

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

**ANÁLISE COMPARATIVA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE AÇO E ESCÓRIA E
RENDIMENTO METÁLICO DE UM FEA ENTRE PARÂMETROS DE
CARREGAMENTO E INJEÇÕES DISTINTOS**

DEISI VIEIRA

Dissertação para obtenção do título de mestre em Engenharia

Porto Alegre
2017

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

**ANÁLISE COMPARATIVA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE AÇO E ESCÓRIA E
RENDIMENTO METÁLICO DE UM FEA ENTRE PARÂMETROS DE
CARREGAMENTO E INJEÇÕES DISTINTOS**

DEISI VIEIRA

Engenheira Metalúrgica

Esta dissertação foi realizada no Centro de Tecnologia na Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.
Área de concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa.

Porto Alegre

2017

CIP - Catalogação na Publicação

Vieira, Deisi

ANÁLISE COMPARATIVA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE AÇO
E ESCÓRIA E RENDIMENTO METÁLICO DE UM FEA ENTRE
PARÂMETROS DE CARREGAMENTO E INJEÇÕES DISTINTOS /
Deisi Vieira. -- 2017.

158 f.

Orientador: Wagner Viana Bielefeldt.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Rendimento Metálico do FEA. 2. Injeções de
Carbono e Oxigênio. 3. Razão C/O. 4. Saturação de MgO
. 5. Sucata Shredder. I. Bielefeldt, Wagner Viana,
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DEISI VIEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE AÇO E ESCÓRIA E
RENDIMENTO METÁLICO DE UM FEA ENTRE PARÂMETROS DE
CARREGAMENTO E INJEÇÕES DISTINTOS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa, e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela banca examinadora do curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Wagner Viana Bielefeldt

Aprovada em: 22/05/2017

Banca examinadora:

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

Prof. Dr. Flávio Beneduce Neto – USP

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

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

Dedico este trabalho aos meus pais, Rosemeri e Clênio, aos meus irmãos Alexandre e Leonardo, à minha avó Almerinda e ao meu noivo Tiago.

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo incentivo, compreensão e amor desde o início da minha trajetória.

Ao meu noivo e colega de profissão Eng. Tiago Favaretto pelo apoio, paciência e inspiração.

Ao Laboratório de Siderurgia (LaSid) pela oportunidade, infraestrutura e auxílio essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eng. Wagner Viana Bielefeldt pela orientação exemplar e amizade que construímos desde a minha graduação.

Ao Prof. Dr.-Ing Antônio C. Faria Vilela pela confiança.

Ao Mestre e Eng. Rodolfo Almeida pelo contínuo suporte ao longo deste trabalho.

À futura Eng^a. e prima Bianca Vieira pelo companheirismo, auxílio e carinho.

Aos integrantes do LaSid, Vinícius Cardoso, Julio Morales, Sabrina Santi, Iara Takehara e Pedro Alves pelo coleguismo, trocas de conhecimento e momentos de descontração.

À Gerdau Charqueadas e, em especial, ao Mestre Felipe Machado pela atenção concedida neste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pela provisão de bolsa de Mestrado Acadêmico.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	16
LISTA DE SIGLAS	19
LISTA DE SÍMBOLOS	20
RESUMO	22
ABSTRACT	23
1 INTRODUÇÃO	24
2 OBJETIVOS	26
3 REVISÃO DA LITERATURA	27
3.1 Produção de aço via aciaria elétrica.....	27
3.1.1 Pátio de Sucatas.....	29
3.1.2 Sucata Metálica	30
3.1.3 Ferro-Gusa	33
3.1.4 Outros Insumos	34
3.2 Metalurgia do Processo de FEA.....	35
3.2.1 Forno Elétrico a Arco	35
3.2.1.1 Carregamento	37
3.2.1.2 Fusão	37
3.2.1.3 Refino.....	38
3.2.1.4 Vazamento	40
3.2.2 Balanço de massa em FEA	41
3.3 Metalurgia das Escórias de FEA	42
3.3.1 Escórias de FEA.....	42
3.3.2 Escória Espumante.....	45
3.3.2.1 Formação da Escória Espumante	45
3.3.3 Propriedades Físico-Químicas das Escórias	47

3.3.3.1	Viscosidade.....	47
3.3.3.2	Basicidade Binária	48
3.3.3.3	Influência do FeO na Escória	49
3.3.3.4	Saturação de MgO	49
3.4	Metalurgia do Refino do Aço	55
3.4.1	Desfosforação.....	55
3.4.2	Descarburação	58
3.5	Rendimento Metálico em FEA.....	61
3.5.1	Influência do Volume de Escória no Rendimento Metálico	63
3.5.2	Influência da injeção de oxigênio e consumo de carbono no rendimento metálico	64
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
4.1	Cenários Analisados no Estudo	75
4.2	Tratamento Inicial para Análise dos Dados.....	78
4.2.1	Rendimento Metálico	79
4.3	Análises dos Dados.....	79
4.3.1	Padrão de Carga	79
4.3.2	Número de Carregamentos	80
4.3.3	Medições e Amostras da Composição Química de Aço e Escória ..	80
4.3.4	Energia Elétrica Consumida	81
4.3.5	Injeções de Carbono e Oxigênio.....	82
4.3.6	Calculo da Massa de Escória	82
4.3.7	Basicidade Binária das Amostras de Escória	82
4.3.8	Análise da saturação de MgO.....	83
4.3.9	Cálculo da Razão C/O	86
4.3.10	Intervalos de Refino.....	87
4.4	Software de Análise Estatística 'ORIGIN 8'	88

4.5	Análise Estatística de Variância ANOVA ‘Fator Único’	89
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
5.1	Estratificação das Corridas	90
5.2	Análise da Composição Química das Escórias para os Padrões C e E	93
5.2.1	Análise da Basicidade Binária dos Padrões C e E	96
5.2.2	Análise da Saturação de MgO	97
5.2.3	Variação do Teor de Fósforo no Aço	103
5.2.4	Variação do Teor de Carbono do Aço	107
5.2.5	Relação entre Energia Elétrica Consumida e teores de FeO e MgO... ..	110
5.3	Rendimento Metálico do FEA.....	114
5.3.1	Resultados Gerais da Usina	114
5.3.2	Rendimento Metálico para os Padrões C e E	115
5.3.2.1	Aumento da Sucata Shredder nos Padrões C e E	118
5.3.2.2	Injeções de Carbono e Oxigênio	120
5.3.2.3	Estabilidade das Injeções.....	127
6	CONCLUSÕES	136
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	138
8	REFERÊNCIAS	139
	APÊNDICE A – HISTOGRAMAS DE TRATAMENTOS DOS DADOS	146
	APÊNDICE B – RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS ANOVA	148
	APÊNDICE C – ANÁLISES DO PADRÃO C SEM RELAÇÕES	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rota do processo de fabricação do aço de uma aciaria elétrica, considerada no estudo.....	28
Figura 2 - Pilha de sucata de obsolescência sendo preparada para ser processada.	31
Figura 3 - Pilha de sucata Shredder.....	32
Figura 4 - Média do rendimento metálico do FEA, baseado no aço líquido, para os cenários testados, sem despoeiramento no equipamento e com despoeiramento no equipamento Shredder.....	32
Figura 5 - Forno Elétrico a Arco e alguns componentes, vista frontal (a) e superior (b).	36
Figura 6 - Evolução da composição química do banho metálico durante o sopro de oxigênio, em BOF.....	39
Figura 7 - Evolução da composição química da escória durante o sopro de oxigênio, em BOF.....	40
Figura 8 - Balanço de massa em FEA, entradas e saídas.	41
Figura 9 - Etapas da formação de escória espumante em FEA.....	46
Figura 10 - Diagrama de Saturação Isotérmica (ISD) para basicidade $B_3 = 1,5$; Onde $C_2S = Ca_2SiO_4$, MW = Magnésio – Wustita e L = Líquido; ($B_3 = \%CaO\%SiO_2 + \%Al_2O_3$, sendo $\%Al_2O_3 = 0$), $T = 1600^\circ C$	50
Figura 11 - Diagramas de Saturação Isotérmica para diferentes basicidades:	51
Figura 12 - Diagramas de Saturação Isotérmica para diferentes basicidades binárias:	52
Figura 13 - Teores de MgO necessários para uma dupla saturação de escórias do sistema CSFM em função da B_2 . $T = 1600^\circ C$	53
Figura 14 – Influência dos teores de MgO da escória em relação ao consumo de energia elétrica no refino do FEA.	54
Figura 15 - Diagrama de Ellingham simplificado.	55
Figura 16 - Relação entre o L_p e (a) B_2 , (b) FeO, (c) Al_2O_3 e (d) MgO (% em massa); $T = 1600^\circ C$	56
Figura 17 – Representação do processo de crescimento de uma bolha de CO (descarburação).	58
Figura 18 – Variação da velocidade de descarburação com o tempo.....	59

Figura 19 – Esquema do consumo de oxigênio na fase de descarburização durante a fabricação do aço.	60
Figura 20 – Fatores que influenciam no rendimento metálico.	61
Figura 21 - Perdas de ferro durante o processo de fabricação.	62
Figura 22 – Efeito do volume de escória no rendimento metálico.	63
Figura 23 – %FeO ao longo do tempo para diferentes quantidades de cales calcínicas adicionadas no FEA.	64
Figura 24 - Exemplo de padrão operacional de injeções durante o refino de um FEA.	65
Figura 25 – % FeO ao longo do tempo para diferentes quantidades de oxigênio injetadas no FEA.	66
Figura 26 - Relação entre o oxigênio injetado e o FeO da escória em FEA.	66
Figura 27 – %FeO ao longo do refino para diferentes quantidades de C injetado no FEA.	67
Figura 28 – Efeito do conteúdo de carbono sobre o teor de FeO da escória.	68
Figura 29 - Relação entre o equilíbrio O/C no processo e o teor de FeO na escória.	69
Figura 30 – Mudança na composição química do banho devido aos perfis de injeções com diferentes razões entre O/C, relativos à uma curva de equilíbrio.	70
Figura 31 – Efeito da redução da taxa de injeção de oxigênio (para 55% do inicial em 8 minutos e 33% em 13 minutos).	71
Figura 32 – Simulação para o efeito do aumento da taxa de injeção de carbono.	71
Figura 33 – Balanço de carbono em experimento de injeção. T: 1691°C; FeO: 35,41 (% em massa); Taxa de Injeção de carvão: 0,0098 mol C/s.	72
Figura 34 – Diferentes relações de FeO x Carbono do aço, para FEAs diferentes. ...	74
Figura 35 – Vistas aéreas do FEA, e posicionamento das injetoras para os Cenários I e II.	75
Figura 36 – Esquema indicando as principais mudanças verificadas no FEA entre os Cenários I e II.	76
Figura 37 – Fluxograma ilustrando a metodologia aplicada neste estudo.	77
Figura 38 – Fluxograma apresentando o tratamento dos dados históricos.	78
Figura 39 – Esquema ilustrando as medições e as amostragens durante o refino. ...	81
Figura 40 – Tela de abertura do software de simulação termodinâmica FactSage 6.4 mostrando os diferentes módulos do programa.	83

Figura 41 – Bancos de dados do software FactSage 6.4 utilizados no estudo.	84
Figura 42 – Fluxograma com as definições para a construção dos diagramas ISD's.	85
Figura 43 – Esquema ilustrando os intervalos de refino propostos neste estudo.....	87
Figura 44 – Interpretação de um 'Box Plot'.	88
Figura 45 – Aplicação da ferramenta 'Mask Toolbar'.	88
Figura 46 – Corridas por número de cestões no carregamento do FEA para o Cenário I.	91
Figura 47 – Corridas por número de cestões no carregamento do FEA para o Cenário II.	92
Figura 48 – Número de corridas de três cestões contidas nos padrões de carga do Cenário I.....	92
Figura 49 – Número de corridas contidas no Cenário II.	93
Figura 50 – Distribuição da basicidade binária nos Cenários I e II para ambos os padrões.	96
Figura 51 – Distribuição dos valores de CaO da escória em quilogramas para os Cenários I e II.	97
Figura 52 – Distribuição dos valores de MgO da escória em quilogramas para os Cenários I e II.	97
Figura 53 - Relação entre basicidade binária da escória e quantidade de MgO em quilogramas na escória, para o Padrão C em ambos cenários.	98
Figura 54 - ISD para o padrão C, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química: Al ₂ O ₃ : 5,5 – 6,36% e B ₂ : 2,2 – 2,4; T = 1600°C.	99
Figura 55 - ISD para o padrão C, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química: Al ₂ O ₃ : 5,5 – 6,36% e B ₂ : 2,4 – 2,6; T = 1600°C.	100
Figura 56 - ISD para o padrão C, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química: Al ₂ O ₃ : 5,5 – 6,36% e B ₂ : 2,6 – 2,8; T = 1600°C.	100
Figura 57 – Relação entre B ₂ e quantidade de MgO em quilogramas na escória, para o Padrão E em ambos cenários.	101
Figura 58 – ISD para o padrão E, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química: Al ₂ O ₃ : 5,5 - 7,3% e B ₂ : 1,8 – 2,0; T = 1600°C.	102
Figura 59 - ISD para o padrão E, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química: Al ₂ O ₃ : 5,5 - 7,3% e B ₂ : 2,0 – 2,4; 1600°C.	102

Figura 60 - ISD para o padrão E, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química: Al_2O_3 : 5,5 - 7,3% e B_2 : 2,4 – 2,6; 1600°C.	103
Figura 61 – Relação entre o teor de fósforo no aço e a basicidade binária da escória para as corridas do padrão C, em ambos os cenários.	104
Figura 62 - Relação entre o teor de fósforo no aço e a basicidade binária da escória para as corridas do padrão E, em ambos os cenários.	104
Figura 63- Distribuição dos teores de fósforo no aço para os padrões C e E, em ambos os cenários.	106
Figura 64 - Distribuição dos valores de O ativo inicial para os padrões C e E, em ambos os cenários.	107
Figura 65 – Relação entre o carbono do aço e O ativo inicial para o padrão C em ambos cenários.	108
Figura 66 - Relação entre o carbono do aço e O ativo inicial para o padrão E em ambos cenários.	109
Figura 67 – Consumo de energia elétrica por tonelada no FEA para ambos padrões e cenários.	110
Figura 68 – Relação entre o FeO e energia elétrica consumida por corrida, para o padrão E.	112
Figura 69 - Relação entre o MgO e energia elétrica consumida por corrida, para o padrão E.	113
Figura 70 – Relação entre o ferro perdido pela escória e o rendimento metálico do FEA para o padrão C, nos cenários I e II.	117
Figura 71 - Relação entre o ferro perdido pela escória e o rendimento metálico do FEA para o padrão E, nos cenários I e II.	118
Figura 72 – Distribuição dos valores de oxigênio injetados do FEA, em Nm^3/t de aço vazado, durante o processo para aos padrões C e E, em ambos os cenários.	122
Figura 73 - Distribuição dos valores de carbono injetados do FEA, em kg/t de aço vazado, durante o processo para aos padrões C e E, em ambos os cenários.	122
Figura 74 – Relação entre os valores de injeção de carbono para cada corrida e as amostras de teores de ferro em quilogramas na escória para o padrão E, nos dois cenários.	123
Figura 75 – Influência do ferro-gusa no carregamento para as corridas do padrão E.	124

Figura 76 – Relação entre as injeções de oxigênio e o teor de ferro na escória para o padrão E.....	125
Figura 77 – Relação entre a razão entre as quantidades globais de carbono e oxigênio (C/O) de cada corrida e o teor de ferro na escória para o padrão E, Cenários I e II.	126
Figura 78 – Distribuição do oxigênio ativo para os padrões C e E, em ambos os cenários.....	127
Figura 79 – Relação entre o oxigênio injetado no intervalo final de refino e o oxigênio ativo da primeira amostragem realizada para o padrão C para o Cenário I.	128
Figura 80 - Relação entre o oxigênio injetado no intervalo final de refino e o oxigênio ativo da primeira amostragem realizada para o padrão E para o Cenário I.	129
Figura 81 – Relação entre o carbono injetado no intervalo final de refino e o oxigênio ativo da primeira amostragem realizada para o padrão C.....	129
Figura 82 - Relação entre o carbono injetado no intervalo final de refino e o oxigênio ativo da primeira amostragem realizada para o padrão E.....	130
Figura 83 – Razão entre o carbono e oxigênio injetados ao longo do refino para o Cenário I, padrão C.....	131
Figura 84 - Razão entre o carbono e oxigênio injetados ao longo do refino para o Cenário I, padrão E.....	131
Figura 85 – Distribuição das injeções de oxigênio no intervalo inicial de refino, para os padrões C e E.....	132
Figura 86 - Distribuição das injeções de carbono no intervalo inicial de refino, para os padrões C e E.....	132
Figura 87 - Distribuição das injeções de oxigênio no intervalo final de refino, para os padrões C e E.....	133
Figura 88 - Distribuição das injeções de carbono no intervalo final de refino, para os padrões C e E.....	133
Figura 89 - Razão entre o carbono e oxigênio injetados ao longo do refino para o Cenário II, padrão C.....	134
Figura 90 - Razão entre o carbono e oxigênio injetados ao longo do refino para o Cenário II, padrão E.....	135
Figura 91 – Histograma referente ao capítulo 5.1. Filtros aplicados para o rendimento metálico, referente ao Cenário I.....	146

Figura 92 – Histograma referente ao capítulo 5.1. Filtros aplicados para o power – off'. Referente ao Cenário I	146
Figura 93 – Histograma referente ao capítulo 5.1. Filtros aplicados para o rendimento metálico, referente ao Cenário II.	147
Figura 94 - Histograma referente ao capítulo 5.1. Filtros aplicados para o 'power – off'. Referente ao Cenário II	147
Figura 95 – Relação FeO % em massa e energia elétrica consumida no FEA, Padrão C, CI e II.	156
Figura 96 - Relação MgO % em massa e energia elétrica consumida no FEA, Padrão C, CI e II.	156
Figura 97 - Relação carbono injetado e ferro na escória, Padrão C, Cenários I e II.	157
Figura 98 - Relação oxigênio injetado e ferro na escória, Padrão C, Cenários I e II.	157
Figura 99 - Relação razão C/O global e ferro na escória, Padrão C, Cenários I e II.	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação da composição química do ferro-gusa empregado em distintos processos.....	33
Tabela 2 - Composição química de escórias de FEA para diferentes autores (Composição dos óxidos % em massa).	43
Tabela 3 - Principais óxidos presentes em escórias de FEA. Valores em % em massa.	44
Tabela 4 – Exemplo de Resultados da Análise de Variância utilizando o Excel.	89
Tabela 5 – Número de corridas antes e depois dos filtros, sendo: corridas com faixas de: Rendimento: 0,85 – 0,97; Power-off: até 30 minutos.	90
Tabela 6 - Análise da composição química média das provas de escória em porcentagem em massa de cada óxido, para os padrões de carga C e E; Cenários I e II.	94
Tabela 7 – Mudanças no carregamento de cales e redução da massa de escória em kg/t.	94
Tabela 8 – Quantidade de cada óxido presente na escória em kg, considerando a massa de escória estimada para os padrões de carga C e E; Cenários I e II.	95
Tabela 9 – Médias e desvios das quantidades de oxigênio em Nm ³ /t de aço vazado, injetadas no FEA durante o processo, para os padrões C e E, nos distintos cenários.	105
Tabela 10 – Valores médios de fósforo no aço para os padrões C e E, em ambos os cenários, % em massa.	106
Tabela 11 - Valores médios de carbono no aço para os padrões C e E, em ambos os cenários.....	109
Tabela 12 - Porcentagem corridas, teores de MgO (% em massa), basicidades e consumo de energia elétrica (kWh/t) por corridas que pertencem à uma faixa de FeO = 20 – 30 (% em massa); Cenários I e II; Padrões C e E.....	111
Tabela 13 – Valores médios da aciaria de oxigênio e carbono injetados no processo e quantidade média de sucata Shredder adicionada no carregamento do FEA.	114
Tabela 14 – Valores médios de rendimento metálico do FEA, com base no aço líquido para os dois cenários.	115

Tabela 15 – Médias de Rendimento Metálico (%) para os padrões C e E em ambos os cenários.....	116
Tabela 16 – Médias de FeO (% em massa) e quantidades de ferro perdido para escória (kg) para cada padrão de carga, em ambos os cenários.	116
Tabela 17 – Valores médios de carregamento de Sucata Shredder em kg/t para os dois padrões de carga C e E, em ambos cenários.	119
Tabela 18 – Elementos residuais presentes nas amostras de aço (% em massa), para os padrões C e E em ambos os cenários.....	119
Tabela 19 – Valores médios de injeção de oxigênio em Nm ³ /t de aço vazado e carbono em kg/t de aço vazado, nas corridas nos padrões C e E, Cenários I e II.	121
Tabela 20 - One-Way ANOVA teor de fósforo no aço para o padrão C, Cenários I e II.	148
Tabela 21 - One-Way ANOVA teor de fósforo no aço para o padrão E, Cenários I e II.	148
Tabela 22 - One-Way ANOVA teor de carbono no aço para o padrão C, Cenários I e II.	149
Tabela 23 - One-Way ANOVA teor de carbono no aço para o padrão E, Cenários I e II.	149
Tabela 24 - One-Way ANOVA Consumo de energia elétrica para o padrão C, Cenários I e II.	149
Tabela 25 - One-Way ANOVA Consumo de energia elétrica para o padrão E, Cenários I e II.	150
Tabela 26 - One-Way ANOVA Rendimento do FEA incluindo todas as qualidades, Cenários I e II.	150
Tabela 27 - One-Way ANOVA Rendimento do FEA para o padrão C, Cenários I e II.	151
Tabela 28 - One-Way ANOVA Rendimento do FEA para o padrão E, Cenários I e II.	151
Tabela 29 - One-Way ANOVA carbono injetado em kg/t para o padrão C, Cenários I e II.	152
Tabela 30 - One-Way ANOVA carbono injetado em quilogramas para o padrão E, Cenários I e II.	152
Tabela 31 - One-Way ANOVA cobre no aço (% em massa) para o padrão C, Cenários I e II.	153

Tabela 32 - One-Way ANOVA níquel no aço (% em massa) para o padrão C, Cenários I e II	153
Tabela 33 - One-Way ANOVA estanho no aço (% em massa) para o padrão C, Cenários I e II.....	153
Tabela 34 - One-Way ANOVA molibdênio no aço (% em massa) para o padrão C, Cenários I e II.....	154
Tabela 35 - One-Way ANOVA cobre no aço (% em massa) para o padrão E, Cenários I e II	154
Tabela 36 - One-Way ANOVA níquel no aço (% em massa) para o padrão E, Cenários I e II	155
Tabela 37 - One-Way ANOVA estanho no aço (% em massa) para o padrão E, Cenários I e II.....	155
Tabela 38 - One-Way ANOVA molibdênio no aço (% em massa) para o padrão E, Cenários I e II.....	155

LISTA DE SIGLAS

AC	Corrente Alternada
B₂	Basicidade Binária
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace</i>
C I	Cenário I
C II	Cenário II
CCal	Cal Calcítica
CDol	Cal Dolomítica
CSFM	Sistema CaO-SiO ₂ -FeO-MgO
DC	Corrente Contínua
DRI	<i>Direct Reduced Iron</i>
EBT	<i>Eccentric Bottom Tap-hole</i>
FEA	Forno Elétrico a Arco
HBI	<i>Hot Briquetted Iron</i>
ISD	Diagrama de Saturação Isotérmico
L	Líquido
MW	Magnésio Wustita
ZPF	<i>Zero Phase Fraction Line</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

[%P]	Fósforo do Banho Metálico
(%P)	Fósforo da Escória
σ	Desvio Padrão
η_e	Viscosidade efetiva da escória
η	Viscosidade da escória líquida
Θ	Fração de partículas sólidas
Al	Alumínio
Al₂O₃	Alumina
C	Carbono
Ca₂SiO₄	Silicato Dicálcico
CaO	Óxido de Cálcio
CO	Monóxido de Carbono
C/O	Razão Carbono/Oxigênio
Cu	Cobre
<u>Fe</u>	Ferro no Aço
Fe	Ferro
Fe-C	Liga Ferro Carbono
Fe₂O₃	Óxido de Ferro (Hematita)
FeO	Óxido de Ferro (Wustita)
kg	Quilogramas
kg/t	Quilogramas por tonelada de aço vazado
kWh	Quilowatts Hora
kVA/t	Quilovolt-ampere por tonelada de aço
Lp	Coeficiente de Partição
MgO	Óxido de Magnésio
MgO-C	Magnésia Carbono
min	Minutos
Mn	Manganês
MnO	Óxido de Manganês
Mo	Molibdênio
Nm³	Normal Metro Cúbico

Nm³/t	Normal Metro Cúbico por tonelada de aço vazado
Ni	Níquel
O	Oxigênio
O₂	Gás Oxigênio
O/C	Razão Oxigênio/Carbono
P	Fósforo
P₂O₅	Pentóxido de Fósforo
Pa.s	Pascal Segundo
ppm	Parte por Milhão
R²	Fator de Determinação entre Variáveis
S	Enxofre
Si	Silício
Sn	Estanho
SiO₂	Sílica
T°C	Temperatura em graus Célsius
US\$	Dólares Norte Americanos
Zn	Zinco

RESUMO

Aliar alta produtividade ao menor custo de processo é o principal desafio econômico de uma Aciaria Elétrica. Para isso, mudanças no processo almejando práticas que resultam em uma maior eficiência do FEA, com um menor custo envolvido, ocorrem constantemente. Este trabalho avalia um processo de FEA, com capacidade de 62 toneladas de aço, operando com carregamento de sucata metálica e ferro-gusa. Dois grupos de corridas de aço, pertencentes à dois cenários distintos, foram estudadas. Os cenários foram denominados Cenário I e Cenário II, sendo que, no segundo cenário ocorreram mudanças nas práticas de injeções de carbono e oxigênio, nas práticas de adição de cales no carregamento e mudanças na quantidade de Sucata Shredder no FEA. O objetivo deste trabalho foi analisar como essas mudanças influenciaram no processo. A composição química de aço e escória de dois padrões de carga (C e E) foi comparada entre os cenários. Verificou-se que a massa de escória diminuiu para os dois padrões de carga. Porém, a basicidade do padrão C foi reduzida de 2,5 para 2,1, enquanto para o padrão E manteve-se em 2,2 para os dois cenários. O MgO de saturação foi avaliado através de diagramas de saturação isotérmicos (ISD), e a maior parte das corridas do Cenário II ficaram acima da linha de saturação da escória. Houve uma redução de 30% do oxigênio injetado para os dois padrões e seus teores de fósforo no aço aumentaram significativamente. No entanto, apenas o padrão C teve uma variação nos teores de carbono no aço. A energia elétrica consumida mostrou-se dependente dos teores de FeO e MgO da escória. O padrão E apresentou um aumento significativo de 10 kWh/t. O rendimento metálico dos padrões C e E aumentou 3,59% e 2,22%, respectivamente. No Cenário II, o aumento da sucata Shredder no carregamento foi duas vezes maior. O Cenário II apresentou uma redução dos teores de cobre no aço para os dois padrões. As quantidades médias de injeção de carbono não tiveram variação significativa, por outro lado, através dos gráficos de distribuição, notou-se uma maior estabilidade nos valores de injeção. Para o padrão E observou-se uma quantidade mínima de ferro na escória para a razão global C/O de 0,75. Uma análise da razão das injeções de carbono e oxigênio durante o refino foi feita. Observou-se uma maior estabilidade das injeções ao longo do tempo de refino para o Cenário II em ambos os padrões.

Palavras-chave: Cales; Saturação de MgO; Sucata Shredder; Injeção de Carbono; Injeção de Oxigênio; Razão C/O; Rendimento Metálico no FEA.

ABSTRACT

Combine high productivity and lower costs is the main economical challenge of a steelmaking melt shop. Therefore, changes in the process aiming practices that result in higher efficiency of the EAF, with lower costs, occur frequently. This work evaluates an EAF process, with capacity of 62t of steel, operating with metal scrap and pig iron load. Two groups of steel heats that represents two distinct scenarios were studied. The scenarios were called Scenario I and Scenario II. In the Scenario II carbon and oxygen injection practices, limes loading practice and Shredder scrap loading amount were modified. The aim of the present work is analyze how these changes affected process parameters. The steel and slag chemical composition of two loading patterns (C and E) was compared on the scenarios. It was found that the slag mass reduces for both loading patterns. However, the basicity of the pattern C was reduced from 2.5 to 2.1 while the pattern E was maintained on 2.2 for both scenarios. The MgO saturation content of the slag is evaluated through Isothermal Solubility Diagrams. Most of the heats of the Scenario II MgO content are higher than the minimal saturation content. There was a reduction of 30% of the injected oxygen for both loading patterns and their P content increased significantly. Meanwhile, only the pattern C shows a variation on carbon content in the steel. The electric power consumption showed proportional relation to FeO and MgO content of the slag and the pattern E showed a significant increase of 10 kWh/t. The metallic yield of the patterns C and E increased 3.59 and 2.22, respectively. The scenario II showed a reduction of the Cu content in both patterns. The carbon injection amount means did not vary significantly, but, through distribution graphs, was noted a higher stability in the injection amount. For the E pattern, a minimum amount of iron in the slag was observed for the overall C/O ratio of 0,75. An analysis of the ratio of the carbon and oxygen injection during the refining period was done. It was observed a higher stability of the injections along the refining period for the Scenario II on both patterns.

Keywords: Lime; MgO saturation; Shredder scrap; Carbon injection; Oxygen Injection; C/O Ratio; Metallic Yield; EAF.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de FEA vem avançando com o passar do tempo e permitindo uma maior competitividade com as usinas que operam com conversor a oxigênio. O aumento da produtividade conduziu à uma produção de aço com maior viabilidade econômica. As inovações, como queimadores de oxigênio, práticas de escória espumante, injeção de carbono e cal, etc., possibilitaram um menor consumo de energia elétrica no FEA, devido à oferta de energia química e maior eficiência energética. As reações exotérmicas que ocorrem durante a fusão da sucata e refino, através das injeções de oxigênio e gás natural, substituem uma porção da energia elétrica do FEA (PRETORIUS, OLTMANN e JONES, -).

No entanto, é necessário controlar as quantidades de carbono e oxigênio adicionadas no FEA. Injeções descontroladas de oxigênio levam à uma redução do rendimento metálico do FEA devido à perda de ferro pela escória na forma de FeO. O momento em que as injeções ocorrem também é um fator importante. É necessário conciliar as injeções de carbono e oxigênio durante o refino, pois em certos instantes é preciso a oferta de oxigênio para que ocorra a descarburização do banho metálico, e em outros momentos é preciso a oferta de carbono para reduzir o ferro que foi oxidado (MATSUURA *et al*, 2008).

Além do conhecimento das práticas de injeções para o controle do rendimento metálico do FEA, o uso da sucata metálica adequada é um parâmetro importante. Sucatas que possuem óleos, revestimentos de tinta, água e sujeira podem ser mais acessíveis financeiramente, porém o rendimento do aço líquido pode ser consideravelmente inferior ao obtido quando se utiliza uma sucata de custo mais elevado. Além disso, esses componentes indesejáveis podem resultar em maiores necessidades de energia e problemas ambientais (PRETORIUS, OLTMANN e JONES, -).

A espumação da escória faz parte do processo de produção de aço no FEA e pode trazer diversos benefícios, entre eles a economia de energia, aumento da produtividade, aumento da vida útil das paredes refratárias, etc. Alguns fatores limitam qualidade da escória para uma espumação eficiente, como basicidade, teor de FeO, tensão superficial, viscosidade e injeção de carbono e oxigênio (ALMEIDA, *et al*, 2016).

A composição química ideal da escória para a espumação pode ser representada nos diagramas de saturação isotérmicos (ISD). A estabilidade máxima da espumação é obtida com uma certa quantidade de partículas sólidas na escória devido à uma saturação controlada. Sendo assim, uma combinação ideal das cales calcítica e dolomítica favorecem uma condição ótima de espumação da escória (OLTMANN e PRETORIUS, 2002).

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é comparar dois grupos de corridas produzidas no Cenário I e Cenário II em um forno elétrico a arco, onde os parâmetros de injeção de carbono e oxigênio, carregamento de sucata e prática de cales são distintos. Os objetivos específicos foram:

- Analisar como as mudanças entre os parâmetros citados, influenciaram na variação da composição química de aço e escória, de dois padrões de carga mais produzidos nos Cenários I e II.
- Avaliar se a mudança das práticas de cales influenciaram na basicidade e saturação de MgO da escória;
- Verificar se as mudanças de basicidade influenciaram nas reações de desfosforação;
- Avaliar a saturação de MgO da escória nos dois padrões de carga em ambos os cenários através de diagramas de solubilidade isotérmicos (ISD's), calculados via FactSage;
- Analisar se as mudanças nas práticas de injeção de oxigênio alteraram os teores de fósforo e carbono no aço;
- Comparar o consumo de energia elétrica entre os dois cenários;
- Calcular o rendimento metálico do FEA em ambos os cenários;
- Definir quais as mudanças na composição química do aço ocorreram devido ao aumento de Sucata Shredder no Cenário II;
- Avaliar como as injeções de carbono e oxigênio influenciam para a perda de ferro para a escória;
- Avaliar a mudança na estabilidade das injeções devido às mudanças das práticas no processo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresentará como é viabilizado o processo de produção de aço via aciaria elétrica. Além disso, estudos envolvendo os principais parâmetros que influenciam na eficiência do processo serão salientados. Ainda, serão descritos, principalmente, equipamentos que pertencem ao *layout* de uma Usina Siderúrgica da região Sul do Brasil, onde o trabalho foi desenvolvido.

3.1 Produção de aço via aciaria elétrica

A história da produção de aço via aciaria elétrica é recente – os ensaios para fundir aço utilizando energia elétrica começaram há pouco mais de cem anos. Durante esse período, grandes avanços foram alcançados nas tecnologias de equipamentos do forno, na prática de fusão, matérias-primas e produtos (MADIAS, 2014).

No passado, os fornos elétricos eram utilizados especificamente para produção de aços de maior valor agregado, como aços inoxidáveis e outros aços de alta-liga. Os fatores que permitiriam a produção de aço ser economicamente viável foram:

- Redução do consumo e custos de insumos (refratários, eletrodos, etc.);
- Aumento da eficiência energética dos fornos;
- Menor tempo necessário para a elaboração das corridas;
- Uso de diversos tipos de matérias-primas.

Os fornos elétricos estão sendo utilizados inclusive em áreas nas quais tradicionalmente dominava a rota de produção Integrada (alto-forno/convertedor a oxigênio) (RIZZO, 2006).

As usinas siderúrgicas classificam-se segundo o seu processo produtivo:

- Integradas – São as usinas que operam três etapas básicas: redução, refino e conformação. Participam de todo o processo produtivo e produzem aço.
- Semi-integradas - São as que operam duas etapas: refino e conformação, em uma maior parte. Estas usinas partem de ferro-gusa, ferro-esponja ou sucata metálica adquirida de terceiros para transformá-los em aço em aciarias elétricas e sua posterior laminação. Existe a possibilidade de se operar com redução e refino em alguns casos.

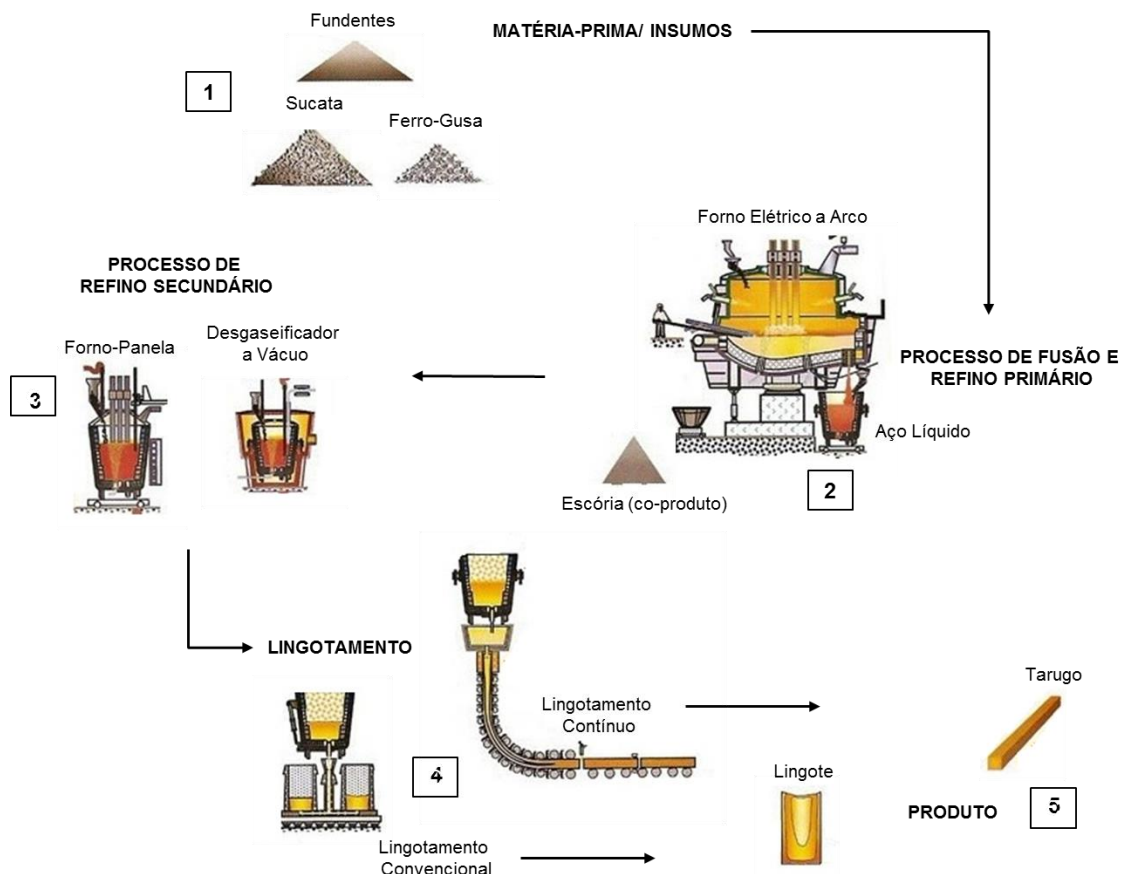
Além disso, em função dos produtos que preponderam em suas linhas de produção, as usinas também podem ser assim classificadas:

- Usina de semi-acabados (placas, blocos e tarugos);
- Usina de aços planos ao carbono (chapas e bobinas);
- Usina de aços planos especiais/ligados (chapas e bobinas);
- Usina de aços longos aços ao carbono (barras, perfis, fio máquina, vergalhões, arames e tubos sem costura);
- Usina de aços longos especiais/ligados (barras, fio-máquina, arames e tubos sem costura).

Existem unidades produtoras chamadas de não-integradas, que operam apenas uma etapa do processo: conformação mecânica (laminação, forjaria ou trefilas) ou redução.

A Figura 1 mostra a rota do processo de produção de aço de uma aciaria elétrica, que foi considerada neste estudo.

Figura 1 - Rota do processo de fabricação do aço de uma aciaria elétrica, considerada no estudo.



Fonte: Adaptado de RIZZO, 2006

Observa-se na figura 1 diferentes tipos de matérias-primas e insumos (1), fundentes, sucata metálica e outros que serão descritos nos capítulos 3.1.2 ao 3.1.4.

O refino primário (2) ocorre no forno elétrico a arco (FEA), responsável pela fusão da carga metálica e sobreaquecimento do aço líquido. Além disso, ocorrem as reações de desfosforação e descarburização, que serão descritas nos capítulos 3.3 e 3.4. Após a elaboração do aço no refino primário, o processo de obtenção com o inerente ajuste de composição química, de temperatura e limpidez, será complementado através dos processos de refino secundário (RIZZO, 2006).

O refino secundário (3) é necessário para a produção de aços de alto nível de limpeza. Alguns equipamentos, descritos por Jung, Lehmann e Jak (2014), são utilizados para a remoção de impurezas. No Forno-Panela é possível elevar a temperatura e ajustar a composição química do aço líquido. Gases e elementos como carbono e hidrogênio podem ser removidos no desgaseificador a vácuo.

Seguindo a etapa, no lingotamento (4) tem-se a transformação do aço líquido em sólido (5). No lingotamento contínuo um reservatório de aço líquido, chamado distribuidor, alimenta continuamente os veios diretamente para um molde de cobre, que será responsável pelo início do processo de solidificação. No lingotamento convencional, a alimentação do aço pode ser dada direta ou indiretamente em lingoteiras, dando origem aos chamados lingotes (RIZZO, 2006).

3.1.1 Pátio de Sucatas

O Pátio de Sucatas corresponde ao estágio inicial do processo de produção de aço do tipo aciaria elétrica. O Pátio de Sucatas é responsável pelo recebimento, separação, classificação e processamento da sucata, de acordo com o seu tamanho, densidade, procedência e composição química. Após processadas e prontas para o consumo interno, as sucatas de diferentes tipos são dispostas em áreas específicas denominadas baias e carregadas no cestão, juntamente com fundentes, como as cales calcítica (CCal) e dolomítica (CDol), e em alguns casos materiais carburantes como o coque de petróleo, por exemplo, além do ferro-gusa sólido, que também é armazenado neste local (ROSSI, 2014).

No pátio de sucatas é feito o processamento de alguns tipos de sucatas, buscando reduzir o nível de impurezas. Cada processo tem suas características e é importante realizar um processo específico para cada tipo de sucata. É preciso evitar

que uma sucata passe por processos desnecessários que só irão aumentar o custo desta, sem melhorar sua qualidade (NASCIMENTO, 2008).

Os principais métodos utilizados no processamento de sucata são:

- Prensa pacote: utilizada para formar pacotes de sucata;
- Prensa tesoura: primeiramente, prensa a sucata e depois uma tesoura guilhotina corta a mesma, em alguns casos é utilizada uma calha vibratória para retirar impurezas;
- Oxicorte: equipamento utilizado para cortar sucatas de grandes dimensões;
- Tesoura móvel: implemento acoplado ao braço de escavadeiras industriais, composto por duas mandíbulas (inferior e superior) e lâminas de corte;
- Shredder: equipamento composto por moinho e grelhas, que irá triturar a sucata e realizar separação magnética, promovendo a retirada de impurezas.

3.1.2 Sucata Metálica

A principal matéria-prima para a produção de aço em forno elétrico a arco é a sucata metálica. A sucata é gerada principalmente de três fontes principais:

- Sucata de obsolescência, que é obtida a partir de carros antigos, demolições, máquinas descartadas e objetos domésticos;
- Sucata industrial (também conhecida como sucata especial) que é gerada por indústrias que usam aço no seu processo de manufatura;
- Sucata de retorno (também conhecida como sucata interna) que é gerada dentro da aciaria e em processos de conformação (operações de laminação, perdas metálicas pela escória, etc.) (LIBÓRIO, 2009).

A principal influência da sucata no rendimento metálico é a quantidade de impureza contida nela. As impurezas podem ser classificadas como intrínsecas e extrínsecas (NASCIMENTO, 2008):

- Impureza intrínseca - é aquela que necessariamente está agregada a sucata e faz parte da natureza da mesma. Desde que não esteja em quantidades acima do normal, é um fator conhecido e levado em conta no processo. Ferrugem e revestimentos superficiais são exemplos de impureza intrínseca;
- Impureza extrínseca - é aquela que pode estar agregada ou solta no meio da sucata. Terra, papel e plástico são exemplos de impureza extrínseca. A impurezas extrínsecas geram gases, poeira de aciaria, e podem acabar na

escória do FEA e, por isso, pode causar quedas no rendimento metálico. Muitas sucatas passam por processamento para que esta impureza possa ser retirada e o uso desta sucata seja possível no FEA.

O nível de impureza pode prejudicar o rendimento metálico, o qual será definido no capítulo 3.5, além de afetar outros parâmetros, podendo dificultar a operação do FEA.

A Figura 2 apresenta uma pilha de sucata de obsolescência, no pátio de sucatas de uma Usina Siderúrgica.

Figura 2 - Pilha de sucata de obsolescência sendo preparada para ser processada.



Fonte: Pátio de sucatas de uma Usina Siderúrgica da região Sul do Brasil (Cortesia).

Na Figura 2, se observa uma das características da sucata de obsolescência, sendo dimensões e geometrias variadas, dificultando o emprego no FEA, pois há riscos de acidentes no processo, como danos aos painéis refrigerados. Também possui baixa densidade aparente, reduzindo a produtividade.

A Figura 3 apresenta uma pilha de sucata de obsolescência após o processamento via equipamento Shredder.

Figura 3 - Pilha de sucata Shredder.

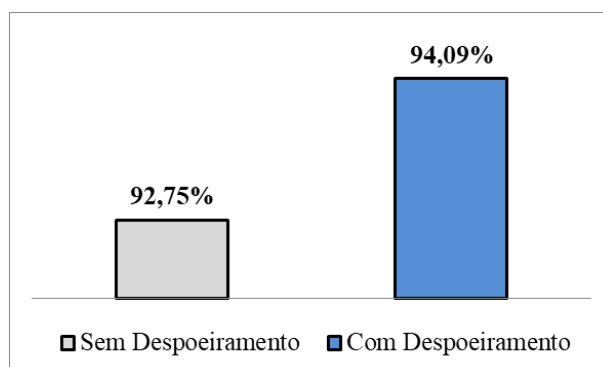


Fonte: Pátio de sucatas de uma Usina Siderúrgica da região Sul do Brasil (Cortesia).

A Figura 3 mostra a sucata Shredder, a qual elementos residuais ficam limitados à valores mais estáveis, devido a maior homogeneidade química, comparada com outros processamentos, evitando possíveis problemas de elementos fora de faixas de composição química permitidas, chumbo, estanho, cobre e molibdênio.

A Figura 4 apresenta a média de valores de rendimento metálico do FEA, obtidos em cenários onde o Shredder opera sem o sistema de despoeiramento e com o sistema de despoeiramento. Um maior detalhamento sobre o processo via Shredder pode ser encontrado em Alves, (2016).

Figura 4 - Média do rendimento metálico do FEA, baseado no aço líquido, para os cenários testados, sem despoeiramento no equipamento e com despoeiramento no equipamento Shredder



Fonte: Adaptado de ALVES, 2016.

Como pode ser visto na Figura 4, a inclusão do despoejamento no Shredder resulta em um aumento de 1,34% no rendimento metálico do FEA. Este aumento no rendimento está associado à menor quantidade de impurezas extrínsecas adicionadas ao forno elétrico no início do processo. A figura 4 também pontua o alto rendimento metálico desse tipo de carga metálica.

3.1.3 Ferro-Gusa

Para as aciarias elétricas, o uso de ferro-gusa sólido é bastante difundido no Brasil. Geralmente, um máximo de 20% de ferro-gusa é usado no FEA, pois este leva mais tempo para fundir do que a sucata. A fusão tardia do ferro-gusa aumenta significativamente o teor de carbono do aço (PRETORIUS, 1996).

O ferro-gusa deve ser colocado na metade inferior do primeiro cestão, para que a fusão ocorra no início do processo. Isto permite um tempo de descarburização adequado (evitando assim a possibilidade de um *tap-to-tap*¹ prolongado).

A composição química do ferro-gusa empregado depende do processo de fabricação de sua posterior aplicação e pode variar conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Variação da composição química do ferro-gusa empregado em distintos processos.

Ferro-Gusa	%C	%Si	%S	%P	%Mn
Para aciaria	3,5-4,5	< 1,0	< 0,04	0,08-0,25	0,4-1,0
Para fundição	3,6-4,1	2,0-2,5	< 0,04	0,5-0,7	0,6-0,9
Brasileiro via aciaria	4,1-4,4	0,3-0,4	0,003-0,015	0,07-0,11	0,10-0,50
Brasileiro Fundição	3,8-4,2	1,5-3,0	0,01	0,08-0,12	0,40-0,80

Fonte: PRETORIUS, 1996.

O conteúdo de silício se encontra entre 0,3% e 3,0%. O conteúdo de manganês por volta de 0,1% podendo chegar até 1,0%. Carbono varia entre 3,5 e 4,5. Já a sucata metálica empregada em FEA, contem normalmente 0,1% de silício, 0,1-0,3% de carbono e 0,6% de manganês.

O uso de 10-15% de ferro-gusa na carga metálica pode gerar economia de energia no processo, devido à presença do silício, manganês e carbono. Estes

¹ Tempo de corrida.

elementos atuam como fonte de energia química no banho quando o oxigênio é injetado (PRETORIUS, 1996).

O ferro-gusa contém silício, que reage com oxigênio para produzir sílica (SiO_2), que é transferida para a escória. A reação de oxidação é exotérmica contribuindo com a energia química. Entretanto, isso pode exigir calor adicional para manter a basicidade da escória, aumentando a quantidade de escória no forno e o consumo de energia. Para o mesmo teor de óxido de ferro (FeO), um maior volume de escória resulta em maiores perdas de rendimento metálico (PRETORIUS, 1996).

Em suma, o ferro-gusa, uma liga de ferro e carbono (Fe-C), é um importante componente da carga, por três motivos:

- Agrega carbono à carga, fornecendo energia química durante o processo;
- Possui baixo nível de elementos residuais como cobre, estanho, zinco e enxofre (Cu , Sn , Zn , S), diluindo as impurezas da sucata;
- Possui alta densidade aparente, evitando vazios no carregamento para o FEA (SILVA, 2011).

3.1.4 Outros Insumos

O carbono é um dos elementos chave que fornece propriedades ao aço. É também importante na etapa de refino e pode contribuir para a energia química necessária nas operações de fabricação do aço. No FEA, o carbono está presente na sucata, ferro-gusa e outras fontes de ferro, por exemplo DRI (*direct reduced iron*) e HBI (*hot briquetted iron*). A reação do carbono com o oxigênio no banho metálico produz monóxido de carbono (CO), que resulta num significativo ganho de energia no processo, além de uma queda no consumo de energia elétrica na operação.

Na operação de injeção de oxigênio, parte do ferro (Fe) sofre oxidação e é transferido para a escória. Operações com os chamados queimadores também irão gerar uma oxidação da sucata metálica. O carbono dissolvido no aço irá reagir com o FeO na interface escória/banho e produzirá CO e o Fe será recuperado, ou seja, retornará para o banho metálico. A quantidade de carbono utilizada na carga metálica irá depender de alguns fatores, como quantidade de carbono da sucata, projeção do consumo de oxigênio, teor de carbono desejado no aço, e a relação custo do rendimento metálico com relação ao custo do carbono. Em geral, a quantidade

utilizada irá corresponder com o balanço entre carbono e oxigênio, que maximize o rendimento metálico. Há três tipos de materiais carbonáceos, usados na carga do FEA: Carvão antracítico, carvão metalúrgico e coque de petróleo (BOWMAN e LEFRANK, 1998).

Os fluxantes, também denominados de escorificantes ou fundentes, são os materiais adicionados à carga para formação das escórias (escorificantes), durante a elaboração do aço, para controlar a composição, basicidade e potencial de oxidação das escórias ou para melhorar a fluidez destas (fluxantes). Os óxidos e carbonatos são os mais utilizados por serem ambientalmente mais apropriados: óxidos de cálcio, de magnésio, de silício, de bário, etc., ou os correspondentes carbonatos contendo estes componentes, tais como calcário, dolomita e magnesita (MOURÃO, 2007).

3.2 Metalurgia do Processo de FEA

3.2.1 Forno Elétrico a Arco

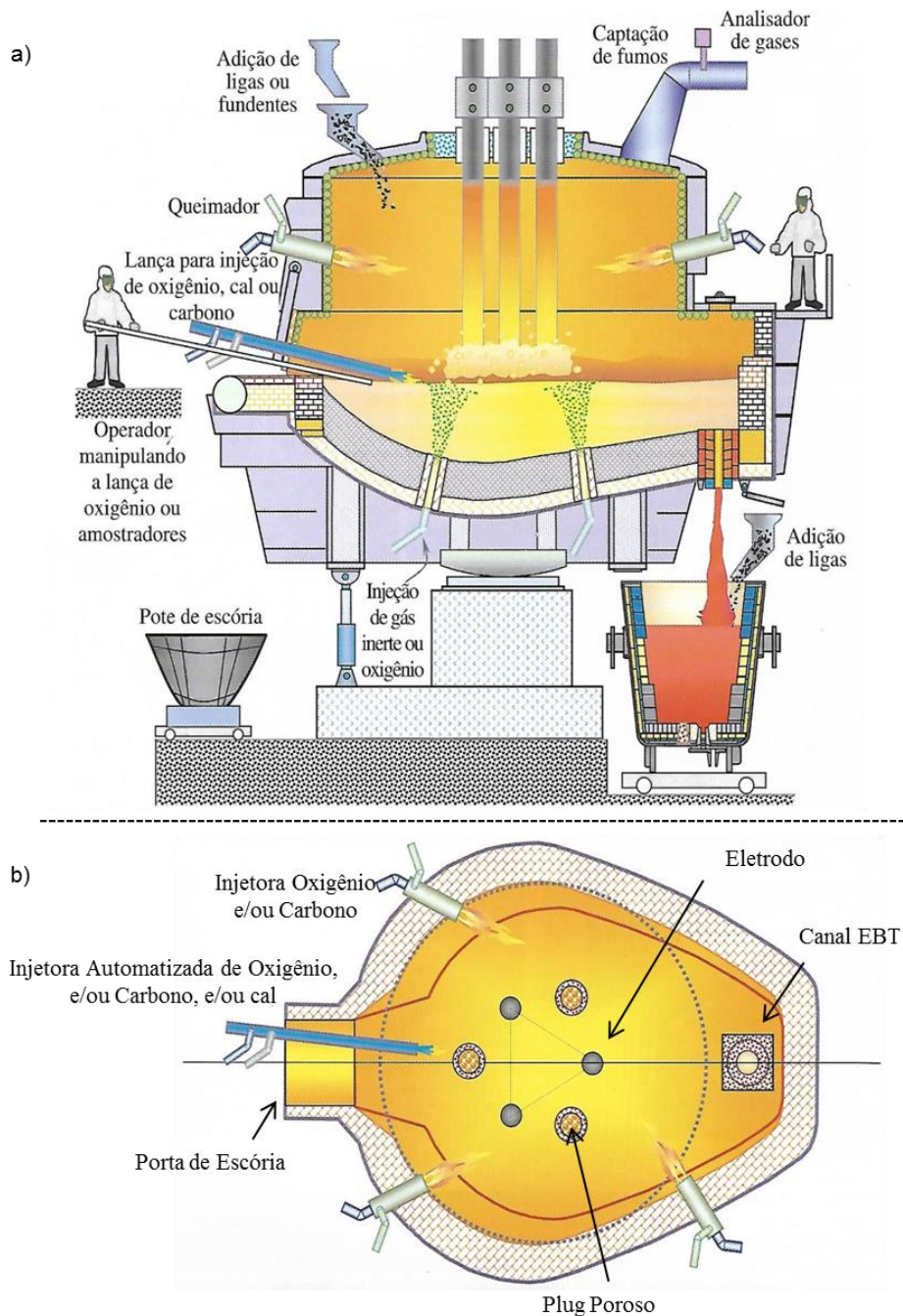
A operação em FEA é um dos processos recicladores de sucata mais importantes. Nos países desenvolvidos é comum operar com 100% de sucata metálica. A situação não é a mesma nos países emergentes, onde a quantidade de sucata necessária não é sempre disponível; alternativamente, materiais como DRI, HBI, ferro-gusa e ferro fundido são partes da carga. A carga metálica do FEA pode ser composta em média por 75% de sucata, 15% de DRI/HBI e o restante ferro-gusa e ferro fundido. Além de reciclar sucata, muitas vezes o FEA é utilizado para recuperar resíduos internos, como a poeira, escória e materiais refratários. Também resíduos como pneus e plásticos, em alguns países (MADIAS, 2014; FERREIRA *et al.*, 2015; BAGATINI, 2011). Os FEAs podem ser de corrente alternada (AC), possuindo um sistema trifásico de eletrodos de grafita, ou monofásico de corrente contínua (DC). Este estudo enfatizará nas características dos fornos AC.

O FEA consiste basicamente em uma carcaça metálica revestida por materiais refratários e painéis refrigerados. Essa carcaça metálica é coberta por uma abóboda móvel, para que seja possível fazer o carregamento da carga. A energia elétrica é fornecida pela aproximação dos eletrodos de grafita com a carga metálica, que

formam o arco elétrico. Essa energia é transferida para a carga metálica em forma de calor, promovendo a fusão da sucata (LIBÓRIO, 2009).

A representação esquemática do FEA, com alguns dos seus componentes externos, pode ser vista na Figura 5 (RIZZO, 2006).

Figura 5 - Forno Elétrico a Arco e alguns componentes, vista frontal (a) e superior (b).



Fonte: RIZZO, 2006.

As operações do FEA podem ser divididas nas etapas de:

- Carregamento da sucata e fundentes;
- Fusão;
- Refino;
- Vazamento.

3.2.1.1 Carregamento

Os eletrodos (Figura 5 (a)) são levantados, de forma que não sejam expostos a choques, e após, levanta-se a abóbada. Existe uma preocupação com a proteção do refratário da soleira, e também com a penetração dos eletrodos para a abertura do arco elétrico, então a carga é disposta em três camadas dentro do forno, de modo que primeiramente entre em contato com a soleira a sucata com menor densidade, para amortecer a queda da segunda camada, que é composta de sucatas mais densas. É importante que a última camada seja formada por sucatas de menor densidade, pois isso facilitará a penetração dos eletrodos, e essa sucata irá proteger a abóbada do forno das radiações, e diminuirá a emissão de ruídos (ARAUJO, 2008).

A carga do FEA é composta por sucata de aço e ferro-ligas, para se obter o aço com a qualidade desejada. Para evitar elementos indesejáveis no banho líquido, é necessário um rígido controle da carga metálica (SILVA, 2011).

3.2.1.2 Fusão

Após o carregamento, e finalizados os procedimentos de fechamento do forno, baixam-se os eletrodos, e aciona-se o arco elétrico. Nos primeiros minutos, os eletrodos fornecem energia elétrica que é transferida para a sucata metálica para a sua fusão. Nesta etapa se trabalha com uma tensão mais reduzida, criando um arco elétrico curto e um fluxo de calor vertical abrindo caminho na sucata, e esta vai protegendo as paredes da radiação do arco.

Após, aplica-se máxima voltagem e baixa corrente, resultando em um arco elétrico longo com um fluxo de calor horizontal, para que a carga seja fundida o mais rápido possível. Para acelerar a fusão, além da energia elétrica, pode-se fornecer energia química, por exemplo, através de lanças de oxigênio, que também podem funcionar como queimadores. Estes queimadores permitem o aproveitamento dos

gases gerados durante o processo no interior do próprio forno, fornecendo uma quantidade extra de energia proveniente da energia de pós-combustão, oriundos das reações de refino do aço, da oxidação de alguns componentes da carga e da combustão dos combustíveis adicionados no forno. A injeção deste oxigênio pode ser feita de forma manual, utilizando lanças consumíveis, por exemplo, e também com a técnica de queimadores auxiliares, vistas na Figura 5 (b) (RIZZO, 2006).

O sistema de lança consumível alcança as regiões de sucata que estão mais frias, longe dos eletrodos, ajudando no corte da sucata que fica próximo a porta de escória, reduzindo o volume durante a fusão, e facilitando o processo de retirada de escória da porta. Mas uma alta vazão destas lanças pode gerar respingos do banho, levando o consumo elevado dos eletrodos e refratários. Para que isso não aconteça, este sistema trabalha em conjunto com os queimadores auxiliares, quando posicionados corretamente, proporcionam a agitação do banho líquido, e uma adequada homogeneização da temperatura, aumentando então a eficiência da energia química (LIBÓRIO, 2009).

Finalizada a fusão da carga, inicia-se a etapa de refino do banho líquido, onde ocorrerão as etapas de descarburização e desfosforação.

3.2.1.3 Refino

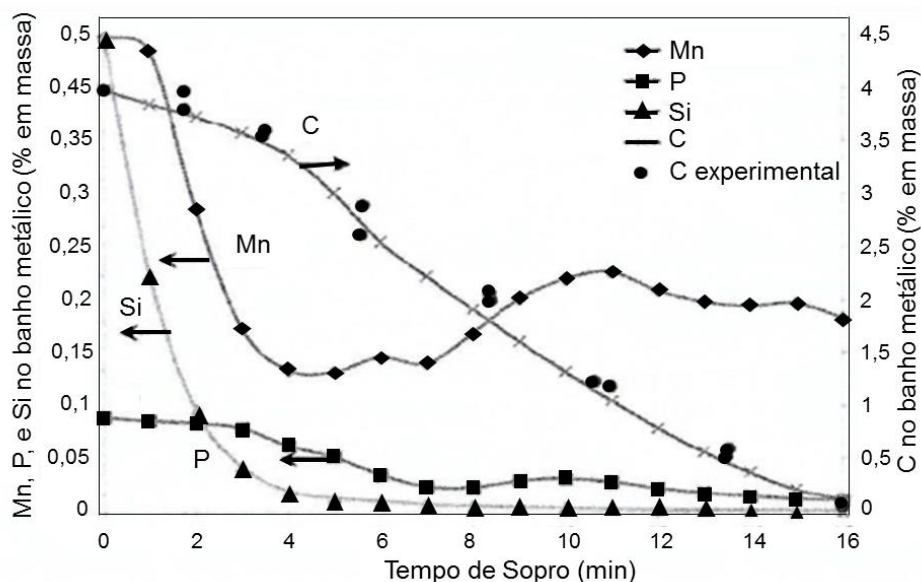
A operação de refino no FEA envolve a remoção de elementos como o fósforo, carbono, silício, manganês e alumínio. Essa etapa pode ocorrer após a fusão da carga metálica, e em alguns casos, durante a fusão. As reações são dependentes da quantidade de oxigênio disponível. Durante o refino, elementos tais como o fósforo, silício e alumínio, tem uma grande afinidade química pelo oxigênio, formando óxidos que vão ser absorvidos pela escória. Sendo pequena a relação entre a quantidade de escória e quantidade de aço por tonelada, a remoção de impurezas no FEA é limitada. Uma vez que as impurezas migram para a escória, elas não necessariamente ficarão lá. A retenção do fósforo na escória é uma função da temperatura do banho, da basicidade e dos níveis de FeO da escória. Em temperaturas mais altas, ou baixos níveis de FeO, o fósforo vai reverter a partir da escória para o banho. Então, a remoção do fósforo deve ser realizada o mais cedo possível, quando a temperatura do banho é mais baixa. O teor de fósforo do produto final depende da especificação desejada,

sendo dependente também da qualidade da sucata fundida (BOWMAN e LEFRANK, 1998).

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

Segundo Yildirim e Prezzi, (2011), a evolução química dos processos de FEA e BOF são semelhantes, e as escórias se assemelham tanto quimicamente quanto morfologicamente. As Figuras 6 e 7 mostram um resultado de simulação típico de um processo BOF² utilizando como ferramenta um modelo de zona de reação de equilíbrio efetivo (HACK e VANNDE, 2014).

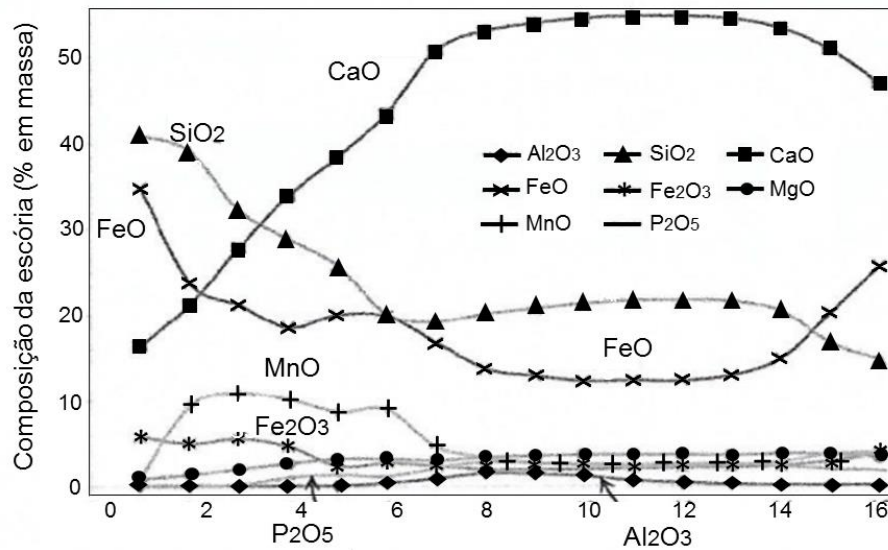
Figura 6 - Evolução da composição química do banho metálico durante o sopro de oxigênio, em BOF.



Fonte: HACK e VANNDE, 2014.

² Basic Oxygen Furnace – Forno básico a oxigênio, parte de ferro-gusa líquido para a produção de aço.

Figura 7 - Evolução da composição química da escória durante o sopro de oxigênio, em BOF.



Fonte: HACK e VANNDE, 2014.

Na Figura 6, nota-se a evolução da reação de descarburização, rápida oxidação do Si e reversão do manganês e fósforo. No início do processo, o Si do banho metálico é rapidamente oxidado, formando SiO₂ e uma escória rica em FeO, Figura 7. O FeO é formado da oxidação da superfície do banho metálico quando o sopro da lança de oxigênio é alto. O conteúdo de cal (CaO) da escória evolui progressivamente conforme vai sendo dissolvido. Os elementos manganês (Mn) e fósforo (P) são oxidados logo em seguida. A remoção do carbono do metal ocorre após um período de incubação. Então o conteúdo de FeO da escória decresce, sendo consumido pela reação de descarburização (HACK e VANNDE, 2014).

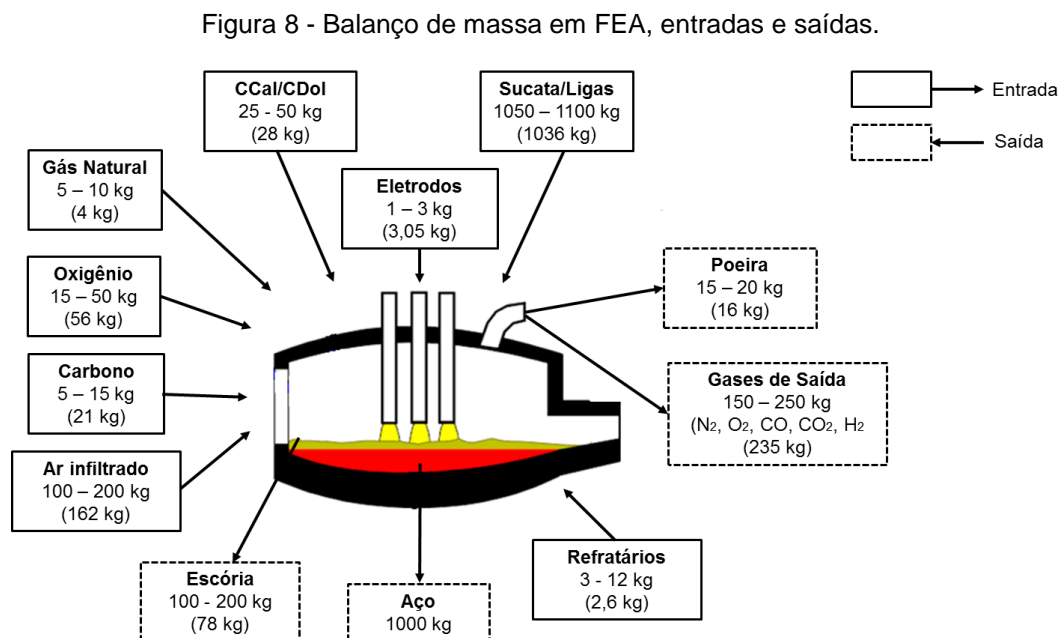
3.2.1.4 Vazamento

Quando a composição química e a temperatura especificadas do banho são atingidas no FEA, o furo de vazamento, canal EBT (*Excentric Bottom Tapping*), é aberto e o forno é inclinado de modo que o aço seja transferido para panela (Figura 5 (a)). Durante o processo de vazamento, são adicionadas ligas com base na análise do banho metálico e do tipo de aço desejado. Desoxidantes são adicionados ao aço para reduzir o teor de oxigênio antes do fim do processamento. Os desoxidantes mais comuns são de alumínio ou silício sob a forma de ferro-silício, ferro-silício-manganês ou carbureto de silício. Uma nova escória é formada durante o vazamento. Para as

operações do forno-panela, uma escória a base de cálcio aluminatos é uma boa escolha para o controle de enxofre (MINCU e CONSTANTIN, 2013)

3.2.2 Balanço de massa em FEA

Denomina-se como balanço de massa em FEA o estudo comparativo entre entradas e saídas do forno elétrico. Os objetivos desse balanço são, por exemplo, a determinação das reações metalúrgicas (C, Si, Mn, Fe), a massa de ar infiltrado e a saída de gases em adição a dados bem conhecidos tais como carga metálica, consumo de eletrodo, produtividade, escória, etc. Para que sejam realizadas estas medições referentes à composição do gás na saída são necessários o fluxo de volume e a temperatura do gás. A Figura 8 ilustra o resultado do balanço de massa médio de 31 corridas, realizado por Pfeifer e Kirschen (2005), para um forno elétrico de 100 t de capacidade, energia específica de 450 kVA/t, um consumo de oxigênio, grafita e gás natural relativamente alto.



Fonte - PFEIFER e KIRSCHEN 2005.

Estes resultados são baseados em balanços de massa de carbono (medição da saída de gases), nitrogênio (infiltração de ar) e CaO (massa de escória), conforme mostra a equação 1:

$$X_{CaO,Cal}M_{CaO} + X_{CaO,Refratário}M_{Refratário} = X_{CaO,Escória}M_{Escória} + X_{CaO,Pós}M_{Pós} \quad (1)$$

Onde:

X = Teor de CaO;

M = Massa de CaO.

Os valores de $M_{CaO,Cal}$, $M_{CaO,pós}$ e $X_{CaO,Refratário}$, são conhecidos à partir de análises químicas das amostras. Os valores de $M_{Refratário}$ e $M_{Pós}$ são conhecidos a partir de dados estatísticos e M_{Cal} é um parâmetro do processo. A composição da cal da escória $X_{CaO,Escória}$ é determinada à partir de amostras de escórias retiradas no vazamento a cada corrida (PFEIFER e KIRSCHEN, 2005).

3.3 Metalurgia das Escórias de FEA

A necessidade de compreensão dos mecanismos e reações que comandam o processo de produção do aço, a fim de otimizar inúmeros parâmetros para redução de custos e melhoria do produto final faz com que pesquisadores desenvolvam modelos matemáticos, termodinâmicos e físicos para reproduzir a metalurgia do processo. No FEA, as propriedades físicas e químicas da escória são de extrema importância para um processo mais eficiente. Além disso, o mecanismo de formação de uma escória espumante ainda é um ponto a ser estudado mais detalhadamente, pois a escória é muitas vezes avaliada apenas por seu aspecto visual, por um operador de FEA, e é considerada caótica e instável (DEHKORDI, MOALLEM e PARSAPPOOR, 2011).

3.3.1 Escórias de FEA

Define-se escória como sendo soluções iônicas constituídas de óxidos de metal fundido, que flutuam sobre o aço completamente ou parcialmente líquidas. A escória consiste em uma fração líquida e uma fração sólida. À medida que a fração sólida aumenta a fluidez da escória muda, apresentando características “cremosas”, “macia” e eventualmente “duras” ou sólidas. As funções de uma escória, na produção de aço em FEA (PRETORIUS e CARLISLE, 1998):

- Cobrir o arco do FEA, proteger os refratários de irradiações do arco;

- Promover a qualidade do aço, absorvendo óxidos;
- Desfosforar;
- Proteger o aço da absorção de hidrogênio e nitrogênio;
- Isolar o aço para minimizar as perdas metálicas e térmicas;
- Ser compatível com a linha do refratário.

A composição da escória é expressa pela análise química em termos de componentes óxidos (% em massa). A Tabela 2 apresenta a composição química da escória de FEA para diferentes autores:

Tabela 2 - Composição química de escórias de FEA para diferentes autores (Composição dos óxidos % em massa).

Referência	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe total	MnO
<i>BARRA et al, 2001</i>	29,5	16,1	5,0	7,6	-	32,56	-	4,5
<i>LUXÁN et al, 2000</i>	24,4	15,4	2,9	12,2	34,4	-	-	5,6
<i>MANSO, et al, 2006</i>	23,9	15,3	5,1	7,4	-	-	42,5	4,5
<i>SHI, 2004</i>	35-60	9-20	5-15	2-9	15-30	-	-	3-8
<i>TOSSAVAINEN et al, 2007</i>	38,8	14,1	3,9	6,7	5,6	20,3	-	5
<i>TSAKIRIDIS et al, 2008</i>	35,7	17,5	6,5	6,3	-	26,4	-	2,5

Fonte: *BARRA et al, 2001*; *LUXÁN et al, 2000*; *MANSO et al, 2006*; *SHI, 2004*; *TOSSAVAINEN et al, 2007*; *TSAKIRIDIS et al, 2008*.

Conforme a Tabela 2, as escórias de FEA são compostas principalmente por CaO, SiO₂, MgO, Fe_xO_y, Al₂O₃ e MnO. Existem diferentes formas do óxido de ferro presente, na Tabela 2, *Luxán et al, (2000)*, *Shi, (2004)* apresentam o óxido de ferro em forma de FeO, já *Barra et al, (2001)*, *Tsakiridis et al, (2008)* apresentam em forma de Fe₂O₃. *Manso et al, (2006)* apresenta o ferro total contido na escória.

A Tabela 3 apresenta a origem dos principais óxidos formadores de escória.

Tabela 3 - Principais óxidos presentes em escórias de FEA. Valores em % em massa.

Óxidos	Práticas mais usadas	Origem
CaO	Adicionado	<ul style="list-style-type: none"> • Cal (93% CaO). • Dolomita (\approx 58% CaO e 39% MgO). • Cálcio-Aluminatos (\approx 45% CaO e 53% Al₂O₃). • Refratários dolomíticos.
MgO	Adicionado	<ul style="list-style-type: none"> • Dolomita (\approx 58% CaO e 39% MgO). • Magnésia (> 92% MgO). • Refratários magnesianos e dolomíticos.
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 ($2\underline{\text{Al}} + 3/2\underline{\text{O}}_2 = \text{Al}_2\underline{\text{O}}_3$). • Desoxidação do aço ($3\underline{\text{O}} + 2\underline{\text{Al}} = \text{Al}_2\underline{\text{O}}_3$). • 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 ($2\underline{\text{Fe}} + \text{O}_2 = 2\underline{\text{FeO}}$).
MnO	Processo no FEA	<ul style="list-style-type: none"> • Carga ($2\underline{\text{Mn}} + \text{O}_2 = 2\underline{\text{MnO}}$). • Desoxidação do aço ($\underline{\text{Mn}} + \underline{\text{O}} = \underline{\text{MnO}}$).

Fonte: BIELEFELDT, 2012.

Os óxidos básicos, CaO e MgO (Tabela 3), 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 (DEHKORDI, MOALLEM e PARSAPPOOR, 2011).

A saturação de MgO na escória será discutida no capítulo 3.2.3.4.

3.3.2 Escória Espumante

Recentemente, um melhor desempenho do processo de FEA vem sendo alcançado utilizando os princípios da engenharia de escórias. A escória espumante não apenas diminui o consumo de refratários e eletrodos, mas também promove um significativo aumento na eficiência térmica e diminui o tempo de fusão (DEHKORDI, MOALLEM e PARSAPOOR, 2011).

A eficiência de formação da escória espumante requer algumas propriedades particulares, como pontos ótimos de composição química, pois dessa forma a escória terá propriedades físicas que contribuiriam para a prática.

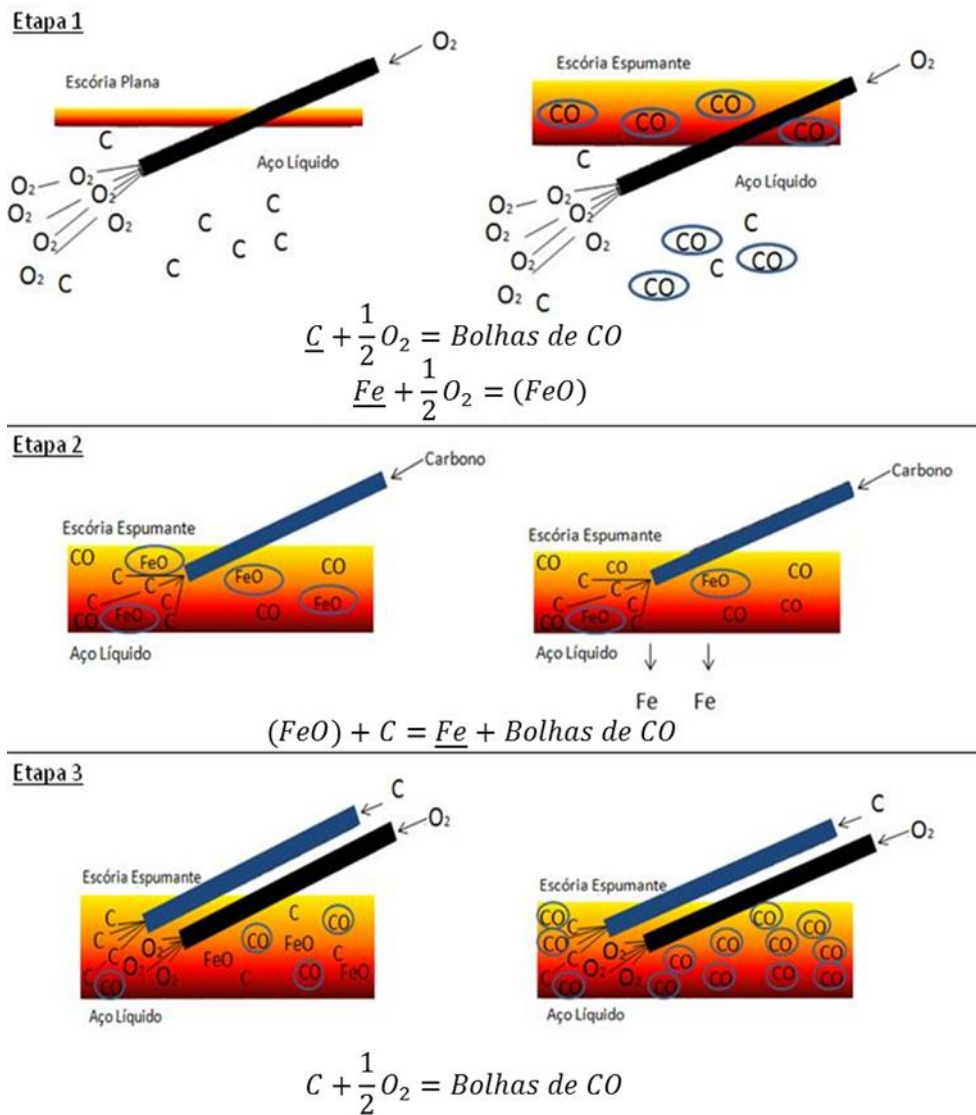
Estudos recentes em FEA mostram que escórias com composições químicas adequadas podem espumar de maneira eficiente, contribuindo com a estabilidade do arco elétrico, resultando em uma maior eficiência energética no FEA, e em consequência, um menor consumo de energia elétrica no processo (DEHKORDI, MOALLEM e PARSAPOOR, 2011; SEDIVY e KRUMP, 2008; DEHKORDI, MOALLEM e PARSAPOOR, 2010; VIEIRA, *et al.*).

3.3.2.1 Formação da Escória Espumante

A formação da escória espumante depende fatores, como a força gravitacional, diâmetro de bolha, forças primárias, viscosidade, tensão superficial e composição da escória (GOU, IRONS e LU, 1996; MORALES, *et al.*, 1997).

Divide-se a formação da escória espumante em três etapas, conforme Figura 9.

Figura 9 - Etapas da formação de escória espumante em FEA.

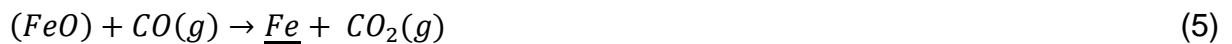


Fonte: Adaptado de PRIBYL, 2009.

Na Figura 9, inicialmente tem-se a injeção de oxigênio no metal fundido (etapa 1), este oxigênio reage com o carbono presente (equação 2), formando as bolhas de CO. O oxigênio reage também com o Fe presente no banho (equação 3).



Como ocorre a perda de Fe para a escória, é feita a injeção de carbono (etapa 2), ocorrendo a reação de redução do FeO (equação 4). A equação 4 é resultado da soma das reações, representadas pelas equações 5 e 6, que ocorrem no FEA espontaneamente. A etapa 2 é de extrema importância, não só por gerar mais gás CO, mas também por causar a recuperação do Fe de volta para o banho, acarretando um aumento do 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 7). 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 consideradas:

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

(X) = elemento presente na escória.

3.3.3 Propriedades Físico-Químicas das Escórias

O controle das propriedades físico-químicas das escórias é a chave para a otimização do processo em FEA, pois algumas variáveis durante o processo dependem dessas propriedades, como a eficiência do refino do aço, desgaste de refratário, o consumo de energia elétrica, rendimento metálico, etc.

3.3.3.1 Viscosidade

Assim como a espumação da escória depende da formação de bolhas, descritas nas equações 4 e 7, a viscosidade da escória é extremamente importante

para uma espumação efetiva. O aumento da viscosidade diminui a taxa de permeabilidade da espuma líquida, aumentando o tempo de residência das bolhas, altura e estabilidade de espumação (ZHU, COLEY e IRONS, 2012).

A viscosidade efetiva da escória pode ser calculada considerando a presença de partículas sólidas, equação 8 (BIELEFELDT, VILELA, HECK, 2013).

$$\eta_e = \eta (1 - 1,35 \theta)^{-5/2} \quad (8)$$

Onde:

η_e – Viscosidade efetiva da escória (Pa.s);

η – Viscosidade da escória líquida (Pa.s);

Θ – Fração de partículas sólidas.

Uma escória eficiente não é totalmente líquida. A presença de partículas sólidas é crucial, pois servem como pontos de nucleação para as bolhas, proporcionando um aumento de bolhas pequenas para a formação da escória espumante. Entretanto, um aumento excessivo da viscosidade da escória forma uma escória “dura” e a presença em excesso de partículas sólidas impedirá a ascensão das bolhas, prejudicando então a espumação da escória (PRETORIUS e CARLISLE, 1998).

3.3.3.2 Basicidade Binária

Na produção de aço, a basicidade das escórias é normalmente representada pela razão das concentrações de massa, ou basicidade binária, como segue na equação 9, que descreve o excesso de cal que compensa a sílica oriunda da carga metálica utilizada no processo:

$$B_2 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} \quad (9)$$

$\%CaO$ = % óxido de cálcio em massa;

$\%SiO_2$ = % sílica em massa.

Para escórias básicas, o aumento do teor de CaO e MgO proporciona um aumento da viscosidade quando se atinge a saturação desses óxidos devido à precipitação de partículas sólidas (CORBARI, *et al*, 2009).

3.3.3.3 Influência do FeO na Escória

O FeO presente na escória, além de representar um impacto no rendimento metálico do FEA, causa um efeito importante nas características fluxantes da escória, causando uma mudança na viscosidade. É de extrema importância um balanço entre o FeO gerado pela injeção de oxigênio e o FeO reduzido pelo carbono; se esse balanço é correto, haverá uma boa espumação de escória (ALMEIDA, *et al*, 2016).

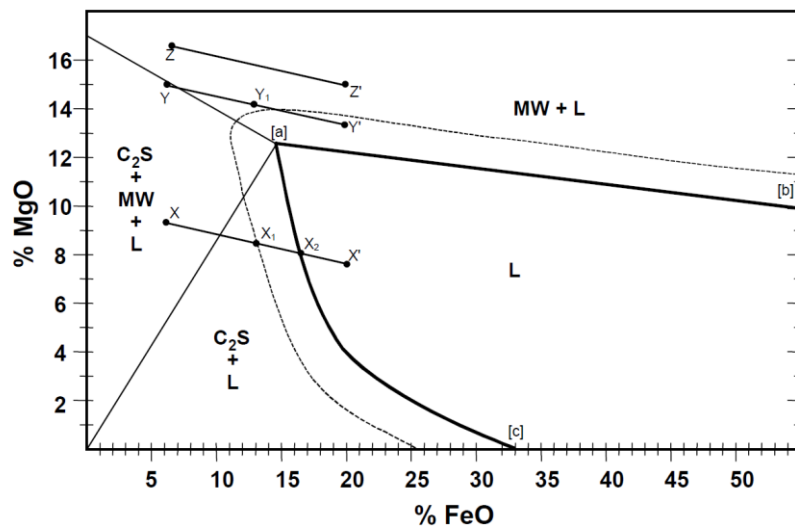
Corbari *et al* (2009) descreveram em seu estudo teores ótimos de FeO na escória para uma melhor espumação, valores entre 25-35% em massa. Aminorraya e Edris (2002), encontraram valores entre 20-25% de FeO para um menor consumo de energia no FEA. Entretanto, os estudos desses autores foram desenvolvidos com diferentes dados de composições químicas de escória. As basicidades utilizadas por ambos, respectivamente, foram de 1,2 e 2,2.

3.3.3.4 Saturação de MgO

A saturação de MgO não envolve apenas a presença de partículas sólidas (como no caso do CaO), mas também permite que o desgaste do refratário não seja excessivo, prevenindo o consumo de MgO do refratário pela escória (ALMEIDA, *et al*, 2016).

Para mostrar os níveis de saturação, Pretorius e Carlisle, (1998), desenvolveram diagramas de saturação isotérmicos (ISD). No diagrama da Figura 10, a basicidade e temperatura foram consideradas constantes, sendo $B_2 = 1,5$ e temperatura de 1600°C.

Figura 10 - Diagrama de Saturação Isotérmica (ISD) para basicidade $B_3 = 1,5$; Onde $C_2S = Ca_2SiO_4$, MW = Magnésio – Wustita e L = Líquido; ($B_3 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$, sendo $\%Al_2O_3 = 0$), $T = 1600^\circ C$.



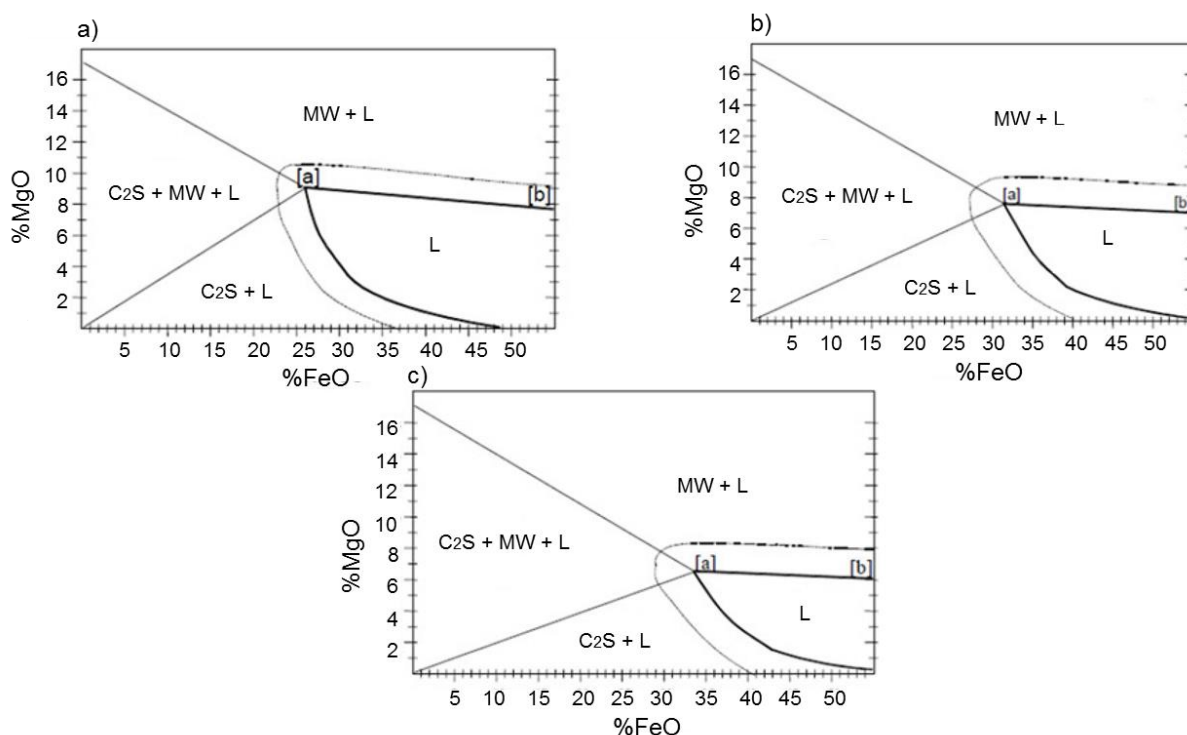
Fonte: PRETORIUS, OLTMANN e JONES, -.

Na Figura 10, a dupla saturação ocorre no ponto [a], que mostra a condição ideal da escória para proteger o refratário do forno, quando estão em contato. As curvas de saturação do MgO e CaO são representadas respectivamente pelos pontos [a] – [b] e [a] – [c] respectivamente. A linha tracejada representa as condições de escórias ideais para a prática de espumação, por ter a presença de partículas sólidas e conseqüentemente uma viscosidade ótima. As escórias dos pontos X, Y e Z demonstram claramente a importância dos teores de MgO e FeO da escória. A escória do ponto X é extremamente “dura”, prejudicando a espumação. À medida que o teor de FeO aumenta, e a composição da escória se desloca para o ponto X₁, a viscosidade da escória muda de “dura” para “macia”, e as propriedades de espumação melhoram. No entanto, com o aumento excessivo de FeO no ponto X₂ a escória torna-se totalmente líquida, diminuindo a viscosidade e conseqüentemente a espumação. Já o caminho da composição química da escória Y, além de ser totalmente compatível com o refratário, as propriedades de espumação estão menos sensíveis aos teores de FeO. Isso se deve à maior quantidade de MgO na escória. Porém, a escória de posição Z, possui o teor de MgO muito elevado, e mesmo que o teor de FeO aumente significativamente, às propriedades de espumação não são ideais, pois a escória será “dura”, dificultando a formação de bolhas.

Os ISDs mostram que os níveis de saturação de MgO variam de acordo com a basicidade e o teor de FeO, Figura 11.

Figura 11 - Diagramas de Saturação Isotérmica para diferentes basicidades:

(a) $B_3 = 2,0$; (b) $B_3 = 2,5$; (c) $B_3 = 3,0$; ($B_3 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$, sendo $\%Al_2O_3 = 0$), $T = 1600^\circ C$.

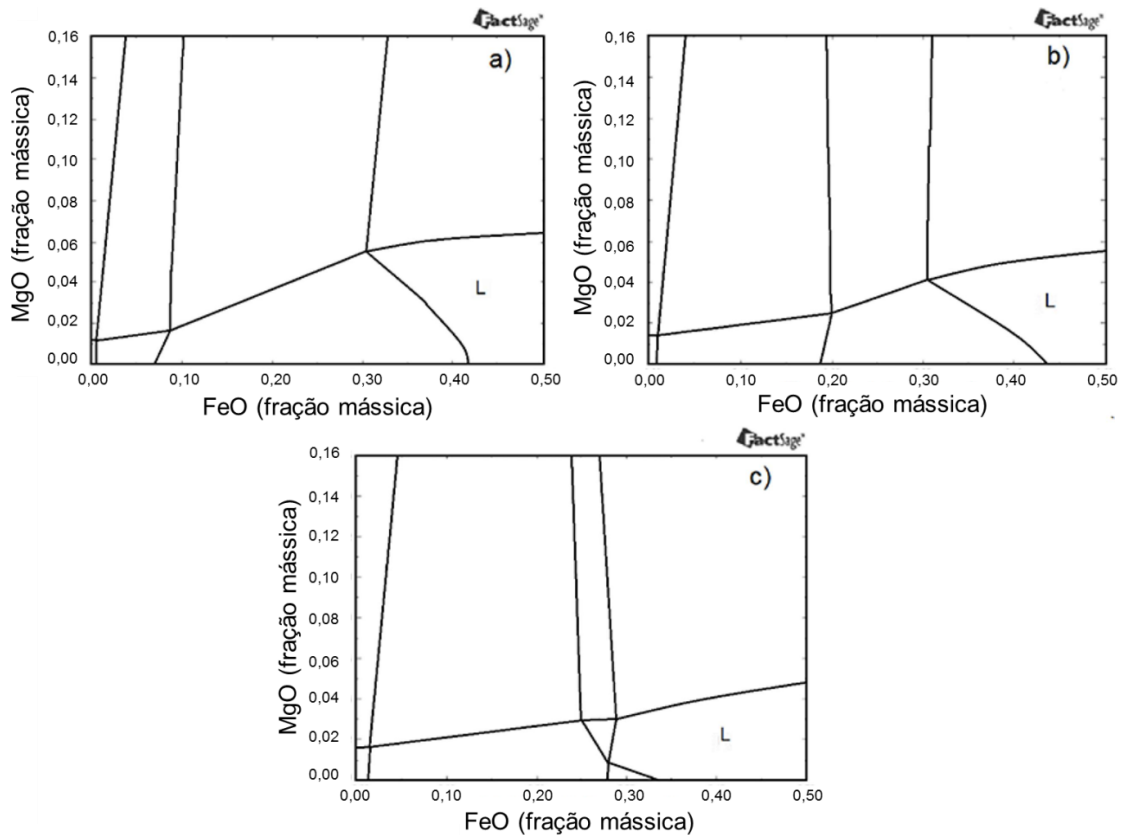


Fonte: PRETORIUS e CARLISLE, 1998.

Com o aumento da basicidade, os níveis de MgO necessários para saturação decrescem. Ocorre o decréscimo do campo líquido. Quanto maior a basicidade maior o teor de FeO necessário para garantir a zona líquida (linhas entre os pontos (a) e (b) da Figura 11.

Paulino *et al* (2014) utilizando o *software* de simulação termodinâmica *FactSage* (versão 6.4), criaram ISDs nas mesmas condições definidas por Pretorius e Carlisle (1998), Figura 12.

Figura 12 - Diagramas de Saturação Isotérmica para diferentes basicidades binárias:
 (a) $B_2= 2,0$; (b) $B_2= 2,5$; (c) $B_2= 3,0$, $T = 1600^\circ\text{C}$.



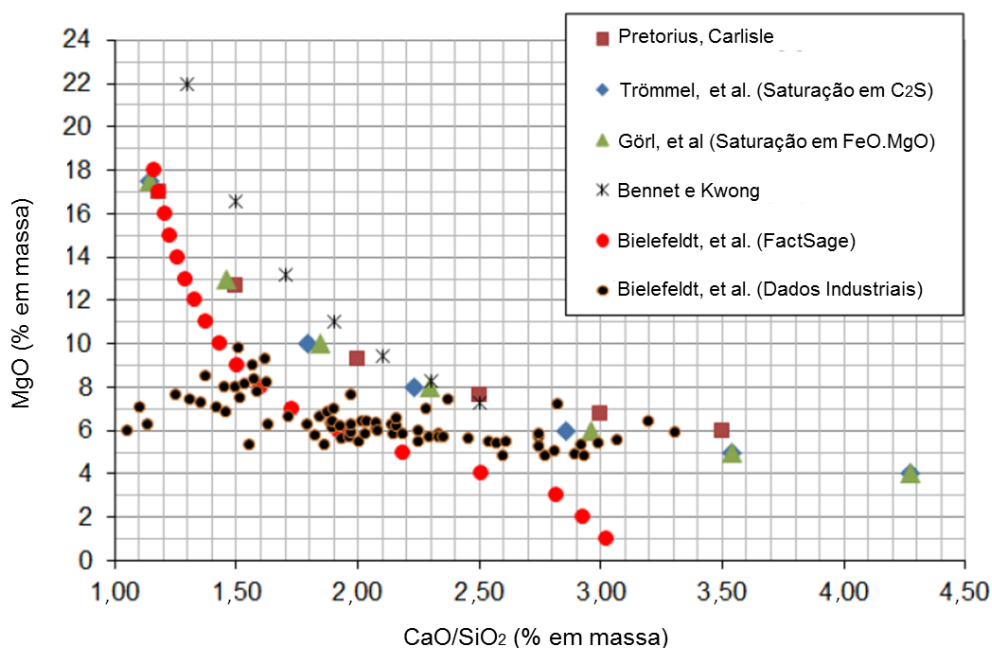
Fonte: PAULINO *et al*, 2014.

De acordo com Paulino *et al* (2014), as condições para saturação de MgO eram as mesmas para escórias de baixa basicidade ($B_2 < 2,0$), quando comparadas com Pretorius e Caslile (1998). Para basicidades mais altas, a inclinação da curva de saturação é positiva, aumentando o MgO de saturação com o aumento de FeO. Portanto, o efeito do FeO na linha de saturação do MgO é o contrário do que foi mencionado por Pretorius. Além disso, o valor da saturação de MgO e o ponto de dupla saturação obtidos pelo *software FactSage* são menores se comparados aos valores encontrados previamente.

Algumas das diferenças podem ser atribuídas a escolha do banco de dados. O “FToxid”, o principal banco de dados considerado, é composto por dois bancos de dados: “FToxid-soluções” (FToxid53Soln.sda), que contém dados de soluções sólidas e líquidas de óxidos e a base “FToxid compostos” (FToxid53Base.cdb), que contém dados de compostos óxidos estequiométricos sólidos e líquidos). Entretanto, Paulino *et al* usaram apenas o modelo de soluções (PAULINO *et al* 2014).

A precipitação de partículas sólidas “CaO” ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) e “MgO” ($\text{MgO}\cdot\text{FeO}$) tem uma curva comum no sistema CSFM ($\text{CaO}\text{-SiO}_2\text{-FeO-MgO}$). A composição descrita nessa curva dirá quando se dará a saturação simultânea de “MgO” e “CaO”. A Figura 13 mostra os teores de MgO para uma dupla saturação da escória no sistema CSFM em função da basicidade binária, obtidos por Bielefeldt *et al* (2015) via simulação termodinâmica, dados industriais, além de resultados adquiridos por outros autores.

Figura 13 - Teores de MgO necessários para uma dupla saturação de escórias do sistema CSFM em função da B_2 . $T = 1600^\circ\text{C}$.



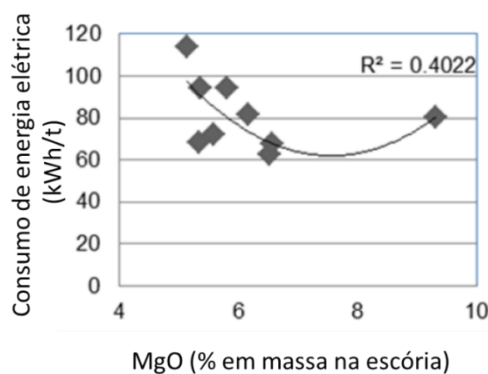
Fonte: BIELEFELDT *et al*, 2015.

A curva mostra uma clara diferença entre as curvas de Pretorius e Carlisle (1998), Trömmel *et al* (1969), Görl, *et al* (1969) e Bielefeldt *et al* (2015). A diferença é por volta de 3% de MgO em uma basicidade entre 1,4 e 2,8. Acima de 2,8 há uma queda nos valores da curva, e para valores superiores a 3,1, já não representam pontos de dupla saturação. As curvas de Pretorius e Carlisle (1998) e as de Trömmel *et al* (1969) e Görl, *et al* (1969) têm uma boa relação entre si, pois os estudos citados serviram como base para o trabalho de Pretorius e Carlisle (1998). Bennett e Kwong (2010), realizaram um estudo empregando a termodinâmica computacional

(*FactSage*) para avaliar o sistema CSFM e obtiveram resultados consistentes com a literatura. A curva obtida por Bielefeldt *et al* através do *FactSage* está mais próxima dos dados industriais, o que pode indicar uma melhor relação comparado com os outros estudos.

Vieira *et al* (2016) apresentaram faixas de composição química de dados industriais que tiveram um menor consumo de energia elétrica durante o refino. Para um FeO entre 27-30% e uma basicidade binária entre 3,0-3,2, que foram as faixas que apresentaram valores menores de energia elétrica durante o refino, foi feita uma análise da influência do teor de MgO na escória, Figura 14.

Figura 14 – Influência dos teores de MgO da escória em relação ao consumo de energia elétrica no refino do FEA.



Fonte: VIEIRA *et al*, 2016.

Conforme a Figura 14, os valores mais baixos de energia elétrica, consumida durante o refino, estão próximos de 6,5%. Além de evitar o desgaste do refratário, a saturação em MgO é essencial para que as propriedades da escória sejam ideais, resultando em uma boa espumação. Com isso, a prática da escória espumante irá proporcionar uma maior estabilidade do arco elétrico no processo de FEA, reduzindo então o consumo de energia elétrica na etapa de refino (BENNETT, 2010).

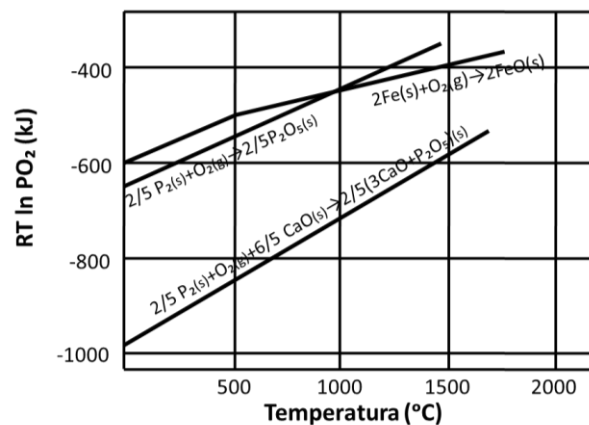
3.4 Metalurgia do Refino do Aço

3.4.1 Desfosforação

A redução de teores de fósforo no aço é uma grande exigência que deve ser atendida pela indústria siderúrgica. O fósforo é um elemento crítico na produção de aços, pois é muito sensível à segregação para o contorno de grão. O fósforo age como um poderoso endurecedor por solução sólida, resultando em efeitos prejudiciais como a fragilidade a frio, redução da resistência ao choque e redução de tenacidade e ductilidade (SONG *et al*, 2010). Sendo assim, uma das operações mais importantes no refino dos aços é a remoção do fósforo, chamada desfosforação.

A remoção direta do fósforo com injeções de oxigênio no FEA não ocorre devido restrições termodinâmicas. O pentóxido de fósforo (P_2O_5) é menos estável em altas temperaturas de processo, podendo ser reduzido imediatamente para o banho metálico durante a fase de refino. Então, para que a reação de desfosforação ocorra é necessária a oferta de cal, CaO , na escória, Figura 15 (URBAN, WEINBER e CAPPEL, 2014).

Figura 15 - Diagrama de Ellingham simplificado.



Fonte: Adaptado de URBAN, WEINBER e CAPPEL, 2014.

O diagrama de Ellingham simplificado da Figura 15, mostra a atividade do P_2O_5 sendo reduzida devido a adição de CaO sólido, formando um composto estável em todas as temperaturas. Por essa razão, escórias de alta basicidade são mais propícias para uma desfosforação mais eficiente.

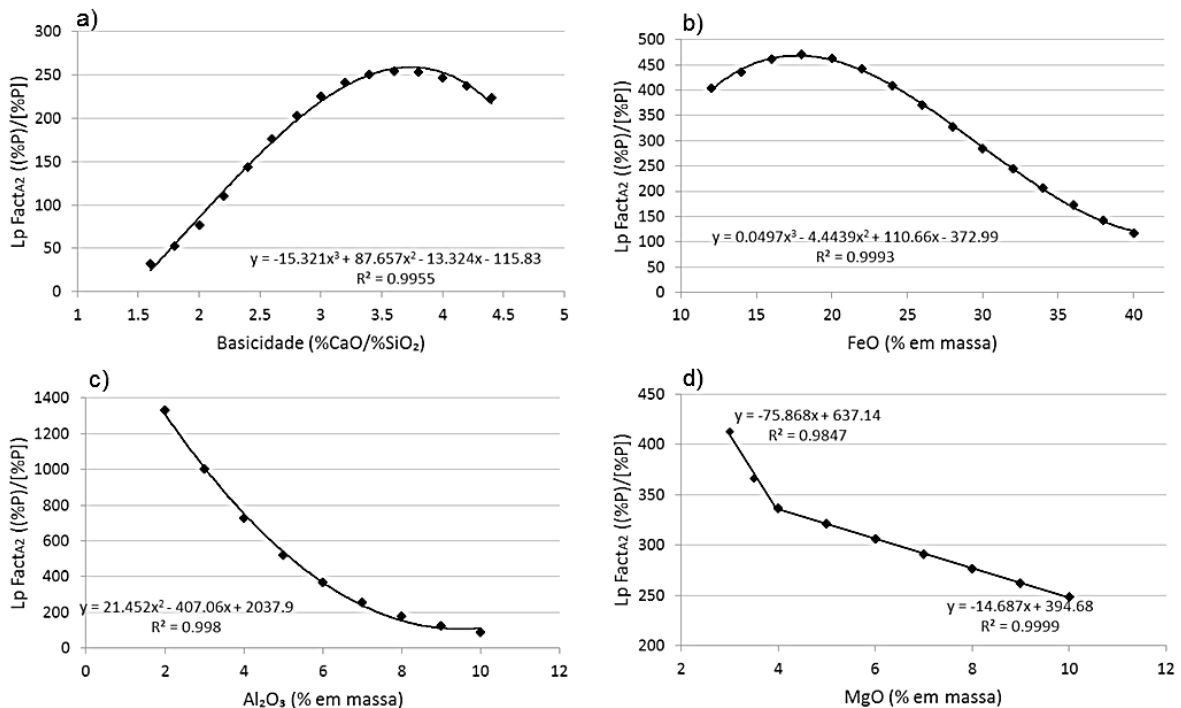
Uma forma de se medir a eficiência da desfosforação é através do coeficiente de partição do fósforo (L_p). Esse coeficiente é definido na equação 10, sendo (%P) o fósforo retido na escória e [%P] o fósforo existente no banho metálico (URBAN, WEINBER e CAPPEL, 2014).

$$L_p = \frac{(\%P)}{[\%P]} \quad (10)$$

Sendo assim, quanto maior o coeficiente de partição, melhor é a desfosforação do banho metálico.

Netto *et al* (2016), avaliaram em seu trabalho a viabilidade de calcular o L_p e avaliar o comportamento da partição de fósforo com relação à composição química da escória por simulação termodinâmica, através do programa *FactSage* (versão 6.4). A Figura 16 relaciona o L_p calculado via *FactSage* com (a) basicidade binária, (b) FeO, (c) Al_2O_3 e (d) MgO.

Figura 16 - Relação entre o L_p e (a) B_2 , (b) FeO, (c) Al_2O_3 e (d) MgO (% em massa); T = 1600°C.



Fonte: NETTO *et al*, 2016.

A Figura 16 mostra que, com o aumento da basicidade (a), ocorre o aumento

do Lp, chegando a uma faixa ótima em que o Lp é máximo ($B_2 =$ entre 3,2 e 4,0). A adição de CaO permite a formação de um composto termodinamicamente mais estável ($2CaO.SiO_2-3CaO.P_2O_5$), que favorece uma melhor desfosforação. Porém, basicidades muito altas representam um excesso de partículas sólidas, significando que a fração líquida é menor. Como a fração líquida, que reage com o banho metálico, diminui, uma menor massa de fósforo é retirada do banho, ocasionando a queda do Lp.

O valor de Lp aumenta com o aumento de FeO (b), e depois de atingir um valor máximo (entre 16 a 20%), este diminui com o aumento de FeO. Enquanto o teor de FeO é baixo, o aumento de FeO representa o aumento do potencial de oxigênio no banho, levando à oxidação do fósforo e elevando o Lp. A partir de 20%, ocorre um decréscimo no Lp na medida em que o teor de FeO aumenta. Segundo alguns autores, quando o teor de FeO é excessivamente alto, o Lp diminui devido à diluição de óxidos básicos, como o CaO (BOROVSKY, KIJAC e DOMOVEC, 2010; SASAKI *et al*, 2013).

O Lp é influenciado pela variação do teor de alumina (c), diminuindo praticamente à metade quando o teor de Al_2O_3 aumenta de 2 para 4%. Existem duas explicações: com a adição desse óxido fluidizante, a fração líquida de escória aumenta e a fração sólida de escória (que contém o fósforo) diminui, promovendo a diminuição de fósforo na escória (ou seja, causando a reversão de fósforo para o banho metálico); e segundo a teoria iônica das escórias, a Al_2O_3 retira os íons O^{2-} de outros óxidos, inclusive dos óxidos formados por fósforo, liberando fósforo para o banho metálico e diminuindo o Lp (LUCIO, 1981).

Também há uma diminuição dos valores de Lp com o aumento de MgO d). A declividade da reta causada pela saturação do MgO, ocorre entre 3,5 e 4%. Chen *et al* (2013) explicam, em seu trabalho, que enquanto a escória não está saturada, a adição de MgO dilui óxidos básicos como CaO, prejudicando a desfosforação. Após a saturação, a adição de MgO consome o FeO contido na escória líquida para formação de magnésio-wustita, o que aumenta a concentração do CaO no líquido e eleva o Lp (o intervalo de MgO estudado por Chen *et al* (2013) foi de 1 a 15%). Porém, utilizando o *FactSage* no intervalo de MgO considerado por Netto *et al* (2016), a adição de MgO não altera a concentração de CaO na escória líquida após a saturação, e diminui muito pouco o teor de FeO. Conseqüentemente, a saturação de MgO somente atenua a taxa de diminuição do Lp.

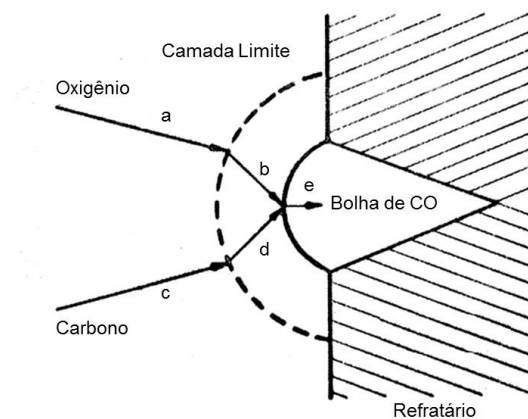
3.4.2 Descarburização

A reação de oxidação do carbono é a mais importante na fabricação do aço, pois fornece energia ao banho e é responsável por reações de refino, impondo o ritmo de produção. Nas operações modernas de FEA a combinação do oxigênio com o carbono pode fornecer de 30% a 40% do total de calor introduzido no forno. A evolução do monóxido de carbono é muito importante para a espumação da escória. Atrelado a uma escória básica, as bolhas de CO irão auxiliar na espumação da escória, o que auxiliará a submergir o arco. Isto fornece uma grande melhoria da eficiência térmica e permite o forno a operar com altas voltagens de arco mesmo quando o estado de banho plano é atingido (BOWMAN e LEFRANK, 1998).

Além disso, o ritmo de descarburização é o fator que controla o potencial de oxigênio preponderante no forno, seu conhecimento vai implicar na possibilidade de se equacionar o que acontece com os outros elementos do banho (CAMPOS, 1983).

O mecanismo de descarburização pode ser simplificado segundo a Figura 17.

Figura 17 – Representação do processo de crescimento de uma bolha de CO (descarburização).



Fonte: CAMPOS, 1983.

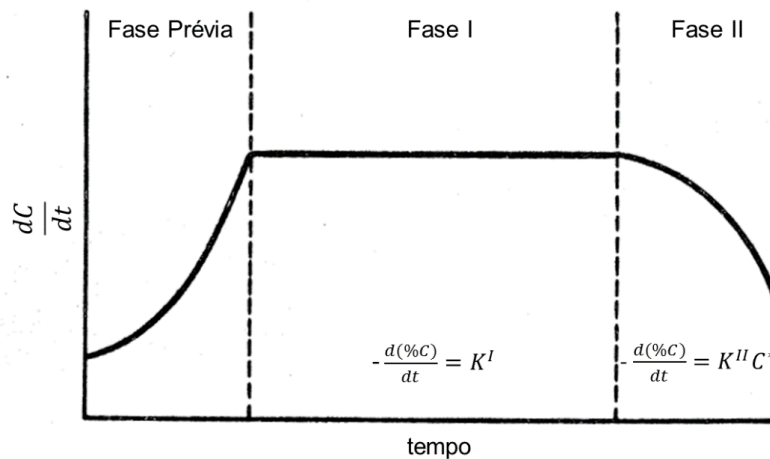
A Figura 17 descreve as seguintes partes:

- Transporte por convecção do oxigênio através do banho até a camada limite;
- Difusão do oxigênio através da camada limite até a interface gás/metal;
- Difusão ou transporte por convecção do carbono através do banho até a camada limite;

- d) Difusão do carbono através da camada limite até a interface gás/metal;
- e) Formação do gás CO na interface gás/metal.

Para que ocorra a descarburização é necessária a nucleação de uma bolha de CO. Uma vez nucleada a bolha, deve haver um fluxo contínuo de carbono e o oxigênio à interface gás/metal. Esse processo é dividido em três fases, Figura 18:

Figura 18 – Variação da velocidade de descarburização com o tempo.



Fonte: CAMPOS, 1983.

A fase prévia corresponde ao consumo de oxigênio pela oxidação preferencial de outros elementos presentes no aço. Na Fase I, a velocidade de descarburização depende somente da velocidade de suprimento de oxigênio, representada pela equação 11. Na Fase II a velocidade de descarburização depende da velocidade de difusão do carbono, portanto é função do teor momentâneo de carbono e do grau de agitação do processo, equação 12.

$$-\frac{d(\%C)}{dt} = K^I \quad (11)$$

Onde:

K^I = Constante determinada pela vazão de oxigênio.

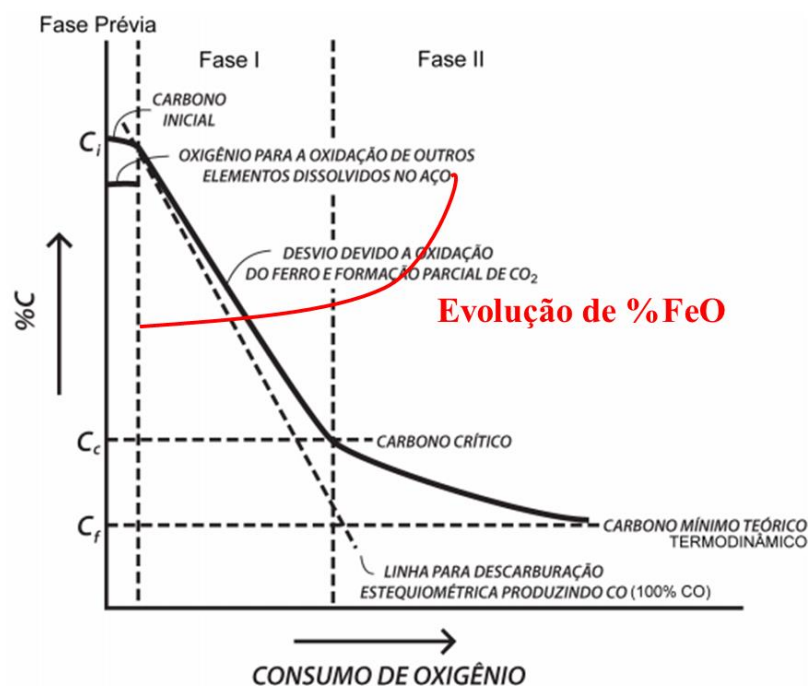
$$-\frac{d(\%C)}{dt} = K^{II} C^* \quad (12)$$

Onde:

C^* = Força motriz da reação de descarburização. Diferença de porcentagem entre carbono momentâneo e carbono em equilíbrio.

O teor crítico de carbono é a quantidade de carbono no aço líquido que determinará em que momento a velocidade da reação de descarburização irá depender da Fase II, ou seja, da velocidade de difusão do carbono, citada na figura 18. Uma vez que o teor de carbono crítico é ultrapassado durante a descarburização, haverá uma drástica redução na velocidade de descarburização e uma grande perda de oxigênio. No FEA o teor de carbono crítico se situa em níveis bem altos, 0,1 e 0,8%C, segundo Campos, (1983). A Figura 19 mostra a curva de consumo de oxigênio em função do teor de carbono do aço.

Figura 19 – Esquema do consumo de oxigênio na fase de descarburização durante a fabricação do aço.



Fonte: Adaptado de CAMPOS, 1983.

Conforme a Figura 19 além de determinar a velocidade do processo, a descarburização determina o teor de FeO da escória, afetando o rendimento metálico. No ponto de vista termodinâmico, a reação entre carbono e oxigênio é a mais favorável. No entanto, a abundância de ferro no processo faz com que a reação de formação do FeO ocorra preferencialmente. Posteriormente, o carbono difunde-se

para a interface, reduzindo o FeO. Para altas concentrações de carbono, a taxa de transferência de massa é elevada, de maneira que a maior parte do FeO formado é reduzido, e a taxa de descarburização é controlada pela taxa de fornecimento de oxigênio. Abaixo do teor de carbono crítico, a transferência de massa do carbono é insuficiente para reagir com o oxigênio injetado, então o teor de FeO aumenta bruscamente (MATSUURA *et al*, 2008).

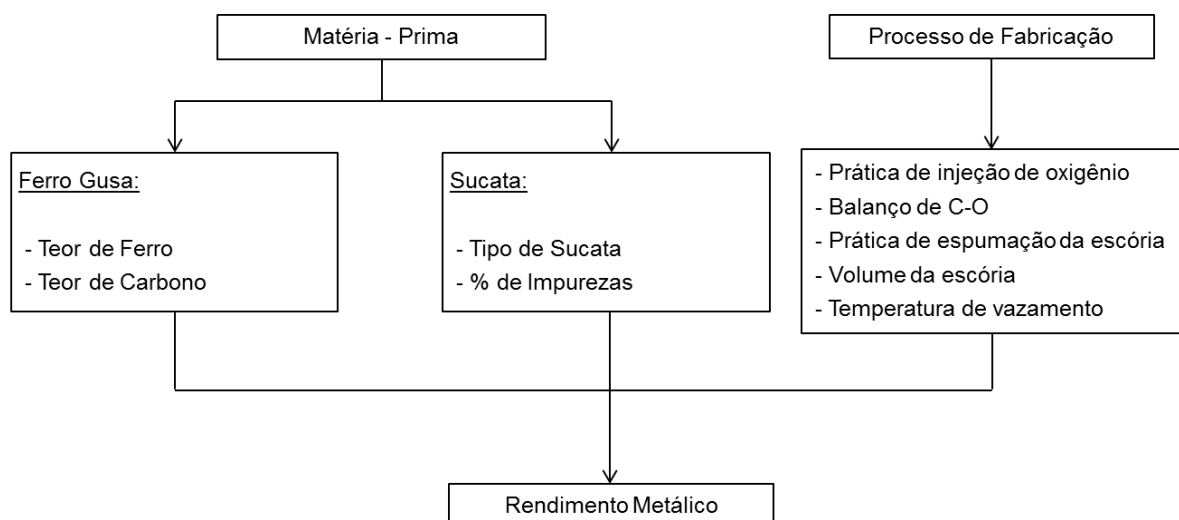
3.5 Rendimento Metálico em FEA

O rendimento metálico é a razão o peso de aço vazado e a quantidade da carga metálica carregada no processo de FEA. Valores baixos de rendimento metálico estão ligados ao aumento de perda metálica no processo de fusão, refino e solidificação do aço, conseqüentemente, uma queda na produtividade.

Um aumento do rendimento implica em diminuir a quantidade da carga metálica, e manter a mesma quantidade de aço vazado, ou seja, se a quantidade de sucata metálica for reduzida, e o teor de FeO perdido pela escória melhor controlado, a quantidade de aço vazado será a mesma. De acordo com trabalhos anteriores, 1% de aumento no rendimento metálico, significa reduzir US\$ 3 a US\$ 4 do custo do aço por tonelada produzida (TORRES *et al*, 2003).

O rendimento metálico depende tanto da qualidade dos materiais que compõe a carga, como baixo teor de elementos residuais e produtos não metálicos carregados no FEA, quanto das práticas do processo de fabricação do aço, Figura 20.

Figura 20 – Fatores que influenciam no rendimento metálico.

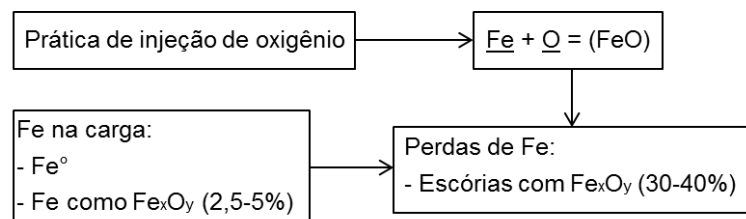


Fonte: Adaptado de TORRES *et al*, 2003.

Como mostra a Figura 20, os fatores que levam a um aumento no rendimento metálico são um melhor ajuste nas injeções do FEA, um balanço entre a quantidade de carbono e oxigênio presentes no FEA, uma maior eficiência na prática de espumação, uma redução no volume de escória, e um ajuste adequado na temperatura de vazamento. Cada variável tem um impacto diferente. No que diz respeito à carga metálica, o rendimento metálico irá aumentar de acordo com o aumento do percentual de ferro total, carbono e diminuição do teor de residuais presentes na carga, características referentes à qualidade da sucata (dependem do tipo de sucata, limpeza, etc.). Em relação ao processo de fabricação, os fatores que levam a um aumento do rendimento metálico, são aqueles que reduzem os níveis de óxido de ferro presentes na escória do FEA. (NASCIMENTO, 2008).

O principal motivo da queda de rendimento no processo de FEA é devido ao ferro que é oxidado, e acaba fazendo parte da escória, conforme Figura 21.

Figura 21 - Perdas de ferro durante o processo de fabricação.



Fonte: Adaptado de TORRES *et al*, 2003.

A Figura 21 mostra que em média, 25% do teor de FeO na escória depende principalmente da prática de injeção de oxigênio no FEA, pois apenas 2,5-5% do FeO entra em forma de óxido na carga metálica durante o carregamento. Práticas não ajustadas de injeção de oxigênio podem elevar demasiadamente a oxidação do ferro, aumentando o teor de FeO na escória. Torres *et al*, (2013), mencionaram em seu trabalho que as injeções de oxigênio no FEA devem ser limitadas em termos do teor de FeO da escória. Se o rendimento metálico é prioridade, então um limite de FeO deve ser imposto, conforme as práticas metalúrgicas do processo.

O rendimento metálico do FEA pode ser representado pela equação 13.

$$Rendimento (\%) = \frac{Massa \ de \ Aço \ Vazado}{Massa \ da \ carga \ metálica \ carregada} \times 100 \dots \dots \dots (13)$$

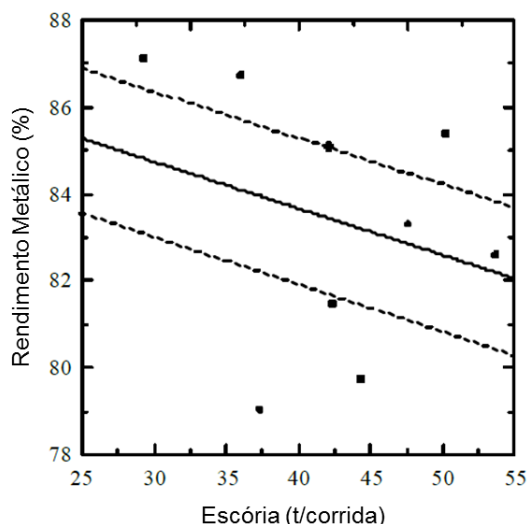
Quanto maior a quantidade da carga metálica carregada, para um mesmo peso vazado, menor o rendimento do FEA.

Todas as variáveis do processo que conduzem à redução do óxido de ferro produzido são os fatores que controlam o rendimento metálico (TORRES *et al*, 2013). Nos capítulos 3.5.1 e 3.5.2, serão discutidas as principais variáveis em FEA.

3.5.1 Influência do Volume de Escória no Rendimento Metálico

A basicidade binária maior do que dois é importante para promover um balanço estequiométrico, que é preciso para neutralizar a sílica. Uma escória ácida não promove propriedades físicas adequadas, como viscosidade e tensão superficial, para que haja espumação da escória. A prática de adição de escorificantes considera aproximadamente 35% de CCal e 65% de CDol no carregamento (TORRES *et al*, 2013). Porém um aumento do volume de escória pode influenciar no rendimento metálico. A Figura 22 considera um carregamento de 190 - 200 toneladas, onde a quantidade de escória varia entre 27 – 45 toneladas por corrida.

Figura 22 – Efeito do volume de escória no rendimento metálico.

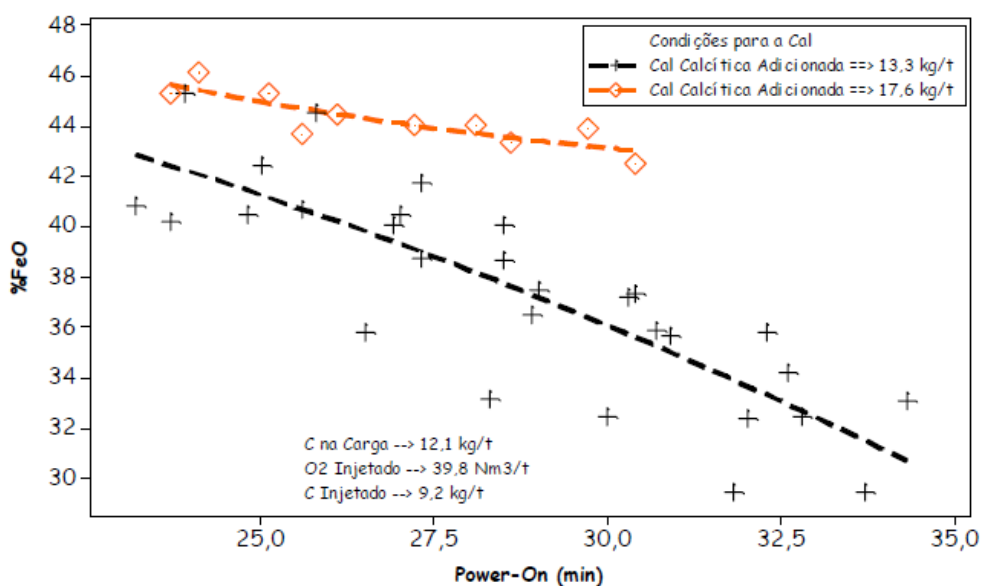


Fonte: TORRES *et al*, 2013.

Mesmo sendo baixa a relação mostrada por Torres *et al*, (2013), sabe-se que para um mesmo teor de FeO, um maior volume de escória irá contribuir em altas perdas de ferro (PRETORIUS, 1996).

Nascimento, (2008), realizou testes onde foram adicionadas diferentes quantidades de cal calcítica no FEA para que se pudesse avaliar o impacto do volume de escória no processo na %FeO da escória. Figura 23.

Figura 23 – %FeO ao longo do tempo para diferentes quantidades de cales calcíticas adicionadas no FEA.



Fonte: NASCIMENTO, 2008.

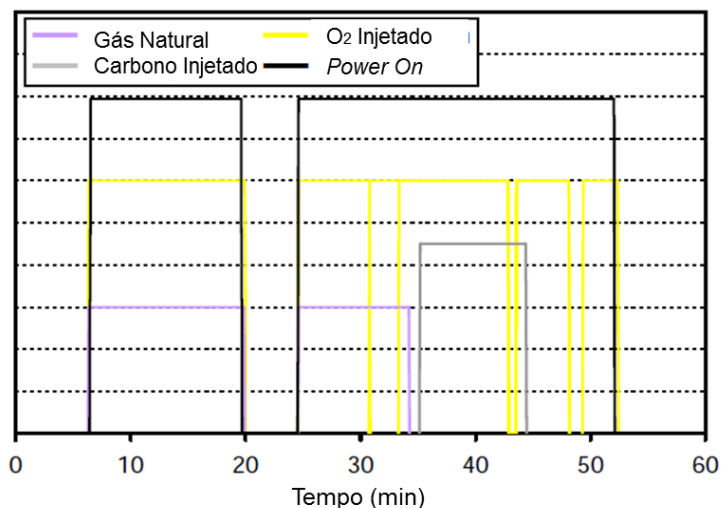
A quantidade de escória no FEA é um parâmetro diretamente proporcional à quantidade de CCal adicionada. Na Figura 23, nota-se que apesar dos teores iniciais de FeO das corridas dos dois experimentos serem similares, nas corridas do experimento no qual se utilizou 75% do valor padrão de CCal adicionada, observou-se uma queda significativamente maior do %FeO da escória apresentando um percentual final menor que os das corridas do experimento com maior quantidade de cal.

3.5.2 Influência da injeção de oxigênio e consumo de carbono no rendimento metálico

O oxigênio injetado no FEA é importante para a descarburização, discutido no capítulo 3.4, assim como na oferta de energia química. Nas práticas atuais, a tendência é aumentar as quantidades de oxigênio injetado no FEA, para diminuir o consumo de energia elétrica (TORRES *et al*, 2013).

O perfil de injeções em FEA varia conforme especificação do aço a ser produzido, quantidade de energia elétrica utilizada no processo de fusão e refino, qualidade da sucata, entre outros fatores (PFEIFER *et al*, 2011). A Figura 24 apresenta um perfil geral de injeções para uma corrida de dois carregamentos.

Figura 24 - Exemplo de padrão operacional de injeções durante o refino de um FEA.



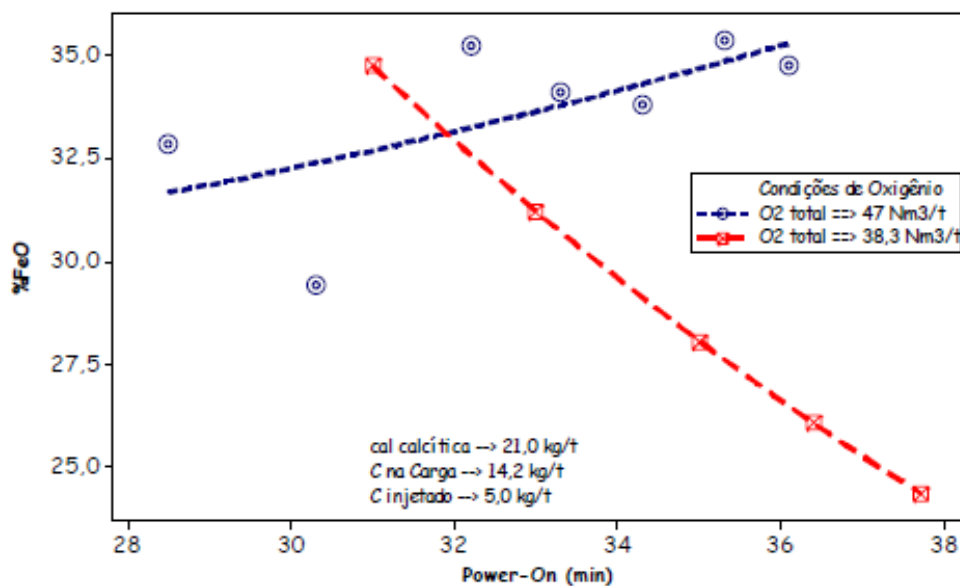
Fonte: PFEIFER *et al*, 2011.

O gás natural com a presença do oxigênio promove as reações de combustão, para auxiliar na fusão da carga metálica. O oxigênio através das reações de oxidação fornece energia química ao processo. A injeção de carbono, na Figura 24, inicia em 35 minutos. Considera-se a etapa de refino a partir do momento em que a carga metálica se encontra totalmente fundida, e então o carbono começa a ser injetado no forno, auxiliando na formação de escória espumante, além de possibilitar a reação de redução do ferro metálico presente na escória.

Nascimento (2008), revela que mudanças nas práticas de injeções de oxigênio e carbono e adições de cales no FEA (capacidade de 100 t), conduziram a uma redução das perdas de ferro pela escória, acarretando em um acréscimo de 1,1% do rendimento metálico. Esse acréscimo representa uma redução em média de 10% do FeO da escória, cerca de 155 kg de ferro metálico.

A %FeO da escória, para duas corridas experimentais, foi analisada por Nascimento (2008), Figura 25.

Figura 25 – % FeO ao longo do tempo para diferentes quantidades de oxigênio injetadas no FEA.

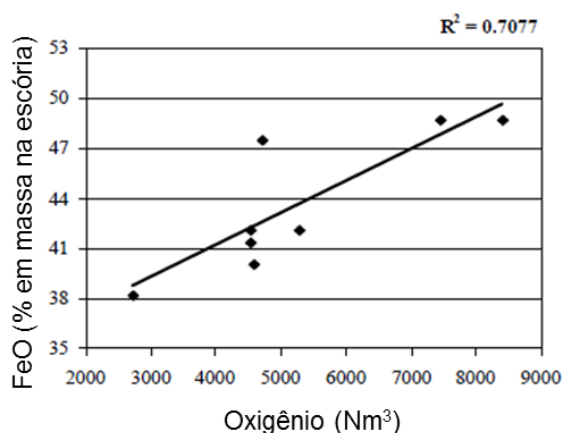


Fonte: NASCIMENTO, 2008.

Como evidenciado na Figura 25, as corridas tiveram características idênticas no que diz respeito a carga fria e demais parâmetros do processo, distinguindo-se apenas o total de oxigênio injetado. A análise mostra que o excesso de oxigênio injetado no FEA acarretou em uma maior perda de FeO para a escória, e assim um menor rendimento metálico.

Rojas *et al* (2013) também mostram o impacto do aumento de injeção de oxigênio, Figura 26.

Figura 26 - Relação entre o oxigênio injetado e o FeO da escória em FEA.



Fonte: ROJAS *et al*, 2013.

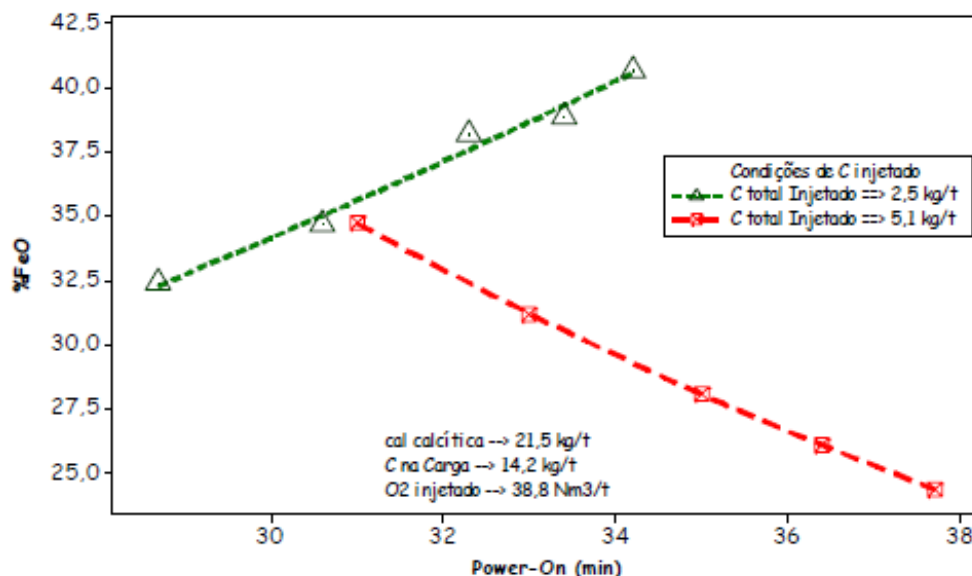
Diferente de Nascimento (2008), a análise da Figura 26 envolve um grupo maior de corridas, mostrando novamente os mesmos impactos na formação de FeO. Ele ainda salienta que, além de reagir diretamente com o ferro, o oxigênio injetado reage com o carbono dissolvido no aço ou carbono injetado para formar CO, ou com CO na fase gasosa, sob a forma de pós-combustão produzindo CO₂.

A distribuição do oxigênio entre estas reações é crítica para o desempenho do forno (MATSUURA *et al*, 2008).

Como visto anteriormente, a escória espumante traz diversos benefícios ao processo de FEA, como a proteção das paredes refratárias, redução das perdas de calor, redução do consumo de eletrodos e redução dos ruídos do FEA (ZHU, 2011). Além disso, a injeção de carbono para a prática da espumação, diminui a concentração de FeO na escória.

Para análise da influência de injeção de carbono no banho metálico, Nascimento (2008), utilizou os mesmos critérios citados anteriormente, porém a quantidade de carbono foi duplicada entre as corridas, Figura 27.

Figura 27 – %FeO ao longo do refino para diferentes quantidades de C injetado no FEA.

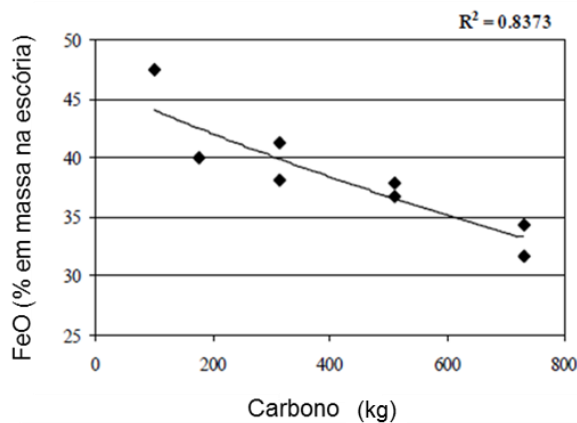


Fonte: NASCIMENTO, 2008.

Na Figura 27, para a menor injeção de carbono, o controle de FeO da escória foi crítico, resultando em um elevado aumento a uma taxa de crescimento de 1,5 pontos percentuais por minuto no teor de FeO presente na escória.

Rojas *et al*, (2013) encontraram uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de carbono injetada e o teor de FeO dissolvido na escória. Os testes foram realizados em um forno elétrico de 250 toneladas com a utilização da prática de pé líquido (50 toneladas) e carga metálica composta de 80% HRI e 20% sucata ferrosa, Figura 28.

Figura 28 – Efeito do conteúdo de carbono sobre o teor de FeO da escória.



Fonte: ROJAS *et al*, 2013.

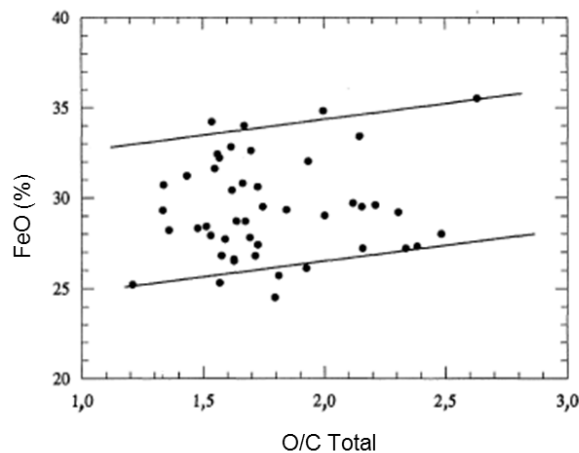
A relação da Figura 28 ocorre devido ao favorecimento da reação de redução do ferro (reação 4) com o aumento da injeção de carbono. O ferro metálico é liberado para o banho e gera bolhas de CO, contribuindo para a espumação da escória.

Matsuura *et al* (2008) desenvolveram um modelo de descarburização e formação de escória para otimizar o rendimento metálico, reduzindo o FeO da escória. Isto pôde ser feito através de práticas de injeção mais eficazes, utilizando o carbono em formas mais reativas e reduzindo as injeções de oxigênio em momentos adequados do processo de fusão e refino. Na aplicação do modelo de simulação desenvolvido, foi possível verificar um aumento do rendimento metálico através dessas modificações operacionais citadas. O modelo inclui a parametrização da taxa de descarburização, da reação de materiais carbonáceos com a escória, balanço de massa entre as espécies no metal, na escória e nos gases, e o comportamento de fusão do ferro-gusa, sucata e fluxantes. Foi considerado um forno elétrico operando com dois carregamentos e contendo apenas sucata, ferro-gusa e fluxantes. O autor ressalta que o perfil de evolução do teor de FeO na escória é muito importante para o controle do processo e rendimento do forno. A otimização do rendimento pode ser feita.

Devido às condições de desequilíbrio termodinâmico em uma planta siderúrgica, Conejo e López, (1997) afirmam que é necessário um excesso de carbono na carga metálica do FEA, para um menor teor de FeO na escória. Além disso, existe uma razão global entre oxigênio e carbono adicionados no FEA. Por estequiometria, a razão O/C é um valor próximo de 1,33, para uma perda mínima de ferro para a escória. Neste trabalho será analisada a relação C/O, por convenção da autora, que equivale à um valor próximo a 0,75.

A Figura 29 apresenta a relação O/C em relação ao teor de FeO presente na escória.

Figura 29 - Relação entre o equilíbrio O/C no processo e o teor de FeO na escória.

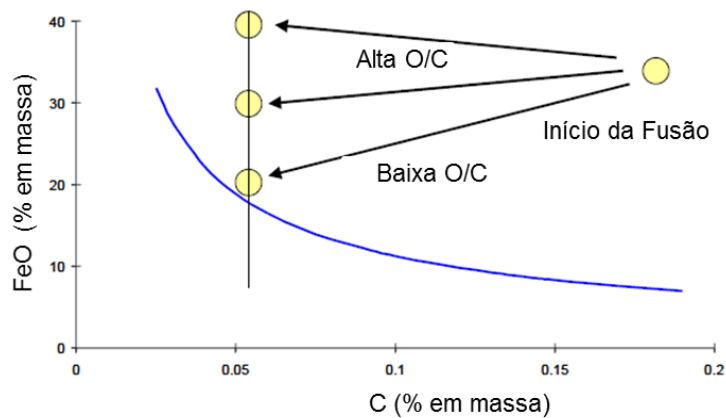


Fonte: CONEJO e LÓPEZ, 1997.

A relação O/C da Figura 29 diz respeito ao oxigênio e carbono total do processo, desde o carregamento até às injeções. Nota-se que para valores próximos de 1,33, os dados experimentais apresentam teores de FeO na escória de até 28%. O estudo foi realizado em um forno elétrico de 220t de carga metálica contendo 100% de DRI, com sistema de carregamento contínuo e injeção de oxigênio apenas pela porta de escória.

A Figura 30 mostra um esquema de como se observa a mudança na composição de FeO dissolvido na escória e C dissolvido no aço para diferentes proporções de injeção de O/C (OLTMANN e PRETORIUS, 2002).

Figura 30 – Mudança na composição química do banho devido aos perfis de injeções com diferentes razões entre O/C, relativos à uma curva de equilíbrio.

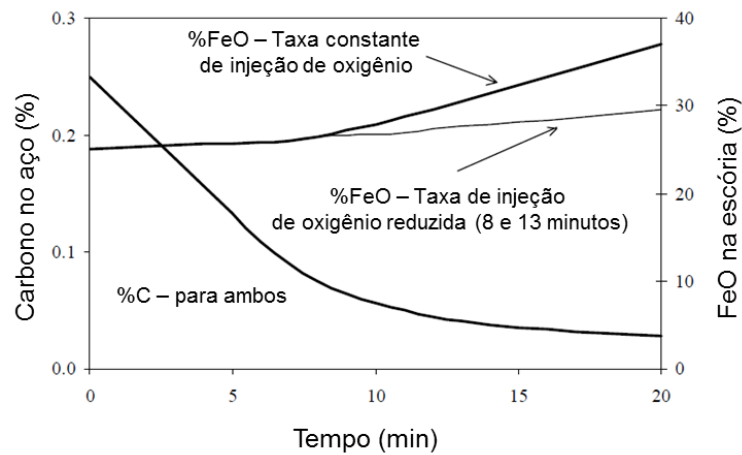


Fonte: OLTMANN e PRETORIUS, 2002.

Para um mesmo teor de carbono carregado na carga metálica, são apresentados, na Figura 30, três teores de FeO, conforme os perfis de injeção. Uma alta razão entre as injeções O/C (somente das injeções) formam um maior teor de FeO na escória. Porém uma razão próxima à razão estequiométrica pode resultar em baixa cinética das reações devido à falta de completa homogeneidade térmica e química no banho, atrasando o processo. Dessa forma, na prática se utiliza um excesso de oxigênio em relação ao equilíbrio (curva azul da figura 30) para aumentar a velocidade das reações (OLTMANN e PRETORIUS, 2002).

O balanço entre carbono e oxigênio no processo se faz importante, pois a perda de rendimento metálico não depende apenas dos fatores termodinâmicos, mas também dos fatores cinéticos e de parâmetros do processo. Oltmann e Pretorius (2002) desenvolveram um modelo de simulação de refino, que avaliava, entre outros fatores, a variação das quantidades de injeção, tanto de carbono quanto de oxigênio, Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Efeito da redução da taxa de injeção de oxigênio (para 55% do inicial em 8 minutos e 33% em 13 minutos).

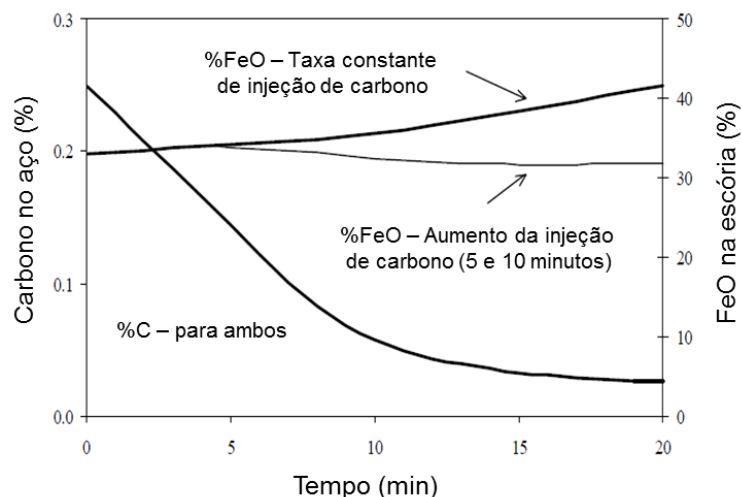


Fonte: OLTMANN e PRETORIUS, 2002.

A Figura 31 deixa claro que, para um mesmo teor de carbono de carregamento e uma mesma taxa de descarburização, diminuindo a taxa de injeção de oxigênio no minuto oito e treze, a redução do teor de FeO é aproximadamente 7%. A redução da taxa de injeção de oxigênio apenas após atingir o carbono crítico é de suma importância, para não retardar a taxa de descarburização, tendo em vista que uma redução precoce de oxigênio pode diminuir o grau de agitação do banho metálico, diminuindo a cinética do processo, além de diminuir o grau de oxidação do sistema (OLTMANN e PRETORIUS, 2002).

Outra alternativa é a injeção de carbono na escória logo após a redução da injeção de oxigênio para o controle do FeO, Figura 32.

Figura 32 – Simulação para o efeito do aumento da taxa de injeção de carbono.



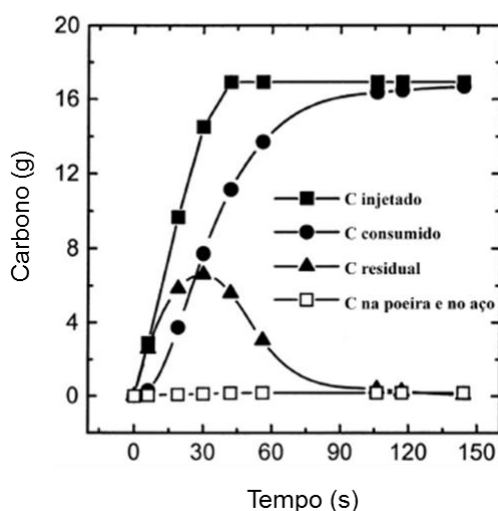
Fonte: OLTMANN e PRETORIUS, 2002.

Na Figura 32, nota-se uma redução de aproximadamente 10% do teor de FeO da escória, com um aumento da taxa de injeção de carbono nos minutos 5 e 10. O aumento da taxa de injeção de carbono é uma alternativa se a taxa de injeção de oxigênio não puder ser ainda mais reduzida (devido à perda de agitação do banho, diminuindo a taxa de transferência de massa). Na zona de descaburação o excesso de oxigênio formará o FeO, que na escória será reduzido pelo carbono injetado, mantendo o teor de FeO sob controle na escória.

O parâmetro mais importante para a redução do FeO da escória através da injeção de carbono, não é quanto de carbono é injetado, mas sim o quanto reage efetivamente com o FeO (OLTMANN e PRETORIUS, 2002).

Dados de usinas siderúrgicas mostram que a eficiência do carbono injetado no forno é muito menor que 100%, conforme mostra a Figura 33 (JI, 2004).

Figura 33 – Balanço de carbono em experimento de injeção. T: 1691°C; FeO: 35,41 (% em massa); Taxa de Injeção de carvão: 0,0098 mol C/s.



Fonte: JI, 2004.

A Figura 33 mostra que o carbono residual é o carbono injetado menos o carbono consumido. Nota-se também que, dois minutos depois de interrompida a injeção de carbono, o seu consumo continua, ou seja, a formação de bolhas de CO ainda ocorre (JI, 2004).

A geração de CO no nível do banho líquido geralmente conduz a uma melhor espumação do que o CO formado na própria escória, pois o CO vindo do banho líquido consiste de pequenas bolhas que são quase uniformemente distribuídas. Devido a

isso, é importante que a injeção seja eficiente, fazendo com que o material carburante atravessasse a escória e atinja a interface entre a escória e o metal.

No processo, se ocorrer apenas a injeção de oxigênio a espumação será de má qualidade, pois a temperatura da escória aumenta significativamente devido as reações de oxidação, diminuindo assim, sua viscosidade (PRETORIUS e CARLISLE, 1998).

A abordagem de equilíbrio não ajuda a descrever a operação do FEA, pois à medida que as injeções de carbono e oxigênio ocorrem no processo o equilíbrio não pode ser alcançado, pois o FEA é um sistema aberto, ocorrendo influências externas.

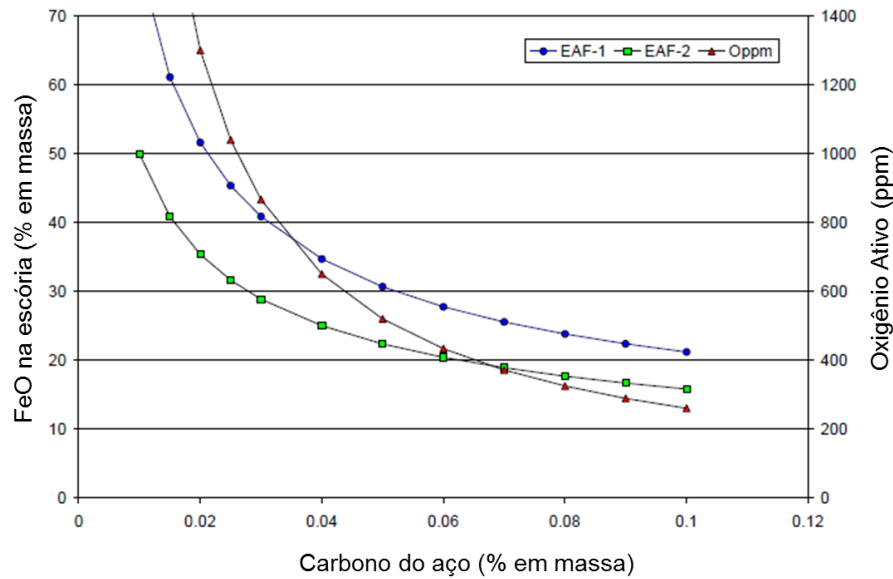
No entanto, a termodinâmica ainda é válida, mas só útil para determinar os limites do processo e as forças motrizes para certas reações acontecerem.

Existem muitos gradientes na composição e temperatura no FEA. As condições são diferentes nas distintas partes do forno. Portanto, as relações de equilíbrio termodinâmico são diferentes em cada uma das partes. Existe uma troca constante de material nas áreas que compõem o forno e a composição é afetada devido a reações existentes, bem como transferência de massa e mistura de materiais de composições variadas. Por exemplo, o delta de temperatura do arco para que ocorra a fusão da sucata é grande. O potencial de oxigênio varia de 100% de O₂ no jato para algumas partes por milhão (ppm) nas áreas profundas do banho com alto teor de carbono. Por estas razões é muito difícil modelar o FEA devido à complexidade e grandes variações entre usinas diferentes (PRETORIUS, OLTMANN e JONES, -).

É mais comum avaliar a operação do FEA por um balanço de massa e energia, considerando a carga inicial, consumo total de materiais, composição final e o aço vazado. Somente as condições iniciais e finais são necessárias para avaliar o processo, independentemente de como as composições mudam com o tempo. Esta é uma abordagem muito útil para comparar diferentes operações em FEA, mas é limitada, avaliando apenas as mudanças relativas das condições operacionais (PRETORIUS, OLTMANN e JONES, -).

A relação entre % C no metal antes do vazamento e a %FeO na escória tem sido frequentemente utilizada como uma descrição do FEA, no entanto, este não é um equilíbrio real, mas sim dinâmico, influenciado pelas condições operacionais, ver Figura 34.

Figura 34 – Diferentes relações de FeO x Carbono do aço, para FEAs diferentes.



Fonte: PRETORIUS, OLTMANN e JONES, -.

Na Figura 34, algumas relações teóricas são previsíveis, por serem mais simples devido ao mecanismo envolvido, como por exemplo, a relação entre o carbono e o oxigênio dissolvido. Se o banho líquido está homogêneo quimicamente, a principal variável é a pressão total do banho. Dessa forma, utilizando 1,3 x pressão atmosférica, como pressão média no banho, a relação $\%C_{\text{dissolvido}} \times \%O_{\text{dissolvido}} = 0,025$, pode ser usada como uma boa regra geral. Devido aos fatores citados anteriormente, como não homogeneidade química do FEA e métodos de amostragem e análises químicas, o que acontece na prática é que as relações nos FEAs variam (PRETORIUS, OLTMANN e JONES, -).

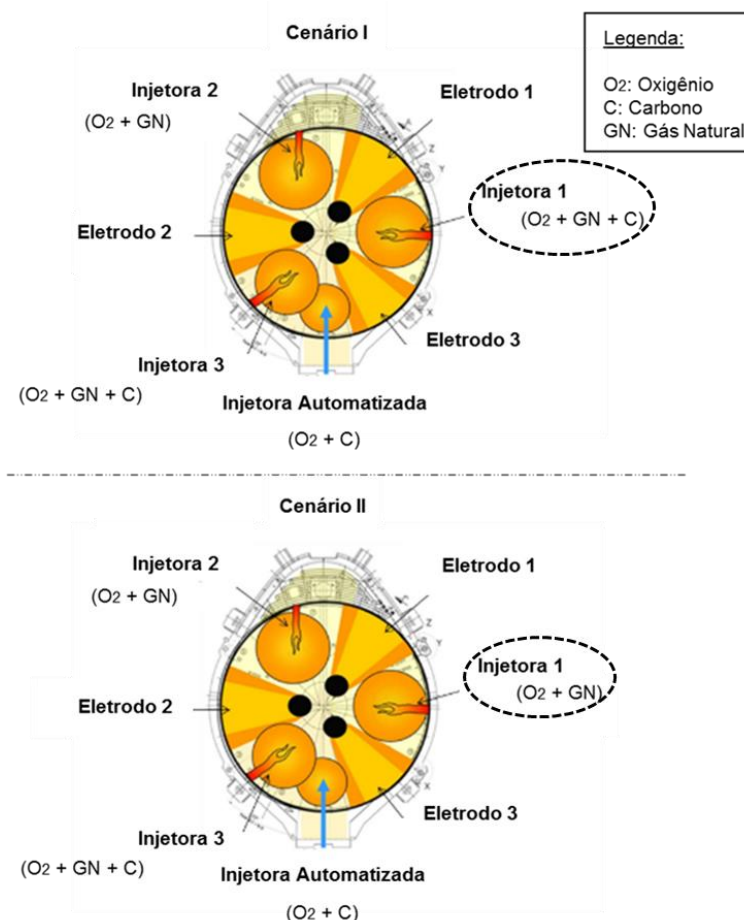
4 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste estudo foi possível através da análise de dados históricos de uma aciaria elétrica em dois cenários distintos, ou seja, existem dois grupos de corridas, que foram produzidas antes e depois de mudanças significativas no processo, que serão apresentadas a seguir. Foram analisados dados de consumo de energia elétrica, de composição química de aço e escória e injeções de carbono e oxigênio no FEA.

4.1 Cenários Analisados no Estudo

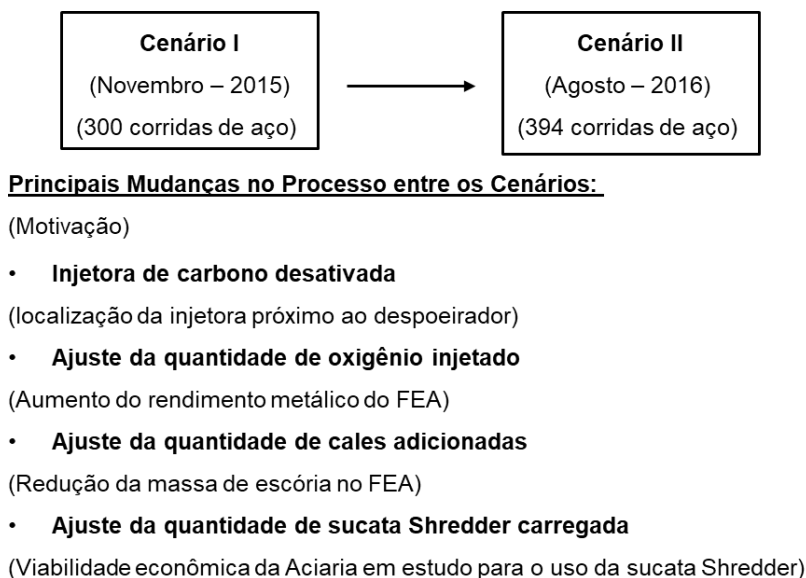
O estudo foi desenvolvido em uma aciaria elétrica que possui um FEA com capacidade de vazamento de 62 toneladas de aço. Este FEA possui um sistema elétrico trifásico de corrente alternada com três eletrodos de grafita. O vazamento do aço é realizado através de um canal EBT. Possui injetoras de carbono, gás natural e oxigênio. As posições das injeções podem ser vistas na Figura 35, nos Cenários I e II.

Figura 35 – Vistas aéreas do FEA, e posicionamento das injetoras para os Cenários I e II.



A Figura 35 mostra que a injetora 1 de carbono (coque verde de petróleo) foi desativada no Cenário II, pois se localizava próximo ao sistema de despoejamento do FEA. O estudo foi realizado a partir de dados históricos pertencentes aos Cenários I e II. Mudanças de outros parâmetros no Cenário II também foram verificadas, Figura 36.

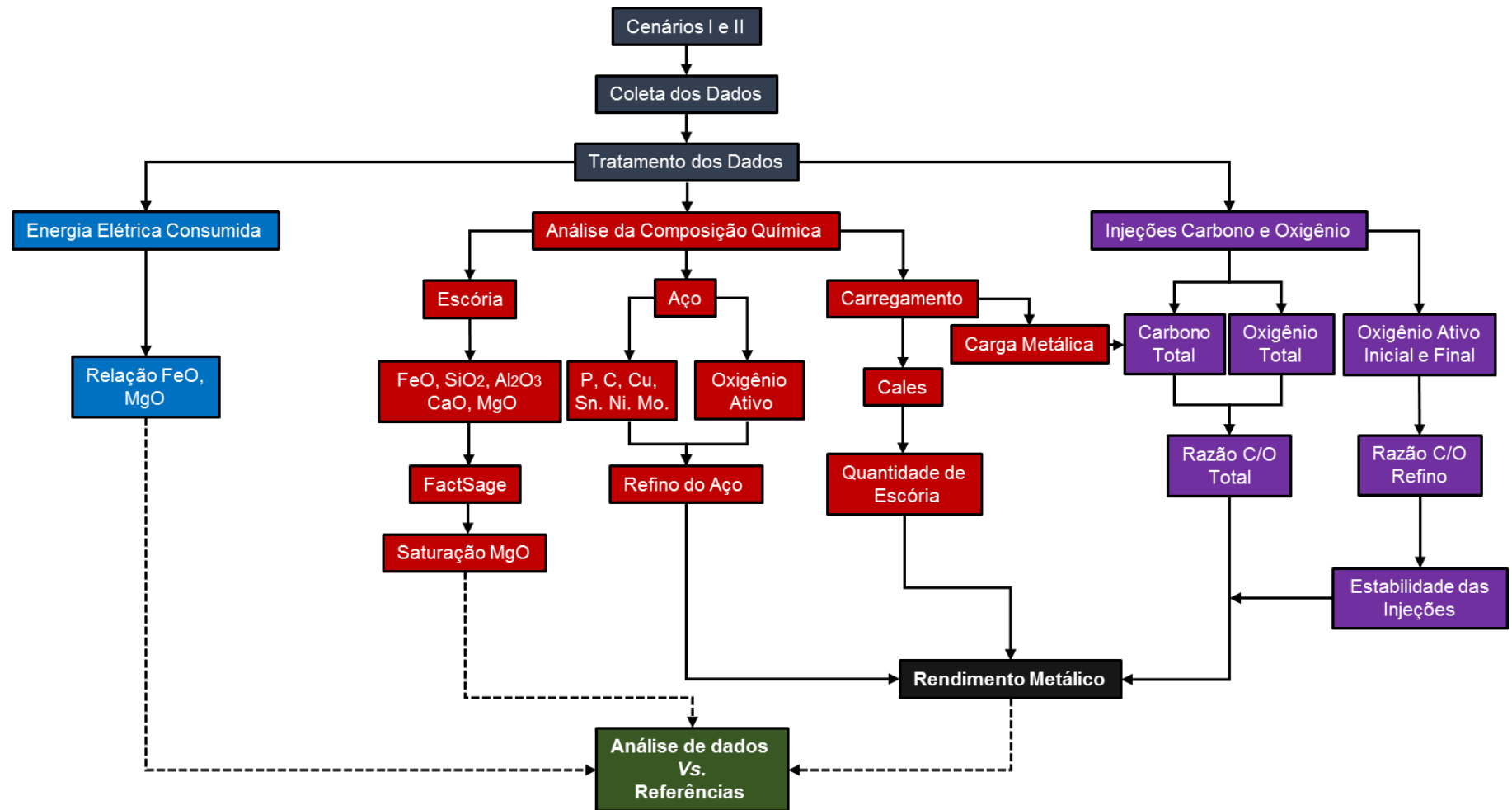
Figura 36 – Esquema indicando as principais mudanças verificadas no FEA entre os Cenários I e II.



Com o objetivo de aumentar o rendimento metálico do FEA foi reduzida a quantidade de oxigênio injetado. A redução da quantidade de CCal no carregamento ocorreu para que houvesse uma menor quantidade de escória durante o refino, podendo assim influenciar no aumento do rendimento metálico do FEA. Além disso, houve um aumento do carregamento da Sucata Shredder no segundo Cenário.

A Figura 37 apresenta um fluxograma que mostra a maneira que as análises foram arranjadas.

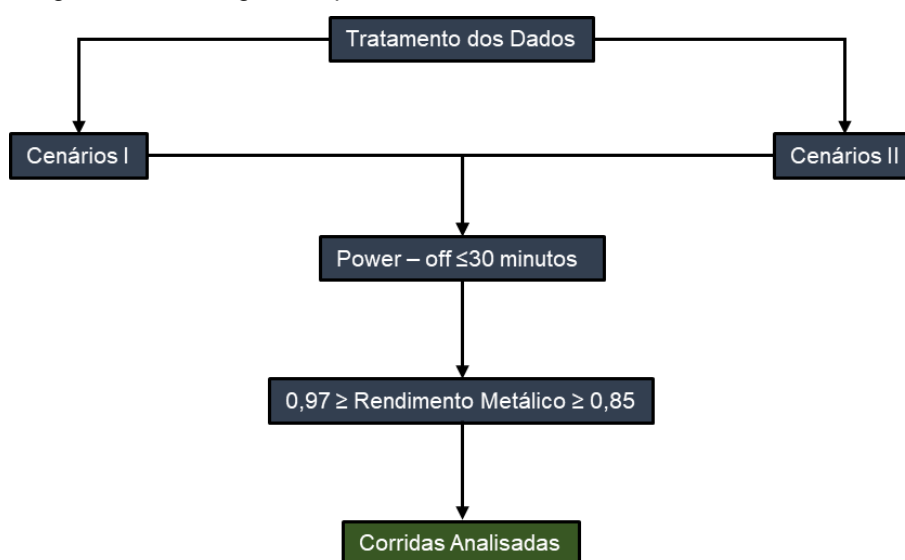
Figura 37 – Fluxograma ilustrando a metodologia aplicada neste estudo.



4.2 Tratamento Inicial para Análise dos Dados

Conforme a Figura 37, coletou-se dados dos Cenários I e II. Para melhor relação entre os dados nos resultados finais, foram aplicados os filtros apresentados na Figura 37. Para as distribuições dos dados de *power-off* e rendimento metálico, a ferramenta de análise estatística 'OriginPro 8' foi utilizada para a construção de histogramas, para que fosse possível a análise e exclusão de amostras consideradas ruidos no processo, Figura 38.

Figura 38 – Fluxograma apresentando o tratamento dos dados históricos.



Power - off é o tempo de forno desligado. Essa informação é de grande importância, pois indica se em determinada corrida houve problemas operacionais, que contabilizam em um tempo de *power-off* alto. No tempo de *power-off* está incluído o 'tempo morto' de uma corrida, que é o tempo programado para os carregamentos no FEA, vazamento e vedação do canal EBT. Geralmente este tempo é em média de nove minutos para corridas com dois carregamentos e onze minutos para corridas de três carregamentos na aciaria estudada.

4.2.1 Rendimento Metálico

O rendimento metálico foi calculado com base na equação 13, que considera a massa de sucata metálica carregada sobre a massa de aço vazado na panela.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{Massa de Aço Vazado}}{\text{Massa da carga metálica carregada}} \times 100 \dots \dots \dots (13)$$

O aço vazado é o valor de aço líquido transferido para panela em cada corrida. Esta informação é fundamental para o cálculo do rendimento metálico. Esse valor é medido através de uma célula de carga acoplada ao carro de vazamento. A massa das ligas adicionadas no vazamento não é descontada da massa total que é medida na panela, porém neste estudo, cada padrão de carga analisado é composto de corridas com a mesma qualidade, ou seja, mesma quantidade de ligas adicionadas no vazamento. As corridas com rendimentos abaixo de 85% e acima de 97% foram desconsideradas. Os rendimentos extremos ocorrem devido a prática de lastro líquido no FEA. Corridas que vazam o lastro líquido, para eventual manutenção no forno possuem um alto rendimento, já corridas que precisam formar o lastro líquido, apresentam um baixo rendimento.

Após o tratamento dos dados em relação ao *power – off* e rendimento metálico foi feita a análise dos outros parâmetros citados no fluxograma da Figura 37.

4.3 Análises dos Dados

Os dados históricos das corridas são coletados e armazenados pelos sistemas da aciaria. Foram analisados dados de 300 corridas do mês de novembro de 2015 (Cenário I) e 394 corridas do mês de agosto de 2016 (Cenário II). Para analisar as características entre os cenários alguns parâmetros foram definidos. Os parâmetros de cada corrida que foram utilizados neste trabalho são apresentados a seguir.

4.3.1 Padrão de Carga

Diferentes qualidades podem pertencer a um único padrão de carga. O que difere uma qualidade no FEA são as quantidades de ligas adicionadas no vazamento

e cales no carregamento. O carregamento consiste em quantidade de cales, ferro-gusa, quantidades e tipos de sucatas. Além disso, cada qualidade possui uma faixa específica de oxigênio ativo que o aço deve ser vazado. As corridas foram agrupadas por padrão de carga, e foram analisados dois padrões que apresentaram maior número de corridas, padrões C e E.

4.3.2 Número de Carregamentos

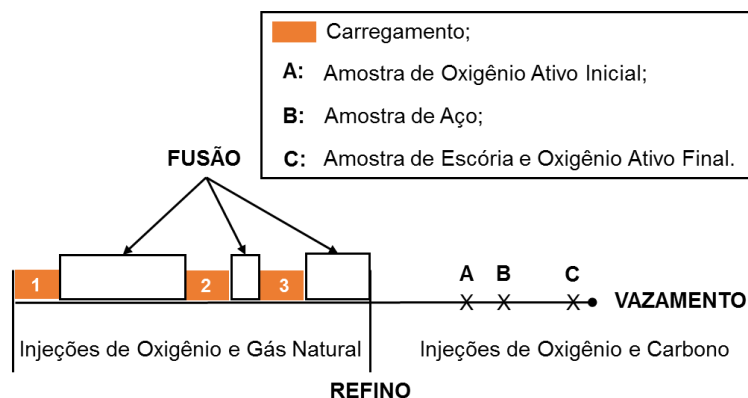
O número de carregamentos consiste no número de cestões que serão adicionados no FEA. Este número depende da densidade aparente da sucata. Para alta densidade aparente utiliza-se 2 cestões e para baixa densidade aparente, 3 cestões. As corridas de dois e três cestões foram divididas em dois grupos distintos.

4.3.3 Medições e Amostragens da Composição Química de Aço e Escória

A composição química de aço e escória são armazenadas para cada corrida. Os óxidos analisados da escória foram óxido de ferro (FeO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), óxido de magnésio (MgO), cal (CaO) e óxido de manganês (MnO). A composição química da escória é determinada pelo equipamento de fluorescência de raios-X (FRX), fabricante *Philips*, modelo *PW2600*.

Já os elementos presentes no aço considerados são o fósforo (P), carbono (C), cobre (Cu), estanho (Sn), níquel (Ni) e molibdênio (Mo). Para análise de carbono o equipamento utilizado foi o *LECO*, modelo *CS-444LS*. Os outros elementos foram analisados pelo equipamento *ARL 4460 Optical Emission Spectrometer*. O oxigênio ativo foi verificado via amostrador *CELOX*. A Figura 39 ilustra a linha do tempo do processo de fusão e refino e suas amostragens.

Figura 39 – Esquema ilustrando as medições e as amostragens durante o refino.



A Figura 39 mostra os momentos de retirada das amostras. Considerando em média um refino de 25 minutos, a amostra do oxigênio ativo inicial é retirada em média doze minutos antes do vazamento. A amostra de aço é retirada dez minutos antes do vazamento e as amostras de escória e oxigênio ativo final são retiradas ao mesmo tempo poucos minutos antes do vazamento. Os dados de composição química de aço foram utilizados para análise das reações de desfosforação, descarburagem e elementos residuais. Os dados de composição química da escória foram utilizados para análise do rendimento metálico, saturação de MgO e outros parâmetros do processo. Os dados de oxigênio ativo foram relacionados com a composição química do aço e com os dados de injeção durante o refino. Foi considerada uma temperatura média de 1600°C durante as amostragens de composição química.

4.3.4 Energia Elétrica Consumida

O consumo de energia elétrica (kWh) é armazenado pelo sistema computacional 'ArcOS' do FEA da empresa 'Siemens VAI', para cada corrida de aço. Foi considerada a energia elétrica consumida total da corrida, desde o carregamento até o desligamento do FEA, quando o aço líquido começa a vazar na panela. Para verificar a variação do consumo de energia elétrica entre os dois cenários, e analisar a influência da composição química da escória (teores de FeO e MgO) foi definida uma faixa de FeO de 20 – 30%, conforme estudos de Corbari *et al* (2009) e Aminorraya e Edris (2002).

4.3.5 Injeções de Carbono e Oxigênio

As quantidades de injeções de oxigênio (Nm³) e carbono (quilogramas) de cada injetora são armazenadas por minuto. As injeções de oxigênio ocorrem desde o início do processo, para cortar a sucata suficientemente aquecida, para fornecer calor ao processo para a fusão da sucata e para a etapa de descarburização que ocorre no refino. Já as injeções de carbono, que se iniciam no período de refino são fundamentais para o processo de espumação e consequente redução do ferro contido na escória para o aço. As informações de injeções foram utilizadas para os cálculos de razão C/O, que serão descritos no capítulo 4.3.9. Além disso, uma avaliação da estabilidade das injeções foi realizada.

4.3.6 Calculo da Massa de Escória

No Cenário II houve uma redução nas quantidades de CCal e aumento nas quantidades de CDol adicionadas no carregamento com o intuito de reduzir a massa de escória no FEA sem afetar a basicidade da mesma. A massa de escória para cada corrida foi calculada conforme equação 14.

$$\text{Massa de Escória} = \frac{(CCal_{\text{carregamento}} \times (0,94) + CDol_{\text{carregamento}} \times (0,56)) \times 100}{\%CaO_{\text{escória}}} \quad (14)$$

Onde:

CCal_{carregamento} = Cal Calcítica em quilogramas;

CDol_{carregamento} = Cal Dolomítica em quilogramas;

%CaO_{escória} = CaO na escória em % em massa.

0,94 e 0,56 = proporção de CaO nas cales CCal e CDol, respectivamente.

4.3.7 Basicidade Binária das Amostras de Escória

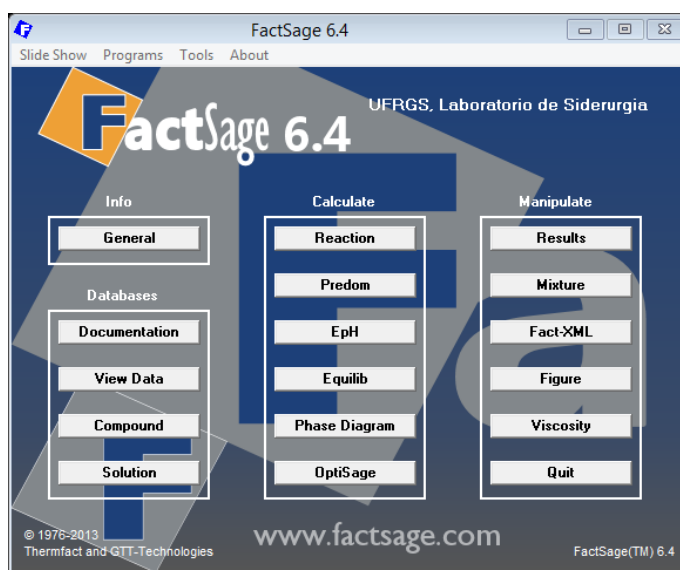
Uma escória básica tem como função prevenir o desgaste do refratário, proporcionar propriedades ideais para a espumação, além de ser fundamental para que as reações de desfosforação do banho metálico ocorram. Para os cálculos de basicidade utilizou-se a equação 9 (basicidade binária), que descreve o excesso de cal que compensa a sílica oriunda da carga metálica. A variação da basicidade binária

das corridas foi avaliada entre os dois cenários e relacionada com os teores de fósforo no aço. Para a análise do teor de fósforo em relação à basicidade, foi definida uma faixa de basicidade para as corridas de ambos os padrões e cenários de 1,4 a 2,4. Além disso, foi fundamental para a construção dos ISD's para análise da saturação de MgO, que será descrito no capítulo 4.3.8.

4.3.8 Análise da saturação de MgO

Devido às modificações das quantidades de cales no processo, foi realizada a análise da saturação de MgO da escória. Para isso, utilizou-se o programa de cálculos termodinâmicos *FactSage 6.4*, no módulo de cálculo nas opções de equilíbrio (*Equilib*) e de diagrama de fases (*Phase Diagram*). Na Figura 40 é vista a tela de abertura do programa.

Figura 40 – Tela de abertura do *software* de simulação termodinâmica *FactSage 6.4* mostrando os diferentes módulos do programa.

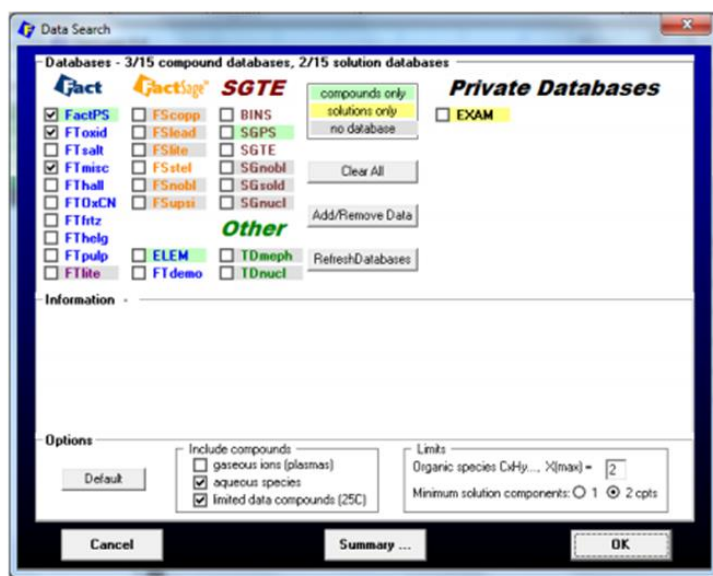


O *FactSage* determina os estados de equilíbrio pela minimização da energia de Gibbs para calcular as seções dos diagramas de fase termodinamicamente, usando o conceito *zero phase fraction line* (ZPF). O programa mapeia os limites do diagrama para encontrar os finais das linhas ZPF. Cada linha é seguida do início ao fim, usando a mínima energia de Gibbs para determinar o ponto no qual uma fase está prestes a surgir (PELTON, 2001).

A Figura 41 mostra a tela com os diferentes bancos de dados do programa 'FactSage 6.4'. Os bancos de dados selecionados foram os seguintes (*FactSage Database Documentation*, 2015):

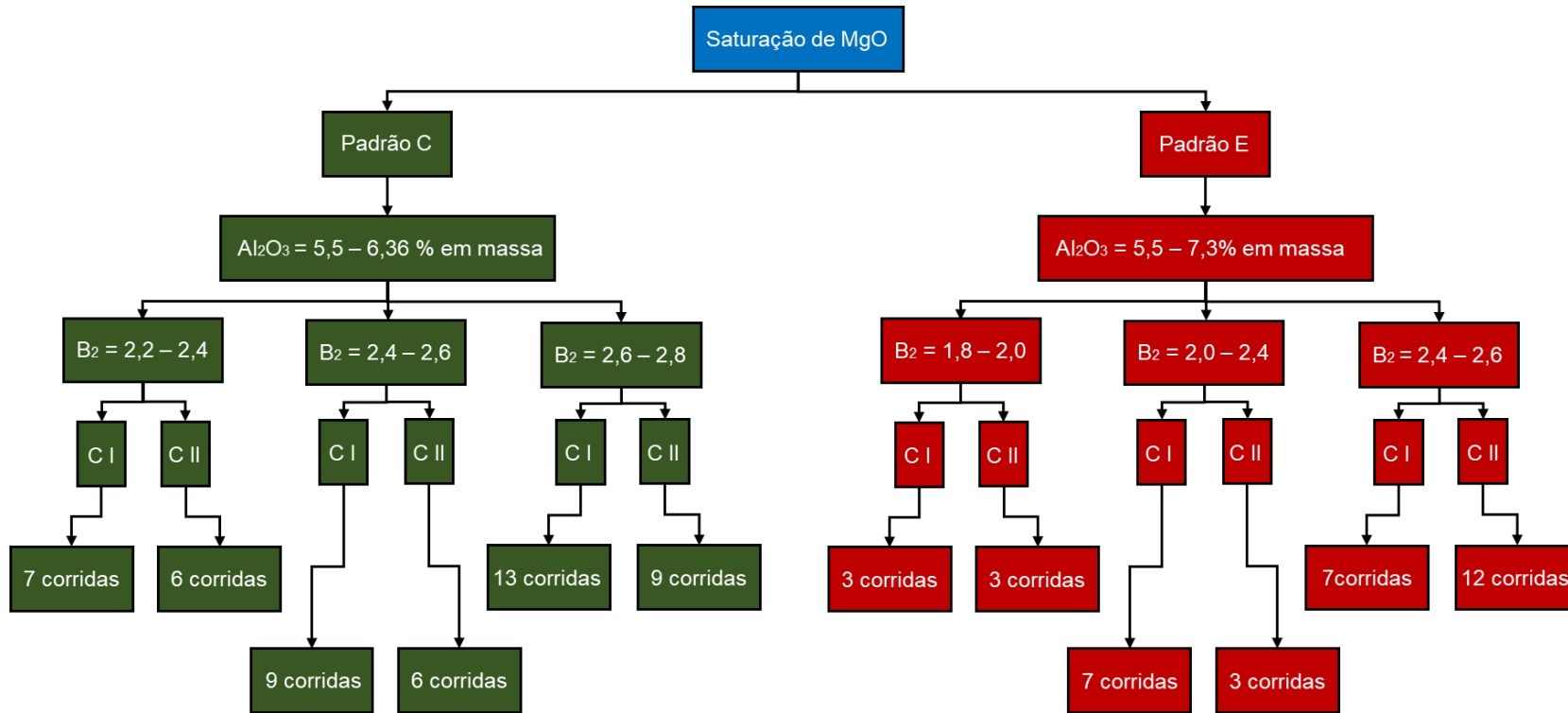
- 'FactPS': banco de dados de substâncias e compostos puros.
- 'FToxid': banco de dados com dados *FToxid* contém dados para sólidos e líquidos estequiométricos e soluções de óxidos de 20 elementos (assim como soluções diluídas de S, SO₄, PO₄, H₂O/OH, CO₃, F, Cl e I em escórias fundidas. Neste banco 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 41 – Bancos de dados do *software FactSage 6.4* utilizados no estudo.



Foram construídos três diagramas para cada padrão para ambos os cenários, conforme o fluxograma da Figura 42.

Figura 42 – Fluxograma com as definições para a construção dos diagramas ISD's.



Com os dados de composição química de cada corrida em ambos os cenários foi possível agrupar as corridas em faixas de basicidade binária. As faixas de basicidade binária da Figura 42 foram definidas de dois em dois pontos percentuais para que houvesse um número significativo de corridas dentro de cada cenário. Os teores de alumina são os máximos e mínimos apresentados nos Cenários I e II. As corridas foram posicionadas nos ISD's para análise da saturação de MgO, ou seja, a formação de partículas sólidas na escória. Para esses cálculos, a temperatura considerada foi de 1600°C, por se tratar de um valor médio de temperatura entre as amostragens de escória. Para cada padrão foi estabelecida uma faixa de alumina, dividindo as corridas em três faixas de basicidade nos dois cenários descritos.

4.3.9 Cálculo da Razão C/O

O cálculo da razão C/O foi realizado de duas maneiras. A primeira levou em consideração o carbono total do processo e oxigênio no modo lança, para que fosse comparado com o ferro perdido pela escória. O oxigênio injetado no modo queima foi desconsiderado, pois este reage com o gás natural, para que ocorram as reações de combustão. A equação para o cálculo é a seguinte:

$$C/O_{\text{global}} = \frac{\text{Carbono Sucata Metálica} + \text{Carbono Ferro-Gusa} + \text{Carbono Injeções}}{\text{Oxigênio Injeções}} \quad (15)$$

Esta razão C/O é global, ou seja, envolve todo o carbono e o oxigênio da corrida. Existe alguma entrada de oxigênio pelo ar infiltrado no FEA, além dos óxidos que estão presentes na sucata, mas não são considerados neste trabalho. A segunda maneira, para que fossem feitas as curvas de estabilidade das injeções durante o refino, levou em consideração apenas o carbono e oxigênio injetados para cada minuto de refino. Porém, como em alguns momentos do refino as injetoras de oxigênio eram desligadas, os valores de razão C/O_{Refino} nestes instantes eram pontos fora da curva, em relação aos outros minutos, impedindo a possibilidade da análise. Então decidiu-se fazer a razão C/O_{acumulada} conforme a equação 16.

$$C/O_{\text{acumulada}} = \frac{C}{O} (i) = \sum_{i=0}^{i=m} \frac{C_{\text{injetado}}}{O_{\text{injetado}}} \quad (16)$$

Onde:

i = minutos;

m = instante qualquer no refino;

C_{injetado} = carbono em quilogramas;

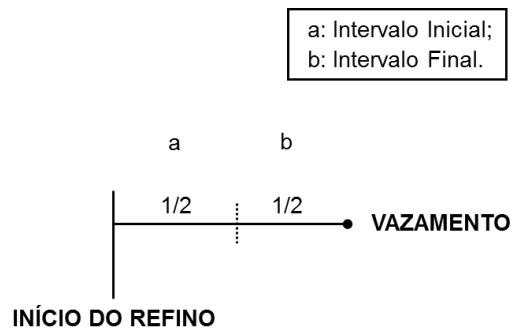
O_{injetado} = oxigênio em quilogramas.

Foram construídas curvas os valores de C/O_{acumulados} em relação ao tempo de refino por minuto para reproduzir a estabilidade das injeções.

4.3.10 Intervalos de Refino

Para verificação do comportamento das injeções durante o refino, foi realizada a distribuição dos valores de injeções de carbono e oxigênio nos intervalos da Figura 43.

Figura 43 – Esquema ilustrando os intervalos de refino propostos neste estudo.

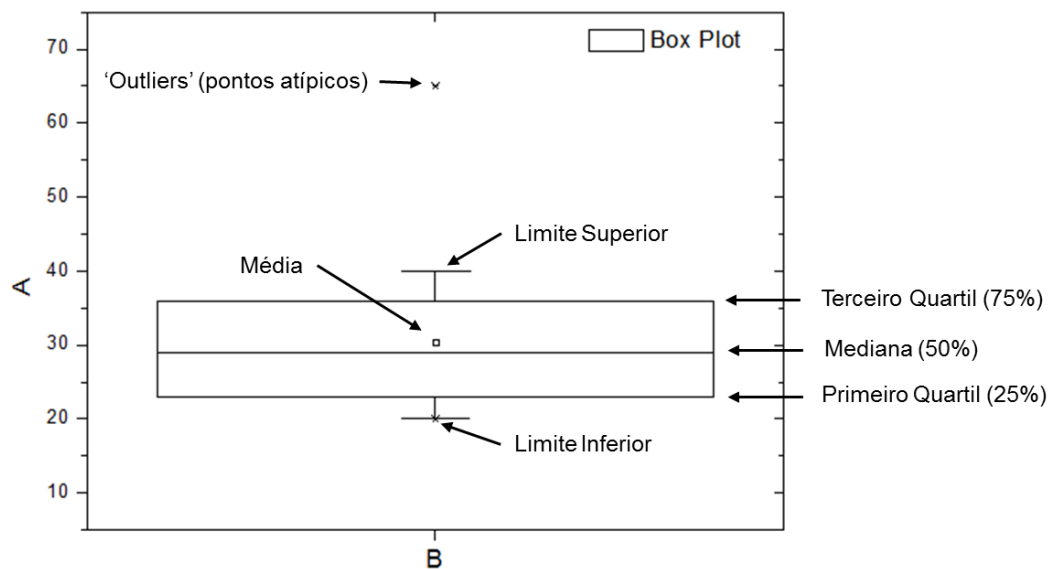


Para o Cenário I, foram relacionadas as quantidades de carbono e oxigênio injetados no intervalo 'b' com o oxigênio ativo inicial. Já para o Cenário II, a distribuição dos valores de injeção para 'a' e 'b' foram verificadas por meio da ferramenta 'Box Plot'. Essas análises foram realizadas para investigar possíveis influências operacionais na instabilidade do processo de injeções.

4.4 Software de Análise Estatística 'ORIGIN 8'

A ferramenta 'Box Plot' do programa de análises estatísticas 'Origin 8' foi utilizada para verificar a distribuição dos dados dos Cenários I e II. A Figura 44 ilustra como os dados são representados através de um 'box plot'.

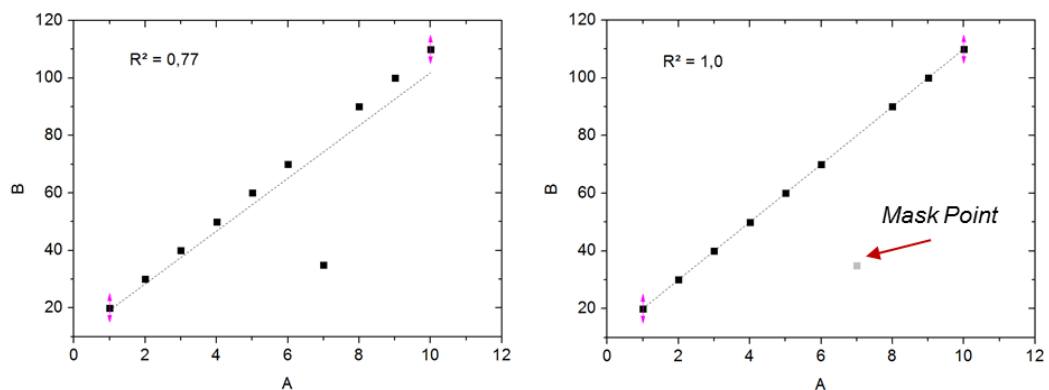
Figura 44 – Interpretação de um 'Box Plot'.



A Figura 44 apresenta a mediana, a média, os limites superior e inferior e os pontos atípicos que podem aparecer. Os dados são distribuídos a cada 25%.

Para construção dos gráficos de dispersão, utilizou-se a ferramenta 'Mask Toolbar' do mesmo programa, Figura 45.

Figura 45 – Aplicação da ferramenta 'Mask Toolbar'.



Em algumas situações os dados que estão fora do padrão precisam ser desconsiderados, para que haja relação nos gráficos de dispersão, e uma análise possa ser feita. Esta ferramenta desconsidera os pontos escolhidos para o cálculo do R² (Fator de Determinação), aumentando a relação entre os pontos como visto na Figura. Estes pontos, neste trabalho, são representados pela cor cinza claro.

4.5 Análise Estatística de Variância ANOVA ‘Fator Único’

Esta ferramenta foi aplicada para verificar a variação entre os teores de elementos residuais, fósforo, carbono, quantidade de carbono injetado e rendimento metálico entre os cenários. O objetivo principal da análise de variância (*analysis of variance* – ANOVA) é a comparação de mais do que dois grupos de amostras. Esta comparação é feita a partir da análise da dispersão presente no conjunto de dados (UNIVERSIDADE DE COIMBRA).

Neste estudo será utilizado a ferramenta estatística ANOVA ‘Fator Único’, pois o objetivo é verificar se existem diferenças entre as médias de uma determinada variável (rendimento metálico, por exemplo) em relação a um tratamento com dois ou mais níveis categóricos (Cenário I e Cenário II, neste estudo).

O $F_{\text{calculado}}$ da tabela é comparado com o F_{tabelado} . Se o $F_{\text{calculado}}$ for maior que o F_{tabelado} para o nível 5%, a diferença é dita significativa ($P < 0,05$). No caso de $F_{\text{calculado}}$ ser menor que o F_{tabelado} , não haverá diferença significativa entre os tratamentos. A Tabela 4 mostra um exemplo da Análise Anova ‘Fator Único’ (RIBOLDI, 2006).

Tabela 4 – Exemplo de Resultados da Análise de Variância utilizando o Excel.

Anova: fator único						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
3DOK1	5	144,1	28,82	33,642		
3DOK5	5	119,9	23,98	14,267		
3DOK4	5	73,2	14,64	16,943		
3DOK7	5	99,6	19,92	1,277		
3DOK13	5	66,3	13,26	2,038		
Composto	5	93,5	18,7	2,565		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	847,0467	5	169,4093	14,37053	1,48E-06	3,895082
Dentro dos grupos	282,928	24	11,78867			
Total	1129,975	29				

Fonte: RIBOLDI, 2006.

Na Tabela 4, um exemplo de análise ANOVA ‘Fator Único’, nota-se que o $F_{\text{calculado}}$ (F) é maior que o F_{tabelado} ($F_{\text{crítico}}$), afirmando que a diferença entre as médias é significativa. As Tabelas com as Análises de ANOVA estão disponíveis no Apêndice B.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo contempla os resultados obtidos neste estudo e relaciona com trabalhos encontrados na literatura. Foram definidos os padrões de cargas estudados conforme a estratificação das corridas. Para estes padrões de carga foram realizadas análises de composição química, como basicidade binária, saturação de MgO, teores de fósforo e carbono do aço. As composições químicas das escórias foram relacionadas com os dados de consumo de energia elétrica. O rendimento metálico do FEA foi calculado para todas as corridas produzidas durante o Cenário I e II. Fatores, que foram alterados entre os cenários segundo o capítulo 4, como injeções, adição de cales e carregamento de sucata Shredder foram também avaliados.

5.1 Estratificação das Corridas

Como descrito no capítulo 4.2, as corridas foram divididas em 2 grupos de dois cenários diferentes e alguns filtros foram aplicados. A distribuição dos valores de rendimento e *power-off* para os dois cenários pode ser vista no Apêndice A, Figuras 91 à 94. Os resultados foram obtidos com o número de corridas descritas na Tabela 5, que mostra o número de corridas antes e depois dos filtros, sendo: corridas com faixas de: Rendimento: 0,85 – 0,97; *Power-off*: até 30 minutos.

Tabela 5 – Número de corridas antes e depois dos filtros, sendo: corridas com faixas de: Rendimento: 0,85 – 0,97; *Power-off*: até 30 minutos.

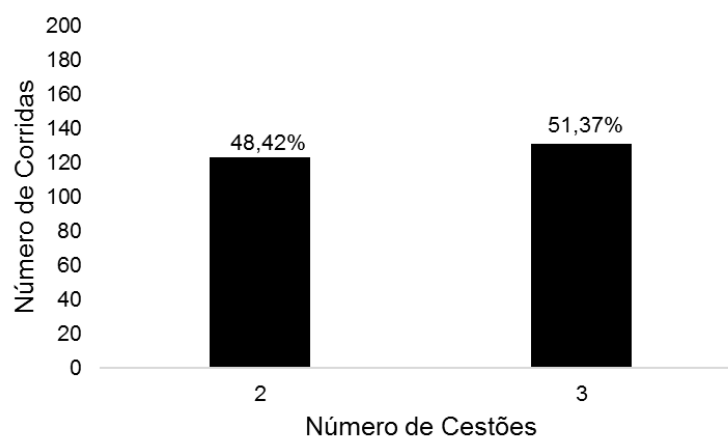
Cenários	Antes	Depois
CI	300	254
CII	394	293

Analisando a Tabela 5, nota-se uma redução de aproximadamente 15,0% e 26,0%, respectivamente para o CI e CII, do número total de corridas após a aplicação

dos filtros. De maneira geral, isso se deve, em termos de *power-off*, por problemas que podem ocorrer no processo de FEA, como por exemplo, quebras de eletrodos por sucatas que foram indevidamente estratificadas, ou ainda problemas nos processos posteriores ao FEA, causando um atraso no FP ou lingotamento, assim o FEA precisa ser desligado, aumentando os valores de *power-off*. Já para os filtros de rendimento, o corte de corridas para os rendimentos extremos ocorre devido possível vazamento do lastro de aço líquido³ na panela ou por haver necessidade de esvaziar o FEA para manutenção (valores de rendimento acima de 97%), por exemplo. E ainda pela prática de lastro líquido, onde uma certa quantidade de aço não deve ser vazada completamente na panela (rendimentos abaixo de 85%). No Cenário II houve uma maior redução na quantidade de corridas após a aplicação dos filtros de rendimento e *power-off*. Analisando os histogramas do Apêndice A, Figura 94, para o Cenário II existe um maior número de corridas com valores de *power-off* acima de trinta minutos. Isso pode ter ocorrido por atrasos ou mudanças nos processos posteriores que não foram analisados neste trabalho.

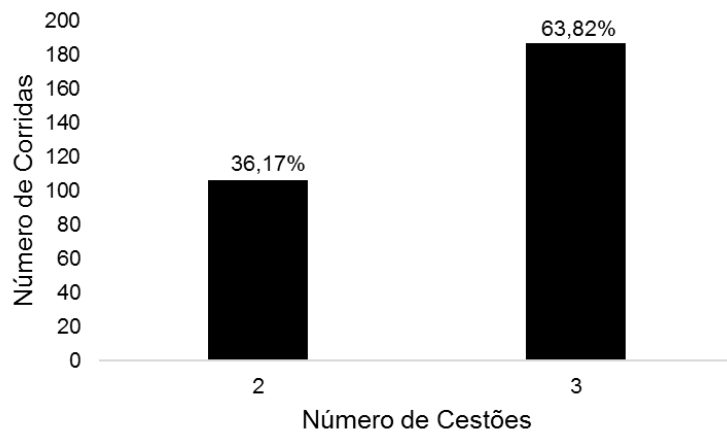
Para que fosse possível uma homogeneidade ainda maior dos dados analisados minimizando ruídos nos resultados, o número de cestões em cada cenário após a aplicação dos filtros foi verificado, conforme Figuras 46 e 47.

Figura 46 – Corridas por número de cestões no carregamento do FEA para o Cenário I.



³ Lastro de aço líquido – quantidade de aço que não é vazada para proteger a soleira do FEA do carregamento da sucata metálica e facilitar a fusão da carga.

Figura 47 – Corridas por número de cestões no carregamento do FEA para o Cenário II.



O número de cestões depende da densidade aparente da sucata. Se a densidade aparente for baixa, para o FEA operar com toda a sua capacidade, costuma-se operar com três carregamentos, ou seja, três cestões. As corridas com três carregamentos predominam nos dois cenários analisados, por isso foram escolhidas para análises posteriores.

Conforme a qualidade de aço a ser produzida, um determinado padrão de carga é adicionado no FEA. O padrão de carga consiste no tipo e quantidade de sucata e nos insumos adicionados. Nos Cenários I e II a distribuição de corridas nos padrões se dividem conforme Figuras 48 e 49.

Figura 48 – Número de corridas de três cestões contidas nos padrões de carga do Cenário I.

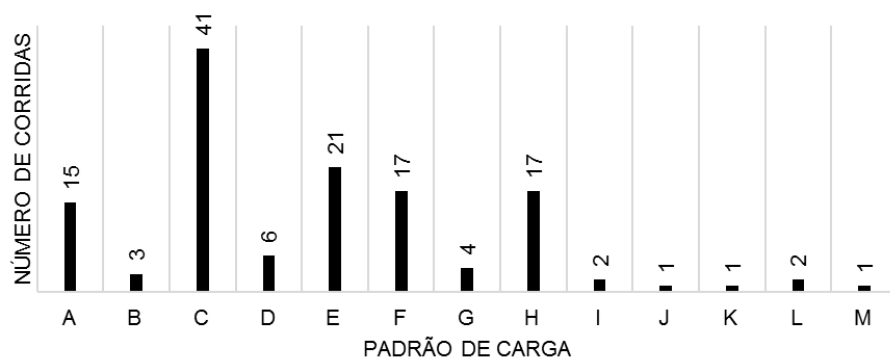
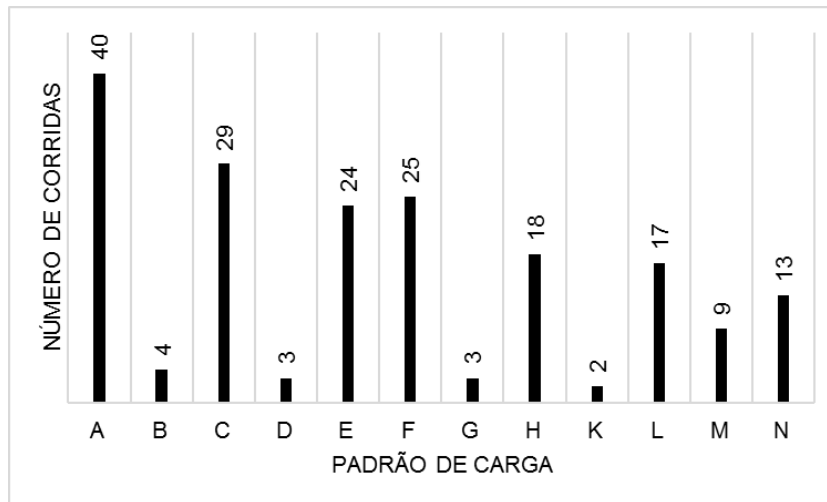


Figura 49 – Número de corridas contidas no Cenário II.



Comparando os dois cenários, os padrões que têm o maior número de corridas são o Padrão de Carga C e Padrão de Carga E. A letra N do Cenário II foi inserida para agrupar todos os padrões inexistentes no Cenário I.

5.2 Análise da Composição Química das Escórias para os Padrões C e E

As informações de composição química das escórias em FEA são de grande importância, pois pode-se definir as características físico-químicas da mesma, e então estimar se é uma escória adequada para o processo, como por exemplo, se é agressiva ao refratário, se tem boas condições para a prática de espumação e ainda se pode garantir as reações de desfosforação do banho metálico (DEHKORDI, MOALLEM e PARSAPOOR, 2011; SEDIVY e KRUMP, 2008; DEHKORDI, MOALLEM e PARSAPOOR, 2010). A Tabela 6 traz os principais óxidos formadores da escória, junto com a média e desvio padrão da composição química para cada Cenário (I e II) e cada padrão definido (C e E).

Tabela 6 - Análise da composição química média das provas de escória em porcentagem em massa de cada óxido, para os padrões de carga C e E; Cenários I e II.

Padrão	Cenário		FeO	SiO₂	Al₂O₃	MgO	CaO	MnO	
C	I	Média	30,97	12,62	6,42	6,56	31,44	5,73	
		σ	5,64	1,48	1,50	0,88	3,46	0,66	
	II	Média	31,57	13,26	5,51	9,04	28,09	6,61	
		σ	4,56	1,78	0,81	1,35	2,49	0,67	
	E	I	Média	31,92	12,98	7,28	6,85	28,0	6,24
			σ	4,63	1,83	1,10	0,99	2,78	0,58
II		Média	29,68	13,46	5,50	9,42	29,74	6,56	
		σ	3,87	1,29	0,77	1,37	2,61	0,56	

A Tabela 6 mostra a comparação da composição química das escórias dos Cenários I e II para os padrões C e E. A maior variação em ambos os padrões foi o aumento do teor de MgO da escória no Cenário II.

No entanto, houve uma diferença das quantidades em média da quantidade das cales calcítica e dolomítica adicionadas no carregamento do FEA por tonelada de aço vazado, comparando os dois cenários, visto na Tabela 7.

Tabela 7 – Mudanças no carregamento de cales e redução da massa de escória em kg/t.

Padrão	Cenário		Massa de Escória	Cal Calcítica Adicionada	Cal Dolomítica Adicionada	Total de Cales	
C	I	Média	96,66	19,80	18,26	38,08	
		σ	14,04	2,92	2,15	5,00	
	II	Média	78,08	7,19	26,82	34,01	
		σ	10,18	2,19	10,18	3,62	
	E	I	Média	95,24	17,37	18,14	35,51
			σ	15,71	3,23	2,88	5,92
II		Média	77,29	8,04	27,36	35,41	
		σ	9,21	4,57	4,56	2,73	

Conforme Tabela 7, a quantidade média de cales para o padrão C reduziu 4 kg/t de aço vazado. Já para o padrão E os valores se mantiveram em média. No

entanto, a redução da quantidade de escória foi de 18 kg/t de aço vazado para ambos os padrões. Isso ocorreu devido à variação da proporção de cales, CCal e CDol. Para o padrão C no Cenário I as proporções de CCal e CDol eram respectivamente 52 e 48% do total do carregamento, passando para 22 e 78% no Cenário II. Para o padrão E os valores são similares, no Cenário I, 49 e 51%, já no II, 23 e 77%. Os valores do Cenário II se aproximam dos valores mencionados por Torres *et al*, (2013) onde a prática de adição de escorificantes considera aproximadamente 35% CCal e 65% CDol.

A influência do volume da escória no rendimento metálico será discutida posteriormente, no entanto, considerando essa visível redução da quantidade de escória, pode-se analisar a Tabela 8, que mostra os valores em média dos óxidos em quilogramas por tonelada de aço, considerando a quantidade de escória do processo.

Tabela 8 – Quantidade de cada óxido presente na escória em kg, considerando a massa de escória estimada para os padrões de carga C e E; Cenários I e II.

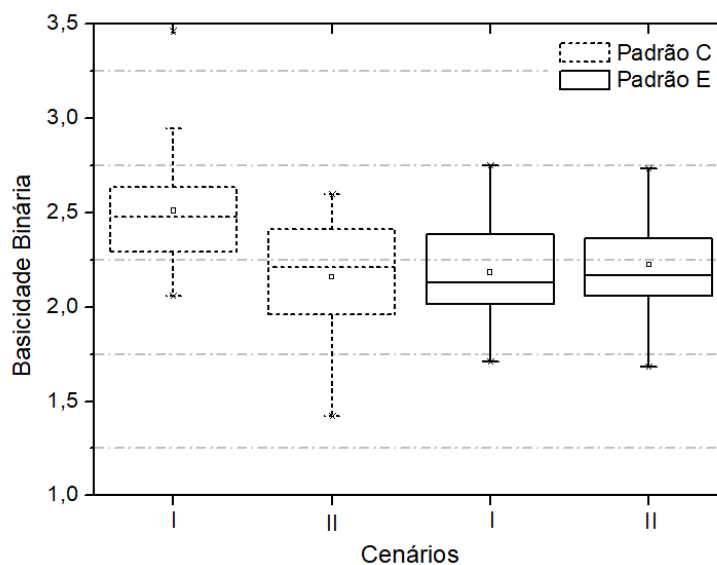
Padrão	Cenário		FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO
C	I	Média	1815,82	718,35	361,75	373,17	1790,68	328,71
		σ	568,23	80,12	69,12	46,39	234,13	56,16
	II	Média	1566,73	651,47	270,12	443,02	1373,0	325,67
		σ	384,10	111,54	49,0	72,86	134,74	58,0
E	I	Média	1923,22	777,56	442,51	410,05	1668,48	375,18
		σ	432,28	176,62	125,23	89,45	283,48	76,47
	II	Média	1457,48	651,65	267,91	455,68	1441,97	320,42
		σ	321,34	68,69	51,71	65,54	164,38	51,69

Apesar da Tabela 6 ter mostrado que o FeO, Al₂O₃, SiO₂, CaO e MnO não tiveram uma grande variação, considerando a porcentagem em massa, a Tabela 8, considerando a quantidade de escória no cálculo, mostra que houve uma redução nas quantidades de todos os óxidos, para ambos os padrões, exceto para o MgO, que aumentou devido as mudanças das proporções das quantidades de CCal e CDol. Esse aumento de MgO será avaliado no capítulo 5.2.2.

5.2.1 Análise da Basicidade Binária dos Padrões C e E

Devido às variações das quantidades de cales adicionadas no FEA, avaliaram-se as mudanças na basicidade do processo, comparando os cenários na Figura 50.

Figura 50 – Distribuição da basicidade binária nos Cenários I e II para ambos os padrões.



A Figura 50 mostra que, para o padrão C, a média da basicidade entre as corridas diminuiu de 2,5 para 2,1, porém, a dispersão desses valores teve um aumento, pois aumentou o número de corridas na faixa de 1,4 - 2,0 de basicidade. A Tabela 7 indica que esse aumento da dispersão da basicidade para o padrão C no Cenário II se deve ao aumento do desvio padrão da sílica na escória. A redução da basicidade devido às mudanças no carregamento de cales influencia na diminuição da quantidade de escória no FEA. Porém, baixas basicidades podem resultar em desgaste do refratário, além de influenciar negativamente nas propriedades de espumação da escória e reação de desfosforação. Já para o padrão E a média e a dispersão da basicidade ficaram parecidas para ambos os cenários. Torres et al, (2015) citam a importância da basicidade do FEA maior do que 2,0 para promover um balanço estequiométrico e conseqüentemente a neutralização da sílica. Além disso, Corbari, *et al*, (2009) afirmam que a oferta do CaO proporciona um aumento da viscosidade, devido a saturação de óxidos que precipitam partículas sólidas. Uma avaliação da saturação de MgO foi feita para verificar se o aumento do MgO foi necessário para a saturação de partículas sólidas em forma de magnésio-wustita da

escória, auxiliando no aumento da viscosidade, e então nas propriedades de espumação, capítulo 5.2.2.

5.2.2 Análise da Saturação de MgO

O principal motivo para a análise da variação de saturação de MgO da escória para os Cenários I e II foi a mudança das proporções de cales no carregamento. As Figuras 51 e 52 mostram as distribuições dos óxidos CaO e MgO em quilogramas por corrida.

Figura 51 – Distribuição dos valores de CaO da escória em quilogramas para os Cenários I e II.

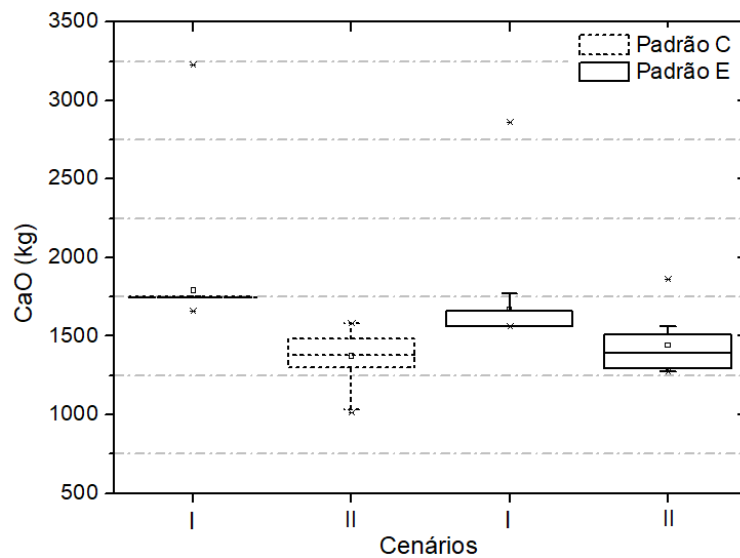
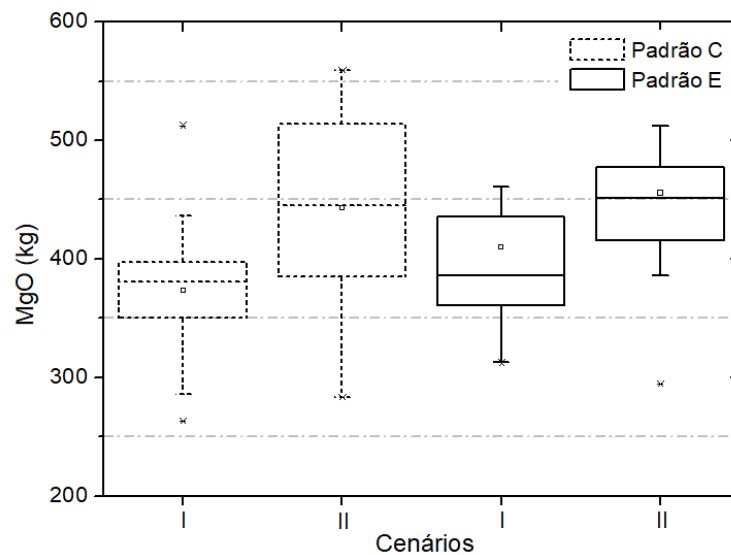


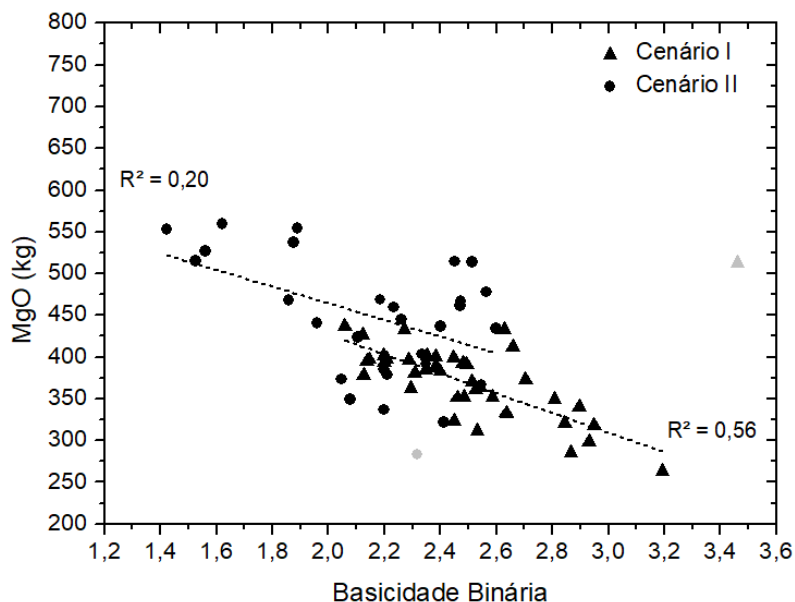
Figura 52 – Distribuição dos valores de MgO da escória em quilogramas para os Cenários I e II.



Em ambos os padrões houve a redução do CaO, e o aumento do MgO em média para as corridas do Cenário II. Almeida *et al* (2016), explicam em seu trabalho que, além de envolver a presença de partículas sólidas, a saturação de MgO previne que a escória não consuma o MgO do refratário. Para o padrão C, a dispersão da quantidade de MgO adicionado no Cenário II é maior comparada a dispersão do padrão E.

A relação entre basicidade binária e a quantidade de MgO da escória mostrou-se linear para o padrão C, visto na Figura 53.

Figura 53 - Relação entre basicidade binária da escória e quantidade de MgO em quilogramas na escória, para o Padrão C em ambos cenários.



A relação entre os dados do Cenário II é menor, se comparada ao Cenário I. Isso pode ter ocorrido pelo fato de que a dispersão, tanto para a basicidade quanto para o teor de MgO da escória aumentou, vistos nas Figuras 50 e 52. Conforme a basicidade aumenta, a quantidade de MgO na escória diminui. Em função do aumento da basicidade, o teor de MgO necessário para saturação da escória diminui. Para os pontos que representam as corridas do Cenário II é verificado um aumento do teor de MgO da escória devido às mudanças no carregamento de cales.

Os pontos cinza claros são amostras de corridas que foram consideradas ruidos no processo, e foram ignoradas no cálculo de R^2 , como explicado no capítulo 4.4. Em um estudo que envolve dados industriais se faz necessário esse tratamento

dos dados, pois há variações não previstas nas operações e também nas amostragens das escórias e aço.

As Figuras 54, 55 e 56, mostram as corridas do Padrão C em representações do tipo ISD's, distribuídas nas seguintes faixas de basicidade (2,2 - 2,4; 2,4 – 2,6; 2,6 – 2,8). As corridas com basicidades abaixo de 2,2, vistas na Figura 50, pertencem ao Cenário II, não foram incluídas nos ISDs, por não haver corridas com esses valores no Cenário I, não sendo possível comparar os cenários.

Figura 54 - ISD para o padrão C, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química: Al_2O_3 : 5,5 – 6,36% e B_2 : 2,2 – 2,4; $T = 1600^\circ C$.

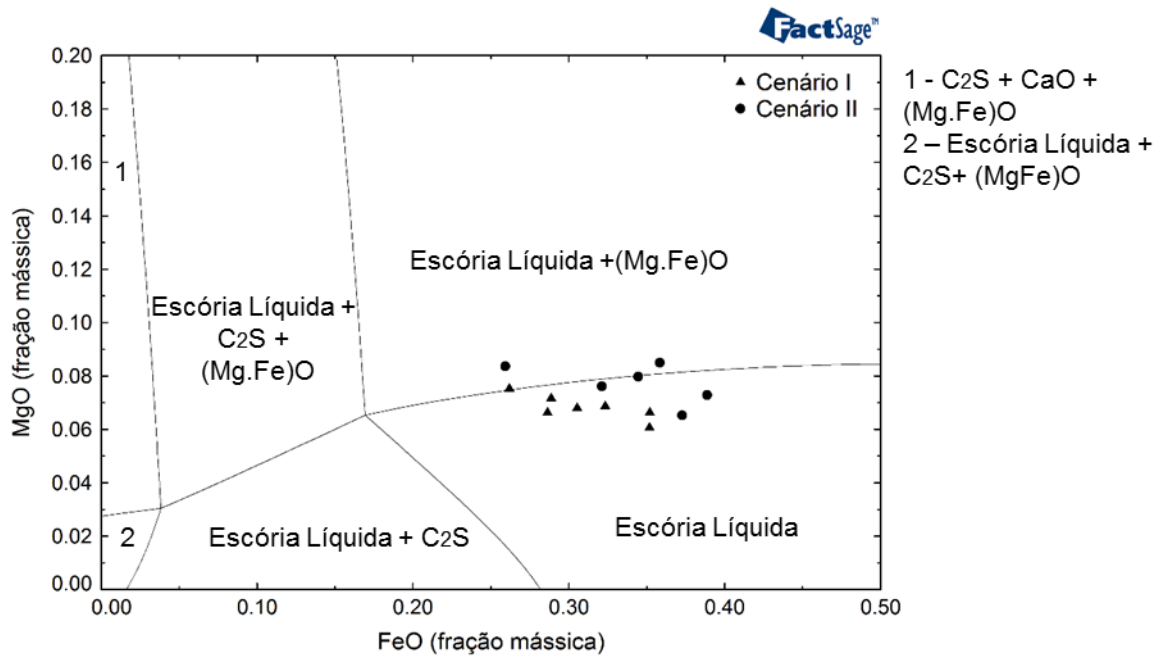


Figura 55 - ISD para o padrão C, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química:
 Al_2O_3 : 5,5 – 6,36% e B_2 : 2,4 – 2,6; T = 1600°C.

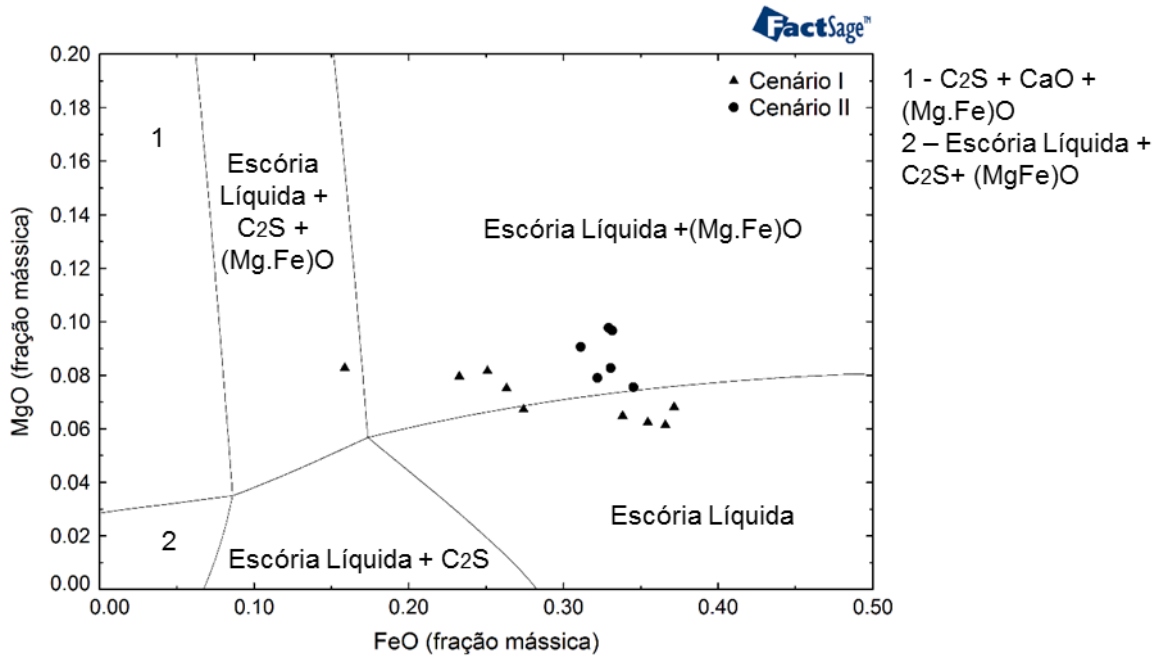
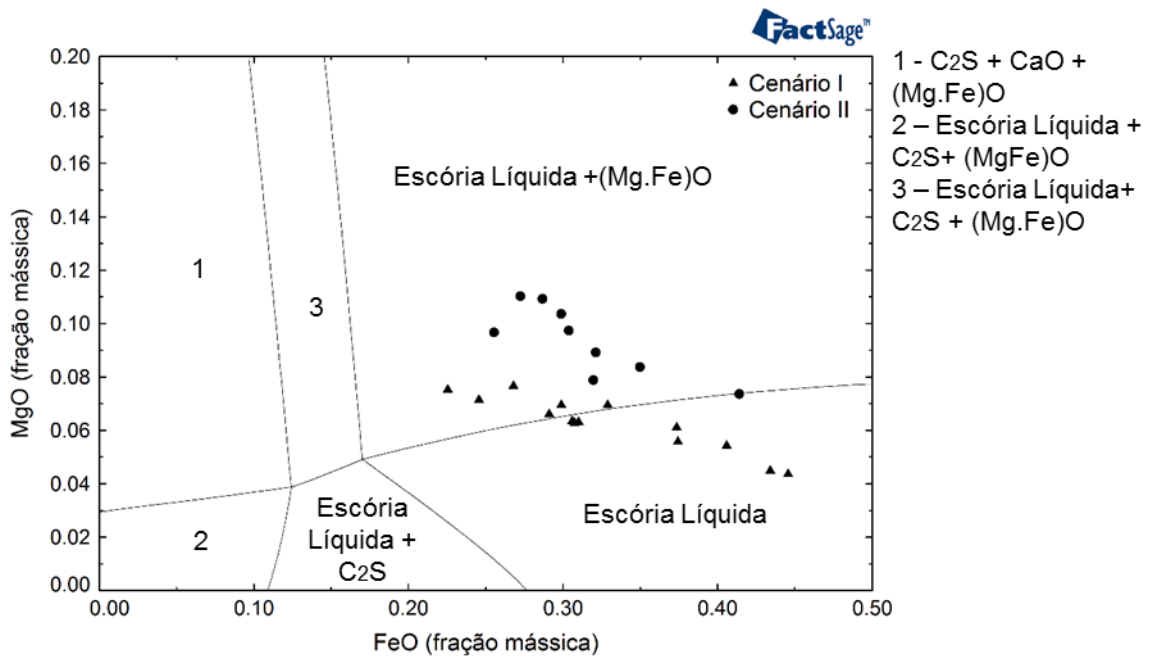


Figura 56 - ISD para o padrão C, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química:
 Al_2O_3 : 5,5 – 6,36% e B_2 : 2,6 – 2,8; T = 1600°C.

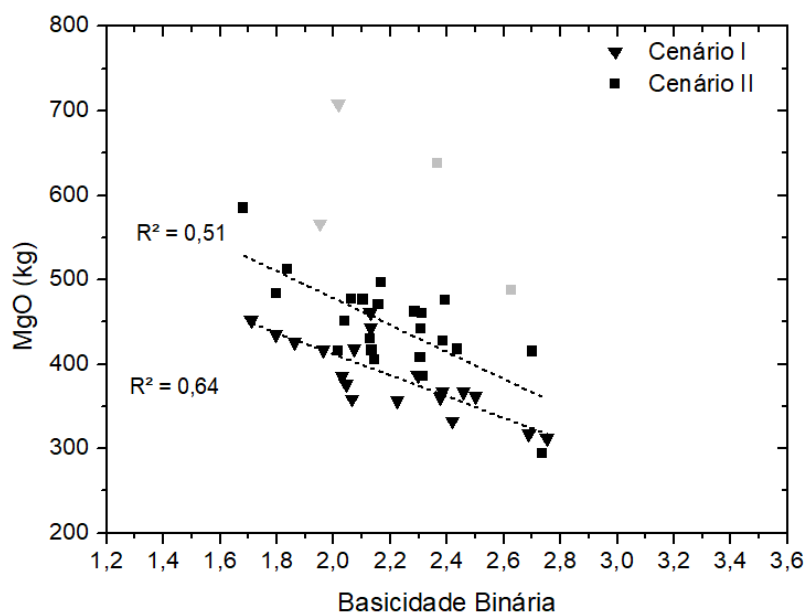


As Figuras 54, 55 e 56 mostram que, conforme a basicidade aumenta, as corridas de ambos os cenários se posicionam acima da linha de saturação da magnésio-wustita. Este fato já é esperado, de acordo com Pretorius e Carlisle (1998),

o MgO necessário para a saturação diminui de acordo com o aumento da basicidade. É importante salientar que, para os três ISD's, os pontos que representam as corridas do Cenário II estão acima dos pontos do Cenário I. Isso mostra que a diferença de MgO ocasionada pelas mudanças nas adições de cales, vistas no capítulo 5.2, Tabela 6, ocasionou um aumento na quantidade de MgO, o que aumentou a quantidade de partículas sólidas e possivelmente proporcionou uma espumação da escória mais efetiva, além de ter diminuído o consumo de refratário. Pode ser verificado que a maioria das corridas com fração mássica de FeO acima de 0,36 ficam distantes da linha de saturação nos ISDs apresentados, de acordo com Paulino *et al* (2014). Os autores afirmam que para basicidades mais altas a inclinação da curva de saturação de MgO é positiva, com o aumento do FeO.

Para o padrão E, o mesmo comportamento linear encontrado na Figura 53 (padrão C), é visto na Figura 57, quando relacionados basicidade e quantidade de MgO na escória.

Figura 57 – Relação entre B_2 e quantidade de MgO em quilogramas na escória, para o Padrão E em ambos cenários.



As relações encontradas para este padrão são mais próximas da linearidade, pois os valores de basicidade e MgO apresentaram uma faixa de dispersão menor, visto nas Figuras 50 e 52, no padrão E.

Os ISD's para o padrão E, Figuras 58, 59 e 60, foram calculados para as corridas com faixas de basicidade 1,8 – 2,0, 2,0 – 2,4 e 2,4 – 2,6, respectivamente.

Figura 58 – ISD para o padrão E, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química:
 Al_2O_3 : 5,5 - 7,3% e B_2 : 1,8 – 2,0; $T = 1600^\circ C$.

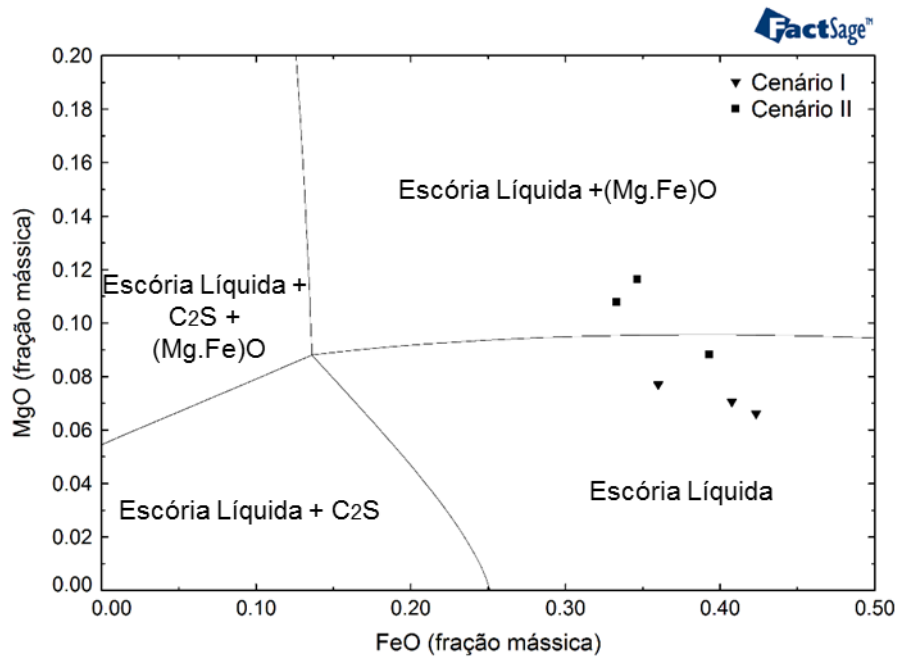


Figura 59 - ISD para o padrão E, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química:
 Al_2O_3 : 5,5 - 7,3% e B_2 : 2,0 – 2,4; $1600^\circ C$.

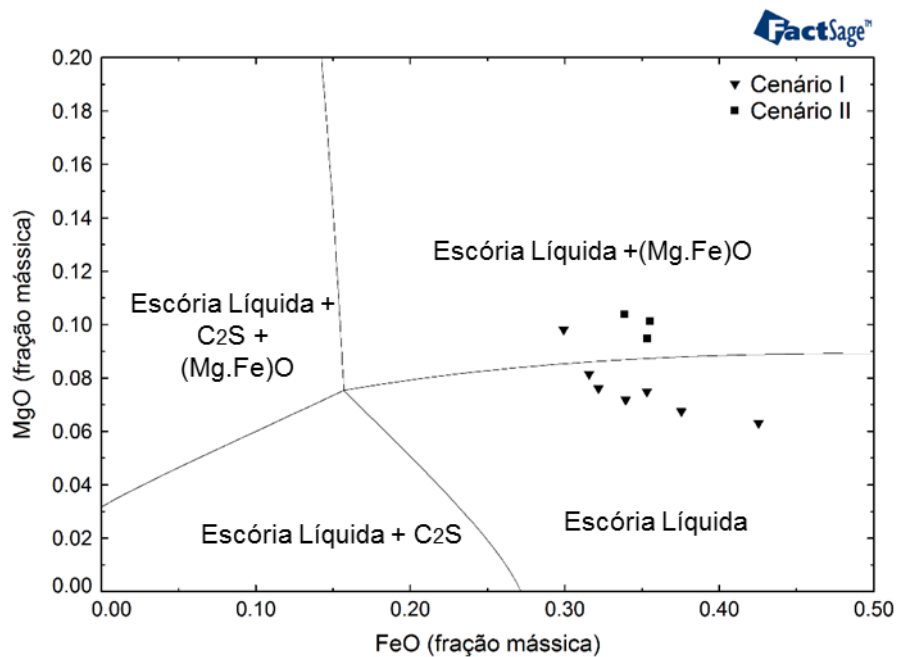
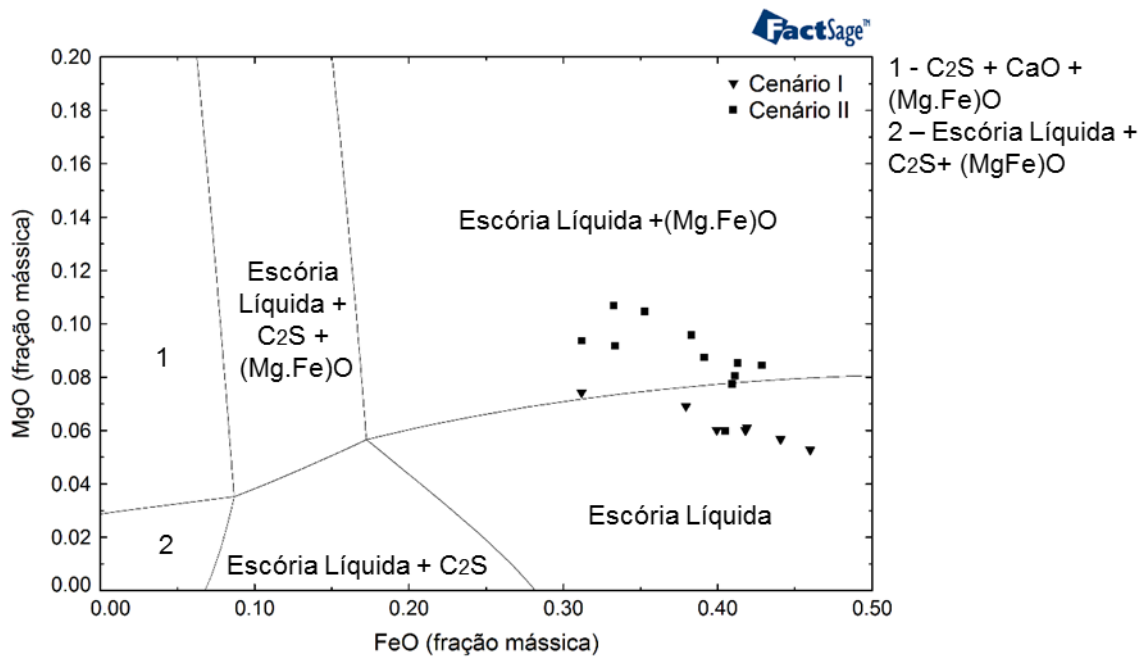


Figura 60 - ISD para o padrão E, nos Cenários I e II; Corridas nas faixas de composição química:
 Al_2O_3 : 5,5 - 7,3% e B_2 : 2,4 - 2,6; 1600°C.



Grande parte das corridas do Cenário I está abaixo da linha de saturação, com exceção de duas. Já para o Cenário II, apenas duas corridas estão no campo 100% líquido do diagrama. Mostrando que a escória do Cenário II possui a maior formação de partículas sólidas, conseqüentemente melhores propriedades físicas para espumação.

5.2.3 Variação do Teor de Fósforo no Aço

Em razão da redução dos teores de CaO na escória, discutido no capítulo 5.2.2, viu-se a necessidade de avaliar a variação do teor de fósforo no aço, pois como visto no capítulo 3.3, a oferta de CaO na escória é essencial para uma desfosforação eficiente (URBAN, WEINBER e CAPPEL, 2014). As Figuras 61 e 62 confirmam esse conceito.

Figura 61 – Relação entre o teor de fósforo no aço e a basicidade binária da escória para as corridas do padrão C, em ambos os cenários.

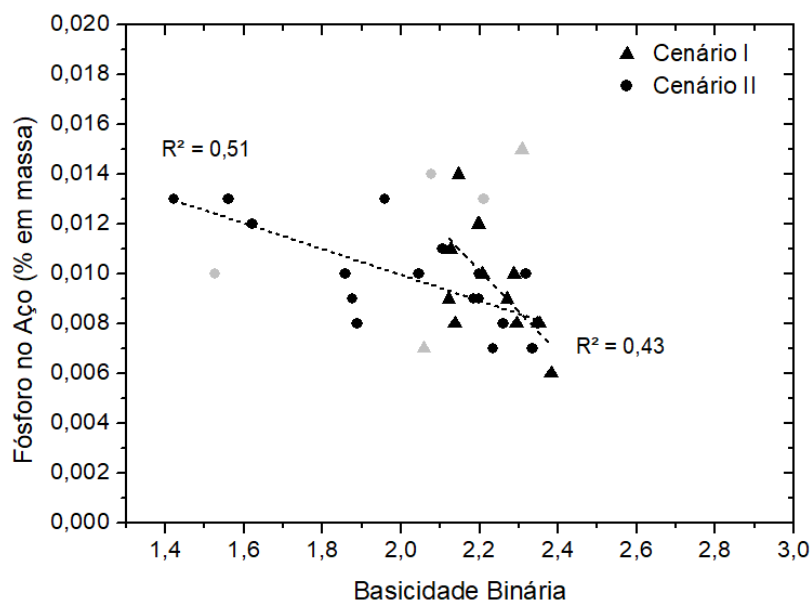
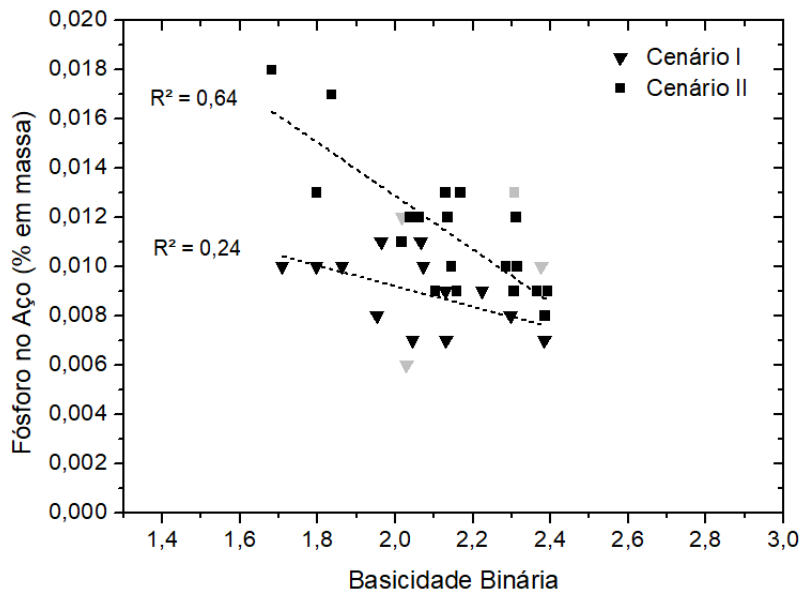


Figura 62 - Relação entre o teor de fósforo no aço e a basicidade binária da escória para as corridas do padrão E, em ambos os cenários.



As Figuras 61 e 62 apresentam as corridas pertencentes à uma faixa de basicidade de 1,4 a 2,4, mostrando uma relação inversamente proporcional do teor de fósforo no aço e a basicidade. Esse comportamento é esperado, pois com o aumento da basicidade binária ocorre a oferta de CaO na escória que segundo Urban, Weinber e Cappel (2014) é necessária para uma desfosforação eficiente, pois haverá a

formação da fase $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\text{-}3\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$, que é termodinamicamente estável, mantendo o P_2O_5 na escória.

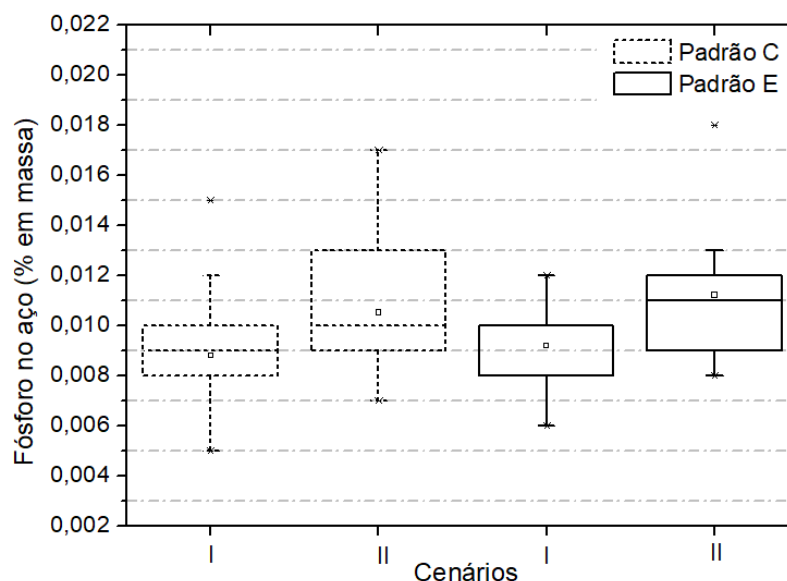
A Tabela 9 apresenta os valores médios de oxigênio injetado para os dois padrões, nos distintos cenários.

Tabela 9 – Médias e desvios das quantidades de oxigênio em Nm^3/t de aço vazado, injetadas no FEA durante o processo, para os padrões C e E, nos distintos cenários.

Padrão	Cenário		Oxigênio
C	I	Média	27,67
		σ	2,46
	II	Média	19,18
		σ	1,36
E	I	Média	27,34
		σ	1,77
	II	Média	18,42
		σ	1,64

A Tabela 9 mostra que houve uma redução de aproximadamente 30% para os valores de injeção de oxigênio do cenário I para os dois padrões. Essa redução de oxigênio diminui a oxidação do banho metálico, podendo prejudicar algumas reações que precisam de alta oferta de oxigênio no processo de refino. Para verificar se houve influência na reação de desfosforação nos padrões envolvidos no estudo, deve-se analisar a Figura 63.

Figura 63- Distribuição dos teores de fósforo no aço para os padrões C e E, em ambos os cenários.



A Figura 63 identifica um aumento no teor de fósforo do aço para ambos os padrões. Ainda pode-se notar uma maior dispersão nas faixas de fósforo do aço no padrão C, se comparado ao padrão E. Essa diferença pode ser pela qualidade da sucata metálica carregada no cestão, ou seja, pela variação no percentual de impurezas extrínsecas ou pelo teor de fósforo no ferro-gusa (NASCIMENTO, 2008). A Tabela 10 mostra os valores de fósforo no aço para ambos os cenários.

Tabela 10 – Valores médios de fósforo no aço para os padrões C e E, em ambos os cenários, % em massa.

Padrão	Cenário		Fósforo no aço
C	I	Média	0,008
		σ	4,33E-06
	II	Média	0,010
		σ	5,76E-06
E	I	Média	0,009
		σ	3,1619E-06
	II	Média	0,011
		σ	6,51993E-06

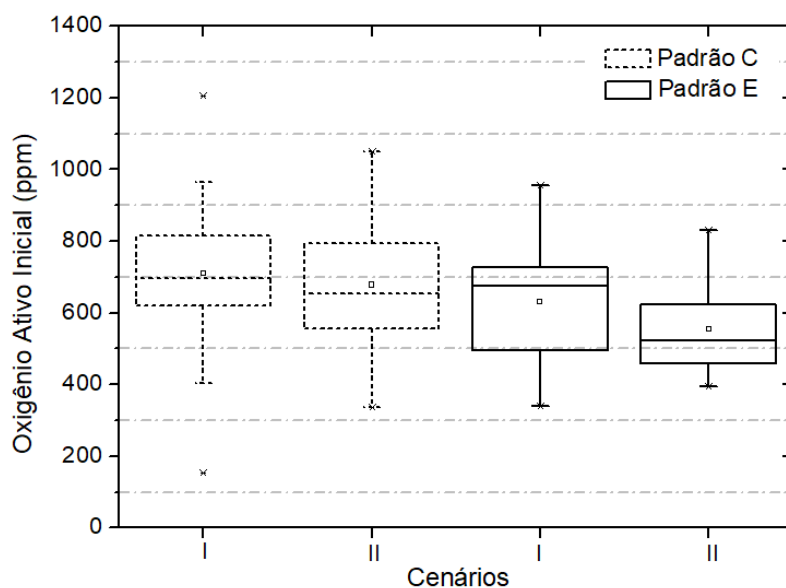
Para avaliar os valores da Tabela 10, foi usada a ferramenta estatística 'ANOVA, Análise de Fator Único', descrita em materiais e métodos. Para ambos os padrões, a diferença entre as médias de fósforo no aço, nos cenários I e II, foi significativa estatisticamente (Apêndice B, Tabelas 20 e 21). Assim, as reduções nas quantidades de CaO e oxigênio injetado no processo, alteram as reações de desfosforação do aço. Porém, cada padrão de carga tem especificações, onde há um limite crítico de teor de fósforo no aço. Então, o aumento do fósforo no aço no cenário II, não é um problema se os valores ainda estiverem dentro do especificado.

5.2.4 Variação do Teor de Carbono do Aço

O ritmo de descarburização é o fator que controla o potencial de oxigênio no FEA. Além disso, esse mecanismo é responsável pela formação de bolhas de CO, devido a oxidação do carbono, sendo importante para a espumação da escória (CAMPOS, 1983). No capítulo 3.4 foi discutido como funciona esse processo, que é dividido em três fases (Fase Prévia, Fase I e Fase II). Na Fase I a velocidade de descarburização depende do suprimento de oxigênio no FEA.

Como já discutido, as injeções de oxigênio foram reduzidas para os dois padrões de carga analisados. A Figura 64 mostra como essa redução de oxigênio influenciou na distribuição dos valores de oxigênio ativo inicial do FEA.

Figura 64 - Distribuição dos valores de O ativo inicial para os padrões C e E, em ambos os cenários.



Durante o processo de refino são retiradas algumas amostras de oxigênio ativo, através do amostrador *CELOX*, para verificar se o banho metálico está na faixa desejada de oxigênio ativo para a qualidade de aço que irá vazar na panela. A Figura 64 mostra a dispersão dos valores da primeira amostra retirada de oxigênio ativo, pois assim é possível analisar o comportamento do nível de oxidação no início do refino, pois na Fase I o principal parâmetro para que a reação ocorra é a oferta de oxigênio. Nota-se que, para o Cenário II, ocorre um aumento da faixa de oxigênio ativo para o padrão C, e uma maior estabilidade para o padrão E. Isso está de acordo com o resultado de redução de oxigênio apresentado no capítulo anterior.

Nas Figuras 65 e 66 pode-se observar a relação entre o oxigênio ativo inicial e o conteúdo de carbono no aço.

Figura 65 – Relação entre o carbono do aço e O ativo inicial para o padrão C em ambos cenários.

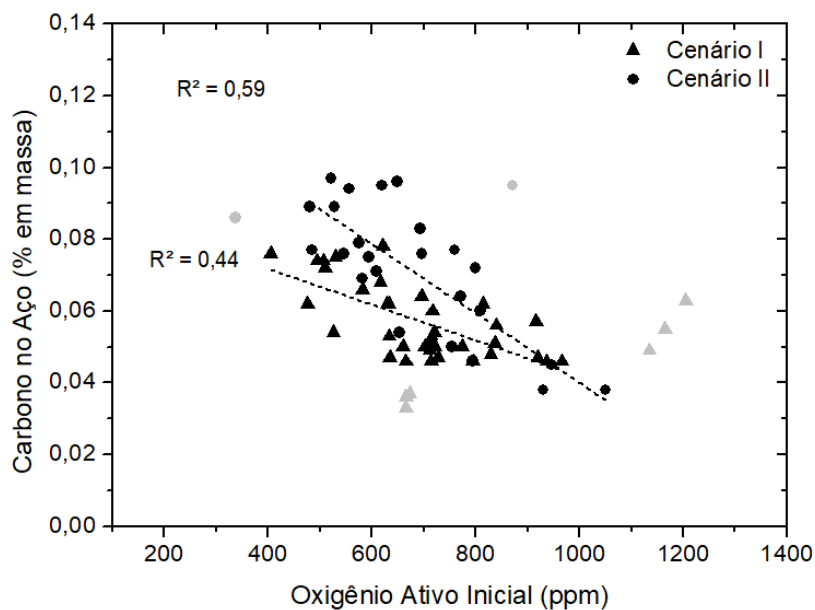
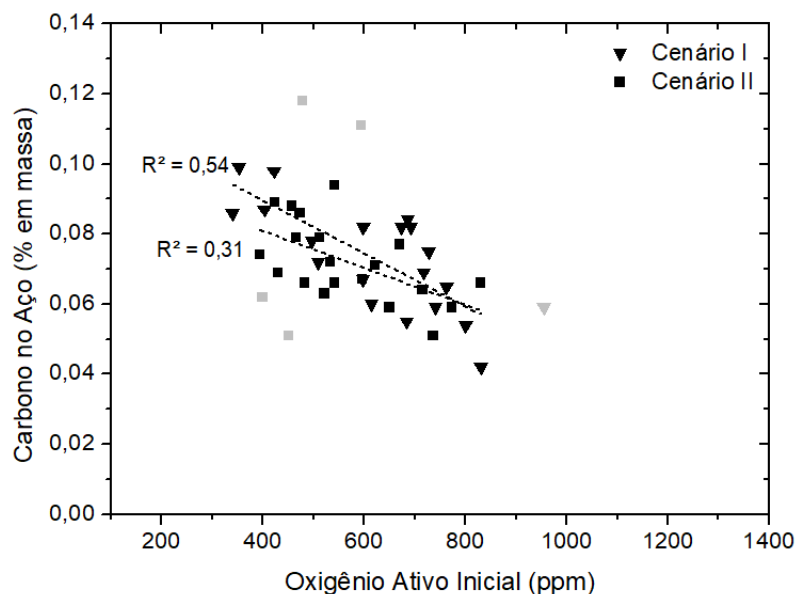


Figura 66 - Relação entre o carbono do aço e O ativo inicial para o padrão E em ambos cenários.



Observa-se pelas Figuras 65 e 66, que quanto maior o oxigênio ativo do aço, na primeira amostragem, menor o teor de carbono presente no aço. Na Fase II, a velocidade de descarburização depende da velocidade de difusão do carbono, portanto é função do teor momentâneo de carbono e do grau de agitação do processo. Quando o aço atinge o carbono crítico, ocorre uma drástica redução da velocidade de descarburização e uma grande perda de oxigênio, sendo que no FEA o carbono crítico se situa em níveis mais altos, entre 0,1 e 0,8% (CAMPOS, 1983). A Tabela 11 apresenta as médias das amostragens de aço das corridas nos seus distintos padrões e cenários.

Tabela 11 - Valores médios de carbono no aço para os padrões C e E, em ambos os cenários.

Padrão	Cenário		Carbono no Aço
C	I	Média	0,057
		σ	0,0003
	II	Média	0,086
		σ	0,0056
E	I	Média	0,072
		σ	0,0002
	II	Média	0,074
		σ	0,0002

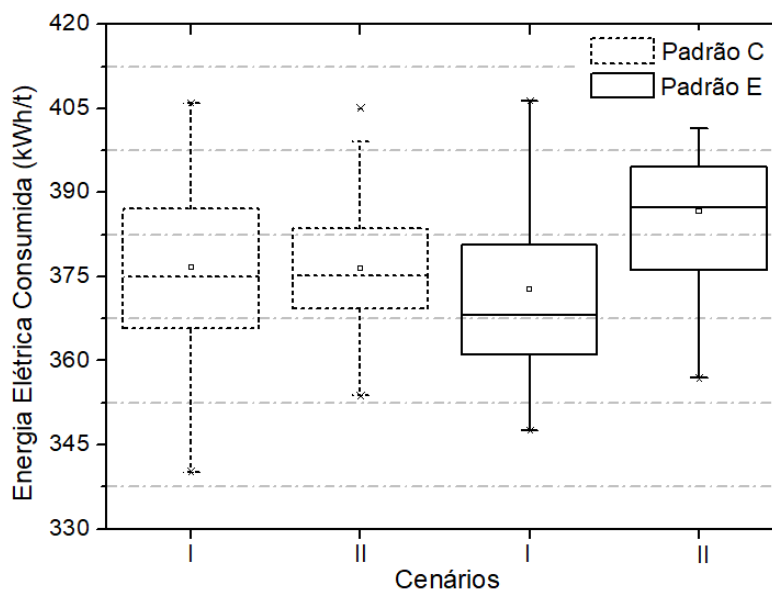
Segundo 'Análise de Fator Único', estatisticamente não houveram mudanças significativas dos teores de carbono no aço para o padrão E. Mas para o padrão C houve um aumento significativo do teor de carbono no aço (Apêndice B, Tabelas 22 e 23). Na Figura 64, para o padrão C, no Cenário II houve um aumento na dispersão dos dados de oxigênio ativo inicial, podendo assim justificar o aumento de carbono para esse padrão.

5.2.5 Relação entre Energia Elétrica Consumida e teores de FeO e MgO

Torres *et al* (2013) mencionam em seu trabalho que a tendência das práticas de FEA é aumentar as injeções de oxigênio, para diminuir a energia elétrica consumida durante a fusão e o refino do aço. Porém, se o objetivo do processo for reduzir o ferro oxidado pelo excesso de oxigênio injetado, para um aumento do rendimento metálico, a injeção de oxigênio do processo deve ser reduzida. A distribuição do oxigênio entre as reações que ocorrem no FEA é crítica para o desempenho do forno (MATSUURA *et al*, 2008).

A Figura 67 ilustra a distribuição do consumo de energia elétrica para ambos padrões, nos Cenários I e II.

Figura 67 – Consumo de energia elétrica por tonelada no FEA para ambos padrões e cenários.



Em média os valores de energia elétrica para o padrão C estão próximos. Porém, nota-se que a energia consumida no Cenário II se encontra em uma menor faixa de dispersão, mostrando uma maior estabilidade no processo. Para o padrão E, houve um aumento da energia elétrica para o Cenário II. Analisando as Tabelas 8 e 9, verifica-se que os valores de oxigênio e FeO da escória no Cenário II, são menores para o padrão E, se comparados ao padrão C, explicando um maior consumo de energia elétrica para este padrão, pois houve menor oferta de energia química. As significâncias das variações dos valores de energia elétrica podem ser confirmadas pela 'Análise de Fator Único' no Apêndice B, Tabelas 24 e 25.

Tendo como base os estudos de Corbari *et al* (2009) e Aminorraya e Edris (2002), que definiram faixas específicas de FeO e basicidade para um menor consumo de energia no FEA, 25 – 35% e 20 – 25%; 1,2 e 2,2 respectivamente, foi desenvolvida a Tabela 12.

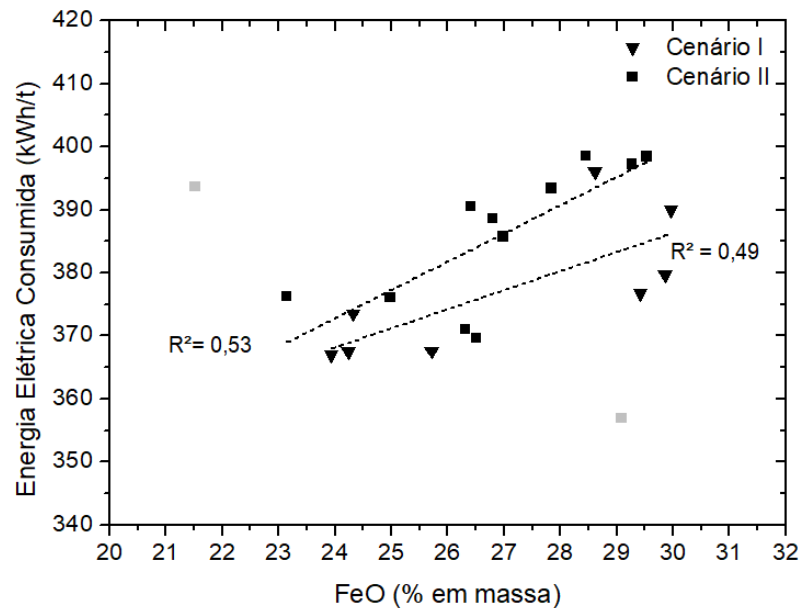
Tabela 12 - Porcentagem corridas, teores de MgO (% em massa), basicidades e consumo de energia elétrica (kWh/t) por corridas que pertencem à uma faixa de FeO = 20 – 30 (% em massa); Cenários I e II; Padrões C e E.

Padrão	Cenário	Corridas (%)	MgO	Basicidade	Energia Elétrica Consumida
				Binária	
C	I	41	6,0 - 8,1	2,1 – 2,9	355,56 – 402,79
	II	34	8,4 – 12,0	1,4 – 2,5	358,05 – 405,06
E	I	38	6,7 – 9,8	1,8 – 2,4	366,96 – 396,10
	II	54	8,1 – 12,3	1,7 – 2,7	356,87 – 398,55

A Tabela 12 contempla informações das corridas que pertencem à uma faixa de FeO entre 20 e 30%. Essa faixa engloba os estudos de ambos os autores, Corbari *et al* (2009) e Aminorraya e Edris (2002). Porém, os valores de basicidades foram extrapolados para que houvesse maiores números de pontos para a construção dos gráficos das Figuras 68 e 69, que pertencem ao padrão E. Para o padrão C não houve relação entre os dados, que podem ser verificados no Apêndice C, Figuras 93 e 94.

A Figura 68 apresenta a relação entre o teor de FeO (% em massa) e os valores de energia elétrica consumida.

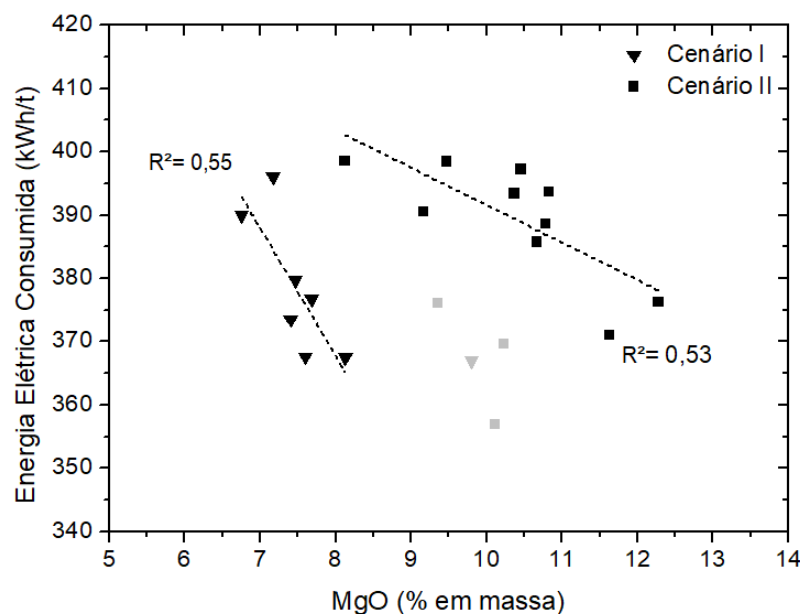
Figura 68 – Relação entre o FeO e energia elétrica consumida por corrida, para o padrão E.



As relações da Figura 68 condizem com a literatura. Uma vez que o excesso de FeO altera as características fluxantes da escória, ele causa um decréscimo da viscosidade, prejudicando a espumação. Com a ineficiência da escória espumante, o arco elétrico fica exposto, irradiando calor para as paredes do forno, e não para o banho metálico (DEHKORDI, MOALLEM e PARSAPPOOR, 2011; SEDIVY e KRUMP, 2008). Outro ponto a ser discutido é em relação a massa de escória. Na Tabela 11, para o Cenário I, apenas 38% das corridas possuem FeO entre 20-30%. As restantes, que foram desconsideradas para esta análise, possuem FeO acima de 30%. O aumento de FeO na escória aumenta a quantidade de escória, então a energia elétrica necessária para fornecer calor ao processo será maior. Em relação ao Cenário II, 46% das corridas ficaram com FeO acima de 30%. São essas corridas que elevam a média de energia elétrica consumida da Figura 67. Os menores valores de energia elétrica para o Cenário II estão na faixa de 23 – 27% de FeO.

A Figura 69 mostra a relação entre MgO da escória e energia elétrica consumida.

Figura 69 - Relação entre o MgO e energia elétrica consumida por corrida, para o padrão E.



A Figura 69 ilustra que existe uma relação linear, quanto maior o teor de MgO da escória, menor a energia elétrica consumida. Isso ocorre devido à presença de partículas sólidas, que aumentam a qualidade da espumação, aumentando a eficiência térmica do forno, reduzindo então a energia elétrica consumida. Porém, outros fatores estão envolvidos no processo, e conforme a mudança dos cenários, houve a redução de oxigênio injetado no processo. Por esse motivo, é evidenciado uma redução de energia elétrica com o aumento de MgO, mas não uma redução de energia elétrica do Cenários I para o Cenário II.

A falta de relação para o padrão C (Figuras 95 e 96 do Apêndice C) não pode ser explicada a partir dos dados disponíveis neste trabalho, embora as faixas de composições químicas e energias consumidas são semelhantes entre os dois padrões.

5.3 Rendimento Metálico do FEA

5.3.1 Resultados Gerais da Usina

Neste capítulo serão apresentados os resultados de todos os padrões de carga que foram produzidos nos Cenário I e Cenário II. Dessa forma, uma visão mais ampla e um maior entendimento sobre as modificações feitas entre os cenários será possível.

A Tabela 13 mostra as principais mudanças nas quantidades de injeções de carbono e oxigênio, além da quantidade de sucata Shredder adicionada na carga fria, nos Cenários I e II.

Tabela 13 – Valores médios da aciaria de oxigênio e carbono injetados no processo e quantidade média de sucata Shredder adicionada no carregamento do FEA.

Cenário		Oxigênio Injetado (Nm ³ /t)	Carbono Injetado (kg/t)	Sucata Shredder (kg/t)
I	Média	27,38	10,11	74,90
	σ	2,71	3,04	69,39
II	Média	20,20	7,83	215,86
	σ	1,96	2,20	45,12

Na Tabela 13 é observada uma redução de 26% nas injeções de oxigênio. O objetivo almejado nessa mudança foi o aumento do rendimento metálico do FEA, pois considerando os estudos de Nascimento, (2008) e Rojas *et al* (2013), o excesso de oxigênio injetado no FEA é o principal responsável pela queda no rendimento metálico.

Houve uma redução da quantidade de carbono injetado de apenas 10% em média nos resultados gerais da usina. Por mais que uma injetora de carbono tenha sido desligada, como descrito na metodologia capítulo 4.1, a outra injetora compensava as injeções de carbono, esse fato será melhor evidenciado nas análises de injeções dos padrões C e E.

Outra mudança significativa, observada na Tabela 13, foi o aumento do uso da sucata Shredder no processo para todos os padrões. Devido à viabilidade técnica e econômica de substituir a sucata mista-tesourada⁴ por sucata Shredder na Usina de

⁴ Sucata de obsolescência processada via prensa-tesoura.

estudo, o consumo de sucata Shredder aumentou em média 2,9 vezes. Como descrito no capítulo 3.1.2, a composição química da sucata Shredder fica limitada a valores mais estáveis, se comparado ao processo de prensa tesoura, por exemplo. Sendo uma sucata de composição química mais homogênea, se carregada em maiores quantidades no FEA torna o processo mais controlado e previsível.

A Tabela 14 mostra o aumento do rendimento metálico para os dois cenários, envolvendo todos os padrões produzidos.

Tabela 14 – Valores médios de rendimento metálico do FEA, com base no aço líquido para os dois cenários.

Cenário		Rendimento
I	Média	90,85%
	σ	2,17%
II	Média	92,73%
	σ	2,15%

O aumento do rendimento metálico, comparando os dois cenários, foi de 1,88%. Esse aumento foi significativo estatisticamente segundo ‘Análise de Fator Único’ no Apêndice B, Tabela 26. Todos os fatores citados, até o momento, como aumento de MgO na escória, redução do oxigênio injetado, uso de sucata Shredder, influenciam no aumento da estabilidade do FEA, com isso podendo influenciar diretamente no aumento do rendimento metálico. Os próximos capítulos continuam tratando apenas dos padrões C e E, para análises mais específicas.

5.3.2 Rendimento Metálico para os Padrões C e E

O aumento do rendimento metálico implica em diminuir a quantidade da carga metálica carregada e manter a mesma quantidade de aço vazado. O capítulo 4.2.1 fundamenta a forma em que o rendimento metálico foi calculado neste estudo. A Tabela 15 apresenta os resultados médios de rendimento metálico no FEA para os Cenários I e II, padrões C e E.

Tabela 15 – Médias de Rendimento Metálico (%) para os padrões C e E em ambos os cenários.

Padrão	Cenário		Rendimento
C	I	Média	89,55
		σ	1,23
	II	Média	93,14
		σ	2,35
E	I	Média	90,77
		σ	1,00
	II	Média	92,99
		σ	1,52

A Tabela 15 evidencia um aumento do rendimento metálico do FEA para os dois padrões de carga, esse aumento foi significativo estatisticamente segundo ‘Análise de Fator Único’ no Apêndice B, Tabelas 27 e 28. O rendimento metálico do padrão C aumentou 3,59% em relação ao Cenário I, enquanto o padrão E aumentou 2,22%. TORRES *et al*, (2013), afirmam em seu estudo, citado no capítulo 3.5, que um aumento de 1% no rendimento metálico, significa reduzir US\$ 3 a US\$ 4 do custo de aço por tonelada produzida.

A Tabela 16 apresenta a quantidade de ferro em quilogramas para cada teor de FeO da escória.

Tabela 16 – Médias de FeO (% em massa) e quantidades de ferro perdido para escória (kg) para cada padrão de carga, em ambos os cenários.

Padrão	Cenário		FeO	Fe na Escória
C	I	Média	30,97	1416,34
		σ	5,57	437,78
	II	Média	31,57	1222,05
		σ	4,56	302,55
E	I	Média	31,92	1500,10
		σ	4,62	337,18
	II	Média	29,68	1136,83
		σ	3,87	250,64

A Tabela 16 apresenta um aumento da porcentagem em massa do teor de FeO para o padrão C, porém devido a redução da massa de escória, já mencionada no 5.2, Tabela 6, a perda de ferro pela escória foi reduzida. Portanto é importante estudar a quantidade dos elementos em massa, não apenas em porcentagem. No padrão E nota-se uma redução tanto na porcentagem de FeO, quanto na quantidade de ferro em quilogramas. A redução de ferro perdido para o padrão E entre os dois cenários foi mais eficiente comparado com o padrão C, pois reduzindo a porcentagem em massa de FeO a redução da quantidade de ferro perdido do padrão E foi 1,87 vezes maior do que o padrão C. Isso pode ter ocorrido pelo fato de que, para o padrão C, o aumento do rendimento metálico se deu por outros fatores, como o aumento da sucata Shredder, por exemplo. Já para o padrão E o rendimento metálico aumentou pela maior redução do ferro da escória para o banho metálico, como evidenciado nos resultados da Tabela 16.

As Figuras 70 e 71 mostram a relação entre o ferro perdido pela escória e o rendimento metálico do FEA, para os dois padrões de carga, em ambos os cenários.

Figura 70 – Relação entre o ferro perdido pela escória e o rendimento metálico do FEA para o padrão C, nos cenários I e II.

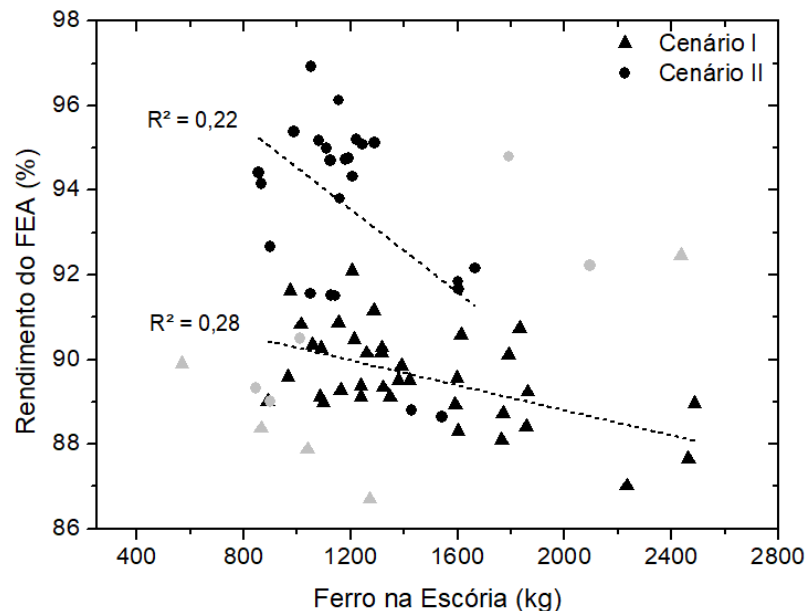
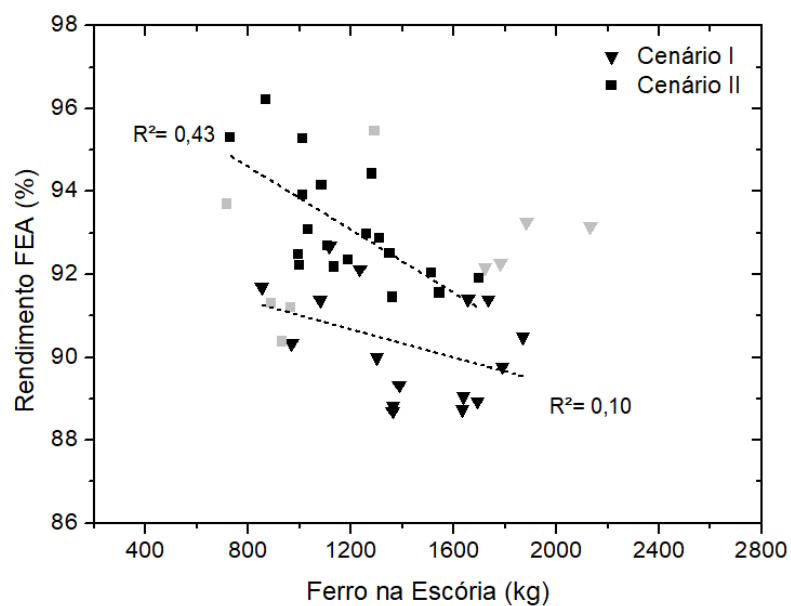


Figura 71 - Relação entre o ferro perdido pela escória e o rendimento metálico do FEA para o padrão E, nos cenários I e II.



Apesar dos filtros aplicados para diminuir os ruídos, as relações para os dois padrões foram baixas, mas mostram uma tendência linear de que, quanto maior o ferro perdido pela escória, menor o rendimento do FEA. Segundo Torres *et al* (2013), todas as variáveis que conduzem à redução do óxido de ferro produzido na escória são fatores que controlam o rendimento metálico. Alguns desses fatores serão discutidos nos capítulos seguintes.

5.3.2.1 Aumento da Sucata Shredder nos Padrões C e E

O aumento da sucata Shredder para os dois padrões de carga analisados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores médios de carregamento de Sucata Shredder em kg/t para os dois padrões de carga C e E, em ambos cenários.

Padrão	Cenário		Shredder
C	I	Média	126,65
		σ	66,68
	II	Média	245,63
		σ	37,7
E	I	Média	90,58
		σ	57,06
	II	Média	182,80
		σ	49,88

No Cenário II, o carregamento de sucata Shredder foi duas vezes maior para ambos os padrões. Além disso, nota-se uma redução no desvio padrão nos valores de carregamento, resultando em uma maior homogeneidade entre as corridas.

Com o objetivo de avaliar a influência do aumento de carregamento da sucata Shredder para o processo, foram analisadas as composições químicas das amostras de aço das corridas de ambos os padrões. A Tabela 18 apresenta os valores de elementos residuais no aço, para os padrões C e E, nos Cenários I e II.

Tabela 18 – Elementos residuais presentes nas amostras de aço (% em massa), para os padrões C e E em ambos os cenários.

Padrão	Cenário		Cu	Sn	Ni	Mo
C	I	Média	0,233	0,0128	0,0881	0,0196
		σ	0,04	0,0018	0,0309	0,0043
	II	Média	0,208	0,0131	0,1044	0,0309
		σ	0,026	0,0011	0,0310	0,0051
E	I	Média	0,259	0,0136	0,1158	0,0325
		σ	0,038	0,0020	0,0602	0,0069
	II	Média	0,209	0,0128	0,0840	0,0276
		σ	0,028	0,0011	0,0148	0,0073

Na Tabela 18, para o padrão C, nota-se uma redução apenas no teor de cobre no aço. Para o padrão E, o aumento do carregamento da sucata Shredder mostrou maior eficiência na redução de elementos residuais, pois houve a queda do teor de todos na composição química do aço, com exceção do teor de estanho, que se manteve em média. Além disso, os desvios padrões também foram reduzidos, mostrando que existe uma maior homogeneidade na composição química entre as corridas. A variação das médias foi avaliada estatisticamente e a 'Análise de Fator Único' do Apêndice B, Tabelas 31 a 38 mostram os resultados.

Os elementos residuais considerados na Tabela 18 não são oxidáveis nas condições de produção do FEA e se incorporam ao aço durante o processo. A única maneira de reduzir o teor desses elementos no aço é controlando a qualidade da sucata carregada no FEA. Como discutido no capítulo 3.1.2, a Sucata Shredder tem uma composição química mais homogênea, devido seu processamento (NASCIMENTO, 2008). O controle dos elementos residuais é importante por afetarem as propriedades mecânicas do produto final, comprometendo a sua qualidade.

5.3.2.2 Injeções de Carbono e Oxigênio

No capítulo 3.5.2 foi abordado como as injeções de oxigênio e carbono influenciam no rendimento metálico do FEA. Conforme Pfeifer *et al* (2011), o perfil de injeções dependerá da quantidade de energia elétrica utilizada no processo de fusão e refino, qualidade da sucata, entre outros fatores. O objetivo da aciaria foi aumentar o rendimento metálico do FEA, diminuindo a formação de óxido de ferro na escória. A Tabela 19 traz as informações da Tabela 9 de injeções de oxigênio, além das informações de injeção de carbono no FEA.

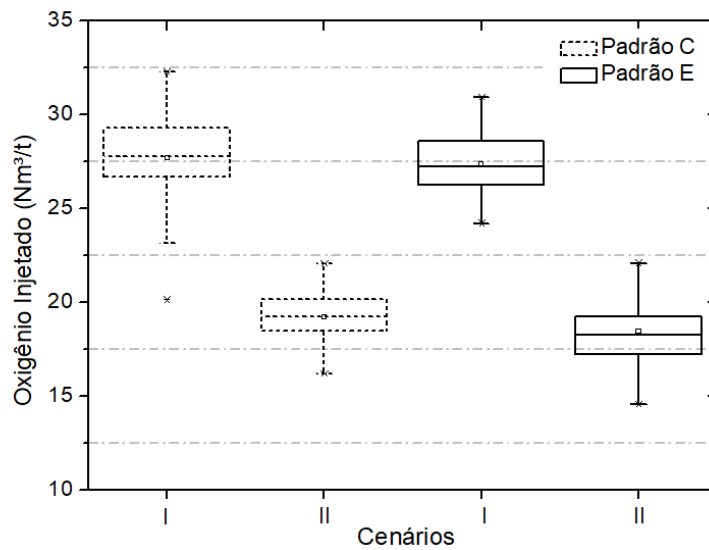
Tabela 19 – Valores médios de injeção de oxigênio em Nm³/t de aço vazado e carbono em kg/t de aço vazado, nas corridas nos padrões C e E, Cenários I e II.

Padrão	Cenário		Oxigênio	Carbono
C	I	Média	27,67	9,32
		σ	2,46	2,70
	II	Média	19,18	8,28
		σ	1,36	1,82
E	I	Média	27,34	7,96
		σ	1,77	3,23
	II	Média	18,42	9,09
		σ	1,64	1,81

Como já discutido anteriormente, houve uma redução significativa nas injeções de oxigênio, em relação aos valores do Cenário I para os dois padrões, cerca de 30%. No entanto as injeções de carbono durante o processo, mantiveram os seus valores nos dois cenários e padrões; a ‘Análise de Fator Único’ do Apêndice B, Tabelas 29 e 30 mostram a diferença não significativa estatisticamente, entre os dois cenários. As injeções de carbono no processo ocorrem apenas na etapa de refino do aço, pois são responsáveis pelas reações de redução do ferro na escória, segundo equação 4, além de proporcionar a espumação da escória.

O controle das práticas de injeção é de suma importância para o desempenho do FEA, pois existe uma razão global entre oxigênio e carbono para uma maior eficiência na redução do FeO da escória. Essa razão será discutida na Figura 77. As Figuras 72 e 73 mostram as distribuições das injeções durante o processo, nas corridas dos padrões C e E, Cenários I e II.

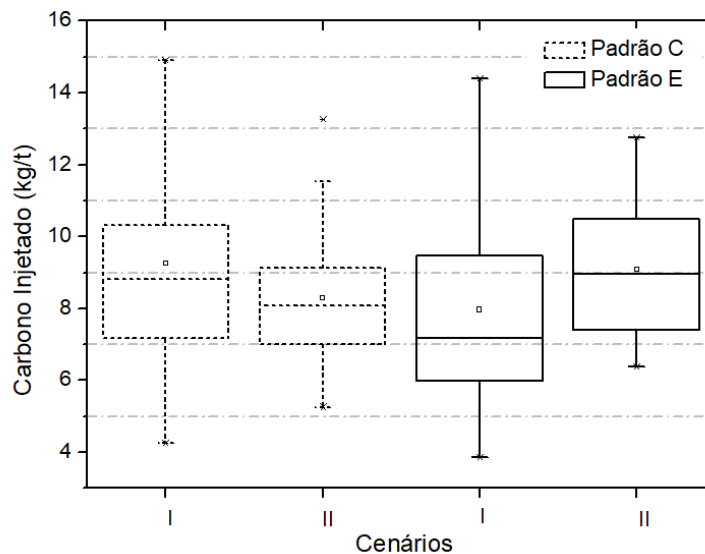
Figura 72 – Distribuição dos valores de oxigênio injetados do FEA, em Nm³/t de aço vazado, durante o processo para aos padrões C e E, em ambos os cenários.



Em relação à Figura 72, nota-se a redução das injeções de oxigênio para os dois padrões. O padrão C apresenta uma maior estabilidade nas injeções para o Cenário II, pois a faixa de injeções está mais reduzida. O contrário ocorre para o Padrão E, apesar da redução das médias de injeções entre as corridas, há um aumento da faixa de injeções de oxigênio.

A Figura 73 mostra as distribuições de injeções de carbono para os padrões C e E nos Cenários I e II.

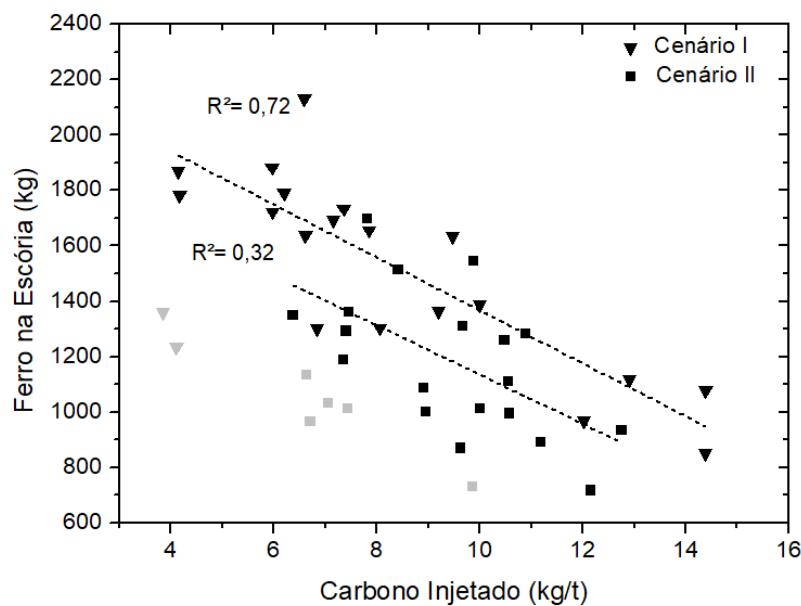
Figura 73 - Distribuição dos valores de carbono injetados do FEA, em kg/t de aço vazado, durante o processo para aos padrões C e E, em ambos os cenários.



A Figura 73 mostra que, no Cenário II, não houve mudança nas médias de injeção de carbono, porém houve uma maior estabilidade nas injeções para ambos os padrões, pois a faixa de injeções foi reduzida, proporcionando uma maior homogeneidade para os valores de injeção.

A Figura 74 mostra a relação entre as quantidades de carbono e os teores de ferro na escória para as corridas do padrão E.

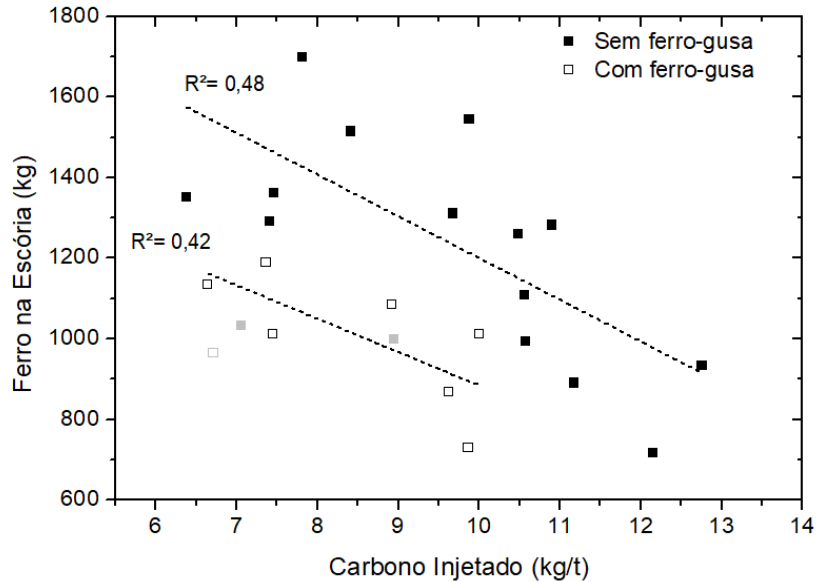
Figura 74 – Relação entre os valores de injeção de carbono para cada corrida e as amostras de teores de ferro em quilogramas na escória para o padrão E, nos dois cenários.



A Figura 74 apresenta uma relação inversamente proporcional entre a quantidade de carbono injetada durante o refino e o ferro presente na escória. Quanto maior a quantidade de carbono menor o teor de ferro na escória. Oltmann e Pretorius (2002) mostram que com o aumento da taxa de injeção de carbono em determinados instantes do refino, há uma redução de aproximadamente 10% do teor de FeO na escória. Na zona de descarburção, o excesso de oxigênio formará o FeO que na escória será reduzido pelo carbono injetado mantendo o teor de FeO sob controle na escória. Ressaltando que o importante não é uma injeção de carbono descontrolada e excessiva, e sim avaliar os momentos que deve ser injetado e o quanto do carbono injetado está reagindo efetivamente com o FeO. Para o Cenário II houve uma relação baixa, pois das 24 corridas analisadas, oito possuíam ferro-gusa no carregamento,

alterando o valor global de carbono em cada corrida. A Figura 75 apresenta a influência do ferro-gusa no carregamento, para o padrão E.

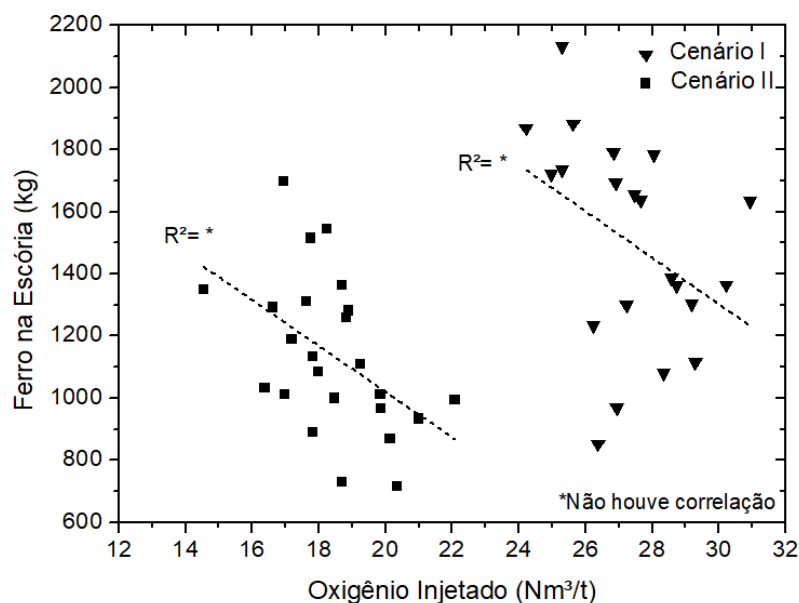
Figura 75 – Influência do ferro-gusa no carregamento para as corridas do padrão E.



Apesar do baixo número de corridas com ferro-gusa no carregamento, a Figura 75 mostra que essas corridas apresentaram um teor menor de ferro na escória. Esse fato condiz com o estudo de Conejo e López (2002) que afirmam que devido ao desequilíbrio termodinâmico no FEA, é necessário um excesso de carbono na carga metálica, para um menor teor de FeO na escória. Além disso, o uso controlado de ferro-gusa garante uma melhor distribuição de carbono na carga fria.

A Figura 76 mostra as relações entre as injeções de oxigênio e o teor de ferro na escória para o padrão E.

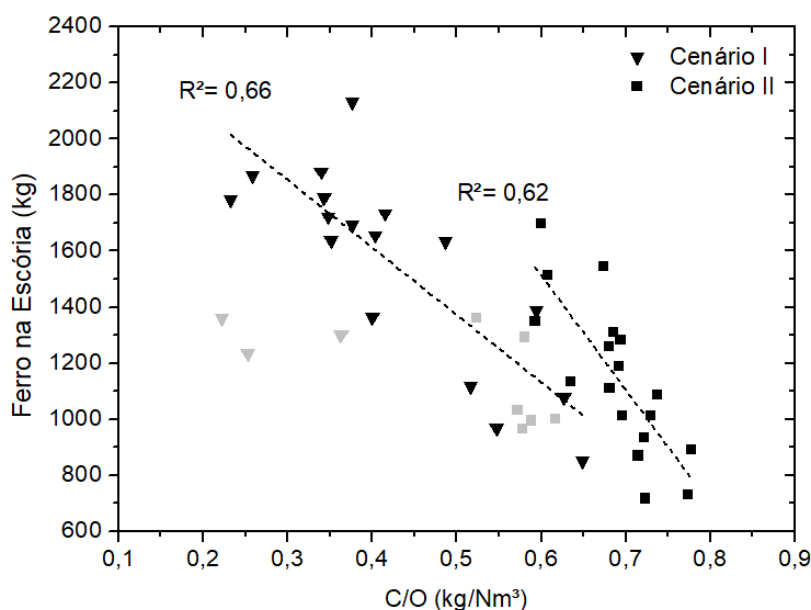
Figura 76 – Relação entre as injeções de oxigênio e o teor de ferro na escória para o padrão E.



Segundo a Figura 76 não há uma relação entre os valores de injeção de oxigênio e ferro perdido na escória. Ao contrário dos estudos feitos por Nascimento (2008) e Rojas *et al* (2013) que mostram uma relação diretamente proporcional entre os dados, de que quanto maior o teor de oxigênio injetado no FEA, maior será o ferro perdido na escória. No entanto, o balanço entre carbono e oxigênio no processo se faz importante segundo Oltmann e Pretorius (2002) e Conejo e López (1997), pois a perda de rendimento metálico não depende apenas dos fatores termodinâmicos, mas também dos fatores cinéticos e de parâmetros do processo.

A Figura 77 mostra a relação entre a razão entre as quantidades globais de carbono (carregamento metálico + injeções) e oxigênio (injeções) e o ferro perdido pela escória para o padrão E.

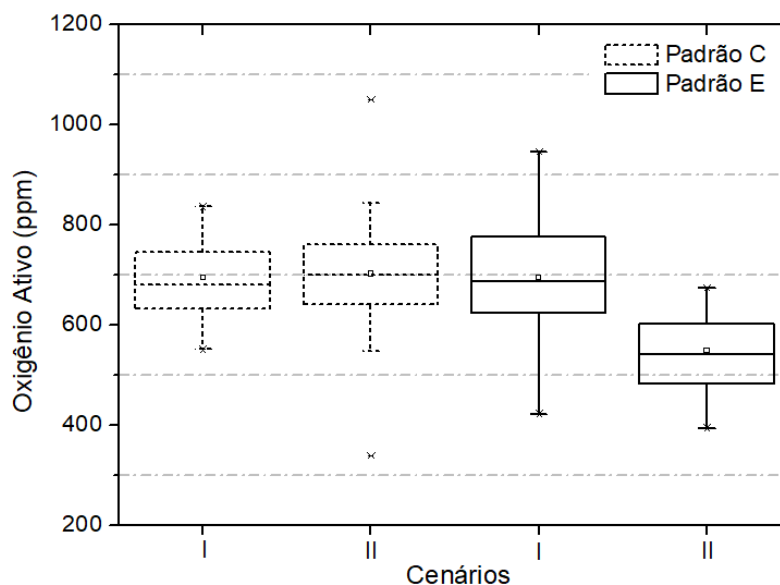
Figura 77 – Relação entre a razão entre as quantidades globais de carbono e oxigênio (C/O) de cada corrida e o teor de ferro na escória para o padrão E, Cenários I e II.



Nota-se na Figura 77 que, quanto maior a razão entre carbono e oxigênio totais do processo, menor a perda de ferro para a escória. Conejo e López (1997) indicam que por estequiometria o equilíbrio O/C se alcança próximo de 1,33 ($C/O = 0,75$). Nota-se que na Figura 77 os valores de maior razão C/O e menor perda de ferro para escória se encontram no Cenário II. Os valores de razão C/O para o menor ferro perdido para escória estão próximos de 0,75. No entanto, valores de razão C/O maiores que 0,8 não ocorreram neste estudo, não podendo ser verificada a influência de valores excessivos de carbono, ou valores muito reduzidos de oxigênio. Oltmann e Pretorius (2002) afirmam que uma razão próxima ao equilíbrio pode resultar em uma baixa cinética das reações devido à falta de homogeneidade térmica e química do banho, atrasando o processo. Então uma redução das injeções de oxigênio pode diminuir a velocidade das reações, devido à perda de agitação do banho.

Para as relações das Figuras 74, 76 e 77, o padrão C não apresentou relação, e uma análise mais aprofundada desse padrão deve ser realizada para entendimento, pois os dados possuem características de injeção e faixas de composição química semelhantes ao padrão E. Por outro lado, a análise do oxigênio ativo para a última amostragem apresentou diferenças significativas entre os dois padrões, conforme Figura 78.

Figura 78 – Distribuição do oxigênio ativo para os padrões C e E, em ambos os cenários.



A Figura 78 mostra que, para o padrão E no Cenário I o oxigênio ativo estava dentro de uma faixa de 400 – 1000 ppm. Já no Cenário II essa faixa é reduzida de 400 – 600 ppm. Enquanto que para o padrão C, as faixas para os dois cenários são de 500 – 800 ppm. Mostrando que as corridas pertencentes ao padrão E no Cenário I eram extremamente instáveis em relação à oxidação final, melhorando a estabilidade para o Cenário II.

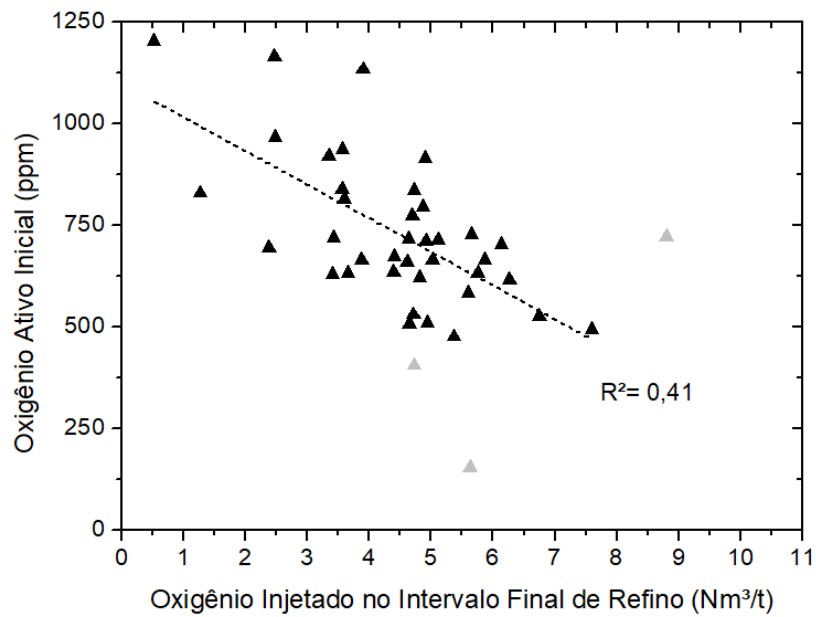
Os gráficos referentes ao padrão C que não possuem relação podem ser vistos no Apêndice C, Figuras 97, 98 e 99.

5.3.2.3 Estabilidade das Injeções

Dehkordi, Moallem e Parsapoor (2011) comentam que as operações de refino muitas vezes são avaliadas por um operador do FEA através dos aspectos visuais da escória. Não apenas isso, mas conforme os resultados das amostragens que são feitas durante o refino algumas atitudes vão sendo tomadas em relação às injeções.

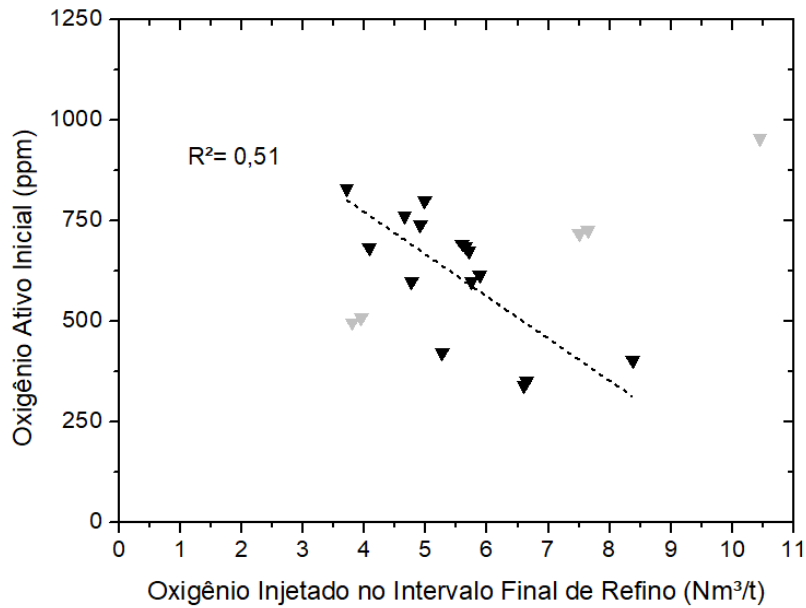
A Figura 79 mostra a relação entre o oxigênio injetado no intervalo final e o oxigênio ativo da primeira amostragem realizada durante o refino, conforme capítulo 4.3.3 para o Cenário I.

Figura 79 – Relação entre o oxigênio injetado no intervalo final de refino e o oxigênio ativo da primeira amostragem realizada para o padrão C para o Cenário I.



Conforme a Figura 79, quanto maior o oxigênio ativo da amostra inicial, menor o oxigênio injetado no final do refino. Isso ressalta a ideia de que depois da análise do oxigênio ativo inicial, dependendo do resultado, o operador toma a devida atitude em relação às injeções de oxigênio para manter o nível de oxidação do forno baixo, para evitar maior formação de FeO na escória. Esse comportamento ocorre de igual forma para o padrão E, Figura 80.

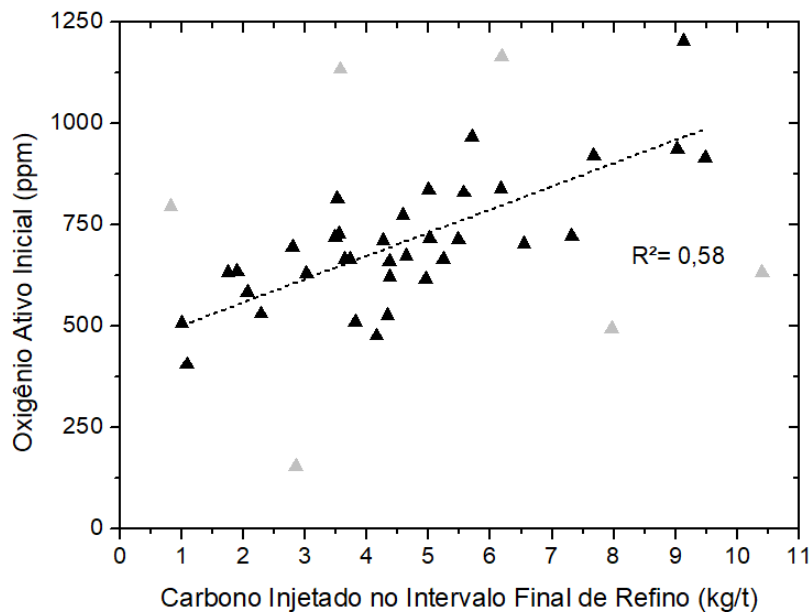
Figura 80 - Relação entre o oxigênio injetado no intervalo final de refino e o oxigênio ativo da primeira amostragem realizada para o padrão E para o Cenário I.



Nota-se que o padrão E a relação encontrada é maior, devido à menor faixa de oxidação inicial encontrada nas amostras.

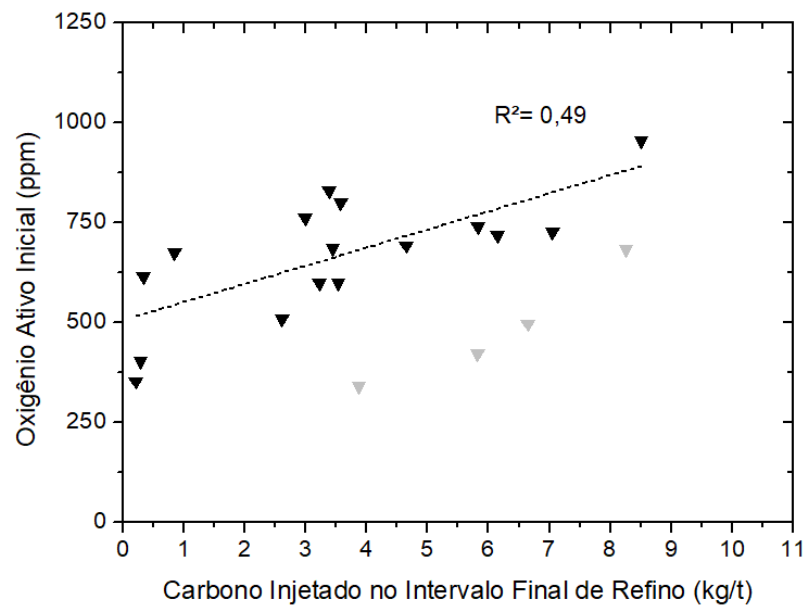
A Figura 81 mostra o comportamento das injeções de carbono, conforme a oxidação inicial do banho metálico para o padrão C para o Cenário I.

Figura 81 – Relação entre o carbono injetado no intervalo final de refino e o oxigênio ativo da primeira amostragem realizada para o padrão C.



A Figura 81 mostra que o procedimento em relação ao carbono injetado é contrário ao oxigênio, pois quanto maior o nível de oxidação do banho metálico, maior a injeção do carbono no intervalo final. Isso ocorre para a redução do nível de oxidação, sendo que o carbono injetado reage com o oxigênio e forma bolhas de CO, conforme equação 7. A Figura 82 apresenta a relação para o padrão E.

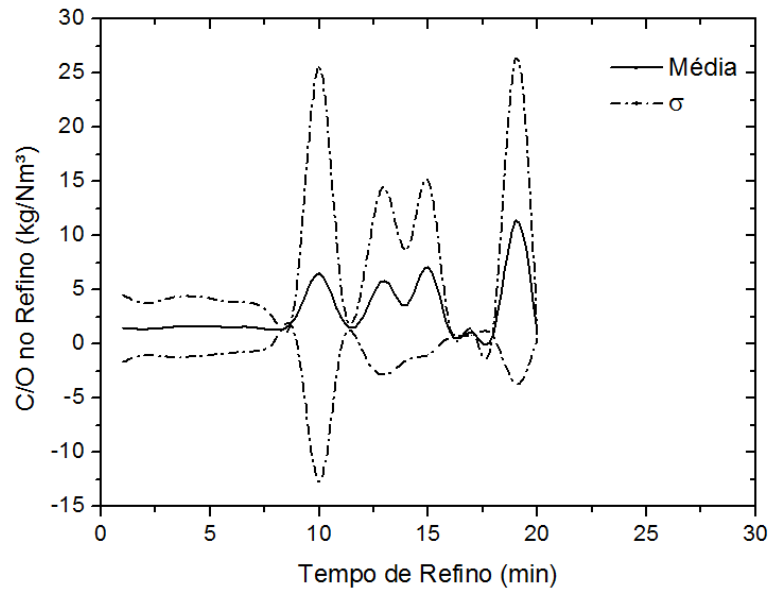
Figura 82 - Relação entre o carbono injetado no intervalo final de refino e o oxigênio ativo da primeira amostragem realizada para o padrão E.



A mesma tendência é vista na Figura 82, de que quanto maior o oxigênio ativo da primeira amostragem maior a injeção de carbono no final do refino.

Para uma visão geral do comportamento das injeções no Cenário I, analisou-se a razão C/O acumulada durante o refino. Conforme Figuras 83 e 84.

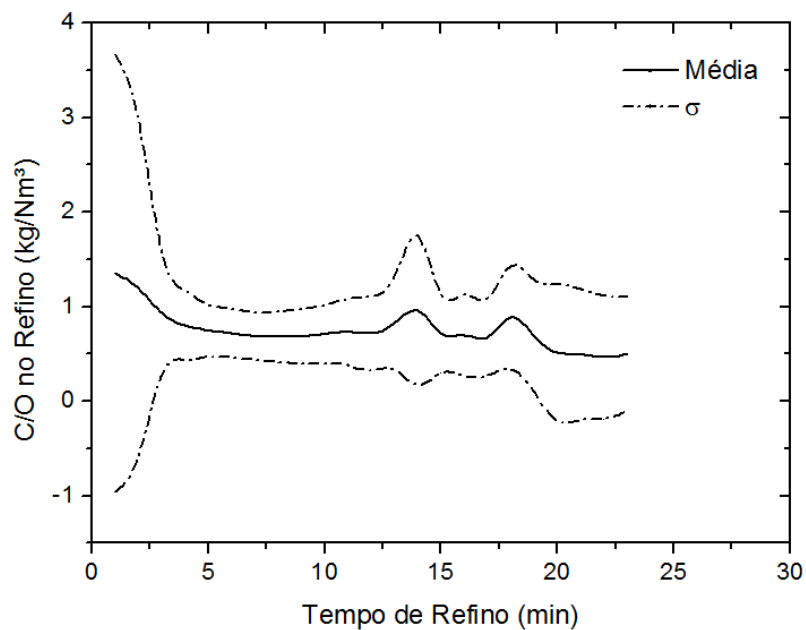
Figura 83 – Razão entre o carbono e oxigênio injetados ao longo do refino para o Cenário I, padrão C.



O cálculo da razão C/O acumulada, descrita no capítulo 4.3.9, levou em consideração as quantidades de carbono e oxigênio injetados em cada minuto de refino. Nota-se que para o padrão C, no Cenário I, os valores de C/O são altos, e há uma certa instabilidade no processo, como mostra o comportamento das curvas e altos desvios padrões.

A Figura 84 apresenta a curva da razão C/O para o padrão E.

Figura 84 - Razão entre o carbono e oxigênio injetados ao longo do refino para o Cenário I, padrão E.



Nota-se que os valores da razão C/O para o padrão E possui valores mais baixos, mas também possui picos, que representam instabilidade entre as injeções.

Para comparação das mudanças das injeções entre os Cenários I e II, gráficos de distribuição das injeções de oxigênio e carbono foram desenvolvidos. As Figuras 85 e 86 apresentam as distribuições para o intervalo inicial, para ambos os padrões.

Figura 85 – Distribuição das injeções de oxigênio no intervalo inicial de refino, para os padrões C e E.

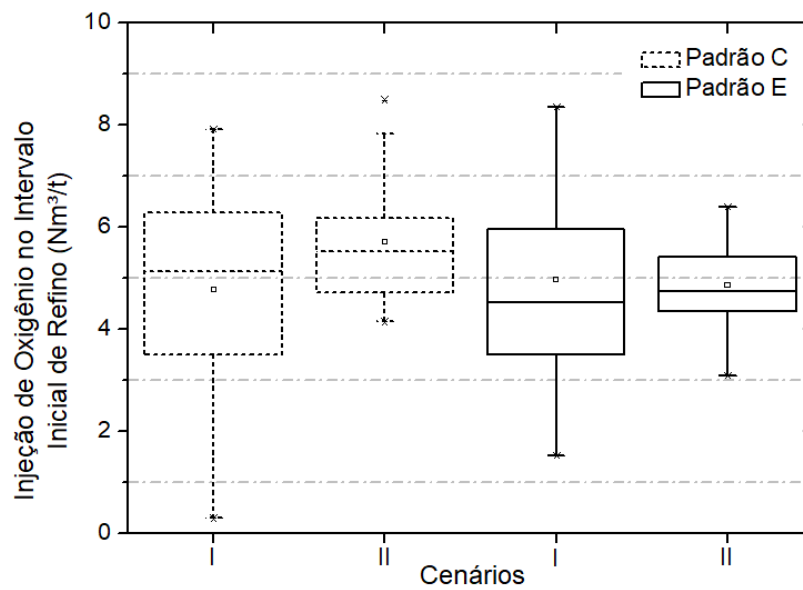
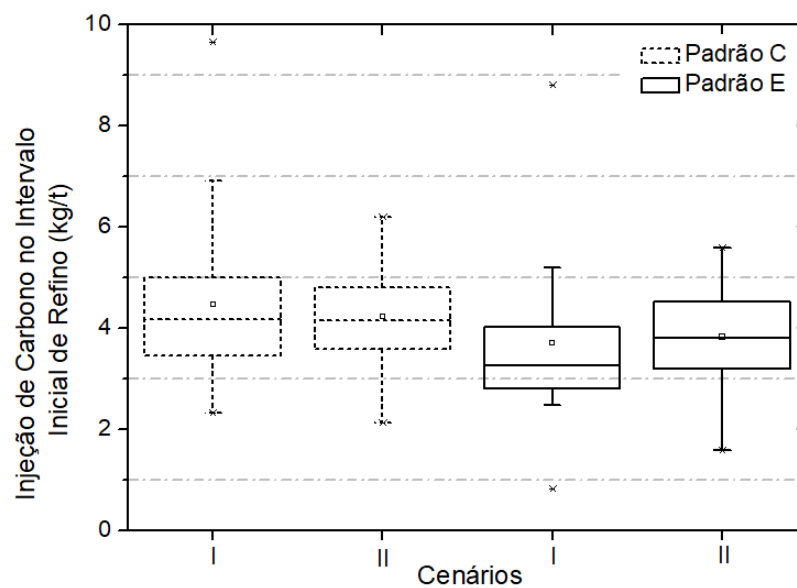


Figura 86 - Distribuição das injeções de carbono no intervalo inicial de refino, para os padrões C e E.



Para o intervalo inicial, segundo as Figura 85, nota-se uma redução na distribuição dos dados de injeções de oxigênio para ambos os padrões no Cenário II, mostrando que a estabilidade no intervalo inicial de refino aumentou. As injeções de carbono, no intervalo inicial, se mantiveram, segundo a Figura 86.

A Figura 87 apresenta as distribuições das injeções de carbono e oxigênio para o intervalo final de refino.

Figura 87 - Distribuição das injeções de oxigênio no intervalo final de refino, para os padrões C e E.

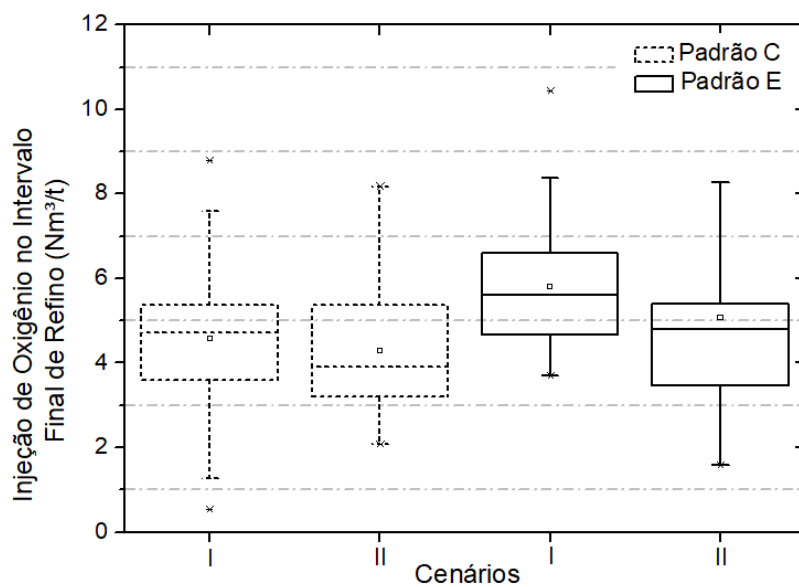
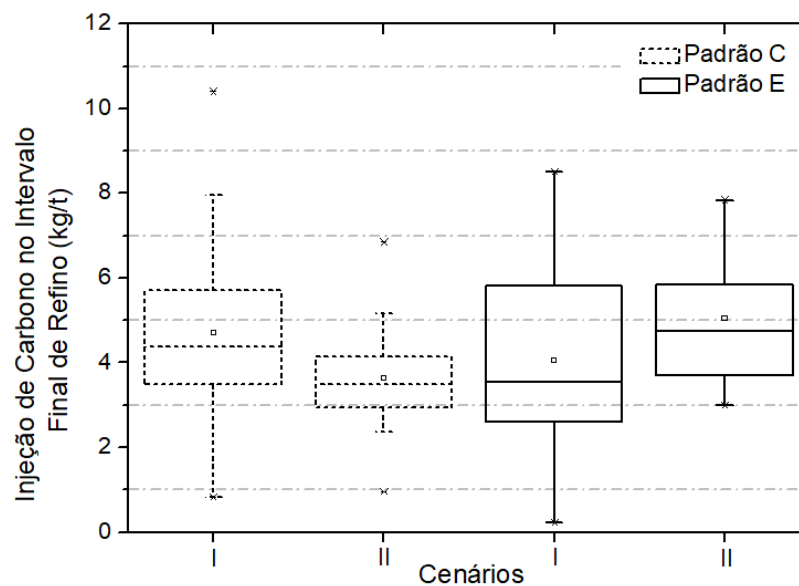


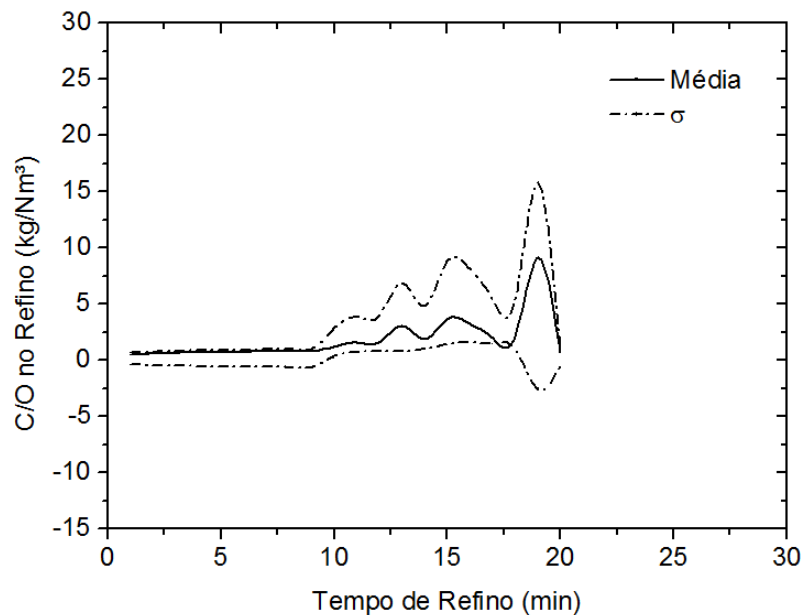
Figura 88 - Distribuição das injeções de carbono no intervalo final de refino, para os padrões C e E.



Em relação ao intervalo final de refino, Figuras 87 e 88, a prática de injeções foi melhor ajustada para o carbono. Observando a Figura 88, nota-se que as faixas de injeções de carbono reduziram para ambos os padrões no Cenário II. Já para injeção de oxigênio no intervalo final, as distribuições aumentaram para o Cenário II, mostrando que um melhor ajuste deve ser implementado.

A Figura 89 mostra a curva da razão C/O para o padrão C durante o refino no Cenário II, após as mudanças nas injeções.

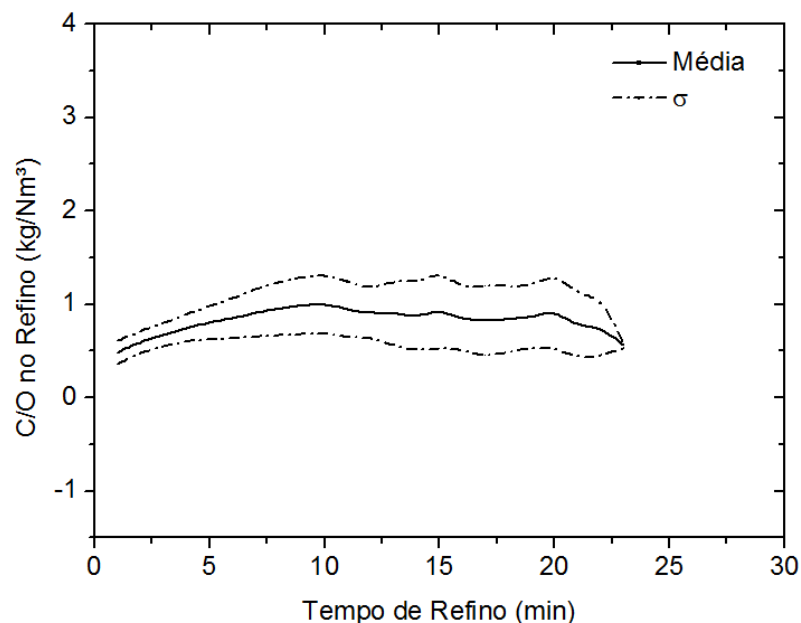
Figura 89 - Razão entre o carbono e oxigênio injetados ao longo do refino para o Cenário II, padrão C.



Comparando a Figura 89 com a Figura 83, nota-se uma grande redução nas razões entre C/O. Os picos ao final do refino são explicados pelo aumento da distribuição nas injeções de oxigênio, mas ainda assim, houve uma maior estabilidade nas injeções para o Cenário II.

A Figura 90 mostra o comportamento da razão C/O para o Cenário II, padrão E.

Figura 90 - Razão entre o carbono e oxigênio injetados ao longo do refino para o Cenário II, padrão E.



Para o padrão E a estabilidade da razão C/O, apresentada na curva da Figura 90, mostra um maior ajuste nas injeções para o Cenário II, se comparada com a Figura 84. Além disso, os valores de razão C/O estão entre 0,5 e 1,0 o que condiz com a literatura, onde os valores ideais entre a razão C/O são próximos de 0,75. Para otimizar o rendimento metálico, reduzindo o FeO da escória é preciso que práticas de sejam mais eficazes, utilizando o carbono em formas mais reativas e reduzindo as injeções de oxigênio em momentos adequados do processo de fusão e refino (MATSUURA *et al*, 2008).

6 CONCLUSÕES

Para o estudo comparativo entre os dois cenários distintos em um forno elétrico a arco, pode-se concluir o seguinte:

- A quantidade de escória diminuiu em média 18,7%, para ambos os padrões;
- A média da basicidade binária do padrão C diminuiu de 2,5 para 2,1, enquanto que para o padrão E se manteve em 2,2 para ambos os cenários;
- A quantidade de CaO da escória foi reduzida para ambos os padrões em média 500 quilogramas, enquanto a quantidade de MgO aumentou em média 100 quilogramas;
- Para o Cenário I, padrão C, apenas 37% das corridas se posicionaram acima da linha de saturação nos diagramas ISD's, enquanto que no Cenário II, 86% das corridas do padrão C se posicionaram acima da linha de saturação. O Cenário II obteve um melhor resultado de saturação de MgO para o padrão C.
- Para o Cenário I, padrão E, apenas 12% das corridas se posicionaram acima da linha de saturação nos diagramas ISD's, enquanto que no Cenário II, 88% das corridas do padrão E se posicionaram acima da linha de saturação. O Cenário II obteve um melhor resultado de saturação de MgO para o padrão E.
- O teor de fósforo do aço mostrou-se dependente da basicidade binária, com uma relação inversamente proporcional. Houve um aumento do teor de fósforo médio no aço no Cenário II para os padrões C e E de 25 e 22%, respectivamente;
- A quantidade de carbono do aço mostrou-se dependente da primeira amostra de oxigênio ativo retirada do FEA, quanto maior o oxigênio ativo inicial menor a quantidade de carbono do aço;
- Para o padrão C não houve um aumento de energia elétrica consumida, do contrário, o padrão E apresentou um aumento médio de 10kWh/t;
- O rendimento metálico aumentou em média para ambos os padrões C e E, 3,59 e 2,2% respectivamente. Apesar disso, a redução do ferro perdido pela escória para o padrão E foi 1,87 vezes maior do que a redução do padrão C.
- O rendimento metálico mostrou-se inversamente proporcional ao ferro perdido pela escória em ambos os padrões;
- O teor médio de cobre no aço em ambos os padrões reduziu significativamente;

- Quanto maior o carbono injetado no refino, menor a quantidade de ferro perdido pela escória para o padrão C;
- Corridas do padrão C com ferro-gusa no carregamento apresentaram quantidade de ferro na escória em média 200 quilogramas menor para uma mesma quantidade de carbono injetado;
- Quanto maior a razão global C/O menor o ferro perdido para a escória no padrão C, sendo o valor mínimo localizado na razão 0,75;
- Houve uma queda do oxigênio ativo para o padrão E em média de 100 ppm. Para o padrão C as médias se mantiveram iguais;
- Os gráficos de razão C/O acumulados durante o refino foram eficientes para demonstrar uma maior estabilidade das injeções no refino do FEA.

O trabalho desenvolvido alcançou os objetivos propostos, comparando os cenários distintos e apresentando os impactos das mudanças no processo na qualidade do aço, escória, consumo de energia elétrica e estabilidade das injeções.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento, deste trabalho percebeu-se que alguns parâmetros devem ser estudados mais detalhadamente no FEA. Para um maior entendimento do processo, sugerem-se as seguintes ideias para trabalhos futuros:

- (1) Analisar o impacto da densidade da sucata adicionada no carregamento no rendimento metálico do FEA;
- (2) Avaliar a quantidade de carbono presente na escória não beneficiada, para avaliar a eficiência das injetoras de carbono;
- (3) Avaliar o ferro perdido para a escória em forma de gotículas de aço;
- (4) Avaliar o impacto da granulometria do carbono injetado no FEA;
- (5) Avaliar distorção de harmônicas do circuito elétrico para os distintos cenários;
- (6) Estimar altura de escória e investigar correlação com a distorção das harmônicas;

8 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Rodolfo Arnaldo Montecinos *et al.* Slag Foaming Fundamentals - A Critical Assessment. **Materials Research**, <<http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0059F>>.

ALVES, Pedro Cunha. **Análise do Rendimento Metálico do FEA Devido ao Uso do Sistema de Despoeiramento do Shredder**. 2016. 48 f. Trabalho de Diplomação (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Metalurgia. Porto Alegre, 2016.

ARAUJO, Luiz Antônio. **Manual de Siderurgia**. São Paulo: Arte e Ciência, v. 1, 2008.

BAGATINI, Maurício Covcevich *et al.* Characterization and Reduction Behavior of Mill Scale. **ISIJ International**, v. 51, N. 7, p. 1072–1079, 2011.

BARRA, M.; RAMONICH, E. V.; MUNOZ, M. A. Stabilization of Soils with Steel Slag and Cement for Application in Rural and Low Traffic Roads. In: PROCEEDINGS OF THE BENEFICIAL USE OF RECYCLED MATERIALS IN TRANSPORTATION APPLICATION, RMCR UNIVERSITY OF DURHAM, Arlington, 2001, p. 423–432, 10 f.

BIELEFELDT, Wagner Viana. **Treinamento GERDAU: Fundamentos de Escórias**, 2012.

BIELEFELDT, Wagner Viana; VILELA, Antônio Cezar Faria; HECK, Nestor Cezar. Thermodynamic Evaluation of the Slag System CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃. In: CONGRESSO INTERNACIONAL ABM, 68, 2013, Belo Horizonte. 12 f.

BIELEFELDT, Wagner Viana *et al.* Investigation of Foaming Slag in Electric Arc Furnace. In: AISTECH, 2015, Cleveland. 13 f.

BOROVSKY, T.; KIJAC, J.; DOMOVEC, M. The Slag Composition Influence on the Dephosphorization and on the Lifetime of Electric Arc Furnace Hearth Refractory Lining. **Acta Metallurgica Slovaca**, v. 16, p. 165-171, 2010.

BOWMAN, B.; LEFRANK, P. A. Electric Furnace Steelmaking. In: FRUEHAN, R. J. (Ed.). **The Making, Shaping and Treating of Steel – Steelmaking and Refining Volume**. Pittsburgh: The AISE Steel Foundation, 1998, cap. 10, p. 624-625.

CAMPOS, Falconi Vicente. **Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido – Fundamentos**. Belo Horizonte, v. 1, cap. 5, p. 129-136, 1983.

CHEN, C.; ZHANG, L.; LEHMANN, J. Thermodynamic Modelling of Phosphorus in Steelmaking Slags. **High Temperature Materials and Processes**, v. 32, p. 237-246, 2013.

CONEJO, A. N.; LÓPEZ, F. Análisis del Grado de Oxidación de la Escoria, Balanceando los Insumos de Carbón y Oxígeno al Horno Eléctrico de Arco. *In: XIV ENCUENTRO NAC. SIDERÚRGICOS, 1997, México.*

CONEJO, A. N.; TORRES, R.; CUELLAR, E. Análisis Industrial de la Reducción del Óxido de Hierro Mediante la Inyección de Finos de Carbón al Horno Eléctrico de Arco. <<http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>>

CORBARI, R. *et al.* Foaming and the Rate of the Carbon-Iron Oxide Reaction in Slag. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 40, p. 940-948, 2009.

COSTA E SILVA, André Luiz Vasconcellos; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. São Paulo, 2006.

DEHKORDI, Berhzard Mirzaeian *et al.* Predicting Foaming Slag Quality in Electric Arc Furnace Using Power Quality Indices and Fuzzy Method. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 60, p. 3845–3852, 2011.

FERREIRA, Felipe Buboltz *et al.* Caracterização e Avaliação da Redução Carbotérmica via Termogravimetria de Pó de Aciaria Elétrica. In: TÊC. AO 45º SEMIN. REDUÇÃO MINÉRIO FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS 16º SIMPÓSIO BRAS. MINÉRIO FERRO E 3º SIMPÓSIO BRAS, 2015, Rio de Janeiro.

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. 27, p. 928-931, 2011.

HANK, Klaus; VANNDE, Marie Aline. Process modeling. In: SEETHARAMAN, Seshadri; MCLEAN, Alexander; GUTHRIE, Roderick; SRIDHAR, Seetharaman (Ed.). **Treatise on Process Metallurgy – Process Phenomena**, United Kingdom: Elsevier, 2014. v.2, cap. 5.4 p. 799-851.

JAMES, Bennett; KWONG, K. S. Thermodynamic Studies of MgO Saturated EAF Slag. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 37, 2010.

JOHN, Alexandre Libório. **Melhoria no Desempenho de Injetores Supersônicos em Operações em um Forno Elétrico a Arco**, 2009. 105 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2009.

JUNG, In-Ho; LEHMANN, Jean; JAK, Evgueni. Applications. In: SEETHARAMAN, Seshadri; MCLEAN, Alexander; GUTHRIE, Roderick; SRIDHAR, Seetharaman (Ed.). **Treatise on Process Metallurgy – Process Phenomena**, United Kingdom: Elsevier, 2014. v.2, cap. 5.3, p. 676-798.

LÚCIO, A. **Físico Química Metalúrgica**. Belo Horizonte: UFMG, v. 2, 1981.

LUXAN, M. P. *et al.* Characteristics of the Slags Produced in the Fusion of Scrap Steel by Electric Arc Furnace. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 4, p. 517–519, 2000.

MADIAS, Jorge. Electric Furnace Steelmaking. In: SEETHARAMAN, Seshadri; MCLEAN, Alexander; GUTHRIE, Roderick; SRIDHAR, Seetharaman (Ed.). **Treatise on Process Metallurgy - Industrial Processes, parte A**, Elsevier. v. 3, cap 1.5, p. 271-300, 2014.

MANSO, J. M. et al. Durability of Concrete Made with EAF Slag as Aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 6, p. 528–534, 2006.

MATSUURA, Hiroyuki *et al.* Development of a Decarburization and Slag Formation Model for the Electric Arc Furnace. **ISIJ International**, v. 48, n.9, p. 1197-1205, 2008.

MINCU, Valentin; CONSTANTIN, Nicolae. Refining Steels Produced in Electric Arc Furnace. **UPB Scientific Bulletin, Series B**, v. 75, p. 109-116, 2013.

MORALES, D. R. *et al.* A Mathematical Model for the Reduction Kinetics of Iron Oxide in electric Furnace Slags by Graphite Injection. **ISIJ International**, v. 37, p. 1072-1080, 1997.

MOURÃO, Marcelo Breda *et al.* **Introdução à siderurgia**. 2ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

NASCIMENTO, C. C. **Modelamento do Rendimento Metálico em Fornos Elétricos a Arco**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal Fluminense. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Rio de Janeiro, 2008.

NETTO, Mariana Boger *et al.* Estudo da Partição do Fósforo de Escórias de um Forno Elétrico a Arco através da Termodinâmica Computacional. In: CONGRESSO INTERNACIONAL ABM, 2016, Rio de Janeiro. 11 f.

PARSAPOOR, Amir; DEHKORDI, Berhzard Mirzaeian; MOALLEM, Mehdi. Predicting foaming Slag Quality in Electric Arc Furnace Using Power Quality Indices and ANFIS. **Conference Proceedings**, p. 861-866, 2010.

PELTON, Arthur D. Thermodynamics and Phase Diagrams of Materials. In: KORSTORZ G, ED. PHASE TRANSFORMATIONS IN MATERIALS, 2001, New York.

PFEIFER, H. et al. Improved EAF Process Control Using Online Offgas Analysis. OFFGAS – EUROPEAN COMMISSION, p.105-106, 2011.

PRETORIUS, Eugene B.; CARLISLE, Robert C. Foamy Slag Fundamentals and their Practical Application to Electric Furnace Steelmaking. In: PROCEEDINGS OF THE 16TH PROCESS TECHNOLOGY CONFERENCE, 1998, New Orleans.

PRETORIUS, Eugene; OLTMANN, H; JONES, J. EAF Fundamentals.

RIBEIRO, José Luis Duarte; CATEN, Carla Schwengber Ten. Projeto de experimentos. Porto Alegre: Série Monográfica Qualidade, 2014. 169 p.

RIBOLDI, João. Disponível em: <http://www.mat.ufrgs.br/~riboldi/anova_classificacao_simples_2006> Acesso em: 04 de maio de 2017.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2006, São Paulo, 102 f.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. Introdução aos Processos de Lingotamento dos Aços. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2006, São Paulo, 158 f.

ROJAS, Marlon *et al.* Impacto del Consumo de Cal, Coque, Oxígeno y Hrd en la Formación de Escoria Espumosa durante el Proceso de Aceración Primaria en Hornos de Arco Eléctrico. **Universidad, Ciencia y Tecnología**, v. 17 n. 68, 2013.

ROSSI, Daniel. **Influência da Proporção entre as Vazões de Oxigênio e Gás Natural do Sistema de Injeção na Eficiência Energética de um Forno Elétrico a Arco**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2014.

SASAKI, N et al. Improvement in Hot-Metal Dephosphorization. **Nippon Steel Technical Report**, v. 104, p. 26-32, 2013.

SEDIVY, C. H.; KRUMP, R. Tools for Foaming Slag Operation at EAF Steelmaking. **Arch. Metall. Mater**, v. 53, p. 1–5, 2008.

SHI, C. Steel Slag—its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 230–236, 2004.

SIMA, Aminorroaya Yamini; EDRIS, Hossein. The Effect of Foamy Slag in the Electric Arc Furnaces on Electric Energy Consumption. In: PROCEEDINGS OF 7TH EUROPEAN ELECTRIC STEELMAKING CONFERENCE, 2002, Venice, Italy, P. 2447-2456.

Tsakiridis. E. *et al* . Utilization of Steel Slag for Portland Cement Clinker Production. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 805–811, 2008.

TORRES, R. G. *et al*. Analysis of Yield Losses in Steel Production in EAF of IMEXSA. 14TH IAS STEELMAKING CONFERENCE, 2003, Argentina.

Tossavainen, M. *et al*. Characteristics of Steel Slag Under Different Cooling Conditions. **Waste Management**, v. 27, n. 10, p. 1335–1344, 2007.

UNIVERSIDADE DE COIMBRA; Disponível em:
<<http://www.mat.uc.pt/~cmtm/ECwww/ANOVA>> Acesso em 04 de maio de 2017.

URBAN, Wolfgang; WEINBER, Matthias; CAPPEL, Jurgen. Dephosphorization Strategies and Modeling in Oxygen Steelmaking. In: CONFERENCE PROCEEDINGS, 2014.

VIEIRA, Deisi *et al.* Slag Evaluation to Reduce Energy Consumption and EAF Electrical Instability. **Materials Research**, p.1127-1131, 2016.

VIEIRA, Deisi. **Estudo de escórias de refino primário visando reduzir o consumo energético do forno elétrico a arco.** 2014. 60 f. Trabalho de Diplomação (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Metalurgia. Porto Alegre, 2014.

YILDIRIM, Irem Zeynep; PREZZI, Monica Hindawi. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. Publishing Corporation Advances in Civil Engineering [doi:10.1155/2011/463638](https://doi.org/10.1155/2011/463638) 2011.

ZHU, T. X.; COLEY, K. S.; IRONS, G. A.; Progress in Slag Foaming in Metallurgical Processes. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 43, p. 751-757, 2012.

ZULAICA, Carlos Javier Lizcano. **Balance Termodinamico de la Fabricacion de Acero.** 1996. Dissertação de mestrado – Universidade Autónoma de Nuevo León. Porto Alegre, 1996.

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

APÊNDICE A – HISTOGRAMAS DE TRATAMENTOS DOS DADOS

As Figuras 91 e 92 representam as distribuições de rendimento e *power-off* das corridas para o Cenário I.

Figura 91 – Histograma referente ao capítulo 5.1. Filtros aplicados para o rendimento metálico, referente ao Cenário I.

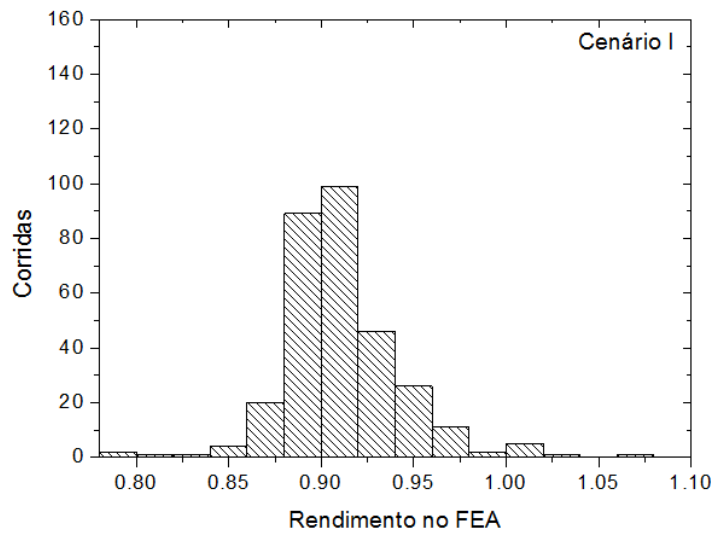
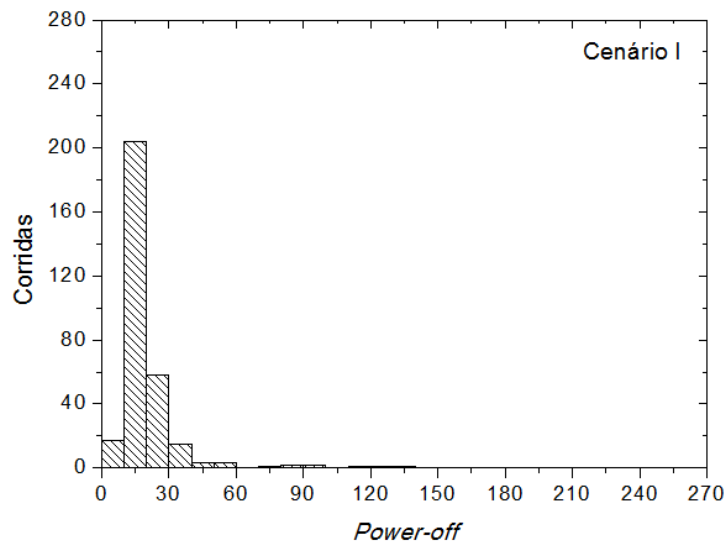


Figura 92 – Histograma referente ao capítulo 5.1. Filtros aplicados para o *power-off*. Referente ao Cenário I



As Figuras 93 e 94 representam as distribuições de rendimento e *power-off* das corridas para o Cenário II.

Figura 93 – Histograma referente ao capítulo 5.1. Filtros aplicados para o rendimento metálico, referente ao Cenário II.

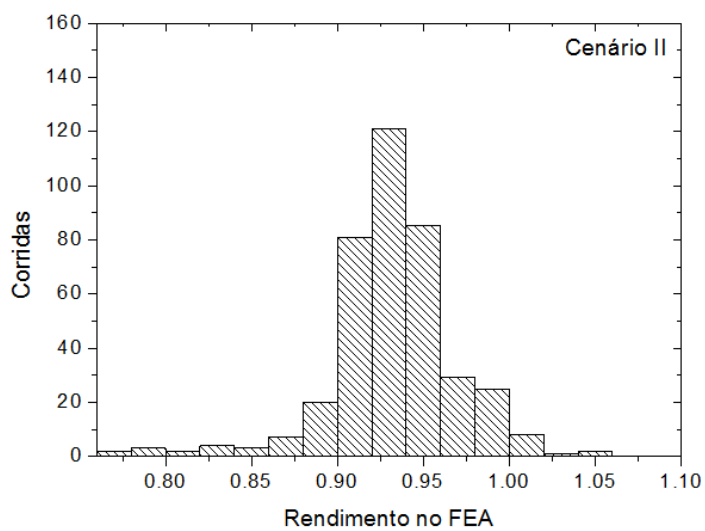
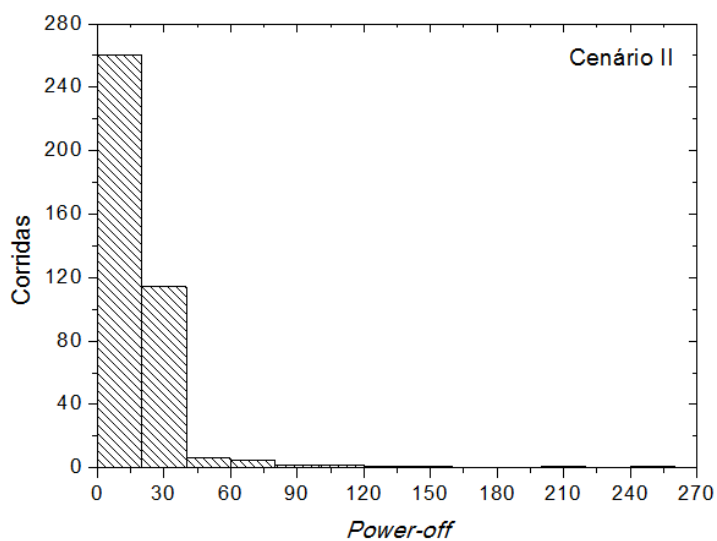


Figura 94 - Histograma referente ao capítulo 5.1. Filtros aplicados para o 'power-off'. Referente ao Cenário II



APÊNDICE B – RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS ANOVA

As Tabelas deste Apêndice apresentam as análises estatísticas de ANOVA 'Fator Único', que demonstram se ocorre ou não diferença significativa entre os dados.

A Tabela 20 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os teores de fósforo no aço entre os Cenários I e II, para o padrão C.

Tabela 20 - *One-Way ANOVA* teor de fósforo no aço para o padrão C, Cenários I e II.

ANOVA

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Fósforo no aço (% em massa) CI	41	0,36	0,008780488	4,33E-06
Fósforo no aço (% em massa) CII	29	0,305	0,010517241	5,76E-06

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5,12342E-05	1	5,12342E-05	10,42263	0,001917	3,981896256
Dentro dos grupos	0,000334266	68	4,91567E-06			
Total	0,0003855	69				

A Tabela 21 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os teores de fósforo no aço entre os Cenários I e II, para o padrão E.

Tabela 21 - *One-Way ANOVA* teor de fósforo no aço para o padrão E, Cenários I e II.

ANOVA

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Fósforo do Aço (% em massa) CI	21	0,193	0,009190476	3,1619E-06
Fósforo do Aço (% em massa) CII	24	0,269	0,011208333	6,51993E-06

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,56036E-05	1	4,56036E-05	9,197872519	0,004096803	4,067047426
Dentro dos grupos	0,000213196	43	4,95806E-06			
Total	0,0002588	44				

A Tabela 22 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os teores de carbono no aço entre os Cenários I e II, padrão C.

Tabela 22 - *One-Way ANOVA* teor de carbono no aço para o padrão C, Cenários I e II.

ANOVA

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Cabono no Aço (% em massa) CI	41	2,369	0,057780488	0,000334576
Cabono no Aço (% em massa) CII	29	2,51	0,086551724	0,00567347

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,014060503	1	0,014060503	5,551051584	0,021358943	3,981896256
Dentro dos grupos	0,172240197	68	0,002532944			
Total	0,1863007	69				

A Tabela 23 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os teores de carbono no aço entre os Cenários I e II, padrão E.

Tabela 23 - *One-Way ANOVA* teor de carbono no aço para o padrão E, Cenários I e II.

ANOVA

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Carbono no Aço (% em massa) CI	21	1,517	0,072238095	0,00022459
Carbono no Aço (% em massa) CII	24	1,781	0,074208333	0,000281737

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,34766E-05	1	4,34766E-05	0,170391251	0,681815389	4,067047426
Dentro dos grupos	0,010971768	43	0,000255157			
Total	0,011015244	44				

A Tabela 24 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de energia elétrica consumida no FEA entre os Cenários I e II, para o padrão C.

Tabela 24 - *One-Way ANOVA* Consumo de energia elétrica para o padrão C, Cenários I e II.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Energia Elétrica (kWh/t) CI	41	15440,8	376,6052775	259,3322891
Energia Elétrica (kWh/t) CII	29	10918,1	376,486489	160,1786562

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,23968053	1	0,23968053	0,001096914	0,973676159	3,981896256
Dentro dos grupos	14858,29394	68	218,5043227			
Total	14858,53362	69				

A Tabela 25 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de energia elétrica consumida no FEA entre os Cenários I e II, para o padrão E.

Tabela 25 - *One-Way ANOVA* Consumo de energia elétrica para o padrão E, Cenários I e II.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Energia Elétrica Consumida (kWh/t) CI	21	7826,62	372,6959737	275,6727791
Energia Elétrica Consumida (kWh/t) CII	24	9280,83	386,7011216	202,4982037

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2196,814691	1	2196,814691	9,287565427	0,003935361	4,067047426
Dentro dos grupos	10170,91427	43	236,5328899			
Total	12367,72896	44				

A Tabela 26 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de rendimento metálico no FEA entre os Cenários I e II, incluindo todas as qualidades.

Tabela 26 - *One-Way ANOVA* Rendimento do FEA incluindo todas as qualidades, Cenários I e II.

ANOVA

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Rendimento CI	256	232,6587175	0,908823115	0,000473972
Rendimento CII	261	242,0276158	0,927308873	0,000480523

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,044164	1	0,044163596	92,53199009	2,95946E-20	3,859578494
Dentro dos grupos	0,245799	515	0,000477279			
Total	0,289962	516				

A Tabela 27 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de rendimento metálico no FEA entre os Cenários I e II, para o padrão C.

Tabela 27 - *One-Way ANOVA* Rendimento do FEA para o padrão C, Cenários I e II.

ANOVA

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Rendimento (%) CI	41	36,71700833	0,895536789	0,000154308
Rendimento (%) CII	29	27,01058985	0,93139965	0,000550558

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>Gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,021846089	1	0,021846089	68,81320046	6,37285E-12	3,981896256
Dentro dos grupos	0,021587922	68	0,000317469			
Total	0,043434011	69				

A Tabela 28 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de rendimento metálico no FEA entre os Cenários I e II, para o padrão E.

Tabela 28 - *One-Way ANOVA* Rendimento do FEA para o padrão E, Cenários I e II.

ANOVA

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Rendimento (%)CI	21	19,06080657	0,907657456	0,000231239
Rendimento (%)CII	24	22,31650764	0,929854485	0,000233093

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,005518331	1	0,005518331	23,76223826	1,52447E-05	4,067047426
Dentro dos grupos	0,009985938	43	0,000232231			
Total	0,015504269	44				

A Tabela 29 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de carbono injetado no FEA entre os Cenários I e II, para o padrão C.

Tabela 29 - *One-Way ANOVA* carbono injetado em kg/t para o padrão C, Cenários I e II.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Carbono Injetado (kg/t) CI	41	382,0939919	9,319365657	7,314469885
Carbono Injetado (kg/t) CII	29	240,3034811	8,286326936	3,339450094

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	18,1266277	1	18,1266277	3,192602142	0,078429292	3,981896256
Dentro dos grupos	386,083398	68	5,677697029			
Total	404,2100257	69				

A Tabela 30 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de carbono injetado no FEA entre os Cenários I e II, para o padrão E.

Tabela 30 - *One-Way ANOVA* carbono injetado em quilogramas para o padrão E, Cenários I e II.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Carbono Injetado (kg/t) CI	20	159,2242422	7,961212109	11,00340049
Carbono Injetado (kg/t) CII	24	218,2180876	9,092420317	3,300990596

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	13,95962194	1	13,95962194	2,057298449	0,158882752	4,072653759
Dentro dos grupos	284,987393	42	6,785414119			
Total	298,9470149	43				

A Tabela 31 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de cobre no aço entre os Cenários I e II, para o padrão C.

Tabela 31 - *One-Way ANOVA* cobre no aço (% em massa) para o padrão C, Cenários I e II

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Teor de Cobre no Aço C I	41	9,576	0,233560976	0,002072952
Teor de Cobre no Aço C II	29	6,044	0,208413793	0,00071168

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,010741439	1	0,010741439	7,102114253	0,009608294	3,981896256
Dentro dos grupos	0,102845132	68	0,001512428			
Total	0,113586571	69				

A Tabela 32 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de níquel no aço entre os Cenários I e II, para o padrão C.

Tabela 32 - *One-Way ANOVA* níquel no aço (% em massa) para o padrão C, Cenários I e II

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Teor de Níquel no Aço C I	41	3,615	0,088171	0,000957
Teor de Níquel no Aço C II	29	3,029	0,104448	0,000964

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,004501	1	0,004501	4,688247	0,033882	3,981896
Dentro dos grupos	0,065277	68	0,00096			
Total	0,069777	69				

A Tabela 33 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de estanho no aço entre os Cenários I e II, padrão C.

Tabela 33 - *One-Way ANOVA* estanho no aço (% em massa) para o padrão C, Cenários I e II

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Teor de Estanho no Aço C I	41	0,523	0,012756	3,39E-06
Teor de Estanho no Aço C II	29	0,381	0,013138	1,27E-06

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,48E-06	1	2,48E-06	0,984739	0,32455	3,981896
Dentro dos grupos	0,000171	68	2,51E-06			
Total	0,000173	69				

A Tabela 34 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de molibdênio no aço entre os Cenários I e II, para o padrão C.

Tabela 34 - *One-Way ANOVA* molibdênio no aço (% em massa) para o padrão C, Cenários I e II

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Teor de Molibdênio no Aço C I	41	0,803	0,019585	1,84E-05
Teor de Molibdênio no Aço C I	29	0,896	0,030897	2,69E-05

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,002173202	1	0,002173	99,13705	6,52E-15	3,981896
Dentro dos grupos	0,001490641	68	2,19E-05			
Total	0,003663843	69				

A Tabela 35 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de cobre no aço entre os Cenários I e II, para o padrão E.

Tabela 35 - *One-Way ANOVA* cobre no aço (% em massa) para o padrão E, Cenários I e II

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Teor de Cobre no Aço C I	21	5,445	0,259286	0,001511
Teor de Cobre no Aço C II	24	5,035	0,209792	0,000809

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,027436	1	0,027436	24,17027	1,33E-05	4,067047
Dentro dos grupos	0,04881	43	0,001135			
Total	0,076246	44				

A Tabela 36 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de níquel no aço entre os Cenários I e II, para o padrão E.

Tabela 36 - *One-Way ANOVA* níquel no aço (% em massa) para o padrão E, Cenários I e II

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Teor de Níquel no Aço C I	21	2,431	0,115761905	0,00363369
Teor de Níquel no Aço C II	24	2,018	0,084083333	0,000219297

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,011239557	1	0,011239557	6,218677502	0,016566166	4,067047426
Dentro dos grupos	0,077717643	43	0,001807387			
Total	0,0889572	44				

A Tabela 37 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de estanho no aço entre os Cenários I e II, padrão E.

Tabela 37 - *One-Way ANOVA* estanho no aço (% em massa) para o padrão E, Cenários I e II

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Teor de Estanho no Aço C I	21	0,286	0,013619048	4,24762E-06
Teor de Estanho no Aço C II	24	0,309	0,012875	1,41848E-06

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6,2004E-06	1	6,2004E-06	2,267588046	0,139416686	4,067047426
Dentro dos grupos	0,000117577	43	2,73436E-06			
Total	0,000123778	44				

A Tabela 38 apresenta os resultados da análise ANOVA para verificar as diferenças entre os valores de molibdênio no aço entre os Cenários I e II, para o padrão E.

Tabela 38 - *One-Way ANOVA* molibdênio no aço (% em massa) para o padrão E, Cenários I e II

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Teor de Molibdênio no Aço C I	21	0,683	0,03252381	4,77619E-05
Teor de Molibdênio no Aço C I	24	0,659	0,027458333	5,36504E-05

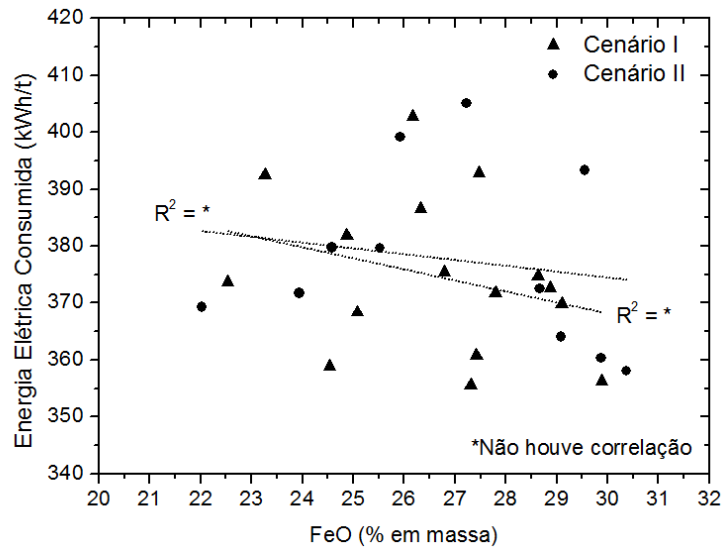
ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,000287381	1	0,000287381	5,644718699	0,02203424	4,067047426
Dentro dos grupos	0,002189196	43	5,09115E-05			
Total	0,002476578	44				

APÊNDICE C – ANÁLISES DO PADRÃO C SEM RELAÇÕES

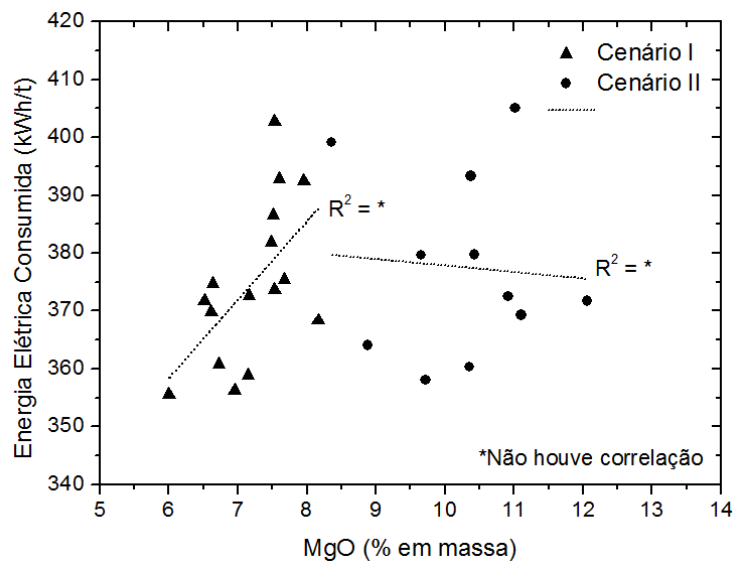
As Figuras deste Apêndice são referentes ao padrão C. A Figura 95 mostra que não houve relação entre a energia elétrica consumida e o teor de FeO da escória.

Figura 95 – Relação FeO % em massa e energia elétrica consumida no FEA, Padrão C, CI e II.



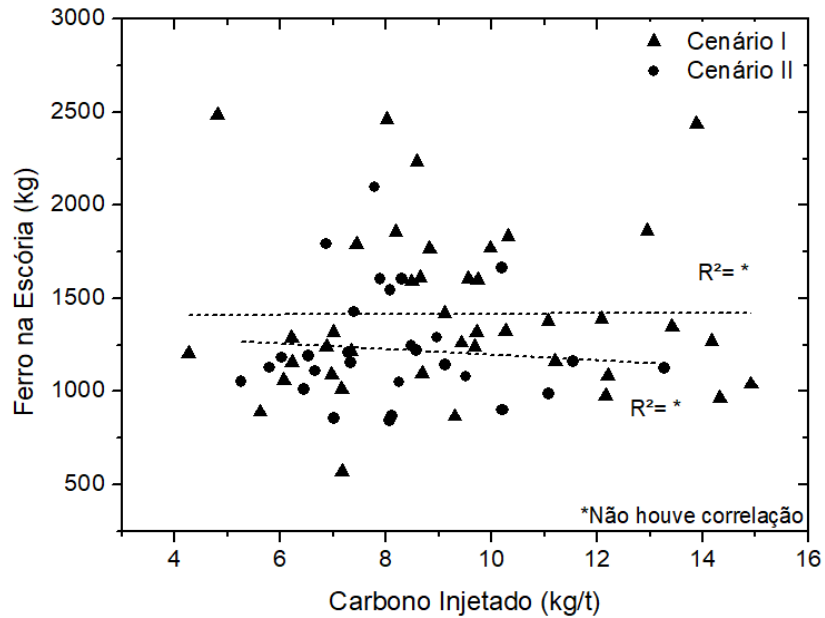
A Figura 96 mostra que não houve relação entre a energia elétrica consumida e o teor de MgO da escória.

Figura 96 - Relação MgO % em massa e energia elétrica consumida no FEA, Padrão C, CI e II.



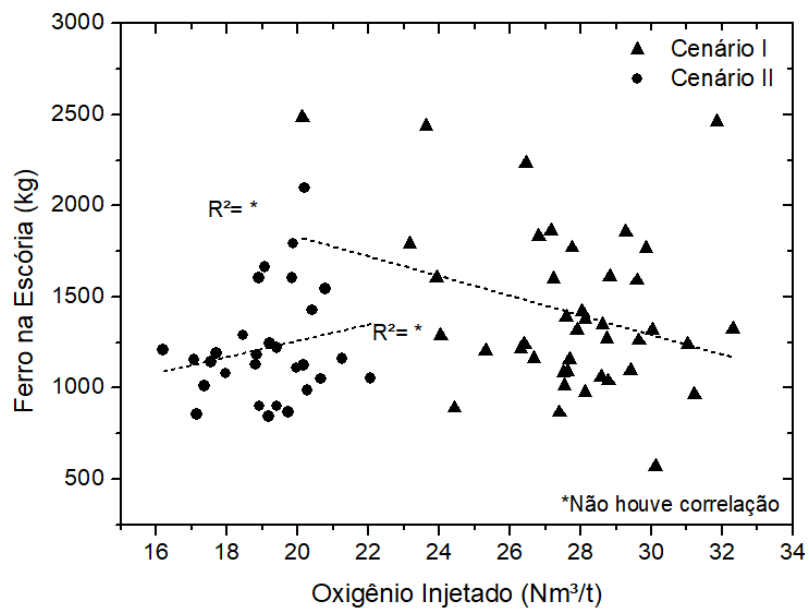
A Figura 97 mostra que não houve relação entre o carbono injetado e a quantidade de ferro na escória.

Figura 97 - Relação carbono injetado e ferro na escória, Padrão C, Cenários I e II.



A Figura 98 mostra que não houve relação entre o oxigênio injetado e a quantidade de ferro na escória.

Figura 98 - Relação oxigênio injetado e ferro na escória, Padrão C, Cenários I e II.



A Figura 99 mostra que não houve relação entre a razão C/O do processo e a quantidade de ferro na escória.

Figura 99 - Relação razão C/O global e ferro na escória, Padrão C, Cenários I e II.

