiver operando com baixa potência. Normalmente, o tempo de perfuração não ultrapassa 2 minutos.

No período seguinte, denominado fusão, utiliza-se a potência máxima permitida pelo forno, respeitando a corrente máxima prevista para os eletrodos. Nesta fase existe já uma pequena poça de aço fundido na soleira do forno, e a medida que os eletrodos forem aproximados dela, o arco ficará bem mais estável. A sucata ainda existente nas laterais do forno, acima do arco gerado pelos eletrodos, vai proteger a abóbada de um superaquecimento, além de proteger as paredes refratárias. Vem aí a importância de não se carregar sucata pesada nas regiões superiores do cestão, porque com os eletrodos penetrados, a fusão da sucata irá acontecer no arco elétrico formado junto a poça de metal líquido (fundo), e a sucata ainda não fundida irá cair sobre o arco. A queda de sucata pesada pode vir a atingir os eletrodos e, conseqüentemente, gerar quebras. Os injetores de gases e queimadores atuam simultaneamente com arco o elétrico, contribuindo significativamente na produtividade do sistema, fundindo a sucata nas regiões não cobertas pelo arco.

O final da fusão é verificado quando toda ou praticamente toda a sucata carregada se encontra fundida.

Se a opção for de carregar o cestão seguinte com toda a carga fundida, o nível de sucata vai se baixando e expondo as paredes e abóbada à radiação do arco. Neste caso, é

necessário reduzir a tensão e, conseqüentemente, o comprimento de arco. Esta redução de tensão reduz a velocidade de fusão, prejudicando a produtividade do processo.

Outra alternativa é realizar o carregamento seguinte com alguma sucata ainda não fundida. Neste caso, não é necessário reduzir a potência, uma vez que ainda há sucata sólida para proteger paredes e abóbada. É evidente o ganho em produtividade, desde que este procedimento não exija o carregamento de um cestão adicional, ou então, a utilização de sucatas de maior densidade e que são geralmente de custo elevado.

Neste momento, o processo está preparado para receber o próximo carregamento de sucata.

A eficiência da fusão é muito importante para um bom resultado operacional do processo da aciaria elétrica. Uma regulagem inadequada dos parâmetros do forno pode gerar problemas de sucata alta dos carregamentos de sucata pela formação de cascões, além de aumentar o tempo de corrida, gerando redução na produtividade, aumento do consumo de energia, eletrodos e queda de rendimento.

Após a etapa de fusão, teoricamente o banho já se encontra no estado líquido, ou como chamado por alguns autores, o banho está plano, com a possível exposição das paredes e abóbada à irradiação. A prática até meados da década de 80 era reduzir a potência, segundo Figueira (2007). Com isto o processo perdia eficiência para elevar a temperatura do banho até a temperatura de vazamento (1580 a 1680 °C).

Para evitar esta perda desenvolveu-se então a prática de escória espumante, que consiste em criar uma escória que envolva o arco elétrico no final da fusão, absorvendo a irradiação do arco elétrico e funcionando como uma barreira de proteção dos painéis refrigerados. Além desta proteção, a escória, absorvendo o calor do arco, aumenta a eficiência térmica do processo, pois esta energia é posteriormente transferida ao banho metálico em vez de aquecer a água de refrigeração dos painéis.

A escória espumante é formada através da injeção de oxigênio no banho metálico onde ocorre a reação 2.1:



O FeO formado com a injeção de oxigênio é incorporado a escória juntamente com os demais elementos oxidados (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc) e o MgO e CaO adicionados. Nesta escória são injetados então finos de carvão, cujo carbono reage com o FeO produzindo CO segundo a reação 2.2.



Com a redução da tensão superficial e aumento da viscosidade efetiva da escória é possível reter mais CO no interior da mesma. Porém, a presença de partículas saturadas como o CaO e MgO, são decisivas para determinar a capacidade de espumação da escória. Estes fenômenos provocam um inchamento da escória, que gradativamente vai envolvendo os eletrodos e o arco elétrico, e desta maneira protegendo os painéis refrigerados.

A dificuldade encontrada pela bolha de CO para atravessar a massa de escória é causada pela força de empuxo, que regula a velocidade da bolha. Então a capacidade de formação da escória espumante está diretamente relacionada à viscosidade da escória, e inversamente proporcional à sua densidade e tensão superficial.

O teor de FeO tem um papel muito importante na espumação, pois é responsável pela geração de gás. Até certo ponto, o FeO melhora a espumação e, a partir deste, a influência sobre a viscosidade predomina, e a espumação diminui. Na Figura 8 pode-se observar a efetividade de espumação em relação ao teor de FeO da escória do forno.



Figura 8 – Influência do FeO na efetividade da espumação da escória no FEA

Fonte: Foamy slag fundamentals and their practical application to EAF Steelmaking; Brett Kuncze, Victor Araújo, Cosigua (2005)

Além do FeO, a basicidade ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) e a quantidade de MgO da escória possuem uma influência muito grande sobre a espumação da escória.

A Figura 9 mostra o efeito do MgO e FeO a uma basicidade  $B_3$  constante de 1,5 na viscosidade da escória. Entre a linha vermelha e a tracejada é indicada a área ideal de composição para espumação. Ao longo do refino a composição da escória pode variar, como por exemplo, pelo aumento ou redução do teor de FeO, ou então, pela injeção de finos a base de MgO o CaO durante esta etapa da corrida.

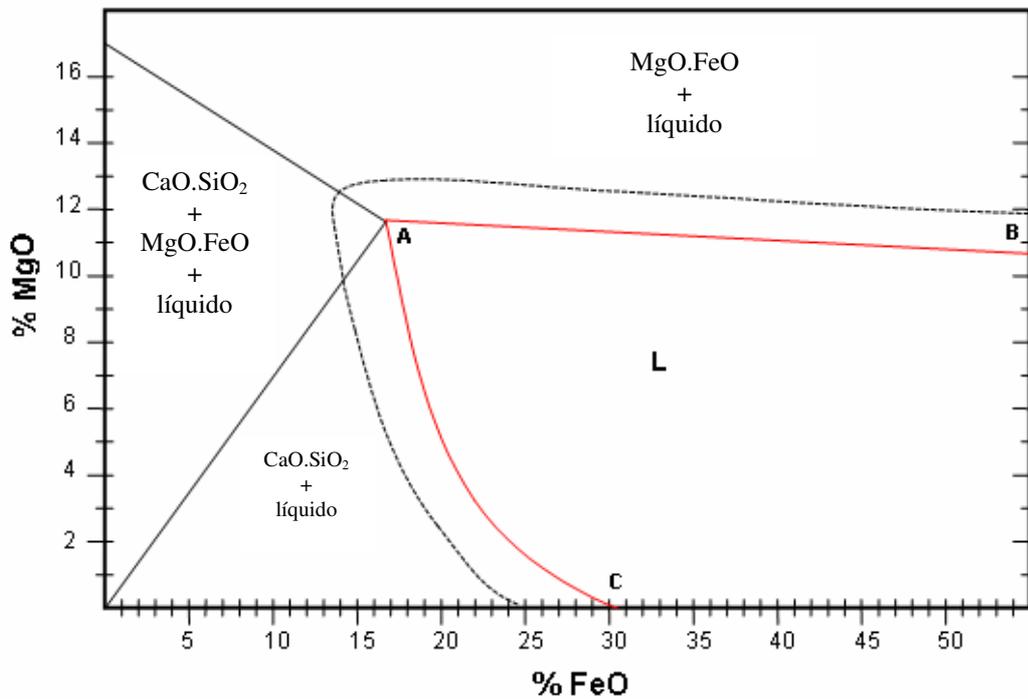


Figura 9 – Influência do FeO, basicidade e MgO na capacidade de espumação da escória  
 Fonte: Foamy slag fundamentals and their practical application to EAF Steelmaking; Brett Kuncze, Victor Araújo, Cosigua (2005)

A Figura 10 mostra a efetividade da espumação da escória para 3 diferentes condições de basicidade. É possível verificar que quanto maior a basicidade, menor é o percentual de saturação do MgO e maior o teor de FeO para obter um máximo de espumação.

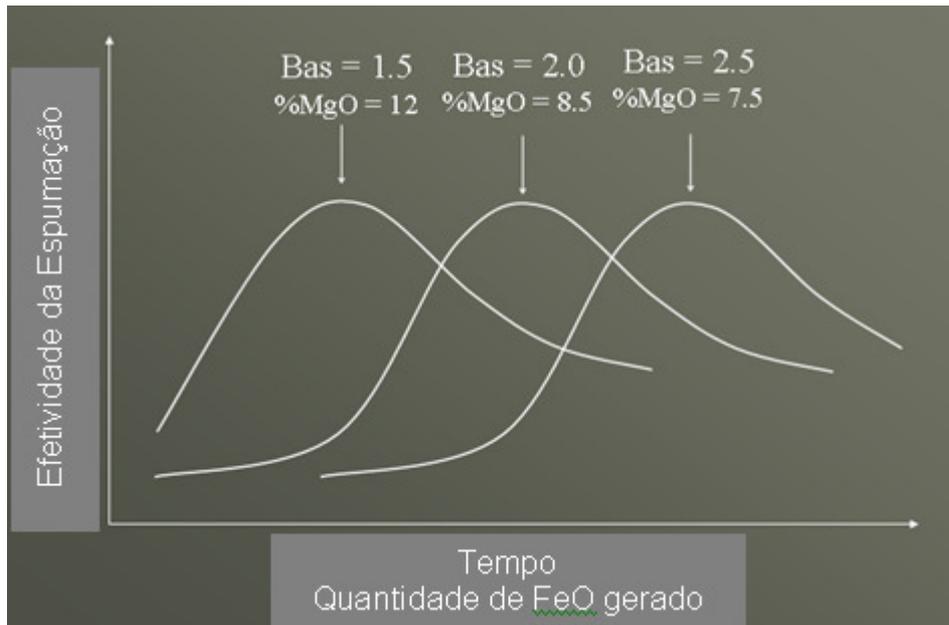


Figura 10 – Influência do FeO, MgO e basicidade na efetividade da espumação da escória no FEA

Fonte: Foamy slag fundamentals and their practical application to EAF Steelmaking; Kuncce, Araújo, Cosigua (2005)

Além da eficiência na espumação, as características da escória são muito importantes em índices como o consumo de refratário do FEA e a qualidade do aço vazado.

O grande desafio do processo de FEA é produzir uma escória compatível com material refratário do forno, evitando assim a sua erosão química, assim como, uma escória capaz de absorver impurezas oxidadas no banho durante o processo, como por exemplo, o fósforo, silício, alumínio, etc.

Durante a etapa de refino, pode ser retirado o excesso da escória através da porta de escória do FEA. Este procedimento evita a reversão de determinados elementos para o banho no final do processo, como por exemplo, o fósforo.

Quando o banho atinge a temperatura ideal, o aço pode ser retirado do interior do forno e depositado em um recipiente chamado de panela. Esta etapa do processo é definida como vazamento.

Os principais desafios desta operação no FEA são os seguintes:

- Controle da passagem de escória do forno para a panela;
- O aço deve absorver o mínimo possível de gases;
- A perda de temperatura deve ser a menor possível;
- Manter a quantidade ideal de aço no forno para a próxima corrida;

É importante controlar a passagem de escória do forno para a panela ao final do vazamento. Esta escória transferida, protege o banho líquido da absorção de gases e da perda

excessiva de temperatura, porém é rica em FeO e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e com a passagem excessiva pode gerar a reversão do P para o banho, além de elevar o consumo de desoxidantes e aumentar o consumo de refratários da panela. A necessidade de remover o excesso de escória da panela implica na perda de tempo, calor e aço durante a operação.

A absorção de gases depende da condição do jato, ou seja, um jato aberto favorece a absorção de O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>.

- A absorção do N<sub>2</sub> é menor quando o teor de O<sub>2</sub> for maior, ou então, em aços com alto teor de enxofre;
- A absorção de H<sub>2</sub> varia em função da pressão parcial do vapor d'água no ar, que em dias úmidos ou muito quentes é maior, portanto favorecendo uma maior absorção no aço.

A perda de temperatura varia conforme as condições prévias de temperatura da panela, tempo de vazamento e condições do jato. Jato aberto aumenta a perda de temperatura.

A retenção de metal líquido no forno no final do vazamento é importante, porque gera os seguintes benefícios:

- Antecipa a oxidação do carbono gerando calor;
- Antecipa o processo de desfosforação;
- Melhora as condições de transferência de calor durante a fusão;
- Protege a soleira do impacto da sucata durante o carregamento e da irradiação do arco elétrico durante a fusão da carga.

São dois os dispositivos geralmente utilizados para o vazamento do metal líquido para a panela, a *Eccentric Botton Tapping* (EBT) ou a bica convencional.

Segundo Chevrand (2007), atualmente mais de 70% dos FEAs do mundo utilizam furo de corrida do tipo EBT.

Os fornos primeiramente eram construídos com a chamada bica convencional. Neste modelo o aço era vazado pela parte superior da carcaça, gerando uma grande passagem de escória, exigindo muitas vezes uma posterior remoção do excesso da panela.

Este método de vazamento é ilustrado na Figura 11.

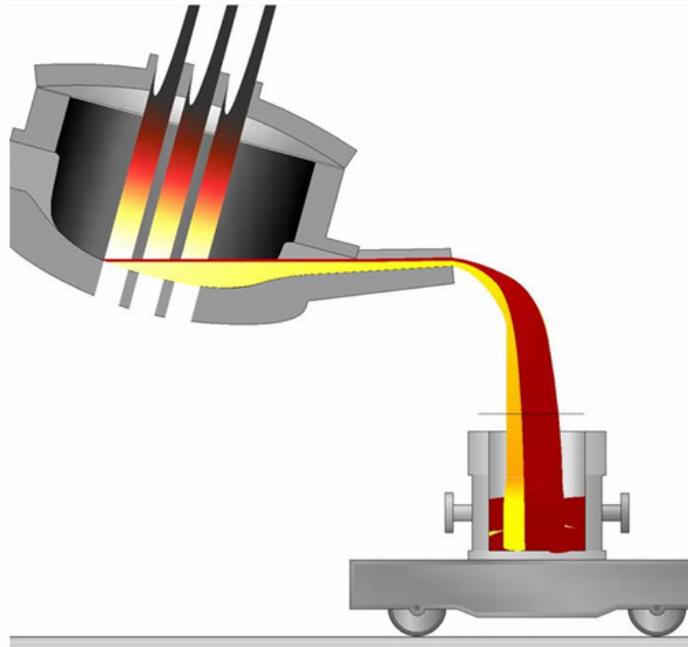


Figura 11 – Modelo de esgotamento de forno com o princípio de bica convencional.

Fonte: Operação de Forno Elétrico a Arco, Figueira (2007).

Como os métodos mencionados anteriores geravam grandes dificuldades operacionais, as pesquisas continuaram e então foi desenvolvido o canal EBT. Com este conceito, o FEA sofreu uma grande modificação em sua geometria, onde o furo de corrida passou da região superior para base do forno, localizada excêntrica no sentido vertical. Ver nas Figuras 12 e 13.

As principais vantagens deste sistema, segundo Chevrand (2007) são:

- Vazamento livre de escória, onde o ângulo de basculamento de aproximadamente 15 graus permite retornar o forno após o vazamento para a retenção de escória ou metal;
- Jato mais compacto, gerando uma menor perda de temperatura (ganho de 20 a 30 graus na temperatura de corrida) e menor absorção de gases como nitrogênio e hidrogênio;
- Menores tempos de vazamento de corrida;
- Diminuição no consumo de refratários pela possibilidade de aumentar a área de painéis refrigerados de 87 para 90%;
- Carregamento mais rápido, pela maior facilidade de manutenção do furo de corrida pelo painel superior em forma de escada.

A Figura 12 apresenta os dois sistemas utilizados para realizar o vazamento do aço.

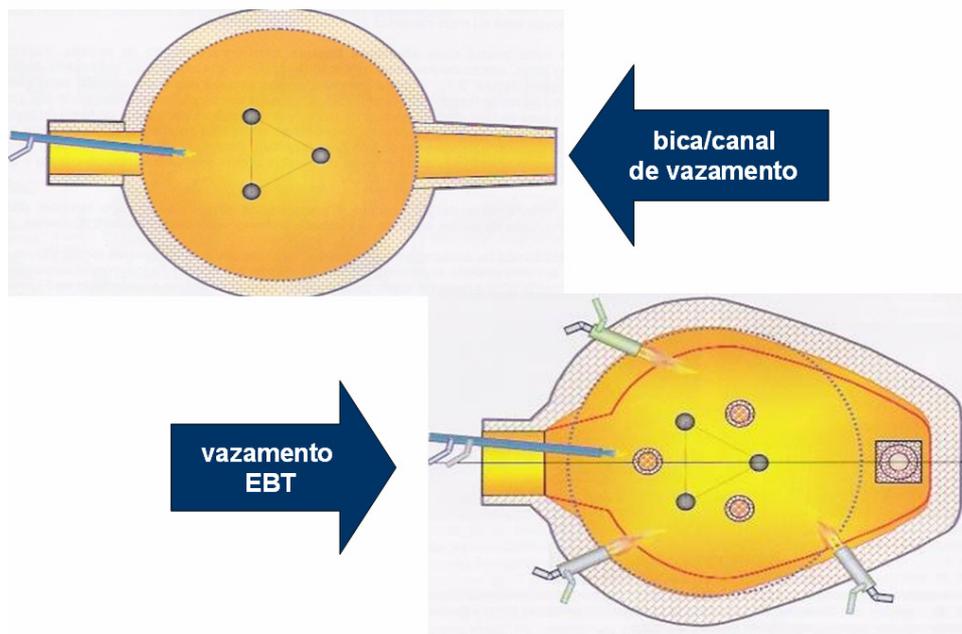


Figura 12 – Modelo de esgotamento de forno com o princípio de EBT (vista de planta).

Fonte: Operação de Forno Elétrico a Arco, Figueira (2007)

A Figura 13 ilustra o sistema EBT, visto lateralmente.

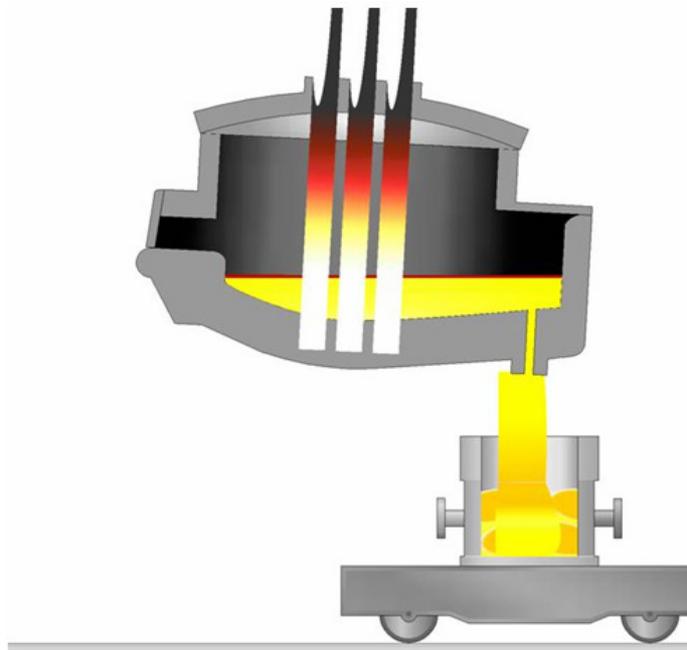


Figura 13 – Imagem representando furo de corrida EBT (vista lateral).

Fonte: Operação de Forno Elétrico a Arco, Figueira (2007)

### 2.2.2.3 Refino secundário (refino redutor)

Na atualidade, grande parte das aciarias elétricas do mundo opera com estações de refino secundário, como o forno panela.

Esta etapa do processo confere a aciaria elétrica os seguintes benefícios:

- Aumento da produtividade do FEA por diminuir os tempos de refino no interior do forno, além de favorecer o vazamento a temperaturas mais baixas;
- Melhora o ajuste de composição química, principalmente dos aços de alta liga;
- Melhora a qualidade dos aços, pela remoção de gases com  $N_2$ ,  $H_2$  e  $O_2$ ;
- Aumenta o rendimento das ligas adicionadas;
- Maior homogeneização de temperatura e composição química do aço líquido, gerado pela rinsagem com gás inerte ou agitação eletromagnética, favorecendo também a remoção de inclusões indesejadas e a desulfuração;
- A estação de FP funciona como um “pulmão” no processo entre LC e FEA. Em resumo, a estação de forno panela serve para realizar a desoxidação do metal líquido proveniente do FEA. Pode retrabalhar também, corridas retornadas do LC.

Como já comentado no item anterior, quando o aço está com as condições ideais pré-definidas, este é vazado para a panela.

A panela, no momento do vazamento, deve-se encontrar em uma temperatura ideal para receber o aço líquido, com isto se evita a perda excessiva de temperatura do aço em contato com a panela fria e se diminui o choque térmico do refratário. É neste momento também que são adicionadas as ferroligas e os formadores de escória, aproveitando assim a turbulência do banho para favorecer a dissolução do material adicionado.

A própria panela vai servir de vaso para as reações no forno panela. Este equipamento, vide Figura 14, consiste também de uma abobada refrigerada, pela qual passam 3 eletrodos de grafita que são responsáveis pelo aquecimento do banho. Na panela é promovida uma agitação do banho, ou por rinsagem com gás inerte, ou então por um sistema eletromagnético. O sistema mais utilizado é aquele por gás inerte, introduzido através do *plug* poroso pela região inferior da panela.

A potência aparente de operação do FP é bem inferior a do FEA, variando entre 0,16 e 0,25 mVA/t. O consumo de energia elétrica varia entre 25 e 42 kWh/t, promovendo uma taxa de aquecimento de aproximadamente de 3 a 5°C/min, e uma precisão de temperatura

de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . A Figura 14 apresenta um esquema representativo do equipamento, e a Figura 15 a potência dos FP em relação à capacidade de produção.

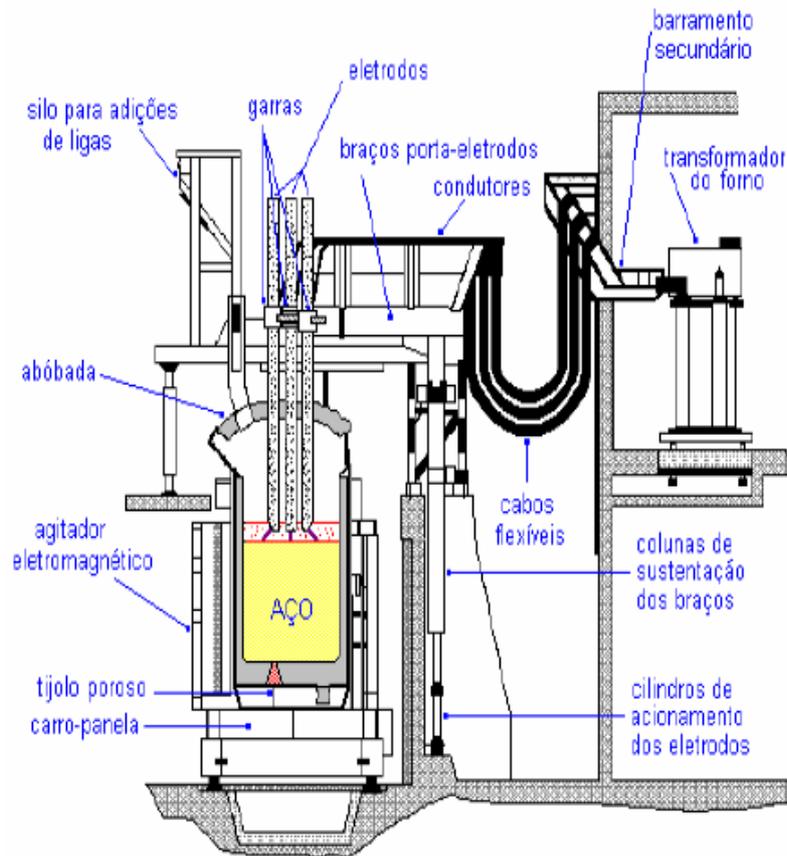


Figura 14 – Esquema representativo de construção do Forno Panela.

Fonte: Curso de Metalurgia secundária, Ribeiro et al (2007).

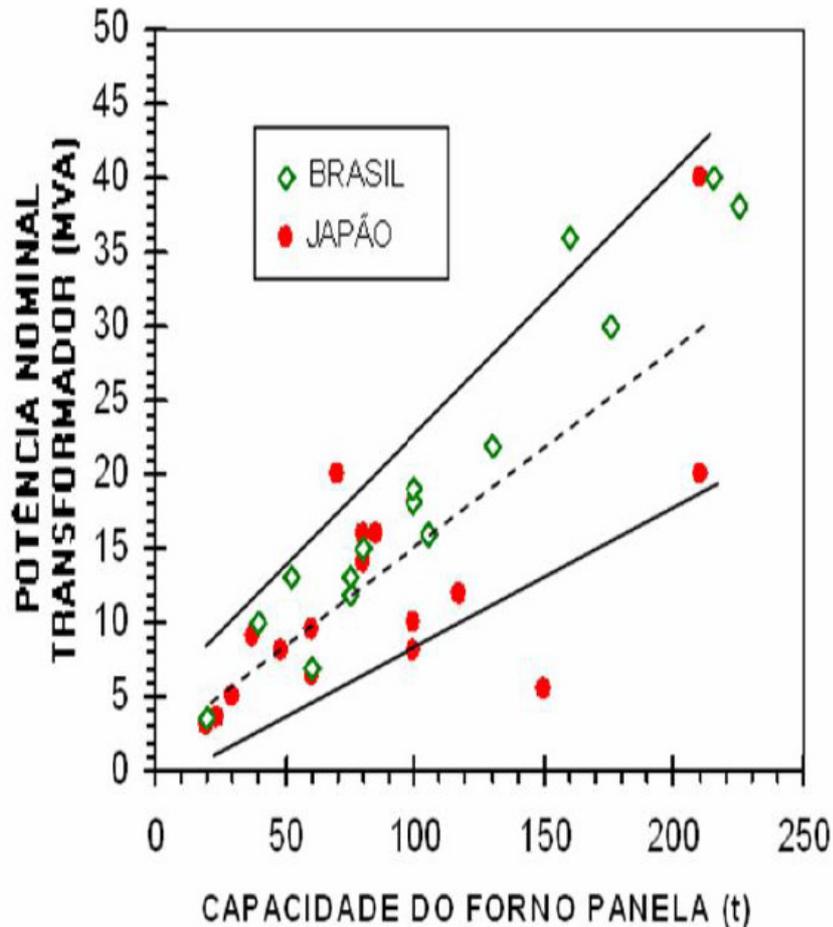


Figura 15 – Características em relação a capacidade dos Fornos Panelas em operação no Brasil e Japão.

Fonte: Curso de Metalurgia secundária, Ribeiro et al (2007).

No FP é importante que a escória seja devidamente ajustada para evitar o desgaste excessivo do refratário da panela, e gerar a desoxidação e desulfuração do aço. Este tratamento consiste em trabalhar com baixos teores de FeO e MnO, além de buscar uma basicidade ideal ( $\text{CaO/SiO}_2 \approx 2,0$ ) e a saturação do MgO ( $\approx 10,0\%$ ) na escória. Estas condições são alcançadas realizando as adições corretas de fundentes e ligas desoxidantes, assim como através da minimização da passagem de escória do FEA durante o vazamento.

A incorporação de gases como o  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$  é minimizada com um correto controle da rinsagem e uma camada ideal de escória sobrenadando o banho, protegendo-o da atmosfera.

O controle de inclusões é realizado com adição de ligas que trabalham a morfologia das partículas, que por diferença de densidade/tamanho e com o auxílio da rinsagem flutam e, desta maneira, são removidas do banho. Em alguns casos podem até permanecer no aço, mas são modificadas ao ponto de não prejudicarem o emprego do aço

pelo cliente. As inclusões basicamente são formadas por nitretos, óxidos e sulfetos. Possuem de 1 a 10 micrometros de diâmetro e, quanto menor o seu tamanho, maior é a dificuldade para a sua remoção.

#### *Vacuum Degassing (VD) ou Vacuum Oxygen Decarburization (VOD).*

Os processos de VD ou VOD desenvolvem-se em equipamentos especiais que possibilitam a redução dos gases dissolvidos através da exposição do aço ao vácuo. É usado em usinas que produzem aços especiais. O objetivo de submeter o banho ao vácuo é a eliminação de gases dissolvidos principalmente o hidrogênio. As principais operações realizadas no desgaseificador são:

- Desgaseificação;
- Adição de elementos de liga;
- Correção da composição química.

O processo de VD possui na sua função principal reduzir os teores de nitrogênio e hidrogênio do metal líquido. Este equipamento mantém a panela de aço à atmosfera de baixa pressão parcial destes gases, gerando sua extração.

O processo VOD é aplicado em aços inoxidáveis que, além de gerar a desgaseificação, reduz o teor de carbono pelo sopro de oxigênio. Não seria possível reduzir em pressão atmosférica o teor de carbono sem interferir na oxidação do cromo, que deve permanecer no aço.

#### 2.2.2.4 Lingotamento

Assim que o aço líquido estiver nas condições pré-estabelecidas de temperatura, composição química, teor de gases e inclusões, este está em condições de ser solidificado. Este processo basicamente por ser realizado por duas vias:

- Lingotamento convencional
- Lingotamento contínuo

O lingotamento convencional consiste em solidificar o aço líquido em potes de ferro fundido chamado de lingoteiras. O aço é solidificado em peças independentes e em seguida deve ser desmoldado com a remoção de cabeças quentes e eventuais rebarbas geradas no lingote. Assim o aço fica adequado para seguir no processo de conformação.

Este método atualmente é empregado em aciaria elétrica na produção de blocos de grandes dimensões e em alguns aços especiais, isto porque este processo não comporta uma produção de larga escala com um custo competitivo nos aços convencionais.

O lingotamento contínuo de solidificação é responsável por grande parte do aço produzido no mundo, e sua introdução na aciaria revolucionou a produção do aço.

Este método consiste em solidificar o aço continuamente, passando por um molde de cobre refrigerado chamado de coquilha. Um movimento relativo entre o aço e o molde evita a adesão entre o material solidificado e a coquilha. Este processo está caracterizado na Figura 16.

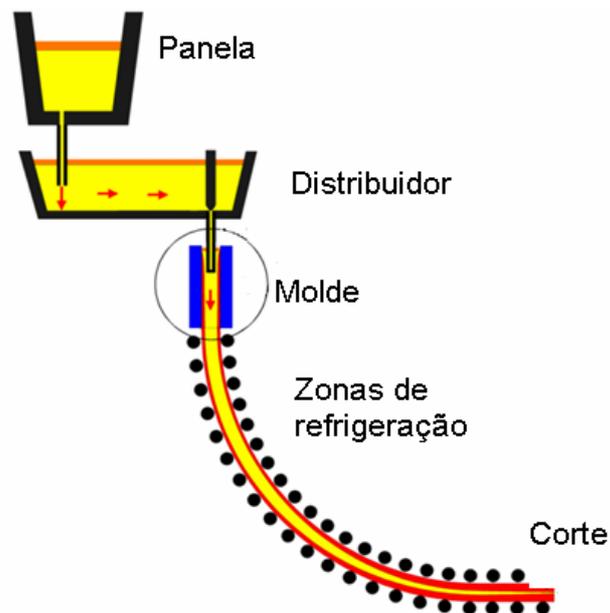


Figura 16 – Desenho esquemático do processo de Lingotamento Contínuo

Fonte: Cortesia Gerdau Riograndense.

O aço é vazado da panela para o distribuidor, que direciona o aço para os veios que comportam as coquilhas (a quantidade de veios varia para cada aciaria). A partida da máquina é realizada com auxílio da barra falsa, que é movimentada pelos rolos extratores e que também movimentam o lingote através da zona de refrigeração secundária, para promover a completa solidificação da secção transversal do tarugo.

Algumas máquinas de lingotamento contínuo possuem agitação eletromagnética, que é utilizada para movimentar o aço líquido no interior do molde promovendo uma solidificação mais homogênea. No agitador, é gerado um campo que é transmitido para o interior do molde produzindo um movimento circular no aço.

Assim que o tarugo estiver solidificado, esta deve ser cortada através de oxicorte, ou então, com guilhotina acionada mecanicamente.

O aço após lingotado poder ser chamado da seguinte maneira, com base na sua secção:

- Tarugos: secção quadrada ou circular até 150 mm de lado ou diâmetro;
- Blocos: secções quadradas ou redondas maiores que 150 mm, ou secções retangulares de até 800 x 400 mm e com relação largura / espessura  $< 2$ ;
- Placas: são secções maiores que as definidas anteriormente, porém com relação largura / espessura  $> 2$ .

As principais vantagens do lingotamento contínuo sobre o convencional são as seguintes:

- Redução do tempo e etapas de lingotamento;
- Eliminação de baterias de lingoteiras maciças, cabeças quentes, pontes transportadoras, estripadores;
- Obtenção de aços de qualidade estrutural superior e mais constante, em função das taxas de refrigeração mais elevadas;
- Obtenção de acabamento superficial melhor e mais regular pela eliminação de defeitos como gotas frias, escamas e dobras que ocorrem no lingotamento convencional;
- Excelente rendimento com aproveitamento quase total do aço, devido à continuidade do processo.

## 2.3 ENERGIA UTILIZADA NO FEA

Segundo Chevrant (2007), a energia necessária para processar uma corrida de aço no FEA deveria ser constante, independente do tamanho do forno e da prática utilizada para tal. Porém, na verdade, existem vários fatores que variam o consumo de energia total por cada tonelada de aço produzido, e que podem ser listados da seguinte maneira:

Influência da Sucata:

- Calor específico médio do aço entre 0 e 1400° C;
- Calor latente de fusão do aço;
- Temperatura inicial da carga;
- Temperatura de fusão;
- Massa total;
- Constituintes da sucata (C, Si, Mn, etc);
- Quantidade de carregamentos (vinculado a densidade), ou método de carregamento.

Influência do processo, basicamente devido às perdas:

- Tempo total de corrida, quanto maior o “tap to tap” da corrida, maior a perda;
- Perdas no circuito secundário do forno, devido à resistência elétrica dos dispositivos que conduzem a energia até os eletrodos.
- Vazão de água do sistema de refrigeração dos eletrodos;
- Característica do programa de potência;
- Qualidade da escória espumante;
- Método e tipo de gases injetados;
- Perdas com as trocas térmicas entre a carga, os painéis refrigerados e abóbada;
- Qualidade da cobertura da abóbada por escória;
- Perfil geométrico da carcaça do forno;
- Perdas no sistema de exaustão;

- Entrada de ar frio;
- Quantidade de fundo úmido;
- Adição de materiais fundentes;
- Rendimento metálico (perda de ferro por oxidação e quantidade de impurezas).

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

### *2.3.1 Energia Elétrica*

Com base na Figura 17, verifica-se que o consumo de energia elétrica varia entre 200 e 800 kWh/t nos fornos elétricos em operação no mundo atualmente. Esta variação é geralmente devido à característica da região onde a planta opera, levando em conta os custos de matérias primas e insumos, além da disponibilidade de capital para investimento em novas tecnologias que aumentam a eficiência do processo e dos equipamentos. Em regiões onde o custo de energia elétrica é elevado, por exemplo, torna-se vantajoso utilizar a energia química como alternativa para reduzir o custo de produção do aço.

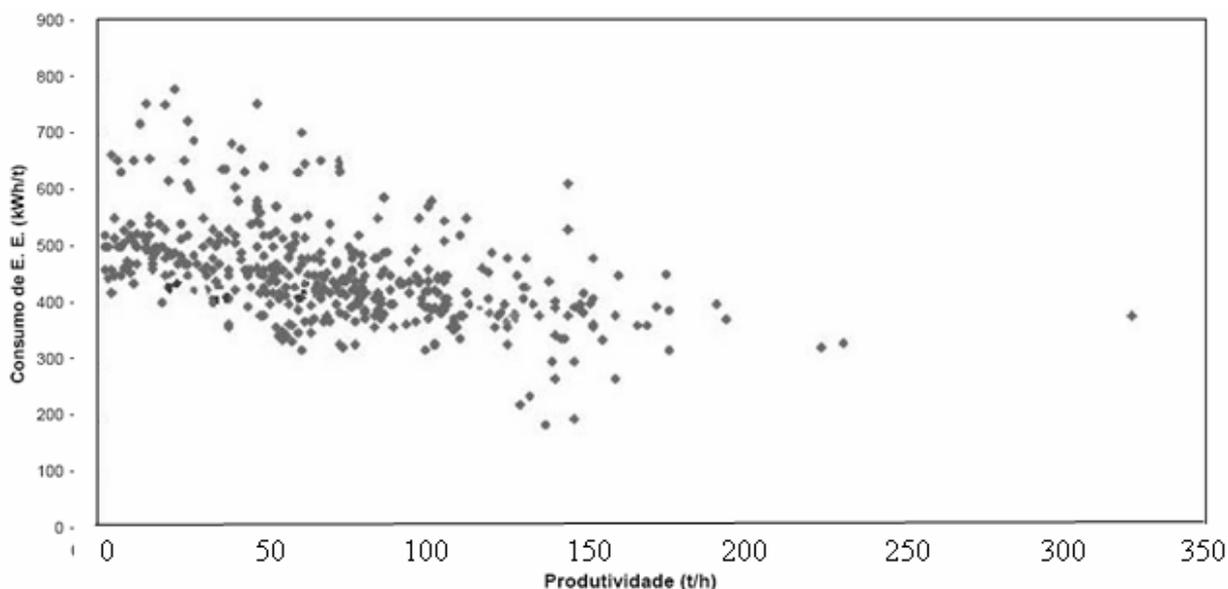


Figura 17 – Consumo médio de energia elétrica por tonelada de aço produzido relacionado com a produtividade do Forno elétrico a arco em toneladas por hora.

Fonte: Seminário de Forno Elétrico a Arco UCAR (2008)

### 2.3.1.1 Arco Elétrico

Segundo Brito (2008), 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. O estabelecimento do arco dá-se pela passagem da corrente entre o cátodo e o ânodo postos em contato e submetidos a potenciais elétricos diferentes. O cátodo, aquecido pela passagem da corrente, emite elétrons que se dirigem até o ânodo sob o efeito do campo elétrico que se cria entre os dois. As moléculas de gás se ionizam pela passagem dos elétrons, se tornam condutoras e asseguram a passagem da corrente elétrica, ainda que o cátodo e o ânodo estejam separados. As moléculas ionizadas, aceleradas pelo campo elétrico, colidem contra o cátodo e o aquecem, dando lugar a uma maior emissão de elétrons.

A posição do eixo do arco e seu comprimento determinam a direção do fluxo de calor. O volume do arco, que confere as condições de transferência de calor, é basicamente definido por duas variáveis:

- Tensão – Define o comprimento do arco, ou seja, quanto maior a tensão, maior é o seu comprimento;
- Corrente – Este parâmetro define a seção transversal do arco, quanto maior a seção, maior é a corrente elétrica.

A Figura 18 ilustra o arco elétrico em duas condições diferentes de corrente. Na situação onde a corrente é baixa, verifica-se que a orientação do fluxo de calor (irradiação) é basicamente horizontal, causado pelo comprimento longo do arco e sua pequena seção transversal. Onde a corrente é alta, o fluxo de calor é basicamente vertical, e a seção do arco é maior. Estas condições são ilustradas para a mesma tensão.

Com base na seção e comprimento de arco, é estimado uma energia por volume de arco de 40 a 50 kWh/cm<sup>3</sup>, e a região ionizada pode chegar a uma temperatura de 4000 °C.

Na Figura 18 é possível observar dois arcos característicos a tensão constante. O primeiro de menor corrente possui irradiação do calor preferencialmente no sentido horizontal. Este tipo de arco é recomendado para etapa de fusão, onde é alcançada a sucata a uma distância maior do eletrodo. Porém, a eficiência na transmissão de calor para a carga a medida que sucata é fundida se reduz, porque grande parte deste calor passa a ser transmitido para os painéis refrigerados. O arco de maior corrente possui um vetor preferencial de irradiação de calor no sentido vertical. Esta característica de arco é desejada durante a etapa de refino, onde com a escória espumante e a alta potência, são alcançados grandes ganhos em produtividade e eficiência energética.

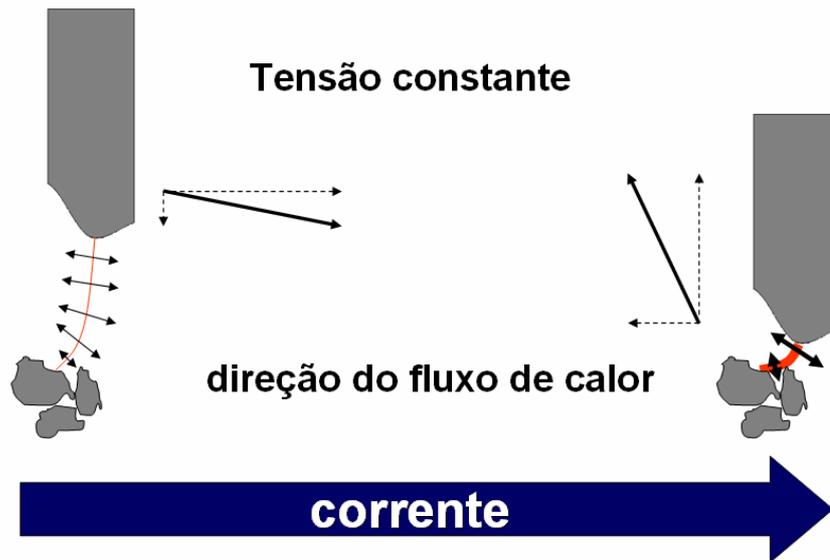


Figura 18 – Característica do fluxo de calor do arco elétrico mediante a variação de corrente.

Fonte: Operação de Forno Elétrico a Arco, Figueira (2007).

Segundo Bowman, citado em UCAR (2008), o arco elétrico movimenta-se de acordo com as forças eletromagnéticas, como ilustram os vetores na Figura 19 para um forno de corrente alternada. Estes vetores indicam a direção preferencial onde ocorre o maior e mais rápido aquecimento da carga durante o processamento da corrida.

$$\text{Força} = \text{corrente} \times \text{indução magnética}$$

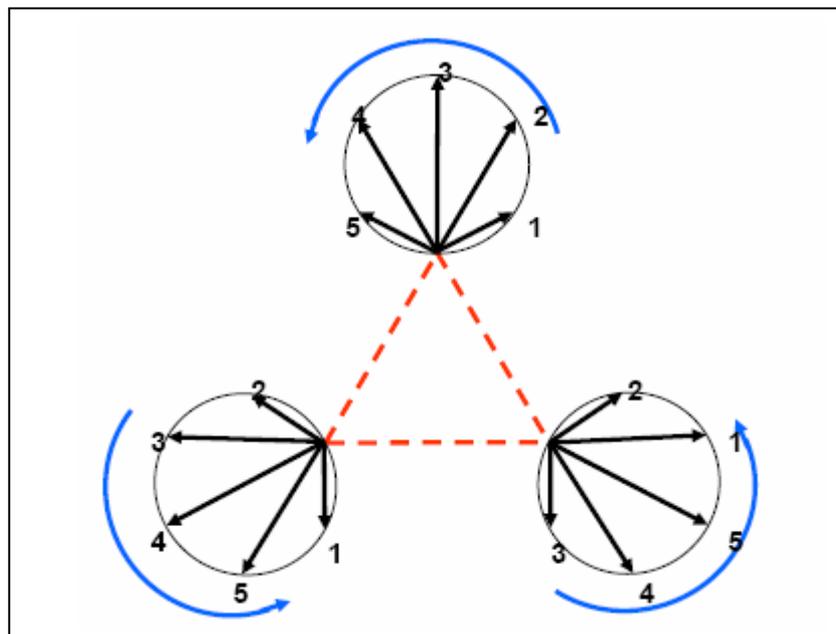


Figura 19 – Vetores da força eletromagnética entre 100 e 120 Hz.

Fonte: Seminário de Aciaria Elétrica UCAR (2008).

A figura 20 ilustra as regiões no interior do forno onde a sucata é fundida, utilizando somente energia proveniente do arco elétrico, com base na teoria referente aos vetores de força eletromagnética. Os pontos em marrom na Figura 20, ilustram a sucata remanescente após a atuação do arco elétrico, e são estes os pontos onde devem ser instalados sistemas capazes de gerar energia química, como queimadores ou injetores de oxigênio, contribuindo para uma fusão uniforme da carga.

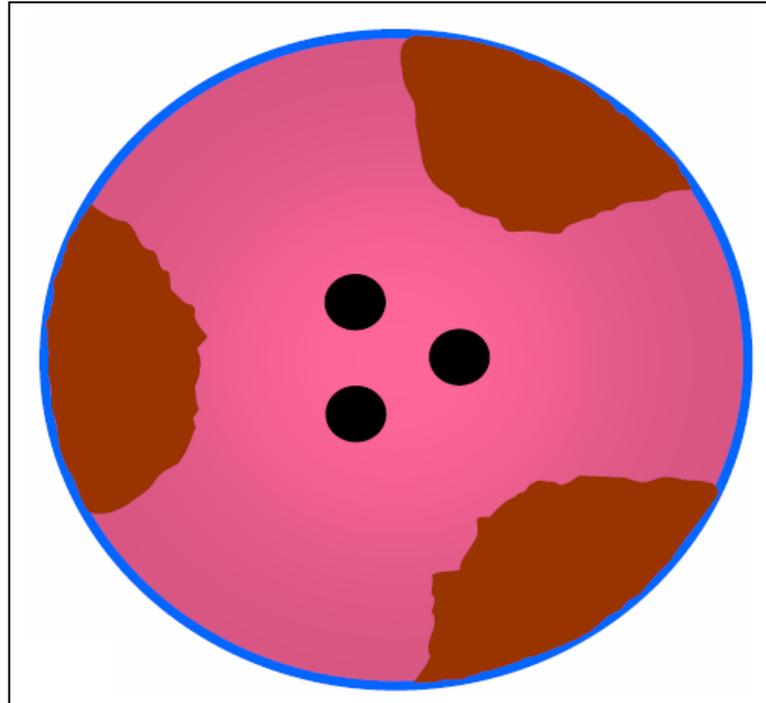


Figura 20 – Regiões onde a sucata é fundida no interior do forno, utilizando energia somente do arco elétrico.

Fonte: Seminário de Aciaria Elétrica UCAR (2008)

Como foi verificado na Figura 20, existem regiões no interior do forno onde a eficiência do arco elétrico é baixa para promover a fusão da carga. Isto estimulou a criação de alternativas como queimadores de gás ou injetores de  $O_2$ , que introduzem a chamada energia química no sistema. Os injetores são posicionados estrategicamente, a fim de promover o preciso aquecimento das regiões não cobertas pelo arco. Este tema será abordado com maior detalhe mais adiante.

### 2.3.1.2 Fornos de corrente contínua e corrente alternada

O arco de corrente contínua (CC) é mais inerentemente estável do que o arco de corrente alternada (CA). Quando um forno de CA é operado, o arco é cíclico, sendo assim inevitável o contato entre os três eletrodos e a carga do metal. Quando isso ocorre, o curto circuito de três fases causa maiores aumentos na energia instantânea retirada da rede elétrica, induzindo flutuação de voltagem *flicker*.

Com a corrente contínua, a magnitude da corrente do arco é limitada ao valor estabelecido pelos reguladores de tiristores e as variações de tensão do suprimento são menos significativas.

Nos FEAs de CA, o arco do eletrodo é localizado e resulta em pontos quentes e fusão irregular da sucata. Em FEAs de CC, a irradiação do arco é uniforme em todas as direções, e produz-se uma fusão igualmente distribuída ao redor do eletrodo.

No processo de CC, a corrente elétrica passa do eletrodo para carga através do arco elétrico, e desta para outro eletrodo geralmente instalado na soleira do forno.

A tendência é de que os fornos de CC cada vez mais substituam os de CA, já que atualmente mais de 45% de toda a capacidade mundial de FEAs é de CC.

As principais vantagens dos FEAs de CC em relação aos de CA são:

- Redução no consumo de energia e eletrodo.
- Redução no consumo de refratário.
- Redução do efeito *flicker*.

### 2.3.2 Energia química

A energia química segundo Fortes (2008) é assim chamada por ser o resultado da 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 capacidade total de energia química gerada no interior do forno, e seu real rendimento para promover a fusão, aquecimento e refino da carga, depende de vários fatores

que serão abordados a seguir. Na atualidade, representa entre 30 e 60% do total da energia introduzida nos fornos, ou seja, aproximadamente 50 a 300 kWh/t de aço lingotado, segundo Fortes (2008).

De maneira geral a energia química gerada pode ser descrita pela seguinte expressão:

$$E_{química} = E_{oxidação} - E_{redução} + E_{queimadores} - E_{calcinação} + E_{dissolução} \quad (2.3)$$

### 2.3.2.1 Energia de redução

Esta fração da equação leva em consideração as eventuais reações de redução de óxido de ferro e demais elementos que possam acontecer. Geralmente, a entalpia desta reação química possui característica endotérmica, justificando o sinal negativo na equação 2.3. Este fenômeno se torna significativo principalmente à medida que são elevadas as quantidades de DRI carregadas no FEA, com baixa metalização e baixo percentual de carbono.

### 2.3.2.2 Energia de queimadores

Esta parcela de energia é aquela adicionada pelos queimadores de gás, ou seja, a quantidade de GN, GLP ou qualquer tipo de combustível combinado com oxigênio injetado no sistema, capaz de gerar calor. Este assunto será tratado com maior detalhe mais adiante.

### 2.3.2.3 Energia de dissolução

A energia de dissolução está relacionada aos elementos adicionados ao metal líquido que absorvem ou liberam energia para se dissolver. Logo, este segmento da expressão 2.3 vem a contemplar este fenômeno.

#### 2.3.2.4 Energia de calcinação

Toda a carga em forno elétrico exige uma proporção definida de fundentes (cal), para formação de uma escória capaz de absorver óxidos ácidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ou diminuir o desgaste dos refratários ( $\text{MgO}$ ).

A cal na natureza é encontrada na forma de calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) e antes de ser carregada no FEA é submetida ao processo de calcinação descrito pela reação 2.4.



Por causa de sua característica endotérmica, esta reação exige a introdução de energia no sistema. Portanto, quanto maior for o grau de calcinação da cal adicionada no FEA, menor deverá ser o desprendimento de energia para reagir o  $\text{CaCO}_3$  residual.

#### 2.3.2.5 Energia de oxidação

O fenômeno de oxidação, para que a energia química seja gerada no interior do FEA, devem existir os elementos com esta característica exotérmica (C, Si, Fe, Mn, Cr, etc), e o  $\text{O}_2$ . De maneira geral, durante a obtenção do  $\text{O}_2$  é consumido de 0,5 a 1 kWh/ $\text{Nm}^3$ , mas ao ser injetado no FEA pode gerar até 5 kWh/ $\text{Nm}^3$  de  $\text{O}_2$ , justificando o emprego desta tecnologia no processo.

Na Figura 21 é possível verificar a redução do consumo de energia elétrica em virtude do uso de oxigênio como fonte energética no FEA.

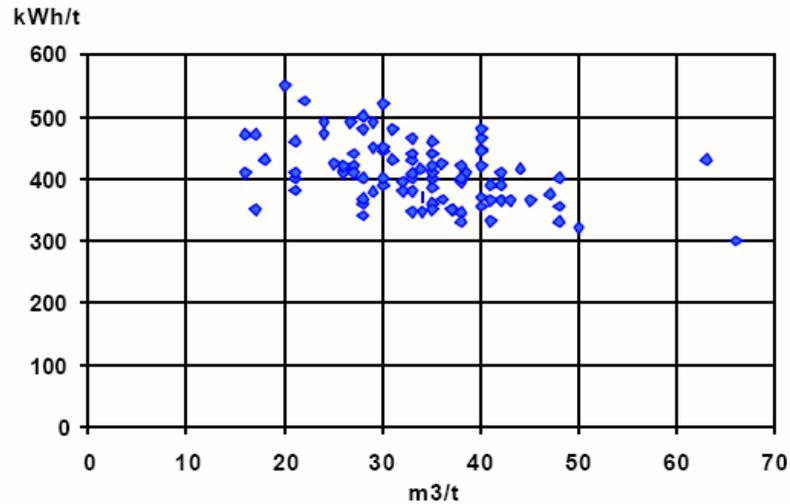


Figura 21 – Consumo de energia elétrica *versus* consumo de oxigênio.

Fonte: UCAR (2001).

Cada um dos elementos citados anteriormente possui uma capacidade energética diferente, ou seja, cada um dos elementos gera uma quantidade particular de energia durante a sua reação com o  $O_2$ . Logo, a fração de cada elemento presente no processo é uma característica importante no somatório total de energia capaz de ser gerada. Muitos fornos operam recebendo grande parte de seu carregamento somente de sucata metálica, já em outros casos são carregados com porções expressivas de ferro gusa (líquido ou sólido), que possui um poder energético diferenciado pelos elementos importantes presentes em sua composição, como o Si e o C.

Na Tabela 4 pode-se verificar a capacidade energética das principais reações que ocorrem em um processo de forno elétrico a arco.

Tabela 4 – Reações químicas exotérmicas durante o refino no forno elétrico a arco.

Reações Químicas no aço fundido				Entalpia da reação	
Si	+ O <sub>2</sub>	→	SiO <sub>2</sub>	-8,94 kWh/kg <sub>Si</sub>	-11,20 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
Mn	+ 0,5 O <sub>2</sub>	→	MnO	-1,93 kWh/kg <sub>Mn</sub>	-9,48 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
2Cr	+ 1,5O <sub>2</sub>	→	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-3,05 kWh/kg <sub>Cr</sub>	-9,42 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
2Fe	+ 1,5O <sub>2</sub>	→	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-2,05 kWh/kg <sub>Fe</sub>	-6,80 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
Fe	+ 0,5O <sub>2</sub>	→	FeO	-1,32 kWh/kg <sub>Fe</sub>	-6,58 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
C	+ 0,5O <sub>2</sub>	→	CO	-2,55 kWh/kg <sub>C</sub>	-2,73 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
2Al	+ 1,5O <sub>2</sub>	→	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-5,29 kWh/kg <sub>Al</sub>	-13,84 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
Mo	+ O <sub>2</sub>	→	MoO <sub>2</sub>	-1,70 kWh/kg <sub>Mo</sub>	-7,20 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
S	+ O <sub>2</sub>	→	SO <sub>2</sub>	-2,75 kWh/kg <sub>S</sub>	-3,94 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
2P	+ 2,5O <sub>2</sub>	→	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-5,54 kWh/kg <sub>P</sub>	-8,58 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
Reações Químicas na fase de gás				Entalpia da reação	
C	+ O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub>	-9,10 kWh/kg <sub>C</sub>	-4,88 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
CO	+ 0,5O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub>	-2,75 kWh/kg <sub>c</sub>	-7,01 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>
H <sub>2</sub>	+ 0,5O <sub>2</sub>	→	H <sub>2</sub> O	-5,54 kWh/kg <sub>h</sub>	-5,99 kWh/m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>

Fonte: Bihel et al (2006).

Com base na Tabela 4, verifica-se que o Si é o elemento com a maior capacidade de gerar calor, ou seja, 11,2 kWh/m<sup>3</sup> de O<sub>2</sub> reagido, e a menor pela formação do CO, 2,7 kWh/m<sup>3</sup> de O<sub>2</sub> reagido.

Durante a etapa de refino, elementos como Si, P e Al são completamente oxidados, o que já não acontece com o Fe, Mn, Cr e Mo, que exigem uma pressão parcial de O<sub>2</sub> superior e oxidam parcialmente.

Segundo Gaskell (1973), a afinidade de cada um dos elementos com o oxigênio e a ordem de preferência da reação pode ser lida no diagrama de Ellingham da Figura 22. O valor de  $\Delta G^\circ$  para uma reação de oxidação é medida pela afinidade química entre o metal e o oxigênio, quanto mais negativo for este valor a qualquer temperatura, mais estável é o óxido.

Na Figura 22 pode ser analisado, que em faixas de temperatura para determinado óxido, onde não há mudança de fase, a relação entre  $\Delta G^\circ \times T$  é praticamente uma linha reta. Quando ocorre a mudança de estado (fusão), a reação sofre a interferência do calor latente, que provoca a alteração de temperatura da fase e conseqüentemente uma curvatura na linha do gráfico. Isto se deve ao fato de haver uma mudança da entropia e entalpia entre as duas

regiões de reta. A diferença entre os valores é geralmente positiva, que caracteriza reações endotérmicas durante a fusão dos metais.

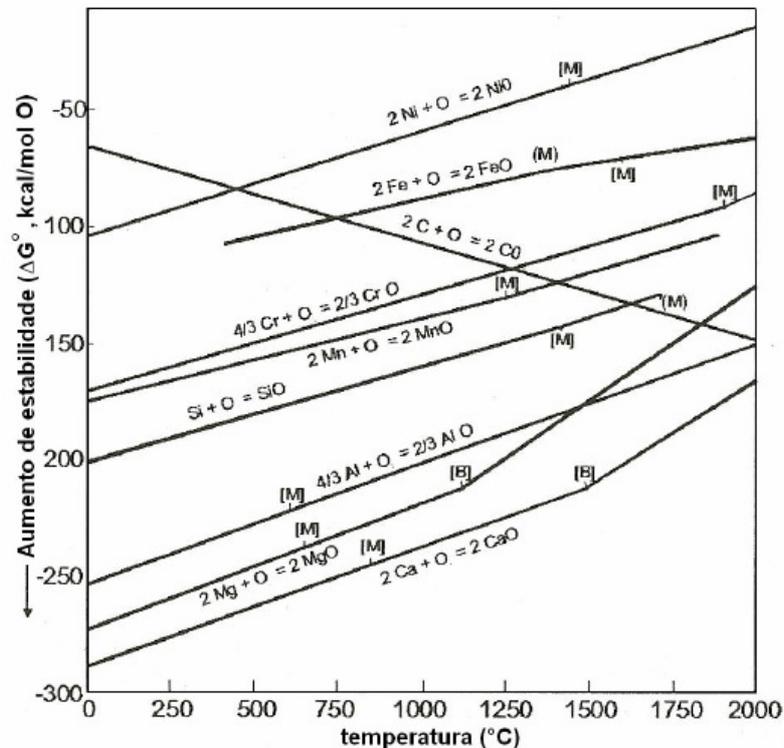


Figura 22 – Diagrama de Ellingham

Fonte: Gaskell (1973)

Portanto, na prática, o processo de oxidação está diretamente relacionado à formação da escória. A baixa temperatura termodinamicamente não favorece a oxidação do ferro no início do processo. Porém, a grande massa presente deste elemento faz com que a sua oxidação se inicie juntamente com a do silício, formando uma escória com o CaO adicionado, FeO e SiO<sub>2</sub>. A geração deste FeO na escória inicial é muito importante para a solubilização da cal e a formação do 2CaO.SiO<sub>2</sub>. A formação deste silicato reduz a atividade da sílica na escória, deslocando o equilíbrio no sentido de favorecer a oxidação de todo o silício presente no processo.

A oxidação do manganês ocorre logo em seguida, e a massa oxidada deste elemento pode variar entre 50 e 80% do total carregado. O teor final de manganês presente no banho depende basicamente do nível de oxidação do metal, ou seja, quanto mais baixos os teores de carbono no final do refino, o teor de oxigênio consequentemente irá ser maior, desta maneira levando a menores teores residuais de manganês.

O carbono no início da oxidação permanece praticamente todo no banho até o momento de ter oxidado praticamente todo o silício e manganês, e assim o oxigênio estará

disponível para tal reação. Fortes (2008), sugere que a oxidação do carbono se inicia com a reação direta entre os dois elementos (carbono e oxigênio) formando CO, mas também é aceita a teoria de que o carbono reduz o FeO, liberando Fe e CO. No início, quando o teor de carbono é elevado, sua oxidação é limitada pelo fornecimento de oxigênio, quando então realmente altas vazões podem contribuir para a redução do tempo de corrida. À medida que o teor de carbono cai, a velocidade de transporte do átomo de carbono até o ponto de reação com o oxigênio passa a ser o fator limitante.

Este mecanismo cinético limita o teor mínimo de carbono em torno de 0,04%, e é quando os teores de oxigênio adicionados passam a favorecer a oxidação do ferro, aumentando sua concentração na escória como FeO. Nesta etapa, qualquer meio que possa provocar um alto nível de turbulência do banho, aumenta a velocidade de transferência do carbono. Assim, por exemplo, o jato coerente ou supersônico de oxigênio acelera o processo de descarburização, minimizando a oxidação de ferro. É evidente que a oxidação excessiva do carbono irá levar a teores muito elevados de oxigênio dissolvido ao final do refino, aumentando o consumo de desoxidantes posteriormente.

Como comentado anteriormente, no banho metálico, o carbono reage na forma de monóxido de carbono (CO), que possui a capacidade energética de 2,55 kWh/kg<sub>C</sub>, e que será o gás predominante na atmosfera no interior do FEA. Esta condição favorece a ocorrência do fenômeno conhecido como *post combustion*, que consiste na queima de qualquer componente já parcialmente queimado, e que no caso do CO para CO<sub>2</sub> é capaz de gerar até 9,10 kWh/kg<sub>C</sub>. Termodinamicamente a transformação de CO para CO<sub>2</sub> no banho metálico é menos favorável. Logo, o fenômeno é alcançado pela injeção de O<sub>2</sub> geralmente em regiões mais altas na atmosfera do FEA, e possui mais efetividade no processo se ainda houver sucata com baixa temperatura, capaz de absorver este calor. Senão, grande parte da energia poderá se perdida para exaustão, ou então, para os painéis refrigerados. Segundo Pfeifer (2005), a eficiência da transferência do calor de *post combustion* para a carga pode chegar a um máximo de 65% quando ainda houver sucata sólida no forno, porém na etapa de refino, quando praticamente toda a carga já estiver líquida, a eficiência máxima alcançada pode não ultrapassar 20 a 30%. É importante que o O<sub>2</sub> não seja injetado em excesso a ponto de aumentar excessivamente a oxidação de ferro, afetando o rendimento metálico.

A eficiência da *post combustion* (PCE) também diminui à medida que os teores de carbono envolvidos no processo aumentam. Além disto, estudos mostram que o fenômeno não aumenta a vazão de gases na exaustão, mas é percebida uma leve elevação da temperatura nesta região.

A relação de *post combustion* (PCR) pode ser descrita pela expressão 2.5:

$$\text{PCR} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CO}}} \quad (2.5)$$

Onde V CO é o volume do gás CO produzido pela reação direta do carbono com o oxigênio, ou pela redução do óxido de ferro pelo carbono, assim como VCO<sub>2</sub> é o volume de CO<sub>2</sub> gerado pela reação de *post combustion*, pela oxidação do gás natural ou pela calcinação dos materiais fundentes.

## 2.4 INJEÇÃO DE OXIGÊNIO

Segundo Jones et al (1998), os grandes ganhos alcançados em produtividade no FEA ao longo dos anos, se devem principalmente ao avanço das práticas relacionadas ao emprego do oxigênio. Nos primeiros equipamentos em operação, os consumos praticados giravam em torno de 9 Nm<sup>3</sup>/t. Já na atualidade, podem ultrapassar os 40 Nm<sup>3</sup>/t. Naquele tempo, o *tap-to-tap* de corrida durava entre 3 e 8 horas, e na atualidade dificilmente ultrapassa 1 hora.

### 2.4.1 Injeção por tubos consumíveis

Segundo Bihel et al (2006), a primeira tecnologia de injeção de oxigênio no FEA foi a utilização de tubos consumíveis, introduzidos pela porta de escória através de operações manuais. Mais tarde, estes tubos passaram a ser acoplados em manipuladores mecânicos, como mostra a Figura 23, mas que ainda dependiam da interferência do operador para introdução no banho, a fim de ajudar na fusão da sucata nas regiões mais frias, as quais não são devidamente aquecidas pelo arco elétrico proveniente do eletrodo.

Este sistema de injeção promove uma eficiência muito elevada na utilização dos materiais injetados, isto porque o bico do tubo é mantido submerso na carga evitando perdas para a exaustão. Esta tecnologia é utilizada ainda hoje em paralelo aos demais sistemas de

injeção para cortar e ajudar na fusão da sucata presente junto à porta de escória, permitindo o acesso de lanças para introdução de finos como carvão e cal, tanto no banho metálico como na escória, além de facilitar a remoção do excesso de escória pela porta.

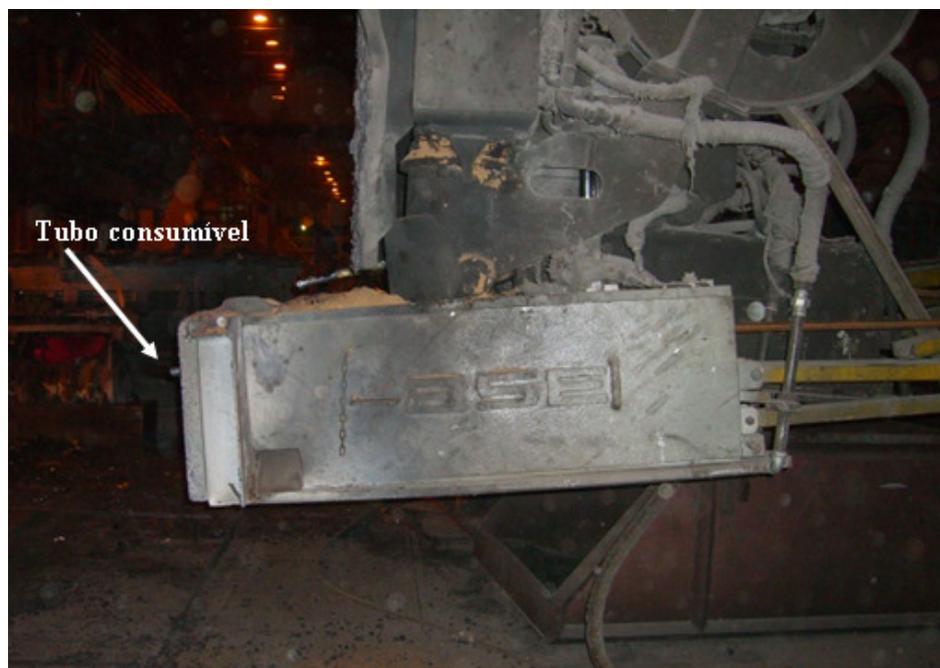


Figura 23 - Manipulador de lança consumível

Fonte: Cortesia Gerdau Riograndense

#### 2.4.2 Sistema de jato coerente

Como já haviam sido mencionados em capítulos anteriores, todos os fornos elétricos em função de seu diâmetro, potência do transformador e potência introduzida, apresentam uma característica particular de distribuição de calor em seu interior, como pode ser visto na Figura 24 (esquerda). As regiões em tons de cinza estão caracterizando os pontos mais frios, ou seja, aqueles que não estão devidamente cobertos pelo arco elétrico principalmente durante a etapa de fusão.

Para evitar a formação de placas mal fundidas nestas regiões frias, que geralmente se desprendem e caem no banho líquido durante a etapa de refino, é recomendada uma boa distribuição de energia química no interior do FEA. Injetores de oxigênio, ou sistemas mistos de  $O_2$  com gás/óleo combustível, posicionados adequadamente, ajudam no corte e fusão da sucata, além de promover a agitação do banho na etapa de refino, contribuindo na formação da escória espumante e para o fenômeno de *post combustion*. Segundo Memoli (2004), o

desenvolvimento dos modernos equipamentos de injeção de oxigênio fez com que o consumo deste insumo aumentasse de 12,8 milhões de m<sup>3</sup> em 1990 para 26,1 milhões de m<sup>3</sup> em 1995, e com a introdução destes sistemas conseguiu-se uma uniformidade na distribuição de calor muito superior, pela menor estagnação do fluxo nas regiões da parede do FEA. Para obter a mesma agitação do banho somente com o uso de tubos pela porta de escória, seria necessária a utilização de vazões muito elevadas, que aumenta muito a projeção de respingos, prejudicando o consumo de eletrodos e refratários, além de expor à perfuração os painéis refrigerados. A Figura 24, à direita, caracteriza o posicionamento dos queimadores e injetores nas posições com maior deficiência de calor proveniente dos eletrodos.

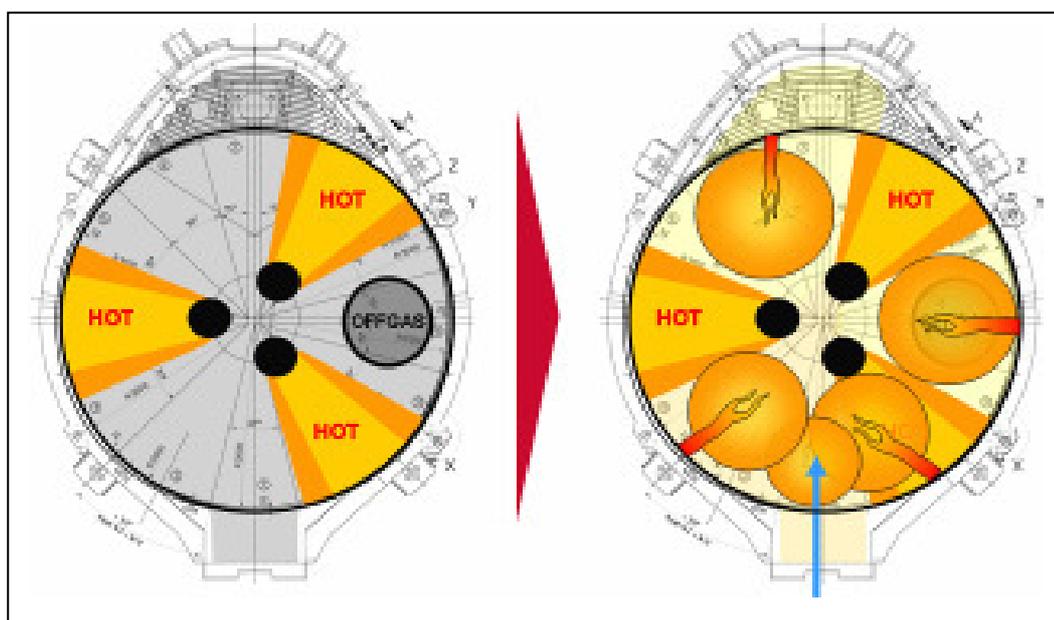


Figura 24 – Modelamento do forno com e sem posicionamento de queimadores em pontos frios, que não são devidamente aquecidos pelo arco elétrico gerado através dos eletrodos.

Fonte: Bihel et al (2006)

O posicionamento dos injetores junto aos painéis refrigerados em torno do forno é uma tarefa extremamente complexa e exige um projeto preliminar muito cuidadoso. Os principais problemas que podem ocorrer perante um projeto de instalação mal executado são:

- Desgaste excessivo de materiais refratários na região dos injetores;
- Rebotes de jato na direção de painéis refrigerados, sistema de fechamento de forno ou do próprio injetor, com isto provocando vazamentos de água no sistema;

- Extrema oxidação do banho em regiões pontuais do forno, gerando o colapso da escória espumante pelo super enriquecimento de FeO nesta região;
- Desgaste excessivo dos eletrodos.

Segundo Memoli (2004), no sentido vertical os injetores geralmente são posicionados em um ângulo que pode variar entre 41 e 44°. Injetores muito inclinados (apontados para baixo) podem gerar rebotes excessivos no refratário, enquanto que pouca inclinação pode gerar muitos respingos no banho, comprometendo outros componentes importantes do forno, como painéis refrigerados e abóbada.

Segundo Bihel et al (2006), as primeiras tecnologias relacionadas ao emprego de queimadores se voltaram para o uso de sistemas independentes, ou seja, uma lança injetava o combustível e em paralelo havia um injetor de oxigênio para a formação do *post combustion*. O aprimoramento dos sistemas oxi-queimadores possibilitou a união dos dois sistemas para uma só ferramenta, que confere uma penetração muito superior do jato no banho. Este sistema consiste em um bico de lança com um jato central supersônico, circundado por um jato de oxigênio e gás combustível em velocidade subsônica. Este modelo de injetor chamado de *co-jet*, mantém a velocidade supersônica do jato em uma distância muito superior, se comparado aos modelos de bico convencional sem envelopar. Esta tecnologia permite afastar o bico a uma distância de até 2 metros do banho, mesmo assim mantendo uma boa eficiência de penetração do jato. Isto favoreceu muito a segurança da operação e diminuiu os custos de manutenção dos sistemas de fixação dos injetores. Mas mecanismos mais recentes, novamente permitem avançar o injetor para próximo do banho, como por exemplo, caixas refrigeradas de cobre, instaladas logo sobre a parede de refratário e avançados sobre o banho, afastado do painel refrigerado e encobertos pela escória durante a sua espumação durante o refino. Estes dispositivos possuem também proteções especiais para absorver colisões de sucata. Na Figura 25 pode-se observar um esquema ilustrativo destes sistemas de injeção.

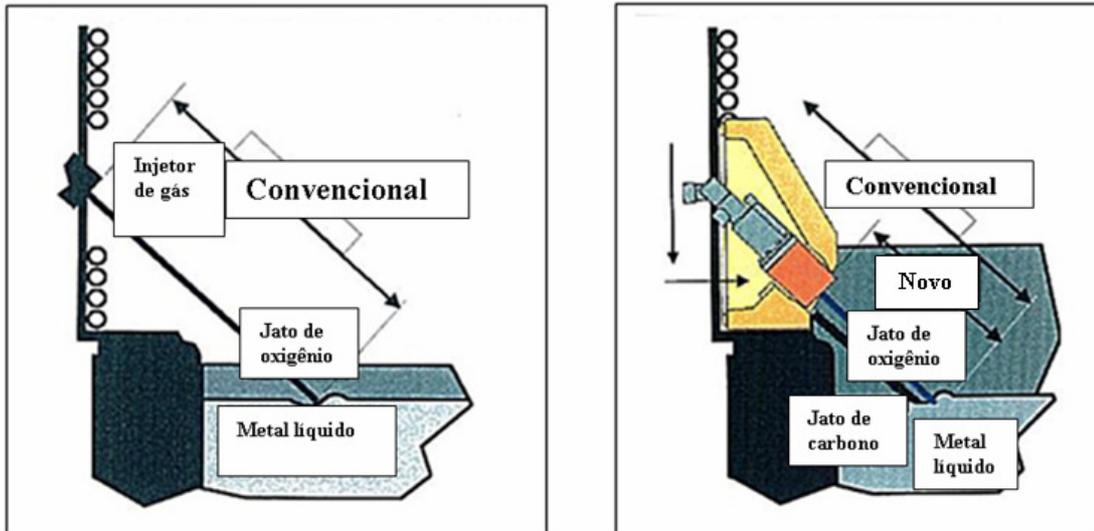


Figura 25 – Sistema *co-jet* convencional (esquerda) e *jetbox* (direita).

Fonte: Bihel et al (2006).

A união do queimador ao próprio injetor de oxigênio foi possível porque cada um dos modos de injeção é utilizado em uma etapa particular da corrida. O modo queimador é ativado geralmente durante os primeiros 5 a 15 minutos após efetuar o carregamento, enquanto que o injetor de oxigênio supersônico é ativado quando o metal já estiver completamente fundido.

A capacidade energética do gás natural varia entre 9,3 e 10,7 kWh/m<sup>3</sup>, com uma eficiência entre 50 e 70% com a pilha de sucata a temperatura baixa. A sua eficiência cai drasticamente à medida que a temperatura da carga é elevada e a pilha é desmanchada, por isto convém utilizar o modo queimador somente no intervalo que é observado material à baixa temperatura no forno, segundo Opfermann et al (2005).

No momento em que é desativado o modo queimador, é imediatamente ativado o modo lança que inicia o processo de descarburização, agitando o banho e contribuindo na formação da escória espumante pela introdução de oxigênio em velocidades supersônicas.

A Figura 26 apresenta um gráfico característico da perda de eficiência do queimador ao longo da etapa de fusão no forno elétrico a arco.

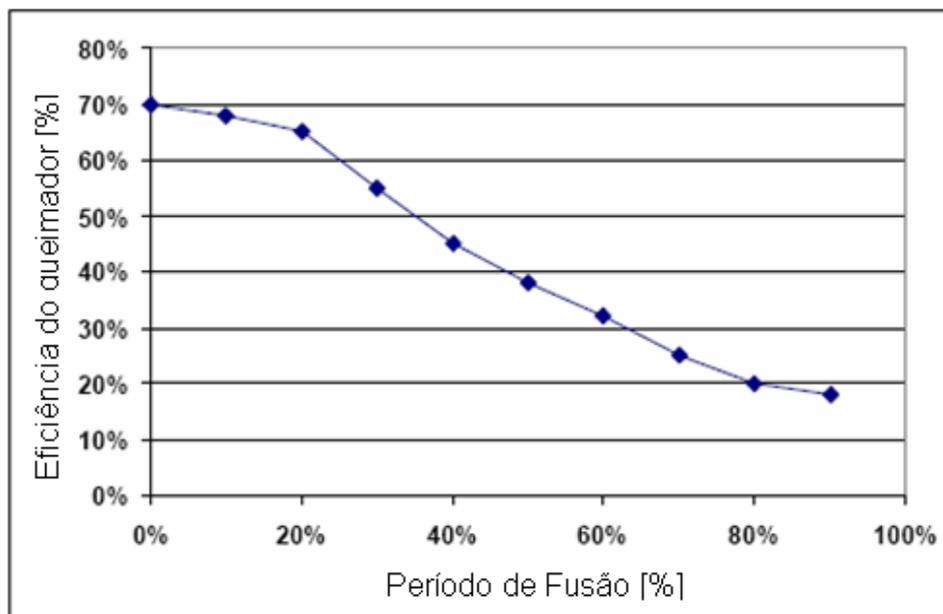


Figura 26 – Gráfico do percentual de eficiência do queimador durante a etapa de fusão da sucata no Forno Elétrico a Arco.  
Fonte: Opfermann et al (2005).

A prática industrial, segundo a Praxair citado por Chevrand (2007), indica o uso mínimo de 1,5 a 2 MW de potência por queimador em fornos de pequena capacidade (15 a 30 t), e de 2 a 5,5 MW para fornos de grande capacidade (30 a 200t). Outro ponto que pode ser tomado como referência é o tamanho do transformador, onde a potência total dos queimadores deve ser entre 35 e 75 % da potência média efetiva do transformador. O consumo total de gás natural deve variar entre 4 a 9 Nm<sub>3</sub>/t.

#### 2.4.3 Sistema Multi Point Double Flow (MPDF)

A tecnologia MPDF consiste no uso de injetores refrigerados, desenhados para soprar um jato primário supersônico de oxigênio (com a função de lança para corte e descarburização da carga) e um secundário subsônico (com a função de promover a pós-combustão do CO), em mais de uma posição do FEA, Figura 27.

Este sistema utiliza somente O<sub>2</sub>, e sua grande vantagem é ter uma instalação relativamente simples, onde pequenas modificações são necessárias no FEA para sua implementação. Seu controle pode ser totalmente automatizado via computador, interligado a um controle de válvulas que comanda todas as linhas/jatos de maneira independente. O

principal resultado no processo é o aumento de produtividade, redução do consumo de energia elétrica, mais rápida e homogênea descarburção e a eliminação de equipamentos móveis.

A inclinação entre os jatos deve ser de tal maneira, que ambos atuem sem haver interferência entre eles, ou seja, deve ser superior a  $18^\circ$  devido ao fenômeno de espalhamento do jato, que será comentado com maior detalhe mais adiante.

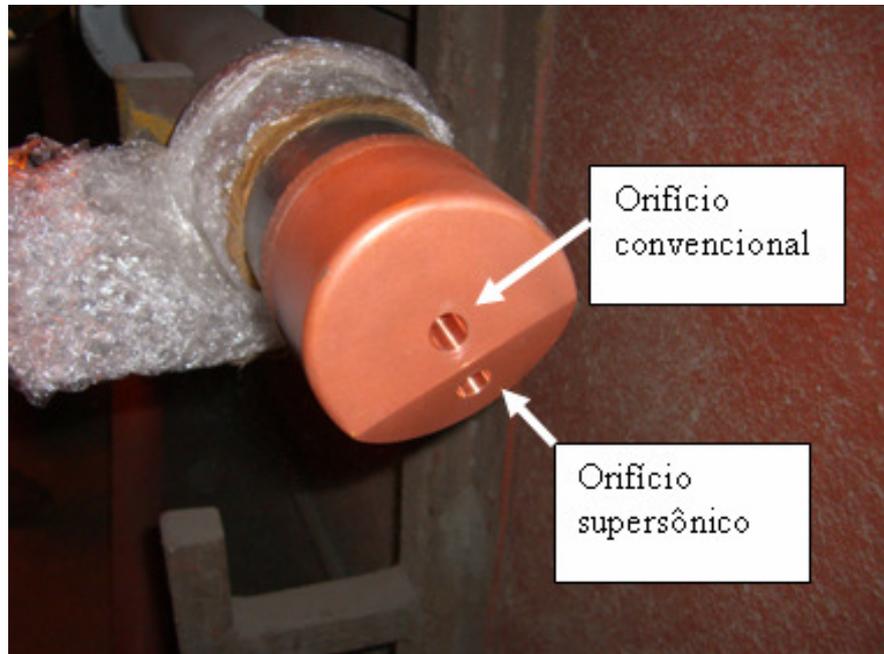


Figura 27 – Injetor *Multi Point Double Flow* (MPDF).  
Fonte: Cortesia Gerdau Riograndense.

## 2.5 TEORIA DO JATO SUPERSÔNICO

Segundo Meidane (2004), em geral os bicos supersônicos consistem em uma entrada convergente, a qual conduz o gás para uma região de estrangulamento "garganta" de menor área de seção transversal, seguido de uma seção divergente, Figura 28. A velocidade do gás na garganta é igual a velocidade do som, de onde ele se expande para a região divergente acelerando para velocidades supersônicas. Para a representação deste modelo de velocidade, adotou-se o número adimensional de *Mach* ( $M$ ), que representa uma relação entre a velocidade do fluido e a velocidade do som apresentada na equação 2.6.

$$M = \frac{V}{V_s} \quad (2.6)$$

Onde “V” é a velocidade do gás e  $V_s$  a velocidade do som. Para valores  $M > 1$ , se considera-se velocidades supersônicas.

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. Isto acontece em um sistema de bico simples sem proteção com gás e oxigênio.

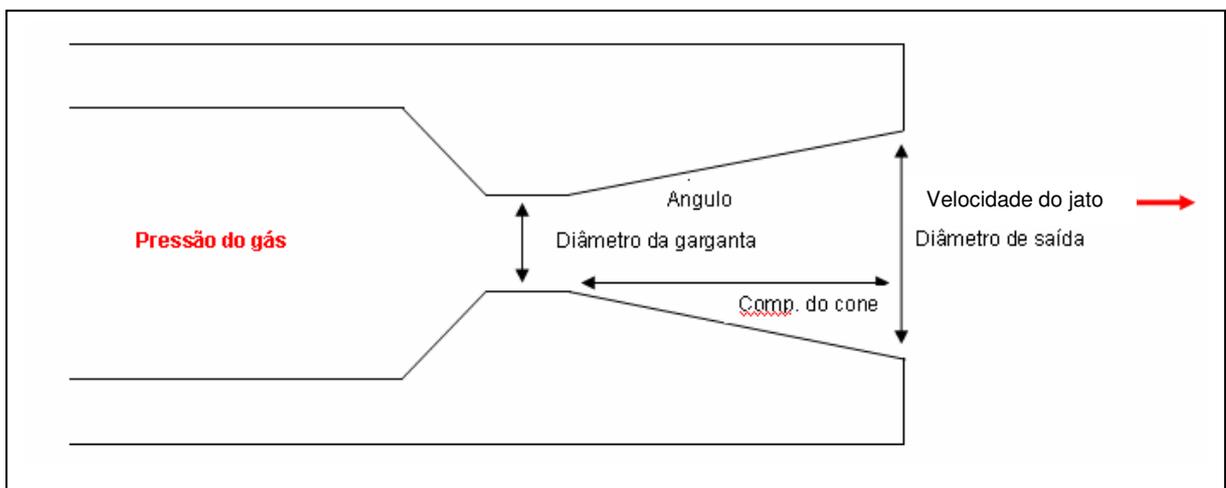


Figura 28 – Modelo de bocal supersônico convergente-divergente.

Fonte: Curso ABM de Aciaria Elétrica (2007).

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. Desta maneira, a força de impacto no diâmetro original do jato reduz à medida que a distância do bico aumenta. 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  $18^\circ$ .

Na fabricação de aço, são geralmente exigidos jatos supersônicos pela sua grande capacidade de penetrar no banho, associado a alta velocidade e densidade de gás.

Como as lanças geralmente são instaladas a uma distância de segurança do banho para evitar sua erosão mecânica ou química, certa quantidade de gás da atmosfera do forno é arrastada pelo jato, reduzindo a sua concentração de oxigênio. Para minimizar este problema como já comentado anteriormente, foi desenvolvido o sistema *co-jet*, que consiste em

envolpear o jato principal com um jato protetivo de gás combustível e oxigênio, e que trouxe os seguintes benefícios:

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

A Figura 29 ilustra perfeitamente o perfil do jato supersônico convencional e outro jato supersônico com sistema *cojet*, assim como a Figura 30 mostra um jato *cojet* real.

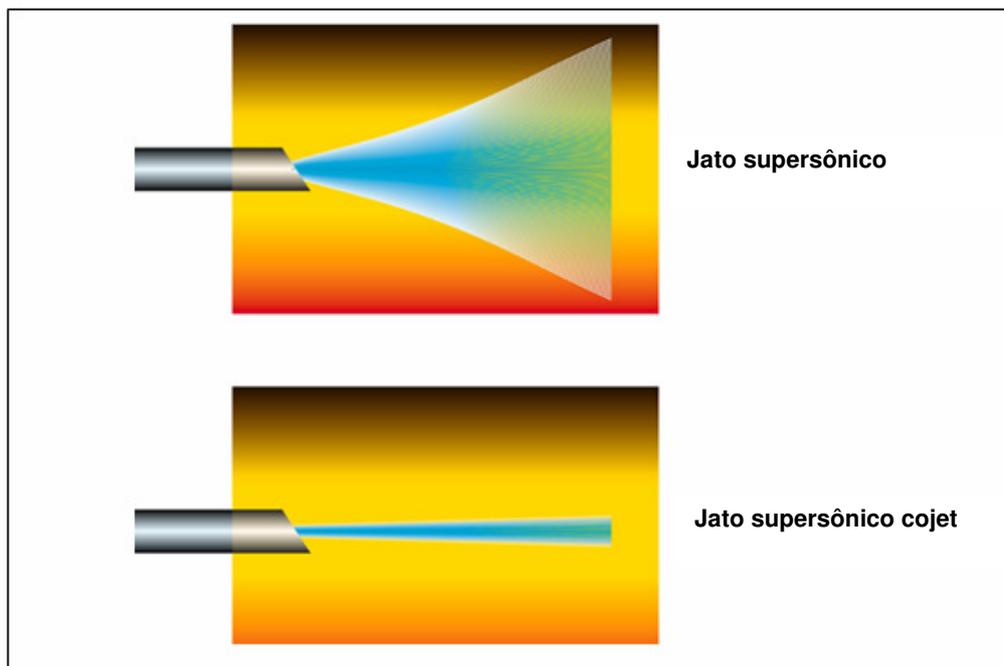


Figura 29 – Imagem ilustrativa comparando um modelo de jato supersônico convencional e um jato supersônico *cojet*.

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



Figura 30 – Jato supersônico protegido por um jato auxiliar de gás natural e oxigênio, caracterizando o sistema cojet.

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

### *2.5.1 Projeto do bico supersônico*

Durante o projeto de um bico para trabalho com jato supersônico, vários são os cuidados a serem tomados para o sucesso de sua operação. Se a entrada da garganta não for suave, perdas de energia ocorrem ao ponto que a verdadeira pressão de trabalho da lança seja maior que a pressão de estagnação calculada. O comprimento da região de garganta também não deve ser superior a uma vez o diâmetro deste segmento, senão a camada limite cresce diminuindo o diâmetro efetivo da garganta, além de reduzir o coeficiente de descarga do bico.

#### *2.5.1.1 Jato ideal*

Quanto às condições de operação, como pode ser visto no exemplo da Figura 31, o gás ao passar a região da garganta expande, reduzindo a temperatura, densidade e pressão. A velocidade é aumentada para velocidades supersônicas ( $M > 1$ ) e assim o gás sai do bico de maneira linear.

Neste caso o gás sai de maneira ideal sem apresentar distúrbios, com velocidade relativa ideal e sem alteração da pressão no contorno, realizando uma fácil transição para a atmosfera com o gás totalmente expandido.

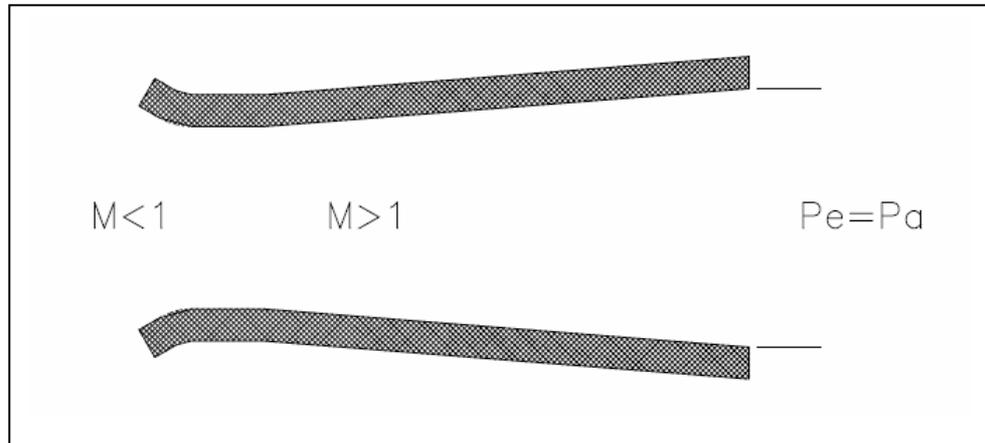


Figura 31 – Modelo ideal de jato na saída do bocal, onde a pressão de saída ( $P_e$ ) é igual a pressão do Forno ( $P_a$ ).

Fonte: Tallman- Bronze Company (2001).

#### 2.5.1.2 Jato sobre expandido

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 (caso ideal). 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 32.

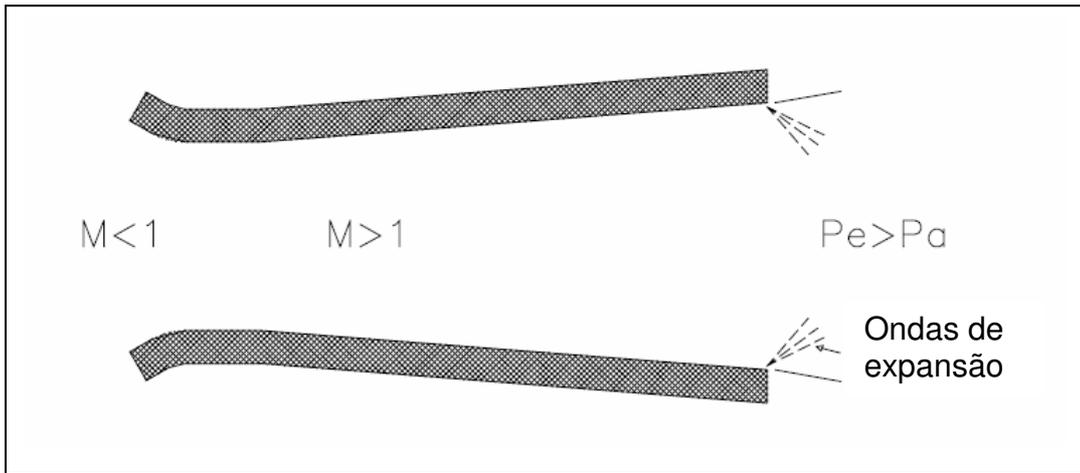


Figura 32 – Modelo de jato sobreexpandido na saída do bocal, onde a pressão de saída ( $P_e$ ) é maior que a pressão do Forno ( $P_a$ ).

Fonte: Tallman- Bronze Company (2001).

### 2.5.1.3 Jato subacelerado

Quando a pressão do jato em seu contorno atinge a pressão do ambiente em algum ponto ainda no interior do bico (região divergente), este extingue a sua expansão e se desprende da parede antes de deixar o bico. Este fenômeno também gera ondas de choque que se propagam a partir do ponto onde ocorre o descolamento do jato da parede do bico. Estas ondas dragam gás do ambiente para região entre a parede e o jato descolado ainda no interior do bico.

Este fenômeno acaba trazendo gases quentes para a extremidade do bico, que gera um super aquecimento e, conseqüentemente, um desgaste prematuro da ponta da lança. Este efeito pode ser minimizado pela refrigeração com circulação de água no interior do injetor, porém, para uma eficiência garantida no processo, são indicadas vazões que não causam descolamento do jato no interior do bico durante a operação. Na Figura 33, pode-se verificar o exemplo de formação de ondas de um jato que se desprende da parede no interior do bico convergente.

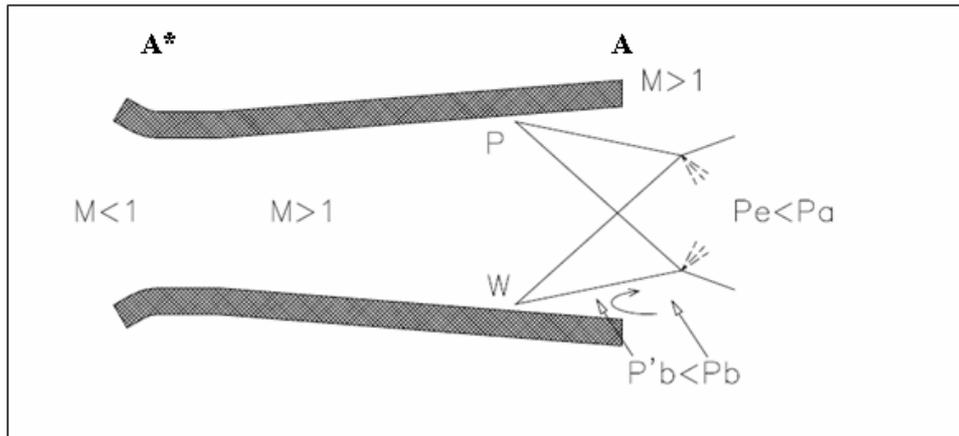


Figura 33 – Modelo de jato subacelerado na saída do bocal, onde a pressão de saída ( $P_e$ ) é menor que a pressão do Forno ( $P_a$ ).

Fonte: Tallman - Bronze Company (2001)

Kawakami (1966) explica que para reduzir as ondas de choque é necessário adotar uma correta relação entre a área da seção transversal de saída do bocal e a área da seção transversal da garganta ( $A/A^*$ ) no lado divergente para uma razão de pressão pretendida ( $P/P_0$ ), e uma forma entre as seções transversais para produzir menores ondas de choque.

Estes fenômenos interferem diretamente na capacidade do jato transformar pressão em momento, a fim de gerar uma boa penetração no banho. A penetração deficiente pode gerar uma mistura entre escória e metal, afetando de imediato o rendimento metálico e os demais resultados metalúrgicos.

Estas características dos jatos relacionados às pressões e vazões de processo interferem na vida útil dos injetores e no consumo total de oxigênio, já que um bico desgastado tem seu diâmetro de orifício aumentado, possibilitando maior passagem de gás para o mesmo nível de pressão.

#### 2.5.1.4 Conceitos básicos utilizados no dimensionamento de um bico supersônico

Os conceitos envolvidos em jatos sônicos têm origem nas equações de conservação de energia, conservação de massa e equações de estado aplicadas em sistemas no estado estacionário. Para simplificar os cálculos desenvolvidos, o oxigênio será considerado como gás ideal.

Pela equação de conservação de energia, freqüentemente denominada de equação de Bernoulli, é estabelecida uma relação entre a velocidade do fluido, a mudança de energia potencial, a energia associada ao nível de pressão e o trabalho feito pelo fluido.

Uma primeira simplificação da equação de Bernoulli para descrever o comportamento de jatos sônicos consiste em considerar um tubo na horizontal, assumir regimes turbulentos, desprezando os efeitos das forças de fricção e, finalmente, assumir que nenhum trabalho nas vizinhanças é realizado. Assim é definida a relação de velocidade em dois pontos distintos em função da pressão, e com estas simplificações obtém-se a equação 2.7:

$$\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} + \int_1^2 \frac{1}{\rho} dP = 0 \quad (2.7)$$

Onde  $v_1$  – velocidade média no ponto 1 em algum lugar na tubulação ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $v_2$  – velocidade média no ponto 2 desta mesma tubulação ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $dP$  – variação de pressão em dois pontos (Pa) e  $\rho$  – densidade ( $\text{kg.m}^{-3}$ ).

Segundo Glass e Smith (1976) citado por Maia (2007), para estabelecer o comportamento do oxigênio ao longo do duto, o escoamento é considerado unidimensional. Isto significa que a velocidade, temperatura e pressão são constantes ao longo da seção transversal do duto.

Para que a equação 2.7 esteja adequada, as premissas abaixo devem ser atendidas:

- A vazão de gás no duto é constante;
- Não existe fluxo de calor entrando ou saindo do gás, enquanto ele escoar por esta porção do duto;
- Os efeitos de fricção na parede são desprezíveis.

Ainda segundo Glass e Smith (1976), um gás movendo com velocidade inferior 61 m/s pode, em muitos casos, ser tratado como sendo um fluido incompressível (densidade constante), e um gás movendo com velocidades próximas de 305 m/s tem que ser tratado como fluido compressível. Desta forma, para descrever os aspectos fluido-dinâmicos dos jatos

de oxigênio, é necessário considerar as propriedades termodinâmicas de um fluido compressível.

$$\bar{v} \times d\bar{v} + \left( \frac{dP}{d\rho} \right) \times \left( \frac{d\rho}{\rho} \right) = 0 \quad (2.8)$$

Para fluidos compressíveis, a equação 2.7 é diferenciada em termos da velocidade média, considerando o escoamento unidimensional. A equação é desenvolvida para obter uma relação entre a velocidade, a pressão e a densidade do fluido, conforme a equação 2.8.

Introduzindo o conceito de velocidade do som, será desenvolvida uma solução para os termos diferenciais da equação 2.8.

$$\bar{v}_s = \left( \frac{\partial P_s}{\partial \rho_s} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

A relação entre a variação de pressão e a variação da densidade são determinantes para a velocidade do som do fluido, apresentada na equação 2.9.

Combinando as equações 2.8 e 2.9, fica estabelecida uma relação entre a variação de velocidade e a densidade, conforme apresentado na equação 2.10.

$$\frac{d\rho}{\rho} = - \frac{\bar{v} \times d\bar{v}}{\bar{v}_s^2} \quad (2.10)$$

Até o momento, as equações desenvolvidas consideraram uma seção de área constante para simplificar as deduções que levam ao conceito de velocidade sônica. Entretanto, variações na seção do duto provocam variações na velocidade sônica e precisam ser detalhadas.

Para desenvolver uma relação entre a área da seção do duto e a velocidade do fluido, será considerado um volume de controle no estado estacionário e com taxa de massa constante, conforme figura 34.

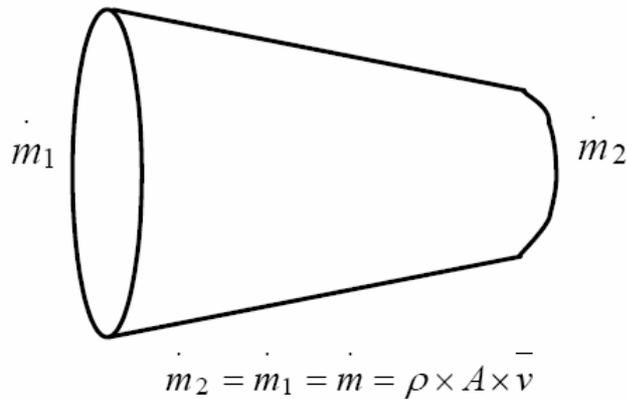


Figura 34 – Esquema representativo da vazão mássica

Expressando a vazão mássica apresentada na Figura 34 na forma diferencial, tem-se a expressão 2.11:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{d\bar{v}}{\bar{v}} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (2.11)$$

Onde A e dA são respectivamente a área transversal ( $m^2$ ) e a diferença de área transversal ( $m^2$ ).

Combinando as equações 2.10 e 2.11, estabelece-se uma relação entre a velocidade e a área, conforme apresentado na equação 2.12.

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dv}{v} \times (1 - Ma^2) \quad (2.12)$$

Onde Ma – número adimensional de Mach.

O número adimensional de Mach representa uma relação entre a velocidade do fluido e a velocidade do som apresentada na equação 2.13.

$$Ma = \frac{\bar{v}}{v_s} \quad (2.13)$$

Considerando a região entre os dois pontos arbitrários no interior de um bocal convergente-divergente, onde será desenvolvido um balanço de energia envolvendo entalpia e a energia cinética na seção, obtém-se a equação 2.14.

$$h_1 + \frac{\bar{v}_1^2}{2} = h_2 + \frac{\bar{v}_2^2}{2} \quad (2.14)$$

Onde  $h$  - entalpia (J) e  $v_1$  - velocidade média no ponto 1 ( $m.s^{-1}$ ),  $v_2$  - velocidade média no ponto 2 ( $m.s^{-1}$ ).

A Figura 35 representa um esquema de bocal convergente divergente.

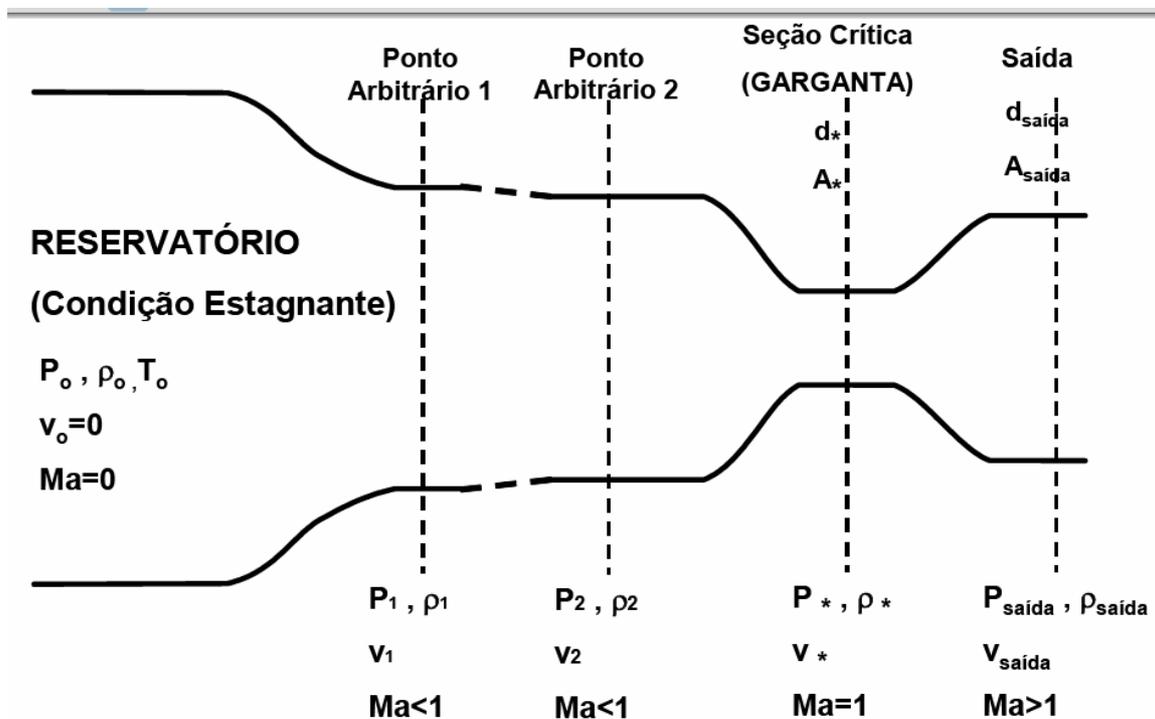


Figura 35 – Esquema do fluxo de gás por um bocal convergente-divergente.

Fonte: Mundim (1985), citado por Maia (2007).

O desenvolvimento da equação 2.14 para obtenção de expressões relacionando a pressão, temperatura e densidade do gás é trabalhoso. Considerando um processo adiabático isoentrópico para um gás ideal, obtém-se que a equação 2.15:

$$\frac{P}{P_o} = \left( \frac{T}{T_o} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.15)$$

Onde:

$$\gamma = \frac{\overline{C_p}}{\overline{C_v}} \quad (2.16)$$

Onde P – pressão (Pa), P<sub>o</sub> - pressão na seção estagnante (Pa), T – temperatura (K), T<sub>o</sub> – temperatura na seção estagnante (K),  $\gamma$  - constante adiabática do gás, C<sub>p</sub> – capacidade térmica do gás a pressão constante (J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) e C<sub>v</sub> - capacidade térmica do gás a volume constante (J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>).

Com esta consideração, é possível reescrever a equação 2.14 nas formas 2.17, 2.18 e 2.19:

$$T_2 \times \left( 1 + \frac{(\gamma-1)}{2} \times Ma_2^2 \right) = T_1 \times \left( 1 + \frac{(\gamma-1)}{2} \times Ma_1^2 \right) \quad (2.17)$$

$$\rho_2^{(\gamma-1)} \times \left( 1 + \frac{(\gamma-1)}{2} \times Ma_2^2 \right) = \rho_1^{(\gamma-1)} \times \left( 1 + \frac{(\gamma-1)}{2} \times Ma_1^2 \right) \quad (2.18)$$

$$P_2^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \times \left( 1 + \frac{(\gamma-1)}{2} \times Ma_2^2 \right) = P_1^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \times \left( 1 + \frac{(\gamma-1)}{2} \times Ma_1^2 \right) \quad (2.19)$$

Onde  $T_1$  – temperatura no ponto 1 (K),  $T_2$  – temperatura no ponto 2 (K),  $\rho_1$  – densidade no ponto 1 ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $\rho_2$  – densidade no ponto 2 ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $P_1$  – pressão no ponto 1 (Pa),  $P_2$  – pressão no ponto 2 (Pa),  $Ma_1$  - Número de Mach no ponto 1,  $Ma_2$  - Número de Mach no ponto 2.

As equações de 2.17 a 2.19 podem ser desenvolvidas para as condições no reservatório considerando que a velocidade é tão pequena que o número de Mach pode ser considerado igual a zero. Por sua vez, as reduções da seção do duto vão até uma seção mínima, denominada pelo subscrito “\*”, chamada de seção crítica ou “garganta”, determinada pelo número de Mach igual a 1. Isto significa que a velocidade do fluido é igual à velocidade do som no meio. Nestas condições, as equações de 2.17 a 2.19 podem ser escritas nas formas 2.20, 2.21 e 2.22.

$$T_* \times \left( 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} \right) = T_1 \times \left( 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} \times Ma_1^2 \right) \quad (2.20)$$

$$P_*^{\frac{(\gamma - 1)}{\gamma}} \times \left( 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} \right) = P_1^{\frac{(\gamma - 1)}{\gamma}} \times \left( 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} \times Ma_1^2 \right) \quad (2.21)$$

$$\rho_*^{(\gamma - 1)} \times \left( 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} \right) = \rho_1^{(\gamma - 1)} \times \left( 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} \times Ma_1^2 \right) \quad (2.22)$$

Onde  $T_*$  – temperatura na seção crítica (K),  $\rho_*$  – densidade na seção crítica ( $\text{kg.m}^{-3}$ )  
<sup>3</sup>)  $P_*$  – pressão na seção crítica (Pa).

Uma relação importante é obtida realizando novamente o balanço de massa, conforme esquema apresentado na Figura 33, aplicado em um ponto qualquer do duto e na seção crítica. Esta relação determina a área crítica como função do número de Mach e da seção qualquer do duto, conforme apresentado na equação 2.23.

$$\frac{A}{A_*} = \left( \frac{1 + \left( \frac{\gamma - 1}{2} \right) \times Ma^2}{\left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)} \right)^{\left( \frac{\gamma + 1}{2 \times (\gamma - 1)} \right)} \times \frac{1}{Ma} \quad (2.23)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DO FORNO 3

A busca dos melhores parâmetros de processo dos injetores atuais, bem como testes com os novos modelos de injetores supersônicos foram realizados no forno 3 da Gerdau Riograndense, que possui as características apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Dados do forno elétrico

Fabricante	BBC
Ano de Fabricação	1956
Capacidade (toneladas de sucata)	25 toneladas
Volume bruto	19,74 m <sup>3</sup>
Capacidade do Transformador	26 MVA

Fonte: Gerdau Riograndense.

Tabela 6 – Dados das dimensões do forno elétrico

Porta de Escória	Dimensões	1500 x 550 mm
	Abertura para lanças	1000 x 300 mm
Eletrodos (grafita)	Diâmetro	406 mm (16")
	Diâmetro furos	457 mm (18")
Abóbada	Altura	495 mm
	Medidas externas	4400 x 3900 mm

Fonte: Gerdau Riograndense

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE OXIGÊNIO DO FORNO ELÉTRICO 3

A Tabela 7 caracteriza o processo de injeção de O<sub>2</sub> empregado no forno 3 com o modelo atual de injetores.

Tabela 7 – Dados referentes ao sistema de injeção de oxigênio.

Modelo/número de bicos	Modo	Pressão (kgf/m <sup>2</sup> )	Vazão/bico (Nm <sup>3</sup> /h)	Ø do bico (mm)
Lança consumível/2	Alta	7,0	700	16(tubo)
Jato Convencional/4*	Purga	1,1	88	12 e 12,5
	Baixa	2,5	125	
	Alta	4,5	210	
Jato Supersônico/2 MPDF	Purga	1,0	70	9,85(garganta)
	Alta	9,3	370	

Fonte: Gerdau Riograndense

\*Os quatro bicos são referentes a dois bicos no corpo dos dois injetores MPDF e dois bicos em dois injetores convencionais.

O modo purga no sistema de injeção é aquele utilizado para manter uma passagem de oxigênio suficiente para não ocorrer o entupimento do bico injetor utilizado, por exemplo, no período de *power off* da corrida.

O modo alta vazão é aquele utilizado para efetivamente provocar a oxidação do banho.

O modo baixa vazão é utilizado nos injetores convencionais para a promoção do fenômeno de *post combustion*.

As Figuras 36 e 37 caracterizam os dois modelos de injetores utilizados no forno 3 da Gerdau Riograndense, assim como, a Figura 38 demonstra o local onde cada um é posicionado no FEA.

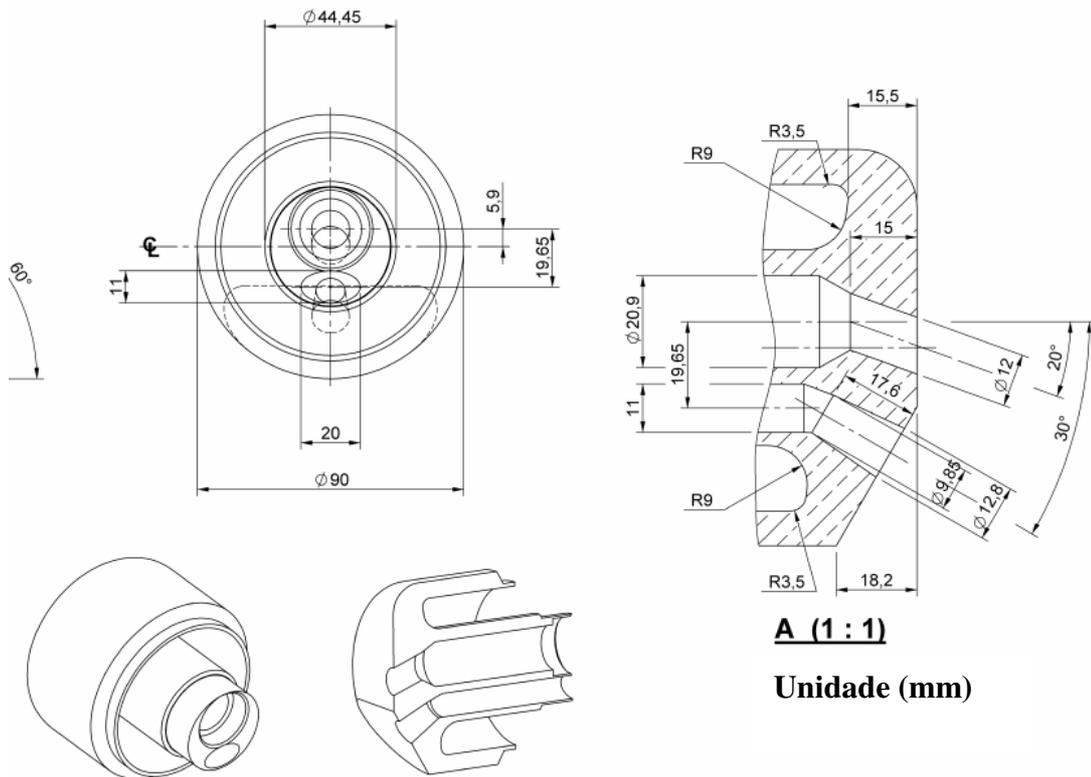


Figura 36 – Injetor MPDF instalado em dois pontos do forno.

Fonte – Cortesia Gerdau Riograndense

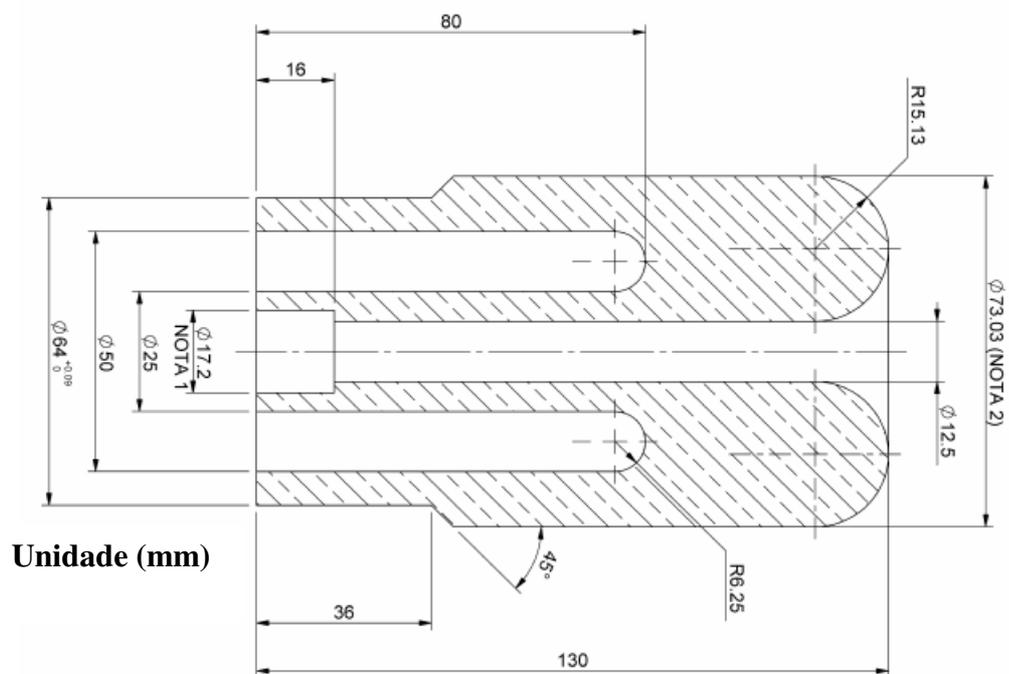


Figura 37 – Injetor convencional instalado em dois pontos do forno.

Fonte – Cortesia Gerdau Riograndense

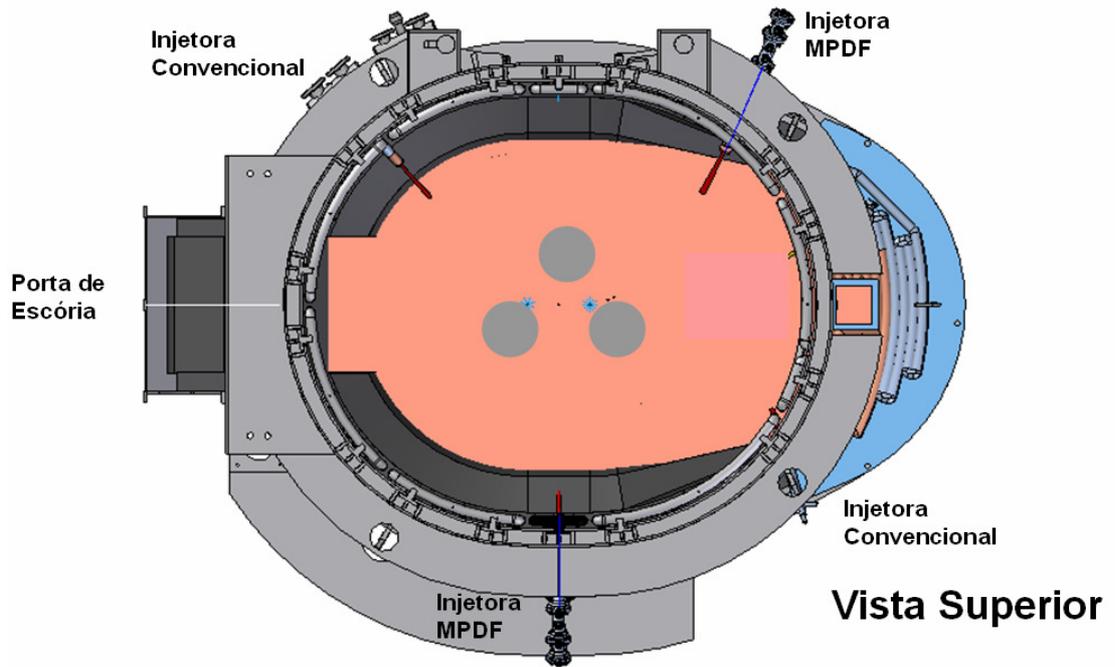


Figura 38 – Posicionamento dos injetores de oxigênio no forno elétrico 3  
Fonte Gerdau Riograndense

A Figura 39 caracteriza o novo diâmetro de garganta do bocal supersônico da injetora MPDF, projetado para o teste segundo Maia (2007). Foram preparadas duas unidades para o experimento. As cotas alteradas estão destacadas pela elipse, e podem ser comparadas com o desenho da Figura 36, que representa o injetor utilizado atualmente. O diâmetro da garganta neste novo injetor é de 8,6 mm, e o diâmetro da extremidade da seção divergente é de 11.2 mm.

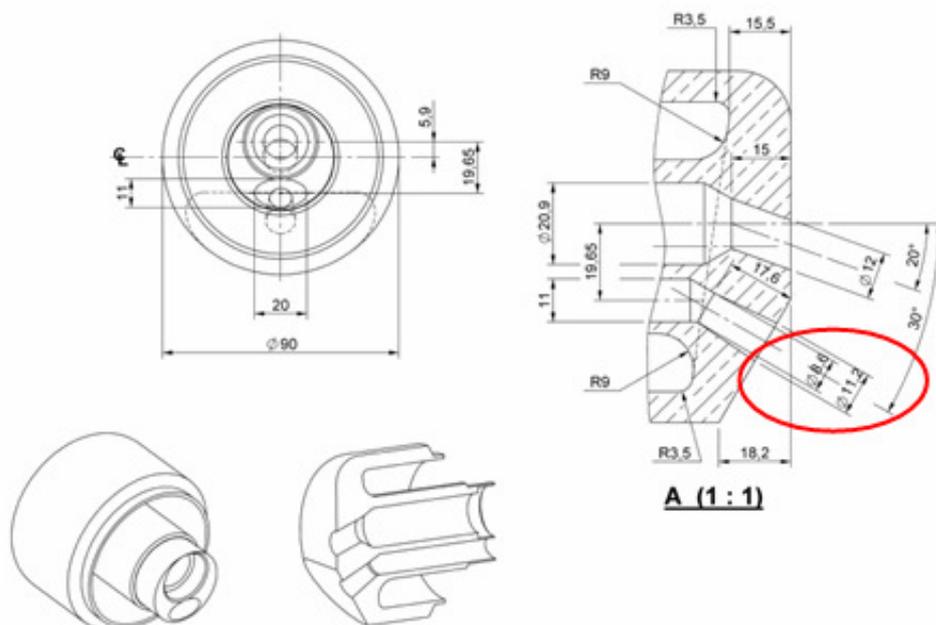


Figura 39 – Novo modelo de lança supersônica com diâmetro de garganta 8,6 mm.

### 3.3 METODOLOGIA DO PROCESSO NO FEA

O forno 3 tem capacidade de vazamento de 21 ton de aço líquido por corrida, operando com *Tap to Tap* aproximado de 40 minutos.

O perfil de injeção de oxigênio durante todo o período da corrida pode ser descrito segundo o gráfico da figura 40. Este perfil representa a condição de carga fria específica realizada durante o período de teste, respeitando o balanço entre carbono e oxigênio ao ponto de atingir o teor médio de 37 % de FeO na escória. As vazões utilizadas estão especificadas na Tabela 7 do item 3.2.

Na Figura 40 é possível observar que no início da corrida todas as injetoras operam um determinado período no modo purga. Este tempo favorece um aquecimento prévio da sucata antes da atuação no modo alta vazão, evitando rebotes de jato na direção dos painéis refrigerados e material refratário.

Após o tempo inicial de modo purga, é ativado o modo alta vazão, para efetivamente gerar a oxidação do banho. O modo purga volta a ser ativado durante o período de *power off* para a realização do 2º e 3º carregamento do cestão, retornando o modo alta vazão logo após o fechamento do FEA.

Após carregar o último cestão, é utilizada a lança consumível para cortar/fundir a sucata na região da porta de escória.

Após o período de alta vazão, todas as injetoras retornam ao modo purga durante a etapa de refino, exceto as injetoras convencionais, que ainda operam um determinado período no modo baixa vazão, para favorecer o fenômeno de *post combustion*.

Ciclo de injeção de Oxigênio durante o Tap to Tap da corrida do FEA3 da Gerdau Riograndense

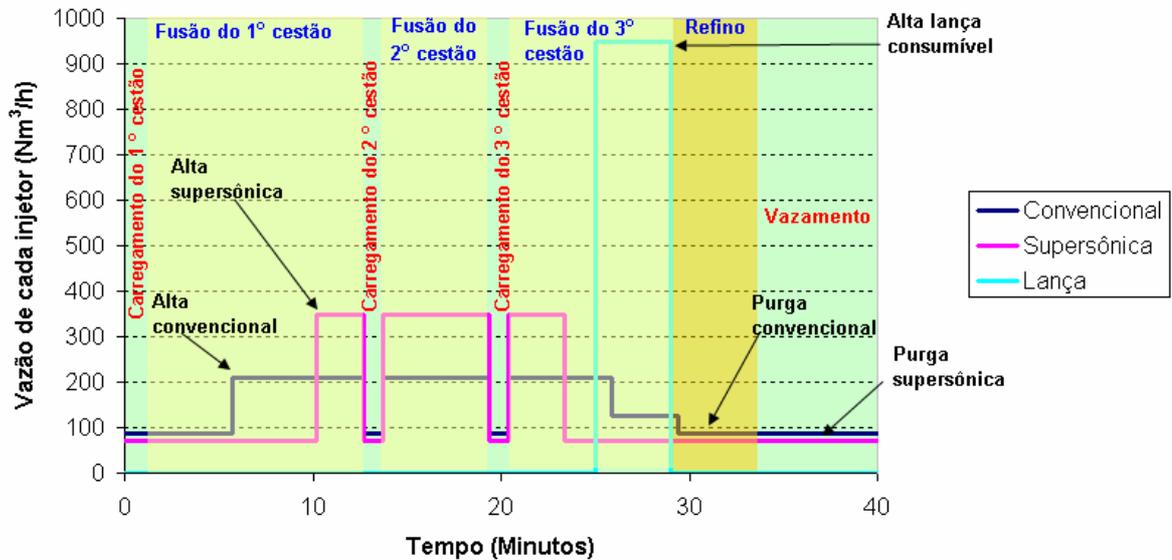


Figura 40 – Ciclo de injeção de oxigênio do FEA3 para cada unidade de injetor.  
Fonte Gerdau Riograndense

Como pode ser visto na Figura 40, em aproximadamente 28% de todo tempo do *Tap to Tap* da corrida, os bicos supersônicos operam no modo vazão alta vazão. Este tempo pode ser maior ou menor dependendo basicamente dos seguintes fatores, comentado na literatura por Bihel (2006), Memoli (2004), Meidane (2004):

- Teor de carbono, silício, fósforo, manganês e demais elementos suscetíveis a reação de oxidação na carga;
- Teor de FeO objetivado na escória, relacionado também com a massa total de escória;
- Tempo de *power on* da corrida;
- Tempo de *power off* da corrida;
- Eficiência com que o oxigênio chega aos materiais de reação, ou seja, sua capacidade de penetrar no banho;
- Vazões toleradas por partes importantes do forno sem causar desgaste, como por exemplo, o material refratário, painéis refrigerados, abóbada, eletrodos ou o próprio bico do injetor.
- Quantidade de oxigênio injetado pelos bicos convencionais, que ajudam a aquecer pontos frios no interior do forno, assim como, promovem a pós-combustão;

- Quantidade de oxigênio injetado pela lança consumível, utilizado para derrubar e fundir a sucata na região da porta de escória;
- Número de injetores e seu posicionamento;
- Entrada de ar falso no forno;
- Vazão de oxigênio estabelecida no modo purga, utilizado para evitar o entupimento do bico.

A vazão utilizada no modo purga também interfere diretamente na quantidade de oxigênio injetado no modo alta vazão dos bicos supersônicos. Apesar das baixas vazões de oxigênio no modo purga, estas acabam oxidando a superfície do banho, pela pouca capacidade de penetração do jato no metal líquido. Para uma condição ideal, o modo purga deveria ser eliminado por completo, mas, devido à exposição do bico a entupimentos, isto não é possível.

O entupimento dos bicos injetores é um problema muito sério, pois afeta o desempenho e a vida útil dos injetores supersônicos. Este tema não é muito abordado na literatura, embora alguns parâmetros de processo evitam contratempos e maximizam o uso dos injetores. No caso de entupimento do bico, a única alternativa que resta é substituir o equipamento, porém muitas vezes este fica bastante ancorado no ponto onde está instalado. Isto se deve pelo acúmulo de escória, que impede sua imediata remoção com o forno quente. Neste caso, é necessário aguardar o resfriamento de toda região, bem como utilizar equipamentos especiais com sistema de roldanas para gerar a extração. Como paradas grandes geralmente comprometem o atendimento do volume de produção, a substituição do injetor é efetuada na parada programada mais próxima. A operação do forno, então, é realizada sem o equipamento, comprometendo o desempenho de indicadores energéticos neste período.

Portanto, as vazões e pressões para operação no modo purga devem atender um valor mínimo, para minimizar a ocorrência de entupimentos. Por outro lado, devem atender um valor máximo, a fim de evitar a oxidação excessiva da superfície do metal líquido.

Conforme comentado por Meidane (2004), Memoli (2004) e Bihel et al (2006), no modo de alta vazão nos injetores supersônicos, o jato de oxigênio deve possuir uma característica de grande penetração e agitação do banho. Assim, realizando uma oxidação mais rápida e homogênea. Porém, a vazão e pressão máximas estão limitadas a efeitos cinéticos no banho, que podem gerar oxidação muito elevada pontualmente. Isto porque a velocidade com que o fluxo de metal se movimenta no interior do forno pode não ser o suficiente para transportar elementos como carbono, silício, manganês e fósforo de outros pontos para a região do jato, desta forma favorecendo a oxidação do ferro. A ocorrência de

rebotes do jato em direção ao material refratário, painéis refrigerados, eletrodos e abóbada também é um ponto importante a ser observado, para determinar a vazão e pressão máxima de operação.

Na Figura 41, é possível observar a injetora supersônica recém montada no refratário do forno, antes de iniciar a operação do FEA.



Figura 41 – Montagem da injetora MPDF no refratário antes de partir o forno.

Fonte: Cortesia Gerdau Riograndense.

O estudo para a determinação das pressões e vazões ideais para operação no modo purga e alta vazão foi realizado analisando parâmetros operacionais como:

- Análise de composição química da escória a cada 5 corridas (teor de FeO);
- Consumo de energia elétrica específica (fechamento diário);
- Avaliação visual do desgaste da massa refratária na região dos injetores MPDF (frequência diária);
- Avaliação visual do desgaste dos bicos supersônicos (frequência diária);
- Consumo específico de O<sub>2</sub> (fechamento diário).

### 3.4 TESTES NO MODO PURGA

Nos testes do modo purga foram observadas para determinação de pressão mínima de operação, 1075 lotes para avaliar a ocorrência de entupimentos (3 lotes com pressão de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup> e 1072 lotes com pressão entre 0,9 e 1,1 kgf/cm<sup>2</sup>). A composição química da escória foi analisada em 137 lotes nesta condição.

Para a determinação da pressão máxima do modo purga, foram avaliadas 537 corridas (na pressão entre 1,3 a 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>). A escória foi analisada em 67 corridas nesta condição.

Não houve mudanças significativas na carga fria no período dos testes, assim como não foram alterados os demais parâmetros operacionais.

### 3.5 TESTES NO MODO ALTA VAZÃO

Nos testes do modo de alta vazão, para a determinação da pressão e vazão ideal de operação, foram acompanhados os seguintes números de lotes:

- 135 corridas com pressão abaixo de 9,0 kgf/cm<sup>2</sup>;
- 135 corridas com pressão entre 9,0 e 9,5 kgf/cm<sup>2</sup>;
- 135 corridas com pressão acima de 9,5 kgf/cm<sup>2</sup>.

### 3.6 TESTES COM O NOVO INJETOR

Como já foi comentado no item 3.3, o valor de pressão e vazão de purga deve ser o menor possível para evitar a oxidação excessiva da superfície do banho, mas também deve ser o suficiente para evitar a ocorrência de entupimentos.

Por outro lado, no modo de alta vazão, deve ser garantida uma vazão e pressão do jato suficiente para penetração no metal líquido e a agitação do banho.

Verificou-se então que a rede de oxigênio do forno 3 disponibiliza uma pressão de até 14 kgf/cm<sup>2</sup> para operação no modo alta vazão. Segundo Maia (2007), é possível operar com um bico de diâmetro de garganta de 8,6 mm com base nos parâmetros de vazão utilizados no modo alta vazão nos injetores atuais. Para a determinação deste diâmetro foram utilizados conceitos descritos no item 2.5.1.4.

No modo purga, os parâmetros de pressão serão os mesmos utilizados nos injetores atuais neste modo de operação, porém a vazão automaticamente será menor, devido a redução da área transversal da garganta do bocal (9,85 mm para 8,6 mm).

Para análise do desempenho entre os injetores supersônicos já utilizados no forno 3 e o novo modelo proposto, foram analisadas 100 corridas, ou seja, 51 lotes na condição atual e 49 lotes durante a operação com o novo injetor. Os parâmetros analisados para verificar a diferença de desempenho entre os dois injetores foram:

- Rendimento metálico;
- Consumo de oxigênio;
- Consumo de energia elétrica.

Não houve mudanças significativas na carga fria no período dos testes, assim como não foram alterados os demais parâmetros operacionais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PARÂMETROS DO MODO PURGA

#### 4.1.1 Entupimentos de bicos

Para reduzir ao mínimo a ocorrência de entupimentos, verificou-se que é necessário operar com uma pressão mínima de  $0,9 \text{ kgf/cm}^2$  na rede de oxigênio do processo. Esta pressão utilizada gera uma vazão de  $65 \text{ Nm}^3/\text{h}$  por bico.

Na operação com pressão abaixo de  $0,9 \text{ kgf/cm}^2$ , foram observadas ocorrências de entupimentos e, conseqüentemente, a necessidade de substituir injetores, neste caso, a pressão de operação foi de  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$  e vazão de  $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$  na soma das duas injetoras. O entupimento foi verificado após produzir 3 lotes, quando notou-se que a vazão praticamente caiu pela metade ( $60 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ), e a pressão subiu para  $0,7 \text{ kgf/cm}^2$ . Após vaziar a corrida, realizou-se a inspeção visual, confirmando o entupimento da injetora instalada abaixo do *elbow*. Esta é a injetora mais próxima do banho, portanto mais exposta aos respingos.

Já com uma vazão de  $65 \text{ Nm}^3/\text{h}$  e pressão de  $0,9 \text{ kgf/cm}^2$  em cada bocal com diâmetro de garganta de  $9,85 \text{ mm}$ , não foram mais observados entupimentos. Assim, entende-se que esta seja a condição mínima de pressão e vazão para evitar o entupimento do injetor supersônico durante o modo de purga. Nestes parâmetros o bico é capaz de suportar os respingos principalmente durante a etapa de refino, quando o banho já está totalmente líquido e a escória está espumante, assim como durante o carregamento do cestão, pela grande projeção de material líquido.

#### 4.1.2 Influência do modo purga na oxidação do banho e escória

No item 4.1.1 foram avaliadas as condições mínimas de pressão e vazão do modo purga, para evitar o entupimento do injetor. Porém, verifica-se no processo que o controle da oxidação da escória se torna muito difícil se a pressão neste modo for superior a  $1,1 \text{ kgf/cm}^2$ , ou então, vazão superior a  $75 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .

A Figura 42 mostra que o teor de FeO médio da escória dos lotes na pressão de purga acima de  $1,1 \text{ kgf/cm}^2$  (média de  $1,4 \text{ kgf/cm}^2$ ), é 26% superior que a dos lotes com pressão de purga abaixo de  $1,1 \text{ kgf/cm}^2$ .

Isto indica a grande capacidade de oxidação localizada do jato que não possui características de penetração no banho, no caso de pressão elevada no modo purga.

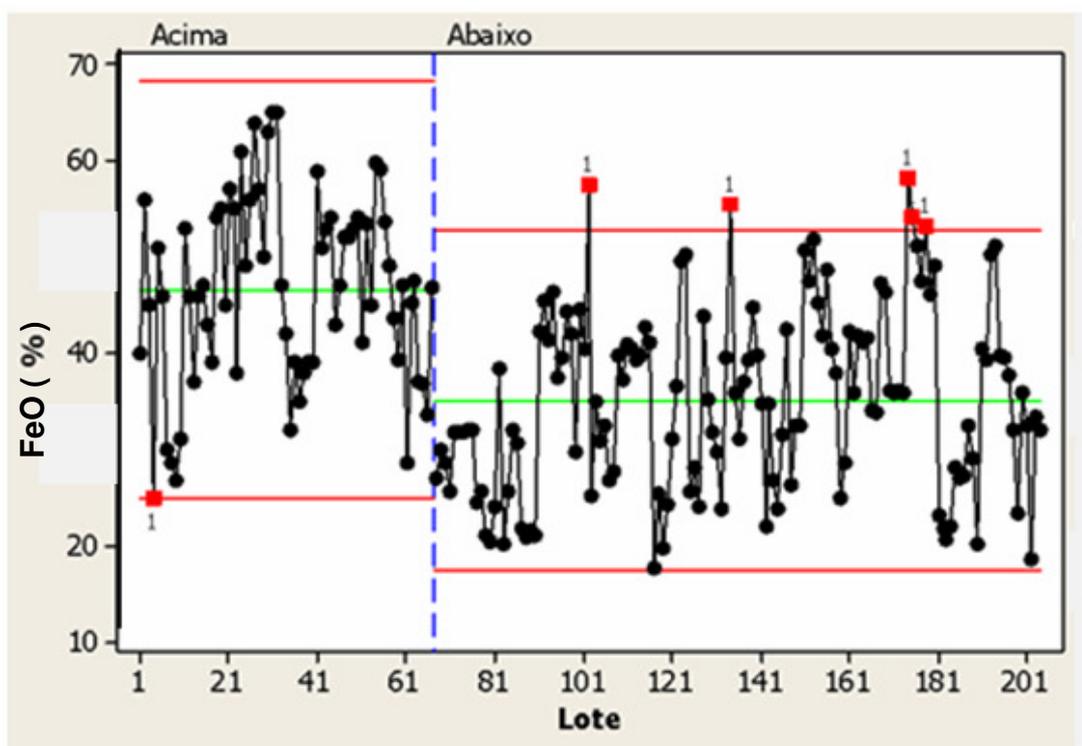


Figura 42 – Teor de FeO da escória do forno 3, no período de pressão de purga abaixo e acima de  $1,1 \text{ kgf/cm}^2$ .

Na Figura 43, é possível analisar que o consumo de médio de oxigênio com pressão de purga inferior a  $1,1 \text{ kgf/cm}^2$  é 6% inferior, se comparada a condição de pressão acima deste valor.

O oxigênio quando injetado inadequadamente sobre o banho acaba perdendo sua eficiência energética, gerando oxidação localizada quando injetado numa pressão elevada no modo purga. Isto porque o ferro é oxidado em excesso, já que os demais elementos como

carbono e silício distribuídos em todo o banho não são alcançados pelo jato de baixa penetração e capacidade de agitar o banho. Com um jato adequado, o oxigênio acaba reagindo com os elementos químicos que de fato deve reagir, não oxidando o ferro em excesso, reduzindo até mesmo a quantidade deste gás necessária no processo.

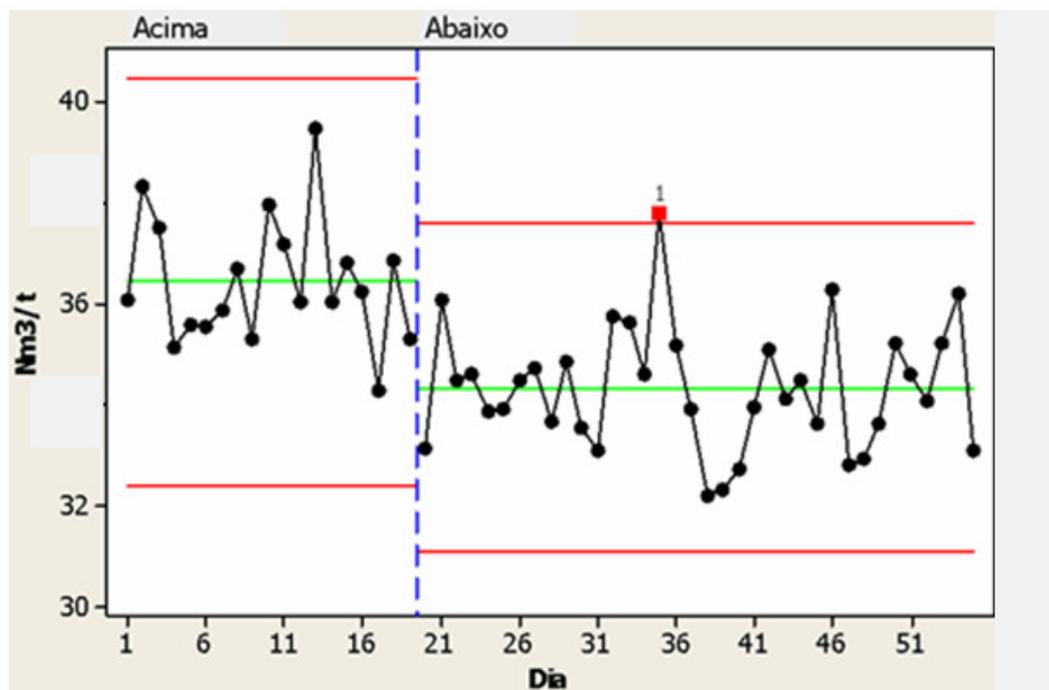


Figura 43 – Consumo específico de O<sub>2</sub> na corrida com pressão no modo purga abaixo e acima de 1,1 kgf/cm<sup>2</sup>.

A alternativa neste caso é reduzir o tempo de vazão no modo alta, mas que diretamente irá interferir no desempenho do forno (aumento do consumo de energia e redução da produtividade). Em algumas corridas, mesmo reduzindo o tempo de vazão do modo alta, não foi possível reduzir o teor de FeO da escória e, além disso, o teor de carbono do banho no final do refino ainda se manteve muito elevado para o vazamento.

Na figura 44, é possível analisar que o consumo médio de energia elétrica do forno 3 com pressão de purga superior a 1,1 kgf/cm<sup>2</sup> é 5% superior, se comparado com os lotes produzidos com pressão de purga abaixo deste valor. Isto se deve principalmente pela dificuldade de formar a escória espumante na condição de pressão elevada na purga, agravado pelo elevado teor de FeO, que deslocou a composição da escória da condição ideal de viscosidade. Isto prejudicou a transferência do calor do arco efetivamente para o banho durante o refino. Este fato provavelmente o desgaste do refratário do forno, porém este parâmetro que não foi avaliado.

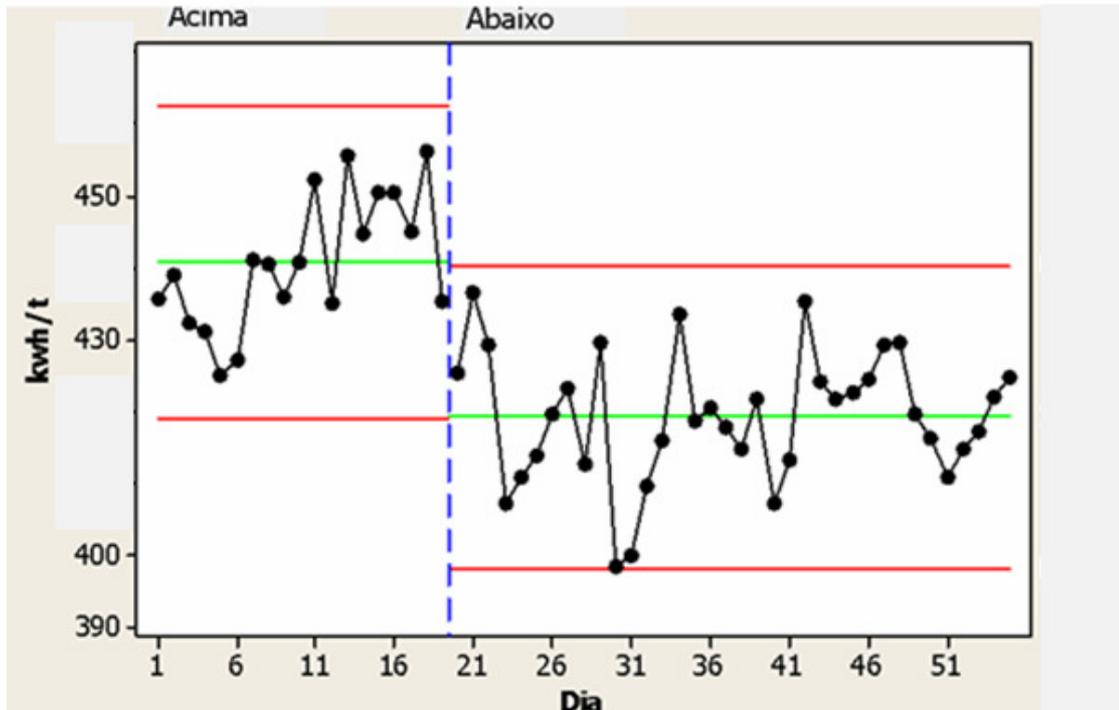


Figura 44 – Consumo de energia elétrica do forno 3, no período de pressão de purga abaixo e acima de  $1.1 \text{ kgf/cm}^2$ .

Portanto, com base em todos os testes realizados no modo purga dos injetores supersônicos do Forno 3, conclui-se que devem ser objetivadas as menores vazões possíveis durante este modo de operação, respeitando a pressão mínima de  $0,9 \text{ kgf/cm}^2$ . Abaixo desta pressão, a operação não é recomendada, pelo fato de haver exposição dos bicos a entupimentos, causados pelos respingos de material líquido (escória ou aço). Isto porque o volume da escória aumenta durante a etapa de refino, chegando muito próximo aos bicos. Outro momento crítico é o carregamento, onde muitos respingos são gerados com a queda da sucata no banho.

Observa-se, também, que a operação com pressões de purga superiores que  $1,1 \text{ kgf/cm}^2$  prejudicam significativamente o bom desempenho energético do forno, relacionado principalmente ao consumo de oxigênio e energia elétrica, além de prejudicar o controle do teor de FeO na escória.

## 4.2 TESTE DE VAZÃO NO MODO ALTA

### 4.2.1 Vazão mínima

Na condição atual de injeção, verificou-se que o desgaste do bico por razão de jato subacelerado é percebido somente quando a vazão do bico é inferior a  $350 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , ou a pressão inferior a  $9,0 \text{ kgf/cm}^2$ . A Figura 45 mostra uma injetora que operou 135 corridas com pressão de  $8,6 \text{ kgf/cm}^2$  e vazão de  $325 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . Para o mesmo número de corridas e pressão acima de  $9,0 \text{ kgf/cm}^2$ , o desgaste não foi percebido. O fenômeno responsável pelo efeito de erosão está descrito no item 2.5.1.3, ou seja, o jato ao se descolar da parede do cone divergente antes de atingir a extremidade do bico por baixa vazão, gera turbulência de gases quentes nesta região, assim provocando o desgaste.



Figura 45 – Injetor *Multi Point Double Flow* (MPDF) com erosão no bico, causado pelo jato subacelerado, na pressão abaixo de  $9,0 \text{ kgf/cm}^2$ .

#### 4.2.2 Vazão máxima

O refratário tem seu desgaste acelerado quando a pressão supera  $9,5 \text{ kgf/cm}^2$  e a vazão ultrapassa  $375 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . Na condição acima deste valor, a necessidade de reparo do forno aumenta. Durante o período dos testes com pressão acima de  $9,5 \text{ kgf/cm}^2$ , gastou-se 500 kg de massa de reparação na região das injetoras supersônicas. Na condição de pressão abaixo de  $9,5 \text{ kgf/cm}^2$ , o consumo de massa para produzir o mesmo número de corridas da condição anterior foi de 150 kg. A Figura 46 mostra a condição do refratário após a operação de 27 corridas (1 dia) com pressão superior a  $9,5 \text{ kgf/cm}^2$ . A Figura 41 no item 3.3 mostra o refratário logo após a montagem da carcaça, para efeitos de comparação do desgaste.

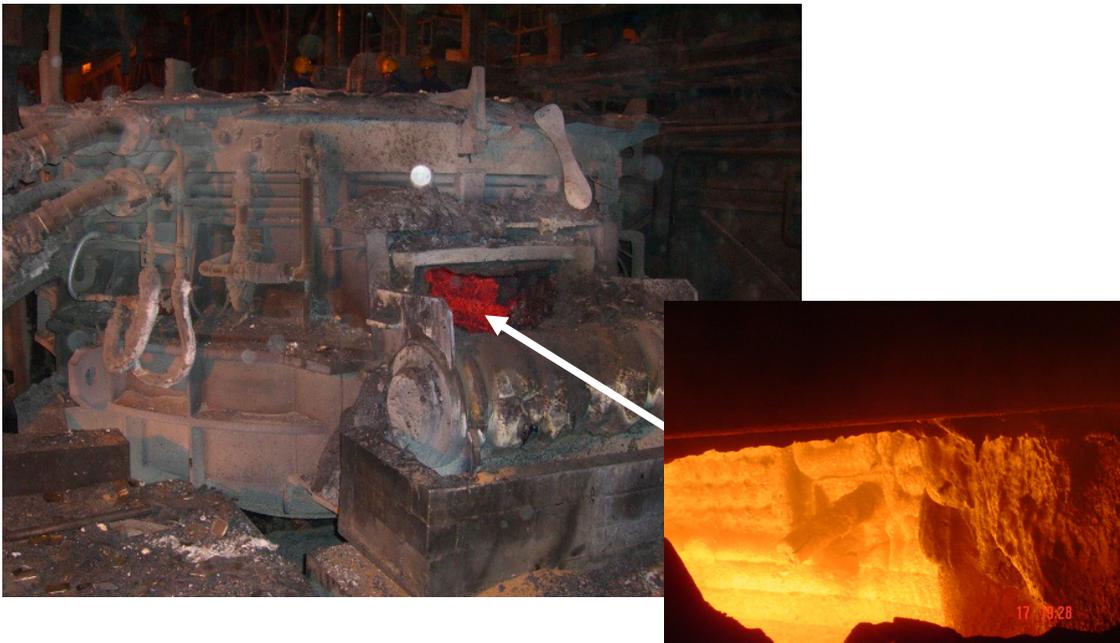


Figura 46 – Desgaste do refratário na região da injetora, após a operação de 27 corridas com pressão superior a  $9,5 \text{ kgf/cm}^2$  no bico supersônico.

### 4.3 RESULTADOS COM O NOVO MODELO DE BICO SUPERSÔNICO

Neste novo modelo de garganta, no modo purga foi possível operar com a vazão de 50 Nm<sup>3</sup>/h à pressão de 0,9 kgf/cm<sup>2</sup>. No modo de alta vazão, para atingir uma vazão de 360 Nm<sup>3</sup>/h, a pressão foi elevada para 12,5 kgf/cm<sup>2</sup>.

Na Figura 47 pode-se verificar a redução do consumo de O<sub>2</sub> no novo modelo em relação ao já utilizado no forno. No modelo de lança supersônica com diâmetro de garganta de 9,85 mm, o consumo médio de oxigênio medido foi 3% maior em relação ao novo modelo testado com diâmetro de garganta de 8,60 mm.

A redução do consumo de oxigênio foi devido a menor vazão utilizada no novo injetor no modo purga. Isto foi possível mantendo a mesma pressão mínima de 0,9 kgf/cm<sup>2</sup>, garantindo o não entupimento dos bicos. A vazão de oxigênio em cada bico do injetor atual é de 65 Nm<sup>3</sup>/h. No bico novo testado, a vazão utilizada reduziu para 50 Nm<sup>3</sup>/h.

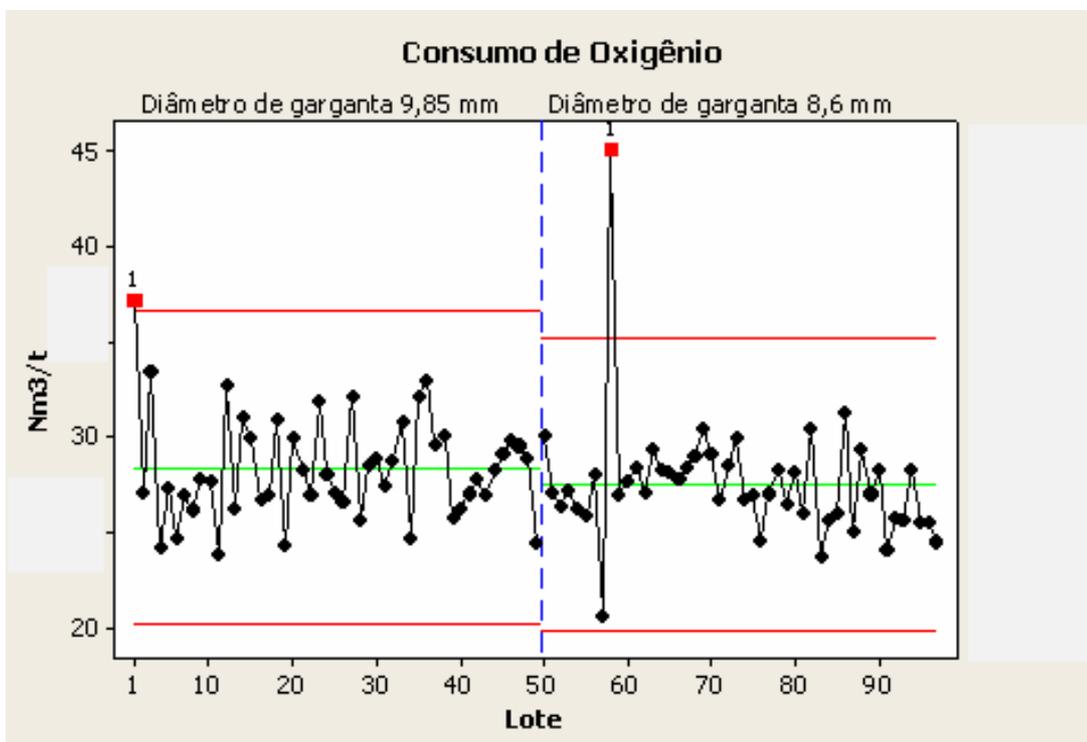


Figura 47 – Consumo de O<sub>2</sub> entre as duas condições de diâmetro da garganta da lança supersônica.

Na Figura 48 é possível verificar que, no modelo testado de 8,6 mm, houve um aumento de 0,92% no rendimento metálico em relação ao atual injetor de 9,85 mm. O cálculo

do rendimento metálico é o quociente entre o peso de tarugo lingotado e o peso da carga metálica mais as ligas adicionadas. Este valor representa um ganho financeiro muito elevado no processo, já que os custos dos metálicos representam em alguns casos até 70% do custo total do aço.

Isto se deve ao fato de que houve menor quantidade de oxigênio injetado através do modo purga, evitando assim uma oxidação localizada na superfície do banho pelo jato com pouca capacidade de penetração (modo purga). Parte deste oxigênio pôde ser convertido para o modo de alta vazão, que possui maior eficiência de penetração e agitação do banho.

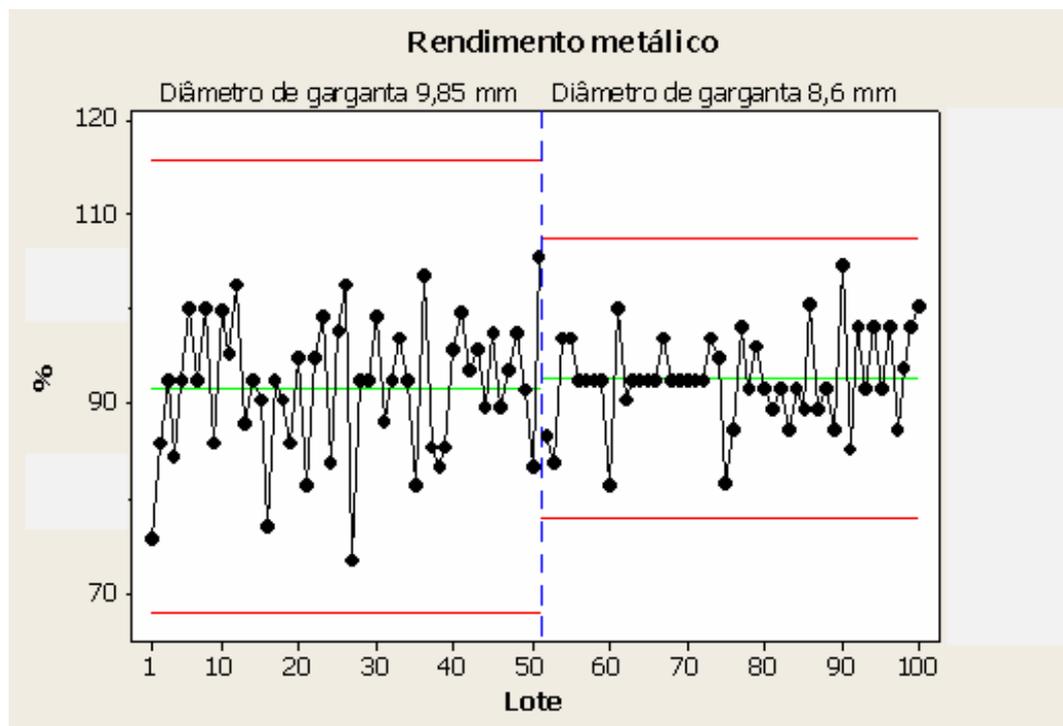


Figura 48 – Rendimento metálico entre as duas condições de diâmetro da garganta da lança supersônica.

Na Figura 49 é possível mostrar que, no período de testes, houve uma redução do consumo de energia elétrica. Nos lotes com o injetor atual com diâmetro de garganta de 9,85 mm, foi verificado um consumo 3% superior em relação ao modelo novo com diâmetro de garganta de 8,60mm.

Isto se deve principalmente pela maior eficiência do oxigênio injetado, onde foi retirado oxigênio do modo purga e transferido para o modo de alta vazão. Isto permitiu um melhor controle da oxidação do banho, melhorando a escória espumante e, conseqüentemente, aumentando a transferência do calor do arco para o banho. Os fatores cinéticos foram melhorados pela maior agitação do banho onde elementos como o carbono e silício foram

oxidados adequadamente, sem ocorrer a oxidação excessiva do ferro, que interfere na viscosidade da escória, diminuindo a efetividade da espumação.

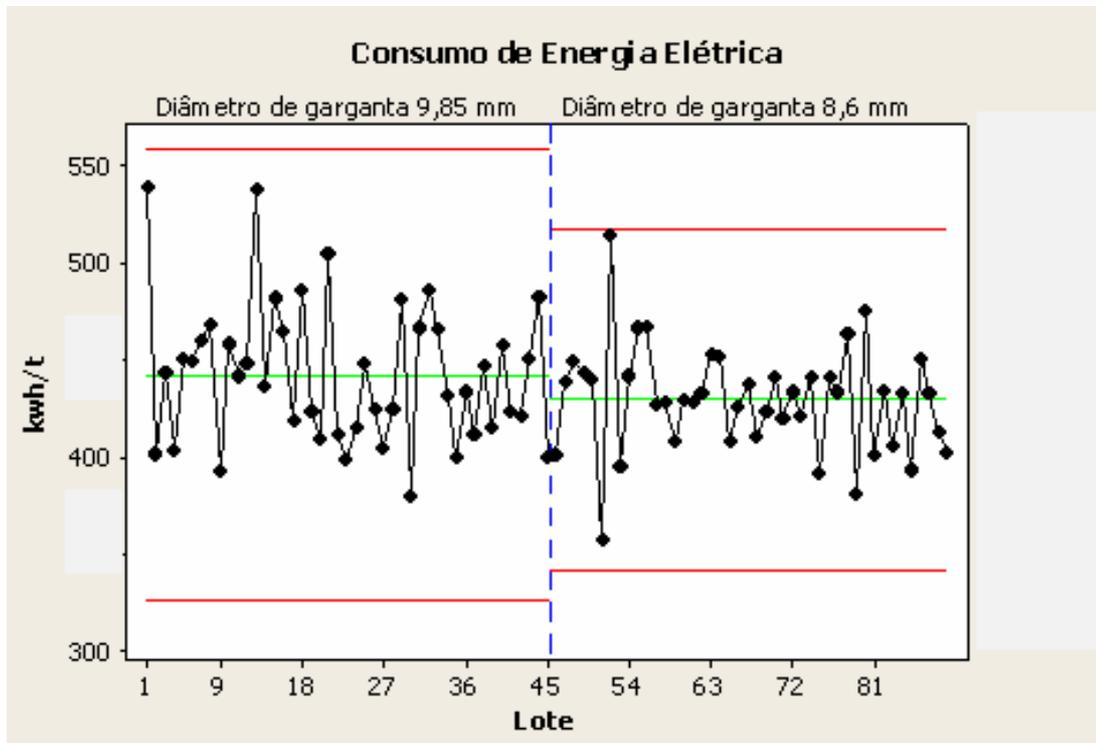


Figura 49 – Consumo de energia elétrica entre as duas condições de diâmetro da garganta da lança supersônica.

## 5 CONCLUSÕES

Os testes realizados no forno 3 com os diferentes parâmetros de vazão e pressão de oxigênio nas injetoras supersônicas aumentaram o conhecimento do processo, em busca de uma melhor eficiência do equipamento.

Verificou-se que na faixa de pressão do modo purga, os injetores supersônicos possuem seu melhor resultado entre 0,9 e 1,1 kgf/cm<sup>2</sup> e vazão entre 65 e 75 Nm<sup>3</sup>/h.

Com base nos testes, quando a pressão é inferior a 0,9 kgf/cm<sup>2</sup> a probabilidade de ocorrer o entupimento do bico sobe consideravelmente, gerando a necessidade de substituir o injetor. Quando a pressão do modo purga é superior a 1,1 kgf/cm<sup>2</sup>, o consumo específico de oxigênio subiu 6%, o teor de FeO da escória subiu 26% e o consumo de energia elétrica subiu 5% kWh/t.

No modo alta foi determinado que a faixa de pressão ideal de operação é entre 9,0 e 9,5 kgf/cm<sup>2</sup>, e a vazão de 350 Nm<sup>3</sup>/h a 375 Nm<sup>3</sup>/h em cada bico.

Na pressão abaixo 9,0 kgf/cm<sup>2</sup>, foi verificado o fenômeno de erosão do bico, característico de jato subacelerado. Acima desta pressão, o fenômeno não foi percebido. Na pressão acima de 9,5 kgf/cm<sup>2</sup>, verificou-se considerável aumento do desgaste do refratário, onde no período de teste foram utilizados 500 kg de massa de reparação na região do injetor. Na pressão abaixo de 9,5 kgf/cm<sup>2</sup>, para um mesmo número de lotes produzidos na condição anterior, o consumo de massa foi de 150 kg.

No novo modelo de lança supersônica testado, com diâmetro de garganta de 8,60 mm, o consumo médio de oxigênio reduziu 3% em relação ao injetor atual de diâmetro 9,85 mm.

No novo modelo, verificou-se também aumento de 0,92% no rendimento metálico e a redução de 3% no consumo de energia elétrica.

Este estudo possibilitou melhorar a eficiência energética do processo, contribuindo também com os ganhos ambientais, pela melhor eficiência da utilização dos recursos naturais e menor disposição de resíduos, pela menor quantidade de FeO na escória.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Neste trabalho foram avaliados somente os parâmetros operacionais para os injetores supersônicos, portanto caberia um trabalho para avaliar os melhores parâmetros de operação dos injetores convencionais do forno 3 da Gerdau Riograndense.

## 7 REFERÊNCIAS

ADAMS W. et al. **Factors Influencing the Total Energy Consumption in Arc Furnaces.** Presented at the 59<sup>th</sup> Electric Furnace Conference and 19<sup>th</sup> Process Tecnology Conference Update, Arizona, nov, 2001.

ARAUJO V. et al. **Curso Foamy slag fundamentals and their practical application to EAF Steelmaking.** Rio de Janeiro: Gerdau S.A., 2005.

BIHEL J. et al. **The JetBox Burner/Injector System for EAF Steelmaking.** Millenium Steel, 2006.

BRITO R. M. **Eletricidade para Aciaria.** São Paulo: Gerdau S.A., 2008.

CHEVRAND, L. J. S. **Aciaria Elétrica.** São Paulo: ABM, 2007.

**Etapas de produção do aço em uma usina siderúrgica.** Site institucional do Grupo Gerdau. Disponível em: <http://www.gerdau.com.br>, nov/2009.

FIGUEIRA, R. M. F. **Operação de Forno Elétrico a Arco.** São Paulo: Gerdau, 2007.

FORTES R. et al. **Decarburization and Slag Formation Model for Electric Arc Furnace.** Gerdau S.A., 2008.

GARCIA, A. et al. **Lingotamento Contínuo dos Aços.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006, p. 1-13.

GLASS, D. R., SMITH, G.C., **Nozzle Theory. In: BOF Steelmaking.** Volume three: Design. New York: The Iron and Steel Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc, 1976. cap.8.

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

GRANADO, E. et al **Curso de Aciaria Elétrica, Módulo de Matérias-Primas.** São Paulo, ABM, 2007.

HOPPERDIEZEL P. **Curso de Aciaria Elétrica, Módulo Injeção de Gases.** São Paulo: ABM, 2007.

JONES J.A.T. et al. **Electric Furnace Steelmaking.** Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998, V. 10, p. 525 -660.

KORIA S. C. et al. **Experimental Investigations on the Design of Gas Injecting Lances.** ISIJ International, 1989, V. 29, p. 650-657.

KUNCE B. et al. **Foamy slag fundamentals and their practical application to EAF Steelmaking.** Rio de Janeiro: Gerdau SA, 2005.

MAIA B. T. **Efeito da Configuração do Bico da Lança na Interação Jato-Banho Metálico em Convertedor LD.** Belo Horizonte: UFMG, 2007.

MEIDANI A. R. N. et al. **Modeling Shrouded Supersonic Jets in Metallurgical Reactor Vessels.** ISIJ International, 2004, V. 44, p. 1639-1645.

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, 2004, v. 44, p. 1511-1516.

MEMOLI, F. et al. **Aumento das Plantas Consteel no Mundo: Flexibilidade para a Carga Contínua de Gusa Líquido e Sucata no Forno Elétrico a Arco Agora na Siderurgia Brasileira,** Tecnologia em metalurgia, Materiais e Mineração, 2009, v. 6, n.1. p. 54-60.

MUNDIM, M. J., **Tecnologia de Fabricação de Aço Líquido**. V. 02 - Aciaria LD. UFMG 3ed. Belo Horizonte: 1985.

OPFERMANN A. et al. **Energy efficiency of Electric Arc Furnace**. Canada: 35<sup>th</sup> McMasters University Symposium on Iron and Steelmaking, 2007, S. 2, p. 1-24.

PFEIFER H. **Thermodynamic Analysis of EAF Electrical Energy Demand**. EEC 2005, Birmingham, 2005.

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

SANDBERG E. **Energy and Scrap Optimisation of Electric Arc Furnaces by Statistical Analysis of Process Data**. Lulea University of Technology Department of Chemical Engineering and Geosciences, Division of Process Metallurgy, 2005.

SAKAMOTO Y. et al. **Estimation of Energy Consumption for Each Process in the Japanese Steel Industry: a Process Analysis**. Japan: Energy Conversion & Management 40, 1999, p. 1129-1140.

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

STASCHOWER, M. et al. **Estudo Experimental de Escoamento de Gases em Bocais Convergente Divergente**. São Paulo: Produção em Iniciação Científica, EPUSP, 2002.

SILVA M. J. S. **Redução do Consumo Específico de Eletrodos de Grafita nos Fornos Elétricos à Arco da Aciaria da Gerdau Riograndense**. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

**Technical Considerations for Improving the Life of BOF and EAF Lance Tips**. Canada: Tallman Bronze Company, 2001, Rev 2.

**2008 Sustainability Report of the world steel industry**. Worldsteel Association. Disponível em: <http://www.worldsteel.org>. nov/2009.