

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

Departamento de Metalurgia

ESTUDO DE ESCÓRIAS DE REFINO PRIMÁRIO VISANDO REDUZIR O
CONSUMO ENERGÉTICO DO FORNO ELÉTRICO A ARCO

Deisi Vieira

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto Alegre 2014

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos, pois me apoiam e incentivam em todos os momentos de minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Wagner Viana Bielefeldt, pela oportunidade, orientação, apoio e amizade.

Ao mestrando Rodolfo Arnaldo Montecinos de Almeida, pelos conselhos e suporte.

Às bolsistas do Lasid, Franciele Almeida, Mariana Boger Netto e Letícia Winck, pela colaboração e carinho.

Ao Dr. Engenheiro Julio Aníbal Morales Pereira.

Ao meu namorado e colega de curso, Tiago Favaretto, pela paciência, companheirismo, amor e dedicação.

Aos meus pais, Rosemeri e Clênio, pela educação que me deram e por estarem sempre ao meu lado.

Aos meus irmãos, pelas horas de brincadeiras e descontração.

À minha avó, Almerinda, pelo afeto.

Aos meus colegas de curso que fizeram parte das maratonas de estudo durante a graduação.

À todos os amigos pelo incentivo.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	III
SUMÁRIO.....	IV
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	IX
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	2
2.1 Forno elétrico a arco	2
2.1.1 Carregamento.....	5
2.1.2 Fusão.....	6
2.1.3 Refino	7
2.1.4 Vazamento	8
2.2 Parâmetros elétricos	8
2.2.1 Fornecimento de energia elétrica.....	9
2.2.2 Qualidade de energia	10
2.2.3 Distorção harmônica.....	12
2.2.4 Arco elétrico	14
2.3 Escória no FEA	16
2.3.1 Escória e estabilidade do Arco	19
2.3.2 Efeitos da escória espumante na operação do FEA.....	19
2.3.3 Redução da instabilidade elétrica com a prática de escória espumante	21
2.3.4 Formação da escória espumante	22
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
3.1 Análise química das amostras de escória.....	32
3.2 Análise dos parâmetros elétricos	37
3.2.1 Análise da tensão	37
3.2.2 Análise da THD	38
3.2.3 Energia elétrica total consumida.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5 CONCLUSÕES.....	57

6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
7	REFERÊNCIAS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação esquemática do FEA. Fonte: Adaptado de CHEVRAND, 2007.	3
Figura 2.2	Esquema das etapas do FEA: carregamento (a), fusão e formação da escória (b), refino e retirada da escória (c) e vazamento do aço líquido (d). Fonte: RIZZO, 2005...	5
Figura 2.3	Lança de oxigênio consumível. Fonte: Seminário UCAR (2008).....	6
Figura 2.4	Sistema FEA, sem queimadores auxiliares (esquerda) e com queimadores auxiliares (direita). Fonte: Adaptado de Módulo de treinamento Gerdau (2012).	7
Figura 2.5	Trajectoria da energia elétrica e esquema da disposição dos transformadores em uma aciaria. Fonte: Adaptado de BARKER, 1998.....	10
Figura 2.6	Formas de ondas senoidais correspondentes à tensão e a corrente de um sistema genérico. Fonte: http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/	11
Figura 2.7	Formas de ondas distorcidas pelo sistema trifásico de alimentação. Fonte: http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/	12
Figura 2.8	(a) Onda senoidal sem a presença de distorção. (b) Forma de onda somada com harmônica de frequência duas vezes maior. Fonte: http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/	12
Figura 2.9	Total distorção harmônica da tensão (THD), durante três corridas. Fonte: Adaptado de Gandhare, 2007.	14
Figura 2.10	(a) Foto dos eletrodos de grafita em operação. (b). Esquematização do arco elétrico. Fonte: Adaptado GERDAU (2012).	15
Figura 2.11	Arco longo (a), Arco curto (b), Arco intermediário (c).Fonte: Adaptado de CANDIDO, 2008.....	16
Figura 2.12	Variáveis que influenciam na espumação da escória Fonte: Adaptado de BOWMAN, 2009.	20
Figura 2.13	Representação da instabilidade da tensão e corrente do sistema. (a) antes da presença de escória espumante e (b) estabilidade após a prática da espumação. Fonte: Adaptado de SEDIVY, 2008.	21
Figura 2.14	Relação entre a qualidade de espumação da escória e dados elétricos. Fonte: DEHKORDI, 2011.	22

Figura 2.15	Etapas da formação de escória espumante no FEA. Fonte: Adaptado de PRIBYL, 2009.	23
Figura 2.16	Variação das propriedades físicas da escória devido ao aumento da viscosidade efetiva e índice de espumação. Fonte: Adaptado de PRETORIUS, 1998.	..... 27
Figura 2.17	Influência da temperatura na tensão superficial e no índice de espumação. Fonte: Adaptado de SKUPIEN, 2010.	..... 27
Figura 2.18	Influência da basicidade na energia consumida do FEA (a), efeito da basicidade sobre a altura da escória (b). Fonte: Adaptado de AMINORROAYA, 2002.	... 28
Figura 2.19	Relação entre o teor de FeO na escória e energia consumida. Fonte: Adaptado de AMINORROAYA, 2002.	..... 29
Figura 2.20	Influência do teor de MgO no índice de espumação da escória. Fonte: ITO, 1989.	30
Figura 3.1	Fluxograma da metodologia utilizada.	..... 31
Figura 3.2	Amostragem de escória, sendo E1 a primeira amostra de escória, E2 a segunda amostra de escória e E3 a terceira amostra de escória.	..... 32
Figura 3.3	Momento de retirada de uma amostra de escória.	..... 33
Figura 3.4	Escória recebida no laboratório de análises químicas (a); Amostra preparada para o espectrômetro de raio-X (b).	..... 33
Figura 3.5	Espectrômetro de Raios-X, modelo PW 2600 X RAY SPECTROMETER.	34
Figura 3.6	Tela de abertura do software FactSage 6.4.	..... 35
Figura 3.7	Banco de dados do software FactSage versão 6.4.	..... 36
Figura 3.8	Exemplo do comportamento da tensão ao longo de uma corrida.	..... 37
Figura 3.9	Distorção harmônica total ao longo do tempo de fusão e refino da carga metálica para uma corrida em FEA.	..... 38
Figura 4.1	Boxplot do teor de MgO (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.	..... 40
Figura 4.2	Boxplot do teor de FeO (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.	..... 41
Figura 4.3	Boxplot do teor de MnO (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.	..... 42
Figura 4.4	Variação do SiO ₂ (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.	42

Figura 4.5	Variação do CaO (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.	43
Figura 4.6	Relação entre a viscosidade efetiva e teores de FeO + MnO, calculado para temperatura de 1600°C.	44
Figura 4.7	Relação entre a viscosidade efetiva e teores de CaO.....	45
Figura 4.8	Relação entre a viscosidade efetiva e teores de MgO.	45
Figura 4.9	Relação entre a viscosidade efetiva e teores de SiO ₂	46
Figura 4.10	Comparação entre os índices de espumação calculados com os modelos de Mills e Keene e Slag Atlas.	47
Figura 4.11	Índice de espumação pela viscosidade efetiva.....	48
Figura 4.12	Energia elétrica consumida pela basicidade binária para cada amostra retirada.	48
Figura 4.13	Energia elétrica consumida pela basicidade binária para cada amostra retirada, com faixa de FeO fixo (27-32%).....	49
Figura 4.14	Basicidade pelo índice de espumação para a faixa de basicidade ótima. ..	50
Figura 4.15	Teor de MgO pela energia elétrica consumida, feitos para cada amostra retirada.	50
Figura 4.16	Teor de MgO pelo índice de espumação para faixa de MgO ótimo.	51
Figura 4.17	Teor de MgO de saturação pela basicidade e do teor do MgO nas amostras pela basicidade.	52
Figura 4.18	Teor de FeO pela energia elétrica consumida.....	52
Figura 4.19	Energia elétrica consumida com relação ao índice de espumação.	53
Figura 4.20	Energia elétrica consumida com relação ao índice de espumação, considerando %FeO entre 27-32.	53
Figura 4.21	Desvio padrão da tensão do arco pelo índice de espumação.	54
Figura 4.22	Basicidade pelo desvio padrão da tensão.....	55
Figura 4.23	Índice de espumação pela variação dos harmônicos.	55
Figura 4.24	Variação dos harmônicos pela basicidade.	56
Figura 4.25	Variação dos harmônicos pelo desvio padrão da tensão.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

μ	Viscosidade.
ρ	Densidade.
ρ	Parâmetro de Interação do Sólido.
σ	Tensão Superficial.
η_e	Viscosidade Efetiva da escória.
H	Viscosidade da Escória Fundida.
Θ	Fração das Fases Sólidas Precipitadas.
Σ	Índice de Espumação.
ANFIS	Adaptive Neuro Fuzzy Interference System.
ArCos	Arco Control Otmization System
ASTM	American Society for Testing and Materials.
CA	Corrente Alternada.
CSFM	CaO-SiO ₂ -FeO-MgO
DC	Corrente Contínua.
E1	Primeira Amostra de Escória.
E2	Segunda Amostra de Escória.
E3	Terceira Amostra de Escória.
FEA	Forno Elétrico a Arco.
H	Diferença da altura da escória antes e depois da injeção de gás.

M	Massa Molar.
R^2	Coefficiente de Determinação.
THD	Total de Distorção Harmônica.
V	Volume Molar
V_g^s	Velocidade superficial do gás
X	Número de Mols.
X_i	Fração Molar.

RESUMO

O processo de produção de aço em uma aciaria elétrica envolve uma série de fatores que exigem um melhor entendimento para se almejar uma melhor qualidade do produto final com menores custos. Um deles é a escória espumante de refino primário, que além de garantir um aço limpo, dentro dos padrões especificados pelo cliente, tem funções fundamentais no FEA que incluem a redução de perdas energéticas, menor consumo de refratário e um aumento da estabilidade do arco elétrico. Pouco se sabe a respeito do comportamento dos óxidos que constituem a escória, além disso, poucos autores relacionam a qualidade de espumação com os parâmetros elétricos que dizem respeito à estabilidade do arco elétrico no FEA. No presente estudo foram coletadas amostras de escórias de 25 corridas de padrões de carga fria diferentes. Analisou-se a composição química, para obter dados de basicidade, índice de espumação e viscosidade efetiva. Os parâmetros elétricos investigados foram: consumo de energia elétrica durante cada corrida, quantidade de distorção harmônica e distorção da tensão em determinadas fases do FEA. Para isso, modelos de Roscoe-Einstein, Mills e Keene, e o software FactSage 6.4 participaram da metodologia do trabalho. Determinados óxidos mostram uma tendência de comportamento. A viscosidade efetiva mostrou uma dependência linear dos teores de FeO, MgO e MnO. A faixa de MgO ótima presente nas amostras de escória está entre 6 e 6,5 (% em massa), para um menor consumo de energia elétrica. O índice de espumação tem uma relação linear com a viscosidade. A escória apresentou uma faixa de basicidade ótima de 1,8-2,2, para um baixo consumo de energia elétrica, e uma baixa variação na tensão do arco. Um teor de 29% de FeO na amostra E3 proporcionou um menor consumo de energia elétrica. Maiores valores de índice de espumação mostraram uma tendência benéfica em relação ao consumo de energia e estabilidade das variáveis elétricas.

Palavras-chave: Escória espumante, óxidos, índice de espumação, viscosidade efetiva, THDs, tensão, consumo de energia elétrica.

ABSTRACT

The steel production process in an electric steel plant involves a number of factors that require a better understanding to aim at a better final product quality with lower costs. One is the foamy slag primary refining, which will guarantee an clean steel within the customer-specified standards, have key roles in the FEA that includes reducing energy losses, lower consumption of refractory and increased arc stability. Not much is known about the behavior of oxides that form the slag, in addition, few authors relate the quality of foaming with the electrical parameters concerning the stability of the arc in the FEA. In the present study slag samples were collected from 25 different heats of cold load patterns. It was analyzed the chemical composition, basicity data, foaming index and effective viscosity. The electrical parameters investigated were: electricity consumption during each trial, amount of harmonic distortion and voltage distortion at certain stages of the FEA. For this, Roscoe Einstein models, Mills and Keene, and the FactSage 6.4 software participated in the work methodology. Certain oxides show a pattern of behavior. The effective viscosity showed a linear dependence of the FeO contents of MgO and MnO. The range of MgO great present in the slag samples is between 6 and 6.5 (wt%) to a low consumption of electricity. The foaming rate has a linear relationship with the viscosity. The slag basicity showed a great range of 1.8-2.2, for a low power consumption, and low variation in arc voltage. A content of 29% FeO at E3 sample provided a lower consumption of electricity. Further foaming index values showed a beneficial trend in relation to energy consumption and stability of electrical variables.

Keywords: Slag foaming, oxides, foaming index, effective viscosity, THDs, voltage, power consumption.

1 INTRODUÇÃO

Na operação do forno elétrico a arco para a produção de aço, um dos objetivos principais é a máxima produtividade envolvendo o menor custo possível. O conhecimento sobre a metalurgia do processo em FEA passa a ser um fator de extrema importância. A qualidade de espumação da escória é um parâmetro essencial que deve ser avaliado tanto para produzir uma matéria prima dentro dos padrões de qualidade específicos exigidos, quanto para uma otimização das perdas energéticas do forno com a redução da instabilidade do arco elétrico durante a fusão e o refino primário.

Sabe-se que a espumação depende de inúmeros fatores, podem ser citados: os diferentes padrões de carga fria existentes, a relação entre o balanço de energia química e elétrica, a formação de escória ao longo do processo e a composição química da escória. No entanto, pouco se sabe sobre a relação do comportamento dos óxidos gerados na escória com a qualidade de espumação.

Pesquisadores consideram o estudo da escória espumante algo complexo e caótico, pois são muitos os parâmetros que influenciam em uma espumação eficiente. Normalmente, o operador do forno caracteriza a eficiência da espumação da escória avaliando sua cor, velocidade com a qual ela flui pela porta de saída de escória do forno e ruídos durante a fusão. No entanto, são aspectos puramente qualitativos e de difícil reprodução, pois dependem, por exemplo, da experiência do operador.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência dos principais óxidos presentes na escória de refino primário no comportamento da espumação e nas variáveis elétricas do FEA. Para que isso seja viabilizado, foram realizadas análises químicas de escórias e feitos cálculos de viscosidade efetiva e índice de espumação, relacionando com estudos de dados elétricos do forno que quantificam a instabilidade do arco elétrico.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Forno elétrico a arco

A tecnologia de fusão do ferro em fornos a arco vem sendo estudada desde 1810, quando Sir Humphry Davy demonstrou o uso do arco elétrico. Mas só em 1878, Sir William Siemens patenteou o primeiro forno elétrico a arco (FEA). Após a Segunda Guerra Mundial, a Europa necessitava ser reconstruída, então a demanda por FEAs foi aumentando e, conseqüentemente, a necessidade de investimentos em novas aciarias elétricas (FIGUEIRA 2007).

Várias são as vantagens que os FEAs trazem para a produção de aço, por ser um instrumento versátil, vem sendo também considerada a opção mais eficiente. Algumas vantagens, segundo Costa e Silva (2010), são citadas:

- Alta eficiência energética;
- Produção de uma grande gama de qualidades de aço, por seu aquecimento ser independente de reações químicas;
- Pode ser operado com 100% de carga sólida;
- Permite operações e mudanças rápidas na produção, em escalas de dezenas até centenas de toneladas.

O FEA consiste basicamente em uma carcaça metálica revestida por materiais refratários e painéis refrigerados. Essa carcaça metálica é coberta por uma abóboda móvel, para que seja possível fazer o carregamento da carga. A energia elétrica é fornecida pela aproximação dos eletrodos de grafita com a carga metálica, que formam o então chamado arco elétrico. Essa energia é transferida para a carga metálica em forma de calor, promovendo a fusão da sucata (LIBORIO, 2009). A representação esquemática do FEA, com alguns dos seus componentes externos, pode ser vista na Figura 2.1.

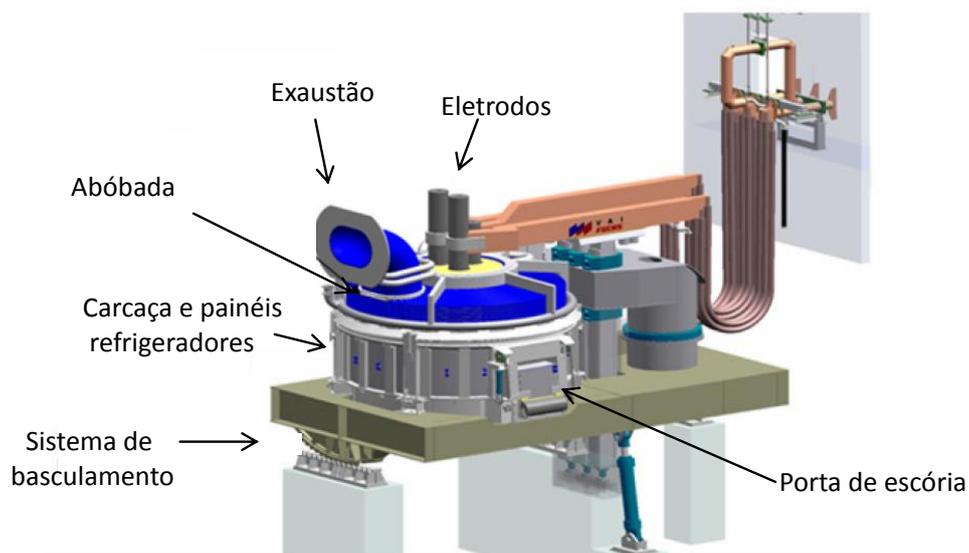


Figura 2.1 Representação esquemática do FEA. Fonte: Adaptado de CHEVRAND, 2007.

Cada componente possui funções de extrema importância para o processo:

- Eletrodos: Uma corrente elétrica alternada, depois de passar por transformadores, chega aos eletrodos. Estes penetram no forno através de aberturas na abóbada, e podem ser movimentados verticalmente, para cima e para baixo. Com a aproximação entre os eletrodos e a carga metálica, ou banho metálico, tem-se a formação do arco elétrico. Os eletrodos mais utilizados são de grafita, feitos com coque de petróleo, tratado a altas temperaturas para formar carbono cristalino. Um eletrodo não pode fundir, além de possuir alta resistência a choques térmicos. Devido ao meio extremamente agressivo que são expostos, devem ser resistentes à oxidação e aos ataques químicos. A resistência elétrica do eletrodo deve ser baixa, para evitar seu aquecimento e reduzir ao mínimo a queda de voltagem do circuito secundário. Deve ser usinável e não pode ser de alto valor aquisitivo (ARAUJO, 2005).
- Abóbada: Está sujeita a altas temperaturas e choques térmicos. Consiste em uma armação anular, em chapa ou perfilado, resfriada internamente. Seu diâmetro externo é maior que o diâmetro interno da carcaça para que sua

estrutura seja suportada pela carcaça metálica do forno, e não pelos seus refratários (ARAUJO, 2005).

- Carcaça e painéis refrigerados: As carcaças dos fornos são constituídas de chapas grossas e soldadas, formando recipientes cilíndricos, com fundo plano ou abaulado. Tem-se uma distância ideal do diâmetro da carcaça e distância dos eletrodos, pois se os eletrodos estiverem muito perto da carcaça, há um consumo excessivo do refratário, e caso contrário, aumenta-se o tempo de fusão da operação. Atualmente, usam-se carcaças resfriadas, que são painéis de chapas soldadas com circulação de água. Esse sistema aumenta muito a vida útil das paredes (ARAUJO, 2005).
- Sistema de basculamento: Segmentos dentados são fixados aos lados da carcaça metálica, e engranam em uma cremalheira, a fim de permitir o basculamento do forno. O basculamento é feito por meio de um cilindro hidráulico lateralmente. Este sistema permite a retirada da escória, no fim do refino, e o vazamento do aço líquido na panela (ARAUJO, 2005).
- Porta de escória: A escória é removida pelo basculamento do forno em direção à porta de escória. Essa abertura serve também para inspecionar o interior do forno, verificando altura do lastro, por exemplo. Alguns materiais são adicionados pela porta durante a operação, caso necessário, e também pode existir a injeção de oxigênio, e ou materiais carbonosos, por lança, (RIZZO, 2005).
- Exaustão: Também conhecido por ser o quarto furo, o sistema de exaustão, ou despoeiramento, é responsável pela coleta do pó de aciaria (ARAUJO, 2005).

As operações do FEA podem ser divididas conforme a Figura 2.2, nas etapas de:

- (a) Carregamento da sucata e fundentes;
- (b) Fusão;
- (c) Refino;
- (d) Vazamento.

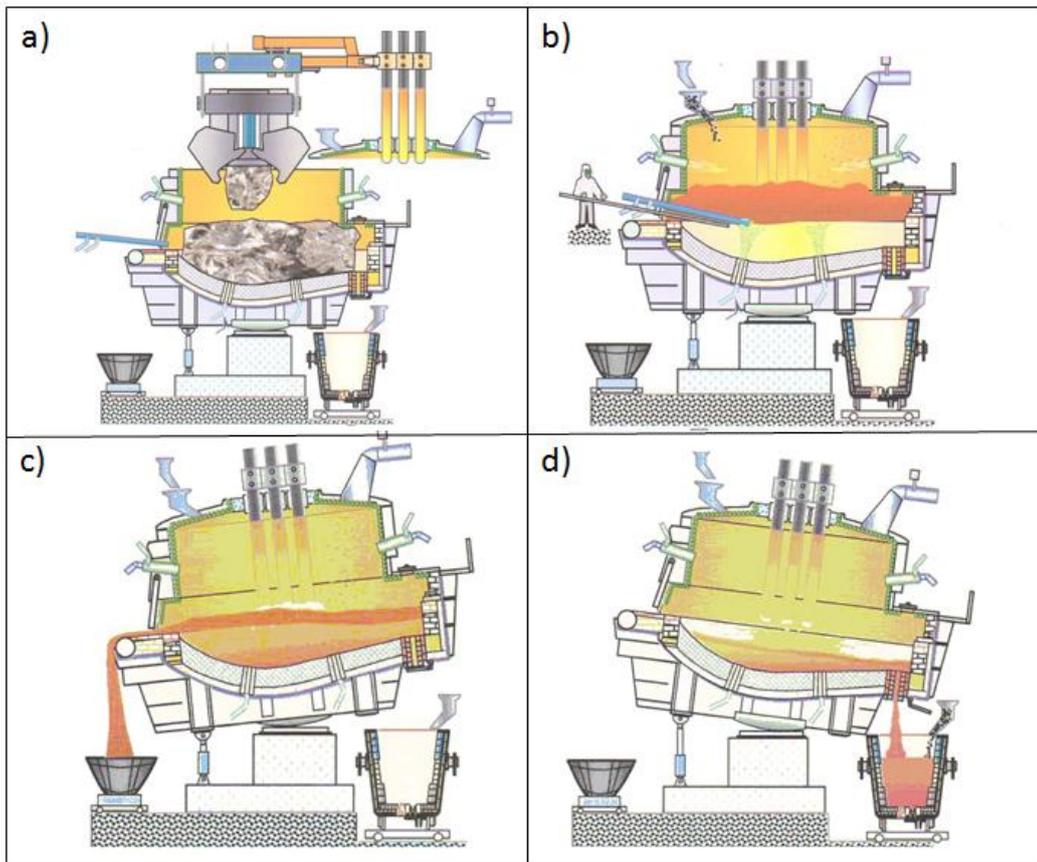


Figura 2.2 Esquema das etapas do FEA: carregamento (a), fusão e formação da escória (b), refino e retirada da escória (c) e vazamento do aço líquido (d). Fonte: RIZZO, 2005.

2.1.1 Carregamento

Os eletrodos são levantados, de forma que não sejam expostos a choques, e após, levanta-se a abóbada. Existe uma preocupação com a proteção do refratário da soleira, e também com a penetração dos eletrodos para a abertura do arco elétrico, então a carga é disposta em três camadas dentro do forno, de modo que primeiramente entre em contato com a soleira a sucata com menor densidade, para amortecer a queda da segunda camada, que é composta de sucatas mais densas. É importante que a última camada seja formada por sucatas de menor densidade, pois isso facilitará a penetração dos eletrodos, e essa sucata irá proteger a abóbada do forno das radiações, e diminuirá a emissão de ruídos (ARAUJO, 2005).

Nas usinas não integradas, a carga do FEA, é composta por sucata e ferroligas, para se obter o aço com a qualidade desejada. Para evitar elementos indesejáveis no banho líquido, é necessário um rígido controle da carga metálica (COSTA E SILVA, 2011).

2.1.2 Fusão

Após o carregamento, e finalizados os procedimentos de fechamento do forno, baixam-se os eletrodos, e aciona-se o arco elétrico. Nos primeiros minutos, os eletrodos fundem a carga que está diretamente sob eles. Nesta etapa se trabalha com uma voltagem mais reduzida, criando um arco elétrico curto e um fluxo de calor vertical abrindo caminho na sucata, e esta vai protegendo as paredes da radiação. Após, aplica-se máxima voltagem e baixa corrente, resultando em um arco elétrico longo com um fluxo de calor horizontal, para que a carga seja fundida o mais rápido possível. Para apressar a fusão, além da energia elétrica, pode-se fornecer energia química, por exemplo, através de lanças de oxigênio, que também podem funcionar como queimadores. Estes queimadores permitem o aproveitamento dos gases gerados durante o processo no interior do próprio forno, fornecendo uma quantidade extra de energia proveniente da combustão dos constituintes do gás, oriundos das reações de refino do aço, da oxidação de alguns componentes da carga e da combustão dos combustíveis adicionados no forno. A injeção deste oxigênio pode ser feita de forma manual, utilizando lanças consumíveis, por exemplo, e também com a técnica de queimadores auxiliares (RIZZO, 2005).

A Figura 2.3 mostra um exemplo de lança consumível em um manipulador, que fica localizada na porta de saída de escória.



Figura 2.3 Lança de oxigênio consumível. Fonte: Seminário UCAR (2008).

O sistema de lança consumível alcança as regiões de sucata que estão mais frias, longe dos eletrodos, ajudando no corte da sucata que fica próximo a porta de escória,

reduzindo o volume durante a fusão, e facilitando o processo de retirada de escória da porta. Mas uma alta vazão destas lanças pode gerar respingos do banho, levando o consumo elevado dos eletrodos e refratários. Para que isso não aconteça, este sistema trabalha em conjunto com os queimadores auxiliares, quando posicionados corretamente, proporcionam a agitação do banho líquido, e uma adequada homogeneização da temperatura, aumentando então a eficiência da energia química (LIBORIO, 2009).

A Figura 2.4 esquematiza o aumento de zonas quentes em um sistema com queimadores auxiliares de oxigênio.

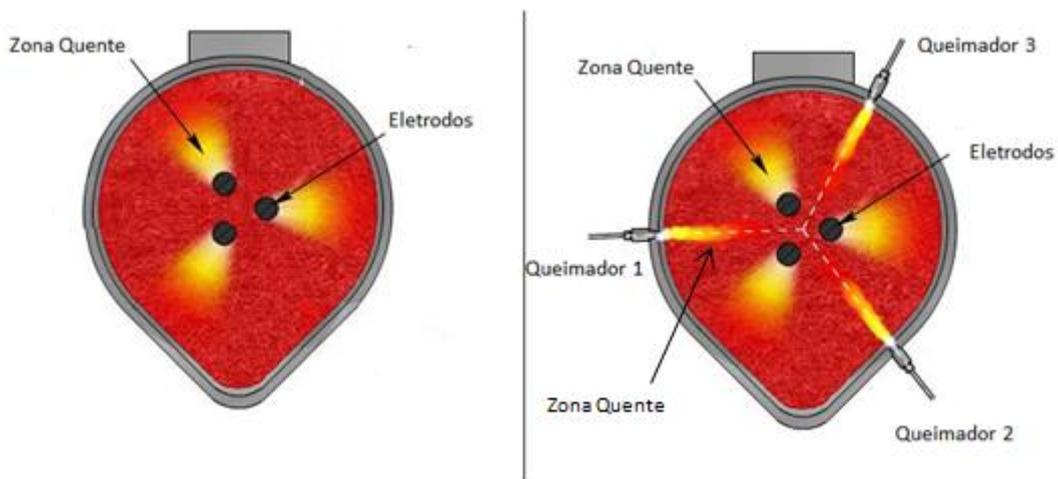


Figura 2.4 Sistema FEA, sem queimadores auxiliares (esquerda) e com queimadores auxiliares (direita). Fonte: Adaptado de Módulo de treinamento Gerdau (2012).

Finalizada a fusão da carga, inicia-se a etapa de refino do banho líquido, onde ocorrerão as etapas de descarburização e desfosforação (COSTA E SILVA, 2011).

2.1.3 Refino

A operação de refino no FEA envolve a remoção de elementos como o fósforo, enxofre, alumínio, silício, manganês e carbono. Essa etapa pode ocorrer após a fusão da carga metálica, e em alguns casos, durante a fusão. As reações são dependentes da quantidade de oxigênio disponível. Durante o refino, uma grande quantidade de elementos, tais como o fósforo, silício e alumínio, tem uma grande afinidade química pelo oxigênio, formando óxidos que vão ser absorvidos pela escória. Sendo a relação entre a quantidade de escória e quantidade de aço por tonelada pequena, a remoção de impurezas no FEA é limitada. Uma vez que as impurezas migram para a escória, elas não necessariamente ficarão lá. A retenção do fósforo na escória é uma função da temperatura

do banho, da basicidade e dos níveis de FeO da escória. Em temperaturas mais altas, ou baixos níveis de FeO, o fósforo vai reverter a partir da escória de volta para o banho. Então, a remoção do fósforo deve ser realizada o mais cedo possível, quando a temperatura do banho é mais baixa. O teor de fósforo do produto final depende da especificação desejada, sendo dependente também da qualidade da sucata fundida (BARKER, 1998).

O método de refino do aço no FEA é de grande interesse para obtenção de uma boa qualidade do produto final, especialmente em termos de teor de fósforo reduzido (CONSTANTIN, 2013).

2.1.4 Vazamento

Quando a composição química desejada e a temperatura do banho são atingidas no FEA, o furo de vazamento é aberto e o forno é inclinado de modo que o aço seja transferido para a panela. Durante o processo de vazamento, são adicionadas ligas com base na análise do banho metálico e do tipo de aço desejado. Desoxidantes são adicionados ao aço para reduzir o teor de oxigênio antes do fim do processamento. Os desoxidantes mais comuns são de alumínio ou silício sob a forma de ferro-silício ou ferro-silício-manganês. Uma nova escória é formada durante o vazamento. Para as operações do forno-panela, uma escória a base de cálcio aluminatos é uma boa escolha para o controle de enxofre (CONSTANTIN, 2013).

2.2 Parâmetros elétricos

Os FEAs se caracterizam pela transformação da energia elétrica em calor, que se transfere para a carga provocando a elevação da temperatura. A energia elétrica é fornecida por uma rede de alta tensão, e chega ao forno através do seguinte circuito elétrico:

- Uma linha de entrada em alta tensão;
- Um transformador principal, que reduz a tensão de entrada para a tensão requerida pelo forno;
- Um circuito elétrico, a continuação do secundário do transformador, que termina nos eletrodos.

Os fornos de corrente alternada (CA) possuem três eletrodos que ficam posicionados acima da carga metálica que será fundida. O arco elétrico se faz entre os eletrodos para a carga, isto é, cada eletrodo funciona como cátodo e ânodo alternadamente.

Por outro lado, o circuito completo compreende resistências, reatâncias e condensadores que determinam os parâmetros de funcionamento da instalação:

- A tensão e a intensidade de corrente;
- As potências ativas na entrada e no arco;
- Os fatores de potência em diversos pontos.

Para determinar condições ótimas de funcionamento, se pode analisar diagramas de funcionamento, entre eles estão:

- Máxima produção, que resultará em uma maior potência no arco;
- Máximo rendimento, isto é, mínimas perdas energéticas;
- Mínimo custo de funcionamento (incluindo consumo de refratários, eletrodos, etc.) (URQUIZA, 1998).

2.2.1 Fornecimento de energia elétrica

As aciarias que possuem FEA requerem uma potência muito alta, normalmente entre 20 à 150 MW, potência suficiente para abastecer uma cidade de 40 mil habitantes. Esta potência é fornecida pelas concessionárias de energia, em um sistema de três fases, por essa razão o FEA que trabalha com CA possui três eletrodos. Essas tensões, recebidas pelo fornecedor de energia, podem alcançar 500 kV, enquanto que a física do forno comporta tensões de arco de até 600V, pois acima desta tensão os arcos tornam-se muito longos. Para converter esta alta tensão para tensões adequadas para o FEA, se faz o uso de transformadores. O processo de redução de tensão é feito em dois estágios. Um primeiro transformador reduz a tensão a partir da linha de alta tensão a um nível de tensão médio, que é padronizado nos Estados Unidos em 34,5 kV. Como a usina siderúrgica precisa de energia para outros setores, além do FEA, haverá vários transformadores conectados ao nível de 34,5 kV. A partir desta tensão média, o FEA é alimentado por um transformador especial de serviço pesado. A tensão secundária do transformador do forno permite operações dos arcos nas faixas de tensões e correntes desejadas (BARKER, 1998).

Como é necessário combinações de tensões e correntes de arco diferentes (para reduzir, fundir e refinar), é feita uma seleção das tensões secundárias, para isso é preciso

instalar um comutador no transformador do FEA. A Figura 2.5 mostra como ocorre a transformação de energia a partir da linha de alta tensão até o FEA (BARKER, 1998).

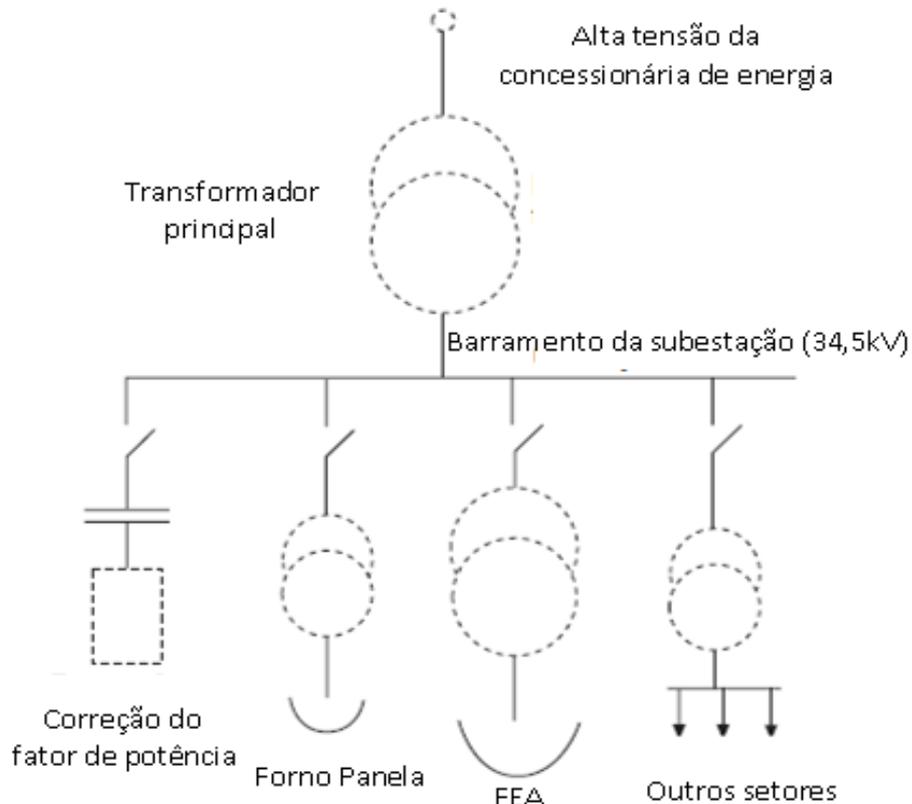


Figura 2.5 Trajetória da energia eléctrica e esquema da disposição dos transformadores em uma aciaria. Fonte: Adaptado de BARKER, 1998.

2.2.2 Qualidade de energia

A qualidade da energia eléctrica interfere na estabilidade de alguns parâmetros eléctricos do FEA. As tensões de alimentação fornecidas pelas concessionárias são senoidais. Antigamente, a maioria dos receptores ligados às redes de energia eléctrica consistia em cargas lineares, assim as correntes consumidas eram senoidais, podendo estar defasadas apenas relativamente à tensão, conforme mostrado na Figura 2.6.

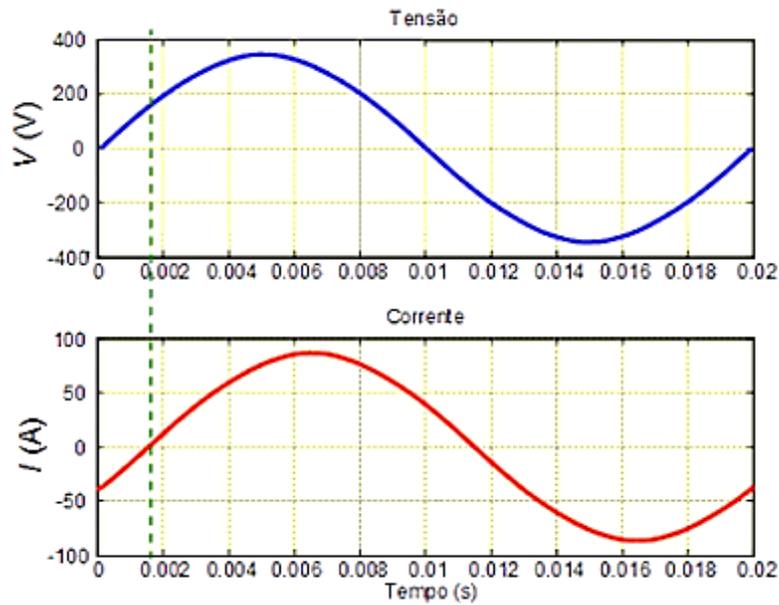


Figura 2.6 Formas de ondas senoidais correspondentes à tensão e a corrente de um sistema genérico. Fonte: <http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/>.

Com o desenvolvimento da eletrônica, alguns equipamentos passaram a não funcionar com cargas lineares, consumindo correntes não senoidais. Estes aparelhos acabam poluindo a rede elétrica com harmônicos. A Figura 2.7 mostra formas de onda de corrente e tensão não senoidais, de uma carga trifásica não linear, como consequência, a tensão de alimentação fica distorcida. A presença de harmônicos nos sistemas de potência resulta num aumento das perdas relacionadas com o transporte e distribuição de energia elétrica.

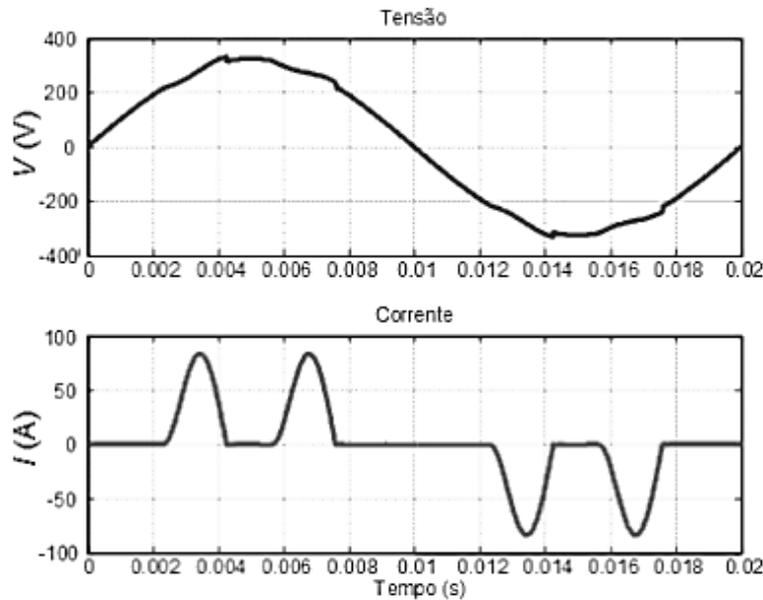


Figura 2.7 Formas de ondas distorcidas pelo sistema trifásico de alimentação. Fonte: <http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/>.

2.2.3 Distorção harmônica

A corrente que circula nas linhas de transmissão será acompanhada de harmônicos se houver a existência de cargas não lineares ligadas à rede elétrica. As quedas de tensão provocadas pelos harmônicos nas impedâncias das linhas fazem com que as tensões de alimentação fiquem distorcidas. A Figura 2.8 (a) mostra uma tensão senoidal perfeita, enquanto a Figura 2.8 (b) a presença de uma harmônica que seja o dobro da sua frequência.

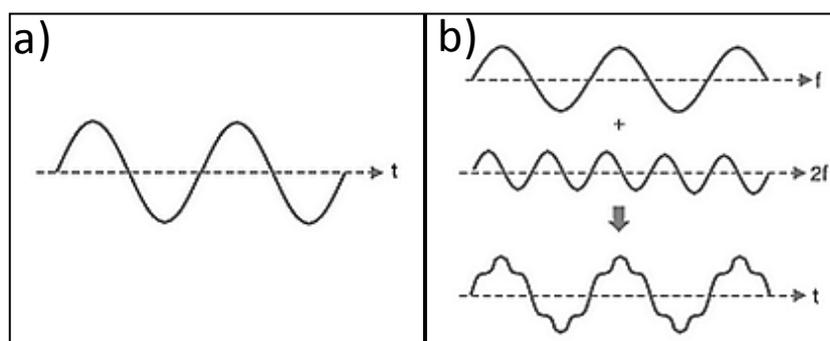


Figura 2.8 (a) Onda senoidal sem a presença de distorção. (b) Forma de onda somada com harmônica de frequência duas vezes maior. Fonte: <http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/>.

Os controladores de fase, muito utilizados para controlar a potência em sistemas de aquecimento, também produzem formas de onda com conteúdo harmônico substancial e interferência eletromagnética de alta frequência.

Além da distorção das formas de onda, a presença de harmônicos nas linhas de distribuição de energia origina problemas nos equipamentos e componentes do sistema elétrico:

- Aumento das perdas de energia, saturação, ressonâncias, vibrações e redução da vida útil de transformadores;
- Aquecimento, ruído audível, redução da vida útil de equipamentos;
- Erros nos medidores de energia elétrica e instrumentos de medida.

A instabilidade e não linearidade são maiores durante a fusão da sucata fria. Isso se acontece devido à dificuldade para ignição do arco elétrico.

Com o avanço da fusão da sucata, e aumento do banho líquido, certas flutuações estão presentes, mas a estabilidade aumenta de maneira significativa. A temperatura e a transferência de calor do arco são elevadas com o banho de aço líquido, e a condução térmica é baixa.

A soma dos conteúdos dos harmônicos pode ser representada pela distorção harmônica total (THD), que está representada na Figura 2.9 onde se encontra a THD da voltagem do FEA, em uma sequência de três determinadas corridas. Nota-se que os picos do gráfico mostram que na fusão da sucata existe uma forte intensidade de harmônicas de tensão, já na etapa de refino, a estabilidade aumenta de forma significativa (Gandhare, 2007).

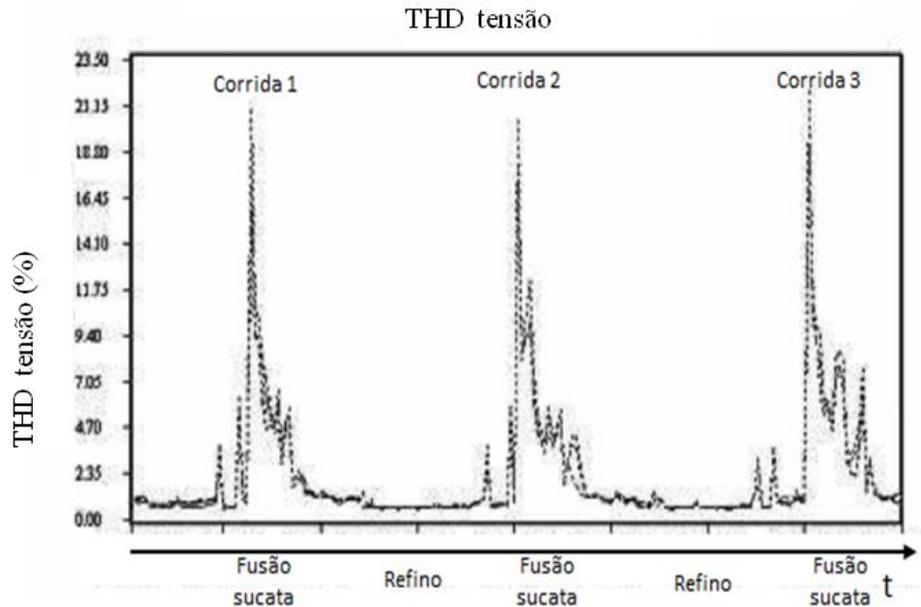


Figura 2.9 Total distorção harmônica da tensão (THD), durante três corridas. Fonte: Adaptado de Gandhare, 2007.

2.2.4 Arco elétrico

O arco elétrico é considerado um fenômeno que ocorre por meio de uma corrente elétrica de alta intensidade entre dois eletrodos, em meio gasoso ionizado. Precisa-se de uma ignição para o estabelecimento do arco, que ocorre por meio da corrente entre os dois eletrodos que estão postos em contato e são submetidos a potenciais elétricos diferentes. O cátodo, que é aquecido pela passagem de corrente, emite elétrons que se movem para o ânodo, devido ao efeito do campo elétrico que se cria entre os eletrodos. As moléculas de gás se ionizam à medida que os elétrons se fazem condutores e garantem a corrente elétrica, mesmo que os eletrodos estejam separados. As moléculas ionizadas, aceleradas pelo campo elétrico, se chocam contra o eletrodo, gerando um aquecimento, isso proporciona uma maior emissão de elétrons (URQUIZA, 1998).

A Figura 2.10 (a) mostra três eletrodos de grafita em operação, e a Figura 2.10 (b) a esquematização dos eletrodos, a formação do arco elétrico, o banho líquido, a distância entre os eletrodos e o ângulo (Θ) da direção do arco em relação ao nível médio superior da sucata.

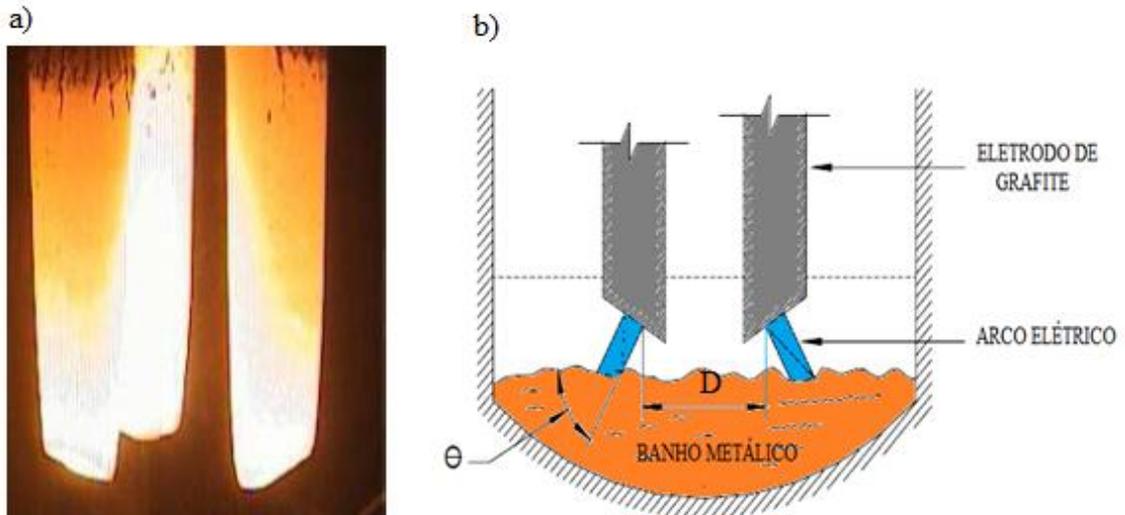


Figura 2.10 (a) Foto dos eletrotos de grafita em operação. (b). Esquematização do arco elétrico. Fonte: Adaptado GERDAU (2012).

O comprimento do arco depende da tensão aplicada no eletrodo, ou seja, quando se deseja um arco curto, a tensão através dele deve ser mantida baixa. Na Figura 2.11, se apresenta o esquema de um arco longo (a), assim grande parte do calor atinge as paredes do forno e a abóbada. Quando o arco apresentado for curto (b), a transferência de calor está concentrada nas regiões próximas dos eletrodos. Para evitar o desgaste excessivo dos refratários, se utiliza preferencialmente arcos curtos (CANDIDO, 2008).

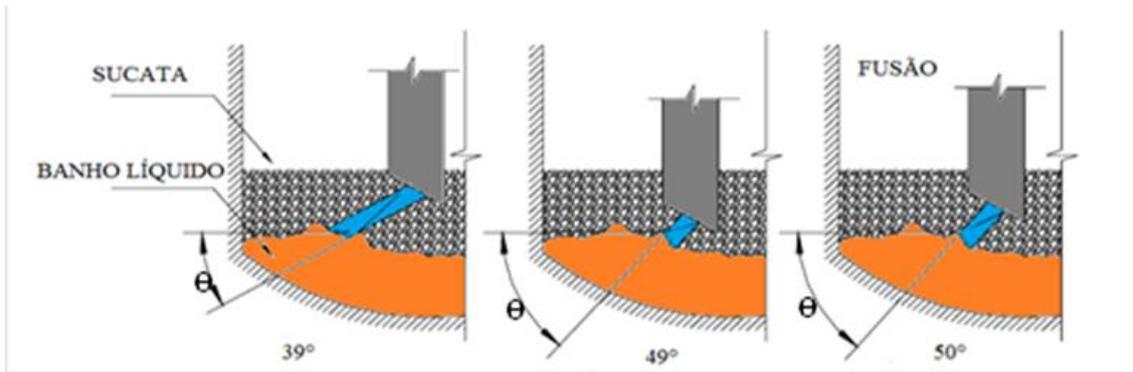


Figura 2.11 Arco longo (a), Arco curto (b), Arco intermediário (c). Fonte: Adaptado de CANDIDO, 2008.

Existem basicamente duas condições de fluxo de corrente. Na situação em que a corrente é baixa, a orientação do fluxo de calor (irradiação) é horizontal, pois o comprimento do arco é longo e sua seção transversal é pequena. Já na situação em que a corrente é alta, a orientação da irradiação é vertical, e a seção do arco é maior. A energia por volume do arco é estimada baseada na seção e comprimento de arco.

De acordo com essas informações, têm-se fases diferentes de comprimento de arco ao longo da fusão da sucata. No início da fusão, o arco deve ser curto, a tensão baixa e uma alta corrente. Isso para que haja uma ignição do arco elétrico com maior facilidade. Quando se quer uma maior penetração dos eletrodos, deve-se manter a tensão alta e uma baixa corrente, para que o arco seja longo. Essa situação é válida também para quando há a formação do banho líquido. Na etapa de refino é importante que se tenha um arco de alta corrente, pois com a escória espumante e a alta potência, são alcançados grandes ganhos de produtividade e eficiência energética (LIBÓRIO, 2009).

2.3 Escória no FEA

As seguintes definições podem ser feitas para escórias:

- Produto não metálico, que essencialmente consiste em silicatos de cálcio e ferro, combinados com óxidos de Fe, Al, Mn, Ca e Mg fundidos, que aparece como co-produto do aço resultante das atividades realizadas nas usinas integradas e semi-integradas de aço - ASTM.
- Escórias fundidas são de natureza iônica, consistindo de íons positivos (cátions) e íons negativos (ânions) (Turkdogan 1998).

- Escórias são soluções iônicas consistindo de óxidos metálicos e fluoretos que flutam sobre a superfície do aço líquido. Completa ou parcialmente líquidas – (Pretorius, 2002)

Isso mostra a complexidade das mesmas. As escórias mudam de acordo com a etapa de fabricação, sendo as escórias de refino primário diferentes das escórias de refino secundário de aços. Assim como, também mudam de acordo com a composição química dos aços, e com os diferentes tipos de refratários.

As principais funções das escórias são (Pretorius, 2002):

- Cobrir o arco elétrico no FEA e proteger os refratários dos arcos.
- Melhorar a qualidade do aço absorvendo os produtos da desoxidação (e.g. SiO_2 , Al_2O_3) e inclusões.
- Desfosforar no refino primário e dessulfurar no refino secundário.
- Proteger o metal da atmosfera (oxidação, absorção de nitrogênio e hidrogênio, evitar a perda de calor).

A escória é composta por vários óxidos diferentes, vindos das mais variadas fontes, podendo ser adicionados propositalmente, provenientes da carga ou como resultado das diferentes reações químicas como oxidação e desoxidação. Os principais elementos que compõe a escória são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Principais óxidos que constituem a escória e suas origens no processo (Bielefeldt, 2012)

Óxidos	Práticas mais usadas	Origem
CaO	Adicionado	- Cal (98% CaO). - Dolomita ($\approx 58\%$ CaO e 39% MgO). - Cálcio-Aluminatos ($\approx 45\%$ CaO e 53% Al ₂ O ₃). - Refratários dolomíticos.
MgO	Adicionado	- Dolomita ($\approx 58\%$ CaO e 39% MgO). - Magnesia ($> 92\%$ MgO). - Refratários magnesianos e dolomíticos.
SiO ₂	Do processo ou da carga	- Oxidação do Si na carga ($\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$). - Desoxidação do aço ($2\text{O} + \text{Si} = \text{SiO}_2$). - Areia e terra. - Refratários sílico-aluminosos.
Al ₂ O ₃	Do processo ou adicionado (FP)	- Oxidação da carga ($2\text{Al} + 3/2\text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3$). - Desoxidação do aço ($3\text{O} + 2\text{Al} = \text{Al}_2\text{O}_3$). - Escória sintética Cálcio-Aluminatos ($\approx 45\%$ CaO e 53% Al ₂ O ₃). - Escória sintética Bauxita ($> 80\%$ Al ₂ O ₃). - Refratários (Alta alumina).
CaF ₂	Adicionado na panela	- Conteúdo de Fluorita entre 80 e 90%. O restante composto principalmente de SiO ₂ e CaCO ₃ .
FeO	Processo no FEA	- Carga ($2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$).
MnO	Processo no FEA	- Carga ($2\text{Mn} + \text{O}_2 = 2\text{MnO}$). - Desoxidação do aço ($\text{Mn} + \text{O} = \text{MnO}$).

A escória tem um papel que não se restringe puramente à metalurgia, mas também desempenha um importante papel físico durante grande parte da corrida:

- A escória básica melhora a estabilidade do arco;
- “Splashing” (respingos) de escória contribuem para a transferência de calor;
- A escória espumante ajuda a melhorar a eficiência térmica;

- Uma camada de escória, sobre os painéis refrigerados nas paredes e abóbada, é essencial para reduzir a perda de calor (Bowman, 2009).

2.3.1 Escória e estabilidade do Arco

A adição de óxidos básicos para uma escória siliciosa tem como função quebrar os grandes aglomerados de íons de silicatos. Com o aumento do teor de CaO a viscosidade da escória diminui e a condutividade elétrica aumenta. Esta quebra da estrutura iônica permite que os íons escapem da escória a temperaturas relativamente baixas. O efeito de tal emissão eletrônica e iônica é para facilitar a passagem da corrente pelo zero para um arco de CA (corrente alternada), reduzindo assim o teor das harmônicas de tensão do arco, suavizando o formato de onda. Para escórias de menor basicidade, este efeito estabilizador é muito reduzido. Assim, fornos que operam com a prática de escórias ácidas, sofrem como consequência, arcos com maior conteúdo harmônico na tensão do arco (Bowman, 2009).

2.3.2 Efeitos da escória espumante na operação do FEA

A formação da escória espumante se dá pela injeção de oxigênio e carbono no banho líquido para a formação de bolhas de CO (estudo mais detalhado no capítulo 2.3.4). Com rendimento suficiente de bolhas e viscosidade da escória favorável, o volume da massa de escória/CO pode ser suficientemente expandido para submergir os arcos. O aumento típico é da ordem de 2 a 5, o que significa que 50 a 80 por cento em volume da espumação da escória consiste em gás. Esta é a situação normal e desejável para a maior parte dos fornos. A capacidade de formação de espuma de escória depende de vários parâmetros, que são acoplados de forma significativa, ver a Figura 2.12.

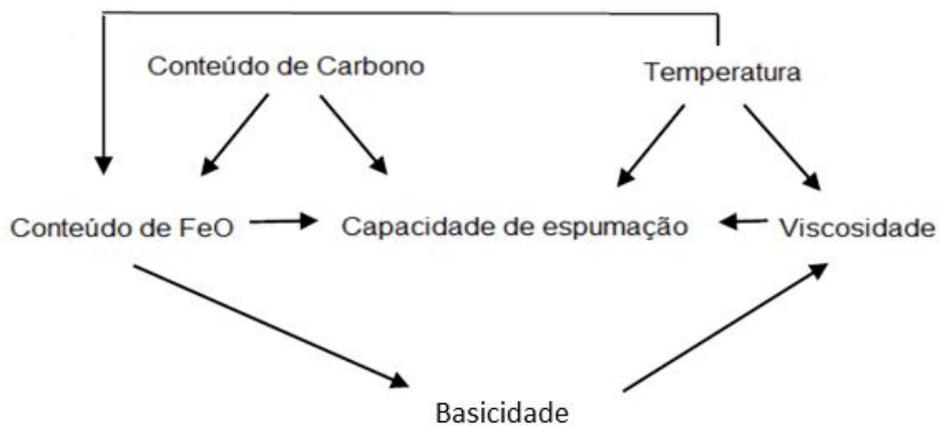


Figura 2.12 Variáveis que influenciam na espumação da escória Fonte: Adaptado de BOWMAN, 2009.

Os efeitos favoráveis devido ao arco estar submerso por espuma de escória são evidentes:

- Uma melhoria na estabilidade do arco - formas de onda de tensão do arco são quase senoidais, produzindo uma redução de harmônicos;
- Melhor estabilidade também produz uma redução do atraso entre tensão e a corrente do arco, correspondendo à diminuição da reatância operacional, e assim, um aumento da potência ativa;
- Redução na produção de ruído - a massa de escória absorve a maior parte da energia acústica, que em si é reduzida pelo menor teor de harmônicas na potência do arco. Em um forno DC (corrente contínua) onde 100 ou 120 Hz são harmônicos, já muito reduzido em comparação com AC (corrente alternada), pode se tornar tão silenciosos, que se pode questionar até mesmo a existência de um arco;
- Uma redução nas perdas de calor para as paredes e telhado. As chamas e projeções destinadas preferencialmente para os pontos quentes são “sufocadas” pela escória (Bowman, 2009).

2.3.3 Redução da instabilidade elétrica com a prática de escória espumante

A qualidade da espumação da escória é um importante parâmetro na produção de aço. A escória espumante ajuda na redução de custos de energia, pois garante que o calor do banho líquido não seja perdido pelas paredes do FEA, mantendo grande parte do calor. Além disso, se for garantido uma boa formação de escória espumante, o resultado será melhoria na eficiência, diminuição das vibrações, do som e do consumo de eletrodos.

A turbulência gerada durante a fusão resulta em grandes flutuações, não linearidade e instabilidade da corrente do arco elétrico nas diferentes fases. Uma espumação adequada garante que o banho metálico seja coberto, e o caminho feito pela corrente elétrica entre os três eletrodos seja facilitado (PARSAPOOR, 2010).

Como citado anteriormente, a instabilidade gerada pelos harmônicos é maior quando a sucata ainda está fria, nos primeiros minutos do processo de fusão. A Figura 2.13 apresenta a varredura da tensão e da corrente, no início da fusão da sucata, e após a formação da escória espumante. Nota-se uma grande redução dos harmônicos, e um formato de onda mais aproximado da forma senoidal (SEDIVY, 2008).

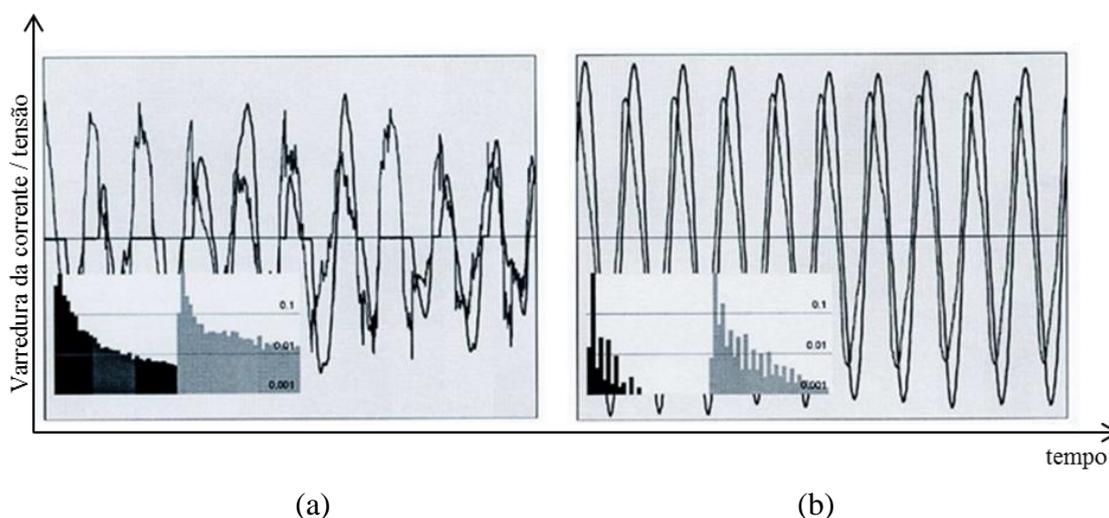


Figura 2.13 Representação da instabilidade da tensão e corrente do sistema. (a) antes da presença de escória espumante e (b) estabilidade após a prática da espumação. Fonte: Adaptado de SEDIVY, 2008.

Segundo Dehkordi (2011), se pode prever a qualidade da espumação da escória através de um sistema inteligente que coleta dados da variação harmônica total de corrente, tensão e ainda coleta valores relacionados ao desequilíbrio da corrente e tensão. O método utilizado é o sistema *adaptive neuro fuzzy inference system* (ANFIS), um dos resultados

apresentados em seu trabalho estão apresentados na Figura 2.14, mostrando que com o aumento da qualidade da escória, o total de harmônicos e o desequilíbrio da corrente são reduzidos de maneira significativa.

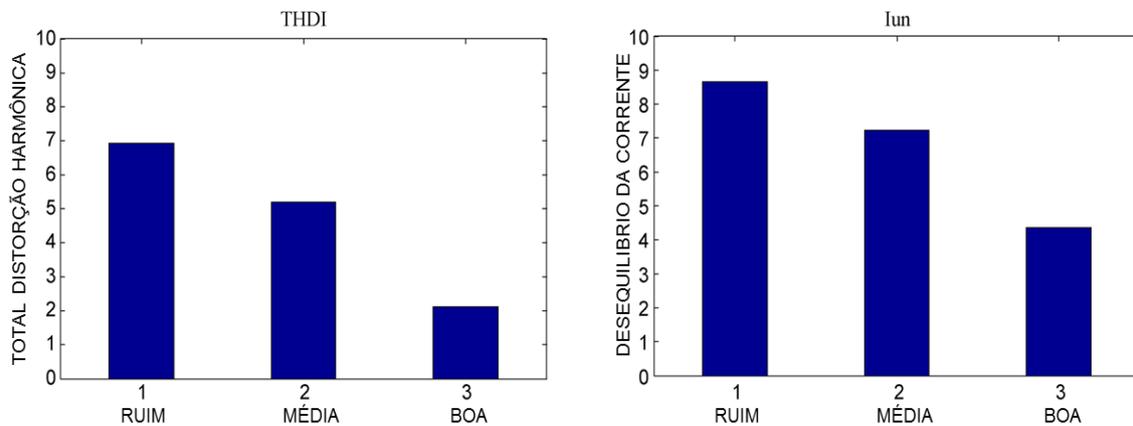


Figura 2.14 Relação entre a qualidade de espumação da escória e dados elétricos. Fonte: DEHKORDI, 2011.

2.3.4 Formação da escória espumante

O processo de formação de escória espumante geralmente é dividido em três etapas, que estão representadas na Figura 2.15 com suas respectivas reações. Geralmente a quantidade de carbono existente no aço líquido é suficiente para a formação de bolhas de CO. Injeções diretas de oxigênio estimulam a geração de bolhas de CO no banho líquido, que em seguida sobem para a escória. As bolhas de CO são a chave para a formação da escória espumante.

À medida que o teor de carbono no banho é reduzido, o oxigênio passa a reagir com o ferro, formando FeO, que é transferido para a escória. O aumento do teor de FeO pode reduzir a viscosidade da escória, inibindo a formação de escória espumante. A fim de reduzir a quantidade de FeO na escória, injeções diretas de carbono são empregadas, o carbono reage com o oxigênio, formando bolhas de CO, e o ferro volta para o banho líquido. A viscosidade aumenta novamente, favorecendo a espumação.

A terceira etapa funciona com novas injeções de oxigênio. O oxigênio adicional acelera a formação de CO. Para que a máxima espumação seja formada, o processo ocorre com a combinação da lança de oxigênio e carbono.

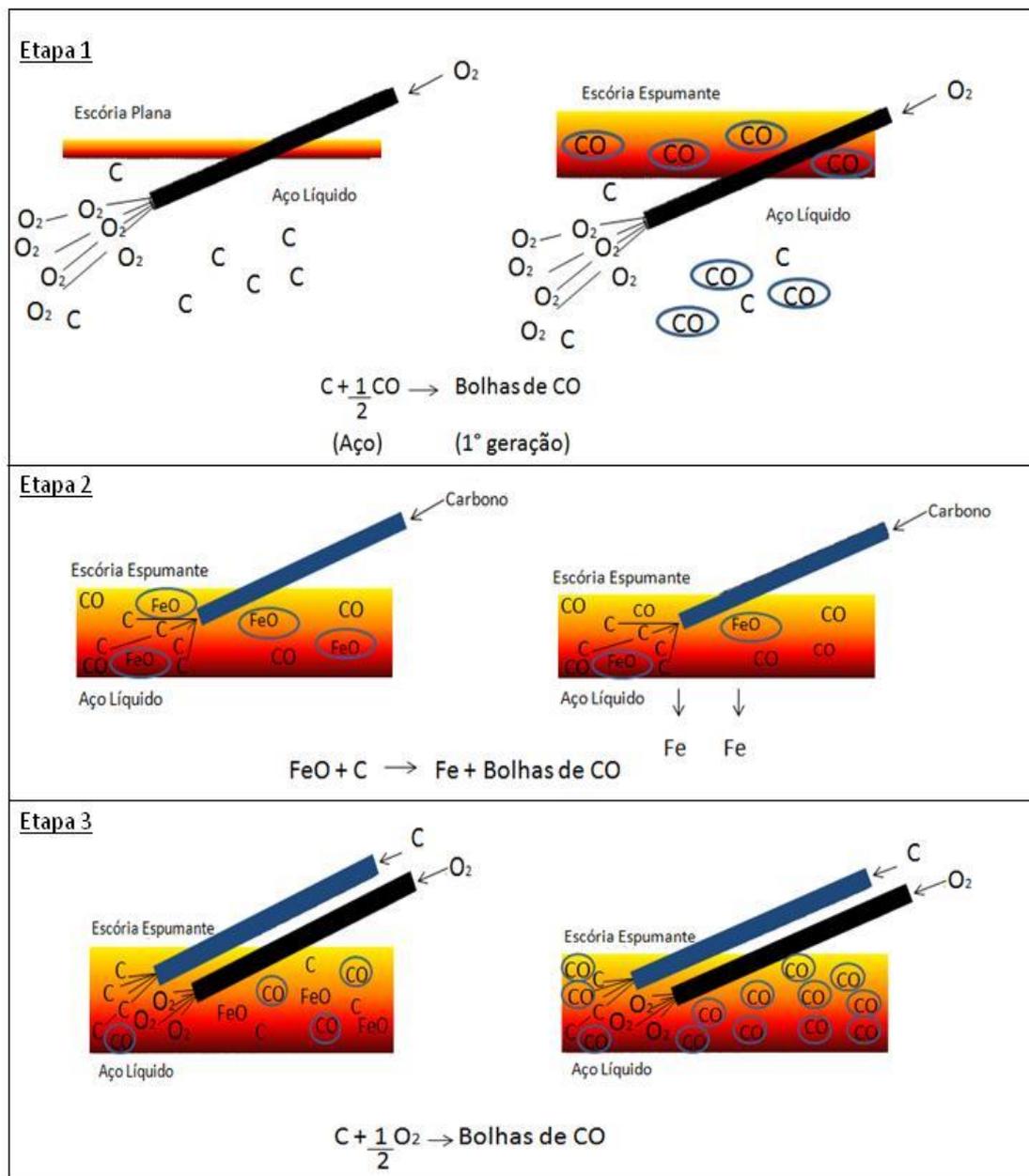


Figura 2.15 Etapas da formação de escória espumante no FEA. Fonte: Adaptado de PRIBYL, 2009.

2.3.4.1 Índice de espumação

Pesquisadores buscam desenvolver modelos úteis para controlar a espumação da escória em processos metalúrgicos. Ito e Fruehan foram os primeiros a aplicar o índice de espumação em sistemas de escórias (Zhu, 2012).

O índice de espumação ou tempo médio para travessia de um gás na escória é obtido pela razão entre a altura de espuma da escória e a velocidade superficial do gás, como apresentado na Equação 2.1. O H é a diferença entre a altura inicial da escória, na

ausência de injeção de gás, e a altura final, quando a espumação encontra-se em estado estacionário, na presença de injeção de gás (ÁVILA, 2011).

$$\Sigma = \frac{H}{V_g^s} \quad [2.1]$$

Onde:

Σ = índice de espumação;

H = altura da escória;

V_g^s = velocidade superficial do gás.

Ito e Fruehan observaram que o índice de formação de espuma passa ser constante após uma determinada velocidade superficial de gás. Este fato confirmou que o índice de espumação é função das propriedades físicas da escória, como a viscosidade, tensão superficial e densidade. Sendo assim, independente da velocidade superficial do gás. (Zhu, 2012).

Skupien e Gaskell (2000) desenvolveram um modelo matemático que mostra a forte relação entre o índice de espumação e as propriedades físicas da escória. Pela Equação 2.2 nota-se o forte efeito que a viscosidade tem sobre o índice de espumação, mostrando o expoente com maior valor se comparado com os expoentes das outras duas propriedades físicas consideradas. A tensão superficial e a densidade têm um efeito deletério sobre o índice de espumação, ou seja, um aumento nestas propriedades causa uma diminuição no tempo de residência da bolha na escória e dessa forma um menor índice de espumação (SKUPIEN, 2000).

$$\Sigma = \frac{100\mu^{0.54}}{(\rho^{0.39}\sigma^{0.15})} \quad [2.2]$$

Onde:

μ = viscosidade;

ρ = densidade;

σ = tensão superficial.

O cálculo da densidade da escória, apresentado pelo modelo do Slag Atlas (1995), leva em consideração o somatório da massa molar de cada óxido. Quanto maior a massa

molar do óxido presente na escória, maior será a densidade obtida, como pode ser visto na Equação 2.3.

$$\rho = \frac{(M_1X_1 + M_2X_2 + \dots)}{(X_1V_1 + X_2V_2 + \dots)} \quad [2.3]$$

Onde:

ρ = densidade (g/cm³);

M = massa molar (g/mol);

X = número de mols (mol);

V = Volume molar(cm³/mol);

xi = fração molar.

Já o modelo de Mills e Keene (1987), considera apenas os óxidos que possuem maior massa molar na escória, que são o óxido de ferro (FeO) e o óxido de manganês (MnO), Equação 2.4.

$$\rho = 2460 + 0,18(\%FeO + \%MnO) \quad [2.4]$$

Onde:

ρ = densidade em (inserir unidade de medida)

%FeO = percentual em massa do óxido de ferro;

%MnO = percentual em massa do óxido de manganês.

2.3.4.2 Influência da viscosidade e tensão superficial

O índice de espumação é elevado quando existe a diminuição da tensão superficial e aumento da viscosidade da escória. No entanto, a presença de partículas suspensas de segunda fase na escória causa um impacto muito maior na formação de espuma do que a tensão superficial e viscosidade da escória fundida. A escória atinge uma ótima espumação quando partículas de segunda fase estão presentes. Estas partículas são locais de nucleação para o gás, que levam à alta quantidade de pequenas bolhas que são favoráveis para a espumação. A viscosidade efetiva é definida pela quantidade de partículas de segunda fase e viscosidade da escória líquida (fundida) (PRETORIUS, 1998).

O Slag Atlas (1995) e o autor Mills e Keene (1987), também apresentaram modelos diferentes em seus estudos para o cálculo da tensão superficial, Equação 2.5 e Equação 2.6.

$$\text{Slag Atlas: } \sigma = x_1\sigma_1 + x_2\sigma_2 + \dots \quad [2.5]$$

Onde:

σ = tensão superficial (N/m);

x_i = fração molar;

σ_i = tensão superficial dos componentes puros (N/m).

$$\text{Mills e Keene: } \sigma = 754,24 - 569,4 (\% \text{SiO}_2/100) - 137,13 (\% \text{FeO}/100) \quad [2.6]$$

Onde:

σ = tensão superficial (N/m);

$\% \text{SiO}_2$ = percentual em massa da sílica;

$\% \text{FeO}$ = percentual em massa do óxido de ferro.

Paulino (2014) utilizou a equação de Roscoe-Einstein para o cálculo da viscosidade efetiva da escória, considerando as partículas sólidas existentes, como mostra a Equação 2.7. O estudo apresenta resultados de viscosidade da escória e quantidade de partículas de segunda fase, obtidos pelo software FactSage 6.4. Com esses dados, analisou que para determinados teores de FeO a viscosidade da escória líquida não apresenta uma considerável variação, já a viscosidade efetiva apresenta bruscas mudanças (PAULINO, 2014a).

$$\eta_e = \eta (1 - \rho\theta)^{-5/2} \quad [2.7]$$

Onde:

η_e - viscosidade efetiva da escória;

η - viscosidade da escória fundida;

θ - fração de fases sólidas precipitadas;

ρ - parâmetro de interação do sólido.

Portanto, para alcançar um alto índice de espumação, a escória não pode estar totalmente líquida, e sim saturada com partículas sólidas (CaO/MgO, por exemplo). Mas a presença excessiva destas partículas diminui a capacidade da escória espumar, como apresentado na Figura 2.16, pois ela se torna dura por estar supersaturada com partículas de segunda fase, diminuindo o índice de espumação (PRETORIUS, 1998).

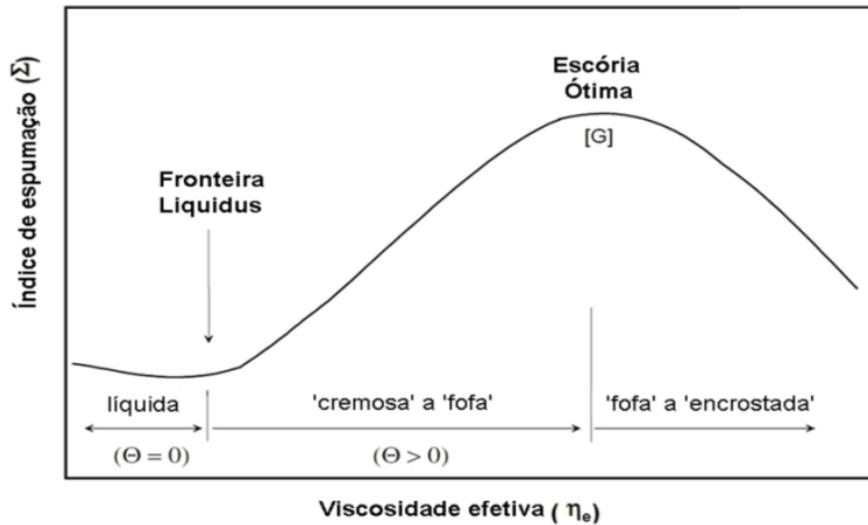


Figura 2.16 Variação das propriedades físicas da escória devido ao aumento da viscosidade efetiva e índice de espumação. Fonte: Adaptado de PRETORIUS, 1998.

As relações entre índice de espumação e tensão superficial foram apresentadas em um estudo realizado por Skupien, Figura 2.17, onde mostra que, com o aumento da temperatura índice de espumação e a tensão superficial decaem. Além disso, este estudo comprova a mensuração feita por Ito e Fruehan, com o decréscimo da tensão superficial, a escória tem um maior índice de espumação (Skupien 2000).

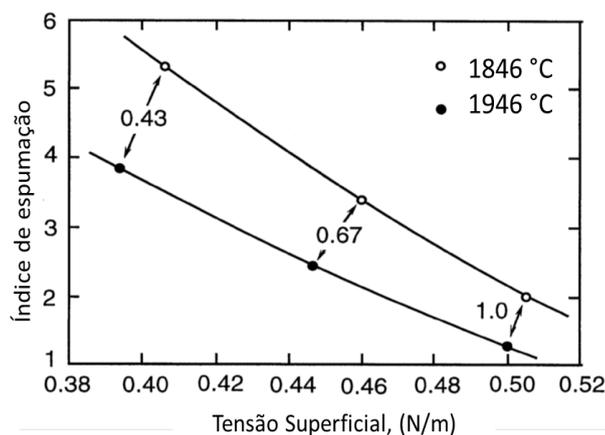


Figura 2.17 Influência da temperatura na tensão superficial e no índice de espumação. Fonte: Adaptado de SKUPIEN, 2010.

2.3.4.3 Influência da basicidade da escória

Os óxidos, componentes da escoria, podem ser separados em dois grupos: óxidos refratários e óxidos fluxantes. O CaO e MgO são óxidos refratários, e a adição destes resulta em um aumento eficaz da viscosidade da escória. Os óxidos fluxantes consistem de SiO₂, Al₂O₃, FeO, MnO e CaF₂, que aumentam a fluidez da escória (PRETORIUS, 1988).

O equilíbrio destes óxidos é definido pela basicidade da escória, e as expressões normalmente utilizadas para defini-la são apresentadas:

$$B_2 = \text{CaO}/\text{SiO}_2; B_3 = \text{CaO}/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3); B_4 = (\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3).$$

Em um estudo sobre escória espumante no FEA, Aminorroaya (2002) cita que existem pontos ótimos de basicidade para se alcançar um menor consumo de energia elétrica. Além disso, a altura máxima da espumação da escória pode ser relacionada com a basicidade. A Figura 2.18 demonstra a relação entre estas variáveis. Interessante também que o autor fixou os valores de FeO entre 20-25%.

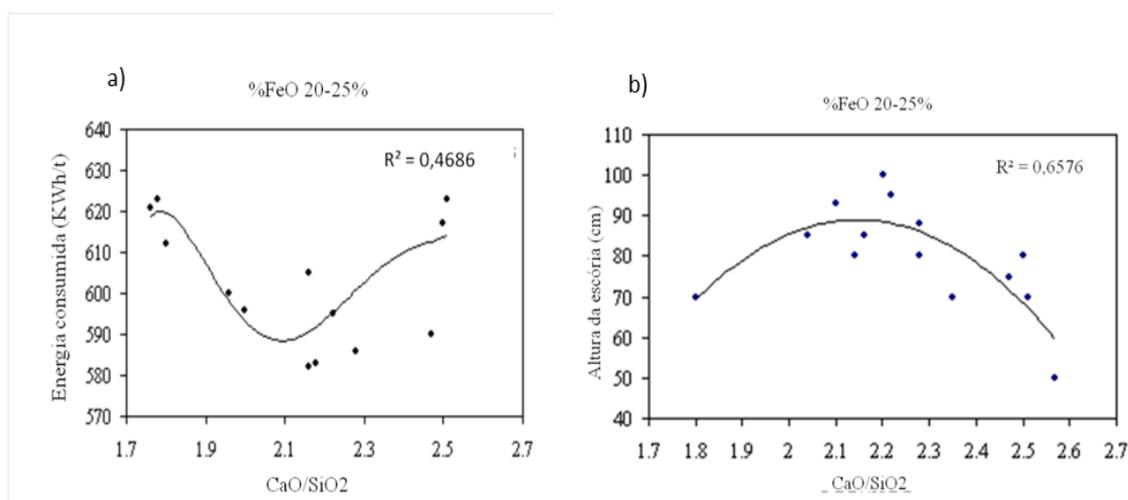


Figura 2.18 Influência da basicidade na energia consumida do FEA (a), efeito da basicidade sobre a altura da escória (b). Fonte: Adaptado de AMINORROAYA, 2002.

2.3.4.4 Influência do teor de FeO

O óxido de ferro contido na escória durante a operação do FEA é normalmente formado pela oxidação do ferro quando o oxigênio é injetado no metal fundido. O FeO é um importante componente na escória e tem um efeito significativo sobre viscosidade, capacidade de espumação, volume de escória, produtividade e consumo de energia. Baixo

teor de FeO (<10% em massa) resulta em uma escória viscosa que é difícil de espumar. Por outro lado, um FeO teor > 40% em massa aumenta a fluidez e as bolhas de gás não podem permanecer no líquido (LUZ, 2011).

As relações entre a quantidade de FeO na escória e o consumo energético podem ser vistas, na Figura 2.19 onde a basicidade foi fixada. Nota-se que temos uma faixa ótima dos teores de óxido de ferro presentes na escória (AMINORROAYA, 2002).

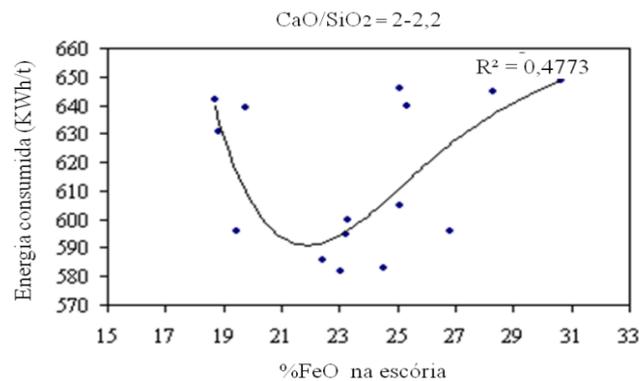


Figura 2.19 Relação entre o teor de FeO na escória e energia consumida. Fonte: Adaptado de AMINORROAYA, 2002.

2.3.4.5 Teor de MgO

A utilização de uma escória saturada em MgO é de grande importância nas operações do FEA, formando a escória espumante com maior eficiência, menor custo de energia, maior rendimento do metal e vida útil do refratário mais longa (BENNET, 2010).

A quantidade de MgO na escória provoca um aumento no índice de espumação (Figura 2.20) devido a quantidade de partículas sólidas. No entanto, o valor de partículas sólidas presente não pode ser estimado, pois o diagrama de fases CaO-SiO₂-FeO-MgO (CSFM) é desconhecido (ITO, 1989).

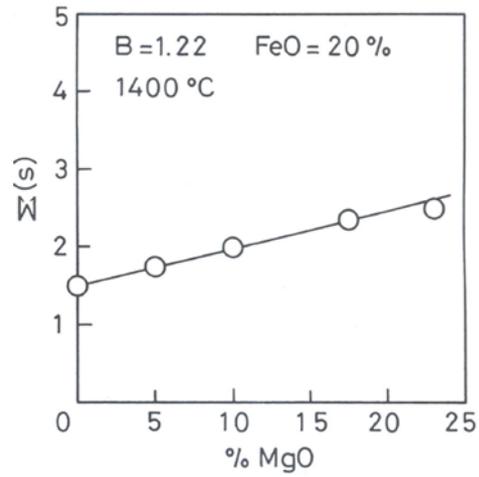


Figura 2.20 Influência do teor de MgO no índice de espumação da escória. Fonte: ITO, 1989.

Em estudos mais recentes, Paulino utiliza modelos termodinâmicos computacionais (software 'FactSage', versão 6.4) para a investigação do sistema CSFM, analisando as composições para saturação das fases sólidas de MgO e CaO na escória (PAULINO, 2014b).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia utilizada consistiu na obtenção de dados elétricos e de composição química da escória de 25 (vinte e cinco) corridas de diferentes padrões de carga fria de um FEA de uma usina produtora de aços especiais. O padrão de carga fria é uma importante variável, e a princípio deveria ser fixada. No entanto, devido a limitações de programação na usina e disponibilidade de pessoas para o acompanhamento, optou-se por não fixar essa variável. Como os teores máximos de fósforo são diferentes, devido às diferentes qualidades, tem-se diversos tempos de “power on” no refino e quantidades variadas de cales adicionadas.

Os parâmetros elétricos escolhidos para a análise foram: a tensão do arco elétrico em determinada fase, a energia elétrica consumida durante a corrida e o total de distorção harmônica da tensão. A análise da estabilidade destes parâmetros mostra o comportamento e a eficiência da escória espumante durante o refino. Ou seja, se a corrida tiver uma baixa variação da tensão, um baixo consumo de energia elétrica e pouca distorção harmônica, significa que se tem uma maior estabilidade de espumação.

A Figura 3.1 representa a maneira como os dados foram divididos e quais análises serão discutidas neste trabalho.

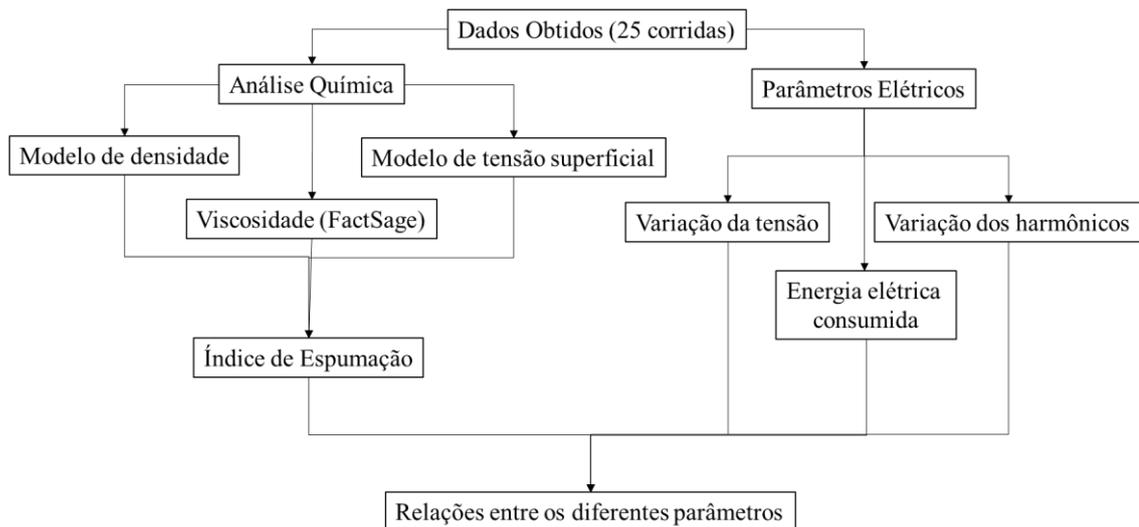


Figura 3.1 Fluxograma da metodologia utilizada.

3.1 Análise química das amostras de escória

Foram coletadas três amostras de escória durante o tempo de refino de 25 corridas de aço de diferentes padrões de carga. Esta forma de amostragem foi escolhida para que fosse possível analisar o comportamento da composição química da escória em diferentes etapas do refino, ou seja, início, meio e fim. A Figura 3.2 apresenta uma linha do tempo da corrida no FEA, onde após a fusão do primeiro e segundo cestão, quando o sistema do forno aponta um determinado nível de energia, se inicia a injeção de carbono, indicando que inicia o refino do banho metálico. Após um minuto de início do refino, normalmente já há indícios de escória saindo pela porta do forno e a primeira amostra é retirada. A segunda amostra é coletada simultaneamente com a amostra da prova de aço, que ocorre no momento em que a corrida alcança um determinado gasto de energia elétrica. Após três minutos a última amostra é obtida, e então a etapa de refino primário se encaminha para o fim.

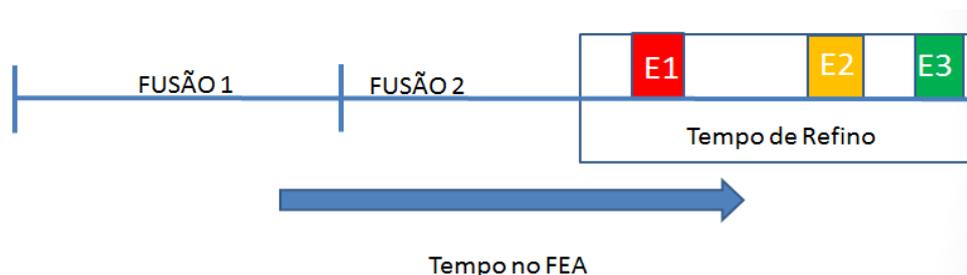


Figura 3.2 Amostragem de escória, sendo E1 a primeira amostra de escória, E2 a segunda amostra de escória e E3 a terceira amostra de escória.

A Figura 3.3 mostra o momento de retirada de uma amostra de escória, feita por um operador capacitado, utilizando uma vara de aço, onde a área incandescente é a porta de retirada de escória.



Figura 3.3 Momento de retirada de uma amostra de escória.

As escórias foram enviadas para o laboratório de análises químicas da empresa, seguindo o procedimento interno. A Figura 3.4 (a) mostra a aparência que a escória chega ao laboratório. Ela é então embutida, como na Figura 3.4 (b). A composição química foi avaliada pelo espectrômetro de raios-x modelo PW 2600 X RAY SPECTROMETER que pode ser visto na Figura 3.5, onde a resposta é dada diretamente no software X40.

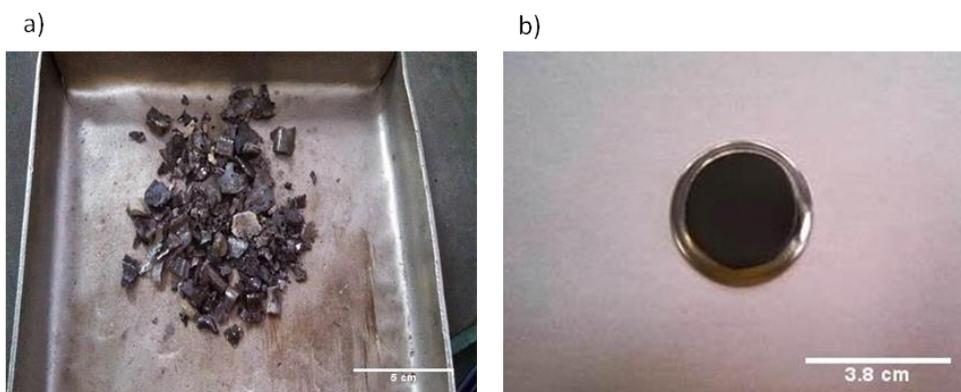


Figura 3.4 Escória recebida no laboratório de análises químicas (a); Amostra preparada para o espectrômetro de raio-X (b).



Figura 3.5 Espectrômetro de Raios-X, modelo PW 2600 X RAY SPECTROMETER.

Os elementos presentes nos resultados de composição química das amostras de escória são: S, CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, FeO, MnO, FeO+MnO, Cr₂O₃, CaF₂, P₂O₅, TiO₂, V₂O₅, K₂O e Na₂O.

Neste estudo foram escolhidas as seguintes propriedades físicas da escória para serem analisadas:

- Viscosidade;
- Viscosidade efetiva;
- Densidade;
- Tensão superficial;
- Índice de espumação.

O cálculo dos quatro primeiros parâmetros é fundamental para a aquisição do índice de espumação, este parâmetro é utilizado para avaliar a qualidade de espumação da escória.

A viscosidade da escória foi obtida via simulação termodinâmica pelo software FactSage (versão 6.4). O FactSage disponibiliza diferentes bancos de dados para as simulações (BIELEFELDT 2005). Conforme a Figura 3.6, o programa é composto por 4

módulos, um de informação (info), de banco de dados (database), outro para cálculos (calculate) e para manipulação (manipulate).

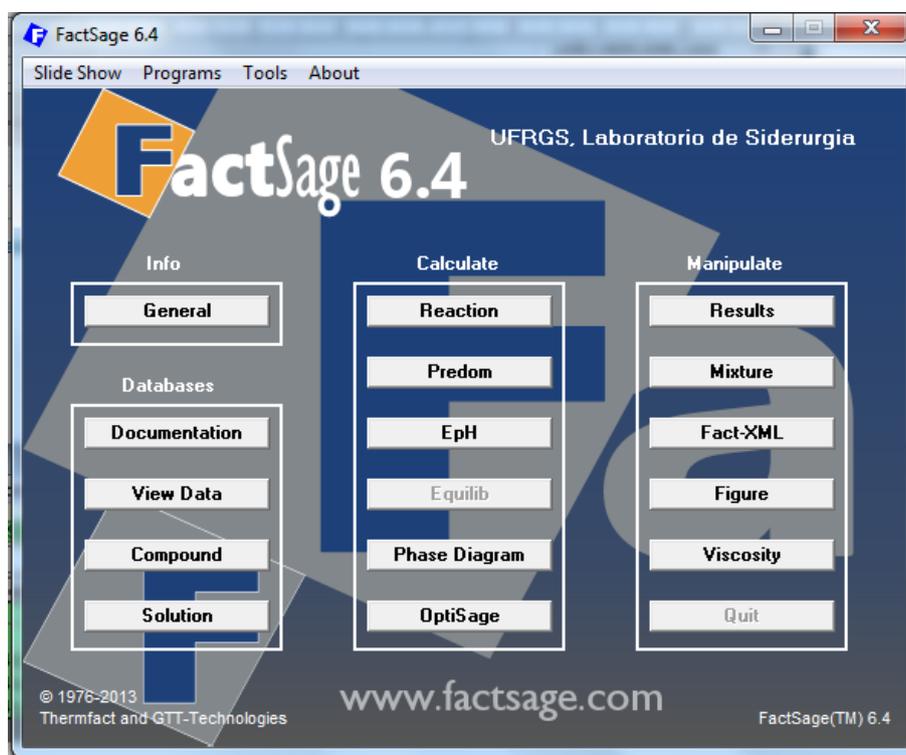


Figura 3.6 Tela de abertura do software FactSage 6.4.

No módulo de informação, são disponibilizadas as informações gerais do programa, o contato dos desenvolvedores do software, assim como é utilizado para acessar a ajuda.

No módulo de banco de dados, é realizada a manipulação e a visualização dos mesmos através das seguintes opções: Documentation (mostra um resumo dos bancos de dados), View Data (lista as substâncias puras, os dados termodinâmicos e as fases de cada tipo de solução), Compound (é usado para entrar, editar, listar e salvar um banco de dados construído pelo usuário), Solution (salvar e editar uma substância não ideal no banco de dados).

No módulo de cálculo é possível acessar os bancos de dados, e realizar diferentes cálculos termoquímicos como: propriedades termodinâmicas, das reações químicas e das espécies (Reaction), calcular e plotar diagramas de predominância (Predom), gerar o diagrama de Pourbaix (Eph), minimizar a energia de Gibbs para simular equilíbrios complexos (Equilib) e plotar diagramas de fases (PhaseDiagram).

Já o módulo de manipulação permite acessar os resultados produzidos e reutilizá-los para criar gráficos e tabelas ou ainda criar misturas ou soluções para serem reutilizadas no módulo de cálculo (BIELEFELDT 2005).

O FactSage mantém também diferentes bancos de dados (verFigura 3.7), aqueles utilizados neste trabalho foram:

- FactPS: banco de dados de substâncias e compostos puros.
- FToxid: banco de dados de óxidos, sulfetos e fluoretos.
- FTmisc: banco de dados que descreve o Fe líquido.

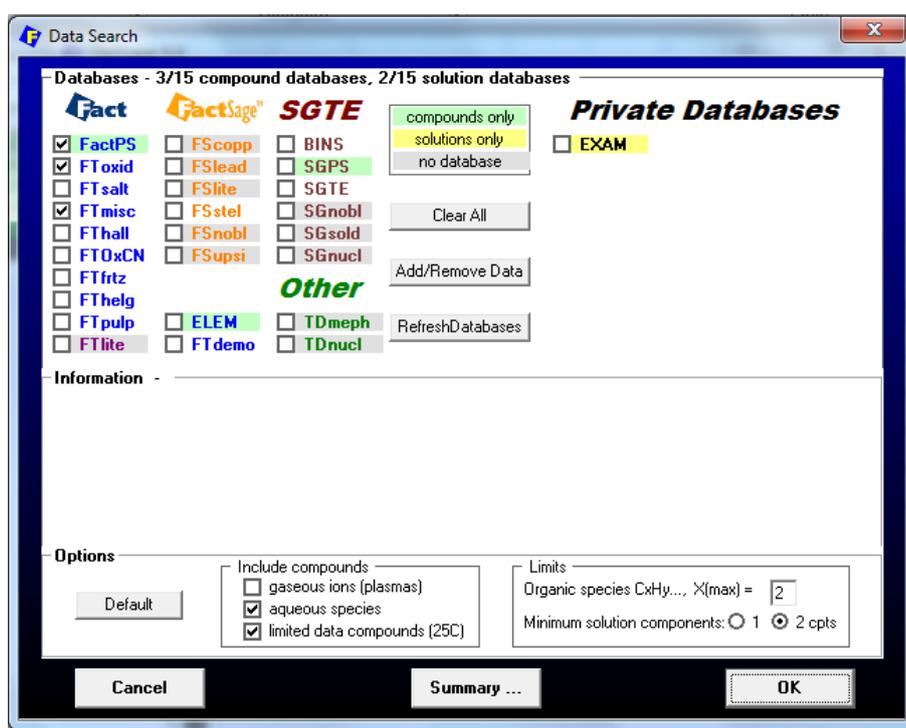


Figura 3.7 Banco de dados do software FactSage versão 6.4.

A fração líquida da escória foi então obtida e a viscosidade de cada amostra calculada pelo módulo de manipulação *Viscosity*.

Além da fração líquida da escória, o software citado anteriormente, a partir do módulo de equilíbrio (Equilib), é capaz de calcular a fração sólida da escória, onde foi considerada uma temperatura de 1600°C. Tendo estes valores, aplicou-se a Equação 2.7, de Roscoe-Einstein, encontrando os valores da viscosidade efetiva. Para uma suspensão diluída de esferas com diferentes tamanhos, aplica-se o parâmetro de interação dos sólidos igual à unidade.

Para os cálculos da densidade da escória e tensão superficial foram utilizados dois modelos, Slag Atlas e Mills e Keene, apresentados nas Equações 2.3 e 2.4, e Equações 2.5

e 2.6 respectivamente, para que pudessem ser avaliadas as diferenças de comportamento dos dois modelos.

Depois de adquiridos todos os valores necessários para o cálculo do índice de espumação (viscosidade, densidade e tensão superficial), foi aplicado o mesmo modelo que os autores Skupien e Gaskell (ver seção 2.3.4.1, Equação 2.2) utilizaram em seu estudo para as três amostras de escórias de cada uma das 25 corridas.

3.2 Análise dos parâmetros elétricos

Os parâmetros elétricos recebidos para estudo foram armazenados pelo sistema computacional ArCOS do FEA da empresa Siemens VAI. Este sistema computa 65 dados diretamente do FEA durante todas as corridas. Entre eles estão o tempo total da corrida, consumo de energia elétrica total, número do cestão em operação, trafo utilizado, tensão por segundo (em cada fase), total de distorção harmônica (em cada fase), índice de estabilidade, se o sistema elétrico do forno está ligado ou desligado, variação da impedância por segundo, entre outros.

3.2.1 Análise da tensão

O comportamento da tensão de uma determinada fase do forno ao longo de uma corrida pode ser visto na Figura 3.8. Conforme verificado na seção 2.3.3, existe uma grande instabilidade ao longo da fusão dos cestões, enquanto que na etapa de refino o contrário acontece.

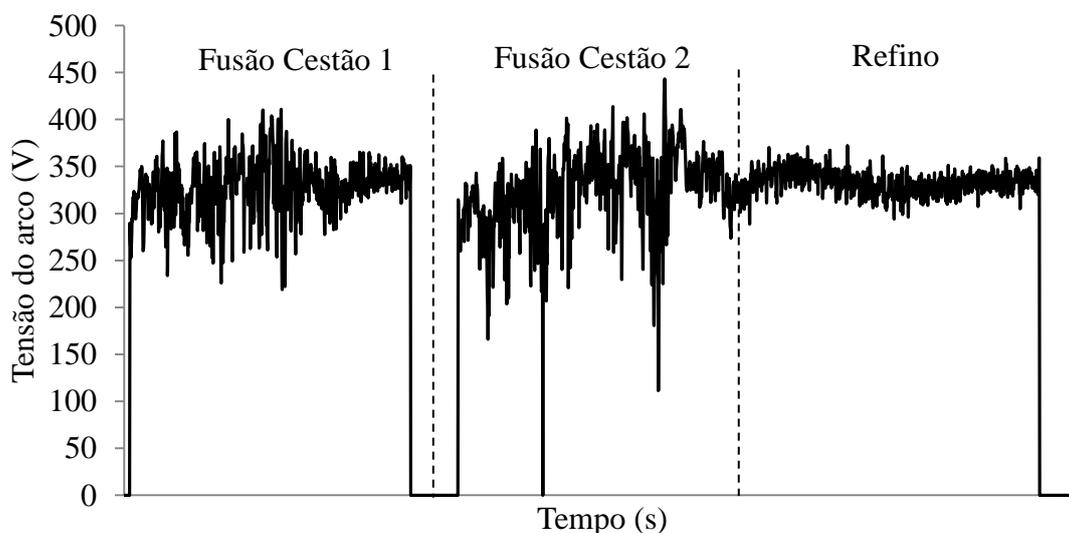


Figura 3.8 Exemplo do comportamento da tensão ao longo de uma corrida.

A média da tensão do arco em cada fase foi calculada para cada uma das corridas, então foi escolhido o valor intermediário da média, para que os cálculos pudessem ser feitos.

Como cada amostra foi retirada em um determinado momento, escolheu-se um intervalo de trinta segundos antes e trinta segundos depois da retirada de cada amostra de escória para cálculo do desvio padrão da tensão na fase escolhida. Com isso o comportamento do arco pode ser avaliado nas diferentes composições químicas de refino.

3.2.2 Análise da THD

O mesmo procedimento adotado na seção 3.2.1 foi efetuado para a distorção total harmônica. A Figura 3.9 mostra a THD de uma corrida em função do tempo. Assim, se pode verificar que o comportamento é semelhante ao apresentado na seção 2.2.3, onde foi discutida a geração de harmônicas no FEA.

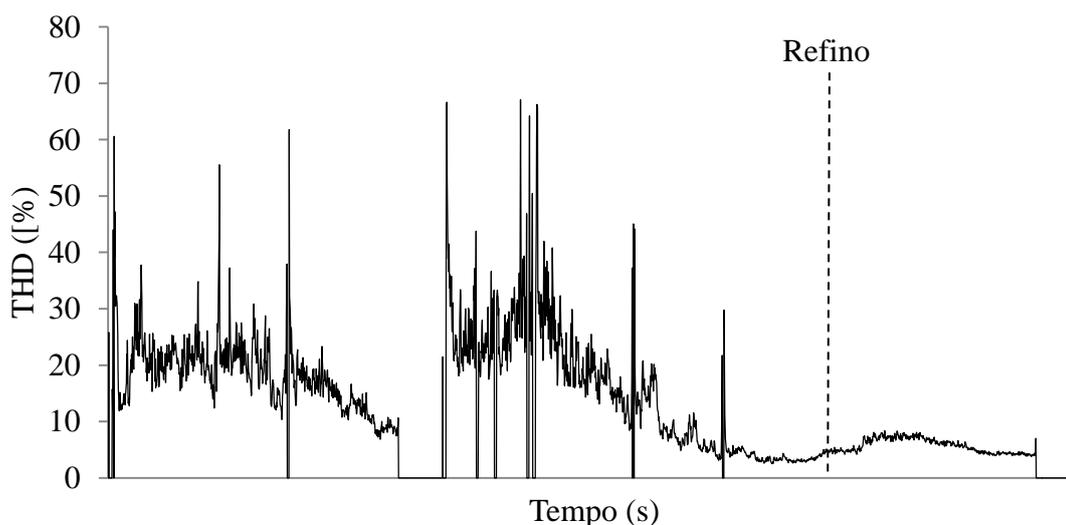


Figura 3.9 Distorção harmônica total ao longo do tempo de fusão e refino da carga metálica para uma corrida em FEA.

3.2.3 Energia elétrica total consumida

O sistema fornece de maneira direta o total da energia gasta consumida, sem a necessidade de cálculos, para a comparação dos valores com outros dados obtidos, igualmente visto na seção 2.3.4.3, onde AMINORROAYA (2002) compara a energia total consumida com as características químicas da escória. Foram utilizados os dados de energia consumida total (durante toda a corrida), não apenas durante o refino, pois foram

consideradas qualidades diferentes de carga metálica, resultando em tempos de refino diferentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sabe-se que as propriedades físicas das escórias estão intimamente ligadas com a composição química das mesmas, assim inicialmente fez-se uma análise das composições químicas recebidas.

A Figura 4.1 mostra o Boxplot do teor de MgO (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.

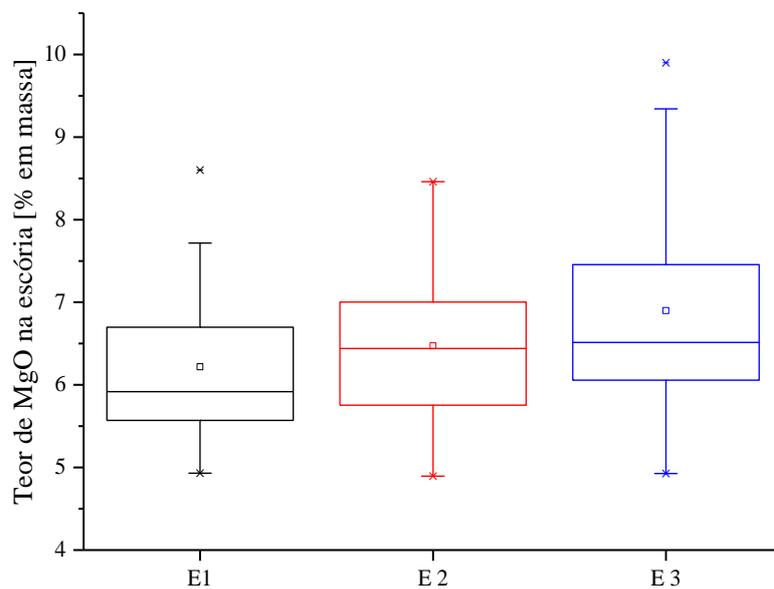


Figura 4.1 Boxplot do teor de MgO (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.

O comportamento do MgO esteve constante para as duas primeiras amostras (E1, E2), já na amostra E3 houve uma maior dispersão dos dados, que pode estar relacionado ao consumo do refratário, ou dissolução tardia deste óxido, mais pronunciado no final do refino. Figura 4.1.

A Figura 4.2 apresenta o Boxplot do teor de FeO (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.

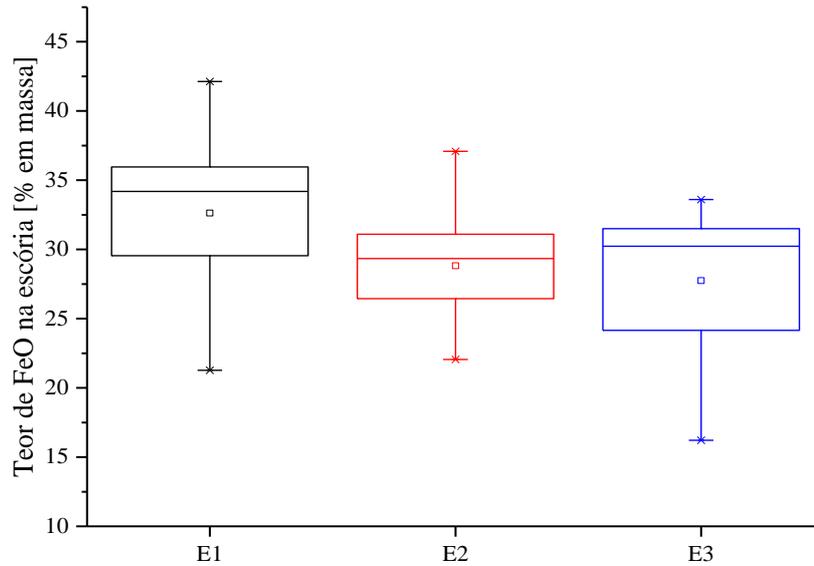


Figura 4.2 Boxplot do teor de FeO (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.

Para o FeO, vê-se uma tendência de diminuição dos valores de acordo com o refino, tendo valores maiores na amostra E1 e menores na amostra E3. Na amostra E2 encontraram-se valores intermediários, devido ao fato de que no início do refino tem-se o início da espumação (injeção de O_2 no aço para descarburização, etapa 1 da Figura 2.15) e com isso uma grande oxidação do ferro. Nas etapas posteriores, as outras etapas da espumação, com a injeção de carbono na escória, o ferro retorna para o banho (Etapas 2 e 3 Figura 2.15).

A distribuição dos teores de MnO (% em massa) para as três amostras estão apresentados na Figura 4.3.

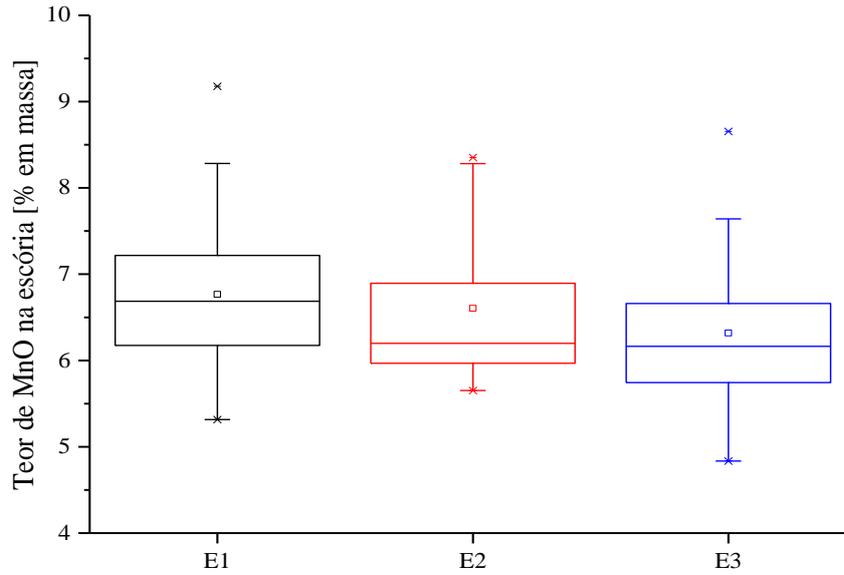


Figura 4.3 Boxplot do teor de MnO (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.

A distribuição do teor de MnO e FeO apresenta mesmo comportamento, devido a similaridade entre os dois óxidos.

O comportamento do SiO₂ e CaO também foi analisado, conforme a Figura 4.4 e Figura 4.5.

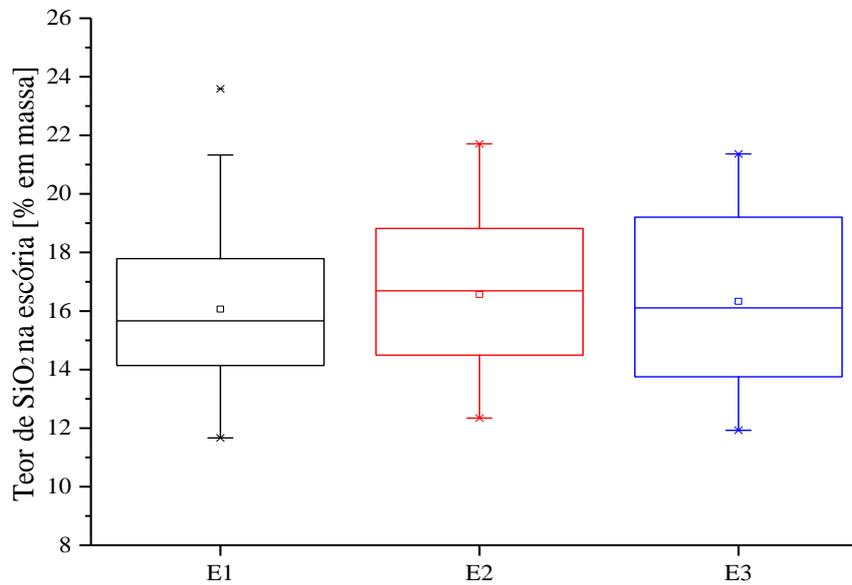


Figura 4.4 Variação do SiO₂ (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.

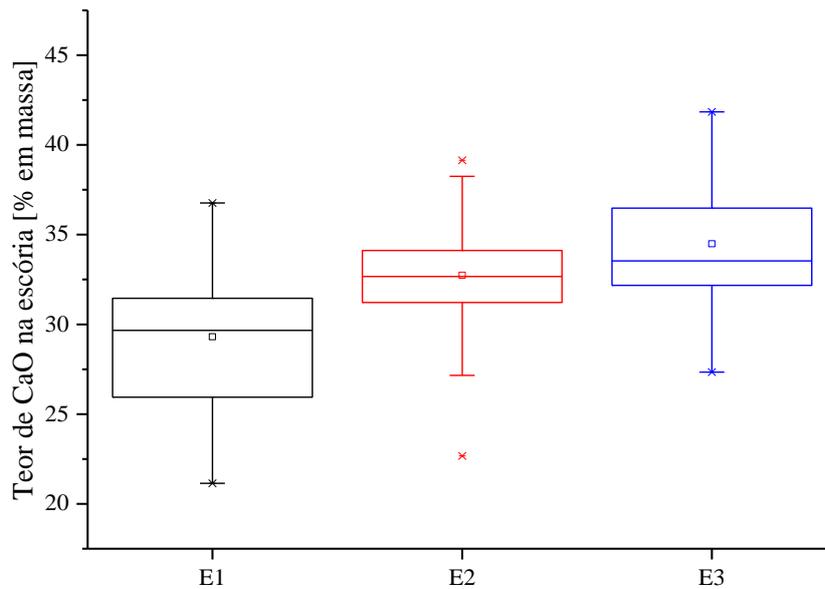


Figura 4.5 Variação do CaO (% massa) para as três amostras de escória, nas 25 corridas analisadas.

O silício proveniente da carga metálica oxida logo no início da formação de escória, o que explica o fato de os teores de SiO_2 mostraram-se praticamente constantes durante o refino.

Um comportamento diferente do encontrado para o CaO, que mostrou aumento nos valores, que pode ser consequência de uma dissolução tardia das cales adicionadas.

Para um melhor entendimento do comportamento da viscosidade em função da composição química da escória, plotou-se os gráficos de viscosidade efetiva com relação ao teor dos óxidos. A Figura 4.6 considera os óxidos de ferro e manganês, nas 75 amostras de escória (3 amostras de cada uma das 25 corridas).

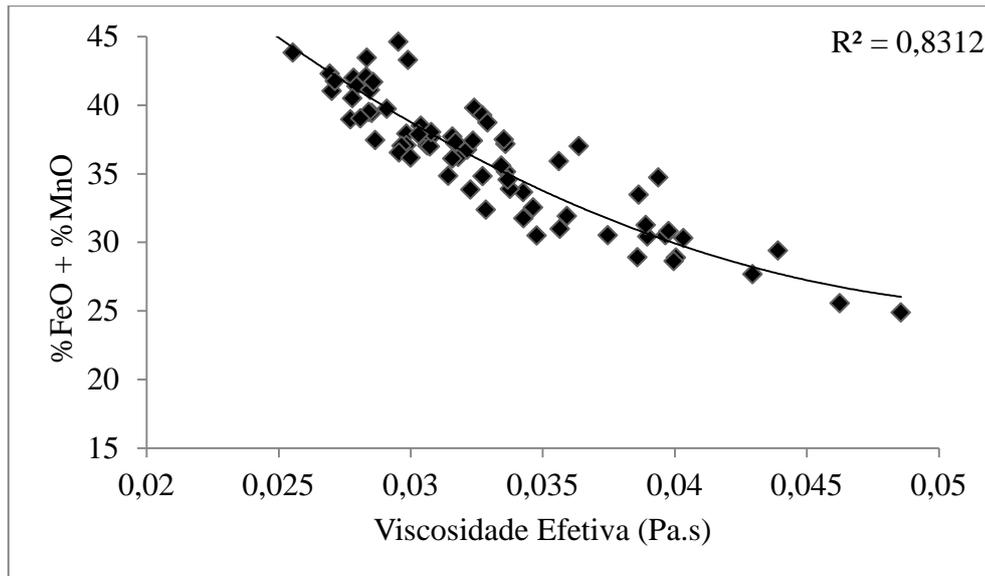


Figura 4.6 Relação entre a viscosidade efetiva e teores de FeO + MnO, calculado para temperatura de 1600°C.

O efeito fluxante do FeO e do MnO está demonstrado, pois quanto maior o teor destes óxidos menor a viscosidade efetiva encontrada. O teor de FeO é extremamente importante para o estudo da escória espumante, pois existe um balanceamento entre o FeO criado pelo O₂ injetado, e pelo FeO reduzido pelo carbono. Se este balanceamento estiver correto, haverá uma boa espumação. Porém, caso haja um excesso de FeO ou uma temperatura mais elevada, a viscosidade cairá em demasia, e a queda na altura da escória será verificada. Como existe uma viscosidade ideal (com teor de sólidos ideal) existe também um teor de FeO ideal para a espumação. Este teor irá depender da basicidade da escória.

Em relação ao teor de MgO e CaO, o efeito é o contrário, quanto maior o teor de MgO e CaO maior é a viscosidade encontrada. As Figura 4.7 e Figura 4.8 mostram este comportamento, nas 75 amostras de escória.

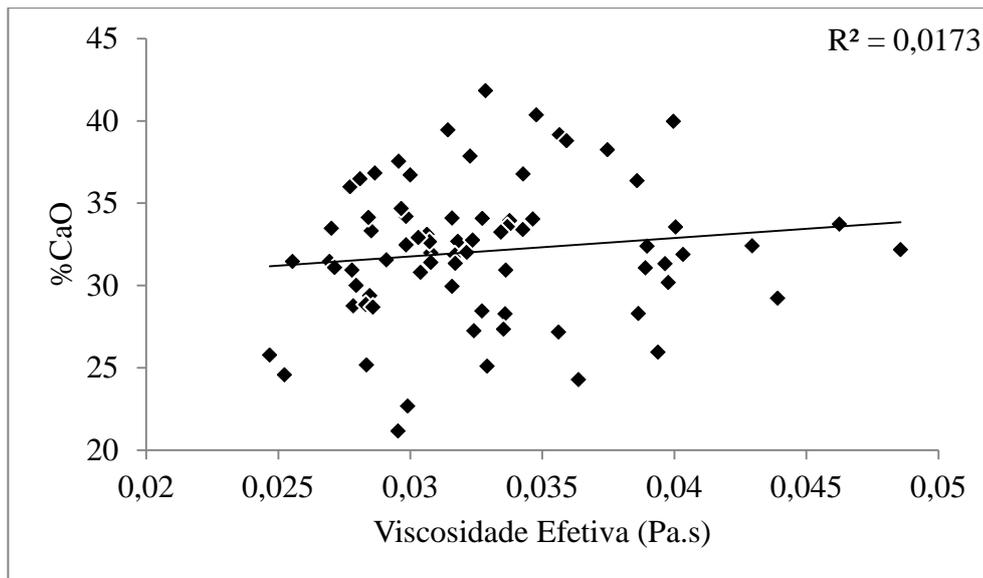


Figura 4.7 Relação entre a viscosidade efetiva e teores de CaO.

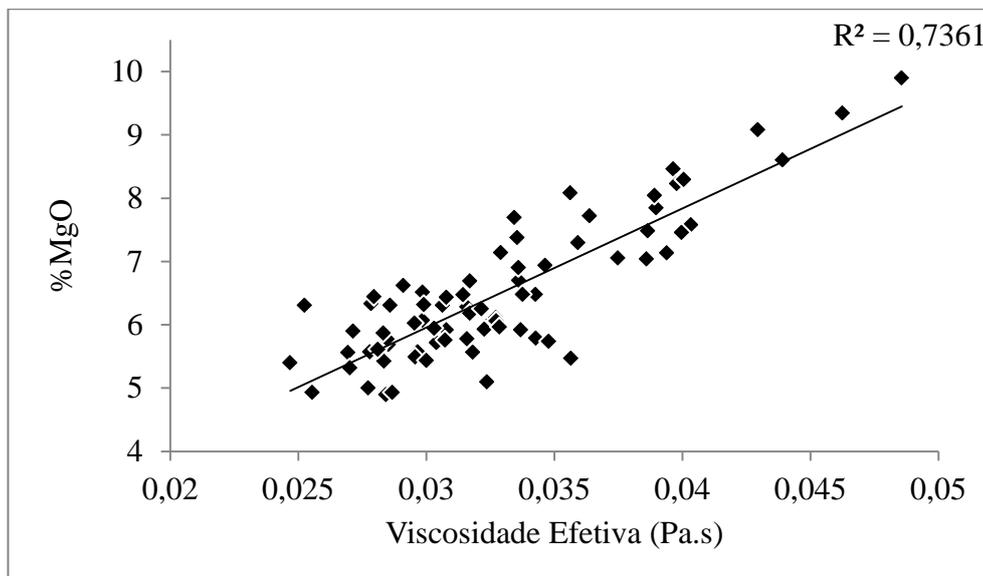


Figura 4.8 Relação entre a viscosidade efetiva e teores de MgO.

Este aumento da viscosidade efetiva ocorre principalmente pela saturação destes óxidos, resultando na precipitação dos mesmos. Como as corridas pertencem a padrões de cargas diferentes, e por haver uma possível dissolução tardia das cales adicionadas, a faixa de CaO é dispersa, apresentando um baixo valor de R^2 .

Para o gráfico do SiO_2 , Figura 4.9, nota-se que o aumento do teor de SiO_2 resulta em um aumento da viscosidade.

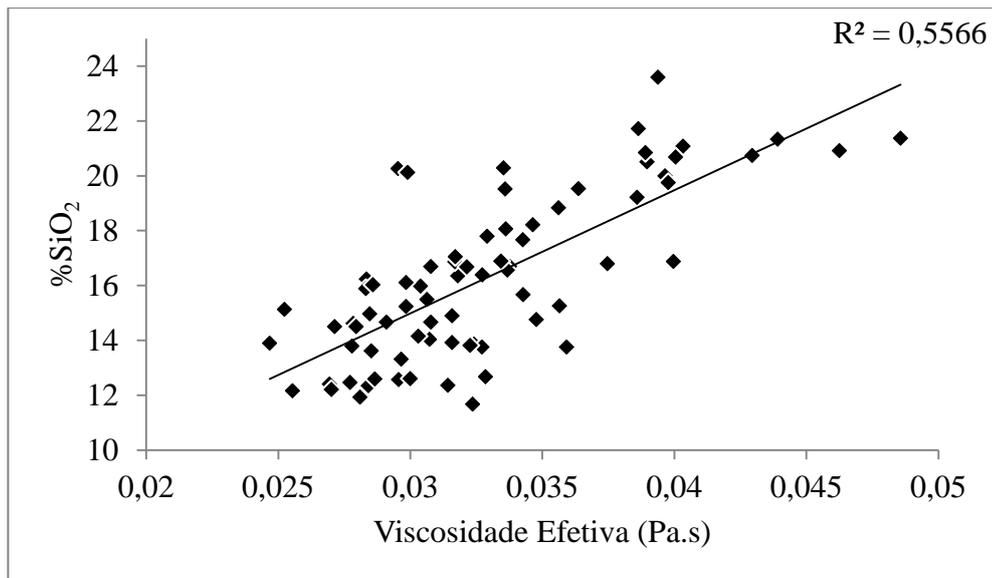


Figura 4.9 Relação entre a viscosidade efetiva e teores de SiO₂.

Como a basicidade da maioria das escórias analisadas é maior ou igual a 2, os valores elevados de sílica estão interligados com valores ainda maiores de CaO, resultando assim em corridas saturadas em CaO, ou seja, corridas no qual existe a presença de partículas sólidas resultando em altas viscosidades.

Foi realizado o cálculo da densidade e da tensão superficial de cada amostra obtida. Os cálculos de índice de espumação foram feitos para todas as corridas utilizando os dois modelos. O objetivo foi o de avaliar o comportamento dos diferentes métodos. A Figura 4.10 mostra os resultados obtidos de quatro corridas.

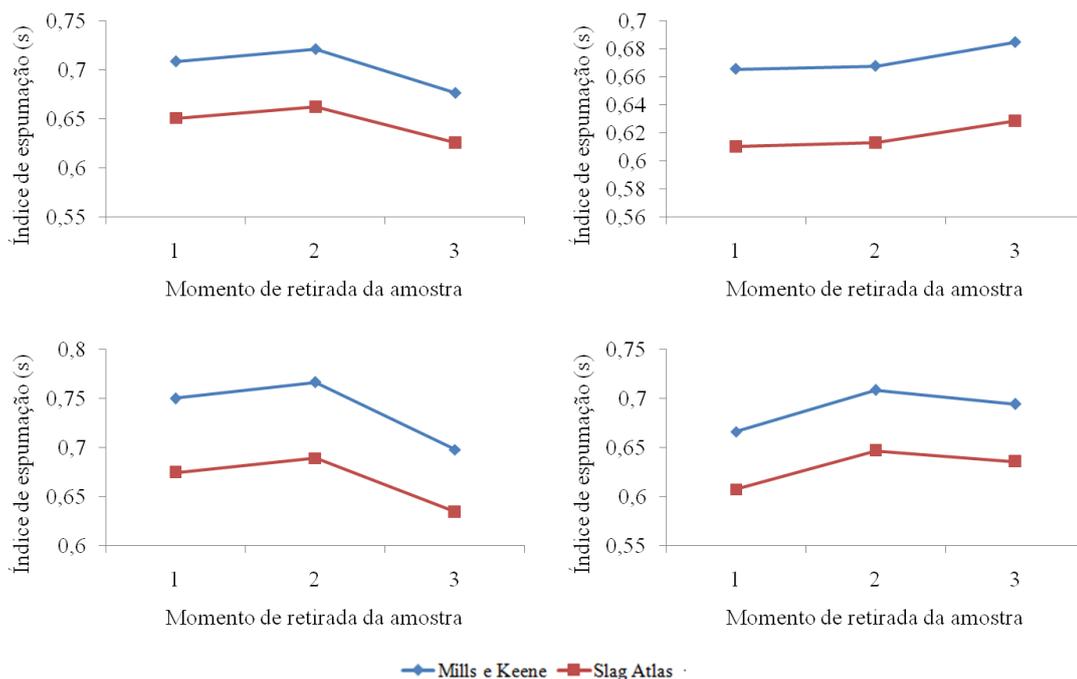


Figura 4.10 Comparação entre os índices de espumação calculados com os modelos de Mills e Keene e Slag Atlas.

Observando a Figura 4.10 conclui-se que os dois modelos apresentaram o mesmo comportamento quando utilizados para calcular o índice de espumação, tendo diferença somente no valor obtido. Isso se deve às diferenças entre os dois cálculos e as simplificações que os dois consideraram. A densidade calculada pelo modelo do Slag Atlas apresentou valores maiores que a calculada pelo modelo de Mills e Keene. Já no caso da tensão superficial ocorre o contrário, os valores encontrados pelo modelo de Mills e Keene são maiores que os encontrados pelo modelo do Slag Atlas. Por ter apresentado valores maiores para o índice de espumação as análises foram feitas usando o modelo de Mills e Keene.

A Figura 4.11 mostra o comportamento do índice de espumação calculado pela viscosidade efetiva (para as 75 amostras).

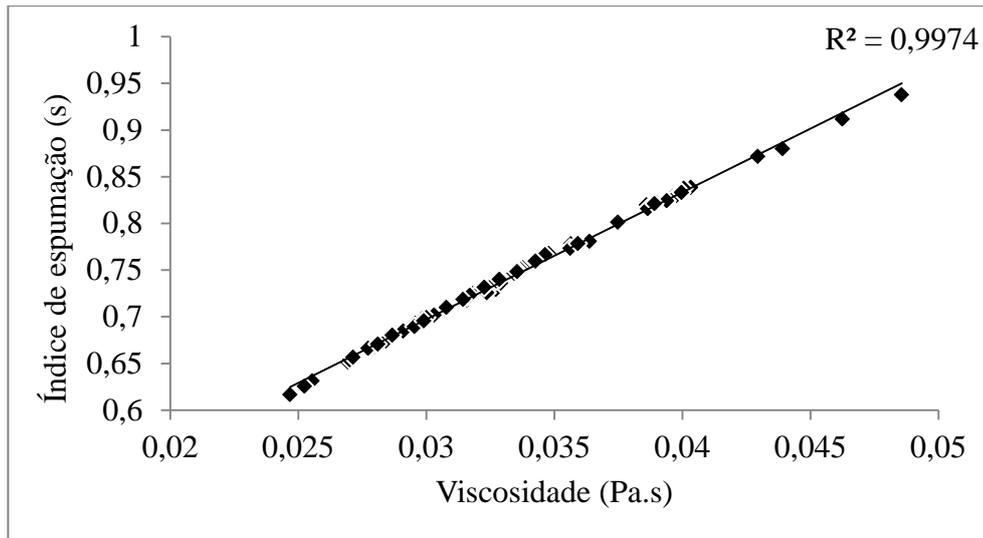


Figura 4.11 Índice de espumação pela viscosidade efetiva.

Sabe-se que a viscosidade tem papel preponderante sobre o cálculo do índice de espumação, onde um aumento na viscosidade resulta em um aumento no índice de espumação (ver equação 2.2).

Na Figura 4.12 estão os gráficos de energia elétrica consumida pela basicidade binária.

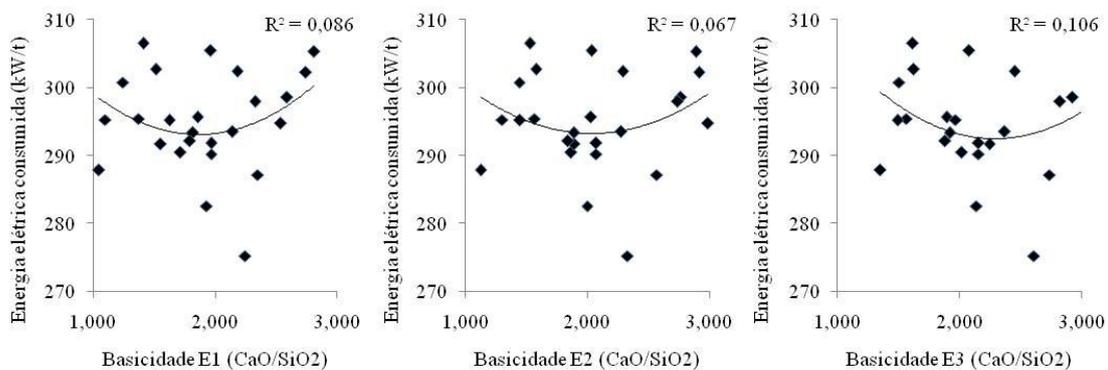


Figura 4.12 Energia elétrica consumida pela basicidade binária para cada amostra retirada.

Estes gráficos foram feitos para cada amostra separadamente, mostrando que existe uma basicidade ótima, que resulta em um menor gasto energético. Considerando que a composição química durante o refino não é constante, tem-se então uma faixa de basicidade ótima que vai de 1,8 até 2,2. Os baixos valores de R^2 mostram a necessidade de

filtrar os padrões de carga devido a grande influência de alguns parâmetros importantes no processo.

A fim de obter-se melhores relações entre energia elétrica consumida e basicidade da escória, foram selecionadas as amostras com teores de FeO (% em massa) entre 27 e 32, visto na Figura 4.13, pois conforme a Figura 4.2, é a faixa que se encontra a média do teor de FeO para os três momentos de retirada das amostras.

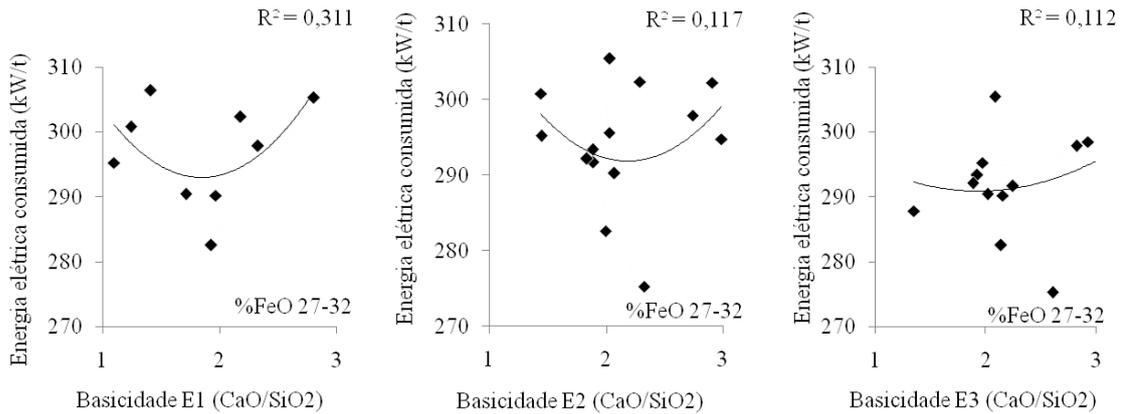


Figura 4.13 Energia elétrica consumida pela basicidade binária para cada amostra retirada, com faixa de FeO fixo (27-32%).

Fixando uma faixa do teor de FeO, pode-se notar uma maior relação entre os dados. Corridas com teores de FeO aproximados na escória podem apresentar características semelhantes.

Através da energia consumida encontrou-se uma faixa de basicidade no qual se tem o menor gasto energético, fez-se então um gráfico para analisar o comportamento do índice de espumação para esta faixa, Figura 4.14, nela foram utilizados dados das três amostras de escória retiradas (E1, E2, E3).

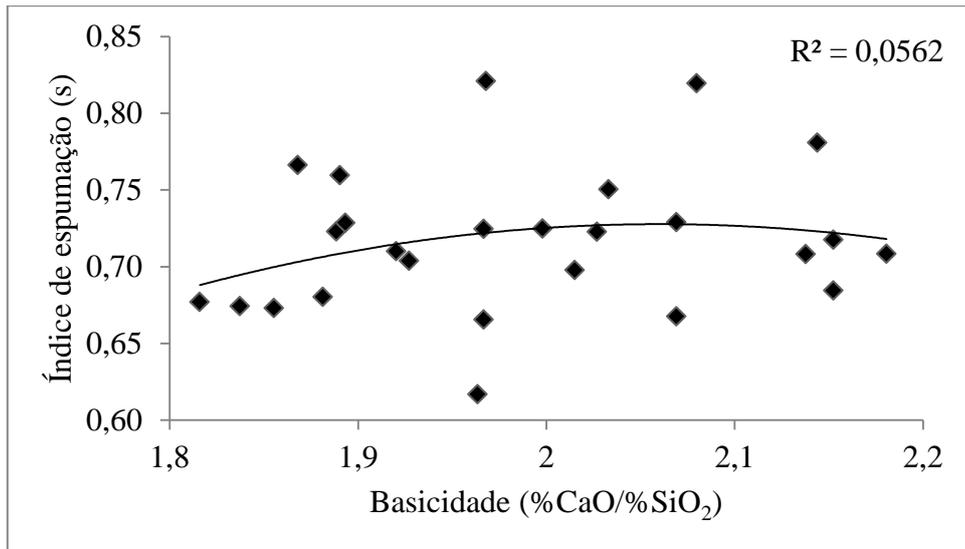


Figura 4.14 Basicidade pelo índice de espumação para a faixa de basicidade ótima.

Nota-se que para esta faixa o índice de espumação tem valor máximo quando a basicidade está entre 1,9 e 2,0, indicando que nesta basicidade deve-se ter uma espumação de melhor qualidade. A tentativa de fixar os teores de FeO para essa faixa de basicidade ótima foi feita, mas não se obteve resultados promissores, pelo fato de que a quantidade de amostras se tornou insuficiente para que se pudesse chegar a alguma conclusão.

Foram feitos gráficos de gasto energético em relação a composição química, na Figura 4.15, se tem o teor de MgO pela energia elétrica consumida, para as três amostras retiradas.

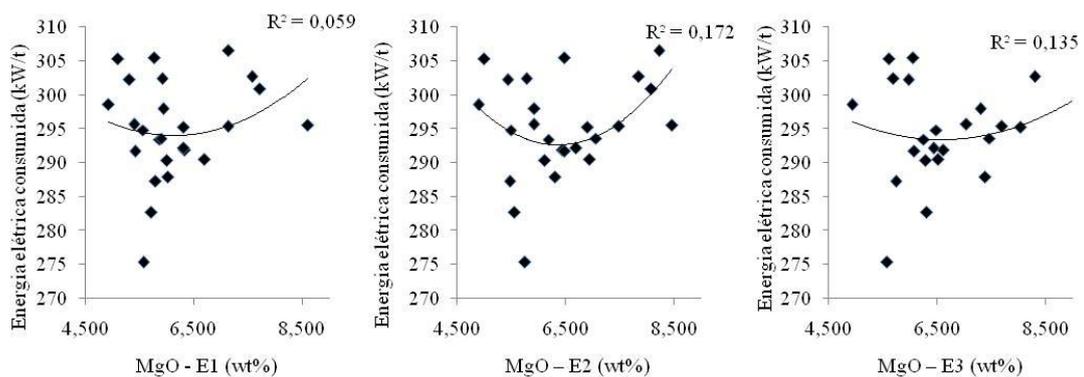


Figura 4.15 Teor de MgO pela energia elétrica consumida, feitos para cada amostra retirada.

Os teores ótimos de MgO resultam em um menor gasto energético, foi encontrado uma faixa para o teor de MgO de 6,0 a 6,5%.

A Figura 4.16 mostra o comportamento do índice de espumação para a faixa de MgO que resultou em um menor gasto energético, mostrando assim um teor de MgO ótimo próximo de 6,1 %, foram utilizados os dados das três amostras retiradas (E1, E2, E3).

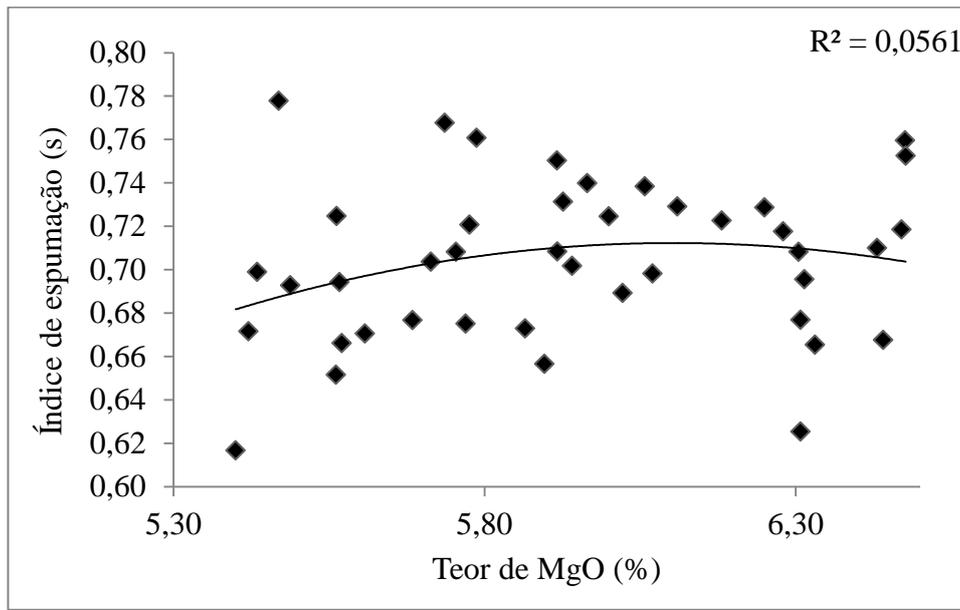


Figura 4.16 Teor de MgO pelo índice de espumação para faixa de MgO ótimo.

O teor de MgO ótimo encontrado deve ter ocorrido por causa do teor necessário para a saturação do mesmo.

A Figura 4.17 mostra o teor de MgO pela basicidade, para dois casos, o da saturação e das amostras analisadas.

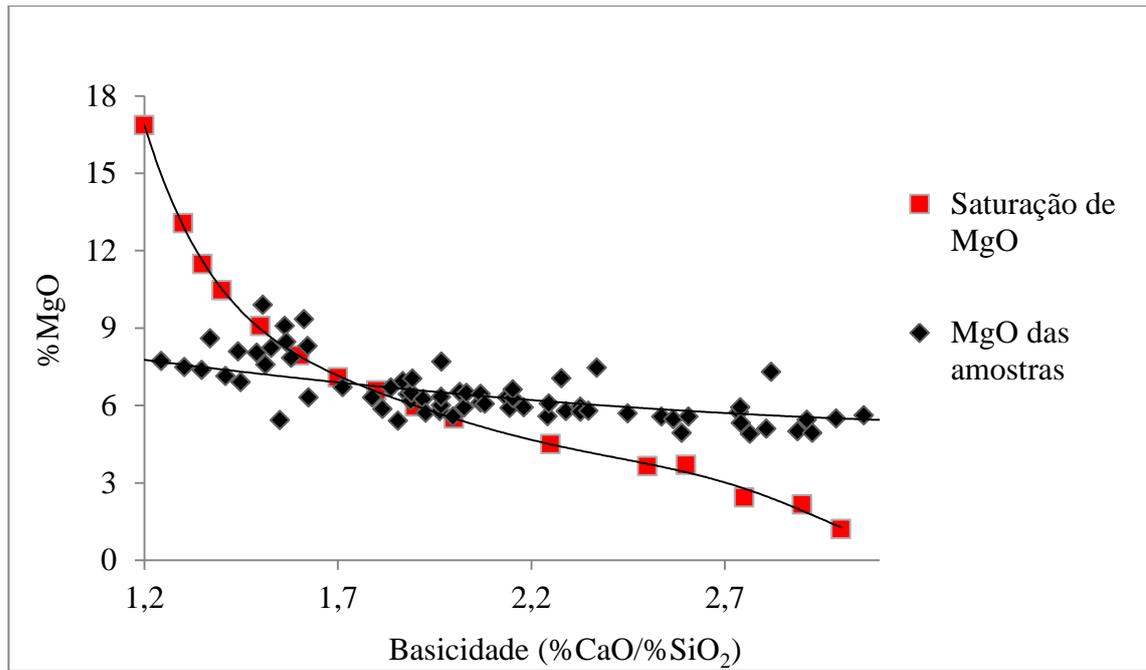


Figura 4.17 Teor de MgO de saturação pela basicidade e do teor do MgO nas amostras pela basicidade.

Levando-se em consideração que a faixa de basicidade encontrada foi entre 1,8 e 2,2 e que o teor de MgO, entre 6,0% e 6,5%, corresponde aos locais onde a escória está saturada em MgO, mas não o suficiente para que houvesse uma super saturação. Este fato é benéfico, pois como citado anteriormente, se a escória tiver um excesso de partículas de segunda fase, ela se torna muito ‘dura’, o que prejudica a espumação. Os valores de MgO de saturação foram obtidos pelo software FactSage 6.4.

A Figura 4.18, mostra o teor de FeO pela energia elétrica consumida.

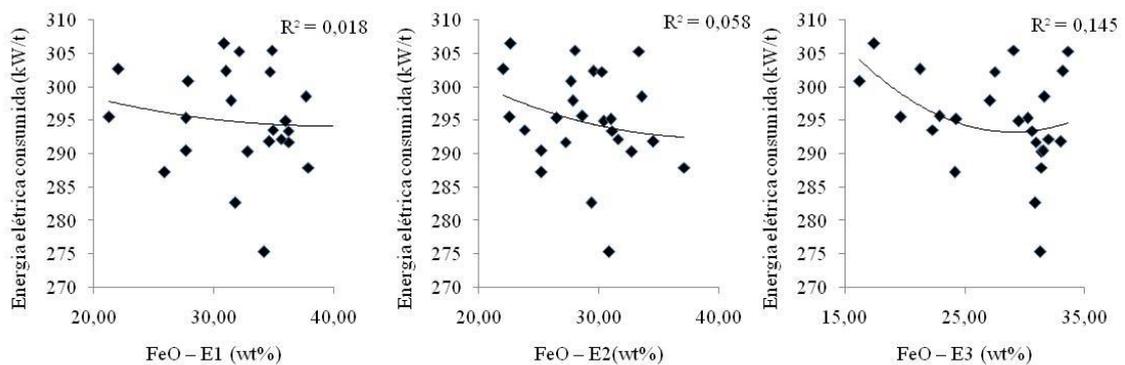


Figura 4.18 Teor de FeO pela energia elétrica consumida.

Para as duas primeiras amostras (E1, E2), não foi encontrado um teor ótimo de FeO. Mas para a última amostra retirada, E3, encontrou-se um teor ótimo de FeO em torno de 29%. Se for fixada a basicidade para este caso, não se terá um resultado esperado, devido à quantidade insuficiente de amostras.

Na Figura 4.19 apresenta um comportamento esperado, quanto maior o índice de espumação, menor a energia elétrica necessária para a produção da corrida.

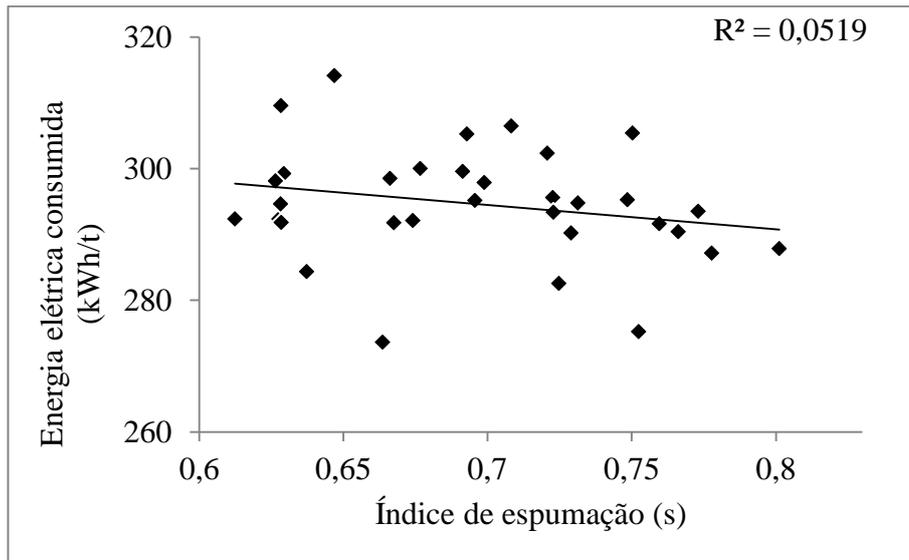


Figura 4.19 Energia elétrica consumida com relação ao índice de espumação.

Novamente fixou-se a faixa de FeO, conforme Figura 4.20.

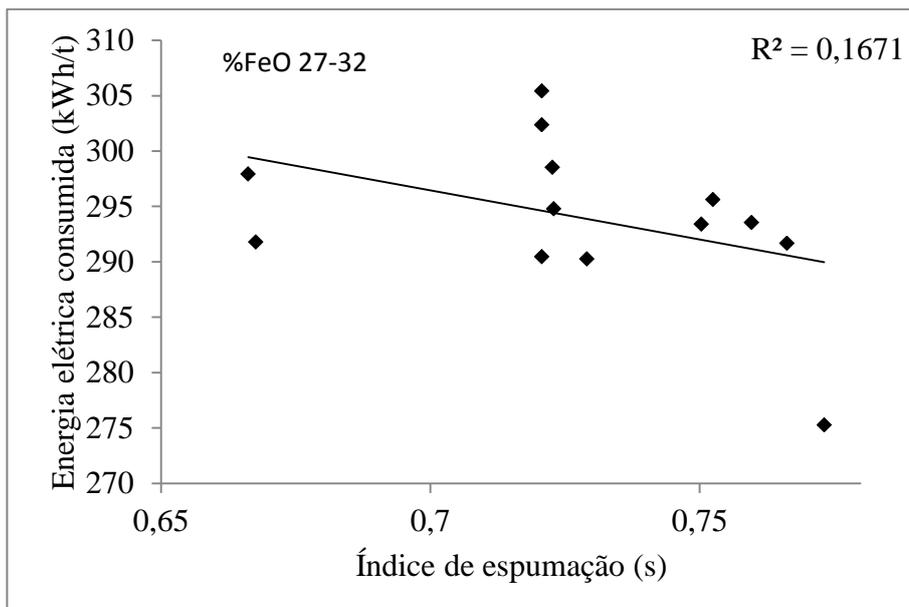


Figura 4.20 Energia elétrica consumida com relação ao índice de espumação, considerando %FeO entre 27-32.

Com uma relação maior entre os dados, devido uma maior semelhança entre as corridas.

Para continuar o estudo fez-se primeiramente o gráfico do índice de espumação pelo desvio padrão da tensão do arco, ver Figura 4.21.

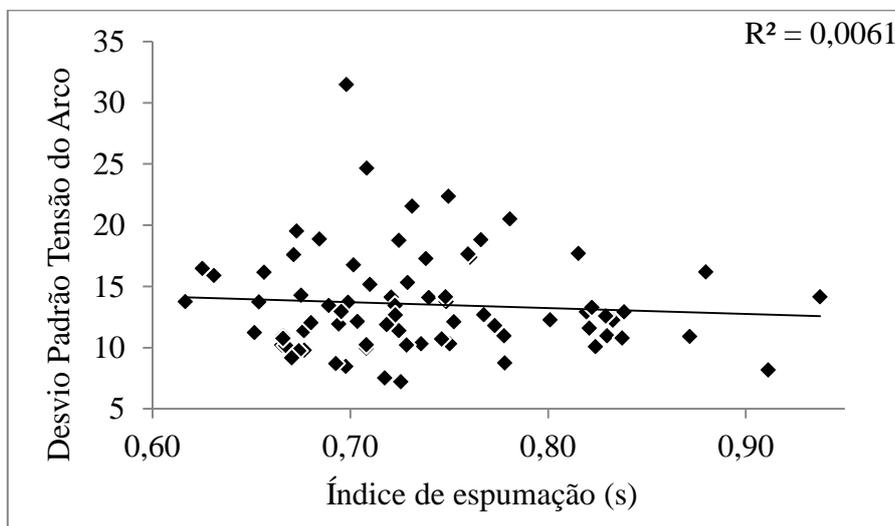


Figura 4.21 Desvio padrão da tensão do arco pelo índice de espumação.

Nela vê-se o comportamento esperado, quanto maior o índice de espumação menor o desvio padrão da tensão, mesmo com uma relação baixa, pois foram consideradas as 75 amostras de escória, que mostram grande dispersão nas variáveis avaliadas até o momento, por pertencerem a padrões diferentes de carga.

A relação entre o desvio padrão da tensão e a faixa ótima de basicidade foi analisada, indicando que existe uma basicidade no qual o desvio padrão da tensão tem menores valores, Figura 4.22.

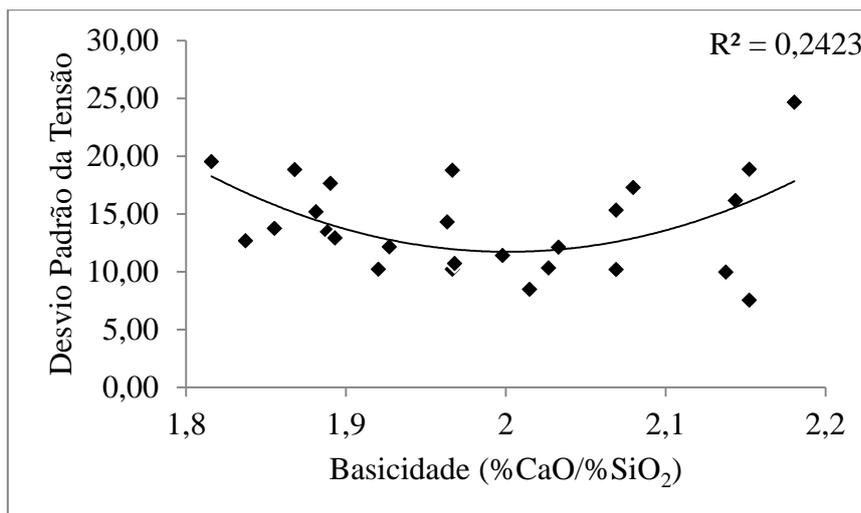


Figura 4.22 Basicidade pelo desvio padrão da tensão.

Na Figura 4.23 e Figura 4.24, foram feitos os gráficos de desvio padrão dos harmônicos pelo índice de espumação e pela basicidade, respectivamente.

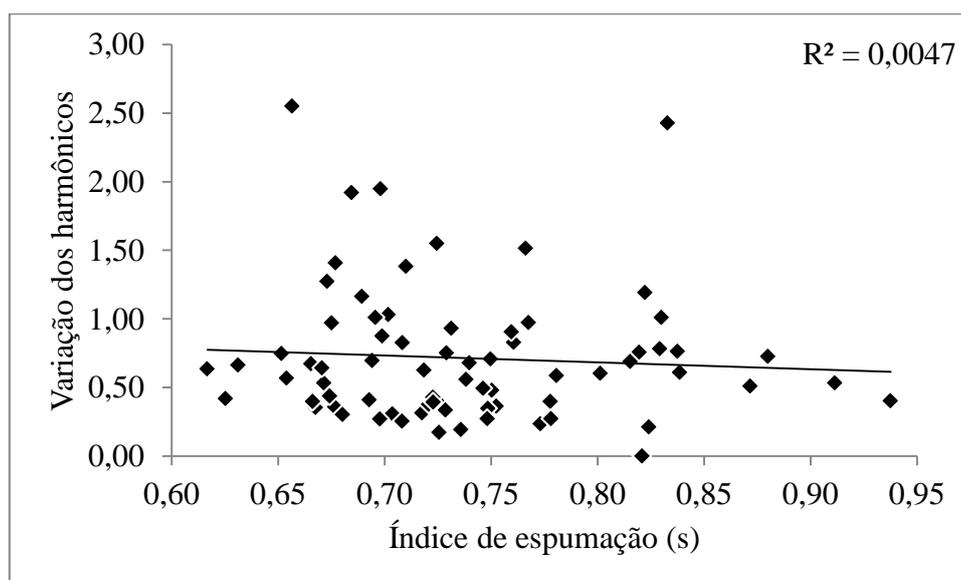


Figura 4.23 Índice de espumação pela variação dos harmônicos.

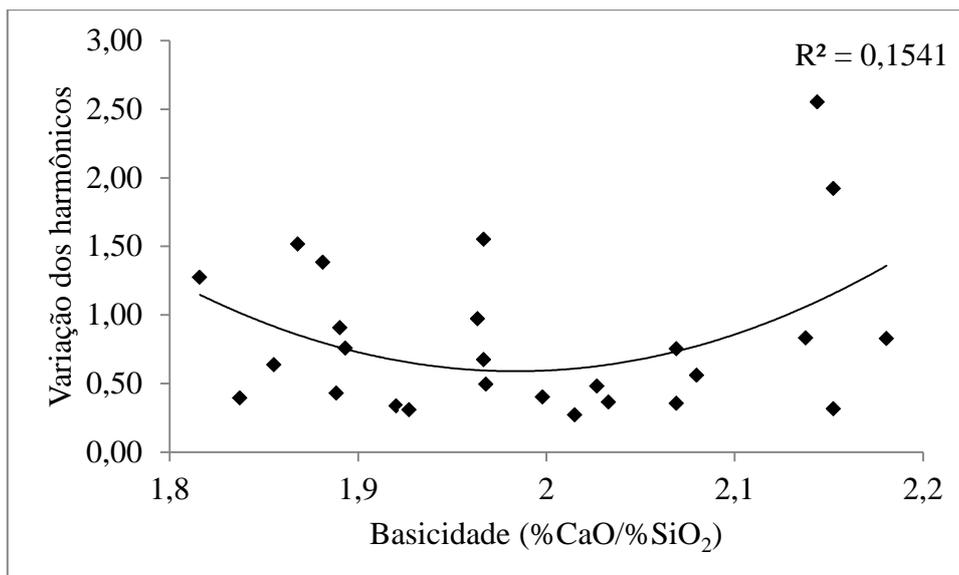


Figura 4.24 Variação dos harmônicos pela basicidade.

Os gráficos mostram que existe uma tendência que relaciona a instabilidade da espumação com as THDs, e uma faixa ótima de basicidade.

Quanto maior a variação dos harmônicos maior a variação sofrida pela tensão do arco. A Figura 4.25 mostra essa relação. Apesar de mostrar a tendência esperada, se observa uma grande dispersão dos pontos, comprovado pelo R^2 muito baixo.

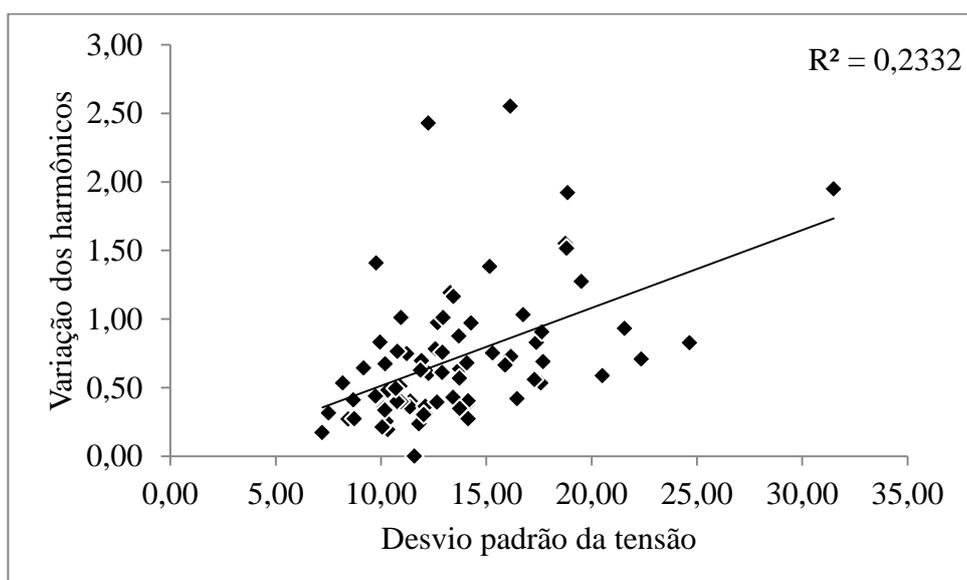


Figura 4.25 Variação dos harmônicos pelo desvio padrão da tensão.

5 CONCLUSÕES

Pelas análises das composições químicas das amostras nota-se que a composição química da escória varia bastante com o decorrer do processo, e que determinados óxidos mostram uma tendência de comportamento.

O MgO não mostra teores constantes na escória.

As médias dos valores de FeO se encontram em uma faixa de 27 a 32% na escória. No entanto, existem amostras E3 (final da etapa de refino) que apresentam teores acima de 33% de FeO.

O MnO e FeO são óxidos que apresentam similaridade no comportamento.

Foi observado um aumento do teor de MgO de 11,3%, e do teor de CaO de 19%, entre a E3 e a E1.

A viscosidade efetiva mostrou uma dependência linear dos teores de FeO, MgO e MnO.

A faixa de MgO ótima presente nas amostras de escória está entre 6 e 6,5 (% em massa), para um menor consumo de energia elétrica.

O índice de espumação apresentou uma relação linear com a viscosidade.

A escória apresentou uma faixa de basicidade ótima de 1,8-2,2, para um menor consumo de energia elétrica, e uma menor variação na tensão do arco.

O teor de FeO que proporcionou um menor consumo de energia elétrica foi encontrado na amostra E3, e o valor de 29%.

A energia elétrica consumida, o desvio padrão de tensão do arco e o desvio das THDs mostraram uma relação linear com o índice de espumação.

Coefficientes de determinação que apresentaram baixos valores atestam a necessidade de isolar o padrão de carga fria e obter uma maior amostragem, para que os parâmetros analisados apresentem melhor relação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar a metodologia deste trabalho para outros padrões de carga fria, considerando alguns fatores importantes como: Teores de fósforo máximo, tempo de refino e qualidade da carga metálica;
- Elaborar um estudo da escória espumante utilizando apenas valores de consumo de energia elétrica durante o refino da corrida;
- Aprofundar este estudo desenvolvendo um sistema acústico que monitore a quantidade de ruídos durante o refino, para avaliar a qualidade da escória espumante;
- Utilizar os resultados já obtidos para relacionar os diagramas ISD's de cada escória analisada.

7 REFERÊNCIAS

- AMINORROAYA, S. **The Effect of Foamy Slag in the Electric Arc Furnaces on Electric Energy Consumption**. European Electric Steelmaking, 2002.
- ARAUJO, L.A. **Manual de Siderurgia**. Ed. Arte e Ciência, 2009.
- ÁVILA, T. **Condicionamento de escórias em fornp elétrico a arco para a otimização das condições de refino da escória e refino do aço**. Dissertação, Minas Gerais, 2011.
- BARKER, J. K. **The Making, Shaping and Treating of Steel**, 11th Edition Steelmaking and Refining Volume. Ed. The AISE Steel Foundation, 1998.
- BENNETT, J. **Thermodynamic studies of MgO saturated EAFslag**. Ironmaking and Steelmaking, Vol 37,2010.
- BIELEFELDT, W. V. **Treinamento GERDAU: Fundamentos de Escórias**, 2012.
- BOWMAN, B. **Arc Furnace Physics**.Stahleisen, 2009.
- CANDIDO M. R. **Aplicação da transformada Wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco**. Dissertação, São Paulo, 2008.
- CONSTANTIN, N. **Refining Steels Produced in Electric Arc Furnace**. Series B, Vol. 75, Iss.2, 2013.
- DEHKORDI, B. M. **Predicting Foaming Slag Quality in Electric ArcFurnace Using Power Quality Indices and Fuzzy Method**. IEEE, Vol. 60, N. 12, Dezembro, 2011.
- FIGUEIRA, R. M. F. **Operação de Forno Elétrico a Arco**.São Paulo: Gerdau, 2007.
- GANDHARE W. Z. **Analyzing Electric Power Quality in Arc Furnaces**. ICREPQ, 2007.
- ITO K. **Study on the Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags**.Vol 20 b, 1989.
- LIBORIO, Alexandre. **Melhoria no Desempenho de Injetores Supersônicos em Operação em um Forno Elétrico a Arco**. Dissertação. PPGEM: UFRGS, 2009.
- LUZ, A. P. **Slag Foaming: Fundamentals, Experimental Evaluation and Application in the Steelmaking Industry**. Refractories, World Forum, 2010.
- MORITA, K. **Treatise on Process Metallurgy**,Vol 1. Process Fundamentals, 2014.
- PARSAPOOR, A. **Predicting Foaming Slag Quality in Electric Arc Furnace Using Power Quality Indices and ANFIS**. IEEE, Iran, 2010.

PAULINO, M. A. et al. **Estudo da Escória Espumante em Forno Elétrico a Arco**. ABM, São Paulo, 2014a.

PAULINO, M.A. et al. **Obtenção de Escória Espumante em Forno Elétrico a Arco: Determinação das Composições para o Sistema CSMF**. ABM, 2014b.

PRETORIUS E. B. **Foamy Slag Fundamentals and Their Practical Application to Electric Furnace Steelmaking**, Baker Refractories, 1998.

PRIBYL, M. **Influence of the Slag Foaming Process Applied in High Alloyed Steel Production on Refractory Wear of EAF at Pilsen Steel Melt Shop**. UNITECR, Brasil, 2009.

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

SEDIVY, C. **Tools forFoaming Slag operation at EAF Steelmaking**. Issue 2, Vol 53, Austria, 2008.

SILVA, A. C. **Aços e ligas especiais**. Ed. Blucher, p. 1, 2011.

SINUS. **Quality on Electric Power**. <http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/>. Acessado em: Outubro/2014.

SKUPIEN, D. **The Surface Tensions and Foaming Behavior of Melts in the System CaO-FeO-SiO₂**. Metallurgical and Materials Transactions, Vol 31B, 2000.

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

URQUIZA J. A. **Hornos de Arco para Fusion de Acero**. Ed. EVE, 1998.

ZHU, T. X. **Progress in Slag Foaming in Metallurgical Processes**. Vol 43B, Agosto, 2012.