

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

ESTUDO DE ESCÓRIAS DE REFINO PRIMÁRIO DE AÇOS COM VISTAS A
REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO

Rodolfo Arnaldo Montecinos de Almeida

Porto Alegre
2016

RODOLFO ARNALDO MONTECINOS DE ALMEIDA

ESTUDO DE ESCÓRIAS DE REFINO PRIMÁRIO DE AÇOS COM VISTAS A
REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto Alegre
2016

RODOLFO ARNALDO MONTECINOS DE ALMEIDA

ESTUDO DE ESCÓRIAS DE REFINO PRIMÁRIO DE AÇOS COM VISTAS A
REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Aprovado em: 29/02/2016

Banca Examinadora:

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

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

Dr. Julio Aníbal Morales Pereira – LaSid/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

Ao professor Wagner Viana Bielefeldt pela orientação e pela confiança.

Ao Laboratório de Siderurgia - LaSid pela oportunidade e infraestrutura.

A colega Deisi Vieira por toda ajuda e apoio.

A equipe de bolsistas de iniciação científica, em especial à Mariana Boger Netto.

Aos demais colegas do Laboratório de Siderurgia, Vinícius Cardoso e Julio Morales pelas conversas e momentos de descontração.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado.

A minha família pelo carinho e incentivo.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho.

As demais pessoas que fizeram destes dois anos mais prazerosos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1. ESCÓRIAS.....	3
2.1.1. Escórias de Forno Elétrico a Arco	5
2.1.2. Composição de óxidos	5
2.2. ESCÓRIA ESPUMANTE.....	7
2.2.1. Formação da Escória Espumante.....	8
2.2.2. Carburantes e injeção de oxigênio	10
2.2.3. Índice de espumação.....	12
2.2.4. Influência da viscosidade.....	15
2.2.5. Influência da Basicidade.....	16
2.2.6. Influência do FeO	17
2.2.7. Saturação de MgO.....	19
2.2.8. Influência da velocidade superficial de gás	25
2.3. PARÂMETROS ELÉTRICOS DO FEA.....	26
2.3.1. Energias no FEA.....	27
2.3.2. Distorção Harmônica de Onda de Tensão.....	29
2.3.3. Efeitos da escória na estabilidade do arco	30
2.4. QUALIDADE DA ESPUMAÇÃO.....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1. ANÁLISE DA SATURAÇÃO DE MgO	35
3.1.1. Equipamentos.....	35
3.1.2. Metodologia	36
3.2. ANÁLISE DOS DADOS INDUSTRIAIS.....	38
3.2.1. Recebimento dos dados industriais.....	38
3.2.2. Análise dos dados	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. SATURAÇÃO DE MgO	44

4.1.1.	Efeitos da basicidade binária e do teor de FeO.....	44
4.1.2.	Efeito da temperatura	45
4.1.3.	Efeito do teor de Al ₂ O ₃	46
4.2.	ANÁLISE DOS DADOS INDUSTRIAIS	55
4.2.1.	Composição química e tempos de processo	55
4.2.2.	ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA NO REFINO	57
4.2.3.	PARÂMETROS ELÉTRICOS	65
5.	CONCLUSÕES.....	70
6.	TRABALHOS FUTUROS.....	72
7.	REFERÊNCIAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema mostrando a formação da escória espumante. Fonte: (VIEIRA, 2014).	9
Figura 2: Altura da espuma para a) grafite, b) char betuminoso e c) char antracito como função do tempo, para diferentes teores de FeO (1600°C). Fonte: (CORBARI et al, 2009).	11
Figura 3: Relação entre altura da escória e velocidade superficial do gás para vários diâmetros de cadinho. Fonte: (ITO; FRUEHAN, 1989a).	12
Figura 4: Relação entre o índice de espumação e a viscosidade efetiva. Fonte: (PRETORIUS; CARLISLE, 1998).	15
Figura 5: Influência da razão de %CaO/%SiO ₂ na viscosidade, em a) escórias ácidas e b) escórias básicas. Fonte: (COUDURIER; HOPKINS; WILKOMIRKY, 1978).	16
Figura 6: Viscosidades de escórias CaO-SiO ₂ -FeO a 1550°C - calculado pelo modelo de Urbain. Com uma linha de isobasicidade B ₂ =1. Fonte (GHAG; HAYES; LESS, 1998).	18
Figura 7: Relação entre a altura da escória com o tempo para diferentes teores de FeO, temperatura de 1550°C. Fonte (CORBARI et al, 2009).	18
Figura 8: Relação entre altura da escória e a energia elétrica consumida. Fonte (AMINORRAYA, EDRIS, 2002).	19
Figura 9: Diagrama de Saturação Isotérmico genérico. Fonte (PRETORIUS; CARLISLE, 1998).	20
Figura 10: ISD mostrando a diferenças dos campos para as temperaturas de 1600°C e 1700°C, para a B ₃ =2,0. Fonte: (PRETORIUS, 2002).	21
Figura 11: Diagramas de saturação isotérmicos para diferentes basicidades (a) B ₃ =2,0;(b) B ₃ =2,5; (c) B ₃ =3,0, temperatura de 1600°C. Fonte: (PRETORIUS; CARLISLE, 1998).	22
Figura 12: Diagramas de saturação isotérmicos para diferentes basicidades (a) B ₂ =2,0;(b) B ₂ =2,5; (c) B ₂ =3,0, L= escória líquida, temperatura de 1600°C (Paulino et al. 2014).	24
Figura 13: Velocidade superficial do gás pela fração de vazios para sistemas espumantes e não espumantes. Fonte: (GOU; IRONS; LU, 1996).	25
Figura 14: Transformação da energia de uma linha de alta voltagem para um forno elétrico a arco. Fonte: (JONES; BOWMAN; LEFRANK, 1998).	28
Figura 15: 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/ .	29
Figura 16: Distorção harmônica total (THD) da tensão, durante três corridas. Fonte: (GANDHARE; LULEKAR, 2007).	31
Figura 17: 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: (SEDIVY; KRUMP, 2008).	32
Figura 18: Gráfico da altura da escória pelo tempo de processo, comparação entre os resultados previstos e os dados obtidos. Fonte: (WILSON; KARR; BANNETT, 2004).	33
Figura 19: Diferenças no sensor de movimento entre:(a) escória não espumante, (b) intervalo e (c) escória espumante. Fonte: (JEONG; BAN; KIM, 2010).	34
Figura 20: Previsão da qualidade da escória pelo ANFIS. Fonte: (DEHKRDI; MOALLEM; PARSAPoor, 2011).	34

Figura 21: Tela de abertura do <i>software FactSage 6.4</i> , mostrando os diferentes módulos do programa.	35
Figura 22: Banco de dados do <i>software FactSage 6.4</i>	36
Figura 23: Diagrama esquemático da metodologia utilizada na análise da saturação de MgO.	37
Figura 24: Fluxograma mostrando a metodologia utilizada na análise dos dados industriais.	39
Figura 25: Modelo indicando a localização das 3 fases e das injetoras no FEA. (FAVARETTO, 2014)	41
Figura 26: Fluxograma mostrando o cálculo da viscosidade efetiva da escória.....	42
Figura 27: Efeito da basicidade no teor e saturação de MgO, para diferentes teores de FeO a 1600 °C, calculado no <i>FactSage 6.4</i>	44
Figura 28: Gráfico do teor de MgO para saturação pela basicidade binária para as temperaturas de 1500 °C, 1550 °C, 1600 °C e 1650 °C e FeO de 30% em massa. .	45
Figura 29: Diagrama pseudo-ternário CaO-SiO ₂ -FeO, com 5% de MgO, 0% de Al ₂ O ₃ e T = 1600°C. Com indicação dos pontos A - ponto de dupla saturação, B - ponto de saturação de (Mg,Fe)O puro e C – ponto de saturação de C ₂ S puro.....	47
Figura 30: Diagrama pseudo-ternário CaO-SiO ₂ -FeO com 5% de Al ₂ O ₃ e 5% de MgO e T = 1600°C. Com indicação dos pontos A - ponto de dupla saturação, B - ponto de saturação de (Mg,Fe)O puro e C – ponto de saturação de C ₂ S puro.....	47
Figura 31: Diagrama pseudo-ternário CaO-SiO ₂ -FeO com 8% de Al ₂ O ₃ e 5% de MgO e T = 1600°C. Com indicação dos pontos A - ponto de dupla saturação, B - ponto de saturação de (Mg,Fe)O puro e C – ponto de saturação de C ₂ S puro.....	48
Figura 32: Sobreposição dos diagramas pseudo-ternários com 0%, 5% e 8% de Al ₂ O ₃ e 5% de MgO.....	49
Figura 33: Diagrama de saturação isotérmico B ₂ =2,15 e T = 1600°C.....	51
Figura 34: Diagrama de saturação isotérmico B ₂ =2,5, 5% de Al ₂ O ₃ e T=1600°C.	51
Figura 35: Diagrama de saturação isotérmico com B ₂ =2,78, 8% de Al ₂ O ₃ e T=1600°C.	52
Figura 36: Diagramas de saturação isotérmicos para diferentes basicidades binárias, linhas vermelhas diagramas feitos sem a presença de Al ₂ O ₃ , linhas pretas, diagramas feitos considerando a presença de 5% de Al ₂ O ₃ e linhas azuis considerando a presença de 8% de Al ₂ O ₃ , T = 1600°C. (a) basicidade binária 1,5; (b) basicidade binária 2,0; (c) basicidade binária 2,5; (d) basicidade binária 3,0.	54
Figura 37: Histograma dos diferentes óxidos e da basicidade das amostras de escória.....	56
Figura 38: Histograma dos tempos de processo ocorridos durante o refino.	57
Figura 39: Energia elétrica consumida com relação ao teor de FeO.....	59
Figura 40: Energia elétrica consumida no refino pela basicidade binária para corridas com FeO entre 27,5 e 30 %	60
Figura 41: Variação da energia elétrica consumida no refino pela basicidade.....	61
Figura 42: Energia elétrica consumida em função do teor de FeO para B ₂ =3,0 – 3,2.	63
Figura 43: Diagrama de saturação isotérmico com 5,5 % de Al ₂ O ₃ , B ₂ =2,1 e T=1600°C.....	64
Figura 44: Diagrama de saturação isotérmico com 6,5% de Al ₂ O ₃ , B ₂ =2,4 e T=1600°C.....	64
Figura 45: Diagrama de saturação isotérmico com 5,5% de Al ₂ O ₃ , B ₂ =3,0 e T=1600°C.....	64

Figura 46: Variação dos harmônicos pelo desvio padrão da tensão para as 3 fases.	66
Figura 47: Gráficos do teor de FeO pelo desvio padrão dos THD's, para o FeO entre 25 e 35 % e basicidade entre 2,4 e 3,2, para as 3 fases.....	67
Figura 48: Relação entre a energia elétrica consumida e o desvio padrão do THD, para as 3 fases.....	68
Figura 49: Desvio padrão do THD e o índice de espumação.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química de escórias de diferentes processos siderúrgicos, percentual em massa. (Fonte: http://www.slg.jp/e/slag/character.html). .4	
Tabela 2: Principais óxidos presentes em escórias de FEA. Valor % em massa. Fonte: (BIELEFELDT, 2012).	5
Tabela 3: Principais óxidos presentes em escórias de FEA. Valor % em massa. Fonte (BIELEFELDT, 2012). Continuação.	6
Tabela 4: Composição química de diferentes fontes de carbono. Fonte: (NUNES, 2014; Corbari et al, 2009).....	10
Tabela 5: Composição química de escórias saturadas em MgO para 1600°C. Fonte: (PRETORIUS, 2002).	20
Tabela 6: Composição química dos pontos de dupla saturação (ponto A) para as escórias com a) 0% de Al ₂ O ₃ , b) 5% de Al ₂ O ₃ e c) 8% de Al ₂ O ₃ . Valores em % de massa.....	50
Tabela 7: Comparação dos valores do ponto de dupla saturação dos ternários com 0, 5 e 8 % de Al ₂ O ₃ e seus respectivos ISD's. Valores em % de massa.	52
Tabela 8: Energia elétrica mínima consumida e energia elétrica máxima consumida no refino para as faixas de FeO.	58
Tabela 9: Energia mínima consumida e energia máxima consumida para as faixas de basicidade.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Al – alumínio dissolvido no aço

ANFIS – *Adaptive Neuro Fuzzy Interference System*

B₂ – basicidade binária

B₃ – basicidade ternária

BOF – *Blast Oxigen Furnace*

C – carbono dissolvido no aço

CA – corrente alternada

C₂S – 2CaO·SiO₂

C₃S – 3CaO·SiO₂

D_b – diâmetro de bolha

E_{ff} – elasticidade efetiva do filme líquido

Fe – ferro dissolvido no aço

FEA – forno elétrico a arco

FP – forno-panela

g – constante gravitacional

ISD – diagrama de saturação isotérmico

LaSid – Laboratório de Siderurgia

η – viscosidade da escória fundida (Pa.s)

η_e – viscosidade efetiva da escória (Pa.s)

O – oxigênio dissolvido no aço

Si – silício dissolvido no aço

T – temperatura (K ou °C)

THD – *Total Harmonic Distortion* (distorção harmônica total)

THD_v – *Total Voltage Harmonic Distortion* (distorção harmônica total de tensão)

T_{refino} - tempo de refino (min)

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

x_i – fração molar

(FeO) – FeO presente na escória

(C) – carbono presente na escória

Σ – índice de espumação

ΔH – variação na altura da escória

ΔV_g^s – variação da velocidade superficial

μ – viscosidade (Pa.s)

γ – tensão superficial (N.m^{-1})

ρ – densidade do líquido (kg.m^{-3})

θ – fração de fases sólidas precipitadas

σ – tensão superficial (N/m)

σ_i – tensão superficial dos componentes puros (N/m)

RESUMO

As indústrias siderúrgicas almejam aliar a máxima produtividade com um menor custo, neste contexto, no processo de produção de aço em uma aciaria elétrica uma série de fatores necessita de um melhor entendimento para alcançar as metas exigidas (máxima produtividade e menor custo). Um destes fatores que tem efeito direto sobre os custos é a escória espumante no refino primário, que além de favorecer o rendimento metálico, melhora a eficiência energética do FEA. O objetivo geral do presente trabalho é estudar as escórias de refino primário visando a redução do consumo energético, avaliando a espumação e os diferentes parâmetros que a afetam, utilizando a termodinâmica computacional (*software FactSage 6.4*) e dados industriais. A metodologia desenvolvida buscou especificamente: a) avaliar a saturação de MgO para o sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ através da termodinâmica computacional; e para os dados industriais: b) encontrar relações entre a composição química da escória e o consumo de energia elétrica; c) utilizar os diagramas de saturação isotérmicos (ISD's) para avaliar o consumo de energia elétrica, avaliando a posição das corridas analisadas; d) encontrar relações entre os harmônicos de tensão e o consumo de energia elétrica; e) encontrar relações entre os harmônicos de tensão e a composição química da escória. Com relação à análise dos dados obtidos, pode-se concluir que: 1) a análise de saturação de MgO realizada no programa *FactSage 6.4* apresentou os resultados esperados com relação à variação de composição química, a comparação entre os diagramas ternários e ISD's; 2) o menor gasto de energia elétrica foi encontrado para as seguintes faixas de composição química: FeO entre 27,5 e 30% em massa, basicidade binária entre 3,0 e 3,2, MgO entre 5,5 e 6,5% em massa; 3) os ISD's podem ser utilizados para a análise do consumo energético; 4) o teor de FeO de menor desvio padrão dos harmônicos foi de 29%; 5) quanto maior a variação dos THD_v's (distorção harmônica total de tensão), maior o gasto energético.

ABSTRACT

Steelmaking industries aim to combine maximum productivity with a lower cost, in this context, in the steel production process in an electric steel plant a number of factors needs a better understanding to achieve the required goals (maximum productivity and lower cost). One of these factors that have a direct effect on costs is the foamy slag in the primary refining, which in addition to promoting the metal yield improves the energy efficiency of FEA. The overall objective of this work is to study the primary refining slag aimed at reducing energy consumption, evaluating the foaming and the different parameters affecting it, using computational thermodynamics (FactSage 6.4 software) and industrial data. The methodology consisted of: a) evaluate the MgO saturation for the CaO-SiO₂-FeO-Al₂O₃-MgO system by computational thermodynamics; and with industrial data: b) find relationships between the chemical composition of the slag and the consumption of electricity; c) use the isothermal saturation diagrams (ISD) to assess the energy consumption, evaluating the position of the analyzed heat; d) find relationships between the voltage harmonics and power consumption; e) find relationships between the voltage harmonics and the chemical composition of the slag. Regarding the analysis of the data, it can be concluded that: 1) the MgO saturation analysis in FactSage 6.4 program presented the results expected in relation to the variation in chemical composition, the comparison between the ternary diagrams and ISD's; 2) the lowest power consumption was found for the following chemical composition ranges: FeO between 27.5 and 30%, binary basicity between 3.0 and 3.2, MgO 5,5 e 6,5%; 3) ISD's can be used for the analysis of energy consumption; 4) the FeO content of less harmonic standard deviation was 29%; 5) the greater the variation of THD's largest energy expenditure.

1. INTRODUÇÃO

Uma das maiores dificuldades que as indústrias siderúrgicas enfrentam nos últimos anos consiste em aliar a máxima produtividade com um menor custo. Para que isso possa ser alcançado, o conhecimento da metalurgia do processo é de suma importância.

Os fornos elétricos a arco (FEA's) são equipamentos amplamente utilizados na produção de aço, representando aproximadamente, um quarto de todo aço produzido no mundo, 26% (World Steel in Figures 2015).

Sabendo que os FEA's são um dos grandes consumidores de energia elétrica nas usinas siderúrgicas, indica que existe uma série de características deste processo que podem ser estudadas para a diminuição de custos.

Neste processo, uma etapa responsável por melhorar a eficiência energética, diminuindo os custos com energia elétrica dos fornos e aumentando a produtividade, é a escória espumante. A espumação da escória é responsável por uma série de benefícios para os fornos como: minimizar o *pick up* de nitrogênio, reduzir a intensidade de ruído, melhorar a estabilidade do arco elétrico e melhorar a transferência térmica.

Sabe-se que a espumação depende de fatores como: a composição química da escória, temperatura, quantidade de partículas sólidas, o padrão de carga fria (quantidade de cales adicionados) e as injeções de oxigênio e carbono. Por ter essa grande quantidade de variáveis, a espumação é normalmente avaliada pelo operador de maneira qualitativa, levando em consideração a cor da escória, velocidade com a qual ela sai pela porta de escória e os ruídos durante o processo. Mas já há produtos oferecidos no mercado que procuram associar variações de temperatura dos painéis refrigerados bem como integração com análise de vibração das partes refrigeradas.

O presente trabalho está dividido em duas etapas, a primeira delas é um estudo da saturação de MgO para escórias do sistema CaO-SiO₂-FeO-Al₂O₃-MgO utilizando a termodinâmica computacional (*software FactSage 6.4*), avaliando o efeito que os diferentes óxidos têm no teor de MgO para saturação.

A segunda parte corresponde a uma análise do consumo de energia elétrica de um FEA. Para isso trabalhou-se com dados de composição química de escórias

de um FEA e parâmetros elétricos como a energia elétrica consumida, tensão do arco elétrico e o total de harmônicos de tensão.

O objetivo geral do presente trabalho é estudar as escórias de refino primário de maneira quantitativa, avaliando a espumação e os diferentes parâmetros que a afetam.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar a saturação de MgO para o sistema de escórias CaO-SiO₂-FeO-Al₂O₃-MgO através da termodinâmica computacional;
- Analisar a espumação das escórias provenientes de uma usina siderúrgica;
- Investigar correlações entre composição química e o consumo de energia elétrica;
- Utilizar os diagramas de saturação isotérmicos para avaliar o consumo de energia elétrica;
- Encontrar relações entre o total de distorção harmônica e o consumo de energia elétrica;
- Avaliar o comportamento da distorção harmônica com relação à composição química da escória.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. ESCÓRIAS

As escórias são um subproduto do processo siderúrgico, que se separa do metal líquido por diferença de densidade. As escórias são tão complexas que existem diversas definições, como:

- Produto não metálico, que consiste essencialmente 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 Standarts 2016).
- Escórias fundidas são de natureza iônica, consistindo de íons positivos (cátions) e íons negativos (ânions) (TURKDOGAN 1996; TURKDOGAN; FRUEHAN, 1998).
- Escórias são soluções iônicas consistindo de óxidos metálicos e fluoretos que flutam sobre a superfície do aço líquido, completa ou parcialmente líquidas (ABM- Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais, 2007).

As escórias siderúrgicas são formadas principalmente por silício rodeados por 4 átomos de oxigênio, formando tetraedros. Esses tetraedros se juntam formando uma rede de silicatos.

Óxidos metálicos como CaO, FeO e MgO quando adicionados a sílica fundida, quebram as redes de silicatos, causando mudanças nas propriedades físicas da escória.

Existem diversas propriedades das escórias que podem ser medidas, ou calculadas através de modelos matemáticos, entre elas estão:

- Densidade;
- Viscosidade;
- Condutividade térmica;
- Condutividade elétrica;
- Tensão interfacial entre escória e metal.

Todas essas propriedades dependem principalmente da composição química e temperatura.

As escórias têm a sua composição química definida de acordo com o processo no qual está inserida. Assim escórias siderúrgicas são diferentes

dependendo da etapa/processo, por exemplo, escórias de refino primário, são diferentes de escórias de refino secundário (Tabela 1), isso ocorre pela necessidade de propriedades diferentes.

Tabela 1: Composição química de escórias de diferentes processos siderúrgicos. Percentual em massa. (Fonte: <http://www.slg.jp/e/slag/character.html>).

	FEA - Forno elétrico a arco (%)	FP – Forno- Panela (%)
CaO	25	55
SiO ₂	12	20
MgO	7	7,5
FeO	30	0,3
Al ₂ O ₃	7	15
MnO	7	1
P ₂ O ₅	0,5	0,1
S	0,2	0,4

Na Tabela 1, vê-se uma grande diferença entre as escórias, principalmente nos teores de CaO, FeO, Al₂O₃ e SiO₂. Isto ocorre pelas características dos refinamentos, nos casos de refino primário (FEA) o refino é oxidante, por isso tem-se um teor de FeO e MnO maiores, Al₂O₃ e SiO₂ menores se comparadas com o refino secundário (FP). Por se tratar de um refino redutor, o FP, tem valores baixos de FeO e MnO (indicativo de grande oxidação do banho líquido) e valores mais altos de Al₂O₃ e SiO₂ (utilizados na desoxidação do aço líquido).

Para encontrar mais informações sobre escórias ver as seguintes referências: (TURKDOGAN; FRUEHAN, 1998; SLAG ATLAS, 1995, ÁVILA, 2011; MILLS; KEENE, 1987; VAZ, 2011; BOWMAN; KRÜGER, 2009; GEIGER; POIRIER, 1973; SESSHARI et al, 2010; COUDURIER; HOPKINS; WILKOMIRSKY, 1978; SEETHARAMAN et al, 2013).

2.1.1. Escórias de Forno Elétrico a Arco

Como mostrado no final do item anterior, as escórias contêm diferentes composições químicas de acordo com a etapa/processo siderúrgico avaliado. Neste tema do trabalho, serão vistas apenas escórias de forno elétrico a arco (FEA).

As principais funções das escórias de FEA são (BOWMAN; KRÜGER, 2009):

- Desfosforar no refino primário;
- A espumação da escória melhora a eficiência térmica e diminui o tap-to-tap;
- Cobrir o arco elétrico e proteger os refratários;
- Melhorar a qualidade do aço absorvendo os produtos da desoxidação (e.g. SiO_2 , Al_2O_3);
- Proteger o metal da atmosfera (absorção de nitrogênio e hidrogênio, evitar a perda de calor);
- O *coating* nos painéis refrigerados é essencial para a redução de perda de calor.

2.1.2. Composição de óxidos

Como visto na Tabela 1, escórias de FEA para a produção de aços comuns são compostas principalmente por CaO , SiO_2 , MgO , FeO , Al_2O_3 e MnO . Estes óxidos vêm de diferentes fontes, conforme as Tabela 2 e 3.

Tabela 2: Principais óxidos presentes em escórias de FEA. Valor % em massa. Fonte: (BIELEFELDT, 2012).

Óxidos	Práticas mais usadas	Origem
CaO	Adicionado	<ul style="list-style-type: none">• Cal (93% CaO).• Dolomita ($\approx 58\% \text{CaO}$ e $39\% \text{MgO}$).• Cálcio-Aluminatos ($\approx 45\% \text{CaO}$ e $53\% \text{Al}_2\text{O}_3$).• Refratários dolomíticos.
MgO	Adicionado	<ul style="list-style-type: none">• Dolomita ($\approx 58\% \text{CaO}$ e $39\% \text{MgO}$).• Magnésia ($> 92\% \text{MgO}$).• Refratários magnesianos e dolomíticos.

Tabela 3: Principais óxidos presentes em escórias de FEA. Valor % em massa. Fonte (BIELEFELDT, 2012). Continuação.

SiO ₂	Do processo ou da carga	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidação do Si na carga ($\underline{\text{Si}} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$). • Desoxidação do aço ($2\underline{\text{O}} + \underline{\text{Si}} = \text{SiO}_2$). • Areia e terra. • Refratários sílico-aluminosos.
Al ₂ O ₃	Do processo ou adicionado (FP)	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidação da carga ($2\underline{\text{Al}} + 3/2\text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3$). • Desoxidação do aço ($3\underline{\text{O}} + 2\underline{\text{Al}} = \text{Al}_2\text{O}_3$). • Escória sintética Cálcio-Aluminatos ($\approx 45\%$ CaO e 53% Al₂O₃). • Escória sintética Bauxita ($> 80\%$ Al₂O₃). • Refratários (Alta alumina).
FeO	Processo no FEA	<ul style="list-style-type: none"> • Carga ($2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$).
MnO	Processo no FEA	<ul style="list-style-type: none"> • Carga ($2\text{Mn} + \text{O}_2 = 2\text{MnO}$). • Desoxidação do aço ($\text{Mn} + \text{O} = \text{MnO}$).

Pelas Tabela 2e 3, vê-se que no caso dos óxidos básicos, CaO e MgO, eles são adicionados ao forno. Estes óxidos são importantes por protegerem os revestimentos refratários, já que são constituídas por óxidos básicos (MgO, MgO-C), evitando o consumo excessivo dos refratários. Estes óxidos também são responsáveis pela desfosforação. Além disso, a saturação da escória com esses óxidos é essencial para uma boa espumação (PRETORIUS; CARLISLE, 1998).

Além de a escória ser saturada em CaO/MgO, é importante o controle do teor dos outros óxidos, pois eles afetam a solubilidade do CaO e do MgO. Assim, trocando-se SiO₂ por Al₂O₃ aumenta-se a solubilidade de CaO, mas diminui-se a solubilidade do MgO. Adicionalmente, aumentando-se o teor de FeO na escória diminui-se a solubilidade do MgO, porém, tem efeito irrelevante na solubilidade do CaO (PRETORIUS; CARLISLE, 1998).

É importante salientar que um excesso de óxidos refratários (CaO, MgO) pode aumentar a viscosidade efetiva da escória por formar partículas sólidas, melhorando assim a espumação. Já um excesso de óxidos fluxantes (FeO, SiO₂), faz com que a escória fique mais fluida, causando o ataque ao refratário e não sustentando a espumação (PAULINO, 2014).

Utilizando o teor/saturação de CaO e MgO, pode-se classificar as escórias de FEA como (PRETORIUS, 2002):

- Dura (*Crusty*) – Escória com alto teor de CaO e/ou MgO. Apresenta-se com alta fração de sólidos;
- Fofa (*Fluffy*) – Escória saturada em MgO e CaO, ideal para proteção dos refratários;
- Cremosa (*Creamy*) – Linha limite de saturação em CaO e MgO. Escória boa para proteção dos refratários;
- Líquida (*Watery*) – Escória muito líquida sem saturação de sólidos. Muito agressiva ao refratário.

Pelas descrições da classificação das escórias, nota-se que as escórias encrustadas e líquidas não seriam escórias indicadas para o processo. A primeira por ter partículas sólidas em excesso, prejudicando algumas etapas da produção como a espumação e a segunda por ser líquida, que causa o consumo excessivo do refratário. Assim, uma escória com a consistência dita “ideal”, seria classificada como esponjosa, pois protege o refratário, estando saturada em MgO/CaO, também sendo ótima para a espumação. Já a escória cremosa, é vantajosa se comparada com as escórias líquidas (já que ela protege o refratário) e duras (tem uma fração de sólidos menor), mas perde em qualidade para a escória esponjosa pela falta de partículas sólidas.

2.2. ESCÓRIA ESPUMANTE

Devido à importância da escória espumante para o processo ela será explicada detalhadamente neste capítulo. Iniciando pela formação da escória espumante, tipos de carburantes, os diferentes modelos matemáticos para prever a espumação, a influência das propriedades físicas, finalizando com o efeito da composição química e a influência da velocidade superficial do gás.

2.2.1. Formação da Escória Espumante

A formação da escória espumante pode ser dividida em 3 etapas, conforme Figura 1. A etapa 1, que é a injeção de O_2 no banho, a etapa 2 que consiste na injeção de carbono na escória, e a etapa 3 que é onde ocorre a injeção de carbono e de O_2 na escória.

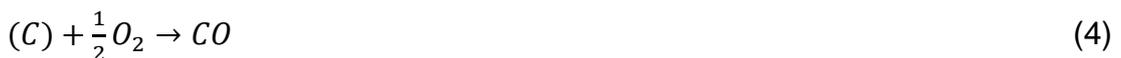
Inicialmente tem-se a injeção de oxigênio no metal fundido (etapa 1), este oxigênio reage com o carbono presente (equação 1), formando as bolhas de CO. O oxigênio reage também com o Fe presente no banho (equação 2).



Como ocorre a perda de Fe para a escória, é feita a injeção de carbono (etapa 2), realizando a reação de redução do FeO (equação 3), esta etapa é de extrema importância, não só por gerar mais gás CO, mas também por causar a recuperação do Fe de volta para o banho, melhorando o rendimento metálico do forno.



Na etapa 3, tem-se a injeção de oxigênio na escória, para que ocorra a oxidação do carbono presente na escória (equação 4). Nesta etapa também pode ser feita injetando-se carbono e oxigênio simultaneamente, tendo assim uma melhor geração de CO e com isso uma melhor espumação.



Em todas as reações mostradas:

\underline{X} = elemento presente no banho líquido;

(X) = elemento presente na escória.

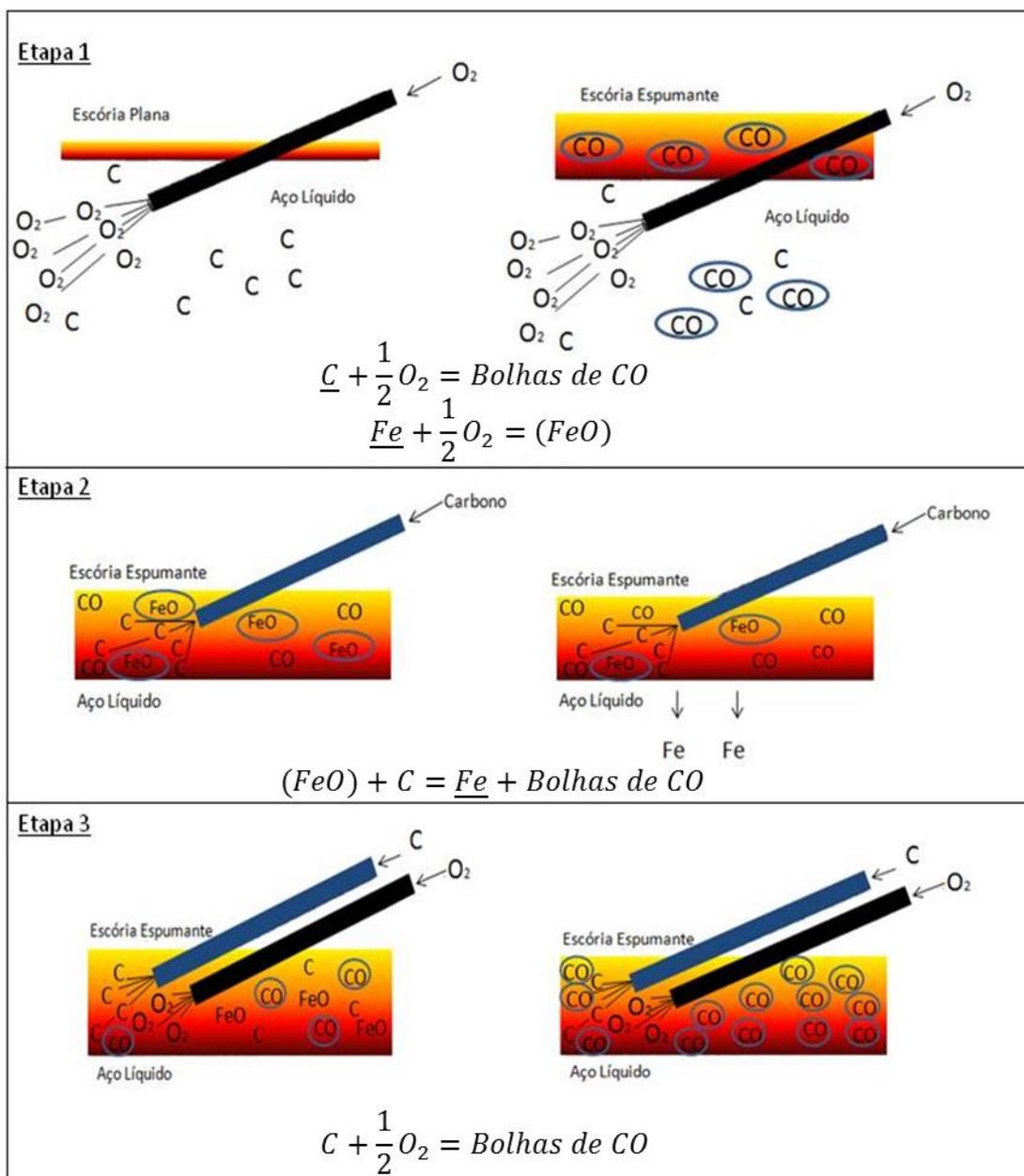


Figura 1: Esquema mostrando a formação da escória espumante. Fonte: (VIEIRA, 2014).

Pretorius e Carlisle (1998) afirmam que o CO gerado pela reação de descarbonização do banho geralmente resulta em uma melhor espumação que o CO gerado nas etapas posteriores, e que isso ocorre porque as bolhas formadas no banho estão distribuídas de maneira mais uniforme e tem um tamanho menor, fornecendo uma melhor estabilidade para a espumação.

Já Matsuura e Fruehan (2009), constataram que a espuma produzida pela reação 3 tinha bolhas menores que as produzidas pela reação 1, e que por isso

deviam contribuir mais para a espumação. Concluíram que não está claro se o CO gerado pela reação de descarburização é tão efetiva quanto o gerado pela reação C-(FeO) para a produção da escória espumante. Afirmando, que se o CO da descarburização é negligenciado, pode-se controlar a espumação através da quantidade de carbono e oxigênio injetados durante o processo.

Além da quantidade, é importante também, o local onde a adição está sendo feita, já que cada local de injeção tem sua peculiaridade, como a descarburização quando o oxigênio é injetado no banho, e o retorno do Fe quando o carbono é injetado na escória. Nota-se que um estudo mais profundo precisa ser feito para estabelecer em qual local a injeção gera uma melhor espumação, pois nota-se a divergência de opinião entre alguns autores (PRETORIUS; CARLISLE, 1998; MATSUURA; FRUEHAN, 2009).

2.2.2. Carburantes e injeção de oxigênio

Conforme dito na seção anterior para realizar a espumação é necessário que carbono e oxigênio estejam disponíveis. Existem diferentes fontes de carbono para serem usadas no FEA entre eles estão o coque metalúrgico, grafita, carvão betuminoso, char de carvão betuminoso, carvão antracito e char de carvão antracito. Na Tabela 4 pode ser visto a composição química destes materiais (NUNES, 2014; CORBARI et al, 2009).

Tabela 4: Composição química de diferentes fontes de carbono. Fonte: (NUNES, 2014; CORBARI et al, 2009).

	Coque Metalúrgico	Grafita	Carvão betuminoso	Char de carvão betuminoso	Carvão antracito	Char de carvão antracito
C (%)	84,4	99,0	60,0	90,0	85,6	89,0
Cinzas (%)	13,3	<1	6,0	9,0	11,0	11,0
Voláteis (%)	2,3	-	34,0	-	3,4	-

O material carburante (na forma de pó) e o oxigênio são injetados através de injetoras em velocidades subsônicas (com menor eficiência, por perderem material

para o sistema de despoejamento) ou supersônicas (com maior eficiência por manterem a coerência do jato) (FAVARETTO, 2014). Entende-se por eficiência a razão entre a quantidade de material utilizada nas reações e a quantidade de material injetada.

Apesar de 90% do coque metalúrgico produzido ser utilizado em processos de alto-forno, pode ser utilizado nos processos de aciaria elétrica se for financeiramente vantajoso (NUNES, 2014).

Corbari et al (2009) realizaram um trabalho no qual compararam a altura da espumação, da escória para três tipos de material carbonoso: grafita, char de carvão betuminoso, char de carvão antracito, a comparação pode ser vista na Figura 2

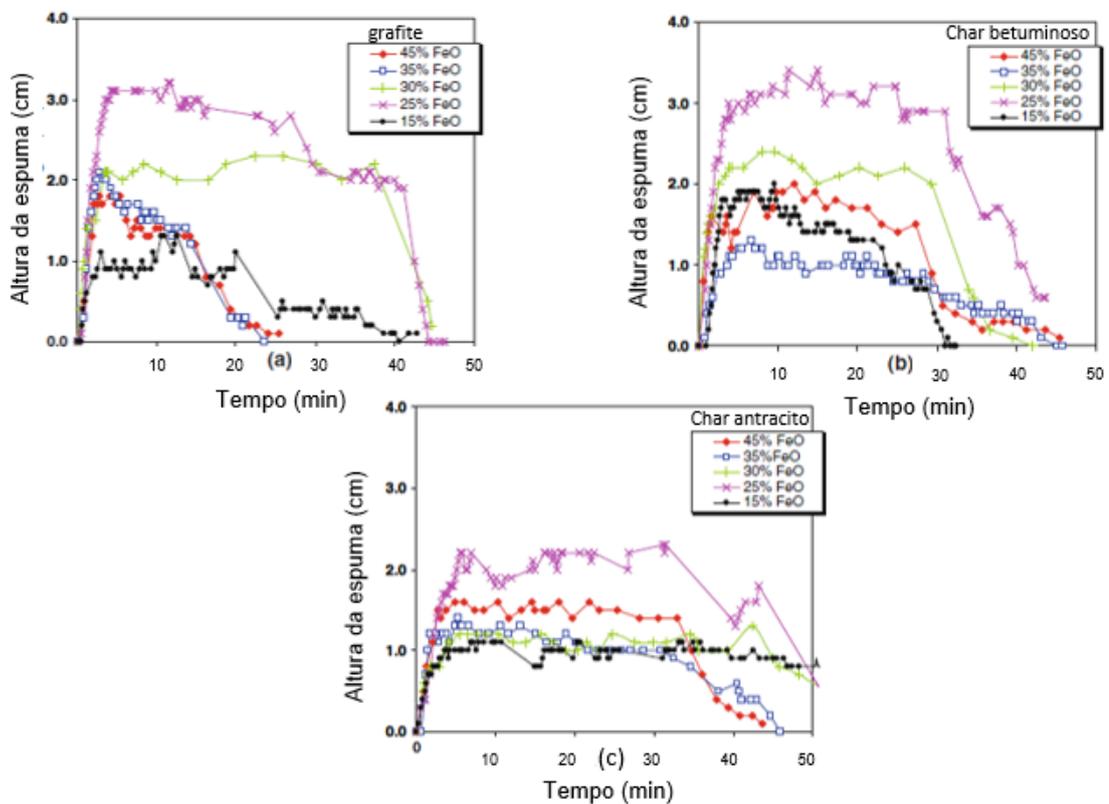


Figura 2: Altura da espuma para a) grafite, b) char betuminoso e c) char antracito como função do tempo, para diferentes teores de FeO (1600°C). Fonte: (CORBARI et al, 2009).

Para os três tipos de materiais injetados, o teor de FeO que teve a maior altura da escória foi o de 25%, decrescendo com o aumento do teor de FeO. Nota-se que a grafita e o char de carvão betuminoso obtiveram alturas de espuma superiores às encontradas pelo char de carvão antracito. Isso ocorreu pelas diferenças entre as reatividades dos carburantes e causadas pelas diferenças mostradas na Tabela 4 no

qual o char de antracito tem um teor de cinzas maior que o dos outros dois casos analisados.

2.2.3. Índice de espumação

Ito e Fruehan (1989a) investigaram o efeito da composição química da escória na espumação. Para isso foram estudadas escórias compostas de CaO-SiO₂-FeO na faixa de temperatura de 1250°C e 1400°C. Eles encontraram um índice de espumação (Σ), que pode ser descrito como o tempo de residência do gás na escória, podendo ser calculado através da relação entre a velocidade superficial de gás e altura da escória, equação 5.

$$\Sigma = \frac{\Delta H}{\Delta V_g^s} \quad (5)$$

Onde:

ΔH = Variação na altura da escória;

ΔV_g^s = Variação da velocidade superficial do gás.

Como a altura da escória crescia linearmente com a velocidade superficial, Figura 3, e Σ se tornava constante após certa velocidade superficial ser atingida, chegou-se à conclusão que o índice de espumação (Σ) podia ser usado como um parâmetro para estudar a espumação da escória.

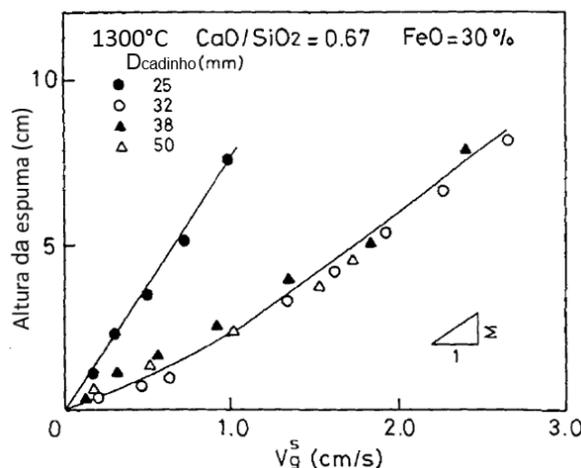


Figura 3: Relação entre altura da escória e velocidade superficial do gás para vários diâmetros de cadinho. Fonte: (ITO; FRUEHAN, 1989a).

Modelos matemáticos para o índice de espumação

Vários modelos foram propostos para definição do índice de espumação utilizando propriedades físicas da escória.

Na equação 6, está o modelo de Ito e Fruehan (1989b). Ele foi obtido após a análise dimensional dos dados obtidos do artigo anterior (ITO; FRUEHAN, 1989a). O efeito da presença de partículas sólidas foi avaliado com partículas de 100 μ de diâmetro, concluindo-se que o aumento da concentração de partículas sólidas, aumenta o índice de espumação.

$$\Sigma = 570 \frac{\mu}{\sqrt{\gamma\rho}} \quad (6)$$

Onde:

μ = viscosidade (Pa.s);

γ = tensão superficial (N.m^{-1});

ρ = densidade do líquido (kg.m^{-3}).

Jiang e Fruehan (1991), conduziram experimentos em escórias dos sistemas CaO-SiO₂-FeO e CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-FeO na temperatura de 1500°C. Encontraram duas relações, uma delas muito próxima da encontrada na equação 6, mas com coeficientes diferentes. As relações encontradas estão nas equações 7 (escórias básicas) e 8 (escórias ácidas).

$$\text{Escórias Básicas: } \Sigma = 115 \frac{\mu}{\sqrt{\rho\gamma}} \quad (7)$$

$$\text{Escórias Ácidas: } \Sigma = 0,93 \frac{\mu}{\rho^{2/3}\gamma} \quad (8)$$

Mas segundo Stadler, (STADLER; EKSTEEN; ALDRICH, 2007), essas relações não explicam bem a espumação para escórias ácidas, seja por incertezas associadas com a medição ou predição das propriedades da escória.

Zhang e Fruehan (1995) propuseram novos modelos, que consideravam o diâmetro das bolhas (D_b) formadas no processo de espumação.

$$\text{Escórias Básicas: } \Sigma = 115 \frac{\mu^{1,2}}{\rho\gamma^{0,2}D_b^{0,9}} \quad (9)$$

$$\text{Escórias Ácidas: } \Sigma = 10,3 \times 10^4 \frac{\gamma^{1,2}}{\mu^{0,4}\rho^{11,4}D_b^{23}} \quad (10)$$

Nota-se pelas equações 7, 8, 9 e 10, que para escórias básicas, a viscosidade teria um peso maior no índice de espumação, já para escórias ácidas o fator que mais influência é a tensão superficial.

No modelo de Ghag (GHAG; HAYES; LEE, 1998), equação 11, foi considerado que a viscosidade tem um efeito significativo na altura da escória, além da elasticidade efetiva do filme líquido que forma a bolha (Eff) e a constante gravitacional g.

$$\Sigma = 1X10^6 \frac{\mu E_{ff}}{(\rho g)^2 D_b^3} \quad (11)$$

Skupien e Gaskel (2000) repetiram a análise dimensional feita por Jiang e Fruehan (1991) para outros valores de tensão superficiais, viscosidades e densidades chegando na seguinte correlação:

$$\Sigma = 100 \frac{\mu^{0.54}}{\rho^{0.39} \gamma^{0.15}} \quad (12)$$

Kim, Min e Park (2001) sugeriram modelos para o sistema CaO-SiO₂-FeO-Al₂O₃ e CaO-SiO₂-FeO-MgO_{sat.}-X (X= Al₂O₃, MnO, P₂O₅ e CaF₂), mostrando os mesmos parâmetros usados na equação 7.

$$\text{Escórias básicas: } \Sigma = 214 \frac{\mu}{\sqrt{\rho \gamma}} \quad (13)$$

$$\text{Escórias saturadas em MgO: } \Sigma = 999 \frac{\mu}{\sqrt{\rho \gamma}} \quad (14)$$

Nota-se que, apesar de depender das mesmas propriedades físicas, se comparado com a equação 7, o modelo de Kim, Min e Park (equação 13), tem uma grande diferença no coeficiente, isto se deve a diferenças entre as propriedades usadas em cada análise (KIM; MIN; PARK, 2001).

Todos os modelos de índice de espumação estão baseados nas propriedades físicas da escória: viscosidade (μ), tensão superficial (γ) e densidade da escória (ρ). No entanto, alguns autores (HONG; HIRASAWA; SANO, 1998) não encontraram relação entre a espumação e as propriedades da escória (como tensão superficial e viscosidade). Encontraram que a escória colapsa rapidamente com a retirada da injetora de oxigênio. Outros chegaram a um modelo de altura de escória que contradiz considerações termodinâmicas básicas, já que prevê um aumento na altura da espuma com o aumento da tensão superficial, além de afirmar que no desenvolvimento das correlações o conceito de espumação foi desconsiderado por não se correlacionar com as evidências experimentais (LOTUN; PILON, 2005).

2.2.4. Influência da viscosidade

Como a escória espumante depende da velocidade de ascensão das bolhas de CO formadas conforme reações descritas, seção 2.2.1, constatou-se que a viscosidade da escória é de extrema importância para uma espumação eficaz. O aumento da viscosidade diminui a taxa de drenagem do líquido da espuma, dando a bolha um maior tempo de residência, aumentando a altura da espuma e a sua estabilidade (ZHU; COLEY; IRONS, 2012). Entende-se por taxa de drenagem como a velocidade com a qual o líquido que compõe a bolha escorre, diminuindo a espessura das paredes.

A viscosidade efetiva da escória pode ser calculada, equação 15, levando em conta a presença de partículas sólidas. Esta equação foi feita por Roscoe (1952), baseado no modelo de Einstein. Ela foi feita relacionando a viscosidade com esferas suspensas de diferentes tamanhos e concentrações.

$$\eta_e = \eta (1 - 1,35 \theta)^{-5/2} \quad (15)$$

Onde:

η_e - viscosidade efetiva da escória (Pa.s)

η - viscosidade da escória fundida (Pa.s)

θ - fração de fases sólidas precipitadas

Na Figura 4, vê-se o efeito que a viscosidade tem sobre o índice de espumação. Uma escória ótima não é completamente líquida, sendo essencial a presença de partículas sólidas.

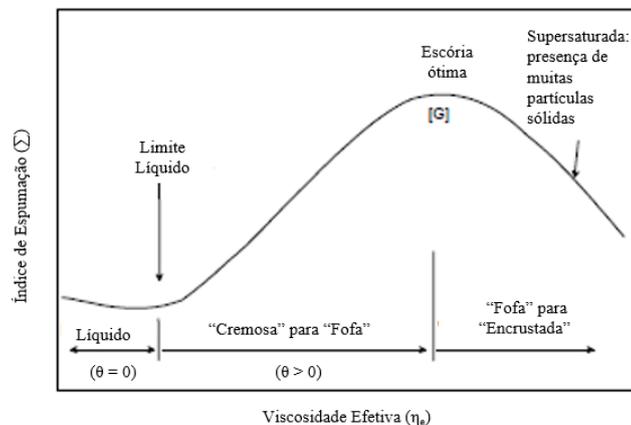


Figura 4: Relação entre o índice de espumação e a viscosidade efetiva. Fonte: (PRETORIUS; CARLISLE, 1998).

As partículas sólidas (tanto de MgO, quanto de CaO) funcionam como sítios de nucleação para as bolhas, ocasionando que uma grande quantidade de bolhas pequenas seja gerada na escória espumante (PRETORIUS; CARLISLE, 1998).

A Figura 4 mostra que um aumento da viscosidade proporciona um aumento do índice de espumação, alcançando um pico, onde se encontra a escória ótima. Mas com um aumento excessivo da viscosidade se forma uma escória “dura” e a presença de partículas sólidas começa a ser prejudicial, pois a ascensão das bolhas é dificultada.

Wu, Albersson e Sichen (2010) mostraram que a tensão superficial e a densidade têm uma correlação muito pequena com a composição química, e que a viscosidade diminui com o aumento do teor de FeO. Isso permitiria a utilização de valores constantes de tensão superficial e densidade, para modelos matemáticos.

Assim é temerário utilizar somente o índice de espumação da escória como parâmetro em dados industriais. Dependendo da composição química das escórias analisadas, a tensão superficial e a densidade poderiam ser consideradas constantes, variando apenas a viscosidade. Como todos os modelos apresentados no capítulo 2.2.3, são diretamente proporcionais a viscosidade, isto pode levar a erros, pois escórias muito viscosas podem ser prejudiciais a espumação, embora possa se obter matematicamente altos valores para o Σ (índice de espumação).

2.2.5. Influência da Basicidade

A basicidade tem uma forte influência sobre a espumação, tanto no caso de escórias ácidas, quanto no caso de escórias básicas. Pois a basicidade está diretamente relacionada com a viscosidade da escória, Figura 5.

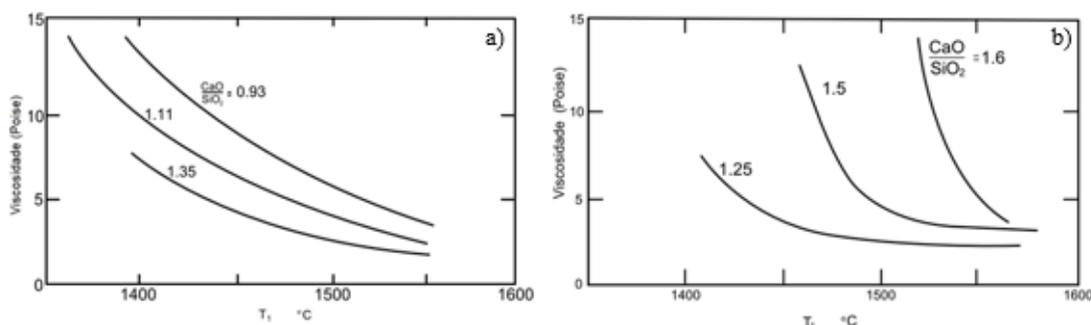


Figura 5: Influência da razão de %CaO/%SiO₂ na viscosidade, em a) escórias ácidas e b) escórias básicas. Fonte: (COUDURIER; HOPKINS; WILKOMIRKY, 1978).

Nas escórias ácidas (a), o aumento do teor de CaO causa uma quebra nas ligações da sílica, causando assim uma diminuição na viscosidade (SEOK et al, 2007) e com isso uma diminuição do índice de espumação.

Já para escórias básicas (b), o aumento do teor de CaO, causa um aumento na viscosidade, pela saturação deste óxido, causando a precipitação da fase sólida na escória fundida (BIELEFELDT, 2012).

Nota-se que há diferenças entre as curvas das duas figuras. Nas escórias ácidas, vê-se uma queda suave da viscosidade com o aumento da temperatura, e um menor valor de viscosidade para a basicidade de 1,35. Isto ocorre, porque essa proporção de CaO/SiO₂ corresponde a composição eutética. Já nas escórias básicas observa-se uma queda brusca da viscosidade com o aumento da temperatura, já que nestas composições o alto ponto de fusão faz com que sejam mais sensíveis a mudanças de temperatura (BIELEFELDT, 2012).

2.2.6. Influência do FeO

O FeO presente na escória, além de representar uma queda no rendimento do forno, ainda causa um efeito que pode ser deletério para a escória, devido à sua característica fluxante, causa uma queda na viscosidade.

A Figura 6 mostra a variação da viscosidade em um diagrama ternário CaO-SiO₂-FeO. A linha de isobasicidade ($B_2=1$) mostra que mantendo a mesma relação de %CaO/%SiO₂ e aumentando o teor de FeO, há uma queda na viscosidade.

Assim, o teor de FeO é importantíssimo, reduzindo a viscosidade de escórias muito viscosas, mas conforme as reações mostradas no capítulo 2.2.1, deve existir um balanceamento entre o FeO criado pelo O₂ injetado com o FeO reduzido pelo carbono, evitando a redução do rendimento metálico. Se este balanceamento estiver correto, haverá uma boa espumação.

Corbari et al (2009) estudaram como a escória se comportou para diferentes teores de FeO, em uma basicidade $B_2=1,2$, mostrando que para teores muito altos ou muito baixos de FeO a altura da escória e a estabilidade foram menores que as encontradas para valores intermediários de FeO (entre 25% e 30%). Nestes casos notou-se que a espuma gerada se manteve presente mesmo após a geração de gás ter diminuído consideravelmente, Figura 7.

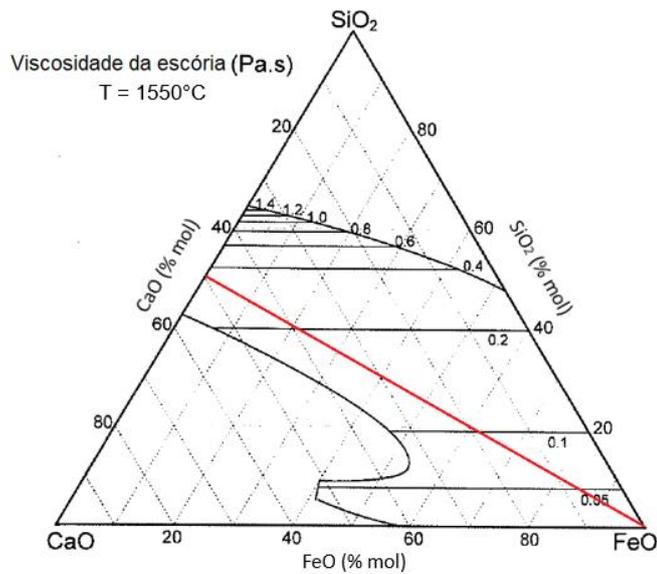


Figura 6: Viscosidades de escórias CaO-SiO₂-FeO a 1550°C - calculado pelo modelo de Urbain. Com uma linha de isobasicidade $B_2=1$. Fonte (GHAG; HAYES; LESS, 1998).

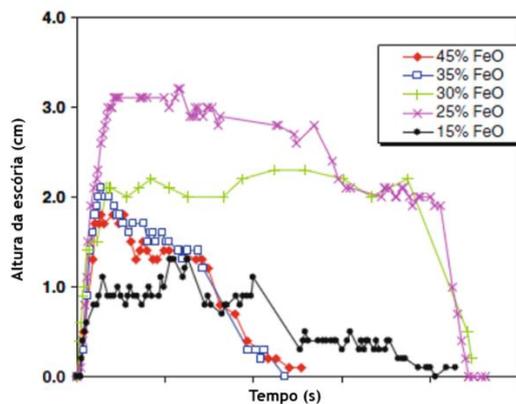


Figura 7: Relação entre a altura da escória com o tempo para diferentes teores de FeO, temperatura de 1550°C. Fonte (CORBARI et al, 2009).

Aminorroaya e Edris (2002) encontraram que para basicidade $B_2=2,2$, a maior altura de escórias ocorreu nos teores de FeO entre 20% e 25%. Também mostraram que para teores de FeO entre 20%-25%, o consumo de energia elétrica foi menor, do que o encontrado quando o teor de FeO foi entre 25%-30%, diminuindo de 630 kWh/t para 580 kWh/t devido a maior altura da escória, conforme mostra a Figura 8.

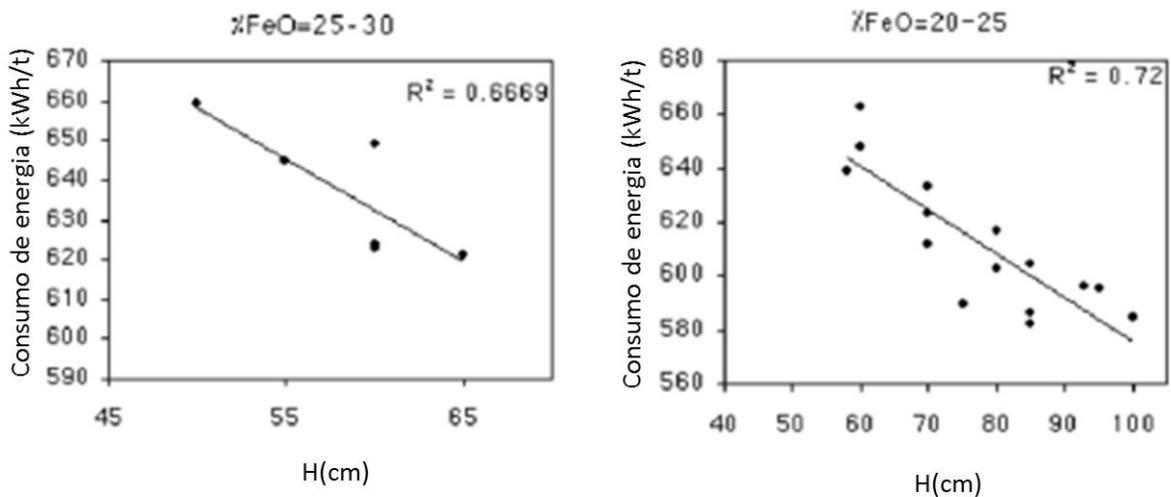


Figura 8: Relação entre altura da escória e a energia elétrica consumida. Fonte (AMINORRAYA, EDRIS, 2002).

Com isso pode-se dizer que existe um teor ótimo de FeO para a espumação, mas foi diferente para os dois casos mostrados, de 25-30% para Corbari et al (2009), e 20–25% para Aminorraya e Edris (2002). Os dados desses autores mostram a dependência com a composição química, em especial com a basicidade, que era de 1,2 para Corbari et al (2009), e de 2,2 para Aminorraya e Edris (2002).

2.2.7. Saturação de MgO

A saturação em MgO garante não apenas a presença de partículas sólidas (como no caso do CaO), mas também que o desgaste de refratário não seja excessivo, pois evita que ocorra o consumo de MgO do refratário pelas reações com a escória.

Para mostrar os níveis de saturação, Pretorius e Carlisle (1998) desenvolveram diagramas isotérmicos de solubilidade (Isothermal Solubility Diagrams, ISD), conforme mostra a Figura 9. Esses diagramas foram deduzidos a partir de diagramas de fase do sistema CaO-MgO-SiO₂-FeO, de onde foram estimados os valores de saturação de MgO. Cada ISD é feito para uma temperatura e com a reação de basicidade fixa, tendo o teor de MgO e FeO como os eixos do gráfico.

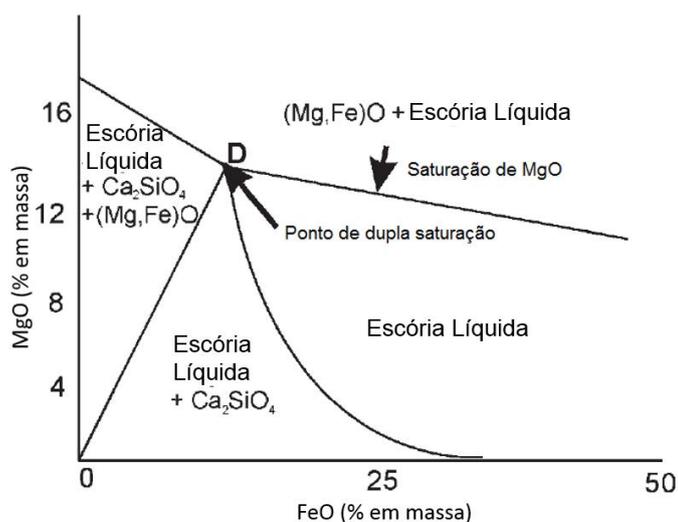


Figura 9: Diagrama de Saturação Isotérmico genérico. Fonte (PRETORIUS; CARLISLE, 1998).

Na confecção dos ISD's, Pretorius e Carlisle (1998) utilizaram a basicidade ternária ($\%CaO/(\%Al_2O_3 + \%SiO_2)$), podendo assim, analisar o efeito da alumina na saturação de MgO. Foi feita a comparação da saturação de MgO de duas escórias (Tabela 5), uma com 0% de Al_2O_3 (resultando em uma basicidade binária $\%CaO/\%SiO_2$), e outra com 10% de Al_2O_3 .

Tabela 5: Composição química de escórias saturadas em MgO para 1600°C. Fonte: (PRETORIUS, 2002).

	Escória A	Escória B
%MgO	9,3	8,3
%CaO	43,1	43,2
%SiO ₂	21,5	11,5
%Al ₂ O ₃	0	10,0
%FeO	26,1	27,0
$B_2 = \%CaO/\%SiO_2$	2,0	3,8
$B_3 = \%CaO/(\%Al_2O_3 + \%SiO_2)$	2,0	2,0

Pela Tabela 5, nota-se que apenas a substituição da SiO_2 pela $\%Al_2O_3$, resultou em basicidades ternárias iguais (2,0), mas basicidades binárias muito diferentes (2,0 para escória A e 3,8 para escória B). Ou seja, está sendo considerado que a alumina e a sílica têm o mesmo efeito na saturação de MgO.

Outro ponto importante nos ISD's é a sua dependência da temperatura. Como são feitos para uma temperatura fixa, ao variar a temperatura se tem diagramas diferentes, com outras fases presentes e com diferentes tamanhos dos campos. O que ocorre com o aumento da temperatura, é a expansão do campo líquido e um aumento do MgO de saturação (Figura 10).

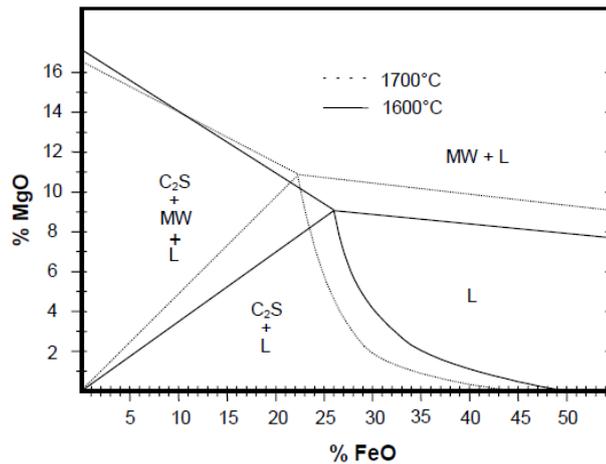


Figura 10: ISD mostrando a diferenças dos campos para as temperaturas de 1600°C e 1700°C, para a $B_3=2,0$. Fonte: (PRETORIUS, 2002).

Os diagramas ISD's demonstram que os níveis de saturação de MgO, variam com a basicidade e com o teor de FeO, conforme mostrado na Figura 10. Com o aumento da basicidade, os níveis de MgO necessários para a saturação diminuem. Ocorre também a redução da variação dos teores de saturação de MgO com o aumento do FeO (linha entre os pontos [a] e [b] da Figura 11). A saturação de MgO, nos casos apresentados por Pretorius, decresce de acordo com o aumento do FeO.

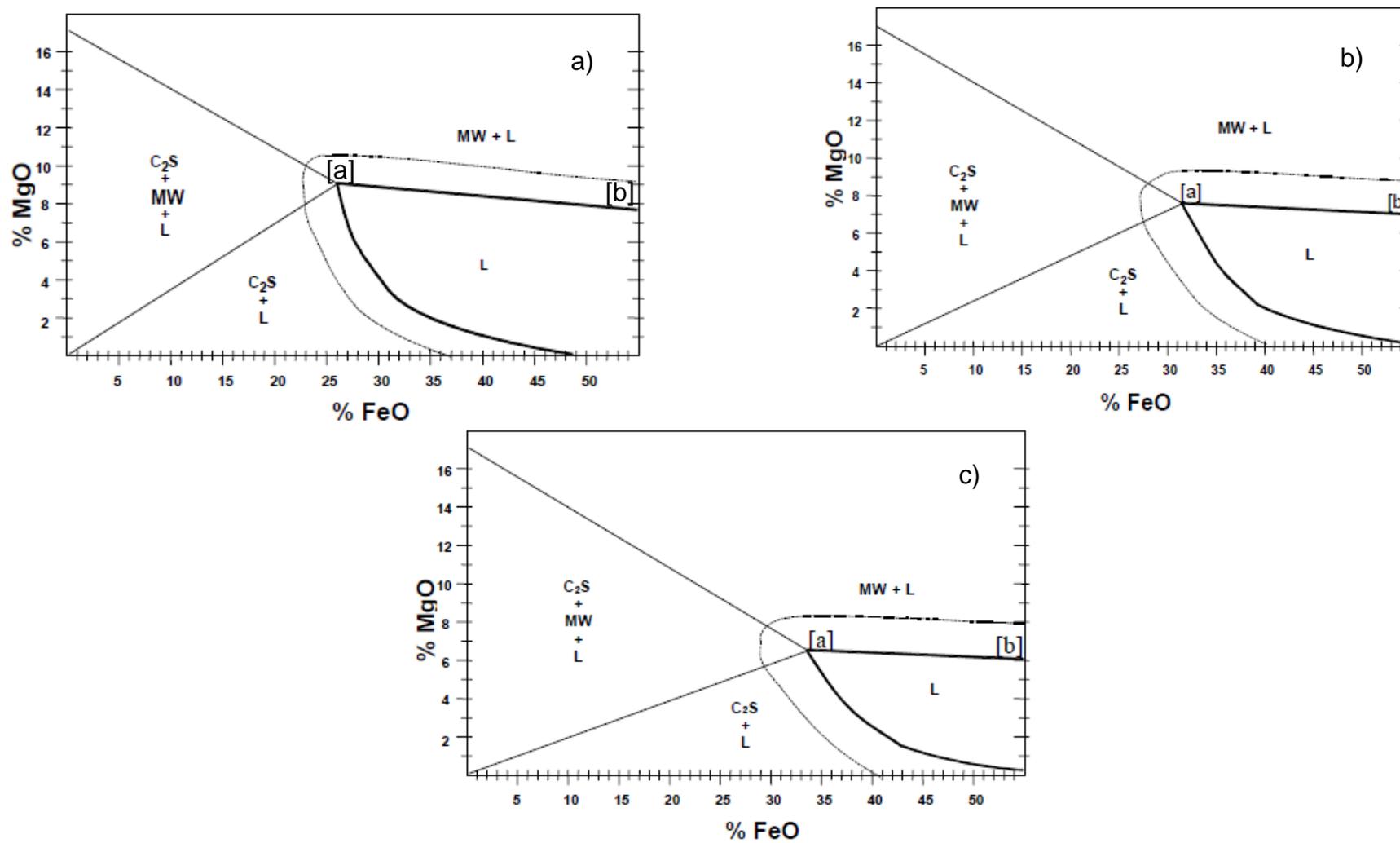


Figura 11: Diagramas de saturação isotérmicos para diferentes basicidades (a) $B_3=2,0$; (b) $B_3=2,5$; (c) $B_3=3,0$, temperatura de 1600°C. Fonte: (PRETORIUS; CARLISLE, 1998).

Apesar da consistência dos resultados de Pretorius, Paulino et al (2014) mostraram que o comportamento da linha de saturação poderia ser outro. De acordo com os autores, as condições para a saturação de MgO foram as mesmas para escórias com baixas basicidades, já para basicidades mais altas vê-se um outro comportamento para a linha de saturação, ela passa a ser crescente com os teores de FeO, além de ter obtido valores menores para a saturação de MgO, Figura 12.

Os ISD's são uma maneira rápida e prática de analisar a saturação de MgO e a qualidade da espumação da escória, mas alguns pontos precisam ser levados em consideração, como a presença de outros óxidos, caso da Al_2O_3 , do P_2O_5 e do Cr_2O_3 , pois podem ter uma grande influência tanto no campo líquido quanto no ponto de dupla saturação.

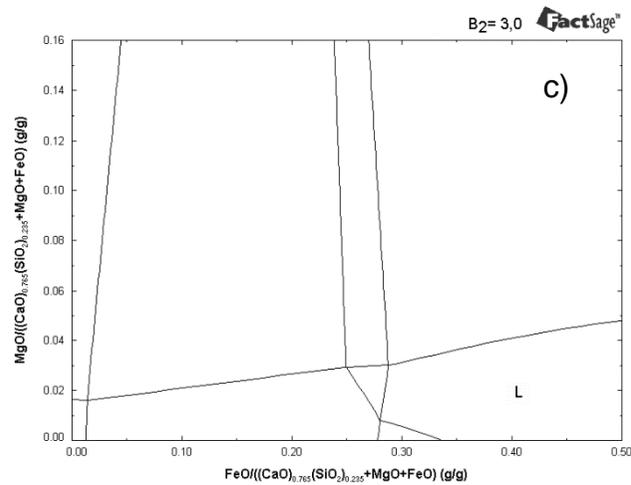
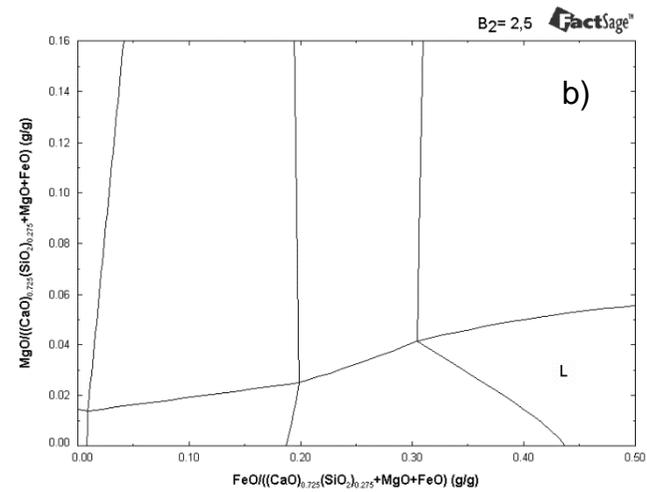
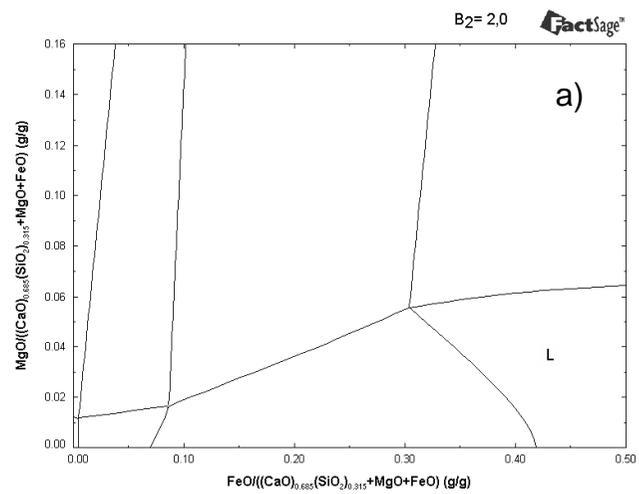


Figura 12: Diagramas de saturação isotérmicos para diferentes basicidades (a) $B_2=2,0$; (b) $B_2=2,5$; (c) $B_2=3,0$, L= escória líquida, temperatura de 1600°C (Paulino et al. 2014).

2.2.8. Influência da velocidade superficial de gás

Para uma boa espumação, a presença de bolhas de CO é necessária, e uma alta quantidade de bolhas aliada a uma boa estabilidade das mesmas resulta em uma espumação mais eficaz. Para obter esses resultados a velocidade superficial do gás é essencial.

Existem diferenças significativas no comportamento da espuma gerada por gases de alta e baixa velocidade. Essas espumas são chamadas de escória expandida e de escória espumante, respectivamente (GOU; IRONS; LU, 1996, ZHU; COLEY; IRONS, 2012).

A Figura 13 mostra a “posição” das escórias espumantes e das escórias expandidas, considerando a fração de vazios e a velocidade superficial do gás. A fração de vazios para ambos os tipos de escórias pode ser quase a mesma, facilitando que se confunda a escória expandida com a escória espumante.

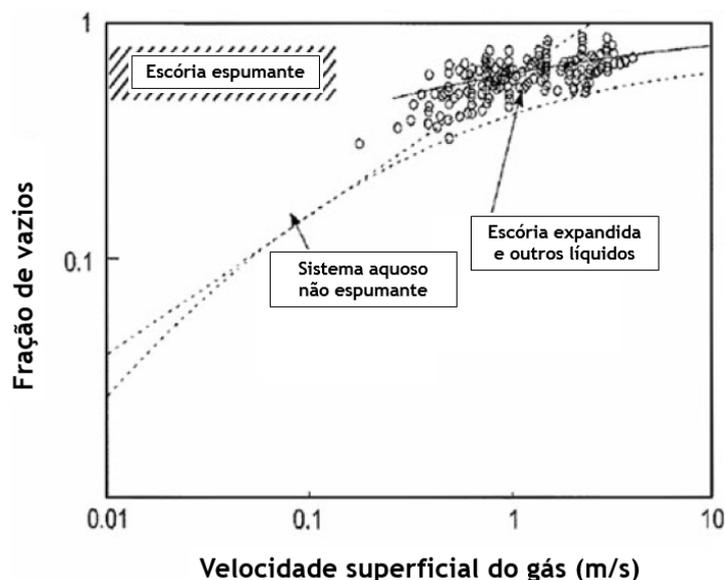


Figura 13: Velocidade superficial do gás pela fração de vazios para sistemas espumantes e não espumantes. Fonte: (GOU; IRONS; LU, 1996).

As principais diferenças entre a escória espumante e a escória expandida são (GOU; IRONS; LU, 1996):

- Escória espumante: baixa velocidade superficial; duas camadas distintas: camada de espumas sobre camada de escória com poucos vazios; grande quantidade de bolhas, com paredes finas, dando uma boa

estabilidade, ou seja, a espuma demora a colapsar mesmo quando a geração de gás diminui consideravelmente.

- Escória expandida: uma camada uniforme e misturada; a fração de vazios varia de acordo com a velocidade superficial do gás; uma aparência turbulenta; grandes vazios, com paredes grossas separando-os, causando uma baixa estabilidade, ou seja, quando a geração de gás diminui, a altura da escória começa a diminuir consideravelmente.

Zhu, Coley e Irons (2012) concluíram que com o aumento da velocidade superficial do gás (após o ponto crítico, acima de 0,2 m/s), a taxa de aumento da altura da escória diminui dramaticamente. Isso ocorre quando a quantidade de escória que ainda não espumou é utilizada para a geração de espuma, o que provoca uma mudança no mecanismo, ocasionando uma espuma menos estável.

Barella et al (2012) afirmaram que a queda na altura da espuma em alta velocidade superficial de gás é associada ao aumento da quantidade das bolhas criadas no difusor de gás. Bolhas maiores favorecem a drenagem do filme líquido diminuindo a estabilidade das mesmas. Mas nos testes industriais a espuma não colapsou nas maiores velocidades superficiais, pois o processo de formação das bolhas, nas condições industriais, levou a formação de bolhas de menor diâmetro que não são propícias para a drenagem.

2.3. PARÂMETROS ELÉTRICOS DO FEA

Os FEA's são os principais equipamentos de transformação da sucata ferrosa em aço, sendo fundamental na indústria. Existe uma série de vantagens na utilização de FEA's:

- Produzir praticamente qualquer tipo de aço, desde aços baixo carbono até aços inoxidáveis;
- Extremamente versátil com relação à carga, podendo ser operado com 100% de carga sólida ou com misturas de carga líquida e sólida;
- Permite operação intermitente e mudanças rápidas na produção em escalas desde dezenas até centenas de toneladas;
- Reduz a exploração de minério de ferro, carvão vegetal ou mineral e outras matérias-primas;
- Permite a reciclagem de sucata ferrosa;

- Diminui a necessidade da construção de equipamentos da área de redução, que são potenciais poluidores do meio-ambiente.

A etapa de refino primário pode ser dividida em etapas de fusão, refino (descarburação, desfosforação) e vazamento. Para mais informações referentes às etapas e ao equipamento de forno elétrico a arco ver as seguintes referências (TURKDOGAN; FRUEHAN, 1998; BOWMAN; KRÜGER, 2009; ABM, 2007).

2.3.1. Energias no FEA

Para realizar a fusão da carga é necessário fornecer uma grande quantidade de energia, na ordem de 360 kWh/t. Como o forno elétrico apresenta uma eficiência de aproximadamente 60%, é correto afirmar que a energia necessária para a fusão de uma tonelada de aço seria de 600 kWh (TURKDOGAN; FRUEHAN, 1998). Esta energia é fornecida de duas formas: energia elétrica e energia química. A utilização da energia é distribuída com 60-65% de energia elétrica e 35-40% de energia química.

A energia química é provida pelas diferentes reações exotérmicas que ocorrem no interior do forno. No artigo de Pujadas, McCauley e Iacuzzi (2003), os autores mostram as entalpias das diferentes reações. Nota-se que as principais fornecedoras de energia seriam as reações de oxidação do silício carbono, manganês, ferro e alumínio. Estes elementos são carregados junto com a carga metálica ou injetados através de finos. Esta injeção é feita através de injetoras.

As injetoras estão localizadas nos pontos frios existentes no interior dos FEA's. Concentrando a energia química homogeneizando a temperatura do banho.

A energia elétrica fornecida pelas concessionárias vem em um sistema trifásico, por essa razão o FEA que trabalha com corrente alternada (CA) possui três eletrodos. As tensões, fornecidas pela concessionária de energia, podem alcançar 500 kV, enquanto que a física do forno comporta tensões de arco de até 600 V, pois acima desta tensão os arcos tornam-se muito longos e difíceis de serem manuseados. Para poder utilizar esta energia é necessária uma série de transformadores, como pode ser visto na Figura 14 (JONES; BOWMAN; LEFRANK, 1998). Atualmente, existem fornos que podem operar com tensões de 1200 a 1500 V.

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 (JONES; BOWMAN; LEFRANK, 1998).

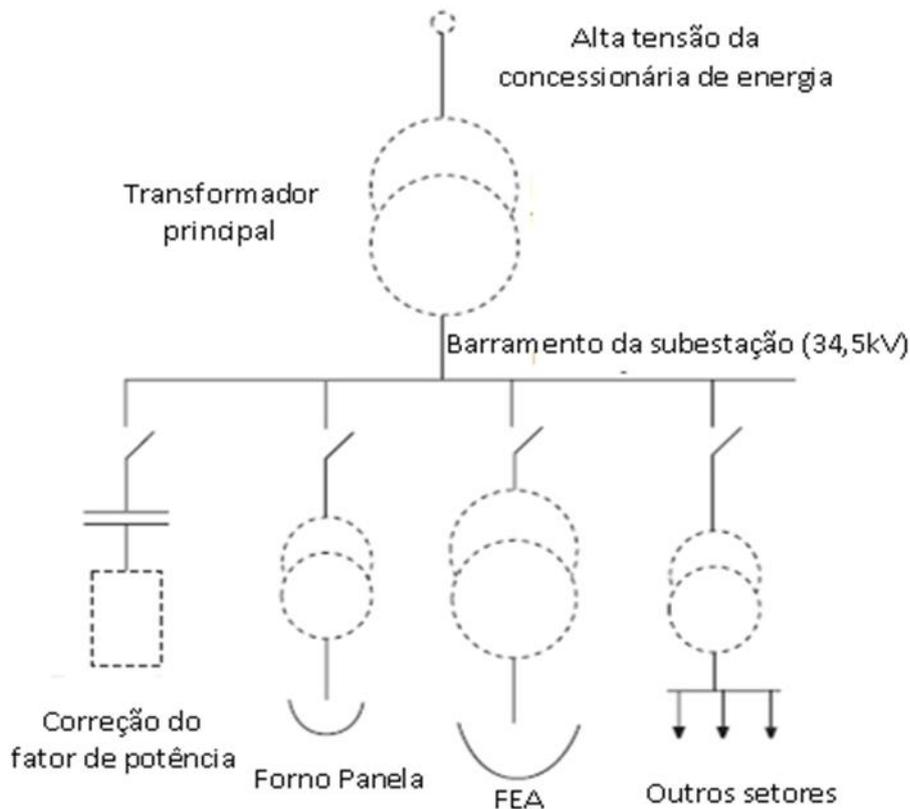


Figura 14: Transformação da energia de uma linha de alta voltagem para um forno elétrico a arco.
 Fonte: (JONES; BOWMAN; LEFRANK, 1998).

Entre os principais problemas de qualidade de energia comumente encontrados nas operações de FEA's estão incluídos: desequilíbrios de tensão, distorção da forma de onda (harmônicas, inter-harmônicas, sub-harmônicas) e flutuações de tensão (SOARES JR; SIMONETTI, 2010).

2.3.2. Distorção Harmônica de Onda de Tensão

Uma distorção de forma de onda é dita harmônica quando esta se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental. Neste caso, seu espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental. Esse tipo de deformação periódica geralmente é imposto pela relação não linear tensão/corrente característica de determinados componentes da rede, como por exemplo, transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos à saturação. Outra causa de não linearidades são as discontinuidades devido ao chaveamento das correntes em conversores eletrônicos, pontes retificadoras e compensadores estáticos (DECKMANN; POMILIO, 2010).

Como as harmônicas são distorções na onda fundamental cuja frequência é um múltiplo da frequência fundamental, pode-se dividi-las em ordem: primeira, segunda, terceira, etc, de acordo com a sua frequência. Na prática as mais incômodas são as harmônicas de ordem ímpar, tanto que as distribuidoras de energia supervisionam harmônicas de ordem 3, 5, 7, 11 e 13 (Schneider Electric, Procobre).

Pela Figura 15, pode-se ver o efeito que os harmônicos de tensão têm em uma onda de tensão senoidal. Onde a Figura 15 (a) mostra uma tensão senoidal sem distorções, e a (b), mostra o resultado da soma de uma onda de tensão senoidal com uma harmônica que tem o dobro da sua frequência.

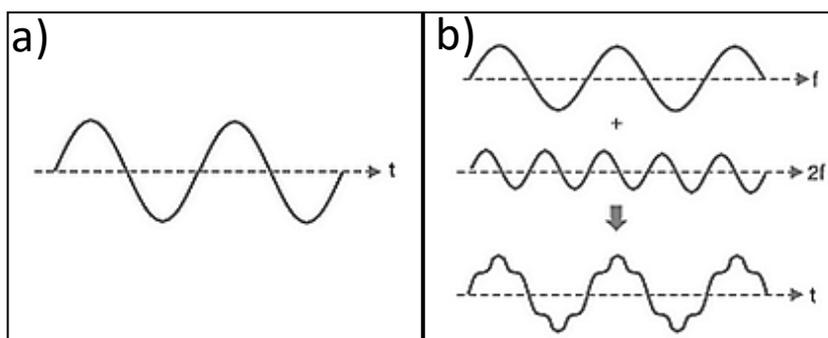


Figura 15: a) Onda senoidal sem a presença de distorção. b) Forma de onda somada com harmônica de frequência duas vezes maior. Fonte <http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/>.

Por se tratar de um curto circuito entre o eletrodo de grafita e a carga adicionada, o arco elétrico é considerado um produtor de distorção harmônica (SOARES JR; SIMONETTI, 2010). Apesar do controle automático do eletrodo tentar manter constante a resistência do arco, ele não consegue acompanhar a velocidade

com o qual o arco elétrico muda, a corrente acaba variando muito, gerando uma relação não linear entre a tensão do arco e a corrente (GANDHARE; LULEKAR, 2007; DECKMAN; POMILIO, 2010)

Conforme uma grande quantidade de autores, a geração de distorções harmônicas depende do estágio do processo (DEACONU et al, 2009; GANDHARE; LULEKAR, 2007; DECKMAN; POMILIO, 2010; MARTELL et al, 2014).

Os harmônicos podem ser utilizados para analisar a qualidade da escória com relação à espumação e com relação ao consumo de energia elétrica o que será discutido nos capítulos posteriores.

2.3.3. Efeitos da escória na estabilidade do arco

É conhecido que a adição de óxidos básicos em escórias à base de sílica quebra os clusters de sílica, baixam a viscosidade e aumentam a condutividade elétrica. A quebra na estrutura iônica permite que os íons escapem da escória em temperaturas relativamente baixas (BOWMAN; KRÜGER, 2009).

O efeito dessa emissão iônica e eletrônica é facilitar a passagem arco elétrico, reduzindo a quantidade de harmônicos de tensão e suavizando a forma da onda. Para escórias menos básicas este efeito é reduzido. Então fornos operando com escórias ácidas sofrem as consequências de arcos com maiores harmônicos (BOWMAN; KRÜGER, 2009).

Segundo Martell et.al (2014), a quantidade de distorções harmônicas no início da fusão, quando a carga ainda está sólida, está em níveis mais altos, diminuindo durante a fusão, até um valor mínimo na etapa de refino. A fusão da escória gera predominantemente harmônicos de terceira ordem e mostra uma grande flutuação no THD (*Total Harmonic Distortion*), especialmente no início do ciclo de aquecimento quando os arcos estão atravessando a sucata metálica. Durante o refino o forno particularmente gera harmônicos de terceira e quinta ordem e mostra uma variação menor dos THD's já que os eletrodos alcançaram o banho metálico. Pela Figura 16 pode-se ver a diferença entre os THD's de tensão durante as etapas de fusão e refino.

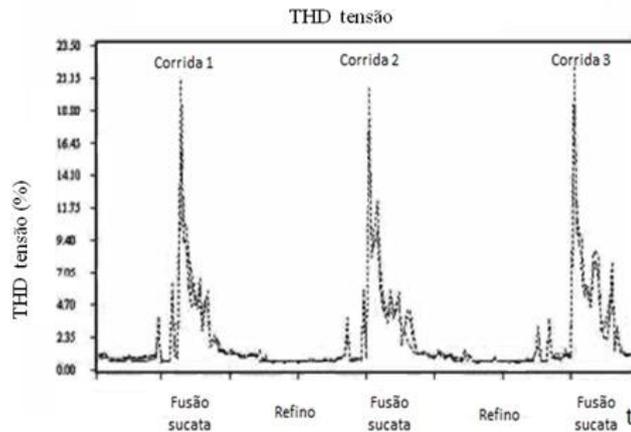


Figura 16: Distorção harmônica total (THD) da tensão, durante três corridas. Fonte: (GANDHARE; LULEKAR, 2007).

Durante a fusão, a escória não foi totalmente formada, tendo uma pequena quantidade disponível. Assim o arco elétrico fica exposto à atmosfera sofrendo uma maior interferência devido à dificuldade para ignição do arco, tendo uma grande quantidade de distorções harmônicas, como pode ser visto na Figura 16.

Com o avanço do processo, aumenta a quantidade de escória presente, cobrindo os eletrodos e conseqüentemente o arco elétrico, facilitando a ignição do arco elétrico, aumentando a estabilidade elétrica, diminuindo a quantidade de distorções harmônicas criadas.

Conforme dito anteriormente no capítulo 1, uma boa espumação da escória colabora com o aumento da estabilidade do arco, isto porque com a expansão do volume de escória os eletrodos ficam submersos, facilitando a passagem do arco elétrico. Uma boa espumação da escória suaviza a forma com a qual a onda de tensão e corrente se apresenta, conforme pode ser visto na Figura 17.

Pela Figura 17 a espumação gera uma da onda de tensão e corrente mais estável, ou seja, uma melhor estabilidade elétrica. Este fato resulta em uma menor quantidade de harmônicos (PARSAPOOR; DEHKORDI; MOALLEM, 2010; SEDIVY; KRUMP, 2008).

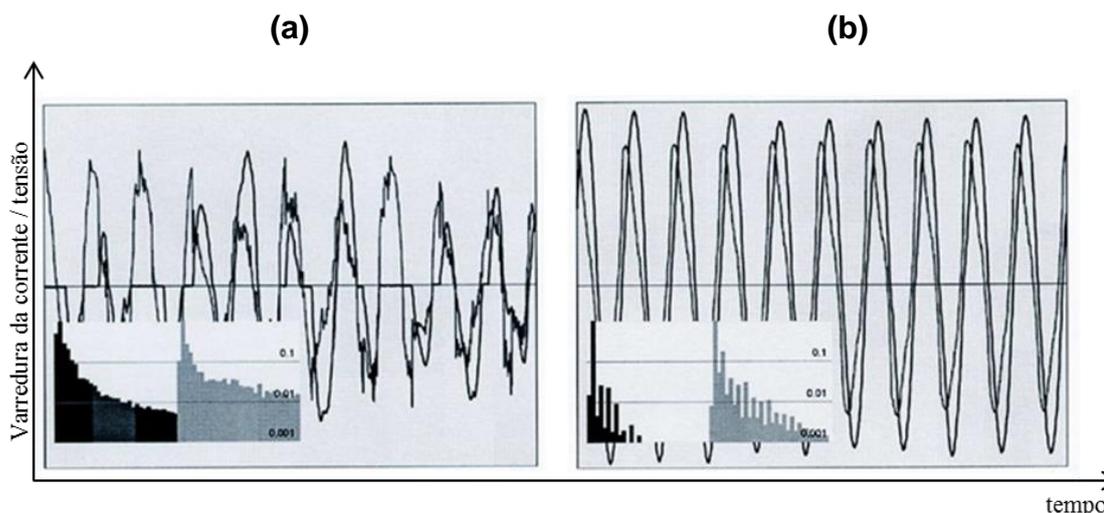


Figura 17: Representação da instabilidade da tensão e corrente do sistema. (a) antes da presença de escória espumante e (b) estabilidade após a prática da espumação. Fonte: (SEDIVY; KRUMP, 2008).

2.4. QUALIDADE DA ESPUMAÇÃO

Mesmo sendo de extrema importância, existem poucos estudos sobre o controle da qualidade da escória para melhorar a eficiência energética. Principalmente pelo fato da escória ter uma natureza complicada, mudando a sua composição a todo instante.

Um dos métodos para analisar a qualidade da escória, feito por Wilson, Karr e Barnett (2004), no qual a espessura da escória foi prevista utilizando-se 35 variáveis da escória espumante. Estas variáveis podem ser divididas em 3 grandes grupos. Variáveis elétricas, variáveis químicas e variáveis físicas. Neste trabalho os autores compararam a previsão feita pelo sistema com a avaliação feita por operadores humanos, ver Figura 18. Nesta figura a altura da escória foi apresentada de maneira relativa, ou seja, 0 seria sem escória espumante e 100 seria muita escória espumante. Apesar do sistema conseguir prever a qualidade da escória de maneira satisfatória, o grande número de sensores aumenta o custo para implementar do sistema. Além disso, nem todas as variáveis podem ser medidas de maneira acessível em todos os FEA's (DEHKORDI; MOALLEM; PARSAPOOR, 2011).

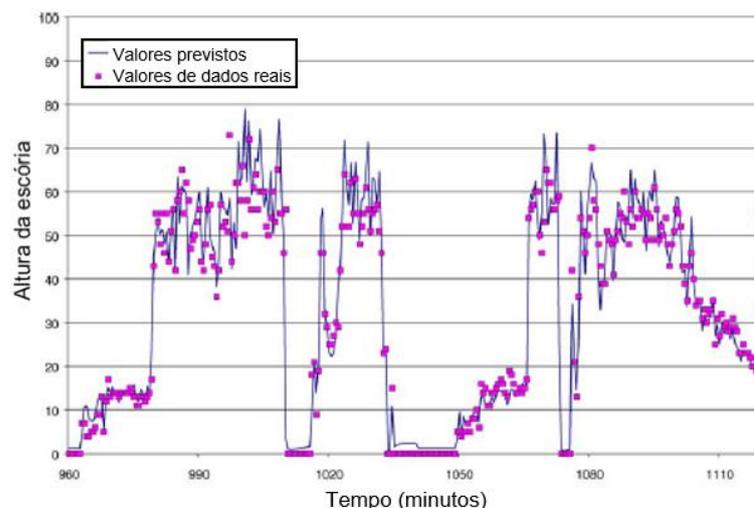


Figura 18: Gráfico da altura da escória pelo tempo de processo, comparação entre os resultados previstos e os dados obtidos. Fonte: (WILSON; KARR; BANNETT, 2004).

Outra forma de analisar a qualidade da espumação seria utilizar a vibração do forno como parâmetro. Este método consiste em utilizar sensores nas paredes do forno para detectar as vibrações das mesmas. Este método já foi descrito em vários trabalhos, tanto em FEA de corrente alternada (MATSCHULLAT et al, 2008), como em FEA de corrente contínua (JEONG; BAN; KIM, 2010) e até mesmo em BOF, onde o sensor foi colocado na lança de oxigênio (IIDA et al. 1984). Na Figura 19, nota-se uma grande diferença entre as vibrações das paredes com/sem a presença da escória espumante.

Para não precisar de sensores para tantas variáveis (físicas, químicas e elétricas), Dehkordi, Moallem e Parsapoor (2011) utilizaram um método baseado no ANFIS - *adaptive neuro fuzzy interference system* - e na *fuzzy logic* que utiliza apenas três grupos de variáveis elétricas: distorção harmônica total de corrente e tensão, harmônicos de corrente e tensão além das variações da corrente e da tensão. Mas, para que o sistema funcione foi necessário um banco de dados fornecido por um especialista, que deve analisar a escória dando nota de -1 (escória péssima) até 4 (ótima), para diversas corridas. Os resultados encontrados (Figura 20) mostram uma boa correlação entre o resultado obtido pelo sistema e as notas dadas pelo especialista. De todos os parâmetros testados para analisar a qualidade da escória três mostraram os melhores resultados: distorção harmônica total de corrente, os harmônicos de sétima ordem da corrente e a variação da corrente trifásica.

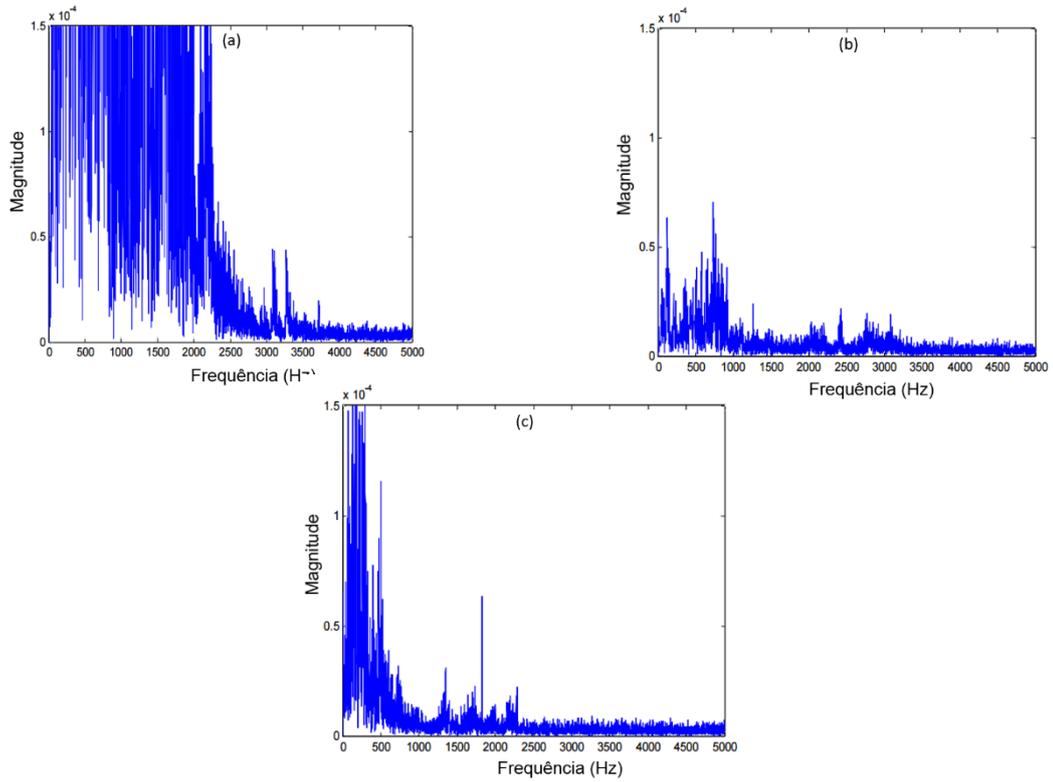


Figura 19: Diferenças no sensor de movimento entre:(a) escória não espumante, (b) intervalo e (c) escória espumante. Fonte: (JEONG; BAN; KIM, 2010).

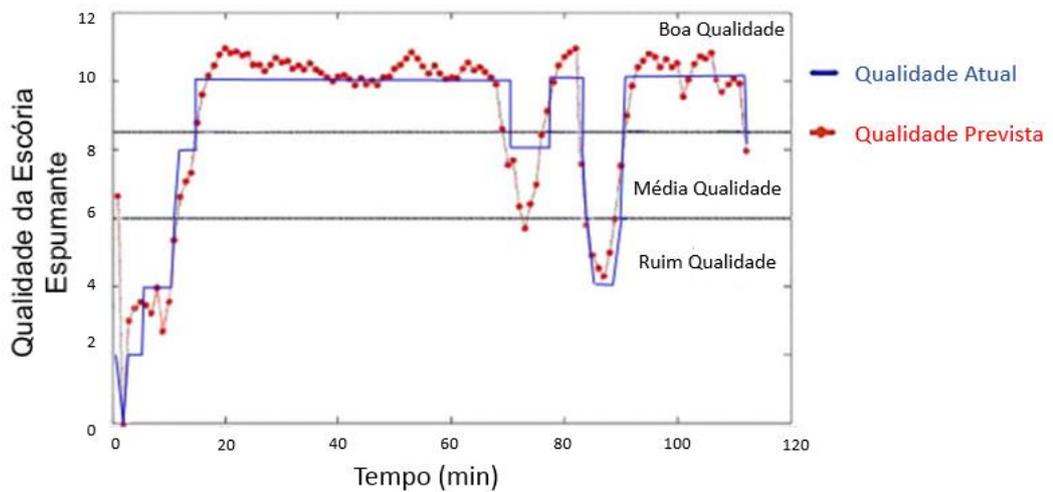


Figura 20: Previsão da qualidade da escória pelo ANFIS. Fonte: (DEHKRDI; MOALLEM; PARSAPOOR, 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho pode ser dividido em duas partes distintas. A primeira corresponde à análise da saturação de MgO, estudando a maneira como a basicidade, teor de FeO e teor de Al₂O₃ atuam na saturação de MgO, quando empregadas base de dados e modelos disponíveis no programa *FactSage 6.4*. A segunda corresponde à análise dos dados industriais de uma usina siderúrgica.

3.1. ANÁLISE DA SATURAÇÃO DE MgO

3.1.1. Equipamentos

Esta etapa do trabalho foi realizada no LaSid, localizado no campus do Vale, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Para fazer a análise da saturação utilizou-se o *software* de simulação termodinâmica *FactSage 6.4*, principalmente o módulo de cálculo nas opções de equilíbrio (*Equilib*) e de diagrama de fases (*Phase Diagram*). Para isso Foi utilizado um computador com a seguinte configuração: 2 Gb de memória RAM, processador intel I5 e Windows 8. Uma descrição geral do programa pode encontrada nos artigos de Bale et al (2002 e 2008) Na Figura 21 é vista a tela de abertura do programa.

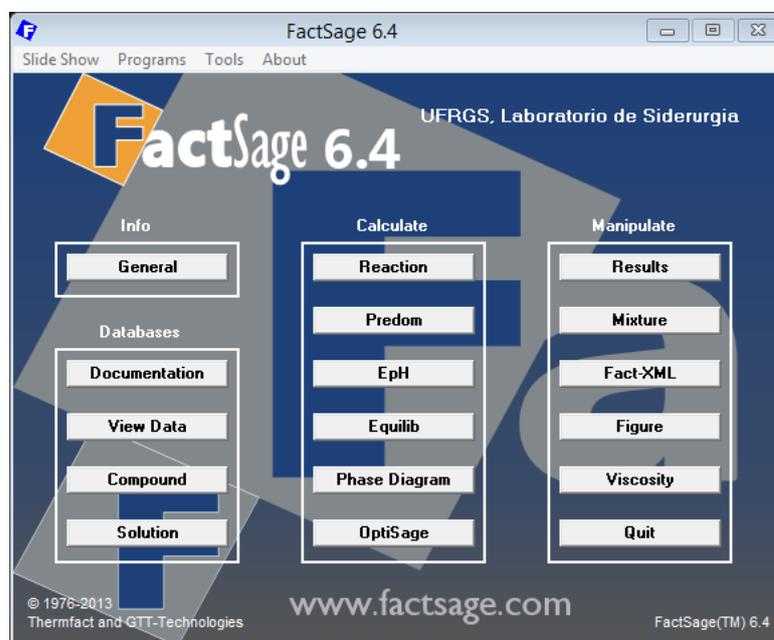


Figura 21: Tela de abertura do *software FactSage 6.4*, mostrando os diferentes módulos do programa.

A Figura 22 mostra a tela com os diferentes bancos de dados do programa *FactSage 6.4*. Foram selecionados os seguintes bancos de dados (*FactSage Database Documentation*, 2015):

- FactPS: banco de dados de substâncias e compostos puros.
- FToxid: banco de dados com dados FToxid contém dados para sólidos e líquidos estequiométricos e soluções de óxidos de 20 elementos (assim como soluções diluídas de S, SO₄, PO₄, H₂O/OH, CO₃, F, Cl e I em escórias fundidas. Neste banco de dados os componentes: Al₂O₃, CaO, FeO, Fe₂O₃, MgO e SiO₂ foram totalmente otimizados e avaliados.
- FTmisc: banco de dados que descreve o ferro líquido contendo Ag, Al, B, Ba, C, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, H, Hf, La, Mg, Mn, Mo, N, Nb, Nd, Ni, O, P, Pb, Pd, S, Si, Sn, Ta, Th, Ti, U, V, W e Zr.

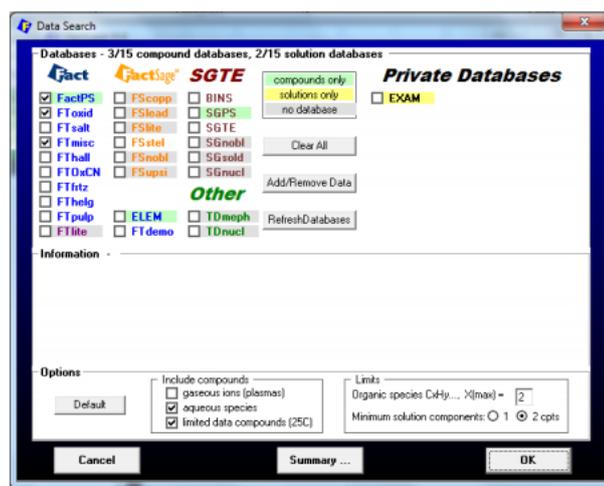


Figura 22: Banco de dados do software *FactSage 6.4*.

3.1.2. Metodologia

Como foi descrito no capítulo 2.2.4, a saturação de MgO é de suma importância para a espumação da escória. Fez-se então a análise da saturação de MgO para diferentes fatores como a basicidade binária, teor de FeO, temperatura e Al₂O₃, conforme pode ser vista na Figura 23.

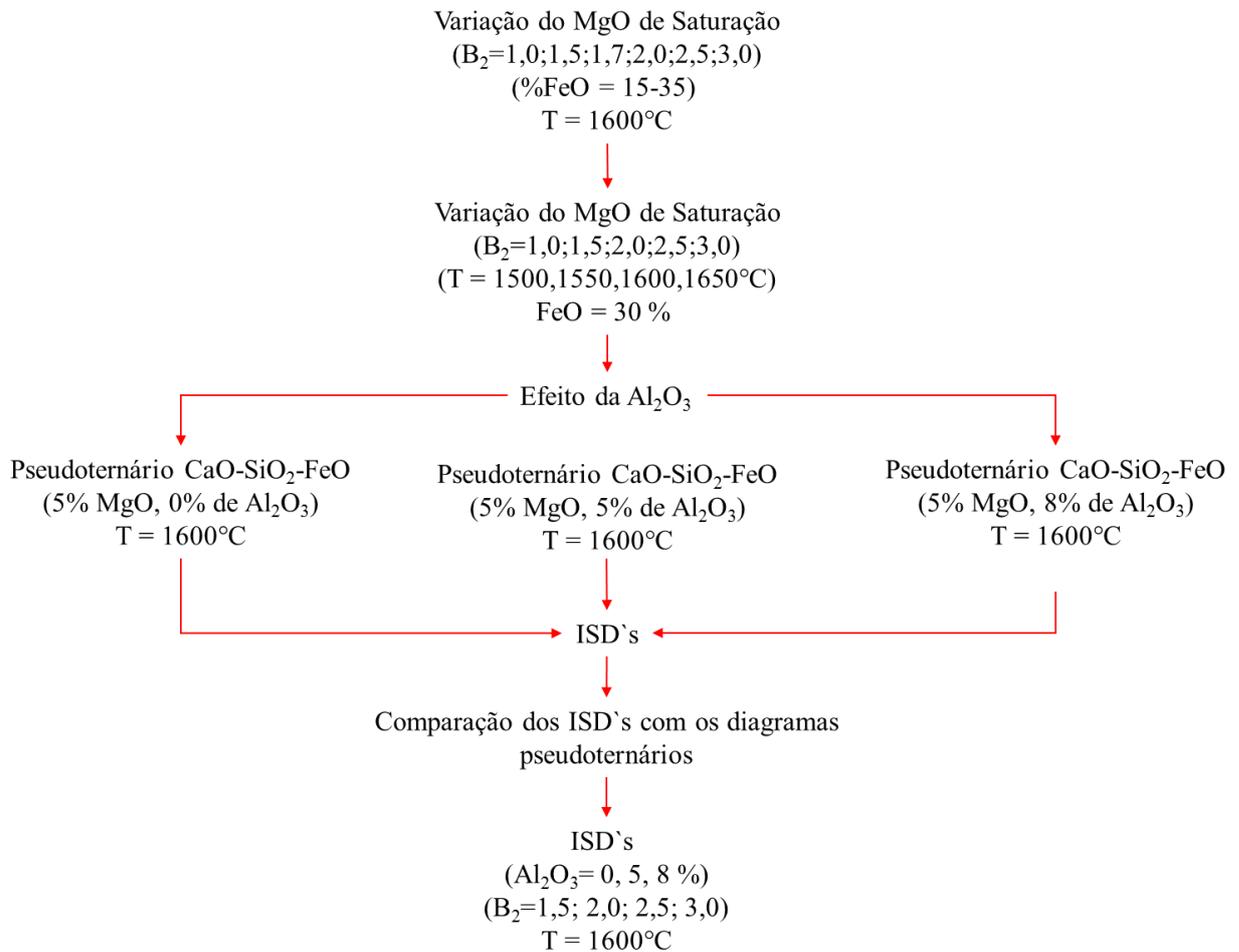


Figura 23: Diagrama esquemático da metodologia utilizada na análise da saturação de MgO.

Conforme mostrado na Figura 23, primeiro se fez o estudo da variação do MgO de saturação para diferentes basicidades (1,0, 1,5, 1,7, 2,0, 2,5 e 3,0), variando o teor de FeO de 15 até 35%, utilizando o módulo de equilíbrio do *software FactSage 6.4*. Para estes cálculos a temperatura considerada foi de 1600°C.

Depois foi feito o estudo do comportamento da saturação de MgO para quatro temperaturas diferentes utilizadas no processo siderúrgico (1500,1550,1600 e 1650°C) variando a basicidade de 1,0 até 3,5. Para que pudesse ser feito, foi estipulado que o teor de FeO seria constante de 30%.

Para estes dois primeiros casos, escolheu-se estas basicidades, teores de FeO e temperaturas, por serem parâmetros comuns que ocorrem no processo.

A análise do efeito da Al₂O₃ na saturação foi feita de outra forma para ser melhor visualizada. Utilizando o módulo de diagrama de fases, fez-se três diagramas pseudoternários CaO-SiO₂-FeO, com 5% de MgO, temperatura de 1600°C e Al₂O₃

de 0, 5 e 8%. Escolheu-se estes teores de MgO e Al₂O₃ por saber que escórias de FEA contêm estes óxidos nestas quantidades. Identificando as linhas de saturação de (Mg,Fe)O (magnésio-wustita), de CaO (na forma de C₂S), e o ponto de intersecção das mesmas – ponto de dupla saturação. Nestes diagramas os campos de maior relevância para este trabalho serão os campos compostos de escória líquida, escória líquida + C₂S e escória líquida + (Mg,Fe)O.

Com a composição química (teor de Al₂O₃ e basicidade binária) dos três pontos de dupla saturação encontrados nos diagramas pseudoternários CaO-SiO₂-FeO, fixando-se os teores de Al₂O₃ e de MgO. Foram feitos três ISD's, um para cada composição química. Estes diagramas foram feitos com o intuito de verificar a igualdade dos pontos de dupla saturação encontrados nos ISD's com os encontrados nos diagramas pseudoternários.

Para verificar o efeito da Al₂O₃ nos ISD's, fez-se a comparação dos ISD's com 0, 5 e 8% de Al₂O₃, para as basicidades de 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0.

3.2. ANÁLISE DOS DADOS INDUSTRIAIS

3.2.1. Recebimento dos dados industriais

Os dados de composição química e dos parâmetros elétricos de 156 corridas foram recebidos.

A amostra é retirada por um operador utilizando uma vara de aço, pela porta de retirada de escória seguindo o procedimento interno da empresa. Então as amostras são enviadas para o laboratório de análises químicas, sendo embutidas e analisadas em um espectrômetro de raio-X modelo PW 2600 X-RAY SPECTROMETER. A resposta é dada no software X40.

O momento da amostragem ocorre quando o forno gasta uma quantidade de energia pré-estabelecida, o que ocorre com aproximadamente 8 minutos de refino.

Os resultados recebidos correspondem aos seguintes óxidos: CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, FeO, MnO, CrO₃, CaF₂, P₂O₅, TiO₂, V₂O₅, K₂O e NaO.

Os parâmetros elétricos foram obtidos através do sistema de aquisição de dados ArcOS, entre os dados recebidos estão:

- Energia elétrica consumida em toda a corrida;
- Energia elétrica consumida apenas durante o refino;
- Tensão do arco elétrico;

- Distorção harmônica total de tensão (THD_v);
- Tempos de processo (*power on* e *power off*).

3.2.2. Análise dos dados

A Figura 24 mostra a metodologia utilizada na análise dos dados industriais.

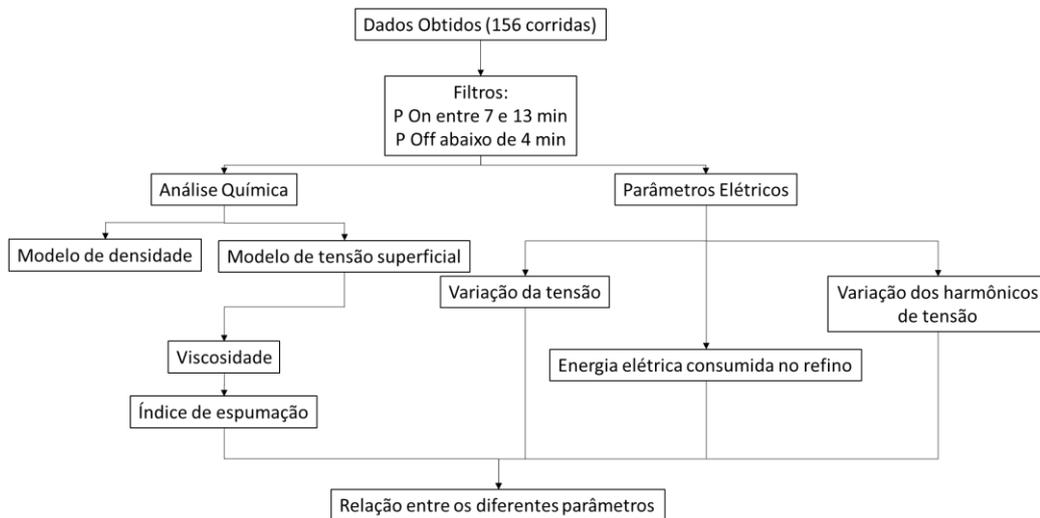


Figura 24: Fluxograma mostrando a metodologia utilizada na análise dos dados industriais.

Conforme a Figura 24, foram recebidos de uma usina siderúrgica os dados de 156 corridas. Todas as corridas analisadas foram produzidas com o mesmo padrão de carga fria, fazendo com que todas as corridas tenham o mesmo teor de fósforo máximo admitido, o mesmo teor de gusa adicionado com a sucata (30 %), garantindo assim uma maior homogeneidade das corridas analisadas, bem como uma menor dispersão dos tempos de *power on* e dos teores de FeO. Além disso, por serem de um mesmo padrão de carga as quantidades de cal (calcítica e dolomítica) adicionadas foram semelhantes.

A aplicação do padrão operacional fica a cargo dos operadores da empresa, fazendo com que as corridas tenham quantidades adicionadas de carbono e de oxigênio diferentes. Essa variação nas injeções pode causar dispersões nos resultados, seja por causarem uma maior geração de energia química, seja por causarem uma maior oxidação do banho.

De todos os elementos presentes na composição química da escória os mais representativos foram escolhidos: CaO, SiO₂, FeO, MgO, Al₂O₃.

Foram feitos histogramas tanto dos óxidos escolhidos, quanto dos tempos de processo. Com eles foram então escolhidos faixas dos tempos de processo no qual

existia a maior quantidade de corridas, assim como faixas de composição química com maior representatividade. Como a temperatura no momento da amostragem não foi averiguada, ela não será analisada neste estudo.

A partir dessas faixas, se obtiveram as diversas relações entre composição química e energia elétrica consumida. Começando pelo teor de FeO, encontrou-se a faixa com o menor gasto energético, e para esta faixa de FeO encontrou-se qual seria a basicidade ótima, ou seja, aquela que resultaria nos menores valores de energia elétrica consumida.

No passo seguinte, realizou-se o caminho inverso. Relacionou-se o consumo de energia elétrica com a basicidade, encontrando a faixa de basicidade ótima. Em seguida, para esta faixa de basicidade ótima, relacionou-se a energia elétrica com o teor de FeO, com o intuito de encontrar o teor de FeO ótimo para a basicidade ótima.

Uma forma de analisar o efeito do FeO e do MgO no gasto energético foi realizada utilizando os ISD's. Conforme explicado na seção 2.2.7, os ISD's são feitos com uma determinada basicidade e temperatura constante. Foram feitos 3 ISD's com basicidades de 2,1, 2,4 e 3, os teores de Al_2O_3 foram escolhidos de forma que uma maior quantidade de corridas possam ser plotadas, resultando em teores de 5,5 e 6,5%. Todos os ISD's foram feitos para a temperatura de 1600°C. Nestes ISD's foram plotadas corridas com as respectivas energias consumidas durante o refino (em kWh) e os tempos de *power on*. Fazendo então, uma relação entre as energias consumidas, a posição da corrida no ISD e os tempos de processo.

Com relação aos parâmetros elétricos primeiro estimaram-se as variações tanto da tensão quanto dos harmônicos totais. Essa variação foi calculada utilizando a fórmula do desvio padrão, conforme equação 16.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{(n-1)}} \quad (16)$$

A relação entre a variação dos harmônicos e o desvio padrão da tensão foi posta em um gráfico para as três fases diferentes. Isto foi feito para verificar se a correlação entre variação dos harmônicos é positiva à variação da tensão do arco elétrico e também para encontrar as diferenças inerentes à disposição das três fases e os correspondentes pontos quentes, como pode ser visto na Figura 25.

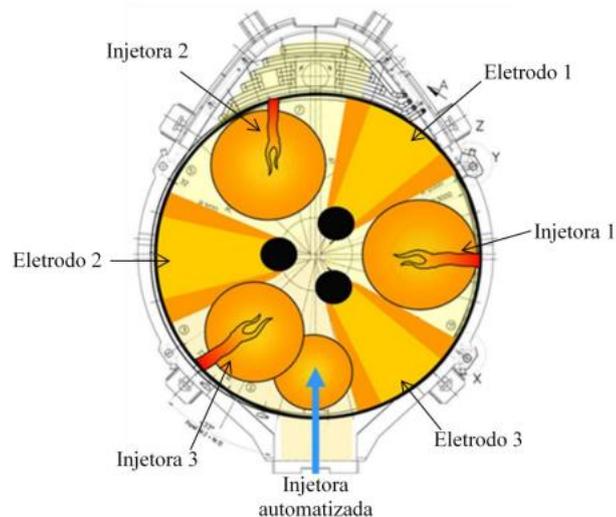


Figura 25: Modelo indicando a localização das 3 fases e das injetoras no FEA. (FAVARETTO, 2014)

Para tentar encontrar a mesma faixa de ótima de FeO, fez-se a relação da variação dos THD_v's com o teor de FeO (entre 25 e 32,5 %).

Utilizando as faixas ótimas obtidas através das relações entre a composição química e a energia consumida/variação dos THD_v's, foi feito o gráfico do desvio padrão do THD com a energia elétrica consumida.

Mesmo existindo uma controvérsia em torno dos índices de espumação, conforme mostrado no capítulo 2.2.3, o comportamento dele foi avaliado com o desvio padrão do THD. Para isso foi escolhido o índice de espumação de Skupien e Gaskell (2000), descrito no capítulo 2.2.3 na equação 12. Assim como a grande maioria dos modelos, este depende de três propriedades físicas, que são a viscosidade, a densidade e a tensão superficial.

A densidade foi calculada através do modelo de Mills e Keene (1987), este modelo está representado na equação 17:

$$\text{Modelo Mills e Keene: } \rho = 2,460 + 0,18(\% \text{FeO}) \quad (17)$$

Onde:

ρ = densidade (g/cm³)

%FeO = percentual em massa do óxido de ferro.

Nota-se que este modelo depende exclusivamente da oxidação da escória, ou seja, teores de FeO

Já a tensão superficial foi calculada através do modelo encontrado no Slag Atlas (1995), conforme equação 18:

$$\text{Modelo Slag Atlas: } \sigma = x_1\sigma_1 + x_2\sigma_2 + \dots \quad (18)$$

Onde:

σ = tensão superficial (N/m);

x_i = fração molar;

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

Esta equação corresponde à adição das contribuições de cada constituinte da escória na tensão superficial total.

Para o cálculo da viscosidade das escórias utilizou-se o programa *FactSage* 6.4. Para isso uma série de etapas foi seguida conforme o fluxograma mostrado na Figura 26.

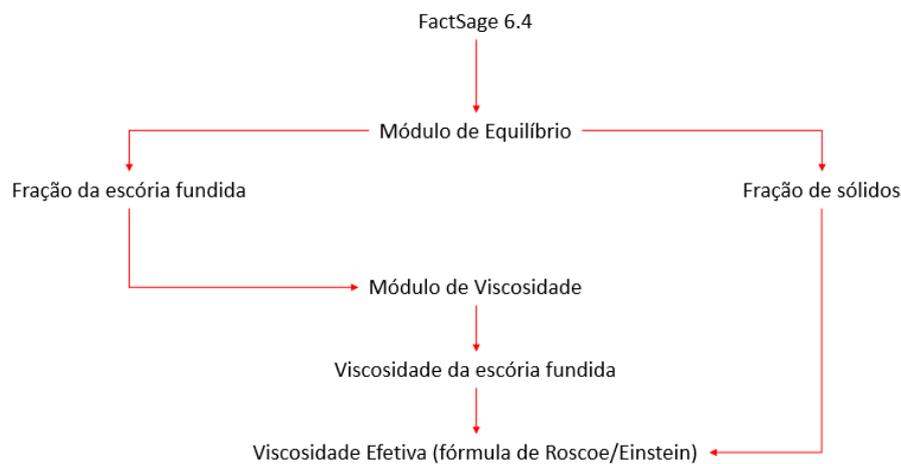


Figura 26: Fluxograma mostrando o cálculo da viscosidade efetiva da escória.

Conforme a Figura 26, se vê que antes de chegar a viscosidade efetiva, utiliza-se os cálculos de dois módulos diferentes: o de equilíbrio (*Equilib*) e o de viscosidade (*Viscosity*).

No modo de equilíbrio utilizaram-se os mesmos bancos de dados apresentados na seção 3.1. Com este módulo foi realizado o cálculo da fração sólida e líquida da escória, para a temperatura de 1600 °C. Além das frações de sólidos e de líquido, também são obtidas as composições químicas de ambos.

A composição química do líquido foi utilizada para calcular a sua viscosidade. Inserindo a composição química da fração líquida no módulo de viscosidade e a temperatura escolhida (1600 °C), o modelo adotado estima a viscosidade em Pa.S.

Para alcançar o resultado da viscosidade efetiva, utilizou-se a equação de Roscoe - Einstein conforme mostrado na equação 15. Nota-se que esta equação utiliza dois resultados obtidos anteriormente, a viscosidade da escória líquida e a fração das partículas sólidas.

Com o resultado da viscosidade efetiva, foi calculado o índice de espumação conforme explicado anteriormente. E a relação entre o índice de espumação e a variação dos harmônicos (desvio padrão dos THD`s) foi então realizada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão mostrados os resultados encontrados. Eles serão apresentados conforme explicado nas figuras 23, 24 e 26 Primeiramente, serão apresentados os resultados do estudo da saturação de MgO, efeitos da basicidade binária, da temperatura, da Al_2O_3 finalizando com os diagramas ternários e ISD's. Após, serão apresentados os resultados da análise dos dados recebidos, iniciando pelas relações entre composição química e a energia elétrica consumida e concluindo com o estudo das variáveis elétricas.

4.1. SATURAÇÃO DE MgO

Como foi descrito no capítulo 2.2.4, a saturação de MgO é de suma importância para a espumação da escória. Fez-se então a análise da saturação de MgO para diferentes fatores como a basicidade binária, teor de FeO, temperatura e Al_2O_3 .

4.1.1. Efeitos da basicidade binária e do teor de FeO

Na Figura 27 pode ser visto a relação entre o teor de MgO de saturação com o teor de FeO, nos quais se variou a basicidade binária, de 1,0 até 3,0.

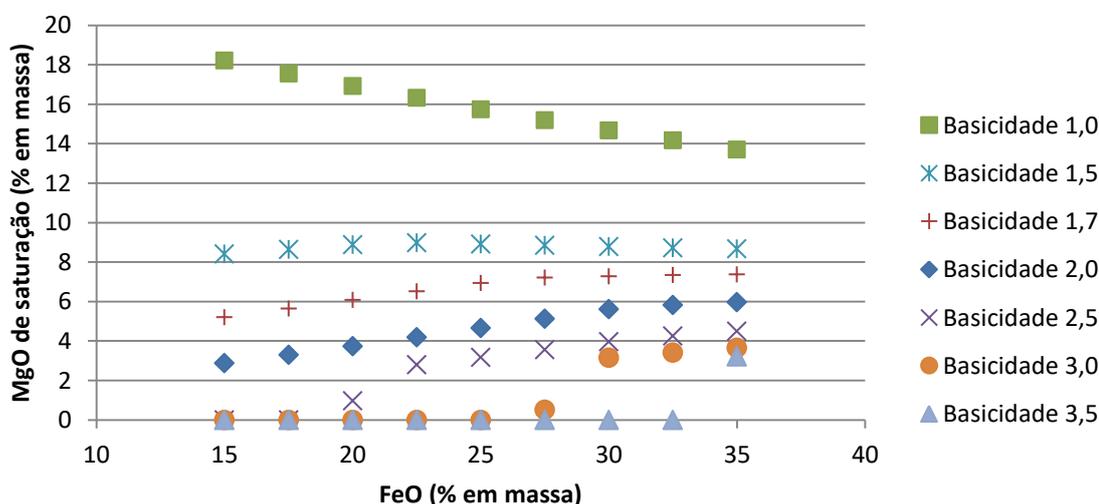


Figura 27: Efeito da basicidade no teor e saturação de MgO, para diferentes teores de FeO a 1600 °C, calculado no *FactSage* 6.4.

Pela Figura 27 vê-se que para diferentes basicidades ocorrem diferentes comportamentos. Nota-se 4 casos diferentes:

- Para basicidades baixas, no caso da basicidade igual a 1,0 nota-se uma queda no valor de MgO com o aumento do FeO;

- Para a basicidade 1,5, vê-se que, a saturação de MgO manteve-se constante com a mudança do teor de FeO;
- Para basicidades de 1,7, 2,0 comportamento é o contrário, a saturação de MgO aumenta com o aumento do teor de FeO.
- Para as basicidades mais altas 2,5, 3,0 e 3,5 nota-se que a escória está saturada em MgO até teores de FeO de entre 20,0 – 22,5 ($B_2=2,5$), 27,5 – 30,0 ($B_2=3,0$) e 32,5 – 35,0 ($B_2=3,5$). Após esse valor o MgO não está saturado seguindo o mesmo comportamento do caso anterior. Estes três últimos casos demonstram o efeito fluxante que o FeO tem nas escórias de refino primário.

De forma geral ocorre a diminuição do MgO de saturação de acordo com o aumento da basicidade o que está conforme a literatura, que afirma: escórias de FEA com uma maior basicidade, $\%CaO/\%SiO_2$ necessitam de um menor teor de MgO para saturação (BANNETT; KWONG, 2010), e também que o teor de FeO tem influência sobre a saturação de MgO (KIM; MIN, 2012).

4.1.2. Efeito da temperatura

Na Figura 28, o gráfico mostra o comportamento do MgO de saturação com a basicidade binária para as temperaturas de 1500, 1550, 1600 e 1650°C.

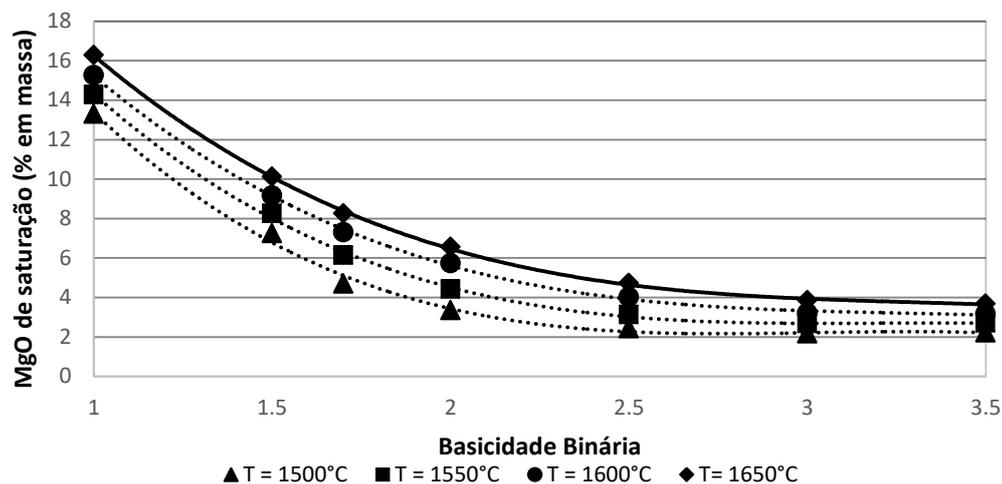


Figura 28: Gráfico do teor de MgO para saturação pela basicidade binária para as temperaturas de 1500 °C, 1550 °C, 1600 °C e 1650 °C e FeO de 30% em massa.

No gráfico da Figura 28, o comportamento do teor de MgO de acordo com o aumento da basicidade ocorre da mesma forma para todas as temperaturas. Conforme a temperatura aumenta, a fração líquida da escória aumenta, causando uma diminuição da viscosidade, isso faz com que o MgO necessário para saturação

aumente também (BENNETT; KWONG, 2010). Entre as basicidades 1 e 2 há queda brusca (de aproximadamente 10 pontos percentuais). Para basicidades maiores (de 2,5 até 3,5) o valor do MgO de saturação varia 0,5%, podendo ser considerado constante.

Com relação à temperatura nota-se que em baixas basicidades ($B_2=1,0$) há uma maior variação de MgO com a temperatura, indo de 16,3% de MgO para 1650°C até 13,3% de MgO para 1500°C. Para a basicidade de 3,5 a variação foi pequena indo de 3,6% de MgO para 1650°C até 2,2% de MgO para 1500°C. Mostrando que as basicidades mais altas suprimem o efeito da temperatura, isso ocorre pelo fato das basicidades mais altas apresentarem uma maior quantidade de sólido diminuindo o aumento da fração líquida causado pelo aumento da temperatura.

4.1.3. Efeito do teor de Al_2O_3

Neste capítulo será mostrado os resultados encontrados através da metodologia utilizada para analisar o efeito do Al_2O_3 na saturação de MgO. Primeiro será mostrado a análise dos diagramas ternários, após será feita a análise dos ISD's.

Diagramas ternários

Nas Figuras 29, 30 e 31 estão os diagramas pseudo-ternários com 5% de MgO com 0%, 5% e 8% de Al_2O_3 respectivamente.

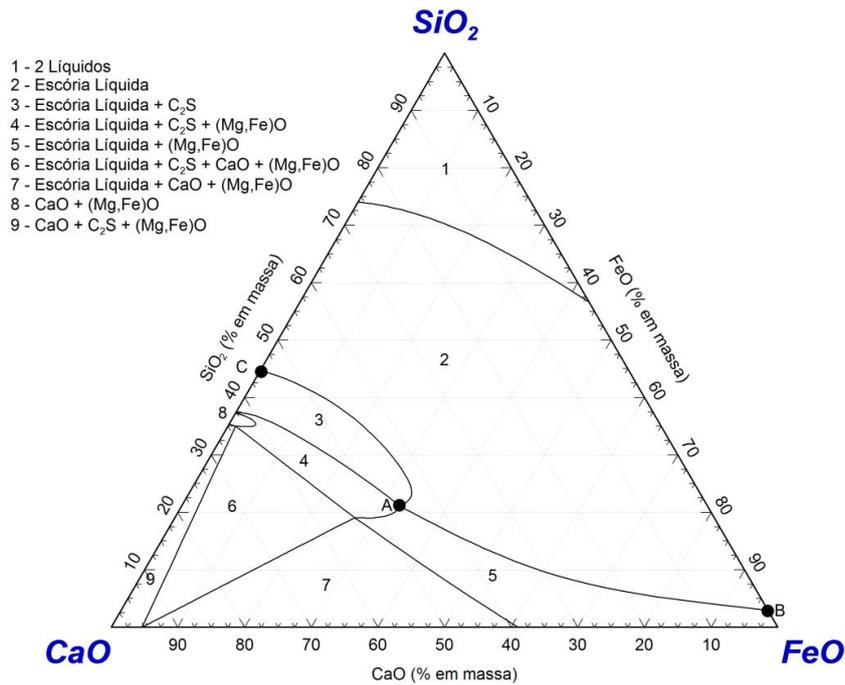


Figura 29: Diagrama pseudo-ternário CaO-SiO₂-FeO, com 5% de MgO, 0% de Al₂O₃ e T = 1600°C. Com indicação dos pontos A - ponto de dupla saturação, B - ponto de saturação de (Mg,Fe)O puro e C – ponto de saturação de C₂S puro.

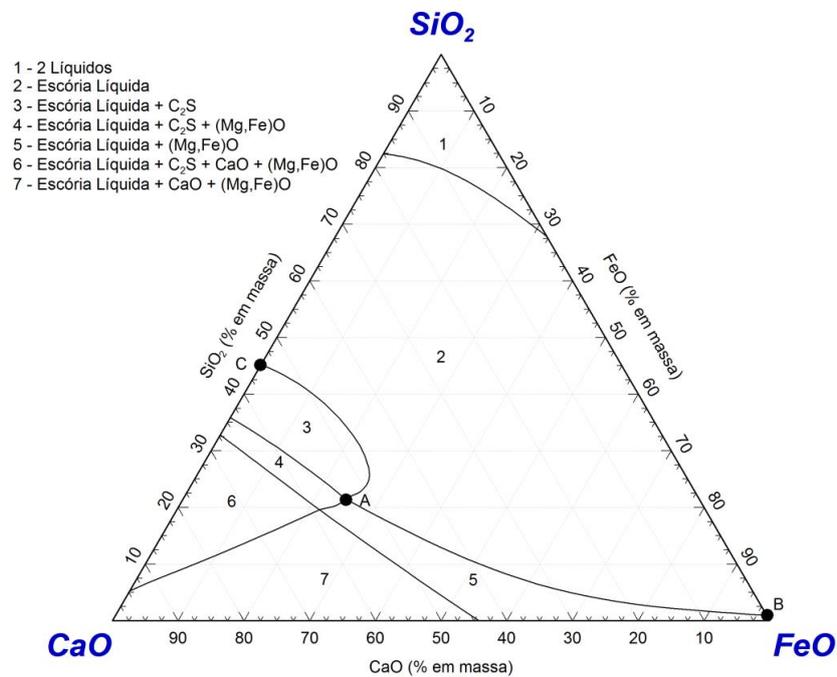


Figura 30: Diagrama pseudo-ternário CaO-SiO₂-FeO com 5% de Al₂O₃ e 5% de MgO e T = 1600°C. Com indicação dos pontos A - ponto de dupla saturação, B - ponto de saturação de (Mg,Fe)O puro e C – ponto de saturação de C₂S puro.

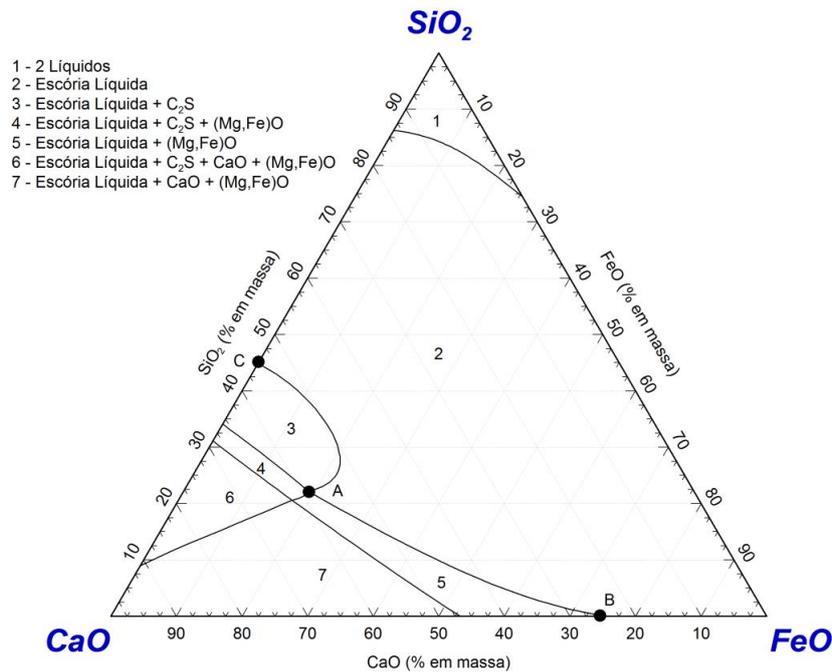


Figura 31: Diagrama pseudo-ternário CaO-SiO₂-FeO com 8% de Al₂O₃ e 5% de MgO e T = 1600°C. Com indicação dos pontos A - ponto de dupla saturação, B - ponto de saturação de (Mg,Fe)O puro e C - ponto de saturação de C₂S puro.

Nota-se que os diagramas ternários apresentados estão com os eixos somando 100%, estão desconsiderando a existência dos óxidos excedentes, MgO e Al₂O₃ nos eixos. Para fazer a leitura será usado como exemplo o ponto C da Figura 29. Na figura o ponto C está com a composição química de: 44,7% de SiO₂, 55,3% de CaO e 0 % de FeO, para conseguir a composição química real é necessário realizar uma regra de três para cada óxido, resultando na composição de 42,5% para SiO₂, 52,5 para CaO e 5% de MgO, conforme especificado na Figura 29.

Os campos de maior interesse neste trabalho são os campos 2, 3 e 5, esses campos são compostos por: líquido, líquido + C₂S e líquido + (Mg,Fe)O, respectivamente. Ou seja, no campo 3 ocorre a precipitação do CaO, na forma de C₂S (2CaO.SiO₂), no campo 5 ocorre a saturação de MgO, na forma de (Mg, Fe)O (magnésio-wustita). Sendo assim estes campos responsáveis por uma melhor espumação da escória (presença de partículas sólidas) e pela proteção dos refratários (escória saturada em MgO).

As linhas A-C e A-B são as linhas de saturação de C₂S e de MgO respectivamente. Nota-se que com 5 % de Al₂O₃, ocorre a supressão de dois

campos da Figura 29: o campo 8 que é composto por C_2S + magnésio-wustita e o campo 9 formado por $CaO + C_2S +$ Magnésio-wustita sólidos.

Na Figura 32 é feita a sobreposição dos três ternários apresentados, para facilitar a visualização das diferenças que a alteração no teor de Al_2O_3 causa nos diferentes campos.

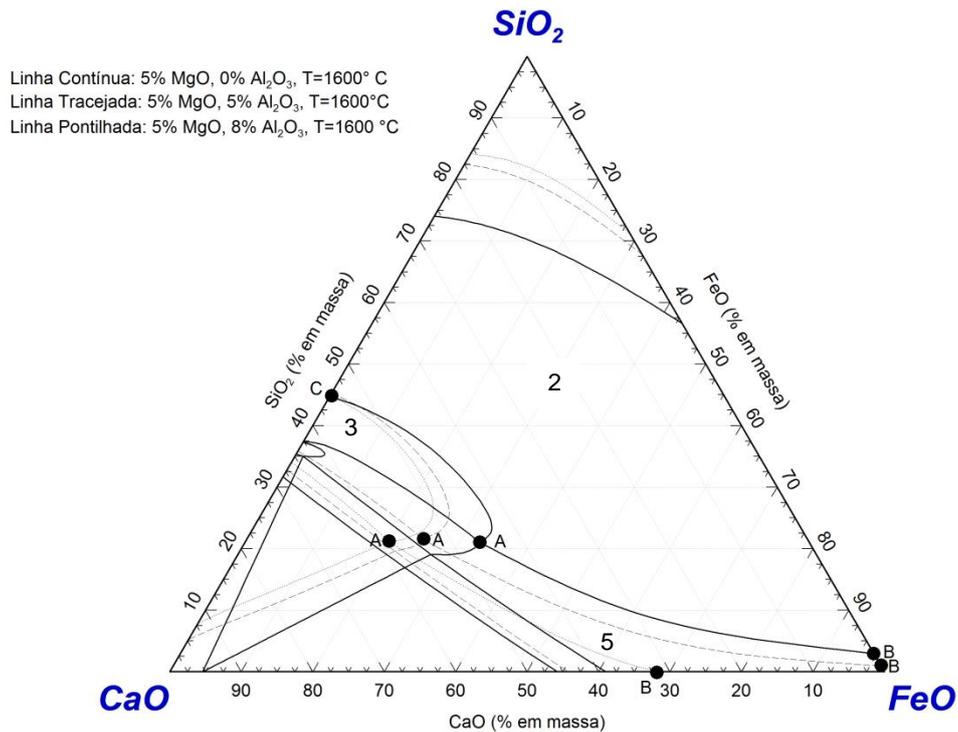


Figura 32: Sobreposição dos diagramas pseudo-ternários com 0%, 5% e 8% de Al_2O_3 e 5% de MgO.

Na Figura 32, observa-se que a presença de Al_2O_3 causa a expansão do campo de escória líquida (campo 2), visto através da mudança nas linhas A-C e A-B.

Outra diferença importante ocorre para o ponto A, que segundo Paulino et al (2014) é o ponto de dupla saturação. Ou seja, é o ponto de intersecção dos campos 2, 3 e 5 das Figuras 29, 30 e 31, neste ponto ocorre a saturação tanto do CaO , na forma de C_2S quanto a saturação de MgO, na forma de magnésio-wustita.

Houve uma grande mudança no ponto A com a mudança no teor de Al_2O_3 , conforme pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6: Composição química dos pontos de dupla saturação (ponto A) para as escórias com a) 0% de Al_2O_3 , b) 5% de Al_2O_3 e c) 8% de Al_2O_3 . Valores em % de massa.

	a	b	c
SiO_2	20,22	19,40	18,35
CaO	43,66	48,46	51,12
B_2	2,15	2,50	2,78
FeO	31,11	22,13	17,50
MgO	5,0	5,0	5,0

O teor de Al_2O_3 tem uma forte influência no ponto A, pela Tabela 6 pode-se ver que quanto maior o teor de Al_2O_3 , maior é a basicidade (indo de 2,15 para 0% até 2,78 para 8% de Al_2O_3) e menor é o teor de FeO necessário para a dupla saturação, evidenciando o efeito fluxante da alumina, conforme mostrado por Kim e Min (2012).

Diagramas de saturação isotérmicos

Seguindo a metodologia apresentada no capítulo 3.1.2, fizeram-se os ISD's com nas Figuras 33, 34 e 35.

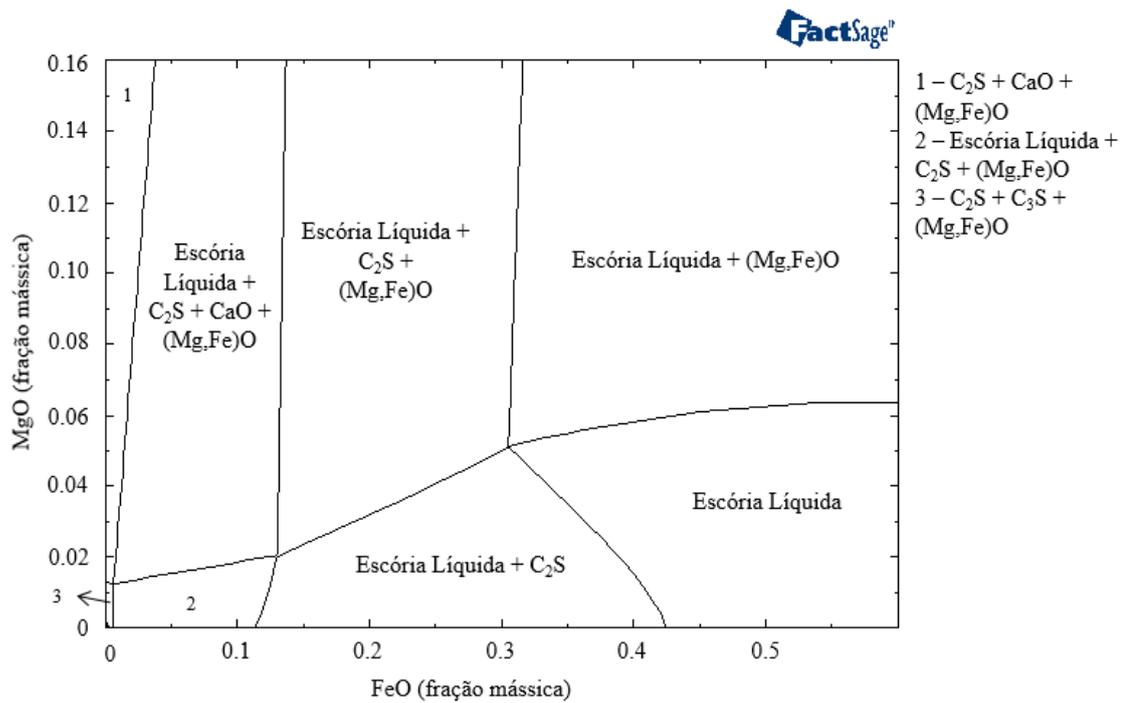


Figura 33: Diagrama de saturação isotérmico $B_2=2,15$ e $T = 1600^\circ C$.

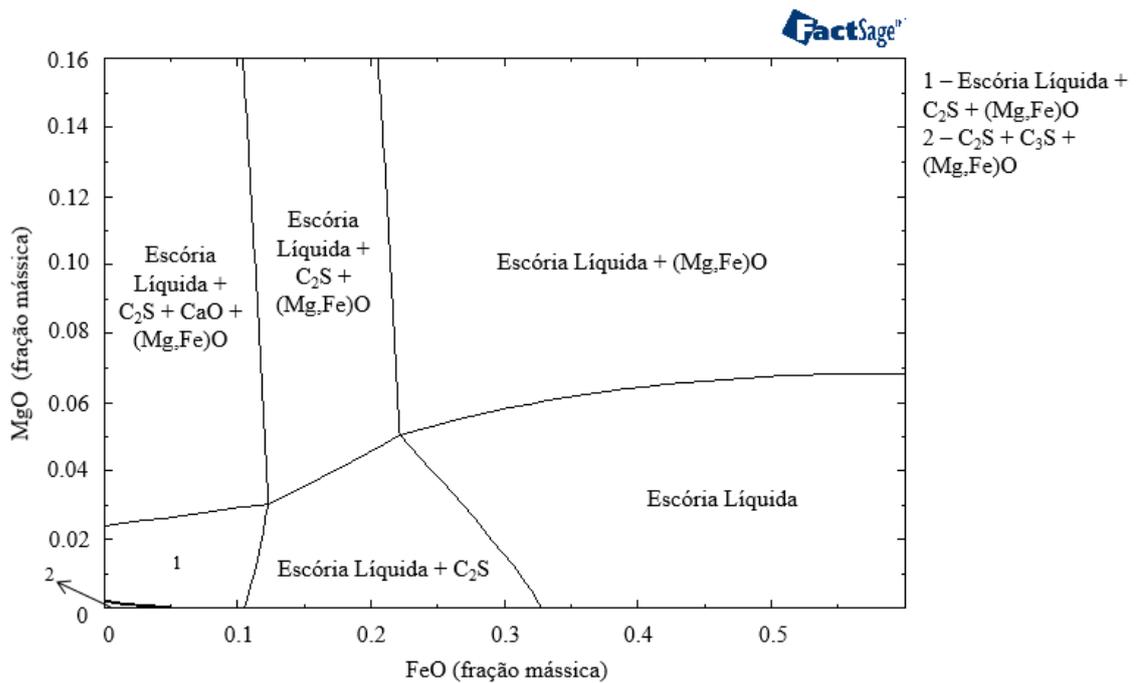


Figura 34: Diagrama de saturação isotérmico $B_2=2,5$, 5% de Al_2O_3 e $T=1600^\circ C$.

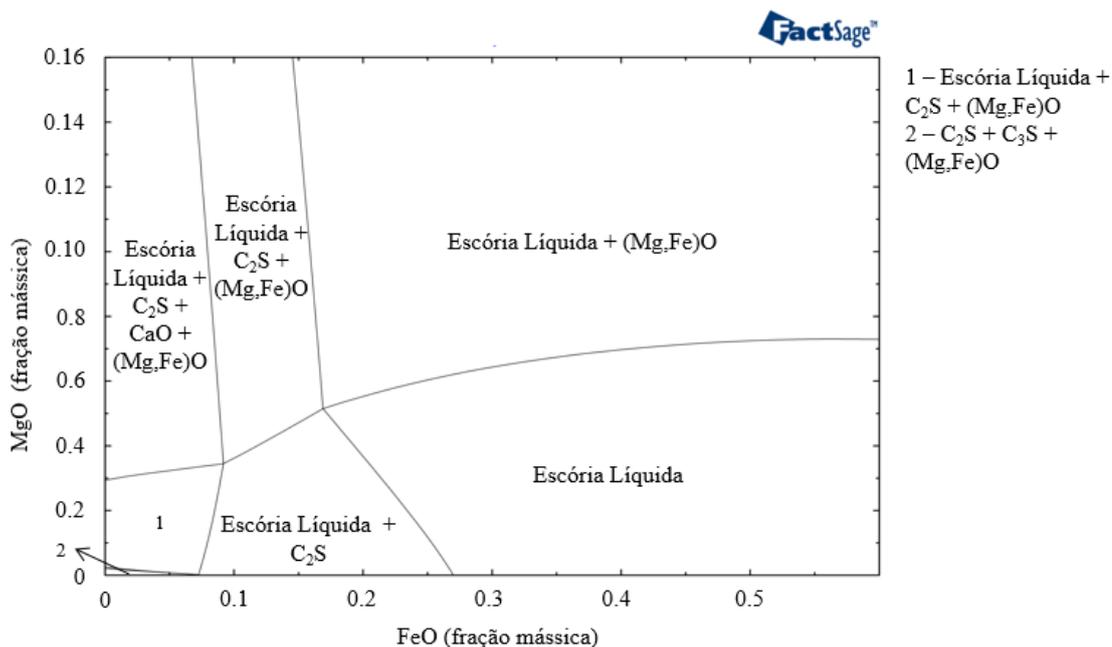


Figura 35: Diagrama de saturação isotérmico com $B_2=2,78$, 8% de Al_2O_3 e $T=1600^\circ C$.

A comparação dos pontos de dupla saturação encontrados nos ISD's com os pontos encontrados nos ternários (ver composição química na Tabela 6) pode ser visualizada na Tabela 7.

Tabela 7: Comparação dos valores do ponto de dupla saturação dos ternários com 0, 5 e 8 % de Al_2O_3 e seus respectivos ISD's. Valores em % de massa.

	Ternário	ISD	Ternário	ISD	Ternário	ISD
B_2	2,15		2,50		2,78	
Al_2O_3	0		5		8	
FeO	31,11	30,5	22,13	22,25	17,50	16,95
MgO	5,0	5,07	5,0	5,01	5,0	5,14

Na Tabela 7 pode ser visto que há pequenas diferenças entre os teores de FeO e MgO encontrados nos pontos de dupla saturação dos ternários com os pontos encontrados nos ISD, diferenças de aproximadamente 0,6% de FeO e 0,1 % de MgO para as basicidades de 2,15 e 2,78. Para a basicidade 2,50 os valores

encontrados estão ainda mais próximos variando apenas 0,12 % de FeO e 0,01% de MgO.

Essa pequena diferença observada mostra que os ISD podem ser utilizados para prever o comportamento de escórias com composição químicas complexas, com a presença de Al_2O_3 , por exemplo.

As diferenças que a alumina causa nos ISD's podem ser vistas na Figura 36, foram feitas sobreposições dos gráficos para facilitar a visualização para as basicidades binárias de 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0.

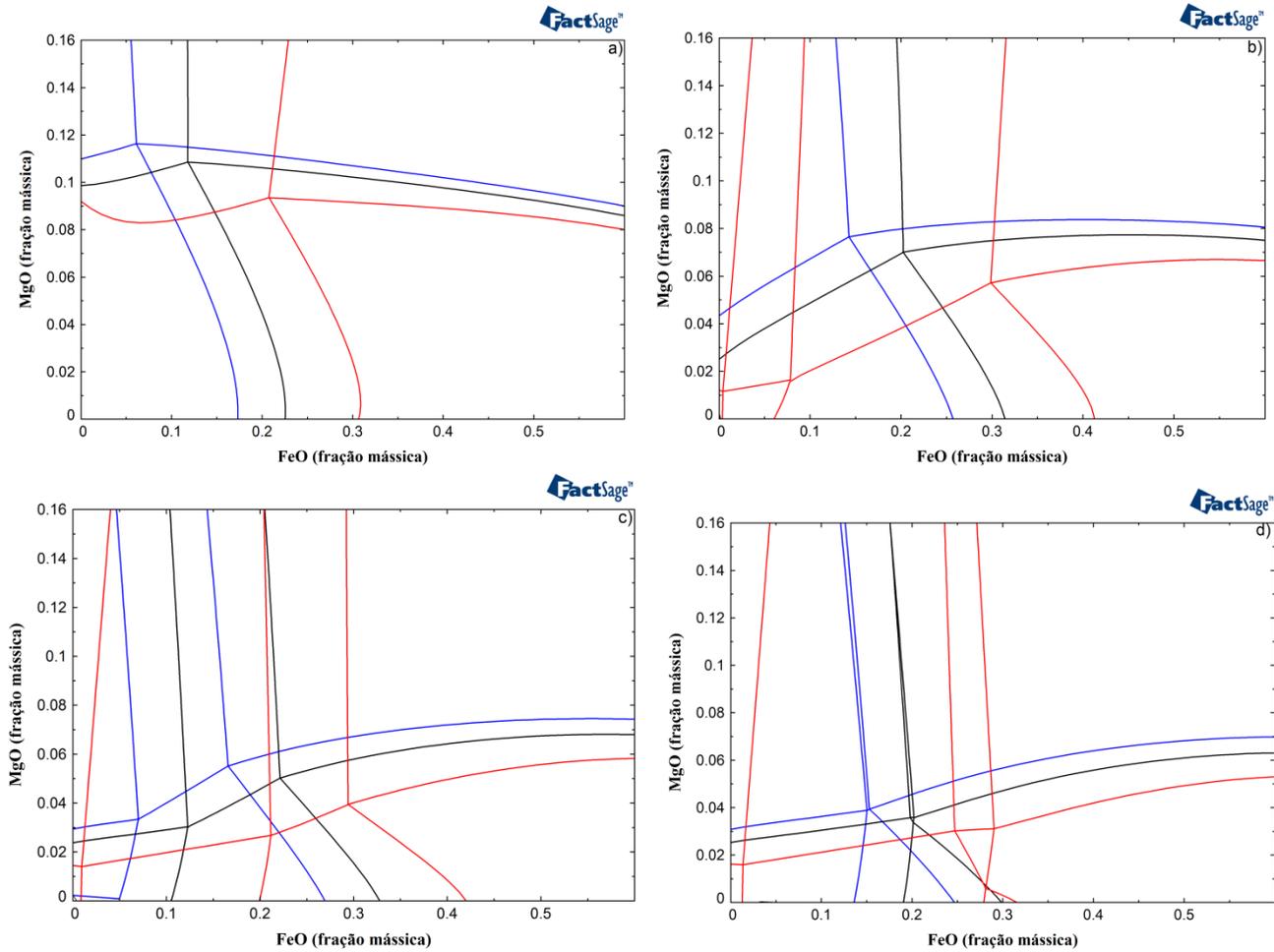


Figura 36: Diagramas de saturação isotérmicos para diferentes basicidades binárias, linhas vermelhas diagramas feitos sem a presença de Al_2O_3 , linhas pretas, diagramas feitos considerando a presença de 5% de Al_2O_3 e linhas azuis considerando a presença de 8% de Al_2O_3 , $T = 1600^\circ\text{C}$. (a) basicidade binária 1,5; (b) basicidade binária 2,0; (c) basicidade binária 2,5; (d) basicidade binária 3,0.

Para as quatro basicidades vê-se que a alumina tem os mesmos efeitos. Com o aumento do teor de Al_2O_3 ocorre o aumento do MgO necessário para a saturação. Ocorre também a diminuição do FeO necessário para a dupla saturação, como no caso do ISD com basicidade 2,0, o FeO necessário para a dupla saturação caiu de 30 % (sem Al_2O_3) para 15 % (com 8 % de Al_2O_3). Com estes dois efeitos somados ocorrem o mesmo que foi visto para os diagramas pseudo-ternários, há um aumento no campo líquido.

Ao se comparar os resultados obtidos com os ISD's mostrados na Figura 11 notam-se grandes diferenças. Nos diagramas de Pretorius e Carlisle (1998) as linhas de saturação de MgO em todos os casos tem correlações negativas com o FeO , nos diagramas da Figura 36 o único caso com correlação negativa é mostrado para a basicidade 1,5, para todos os outros ISD's a correlação do MgO com o FeO é positiva, independente do teor de Al_2O_3 presente.

4.2. ANÁLISE DOS DADOS INDUSTRIAIS

Após ter sido feita a análise do efeito da alumina tanto nos diagramas ternários quanto nos ISD's, fez-se a análise dos dados industriais recebidos.

4.2.1. Composição química e tempos de processo

Como se têm apenas uma amostra de composição química para cada corrida fizeram-se histogramas de diferentes parâmetros para verificar a variação da composição química do grupo de corridas recebidas (ver Figura 37). Para isso escolheram-se os seguintes dados: o percentual de FeO , a basicidade binária, o percentual de Al_2O_3 e de MgO .

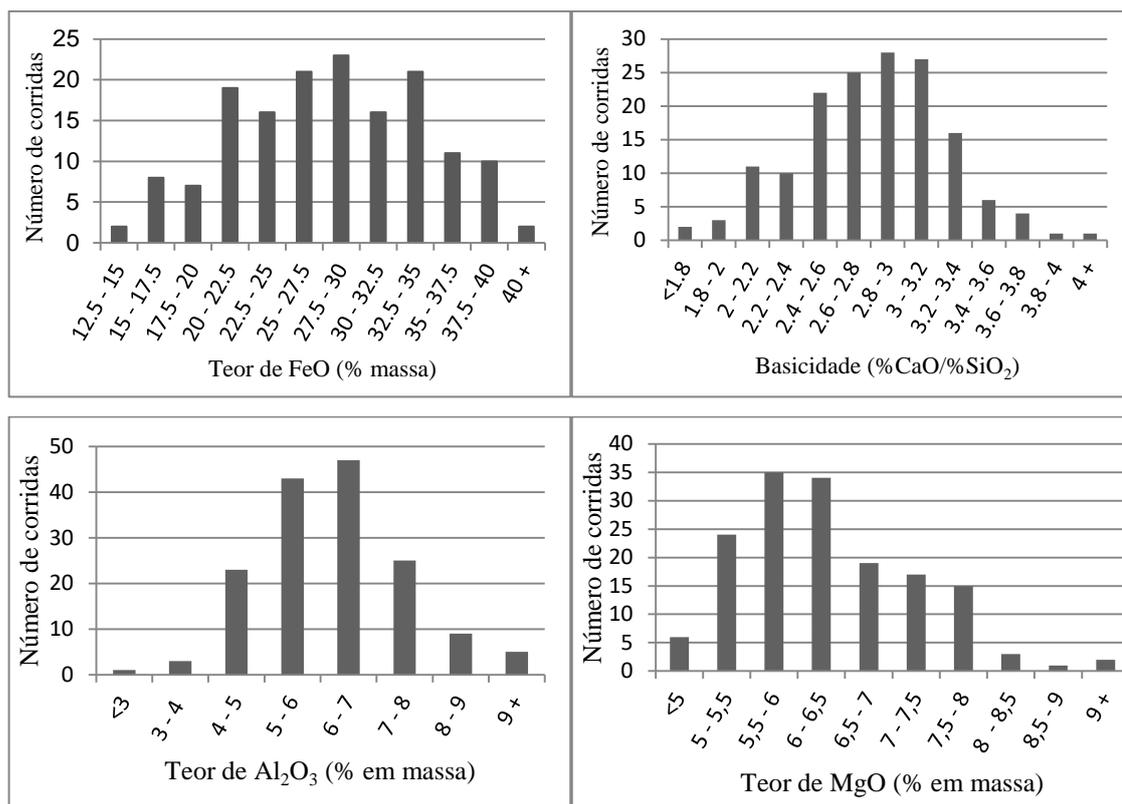


Figura 37: Histograma dos diferentes óxidos e da basicidade das amostras de escória.

Observando a Figura 37, nota-se que todos os gráficos apresentam uma distribuição que poderia se aproximar a normal dos dados. No gráfico do teor de FeO, 75% das corridas foram produzidas com o FeO entre 20 e 35 %, sabe-se pela literatura que esta faixa de FeO corresponde a faixa ótima tanto para a desfosforação quanto para a espumação da escória (CORBARI et al, 2009; AMINORROYA; EDRIS, 2002; URBAN; WEINBER; CAPPEL, 2014).

Para a basicidade binária tem-se que a concentração ocorre para basicidades de 2,4 até 3,2 (65% das corridas), este parâmetro é importante já que, se a escória estiver muito básica, haverá o excesso de partículas sólidas, prejudicando assim a espumação, o contrário também ocorre, para o caso da escória estar muito fluída, a espumação também é prejudicada (PRETORIUS; CARLISLE, 1998; WU; ALBERSSON; SICHEN, 2010, ITO; FRUEHAN, 1989a).

Com relação à alumina (Al₂O₃), vê-se a concentração para uma faixa estreita de composição química, estando entre 5 e 7%.

Para o caso do MgO a faixa de composição química foi ainda mais estreita, ficando entre 5 e 6,5 %. Encontra-se na literatura que esta faixa pode representar a faixa de MgO necessária para a saturação, dependendo do teor de FeO e da

basicidade (KWONG; BANNETT, 2001; BIELEFELDT et al, 2015).

Fizeram-se também os histogramas para os tempos de *power on* e de *power off* do refino, Figura 38.

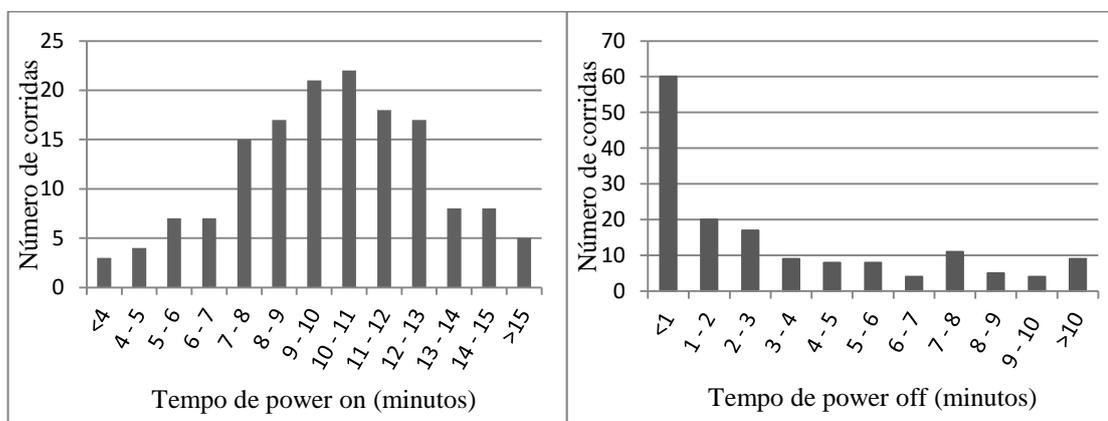


Figura 38: Histograma dos tempos de processo ocorridos durante o refino.

Estes gráficos mostram que, apesar de 70 % das corridas terem um baixo tempo de *power off* durante refino (tempo < 4 minutos), existem muitas corridas (30%) com altos tempos de *power off* (acima de 4 minutos). Esses altos tempos se devem, provavelmente, a atrasos que ocorrem no forno, seja por sucata alta (quando a sucata impede o fechamento da abóboda do forno), por atrasos do lingotamento contínuo, ou atrasos na metalurgia secundária. Já no caso do *power on* durante o refino, a maior parte das corridas (70 %) está localizada em uma grande faixa, com tempos de 7 a 13 minutos, com 30% das corridas com *power on* fora desta faixa, estes altos tempos de *power on* podem ser devidos a casos de atrasos em processos posteriores, ou devido a uma qualidade de sucata inferior, necessitando de um tempo maior de refino.

4.2.2. ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA NO REFINO

Neste capítulo serão mostradas as diferentes relações entre a energia elétrica consumida com a composição química da escória.

Teor de FeO

Fizeram-se as relações entre os teores de FeO com a energia elétrica consumida durante o refino para as principais faixas obtidas, ou seja, foram feitos gráficos para cada uma das faixas de FeO, de 20,0 – 22,5% (11 corridas), 22,5 – 25,0% (12 corridas) , 25,0 – 27,5% (12 corridas), 27,5 – 30,0% (12 corridas), 30,0 – 32,5% (10 corridas) até 32,5 – 35,0% (11 corridas). Decidiu-se separar os dados em

faixas por haver uma grande dispersão dos valores de energia consumidos, diminuindo assim a variabilidade dos pontos. Como para estes gráficos utilizou-se somente as corridas com *power off* menor que 4 minutos e *power on* entre 7 e 13 minutos, resultando em 68 corridas das 156 corridas iniciais. Os resultados estão mostrados na Figura 39.

Na Tabela 8, estão os valores máximos e mínimos encontrados nas diferentes faixas de FeO utilizadas nos gráficos da Figura 39.

Tabela 8: Energia elétrica mínima consumida e energia elétrica máxima consumida no refino para as faixas de FeO.

Faixa de FeO (%)	Energia elétrica consumida mínima (kWh/t)	Energia elétrica consumida máxima (kWh/t)	R ²
20,0 – 22,5	39,14	85,18	0,28
22,5 – 25,0	37,89	104,32	0,14
25,0 – 27,5	42,46	108,14	0,43
27,5 – 30,0	42,14	87,51	0,36
30,0 – 32,5	62,79	114,09	0,56
32,5 – 35,0	66,91	103,26	0,57

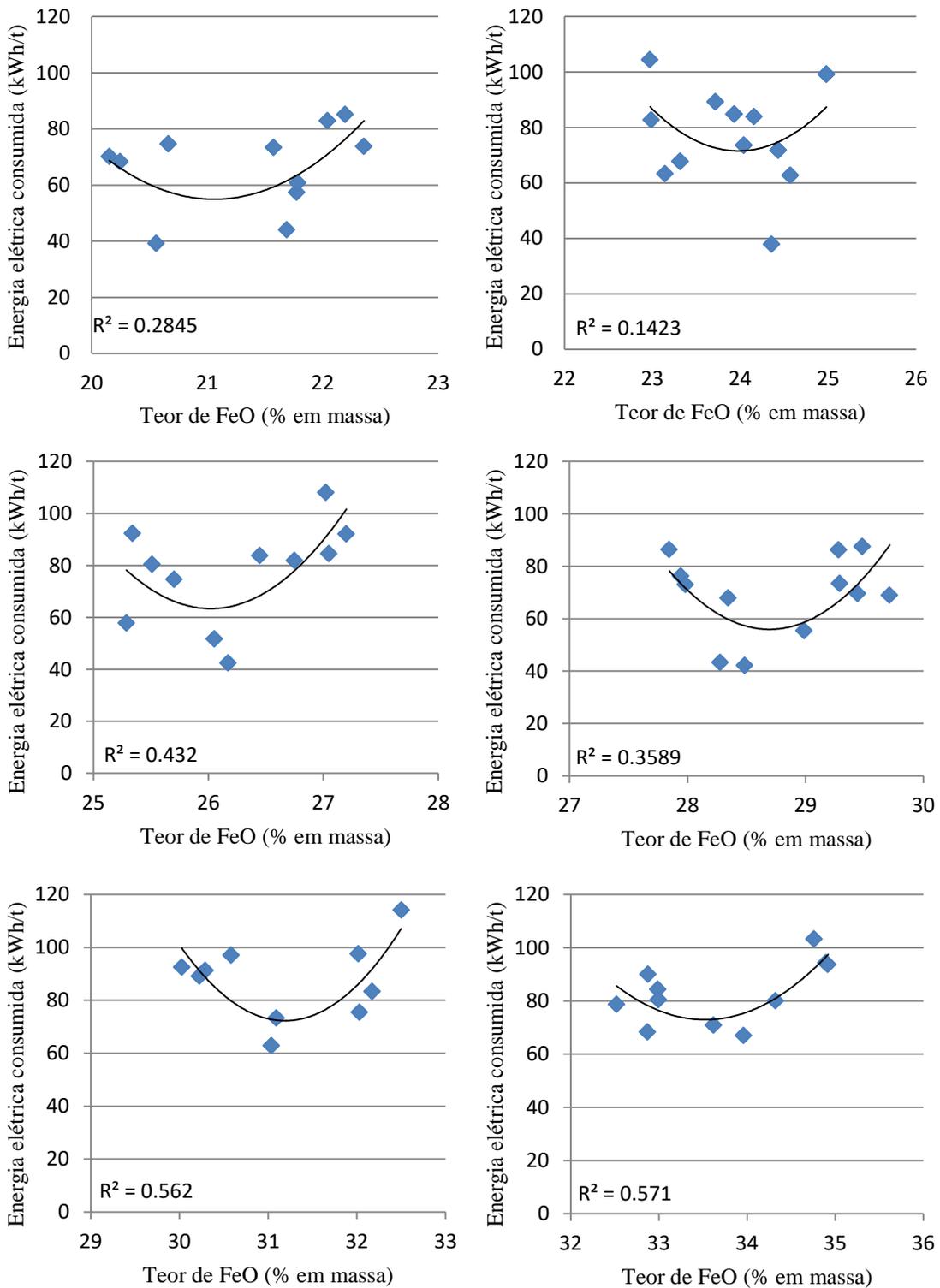


Figura 39: Energia elétrica consumida com relação ao teor de FeO.

Pela Figura 39 vê-se que para quase todas as faixas de FeO escolhidas obteve-se uma correlação regular entre os pontos, considerando que são dados industriais, encontrando também pontos de menor gasto energético. Ocorreu que

para os maiores valores de FeO, entre 30 – 35%, foram encontradas as melhores correlações, com R^2 próximos a 0,6.

Nota-se, pela Tabela 8, que os valores mínimos de energia consumida foram próximos para os 4 primeiros casos (teores de FeO entre 20 e 30%), já quando o teor de FeO foi maior que 30 % os valores de mínimos aumentaram bastante, 20 kWh/t aproximadamente, isso pode indicar uma melhor espumação para valores de FeO menores que 30%. Com relação aos valores máximos, os menores valores ocorreram para faixas de FeO entre 20,0 – 22,5 % e 27,5 – 30,0 %, para as outras faixas analisadas os valores aumentaram em 20 kWh/t aproximadamente, com o valor mais alto para a faixa de 30 - 32,5 %. Pode-se dizer então que os melhores resultados ocorreram para a faixa com valores entre 27,5 até 30,0 % de FeO, pois encontrou-se os menores pontos de máximo e mínimo para gasto energético e uma correlação entre os pontos maior que a encontrada para o intervalo de FeO de 20,0-22,5 % ($R^2=0,36$ e $R^2=0,28$) respectivamente.

Para continuar a análise do teor ótimo de FeO (27,5 até 30,0%), se fez o gráfico da basicidade pela energia elétrica consumida conforme pode-se ver na Figura 40.

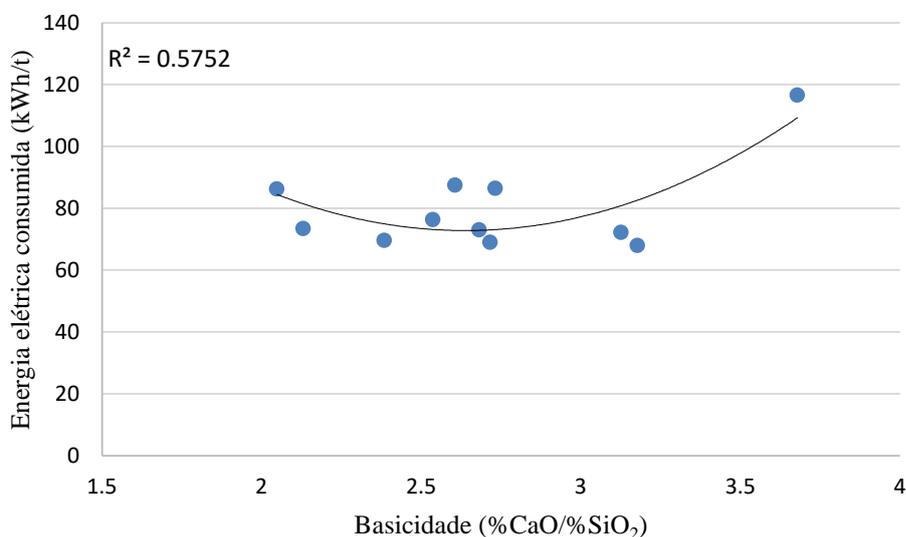


Figura 40: Energia elétrica consumida no refino pela basicidade binária para corridas com FeO entre 27,5 e 30 % .

Apesar da curva na Figura 40 mostra o teor ótimo de basicidade que resultaria no menor gasto energético, sendo esse valor de aproximadamente 2,5. Nota-se que existem apenas 3 pontos com basicidade acima de 3, sendo que dois

deles estão com baixo consumo de energia elétrica, indicando que é necessário um maior número de dados com esta faixa de FeO.

Basicidade

Com relação à basicidade, foram feitos gráficos para as seguintes faixas, 2,4-2,6, 2,6-2,8, 2,8-3,0, 3,0-3,2, ver Figura 41. Essas faixas foram escolhidas já que apresentaram os maiores números de corridas realizadas. Na realização destes gráficos, retirou-se as corridas com *power off* acima de 4 minutos, e também se filtrou o *power on*, escolhendo a faixa ótima apresentada na Figura 38, ou seja, as corridas com o *power on* entre 7 e 13 minutos.

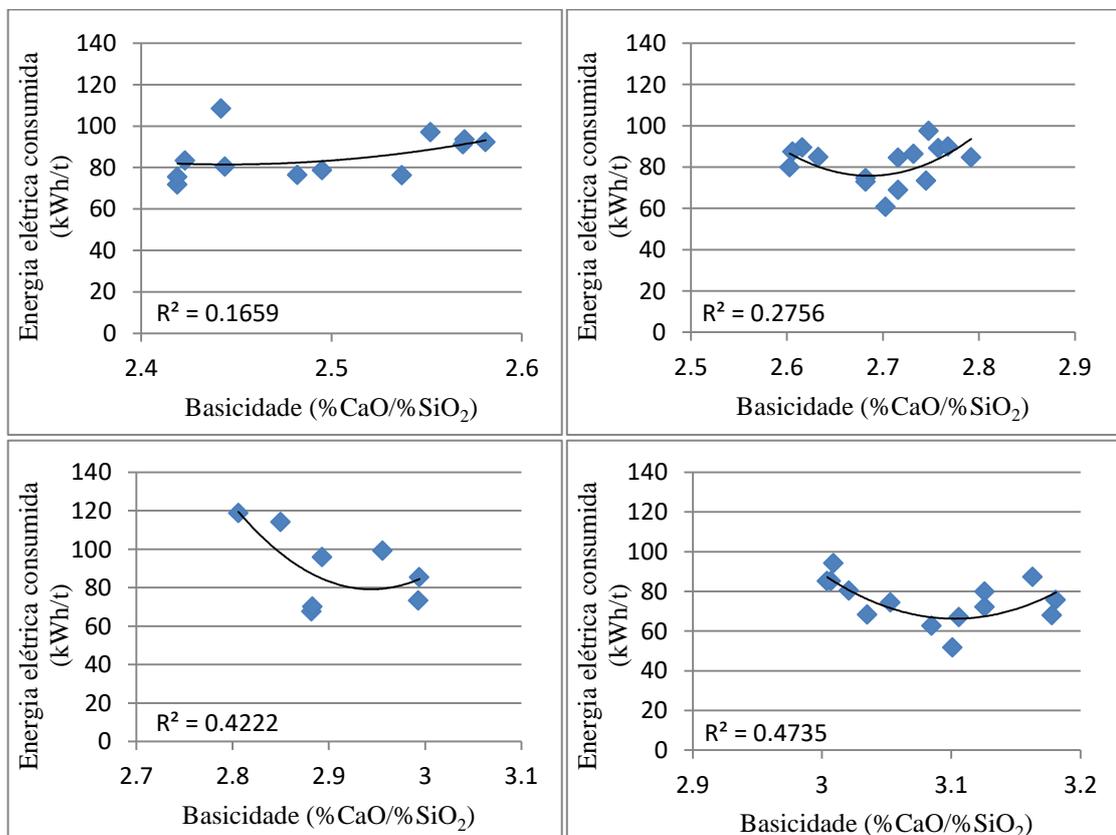


Figura 41: Variação da energia elétrica consumida no refino pela basicidade.

Na Tabela 9, está apresentada a energia consumida mínima e energia consumida máxima para as faixas de basicidade.

Tabela 9: Energia mínima consumida e energia máxima consumida para as faixas de basicidade.

Faixa de Basicidade (%CaO/%SiO ₂)	Energia elétrica consumida mínima (kWh/t)	Energia elétrica consumida máxima (kWh/t)	R ²
2,4-2,6	71,75	108,54	0,17
2,6-2,8	69,02	97,59	0,28
2,8-3	67,68	114,09	0,42
3,0-3,2	51,74	94,24	0,47

Pelos gráficos da Figura 41 e pela Tabela 9, pode-se identificar uma faixa de basicidade que apresentou o menor consumo de energia elétrica. Escolhendo assim a faixa de basicidade entre 3,0 e 3,2, pois além de apresentar a melhor correlação das quatro faixas escolhidas, apresentou também o gasto energético máximo de menor valor, de 94,24 kWh/t, e o ponto de menor gasto energético, de 51,74 kWh/t. Também se nota que para a faixa de basicidade de 2,4 – 2,6, a correlação está muito baixa ($R^2=0,17$), não permitindo que conclusões possam ser afirmadas. Nota-se que para todas as faixas as correlações estão baixas ($R^2=0,17$) ou moderadas ($R^2=0,47$). Isto pode ter ocorrido pela variação dos outros óxidos presentes na escória, pois eles podem afetar a basicidade, caso do MgO e do FeO (GHAG; HAYES; LESS, 1998).

Adicionalmente foi elaborado o gráfico da energia consumida pelo teor de FeO, dada uma faixa de basicidade que apresentou o melhor resultado (basicidade entre 3,0 e 3,2), ver Figura 42.

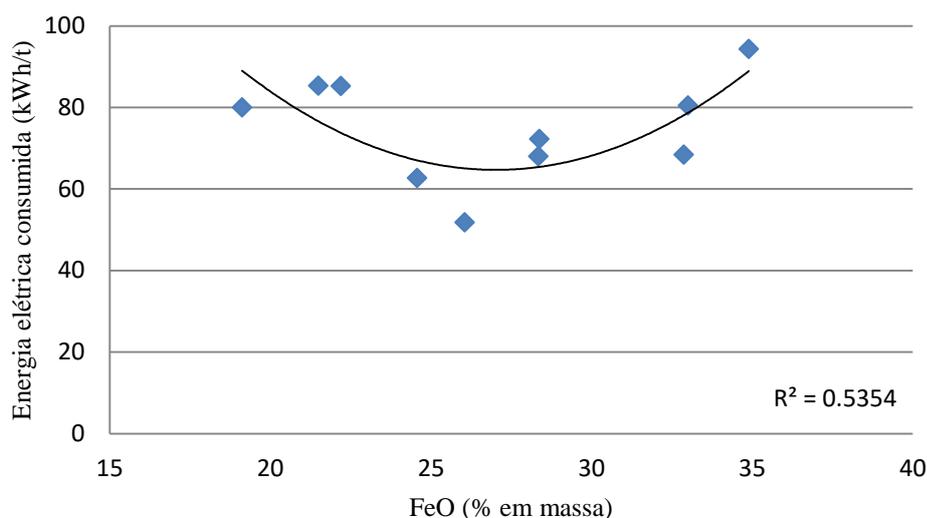


Figura 42: Energia elétrica consumida em função do teor de FeO para $B_2=3,0 - 3,2$.

Na Figura 42, vê-se que o gráfico de FeO pela energia elétrica consumida para a faixa de basicidade entre 3,0 – 3,2, apresentou correlação mais alta, ainda que moderada ($R^2=0,54$), a linha de correlação indica um valor de FeO próximo a 27% para o menor consumo energético. Sendo este valor próximo da faixa de FeO encontrada no capítulo 4.5.1, que foi de 27,5 – 30%.

Este valor de FeO indica uma melhor espumação, talvez por haver partículas sólidas a base de CaO/ MgO na escória em quantidades ideais. Pois para valores de FeO muito baixos (20%) haveria excesso de partículas sólidas, já para valores altos (acima de 30%) haveria a falta dessas partículas, pelo efeito fluxante do FeO (ver capítulos 2.2.6 e 2.2.7).

Diagramas de saturação isotérmicos

Para analisar os efeitos do teor de FeO e de MgO no gasto energético, utilizou-se os gráficos ISD's. As Figuras 43, 44 e 45, além de mostrar o efeito do FeO para a saturação de MgO, também mostram a relação entre a saturação de MgO com o gasto energético.

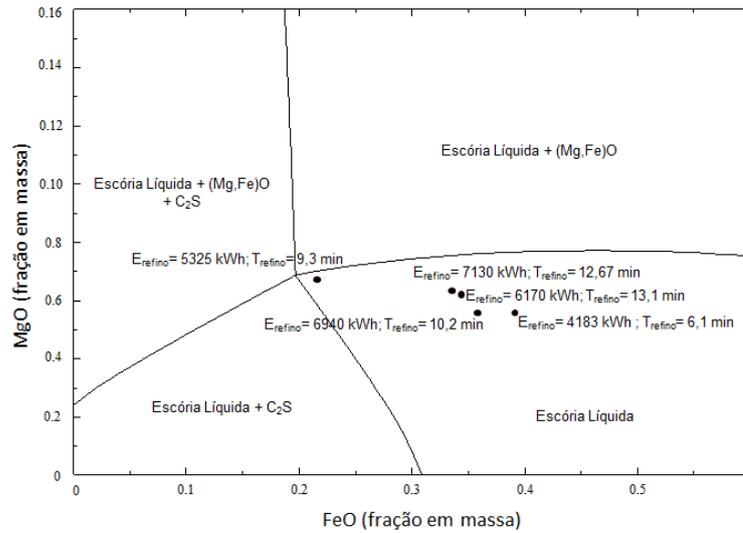


Figura 43: Diagrama de saturação isotérmico com 5,5 % de Al_2O_3 , $B_2=2,1$ e $T=1600^\circ C$.

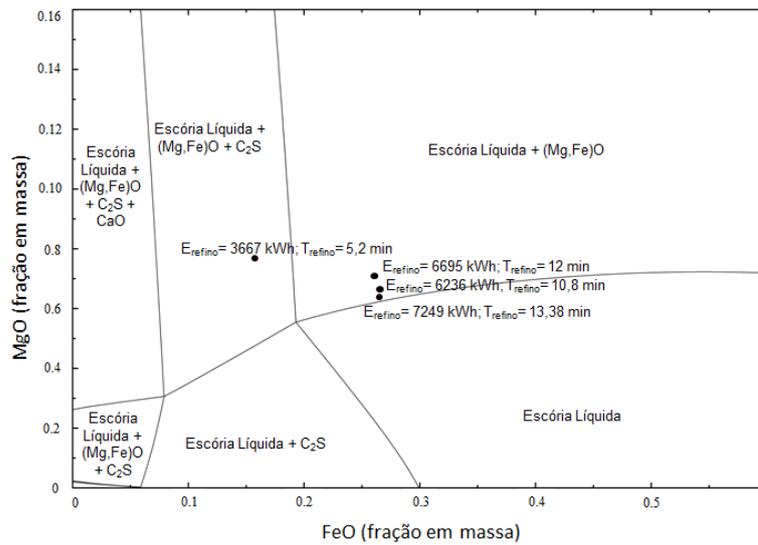


Figura 44: Diagrama de saturação isotérmico com 6,5% de Al_2O_3 , $B_2=2,4$ e $T=1600^\circ C$.

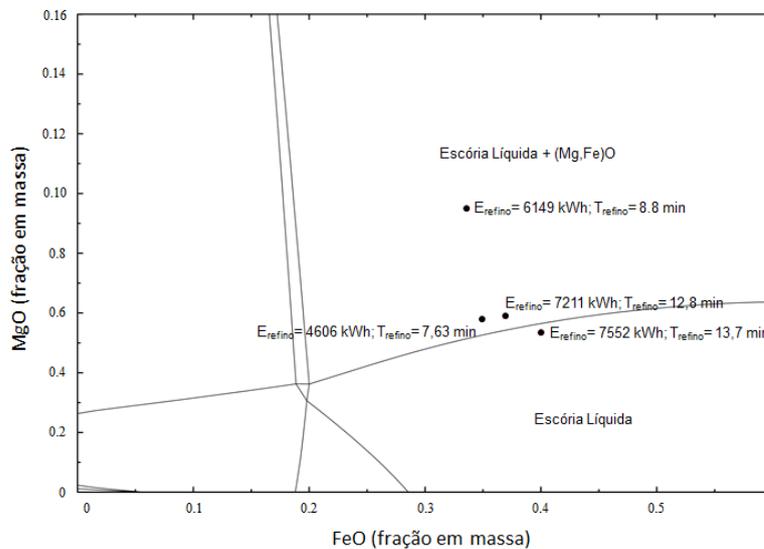


Figura 45: Diagrama de saturação isotérmico com 5,5% de Al_2O_3 , $B_2=3,0$ e $T=1600^\circ C$.

Para as Figuras 43, 44 e 45, nota-se o mesmo comportamento para todas as corridas. As corridas próximas à linha de saturação obtiveram melhores resultados considerando-se a energia gasta durante o refino e o tempo de refino. Nota-se também, que as corridas com maior tempo de refino, resultaram em um maior gasto energético. Mas dependendo da posição da corrida, o efeito do tempo de refino na energia elétrica consumida diminui.

Este fato está mais explícito na Figura 45, comparando-se as três corridas que estão próximas da linha de saturação (T_{refino} de 12,8, 13,7 e 7,6 min) com a corrida que está separada do grupo (T_{refino} de 8,8 min). Mesmo com grande diferença nos tempos de refino, nota-se um pequeno aumento na energia consumida, quando o tempo de refino foi de 12,8 min (4 min de diferença) a energia aumentou 1062 kWh, o aumento foi de 1403 kWh quando o tempo de refino foi de 13,7 min (5,9 min de diferença), ou seja, mesmo que as diferenças nos tempos tenham aumentado (de 4 para 5,9 minutos) o aumento no consumo elétrico não foi expressivo, sendo de 341 kWh. Ao se comparar esta corrida (com T_{refino} de 8,8 min) com a que teve o tempo de refino menor (T_{refino} de 7,6 min), se nota uma grande diminuição da energia consumida que baixou 1543 kWh.

Estas diferenças nas energias elétricas consumidas podem ser explicadas pela espumação das escórias. A corrida que está deslocada (com T_{refino} de 8,8 min), tem o maior valor de MgO (acima de 9%), alta basicidade (3,0) e o menor teor de FeO (próximo a 32%).

Este conjunto (MgO alto, basicidade alta e FeO em torno de 30%) pode ter ocasionado uma escória supersaturada em partículas sólidas, prejudicando a espumação e com isso resultando em um grande gasto de energia elétrica, quando comparada com as outras corridas apresentadas no diagrama.

4.2.3. PARÂMETROS ELÉTRICOS

THD X Tensão elétrica

A análise das respostas elétricas do FEA é parte importante da investigação, portanto foi elaborado o gráfico do desvio padrão da tensão pela distorção dos harmônicos para as 3 fases diferentes, ver Figura 46, nestes gráficos foram utilizados somente corridas com o tempo de power on entre 7 e 13 minutos e com o tempo de power off abaixo de 4 minutos.

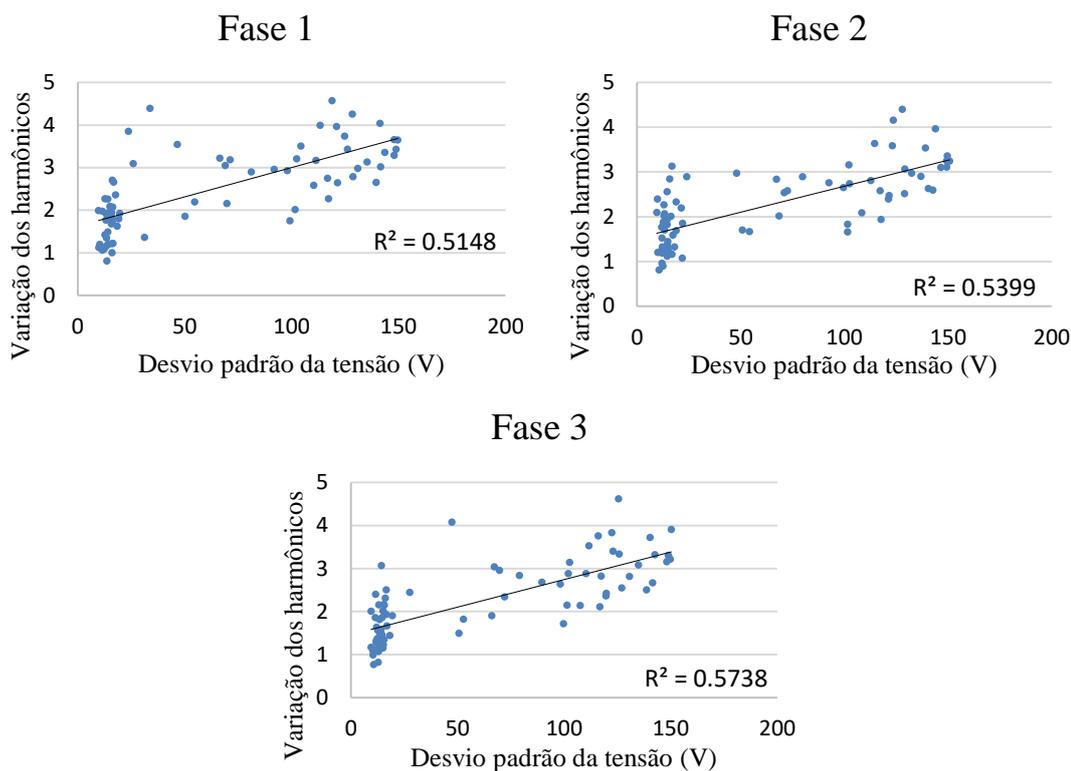


Figura 46: Variação dos harmônicos pelo desvio padrão da tensão para as 3 fases.

Pelos gráficos apresentados na Figura 46, verifica-se que a relação entre o desvio padrão da tensão e a variação dos harmônicos é moderada em âmbito industrial, considerando o fato de serem dados industriais, com R^2 com valores de aproximadamente 0,55.

Por localizar-se em uma região com maiores interferências, com maiores perdas térmicas devido a proximidade da porta de escória e com a presença da lança automatizada (ver Figura 25), esperava-se que a fase 3 obtivesse a pior correlação, mas encontrou-se o contrário. Isso demonstra que um estudo mais aprofundado deve ser feito para analisar a influência da localização do eletrodo no diferentes parâmetros elétricos.

Efeitos da composição química nos THD's

A composição química tem uma forte influência na espumação da escória, conforme visto no capítulo 2.3.2. Foi feito então o gráfico do desvio padrão dos harmônicos pelo teor de FeO, para as 3 fases, com o teor de FeO entre 25 e 35 % e basicidade entre 2,4 e 3,2. Estes gráficos estão na Figura 47.

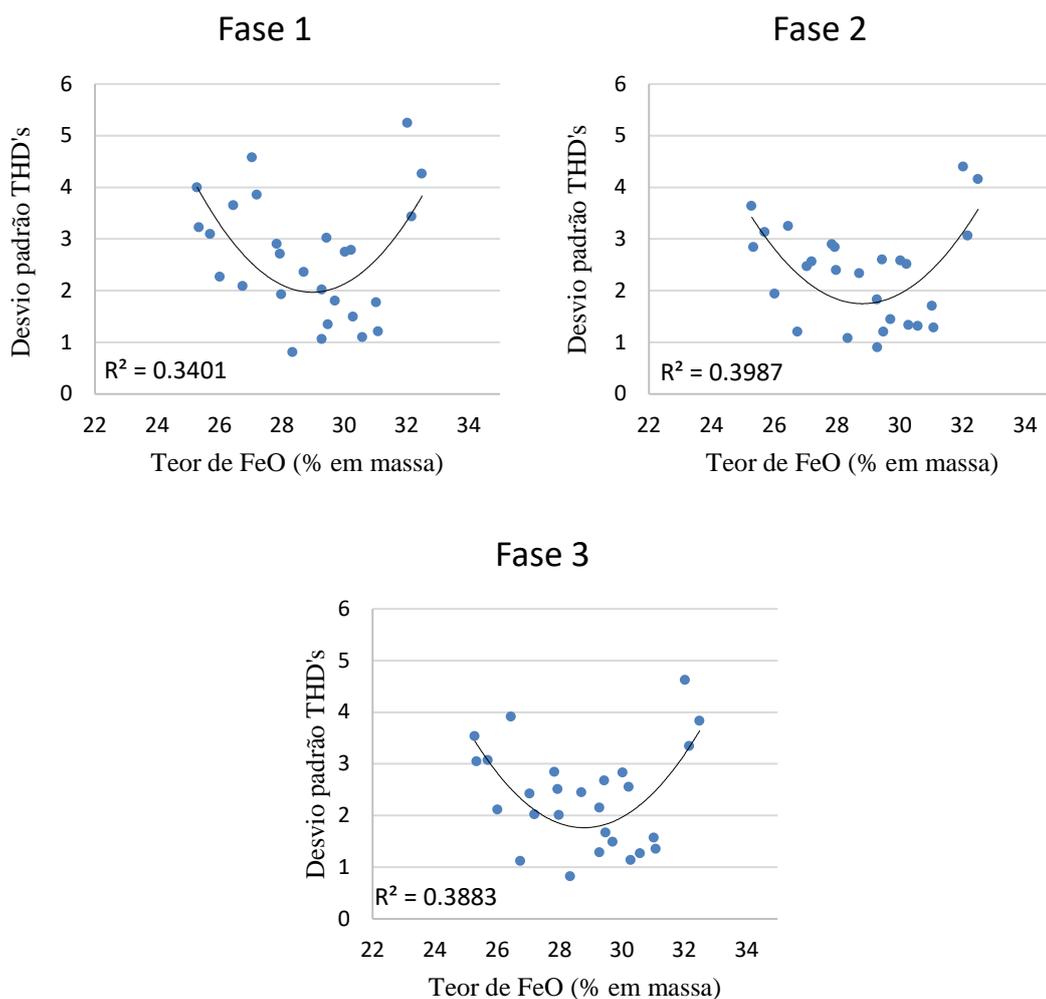


Figura 47: Gráficos do teor de FeO pelo desvio padrão dos THD's, para o FeO entre 25 e 35 % e basicidade entre 2,4 e 3,2, para as 3 fases.

Pela Figura 47, nota-se a semelhança entre as 3 fases, como era de se esperar, existe uma pequena diferença entre as correlações (diferenças entre os R^2 de aproximadamente 0,05) e o ponto de menor variação do THD está próximo a 29% de FeO para os 3 gráficos. Este valor está dentro da faixa encontrada anteriormente na Figura 39, que se refere aos gráficos do teor de FeO pela energia elétrica consumida no refino.

Com as faixas encontradas durante a análise química, teor de FeO entre 27,5 – 30,0, basicidade entre 3,0 – 3,2, power on entre 7 e 13 minutos e power off abaixo de 4 minutos. Foram feitas, na Figura 48, as correlações entre o desvio das THD's e a energia elétrica consumida na etapa de refino.

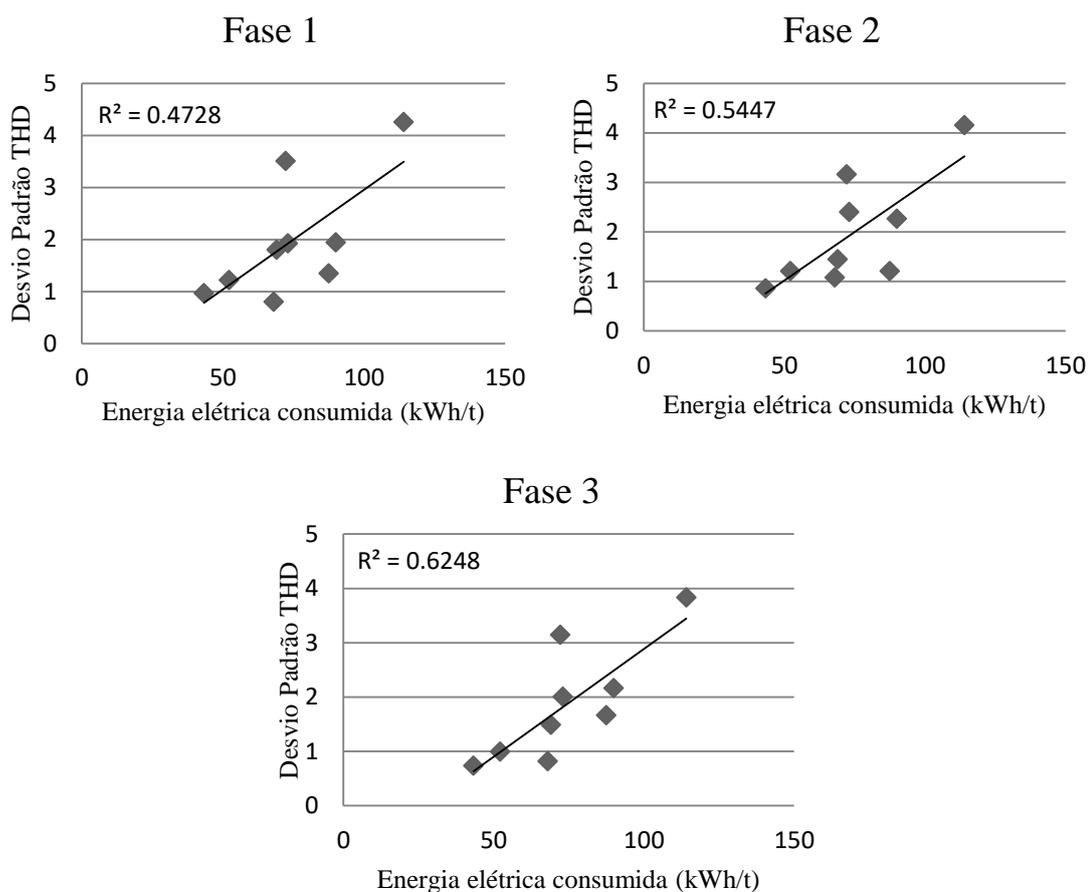


Figura 48: Relação entre a energia elétrica consumida e o desvio padrão do THD, para as 3 fases.

Nota-se que apesar das 3 fases apresentarem correlações moderadas entre os pontos, houve uma grande diferença entre as fases, tendo a fase 1 um coeficiente de correlação de 0,48 e a fase 3 de 0,63; uma diferença de 0,15 no R². Diferenças discutidas anteriormente.

THD X Índice de Espumação

Utilizando os mesmos pontos da Figura 48, se fez a correlação entre o índice de espumação e o desvio padrão da THD na Figura 49. Nesta figura está sendo mostrada apenas uma das fases (fase 3), já que para as três fases o resultado encontrado foi o mesmo.

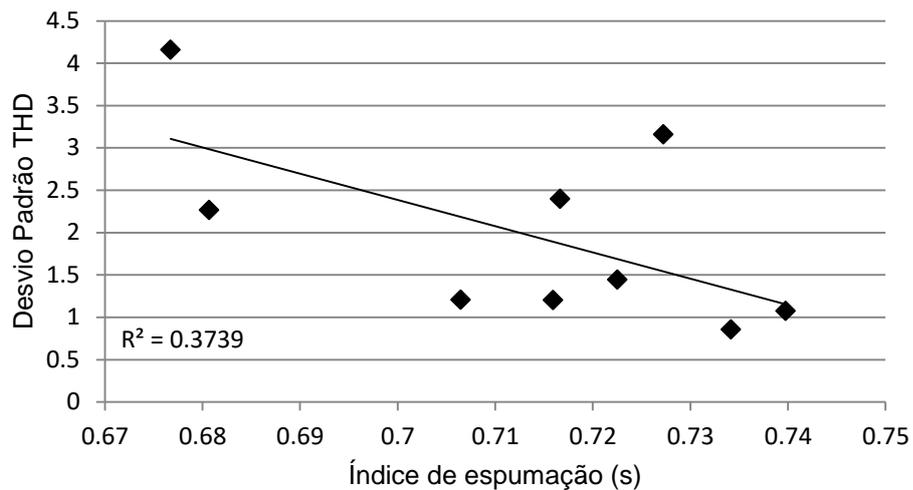


Figura 49: Desvio padrão do THD e o índice de espumação.

A Figura 49 mostrar a tendência de comportamento esperada, uma diminuição no desvio da THD com o aumento do índice de espumação. Além disso, conforme dito no capítulo 2.2.3 existe uma controvérsia sobre a utilização do índice de espumação, já que os índices de espumação calculados pelos modelos matemáticos são diretamente proporcionais a viscosidade. Escórias com viscosidade muito altas terão valor muito alto de índice de espumação quando calculados, mas sabe-se que para viscosidades muito altas, o índice de espumação deveria diminuir.

5. CONCLUSÕES

Com relação à análise da saturação de MgO realizada concluiu-se que o programa FactSage apresentou resultados conforme o esperado para a relação da basicidade com a saturação de MgO. Assim como a relação do teor de FeO com a saturação de MgO, quando as basicidades foram de 1,7 ou maior houve um aumento no MgO de saturação. Para o caso da basicidade de 1,0 ocorreu o efeito contrário, houve queda no MgO de saturação de acordo com o aumento do teor de FeO.

O efeito do Al_2O_3 foi visto através dos diagramas pseudo-ternários CaO-SiO₂-FeO e 5% de MgO e CaO-SiO₂-FeO 5% MgO, 5% e 8% de Al_2O_3 . Notou-se uma grande diferença na dimensão do campo líquido, assim como no ponto de dupla saturação, que teve a sua composição química modificada de SiO₂ = 20,22%, CaO = 43,66%, FeO = 31,11% e MgO = 5 %; para SiO₂ = 19,40%, CaO = 48,46%, FeO = 22,13%, MgO = 5% e Al_2O_3 = 5% e SiO₂ = 18,35%, CaO = 51,12%, FeO = 17,50%, MgO = 5% e Al_2O_3 = 8% mostrando uma grande queda no teor de FeO e um aumento na basicidade, indo de 2,15 (sem Al_2O_3) para 2,78 (8% de Al_2O_3), para que ocorra a dupla saturação.

Os ISD's feitos para os pontos mencionados nos diagramas pseudo-ternários mostraram os mesmos pontos de dupla saturação, tendo o teor de MgO em 5% e o de FeO = 30,5% para a basicidade 2,15, teor de MgO = 5% e de FeO = 22,25% para a basicidade 2,5 e FeO = 16,95% e o MgO = 5,14 para basicidade 2,78.

Sobre os resultados encontrados na análise dos dados industriais concluiu-se que os ISD's mostram que podem ser utilizados para análise do consumo de energia elétrica, pois quanto mais perto da linha de saturação, menor foi o gasto energético.

Ao se analisar os dados elétricos encontraram-se os seguintes resultados:

- O desvio padrão dos harmônicos e o desvio padrão da tensão se comportaram como esperado de maneira linear, com uma correlação moderada dos pontos.
- O teor de FeO, de menor desvio padrão dos harmônicos, foi o mesmo encontrado quando se analisou o gasto energético, valor próximo a 29 %.
- A relação entre os THD's e o gasto energético foi como esperada, quanto maior a variação dos THD's, maior o gasto energético.

- A relação entre o índice de espumação e a variação dos THD's ocorre de forma linear, com uma correlação de 0,37, sendo muito baixa, impossibilitando uma análise mais profunda.

6. TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho permitiu que se fizessem algumas sugestões para a sua continuação:

- Realizar o estudo para outros padrões de carga;
- Utilizar outra forma de analisar a qualidade de espumação (decibelímetro, por exemplo) em conjunto com os dados elétricos;
- Levar em consideração o oxigênio ativo na confecção dos ISD's;
- Aliar o menor consumo energético com um maior rendimento metálico, levando em consideração o custo envolvido;
- Analisar a influência da posição do eletrodo nos parâmetros elétricos.

7. REFERÊNCIAS

1. ABM–Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais. Introdução à Siderurgia. Coleção de Metalurgia e Materiais 2. São Paulo, São Paulo, Brazil. 2007.
2. AMINORROAYA, S.; EDRIS, H. The Effect of Foamy Slag in the Electric Arc Furnaces on Electric Energy Consumption. In: European electric steelmaking conference, 7, Venice, Italy, 2002.
3. ASTM Standarts. Standard Specification for Steel Slag Aggregates for Bituminous Paving Mixtures – D5106. Disponível em <http://compass.astm.org/download/D5106.22404.pdf>. Acesso em 25 jan 2016.
4. AVILA, Tiago Augusto. Condicionamento de Escórias em Forno Elétrico a Arco Para Otimização das Condições de Espumação da Escória e Refino do Aço. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
5. BALE, C. W.; CHARTRAND, P.; DEGTEROV, S. A.; ERIKSSON, G.; HACK, K.; BEN MAHFOUD, R.; MELANÇON, J.; PELTON, A. D.; PETERSEN, S. FactSage Thermochemical Software and Databases. Calphad, v. 26, p. 189-228, 2002.
6. BALE, C. W.; BÉLISLE, E.; CHARTRAND, P.; DEGTEROV, S. A.; ERIKSSON, G.; HACK, K.; JUNG, I.-H.; KANG, Y.-B.; MELANÇON, J.; PELTON, A. D.; ROBELIN, C.; PETERSEN, S. FactSage Thermochemical Software and Databases - Recent Developments. Calphad, v. 33, p. 295-311, 2009.
7. BANNET, J.; KWONG, K.S. Thermodynamic Studies of MgO Saturated EAF Slag. Ironmaking and Steelmaking. v. 37, n. 7, p.529-535, 2010.
8. BARELLA, S. et al. Critical Evaluation of Role of Viscosity and Gas Flowrate on Slag Foaming. Ironmaking and Steelmaking, v. 39, n. 6, p: 463–469, 2012.
9. BIELEFELDT, W.V. Treinamento GERDAU: Fundamentos de Escórias, 2012.
10. BIELEFELDT, W.V. et al. Investigation of Foaming Slag in Electric Arc Furnace. In: AISTech. Cleveland, USA, 2015.
11. BOWMAN, B.; KRÜGER, K. Arc Furnace Physics. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2009
12. CORBARI, R. et al. Foaming and the Rate of the Carbon-Iron Oxide Reaction in Slag. Metallurgical Transactions B, v. 40, n. 6, p: 940–948, 2009.

13. COUDURIER, L.; HOPKINS, D.W.; WILKOMIRSKY, I. Fundamentals of Metallurgical Processes, 1978.
14. DEACONU, S.I. Comprehensive Analysis for Modernization of 100 t Electric Arc Furnace for Steel Production. In: IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Houston, USA, 2009.
15. DECKMANN, S.M.; POMILIO, J.A. Avaliação Da Qualidade Da Energia Elétrica. Curso. UNICAMP/FEEC/DSCE, Campinas, Brasil, 2010.
16. DEHKORDI, B.M.; MOALLEM, M.; PARSAPOOR A. Predicting Foaming Slag Quality in Electric Arc Furnace Using Power Quality Indices and Fuzzy Method. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. v. 60, n. 12, p: 3845–3852, 2011.
17. FactSage Database Documentation. 2015. Disponível em: [Http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/](http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/).
18. FAVARETTO, Tiago. Estudo Comparativo da Influência da Alteração de uma Injetora de Carbono Convencional para uma Injetora Supersônica de Carbono em um Forno Elétrico a Arco. Trabalho de Conclusão (Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.
19. GANDHARE, W.Z.; LULEKAR, D.D. Analyzing Electric Power Quality in Arc Furnaces. In: International Conference on Renewable energies and Power Quality, Sevilla, Spain, 2007.
20. GEIGER, G.H.; POIRIER, D.R. Transport Phenomena in Metallurgy. Massachusetts: Addison-Wesley, 1973.
21. GHAG, S.S.; HAYES, P.C.; LEE, H.G. The Prediction of Gas Residence Times in Foaming CaO-SiO₂-FeO Slags. ISIJ International, v. 38, n. 12, p: 1216–1224, 1998.
22. GOU, H.; IRONS, G.A.; LU, W.K. A Multiphase Fluid Mechanics Approach to Gas Holdup in Bath Smelting Processes. Metallurgical and Materials Transactions B. v. 27B, n. 2, p: 195–201, 1996.
23. HONG, L.; HIRASAWA, M.; SANO, M. Behavior of Slag Foaming with Reduction of Iron Oxide in Molten Slags by Graphite. ISIJ International, v. 38, n. 12, p: 1339–1345, 1998.

24. IIDA, Y. et al. Fully Automatic Blowing Technique for Basic Oxygen Steelmaking Furnace. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, v. 24, n. 7, p: 540–546, 1984.
25. ITO, K.; FRUEHAN, R.J. Study on the Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags: Part I. Foaming Parameters and Experimental Results. Metallurgical Transactions B, v. 20B, n. 4, p: 509–514, 1989a.
26. ———. Study on the Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags: Part II. Dimensional Analysis and Foaming in Iron and Steelmaking Processes.” Metallurgical Transactions B, v. 20B, n. 4, p: 515–521, 1989b.
27. JEONG, J.J.; BAN, S.J.; KIM, S.W. Estimation of Slag Foaming Height from Vibration Signals in Electric Arc Furnaces. In: International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 7, Chiang Mai, Thailand, 2010.
28. JIANG, R.; FRUEHAN, R.J. Slag Foaming in Bath Smelting. Metallurgical Transactions B, v. 22B, n. 4, p: 481–489, 1991.
29. JONES, J.A.T.; BOWMAN, B.; LEFRANK, P.A. Fundamentals of Iron and Steelmaking. In: The AISE Steel Foundation. The Making the Shaping and Treating of Steel. Pittsburg: The AISE Steel Foundation, 1998. V. 2 – Steelmaking and Refining Volume, cap. 10, p.525-660.
30. KEONG, J.; BANNETT, J.P. Achieving MgO Saturated Foamy Slags in the EAF. In Electric Furnace Conference, 59. Phoenix, Arizona, USA, 2001.
31. KIM, H.S.; MIN, D.J.; PARK, J.H. Foaming Behavior of CaO–SiO₂–FeO–MgO_{satd}–X (X=Al₂O₃, MnO, P₂O₅, and CaF₂) Slags at High Temperatures. ISIJ International. v. 41, n. 4, p: 317–324, 2001.
32. KIM, Y.J.; MIN, D.J. Effect of FeO and Al₂O₃ on the MgO Solubility in CaO–SiO₂–FeO–Al₂O₃–MgO Slag System at 1823 K Steel Research International, v. 83, n. 1, p: 1–9, 2012.
33. LOTUN, D.; PILON, L. Physical Modeling of Slag Foaming for Various Operating Conditions and Slag Compositions. ISIJ International. v. 45, n. 6, p: 835–840, 2005.
34. MARTELL, F. et al. Signal Processing of Virtual-Neutral to Ground Voltage for Power Control in Electric Arc Furnaces. Steel Research International. v. 85, n. 2, p: 251–260.

35. MATSCHULLAT, T. et al. Foaming Slag and Scrap Melting Behavior in Electric Arc Furnace - A New and Very Precise Detection Method with Automatic Carbon Control. Archives of Metallurgy and Materials, v. 53, n. 2, p: 399–403, 2008.
36. MATSUURA, H.; FRUEHAN, R.J. Slag Foaming in an Electric Arc Furnace. ISIJ International. v. 49, n. 10, p: 1530–1535, 2009.
37. MILLS, K.C.; KEENE, B.J. Physical Properties of BOS Slags. International Materials Reviews, v. 32, n 1-2, p: 1-120, 1987.
38. Nippon Slag Association. **About Iron and Steel Slag**. Disponível em <http://www.slg.jp/e/slag/character.html>. Acesso em 27 dez 2015.
39. NOVAK, M.; STRAKA, J.; PRIBYL, M. Influence of the Slag Foaming Process Applied in High Alloyed Steel Production on Refractory Wear of EAF at Pilsen Steel Melt Shop. In: International Colloquium on Refractories: Refractories for Metallurgy, 51, Aachen, Germany, 2008.
40. NUNES, William da Silva. Reciclagem de Resíduos Poliméricos Proveniente de Automotive Shredder Residue (ASR) para Espumação do Forno Elétrico a Arco. Trabalho de Conclusão (Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.
41. PARSAPOOR, A.; DEHKORDI, B.M.; MOALLEM, M. Predicting Foaming Slag Quality in Electric Arc Furnace Using Power Quality Indices and ANFIS. In: IRANIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL, 18, 2010, Isfahan, Iran.
42. PAULINO, M.A.S. et al. Obtenção de Escória Espumante Em Forno Elétrico a Arco: Determinação Das Composições Para o Sistema CaO-SiO₂-MgO-FeO. In: Seminário de Aciaria, 45, Porto alegre, Brasil, 2014.
43. PRETORIUS, E.B.; CARLISLE, R.C. Foamy Slag Fundamentals and Their Pratical Application to Electric Furnace Steelmaking. In: Electric Furnace Conference, 56, New Orleans, USA, 1998
44. PRETORIUS, E.B. Fundamentals of EAF and Ladle Slags and Ladle Refining Principles. Baker Refractories.
45. PUJADAS, A.; McCAULEY, J.; IACUZZI, M. EAF Energy Optimization at Nucor Yamato Steel. In: AISTech, 2003, Indianapolis.
46. ROSCOE, R. Viscosity of Suspensions of Rigid Spheres. British Journal of Applied Physics, v. 3, n. 8, p: 267-269, 1952.

47. SEDIVY, C.H.; KRUMP, R. Tools for Foaming Slag Operation at EAF Steelmaking. Archives of Metallurgy and Materials.v. 53, n. 2, p: 1–5, 2008.
48. SEETHARAMAN, S. et al. Understanding the Properties of Slags. ISIJ International, v. 53, n. 1, p: 1–8, 2013.
49. SEOK, S. et al. Viscosity of Highly Basic Slag. ISIJ International, v. 47, n. 8, p: 1090-1096, 2007.
50. SESHARI, V. et al. Fenômenos de Transporte: Fundamentos e Aplicações nas Engenharias Metalúrgicas e de Materiais. São Paulo, São Paulo, Brasil: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2010.
51. Schneider Electric, Procobre. **Workshop: Instalações Elétricas de Baixa Tensão, Qualidade de Energia, Harmônicas**. Disponível em: <http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf>. Acesso em 30/03/2016.
52. SINUS. Grupo de Eletrônica de Potência e Energia. Disponível em <http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/>. Acesso em: 29 dez. 2015.
53. SKUPIEN, D.; GASKELL, D.R. The Surface Tensions and Foaming Behavior of Melts in the System CaO-FeO-SiO₂. Metallurgical and Materials Transactions B. v. 31B, n. 5, p. 921–925, 2000.
54. .SLAG ATLAS. 2nd ed. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 1995.
55. SOARES JR, D.; SIMONETTI, D.S.L. Análise Harmônica E Inter-Harmônica de Um Forno Elétrico a Arco. In: IEEE/IAS International Conference on Industry Applications,9, 2010, São Paulo, São Paulo, Brazil.
56. STADLER, S.A.C.; EKSTEEN, J.J.; ALDRICH, C. An Experimental Investigation of Foaming in Acidic High Fe_xO Slags. Minerals Engineering, v. 20, n. 13, p: 1121–1128, 2007.
57. TURKDOGAN, E.T. Fundamentals of Steelmaking. United Kingdom, 1996.
58. TURKDOGAN, E.T.; FRUEHAN, R.J. Fundamentals of Iron and Steelmaking. In: The AISE Steel Foundation. The Making the Shaping and Treating of Steel. Pittsburg: The AISE Steel Foundation, 1998. V. 2 – Steelmaking and Refining Volume, cap. 2, p.13-158.
59. VAZ, Guilherme Demberg. Quantificação Das Perdas de Ferro Metálico Em Escórias de Forno Elétrico a Arco. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

60. VIEIRA, Deisi. Estudo de escórias de refino primário visando reduzir o consumo energético do forno elétrico a arco. Trabalho de Conclusão (Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.
61. World Steel Association. **World Steel In Figures 2015**. Disponível em <
<https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/2015/World-Steel-in-Figures-2015/document/World%20Steel%20in%20Figures%202015.pdf>>. Acesso em 25 jan 2016.
62. WILSON, E.L.; KARR, C.L.; BANNETT, J.P. An Adaptive, Intelligent Control System for Slag Foaming. *Applied Intelligence*. v. 20, n. 2, p: 165–177, 2004.
63. WU, L.S.; ALBERSSON, G.J.; SICHEN, D. Modelling of Slag Foaming. v. 37, n. 8, p: 612–619, 2010.
64. URBAN, W.; WEINBER, M.; CAPPEL, J. Dephosphorization Strategies and Modeling in Oxygen Steelmaking. In: AISTech. Cleveland, USA, 2014.
65. ZHANG, Y.; FRUEHAN, R.J. Effect of the Bubble Size and Chemical Reactions on Slag Foaming. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 26B, n. 4, p: 803–812, 1995.
66. ZHU, T.X.; COLEY, K.S.; IRONS, G.A. Progress in Slag Foaming in Metallurgical Processes. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 43B, n. 4, p: 751–757, 2012.