

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e
de Minas

Tese de Doutorado

Desenvolvimento de um Modelo de Controle de Processo para Altos-
Fornos a Coque Aplicado a Altos-Fornos Industriais

AUTOR: Vitor Maggioni Gasparini
ORIENTADOR: Prof. Dr Luiz Fernando Andrade de Castro

Agosto/2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e
de Minas

Vitor Maggioni Gasparini

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE CONTROLE DE PROCESSO PARA
ALTOS-FORNOS A COQUE APLICADO A ALTOS-FORNOS INDUSTRIAIS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de
Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Dr Luiz Fernando Andrade de Castro

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia da UFMG

2016

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos iniciais são dirigidos à minha esposa, Juliana, pelo companheirismo, apoio, compreensão e carinho que me ajudam a trilhar e superar todas as dificuldades;

À minha mãe, Orli, e ao meu pai, Jaime, pelo belo exemplo de educação e vida que me proporcionaram;

Ao orientador Professor Doutor Luiz Fernando Andrade de Castro, por sua competência, seriedade, paciência, apoio e orientação acadêmica;

À Gerdau pela oportunidade de crescimento profissional, apoio e confiança depositada na realização deste trabalho;

Ao meu gestor Elton Queibson Moreira Maia pelo apoio e oportunidade de aprendizado e desenvolvimento.

Aos estagiários da Gerdau, Alfredo, Victor e Arthur, pela força, companheirismo e ajuda durante o doutorado.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG pela oportunidade;

A Deus por tudo isso que tenho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE NOTAÇÕES	xiii
RESUMO	xvi
ABSTRACT.....	xvii
1- INTRODUÇÃO	1
2- OBJETIVOS	3
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1- Produção de Gusa em Altos-Fornos a Coque	4
3.1.1- Princípio de Funcionamento.....	5
3.2- Modelo Operacional do Alto-Forno.....	8
3.3- Aspectos Internos do Alto-Forno	17
3.4- Controle Térmico do Alto-Forno	34
3.4.1- Fatores Relativos ao Carregamento.....	36
3.4.2- Fatores Relativos ao Sopro	41
3.4.3- Fatores Diversos.....	46
3.5- Controle de Processo	48
3.5.1- Modelos Estatísticos	52
3.5.2- Modelos Termodinâmicos.....	57
3.5.3- Modelos de Redes Neurais Artificiais.....	60
3.5.4- Modelos Cinéticos	64
3.5.5- Modelos Para Prever a Situação Interna do Alto-Forno	64
3.5.6- Modelos Específicos.....	69
3.5.7- Modelos de Controle Global (“ <i>Expert System</i> ”).....	73
4- METODOLOGIA.....	75
4.1- Reator Industrial	75
4.2- Avaliação da Instrumentação do Alto-Forno.....	76
4.2.1- Instrumentação dos Altos-Fornos 1 e 2	77

4.3- Modelo Termoquímico	78
4.3.1- Índices Operacionais	78
4.3.2- Desenvolvimento do Modelo de Controle.....	79
4.4- Simulação do Modelo na Operação do Alto-Forno	86
4.5- Comparação Entre os Dados Calculados e Reais	86
5- RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
5.1- Desenvolvimento e Utilização do Modelo Termoquímico.....	87
5.2- Resultados Alto-Forno 1	89
5.2.1- Definição e Avaliação Banco de Dados do AF1	89
5.2.2- Análise dos Resultados AF1: Comparação dos Resultados Calculados e Reais	99
5.2.3- Análise dos Resultados AF1: Operação do Modelo Online.....	107
5.3- Resultados Alto-Forno 2	109
5.3.1- Definição e Avaliação Banco de Dados.....	109
5.3.2- Análise dos Resultados AF2: Comparação dos Resultados Calculados e Reais	114
5.4- Sensibilidade do Modelo Termoquímico	117
5.4.1- Cálculo do Fator Ômega	120
6- CONCLUSÕES.....	125
7- CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO	127
8- RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS.....	128
9- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	129
10- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Principais partes do alto-forno (GUIMARÃES, 2003).....	5
Figura 3.2: Descrição do processo de contra corrente (GUIMARÃES, 2003).....	6
Figura 3.3: Matérias-primas e produtos do alto-forno (GUIMARÃES, 2003)	8
Figura 3.4: Perfil de temperatura dos gases e sólidos/líquidos a) KITAEV <i>et al.</i> , 1967 apud CASTRO, 2002; b) TURKDOGAN, 1978	9
Figura 3.5: Diagrama de equilíbrio Fe-C-O mostrando o posicionamento dos gases do alto-forno e das zonas de preparação e elaboração (CAMPOS, 1984).....	13
Figura 3.6: Consumo de carbono vs fator ômega; ω (CASTRO e TAVARES, 1998)...	14
Figura 3.7: Esquema do modelo operacional do alto-forno (CASTRO, 2002)	16
Figura 3.8: Composição do gás gerado na zona de combustão em função do comprimento da zona de combustão (raceway) segundo JINDAL <i>et al.</i> (2007)....	18
Figura 3.9: Esquema da região interna do alto-forno, mostrando as várias zonas (CASTRO e TAVARES, 1998).....	18
Figura 3.10: Estado das camadas de carga na zona granular do alto-forno 4 de Kukioka (KANBARA, 1977 apud CASTRO e TAVARES, 1998)	19
Figura 3.11: Esquema de divisão do alto-forno: modelo operacional e dissecação (CASTRO, 2002).....	20
Figura 3.12: Perda de carga no alto-forno (GUIMARÃES, 2003).....	21
Figura 3.13: Variação da altura da zona de amolecimento e fusão com o fator alfa (TAVARES, 2005)	22
Figura 3.14: Efeito do fator alfa sobre o grau de redução da carga metálica na zona de preparação (CASTRO e TAVARES, 1998)	23
Figura 3.15: Relação entre fator alfa e a forma da zona de amolecimento e fusão segundo TASHIRO <i>et al.</i> (1980) apud CASTRO e TAVARES (1998).....	23
Figura 3.16: Cadinho com baixo nível de líquidos segundo TAVARES (2005)	26
Figura 3.17: Cadinho com alto nível de líquidos segundo TAVARES (2005)	26
Figura 3.18: Zona de amolecimento e fusão com destaque a passagem do gás pelas camadas de coque segundo CASTRO e TAVARES (1998)	27
Figura 3.19: Gráfico do $\Delta\%C$ gusa, onde: $\Delta\%C = \%C_{\text{saturação}} - \%C_{\text{real}}$ (RAIPALI, 2003)	31

Figura 3.20: Relação entre consumo de coque e CO/CO ₂ (HARVEY <i>et al.</i> , 2014).....	35
Figura 3.21: Variação do %CO e %CO ₂ ao longo do raio do alto-forno para padrões de distribuição de carga distintos (GUIMARÃES, 2003)	38
Figura 3.22: Predição do efeito de elevação de temperatura de sopro no consumo de coque (TORSSELL <i>et al.</i> , 1992)	42
Figura 3.23: Influência do %H ₂ em frente às ventaneiras na permeabilidade do alto-forno segundo GUIMARÃES (2003)	43
Figura 3.24: Predição do efeito do enriquecimento (O ₂) do ar soprado no consumo de coque (TORSSELL <i>et al.</i> , 1992)	45
Figura 3.25: Relação entre fator alfa e enriquecimento de oxigênio (TAVARES, 2005)	46
Figura 3.26: Informações necessárias para o controle de processo de produção de gusa em altos-fornos (KALLO <i>et al.</i> , 1999)	49
Figura 3.27: Modelo físico experimental do cadinho: ponto 1 e 2 são os furos de gusa sobre os quais estão instalados condutivímetro; ponto 3 é o sistema radial e rotativo de aspersão (SANTOS <i>et al.</i> , 2011).....	51
Figura 3.28: Predição de carbono pela equação 3.24 (BHAGAT, 2011)	56
Figura 3.29: Relação empírica entre produtividade e fração de finos do minério de ferro granulado (BHAGAT <i>et al.</i> , 1985)	56
Figura 3.30: Previsão do teor de silício do gusa para próxima corrida (SANTOS, 2008)	61
Figura 3.31: Previsão da temperatura do gusa para próxima corrida (SANTOS, 2008)	61
Figura 3.32: Fluxograma do modelo proposto por MEDEIROS <i>et al.</i> (2006)	62
Figura 3.33: Comparação entre valores estimados e reais para as variáveis de controle no teste industrial <i>off line</i> (MEDEIROS <i>et al.</i> , 2006).....	62
Figura 3.34: Comparação entre resultados de <i>fuel rate</i> dos períodos sem suporte do modelo (o) e com suporte do modelo (•) (MEDEIROS <i>et al.</i> , 2007)	63
Figura 3.35: Comparação do %enxofre antes e depois da implantação do sistema de controle (RADHAKRISHNAN e MOHAMED 2000).....	63
Figura 3.36: Formato e posição da zona de amolecimento e fusão do Alto-Forno 6 de Chiba, estimados pelo modelo matemático (KOBAYASHI <i>et al.</i> , 1995 apud CASTRO, 2002)	65

Figura 3.37: Distribuições tridimensionais de temperatura (°C) para várias fases no alto-forno, calculadas pelo modelo desenvolvido por CASTRO, NOGAMI e YAGI (2002).....	66
Figura 3.38: Posição e formato da zona de amolecimento e fusão segundo SHEN <i>et al.</i> (2015) e relação minério/coque utilizada na simulação.....	67
Figura 3.39: Distribuição da concentração do gás CO no alto-forno: a) corte vertical do alto-forno; b) cortes horizontais em diferentes alturas (SHEN <i>et al.</i> , 2015)	68
Figura 3.40: Concentração do gás CO e CO ₂ simulado por AUSTIN <i>et al.</i> (1997).....	68
Figura 3.41: Exemplo de distribuição de carga calculada pelo modelo e utilizado no Alto-Forno B da Sidmar (DANLOY <i>et al.</i> , 2001).....	70
Figura 3.42: Controle do nível de líquidos no cadinho (BRYER, 1999).....	70
Figura 3.43: Máxima linha de erosão dos refratários do cadinho, estimada por um modelo matemático (KOBAYASHI <i>et al.</i> , 1995 apud CASTRO, 2002).....	71
Figura 3.44: Perfil de desgaste do cadinho na direção 190° (SESHADRI <i>et al.</i> , 2009). 72	
Figura 3.45: Evolução da espessura da camada agregada e do refratário localizado na base do cadinho (SESHADRI <i>et al.</i> , 2009)	72
Figura 3.46: Relação entre a velocidade do sopro e a penetração da zona de combustão, previstos através de um modelo a frio (OMORI, 1987)	73
Figura 4.1: Esquema de cálculo do modelo termoquímico	84
Figura 4.2: Esquema do modelo de controle proposto	85
Figura 5.1: Tela inicial do modelo termoquímico	87
Figura 5.2: Tela exemplificando a entrada de variáveis. a) Input Pelota; b) Input Sinter	88
Figura 5.3: Tela exemplificando a entrada de variáveis. a) Input (Coque); b) Input Gusa	88
Figura 5.4: Tela de resultados do modelo com foco no consumo de carbono.....	89
Figura 5.5: Gráfico de sequência de Produção e Índice de Utilização do Alto-Forno 1	90
Figura 5.6: Gráfico de sequência de Produção e Índice de Utilização do Alto-Forno 1 desconsiderados os dias de paradas operacionais	90
Figura 5.7: Carga metálica utilizada no Alto-Forno 1 de jan/16 a jun/16	91

Figura 5.8: Volume de escória gerado no Alto-Forno 1	91
Figura 5.9: Temperatura do Gusa do Alto-Forno 1	93
Figura 5.10: %Silício do Gusa do Alto-Forno 1	93
Figura 5.11: Gráfico do %cinza do coque	95
Figura 5.12: Gráfico do somatório dos gases de topo do Alto-Forno 1.....	96
Figura 5.13: %H ₂ no gás de topo do Alto-Forno 1	96
Figura 5.14: Relação CO/CO ₂ do gás de topo do Alto-Forno 1	97
Figura 5.15: Consumo de carbono do Alto-Forno 1	97
Figura 5.16: Consumo de coque, carvão injetado e combustível total do Alto-Forno 1	98
Figura 5.17: Gráfico de sequência para volume de escória calculado vs real AF1	99
Figura 5.18: Parâmetros utilizados para construção do gráfico <i>Boxplot</i> (CAMPOS,2003)	100
.....	
Figura 5.19: Gráfico <i>Boxplot</i> para volume de escória calculado vs real AF1	101
Figura 5.20: Gráfico Correlação para volume de escória calculado vs real AF1	101
Figura 5.21: Gráfico de sequência para consumo de carbono calculado vs real AF1 ..	103
Figura 5.22: Gráfico <i>Boxplot</i> para consumo de carbono calculado vs real AF1	104
Figura 5.23: Gráfico Correlação para consumo carbono calculado vs real AF1	104
Figura 5.24: Análise de resíduos da regressão entre consumo de carbono real e calculado	105
Figura 5.25: Gráfico dispersão - correlação entre consumo carbono real vs fator ômega (AF1).....	106
Figura 5.26: Gráfico Correlação para consumo carbono calculado vs fator ômega (AF1)	107
Figura 5.27: Gráfico de sequência – Carbono visado vs carbono calculado AF1	108
Figura 5.28: Gráfico de sequência – Carbono visado vs relação %CO/%CO ₂ AF1	109
Figura 5.29: Gráfico de sequência de Produção e Índice de Utilização do Alto-Forno 2	110
Figura 5.30: Gráfico de sequência de Produção e Índice de Utilização do AF2 desconsiderados os dias de paradas operacionais	110
Figura 5.31: Carga metálica utilizada no AF2 de jan/16 a jun/16	111
Figura 5.32: Volume de escória gerado no AF2	111
Figura 5.33: Gráfico da somatório dos gases de topo do AF2.....	112

Figura 5.34: %H ₂ no gás de topo do Alto-Forno 2	112
Figura 5.35: Relação CO/CO ₂ do gás de topo do AF2	113
Figura 5.36: Consumo de carbono do AF2.....	113
Figura 5.37: Consumo de coque, carvão injetado e combustível total do AF2	114
Figura 5.38: Gráfico dispersão para volume de escória calculado vs real AF2.....	114
Figura 5.39: Gráfico de sequência para consumo de carbono real vs calculado AF2 ..	115
Figura 5.40: Gráfico <i>Boxplot</i> para consumo de carbono calculado vs real AF1	116
Figura 5.41: Gráfico Correlação para consumo carbono calculado vs real AF2.....	117
Figura 5.42: Gráfico de impacto de variáveis vs consumo de carbono	118
Figura 5.43: Análise de resíduos para regressão do fator ômega	122
Figura 5. 44: Gráfico de dispersão e correlação para fator ômega calculado vs modelo termoquímico	123
Figura 5.45: Gráfico com impacto das variáveis preditivas no fator ômega	123
Figura 5.46: Gráfico de contorno com campos coloridos para cada faixa de fator ômega	124

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1: Resultados da regressão de %C _{real} para diferentes altos-fornos (RAPALI, 2003)	32
Tabela III.2: Correlações para controle térmico estudados por SPENCE <i>et al.</i> (1997)..	34
Tabela III.3: Tempo de resposta das variáveis na temperatura do gusa (SPENCE <i>et al.</i> 1997)	35
Tabela III.4: Resumo – Correlações de Flint (GUIMARÃES, 2003)	37
Tabela III.5: Resumo – Correlações de Flint (GUIMARÃES, 2003)	37
Tabela III.6: Quantidade de calor para aquecimento do gás de 127°C a 227°C	40
Tabela III.7: Correção do <i>coke rate</i> devido abaixamento de carga (SPENCE <i>et al.</i> , 1997)	40
Tabela III.8: Taxa de substituição de coque vs combustíveis auxiliares (CASTRO e TAVARES, 1998).....	44
Tabela III.9: Resumo – Controle de processo do alto-forno (CASTRO, 2002)	50
Tabela III.10: Variáveis da “Fórmula de Flint”, suas unidades e seus coeficientes de correlação (TAMBASCO, 1977)	53
Tabela III.11: Informações, periodicidade e instrumentações necessárias ao controle de processo de um alto-forno, com a utilização de modelos termodinâmicos (CASTRO, 2002).....	58
Tabela III.12: Dados operacionais, calculados pelos modelos termodinâmicos, necessários ao controle de processo dos altos-fornos (CASTRO, 2002)	59
Tabela IV.1: Dados de projeto dos Altos-Fornos	75
Tabela IV.2: Parâmetros operacionais de projeto dos Altos-Fornos	76
Tabela IV.3: Informações, periodicidade e instrumentações necessárias para implantação do modelo termoquímico	77
Tabela IV.4: Principais índices operacionais do modelo termoquímico (CASTRO, 1983)	78
Tabela IV.5: Balanço de oxigênio na zona de elaboração	82
Tabela IV.6: Balanço térmico da zona de elaboração	83

Tabela V.1: Dados mensais da carga metálica do Alto-Forno 1	92
Tabela V.2: Dados mensais AF1: coque, gusa, ar soprado e gás de topo.....	94
Tabela V.3: Dados mensais AF1: produção, utilização, combustível	98
Tabela V.4: Teste de hipótese – diferença entre volume de escória real vs calculado AF1 (Software Minitab).....	100
Tabela V.5: Grau de correlação segundo CAMPOS (2003).....	102
Tabela V.6: Regressão linear – Volume de escória real vs calculado AF1	102
Tabela V.7: Teste de hipótese – diferença entre consumo de carbono real vs calculado AF1 (Software Minitab).....	103
Tabela V.8: Análise de regressão – consumo de carbono real vs calculado AF1	105
Tabela V.9: Análise de regressão – consumo de carbono real vs calculado AF1	116
Tabela V.10: Tabela de impactos obtida através do modelo termoquímico vs trabalhos da literatura (CASTRO e TAVARES, 1998; GUIMARÃES, 2003; SPENCE <i>et al.</i> 1997)	120
Tabela V.11: Análise de regressão para fator ômega (Software Minitab).....	121

LISTA DE NOTAÇÕES

2-D: duas dimensões

3-D: três dimensões

AF1: Alto-Forno 1

AF2: Alto-Forno 2

B4: basicidade quaternária da escória

C: carbono consumido por tonelada de gusa (kg/t)

C_{16} : coeficiente de correlação do teor de enxofre no gusa

$C_{\text{carregado}}$: quantidade de carbono (kg/t gusa) carregada no alto-forno;

$C_{\text{consumido}}$: quantidade de carbono (kg/t gusa) consumida no alto-forno.

CEO: consumo específico de oxigênio

C_i : coeficiente de correlação que quantifica o efeito da variável, adimensional

C_p : calor específico da água de refrigeração (cal/g.K)

C_{pg} : calor específico dos gases

C_{ps} : calor específico dos sólidos

CR: *coke rate* (kg/t)

Delta CR: variação no *coke rate*

Delta P: pressão de base menos pressão de topo do alto-forno

E_{O_2} : enriquecimento do ar com oxigênio

FR: *fuel rate* (consumo específico de combustível)

GAF: gás de alto-forno

GCO: gás de coqueria

G_g : vazão mássica dos gases

G_s : vazão mássica de sólidos

H° : entalpia (quantidade de calor para aquecimento do gás)

H_2 carvão: % H_2 no carvão de injeção

H_2 topo: % H_2 no gás de topo do alto-forno

IRSID: Institut de Recherches de La Siderurgie

IU: índice de utilização do alto-forno

K: constante de regressão, específica para cada alto-forno (Flint)

$k_{\theta HM}$: constante relacionada a temperatura do gusa

k_0 : constante da equação de incorporação do carbono ao gusa

k_{Mn} : constante relacionada ao %manganês do gusa

k_P : constante relacionada ao %fósforo do gusa

k_S : constante relacionada ao %enxofre do gusa

k_{Si} : constante relacionada ao %silício do gusa

n : número de observações

PCI: carvão de injeção pulverizado

PCR: taxa de injeção de carvão pulverizado

Prod: produção de gusa diária

Q : quantidade de calor perdida através do gás de topo

r : coeficiente de correlação

R^2 : coeficiente ou grau de correlação

RNA: redes neurais artificiais

T_C : temperatura calculada dos gases de topo

T_R : temperatura real dos gases de topo

U_{sopro} : umidade do ar soprado

V : vazão de água no sistema (m^3/h)

V_{ar} : volume de ar soprado (Nm^3/t gusa)

V_i : variável que afeta o consumo de carbono

VIF (Minitab): *variance inflation factors*

VS: vazão de sopro

X_1 : consumo específico de síter, kg/t gusa

X_3 : redutibilidade do síter, %

X_9 : percentual do minério de ferro abaixo de 12mm, %

X_{10} : consumo específico de calcário, kg/t gusa

X_{11} : peso da carga por tonelada de gusa, kg/t gusa

X_{13} : temperatura média do ar soprado, K

X_{14} : percentual de cinza no coque, %

Y_1 : consumo específico de carbono, kg/t gusa

η : rendimento gasoso

ω : fator ômega

α : fator alfa

ρ : densidade da água (kg/m³)

γ : fator gama

θ_{HM} : temperatura do gusa (°C)

$\Delta\%C$: desvio entre carbono de saturação e carbono real do gusa

ΔC : quantidade de carbono carregada - consumida

ΔT : diferença de temperatura entre entrada e saída de água (°C)

$\%C_{real}$: %C incorporado ao gusa

$\%C_{saturação}$: %C de saturação do gusa

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um modelo termoquímico baseado em balanço de massa e térmico para controle de altos-fornos a coque. Com esse modelo pode-se calcular índices operacionais do alto-forno. Esses índices mostram os desvios de nível térmico do alto-forno e permitem uma ação rápida do operador, com consequente ganho de estabilidade. A motivação para este trabalho deve-se à constatação de que existe uma deficiência de modelos capazes de antecipar a atuação do operador no consumo de combustível do alto-forno na siderurgia brasileira.

Conclui-se que o modelo termoquímico é aplicável ao controle de altos-fornos, sendo a análise de gás de topo o principal sensor do modelo, sendo assim, é necessária alta precisão na análise dos gases de topo (CO , CO_2 e H_2).

Aplicou-se o modelo termoquímico desenvolvido para dados industriais de altos-fornos a coque. Várias relações entre parâmetros operacionais e consumo de combustível foram obtidas. Os resultados das simulações mostraram que o modelo de controle desenvolvido é uma ferramenta importante para uma operação estável do processo de produção de gusa em alto-forno a coque.

A utilização do modelo permitiu ao operador antecipar suas atuações no carbono visado e evitar grandes variações no nível térmico do alto-forno, proporcionando maior segurança operacional (menor risco de resfriamento). Ou seja, o controle térmico deixou de ser corretivo e passou a ser preventivo.

ABSTRACT

This work describes the development of a thermochemical model based on mass balance and thermal control for blast furnace. With this model can calculate operational indices of the blast furnace. These indices show the thermal level deviations of the blast furnace and allow rapid operator action, with consequent stability gain. The motivation for this work is due to the fact that there is a deficiency of models able to anticipate the operator action in the fuel consumption of the blast furnace in the Brazilian steel industry.

It concluded that the thermo-chemical model is applicable to the blast furnace control, with the top gas analysis as the main sensor of the model, therefore it is required high accuracy in the analysis of the top gas (CO, CO₂ and H₂).

It was applied the thermo-chemical model for industrial blast furnace data. Various relationships between operating parameters and fuel consumption were obtained. The simulation results showed that the developed control model is an important tool for stable operation of the hot metal production process in blast furnace.

Using the model was possible to show that the operator can anticipate their actions in the targeted carbon and avoid large variations in the thermal level of the blast furnace, providing greater operational safety (reduced risk of cooling). That is, the thermal control ceased to be corrective and became preventive.

1- INTRODUÇÃO

O processo de produção de gusa em altos-fornos se destaca como o mais apropriado processo de redução de óxidos de ferro por suas vantagens de estabilidade operacional e principalmente, altas taxas de produção. Na siderurgia brasileira o gusa é produzido por altos-fornos a coque ou carvão vegetal. Em altos-fornos de grande porte (a coque), as matérias-primas utilizadas são: minério de ferro (granulado, sinter ou pelota), fundentes e combustível (coque e carvão mineral pulverizado). No Brasil, em altos-fornos a coque, o combustível é a matéria-prima de maior custo utilizada na fabricação de gusa.

A estabilidade operacional de um processo complexo como o alto-forno, pode ser continuamente ameaçada pela variação da qualidade das matérias-primas e de outras condições operacionais. Quando este processo é devidamente controlado, reduções de custo significativas podem ser alcançadas.

Desta forma, modelos operacionais de altos-fornos têm sido desenvolvidos com o objetivo de prever desvios operacionais e otimizar o processo, de modo a garantir estabilidade operacional e reduzir o consumo de combustível.

O controle de processo utilizado atualmente nos altos-fornos estudados neste trabalho é denominado corretivo, pois a ação corretiva só é tomada pela constatação do desvio da faixa de composição ou temperatura do gusa. O controle corretivo não demanda instrumentação sofisticada, sendo suficientes apenas instrumento para medição da temperatura do gusa e um pequeno laboratório analítico. Este tipo de operação é reativo e lento, ou seja, introduz grande variação na qualidade e temperatura do gusa e consumo de combustível.

O progresso no sentido de um controle termoquímico exige não só melhor instrumentação, mas também a adoção de cálculos extensos baseados em balanços de massa e térmico do processo. O conjunto desses cálculos é denominado “modelo termoquímico”. Este controle permite correções no processo assim que algum desvio começar a ocorrer, diminuindo sensivelmente o risco de resfriamentos bruscos, melhorando a qualidade do gusa e reduzindo o consumo de combustível.

Dentre as vantagens na aplicação de um modelo operacional (termoquímico), tem-se:

- Maior segurança operacional;
- Maior estabilidade operacional com menores custos de produção;
- Detecção dos fenômenos do processo.

O principal objetivo deste conjunto de análises é atingir a melhor solução para alcançar e sustentar alta produtividade com custos competitivos. Neste sentido, o sistema informa a necessidade de alteração do *fuel rate* (combustível carregado) baseado na alteração da taxa de consumo de combustível do alto-forno.

2- OBJETIVOS

Geral

Este trabalho tem como objetivo aumentar a estabilidade operacional através da implantação de um modelo termoquímico desenvolvido para altos-fornos a coque.

Objetivo Específico

Aplicar modelo operacional em altos-fornos industriais, permitindo uma atuação rápida do operador para antecipar as variações de qualidade do gusa.

Este trabalho busca contribuir para o conhecimento de modelos operacionais no sentido de modernizar o processo de fabricação de gusa em altos-fornos a coque.

Etapas para desenvolvimento do modelo:

- 1) Escolher alto-forno para aplicação do modelo: Altos-Fornos 1 e 2;
- 2) Avaliar informações existentes nos altos-fornos (instrumentação);
- 3) Desenvolver o modelo operacional termoquímico;
- 4) Simular a utilização do modelo na operação do alto-forno;
- 5) Analisar os resultados: comparação do resultado real com calculado pelo modelo termoquímico;
- 6) Avaliar a utilização do modelo operando online.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- Produção de Gusa em Altos-Fornos a Coque

O alto-forno é um reator metalúrgico de contra corrente destinado à produção do ferro gusa. O ferro gusa é obtido a partir da redução de óxidos de ferro e fusão do metal em contra corrente com os gases redutores (CO e H_2). O ferro gusa é uma solução ferro-carbono, composta de 90 a 95% de ferro, 3,0 a 4,5% de carbono, elementos de liga como silício (Si) e manganês (Mn) e impurezas como fósforo (P) e enxofre (S). (ARAÚJO, 1997)

No alto-forno, o gusa é obtido no estado líquido (a uma temperatura de $\sim 1.500^\circ\text{C}$) e nesse estado é levado a Aciaria, onde após um processo de “refino” passa a se denominar aço.

Além do gusa, são gerados no alto-forno subprodutos como escória, gás de alto-forno, pó, lama e energia elétrica.

A escória é obtida pela fusão e separação da ganga das matérias-primas e dos fundentes. É constituída principalmente de óxidos termodinamicamente estáveis como MgO , CaO , Al_2O_3 e SiO_2 , que soma cerca de 95% em peso na escória. O gás do alto-forno, que contém cerca de 20 a 25% de CO e 3% de H_2 pode ser usado como combustível, com um poder calorífico de 700 a 800kcal/Nm³. (ARAÚJO, 1997)

A Figura 3.1 mostra um desenho esquemático do alto-forno onde se destacam as partes e os componentes principais em que é dividido: (SPENCE *et al.*, 1997)

- Topo: é a parte superior do alto-forno, por onde a carga é carregada e por onde os gases são coletados para serem conduzidos ao sistema de limpeza de gás;

- Cuba: possui um formato troco-cônico, com maior diâmetro na parte inferior e compreende a maior região volumétrica do alto-forno. O formato é consequência do aumento de espaço necessário para compensar a expansão da carga devido ao aumento da temperatura. Nessa região ocorrem as principais reações gás/sólido de redução;

- **Ventre:** região acima da rampa, onde os gases se expandem e se distribuem através da zona de amolecimento e fusão;
- **Rampa:** região imediatamente acima das ventaneiras, onde se tem a combustão do coque e a raiz da zona de amolecimento e fusão. O formato tronco-cônico invertido, ajuda na sustentação da carga no interior do alto-forno;
- **Cadinho:** região inferior do alto-forno onde o material líquido (gusa e escória) é armazenado antes de ser vazado. Tem-se a presença de líquidos, sólidos e gases, com a ocorrência de algumas reações. No cadinho, o gusa e a escória se separam por diferença de densidade.

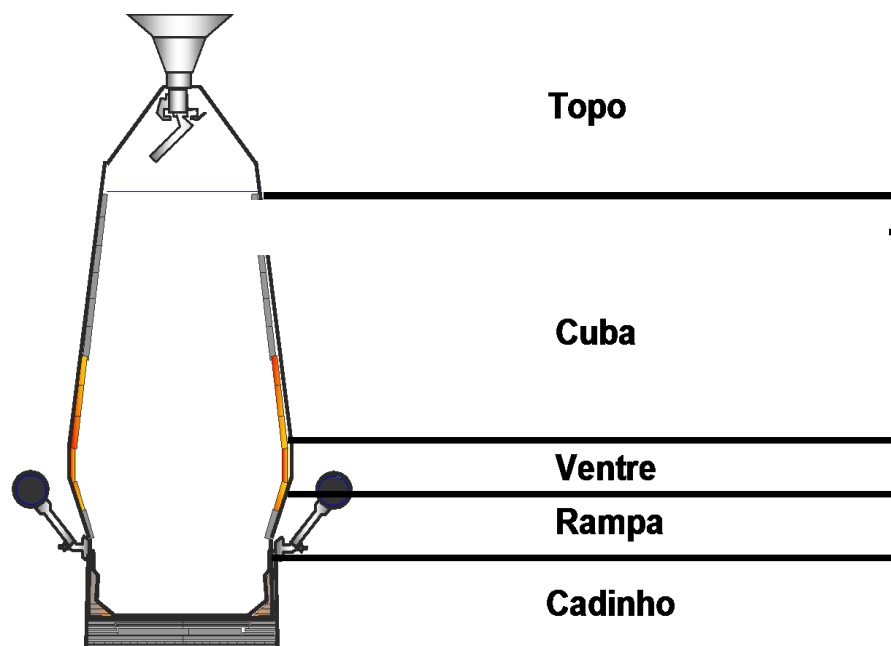


Figura 3.1: Principais partes do alto-forno (GUIMARÃES, 2003)

3.1.1- Princípio de Funcionamento

O ar soprado pelas ventaneiras reage com o coque e o carvão gerando o gás redutor CO e calor. Na região inferior do alto-forno, os gases em temperaturas superiores a 2.000°C fundem a carga metálica e a escória. Esse gás redutor em contato com as fontes de ferro promove a redução dos óxidos. (SPENCE *et al.*, 1997)

A Figura 3.2 ilustra o princípio de funcionamento do alto-forno.

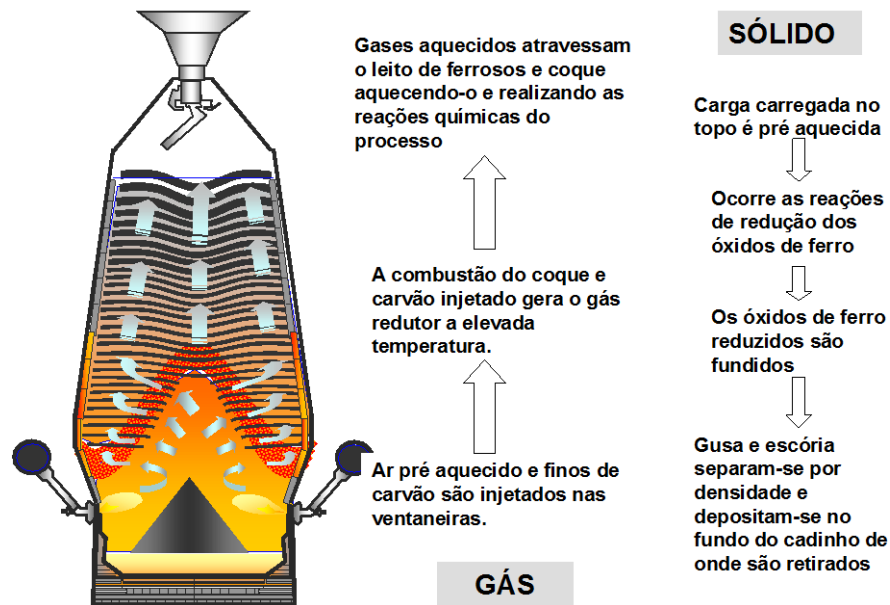


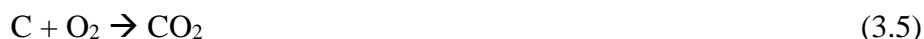
Figura 3.2: Descrição do processo de contra corrente (GUIMARÃES, 2003)

As principais reações decorrentes da redução do minério de ferro no alto-forno são representadas pelas equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4: (ZENG *et al.*, 2010)



Portanto, a redução do minério de ferro ocorre a partir de uma série de reações sequenciais, que gradualmente diminuem o grau de oxidação do ferro até que este atinja a condição de ferro metálico.

A geração dos gases redutores, essenciais para o aquecimento da carga e redução dos óxidos de ferro, ocorre basicamente através das seguintes reações de combustão e gaseificação: (ZENG *et al.*, 2010)



A reação 3.5 é exotérmica, portanto, libera calor para o alto-forno, enquanto que a reação 3.6, formadora do gás redutor, CO, ocorre somente em altas temperaturas ($> 950^\circ\text{C}$ para alto-forno a coque) e se caracteriza pela absorção de calor (endotérmica).

O coque é o combustível e agente redutor para o processo de redução dos óxidos de ferro. Ele também age como “espaçador”, suportando a carga e criando espaços apropriados de modo a garantir um bom escoamento dos gases e dos materiais fundidos. Para que se consiga esse papel de “espaçador”, exige-se do coque baixa reatividade e alta resistência mecânica de maneira que não se degrade à medida que o mesmo desce do topo até a zona inferior do alto-forno.

O minério de ferro granulado, a pelota e o sinter são as fontes de óxidos de ferro das quais o metal (Fe) é extraído no alto-forno. Essas matérias-primas trazem também “impurezas”, principalmente Al_2O_3 , CaO , SiO_2 , MgO , que fundidas formarão a escória que se dirige ao cadinho juntamente com o gusa. (ARAÚJO, 1997)

Da proporção dos quatro óxidos citados depende sua fluidez, ponto de fusão, capacidade de dessulfurar o gusa, “eliminar” álcalis (K_2O e Na_2O) e óxido de zinco carregados no alto-forno.

O carregamento de fundentes (quartzo, calcário, serpentinito e dolomita) no alto-forno, tem como objetivo conferir uma proporção adequada dos quatro principais componentes da escória (CaO , MgO , SiO_2 e Al_2O_3).

A tendência atual é minimizar ou mesmo eliminar o carregamento dos fundentes no alto-forno. Para isso, os aglomerados de minérios (sinter e pelota) já possuem uma percentagem dos 4 óxidos (CaO , MgO , SiO_2 e Al_2O_3) de modo a formar uma escória com a proporção adequada dos mesmos.

Na Figura 3.3 são apresentados as matérias-primas e produtos do alto-forno.

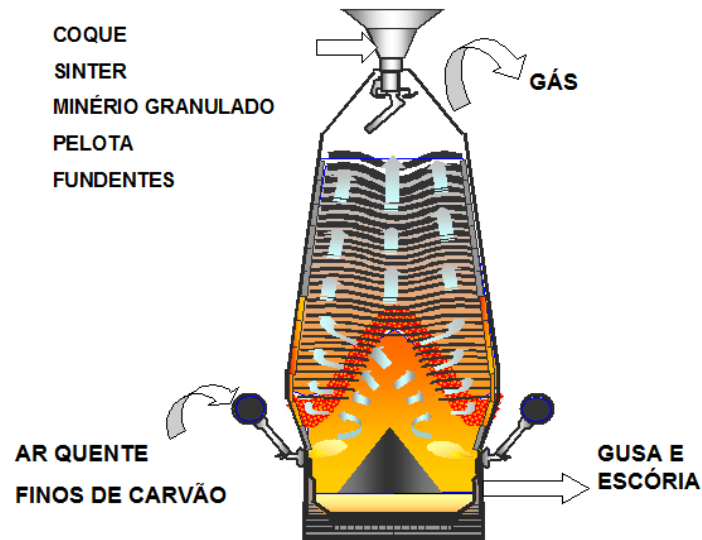


Figura 3.3: Matérias-primas e produtos do alto-forno (GUIMARÃES, 2003)

3.2- Modelo Operacional do Alto-Forno

As contribuições teóricas mais importantes começaram com Kitaev, na década de 50, passaram pelos franceses (IRSID - Institut de Recherches de la Siderurgie) em torno de 1960 e culminaram com os trabalhos de dissecação dos altos-fornos pelos japoneses a partir de 1968. Esses embasamentos, associados ao desenvolvimento de equipamentos e de instrumentações, permitiram uma constante evolução no controle do processo. (CASTRO, 2002)

Os modelos termoquímicos desenvolvidos nos dias de hoje, tem como base o modelo desenvolvido no IRSID e do conhecimento adquirido pelos japoneses através da dissecação de altos-fornos a coque.

A grande contribuição de Kitaev foi estabelecer os perfis de temperatura dos gases e sólidos no alto-forno através de estudos teóricos e de sondagens realizadas em reatores industriais (RICKETTS, 2000). A Figura 3.4 mostra esse perfil de temperatura.

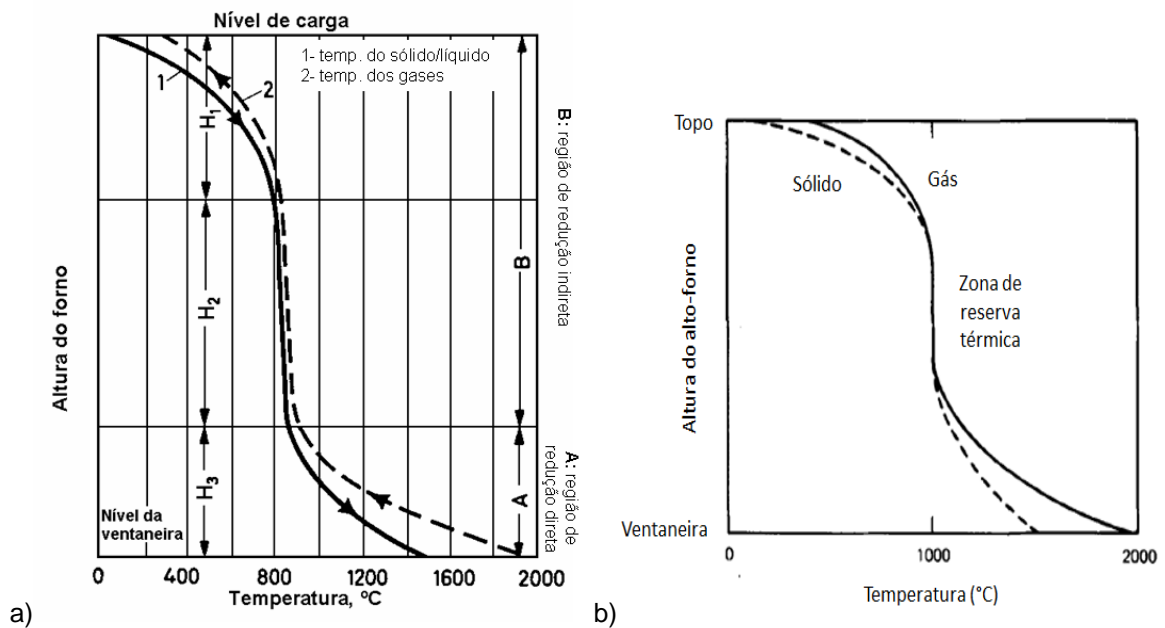


Figura 3.4: Perfil de temperatura dos gases e sólidos/líquidos a) KITAEV *et al.*, 1967 apud CASTRO, 2002; b) TURKDOGAN, 1978

Foi observado que o alto-forno tem três regiões distintas: as regiões superior (H1) e inferior (H3) de intensas trocas térmicas e a região intermediária (H2) de baixas ou nenhuma troca térmica. (CASTRO, 2002)

A região intermediária (H2) é conhecida como zona de reserva térmica e a causa de sua existência é a reação de “*solution loss*” ou “*Boudouard*”: (JINDAL *et al.*, 2007)



Essa reação possui duas características muito importantes:

- 1) é muito endotérmica e, por isso, quando ocorre muito calor é consumido;
- 2) tem uma alta energia de ativação e, por isso, existe uma temperatura bem definida de início da reação. Essa temperatura depende da reatividade do termo-redutor, no caso do coque, é aproximadamente 950°C.

Essas características da reação de “*solution loss*” explicam o porquê do surgimento da zona de reserva térmica dentro do alto-forno. Os gases saem da zona de combustão reduzindo os óxidos e fornecendo calor para o aquecimento de líquidos e sólidos e para as reações endotérmicas

(principalmente, a “*solution loss*”). Com isso, a temperatura dos gases vai diminuindo à medida que eles sobem no alto-forno (região H3). No caso do alto-forno a coque, quando os gases chegam a 950°C a reação de “*solution loss*” deixa de ocorrer. Nesse momento, os gases não têm mais uma reação muito endotérmica para ceder calor e só cederá calor quando encontrarem uma carga mais fria. Como a carga já vem sendo aquecida na parte superior do reator, surge à zona de reserva térmica (região H2), onde os gases e sólidos são mantidos na mesma temperatura (950°C). Somente quando os gases encontrarem uma carga com temperaturas menores do que 950°C é que existirão novas trocas térmicas entre gases e sólidos (região H1). (CASTRO, 2002)

A partir do conhecimento e entendimento dos perfis de temperatura e da reação de “*solution loss*”, os franceses do IRSID desenvolveram, em 1960, um “modelo operacional do alto-forno”. (CASTRO, 2002)

Nas regiões H1 e H2 (zona de reserva térmica) a reação de “*solution loss*” não ocorre e o carbono não é consumido. Na região H3, além de ser consumido pela reação de “*solution loss*”, o carbono se incorpora ao gusa e reage com o oxigênio do ar na saída das ventaneiras. Isso permitiu a divisão do alto-forno em duas regiões com características bem distintas:

- zona de preparação (H1 e H2): onde o carbono não reage, constituindo-se um material inerte;
- zona de elaboração (H3): onde o carbono reage com o CO₂, restituindo o poder redutor do gás, incorpora ao gusa e reage com o oxigênio na saída das ventaneiras.

A existência de uma temperatura crítica (temperatura da “zona de reserva térmica”) abaixo da qual o carbono não reage com os gases é fato marcante, pois o carbono é o maior componente do custo do gusa. É importante, portanto, transferir o máximo possível de oxigênio da carga metálica para os gases antes que tal temperatura crítica seja ultrapassada, ou seja, antes que o carbono comece a ser consumido.

Zona de Preparação

A zona de preparação se localiza em temperaturas inferiores a temperatura na qual a reação de “*solution loss*” ocorre. Dessa maneira, se o carbono da carga não reage nesta região, ela pode

ser tratada como um reator no qual a carga é secada, pré-aquecida e pré-reduzida pelos gases ascendentes. (SAIZ, 1999)

Um alto-forno está operando idealmente quando se tem as seguintes condições na zona de preparação:

- a) trocas térmicas gás-sólido perfeitas;
- b) toda hematita (Fe_2O_3) é reduzida ao estado de wustita ($\text{FeO}_{1,05}$);
- c) os gases entram na zona de preparação em equilíbrio termodinâmico com o ferro e a wustita.

A terceira premissa (“c”) é assumida como verdadeira sempre, exceto no caso de operação bastante irregular. Portanto, a partir do conhecimento da reatividade do termo-redutor e, por consequência, do estabelecimento da temperatura da zona de reserva térmica, é possível calcular a relação de equilíbrio termodinâmico dos gases que saem da zona de elaboração e entram na zona de preparação.

Para o caso do coque, assumindo a temperatura da zona de reserva térmica como sendo 950°C e utilizando os dados termodinâmicos de CARVALHO *et al.* (1977), as relações de equilíbrio entre CO/CO_2 e $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ são:

$$\left(\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2} \right)_{\text{equilíbrio Fe-FeO}_{1,05}, 950^\circ\text{C}} = 2,35 \quad (3.8)$$

$$\left(\frac{\text{H}_2}{\text{H}_2\text{O}} \right)_{\text{equilíbrio Fe-FeO}_{1,05}, 950^\circ\text{C}} = 1,61 \quad (3.9)$$

Com relação à premissa “b”, é definido um índice, chamado de DESVIO DE RIST ou FATOR ÔMEGA, que é calculado e que define a condição de redução da carga metálica na zona de preparação. A sua definição é: (CASTRO e TAVARES, 1998)

$$\omega = (\text{O/Fe})_{\text{passa para a zona de elaboração}} - 1,05 \quad (3.10)$$

onde:

ω = Desvio de Rist ou fator ômega;

$(O/Fe)_{\text{passa para a zona de elaboração}}$ = relação de átomos de oxigênio sobre átomos de ferro da carga metálica que passa para a zona de elaboração.

Se a carga metálica do alto-forno for composta somente de Fe_2O_3 e esse óxido for todo reduzido para wustita ($FeO_{1,05}$) na zona de preparação, o fator ômega será igual a:

$$\omega = 1,05 - 1,05 = 0 \quad (3.11)$$

Do mesmo modo, se o Fe_2O_3 não sofrer nenhuma redução na zona de preparação, o fator ômega será igual a:

$$\omega = (3/2) - 1,05 = 0,45 \quad (3.12)$$

Logo, o fator ômega varia de zero a 0,45, sendo zero a melhor condição e 0,45 a pior. O fator ômega pode ser calculado através da informação da análise do gás de topo do alto-forno. Como as relações CO/CO_2 e H_2/H_2O que entram na zona de preparação são conhecidas, a comparação desses valores com as relações dos gases de topo permitem a avaliação da extensão da redução dos óxidos e, por consequência, do valor do fator ômega.

A Figura 3.5 mostra um diagrama de equilíbrio Fe-C-O com a composição média dos gases ao longo do alto-forno. O ponto "A" na Figura 3.5 equivale ao gás saindo das ventaneiras. Os gases ao encontrarem o carbono tendem ao equilíbrio C-CO-CO₂ ($C_{(s)} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$) e ao encontrarem o minério tendem ao equilíbrio Fe-FeO. O gás que entra na zona de preparação e cuja composição é representada pelo ponto "B", está localizado exatamente sobre a linha de equilíbrio Fe-FeO. Dentro da zona de reserva térmica, onde a temperatura é constante, o gás, ao reduzir o minério, atinge o ponto "C". Como a linha "B-C" está localizada no campo de estabilidade da Wustita, se houver condições cinéticas favoráveis, o produto da zona de preparação é a wustita. O gás, continuando sua ascendência no alto-forno, começa outra vez a resfriar a partir do ponto "C", estando ainda sobre o campo de estabilidade da wustita. Ao atingir o ponto "D" o gás volta a penetrar no campo de estabilidade do ferro havendo condições cinéticas favoráveis, pode ser produzida alguma quantidade de ferro. O ponto "E" fornece a

composição dos gases no topo do alto-forno. (CAMPOS, 1984 e BERNASOWSKI *et al.*, 2011)

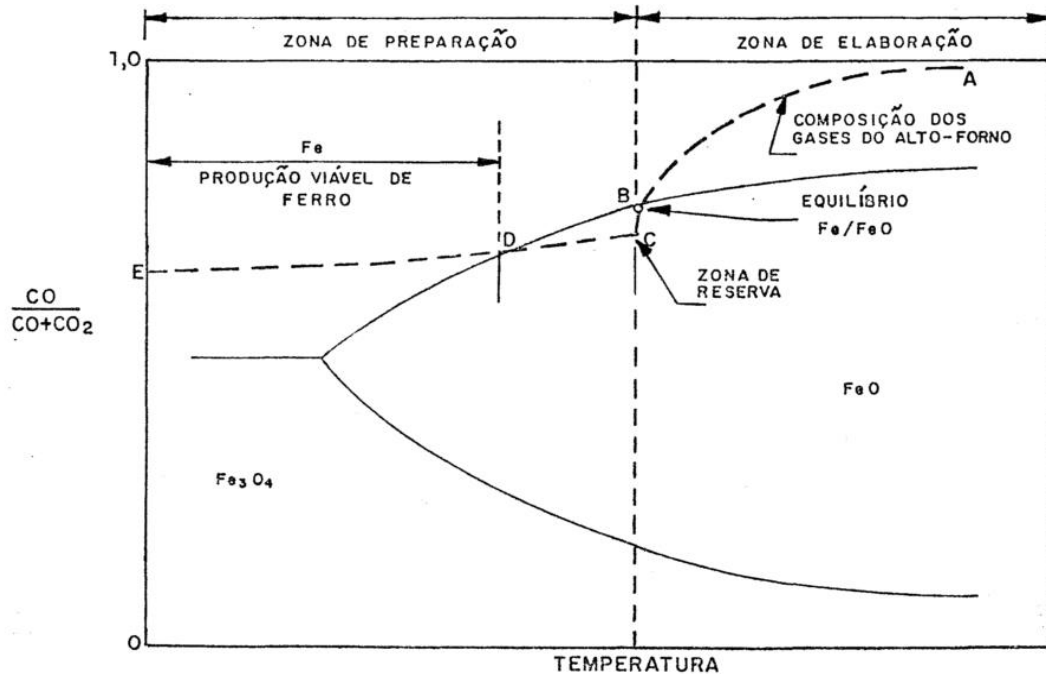


Figura 3.5: Diagrama de equilíbrio Fe-C-O mostrando o posicionamento dos gases do alto-forno e das zonas de preparação e elaboração (CAMPOS, 1984).

O consumo específico de carbono (kg/t gusa) é muito afetado pelo valor do fator ômega. Para uma operação com baixo consumo específico de carbono, menor deve ser o fator ômega, isto é, o processo tem que obter uma boa eficiência de redução dos óxidos de ferro na zona de preparação. Essa eficiência é afetada por quatro fatores: (CASTRO e CAMPOS, 1984)

- a) contato gás-sólido na zona de preparação;
- b) qualidade da carga metálica;
- c) temperatura da zona de preparação;
- d) tempo de residência da carga metálica na zona de preparação.

Um bom contato gás-sólido está associado à distribuição de carga, ao tamanho das partículas e à própria qualidade da carga metálica, com relação à sua degradação. A carga metálica deverá ter também boa redutibilidade, para facilitar as reações de redução.

Com relação à temperatura da zona de preparação, quanto maior for o seu valor e mais tempo a carga metálica ficar em altas temperaturas, a velocidade das reações de redução será maior, contribuindo para um fator ômega menor. Um alto-forno a coque tem uma maior temperatura na zona de preparação, em torno de 950°C, enquanto que para um alto-forno a carvão vegetal essa temperatura chega a 800°C. Portanto, com relação a esse fator, um alto-forno a coque tem vantagem sobre o alto-forno a carvão vegetal. Isso explica também porque um combustível menos reativo é melhor para o alto-forno. A Figura 3.6 ilustra a correlação entre o fator ômega e o consumo de combustível no alto-forno.

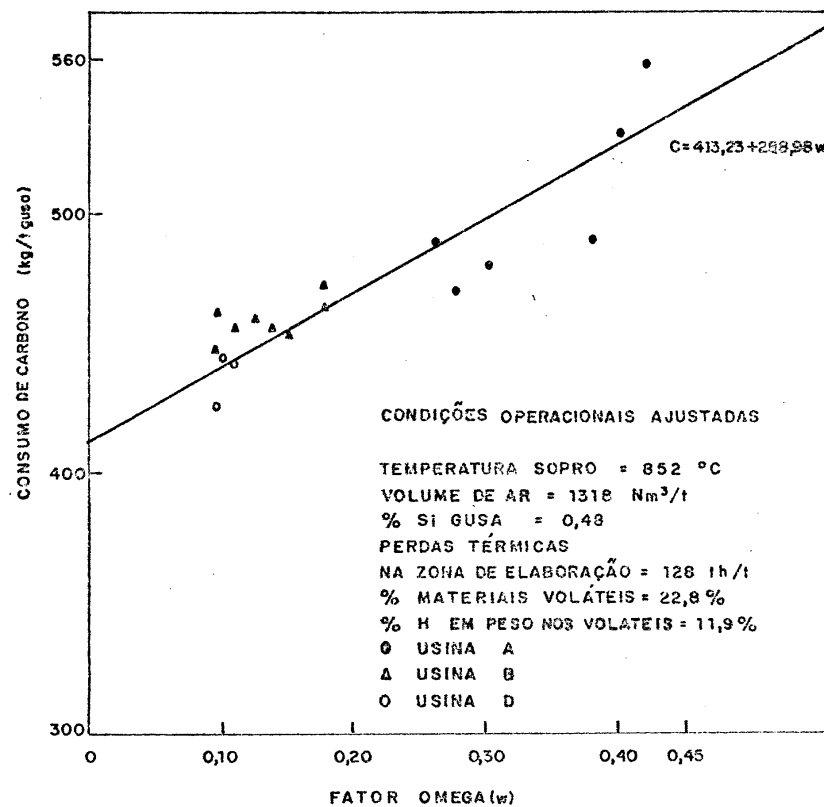


Figura 3.6: Consumo de carbono vs fator ômega; ω (CASTRO e TAVARES, 1998)

Zona de Elaboração

A principal característica da zona de elaboração é que o carbono reage. Portanto, todo encargo térmico transferido para ela é traduzido num aumento de consumo específico de carbono. (CASTRO e TAVARES, 1998)

Na zona de elaboração os gases entram na temperatura de chama, através da zona de combustão, e saem na temperatura em que a reação de “*solution loss*” do carbono da carga para de ocorrer (950°C para alto-forno a coque). (SAIZ, 1999)

O carbono nessa zona reage com o CO₂, incorpora ao gusa e é queimado na zona de combustão, gerando os gases redutores a altas temperaturas. As reações de redução que não ocorrerem na zona de preparação irão acontecer na zona de elaboração, só que com consumo de carbono.

A Figura 3.7 resume do modelo operacional do alto-forno. Qualquer entrada de calor na zona de elaboração (por exemplo, temperatura do ar soprado mais alta) diminui o consumo específico de carbono, mas qualquer entrada de calor adicional na zona de preparação apenas modifica o perfil de aquecimento da carga, o que pode ou não contribuir para uma diminuição do fator ômega. Por exemplo, o carregamento de uma carga pré-aquecida no topo do alto-forno faz com que o aquecimento dessa mesma carga seja mais rápido, isto é, ela ficará mais tempo em temperaturas elevadas. Isso contribui para uma melhor redução dos óxidos na zona de preparação, mas se a carga já tiver uma ótima qualidade e reduzir com eficiência, mesmo com níveis de temperaturas menores, o pré-aquecimento em nada contribuirá para um melhor desempenho dessa zona. (CASTRO e TAVARES, 1998)

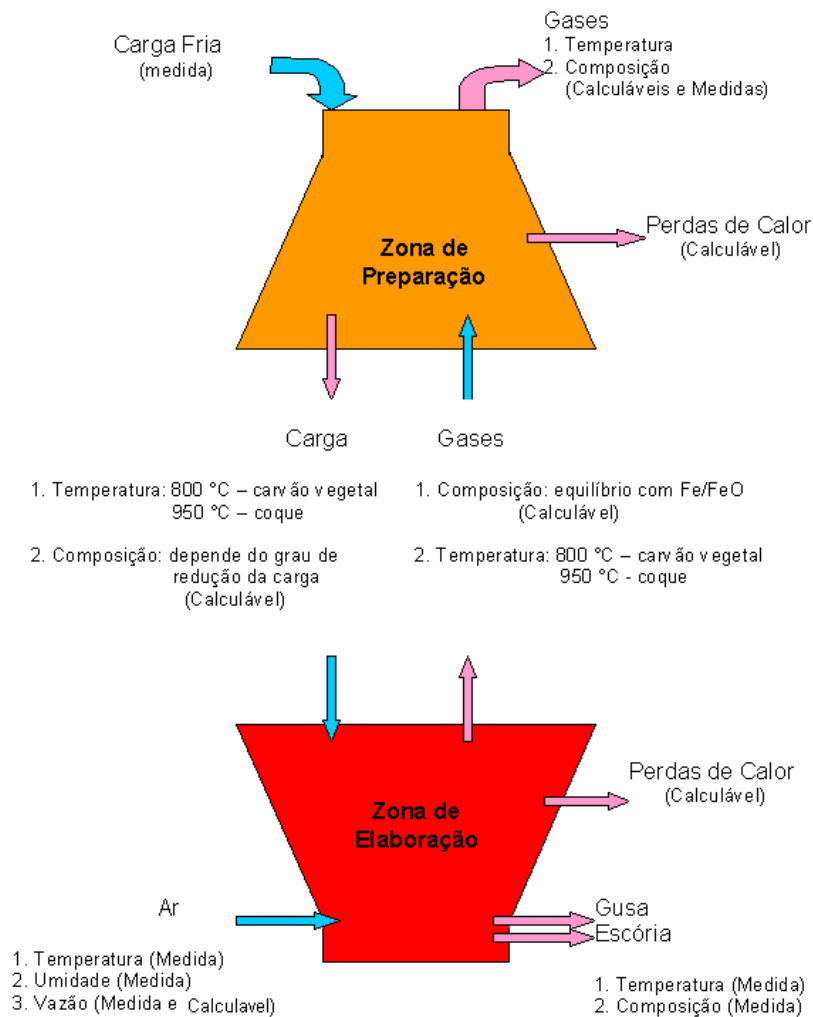


Figura 3.7: Esquema do modelo operacional do alto-forno (CASTRO, 2002)

Outro fato importante é que o gás de topo de um alto-forno sempre terá CO em sua composição. Isso porque o carbono, além de redutor, é o combustível do processo. E é necessária uma quantidade maior de carbono para gerar calor do que a quantidade necessária para reduzir todos os óxidos de ferro. Portanto, na zona de elaboração são gerados gases suficientes (tanto em termos térmicos, quanto de poder de redução) para o aquecimento e redução da carga na zona de preparação. Se isso não acontece é porque o processo pode ser melhorado. O sensor principal para detectar a eficiência de um alto-forno é a composição e a temperatura do gás de topo.

Os conceitos responsáveis pelo desenvolvimento do modelo operacional do alto-forno são totalmente válidos até hoje e devem ser utilizados para um bom controle de processo. (MEDEIROS, 2006)

3.3- Aspectos Internos do Alto-Forno

A estrutura interna dos altos-fornos só ficou bem conhecida com as experiências de dissecação, conduzidas pelos japoneses. (KANBARA, 1977 apud CASTRO e TAVARES, 1998)

A partir dessas experiências, o alto-forno foi dividido em três zonas distintas:

- a) zona granular: zona onde a carga metálica (síniter, e/ou pelota e/ou minério), o termo-redutor (carvão vegetal ou coque) e os fundentes descem sólidos em contra corrente com os gases;
- b) zona de amolecimento e fusão: região onde ocorre o amolecimento e fusão da carga metálica;
- c) zona de gotejamento: zona onde o metal e a escória, já líquidos, escoam através de um empilhamento de coque (ou carvão vegetal) em contra corrente com os gases. A zona de gotejamento engloba o homem morto e a zona de combustão. O homem morto é a coluna de coque por onde o metal e a escória gotejam e que não alimenta a zona de combustão. Ele se estende até o cadinho, podendo ou não encostar na base do cadinho;
- d) zona de combustão: região em frente das ventaneiras, onde ocorre a queima do C do redutor (coque, carvão) pelo oxigênio do ar soprado. Nesta região irá formar o gás redutor (CO e H_2) a partir da umidade do ar soprado, hidrocarbonetos do carvão injetado e carbono do coque. A Figura 3.8 mostra a composição do gás gerado em função do comprimento da zona de combustão segundo JINDAL *et al.* (2007). Como mostra a Figura 3.8, todo CO_2 reage com o carbono para formar o gás CO .

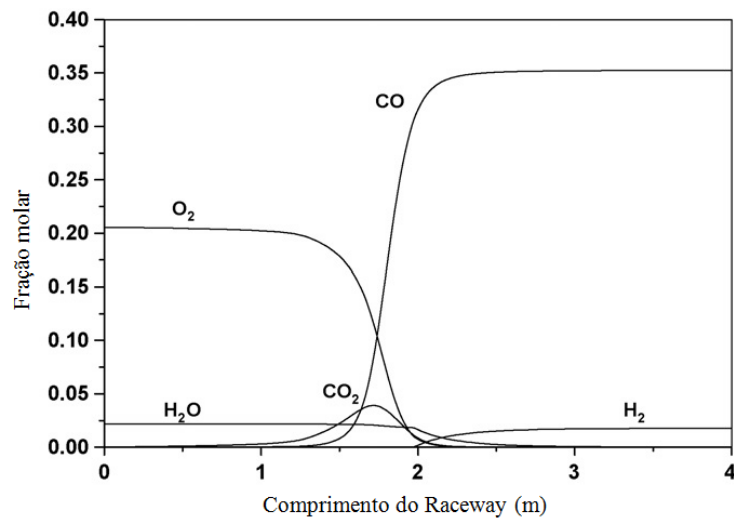


Figura 3.8: Composição do gás gerado na zona de combustão em função do comprimento da zona de combustão (raceway) segundo JINDAL *et al.* (2007)

A Figura 3.9 mostra, de maneira esquemática, a divisão do alto-forno em várias zonas.



Figura 3.9: Esquema da região interna do alto-forno, mostrando as várias zonas (CASTRO e TAVARES, 1998)

Foi verificado que as camadas de minério e coque, da zona granular, mantinham-se inalteradas até o início do amolecimento. A Figura 3.10 mostra o estado das camadas de carga no Alto-Forno 4 de Kukioka (dissecado em 1971). (CASTRO e TAVARES, 1998)

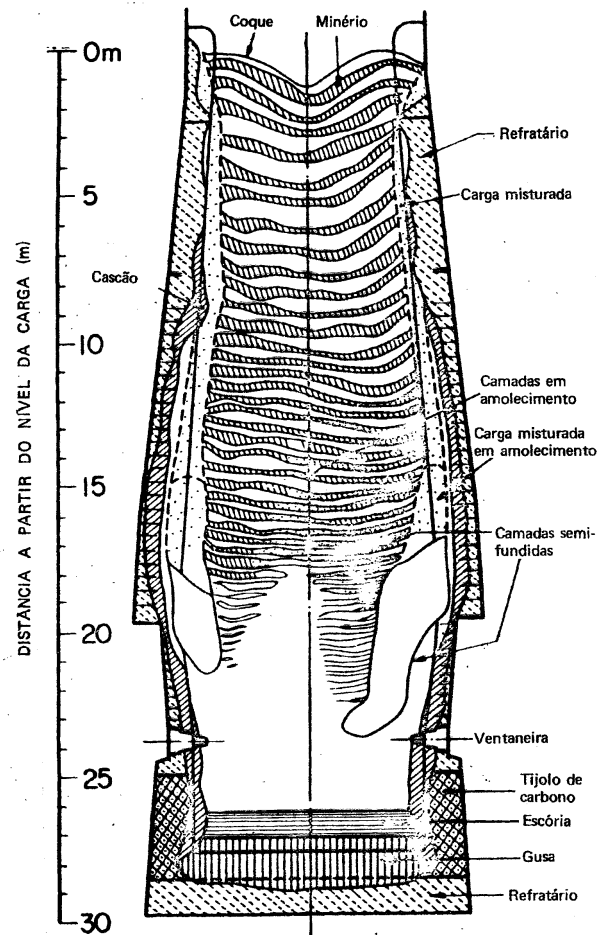


Figura 3.10: Estado das camadas de carga na zona granular do alto-forno 4 de Kukioka (KANBARA, 1977 apud CASTRO e TAVARES, 1998)

Essa divisão não invalida o modelo operacional dos franceses que divide o alto-forno em zona de preparação e zona de elaboração. Como a zona de amolecimento e fusão começa em torno de 1.050°C e a zona de preparação termina a 950°C (coque), a zona de preparação está toda contida na zona granular e a zona de elaboração é composta por uma parte da zona granular, toda a zona de amolecimento e fusão e toda a zona de gotejamento. A Figura 3.11 ilustra essas divisões ao longo de duas regiões do alto-forno: junto à parede e no centro.

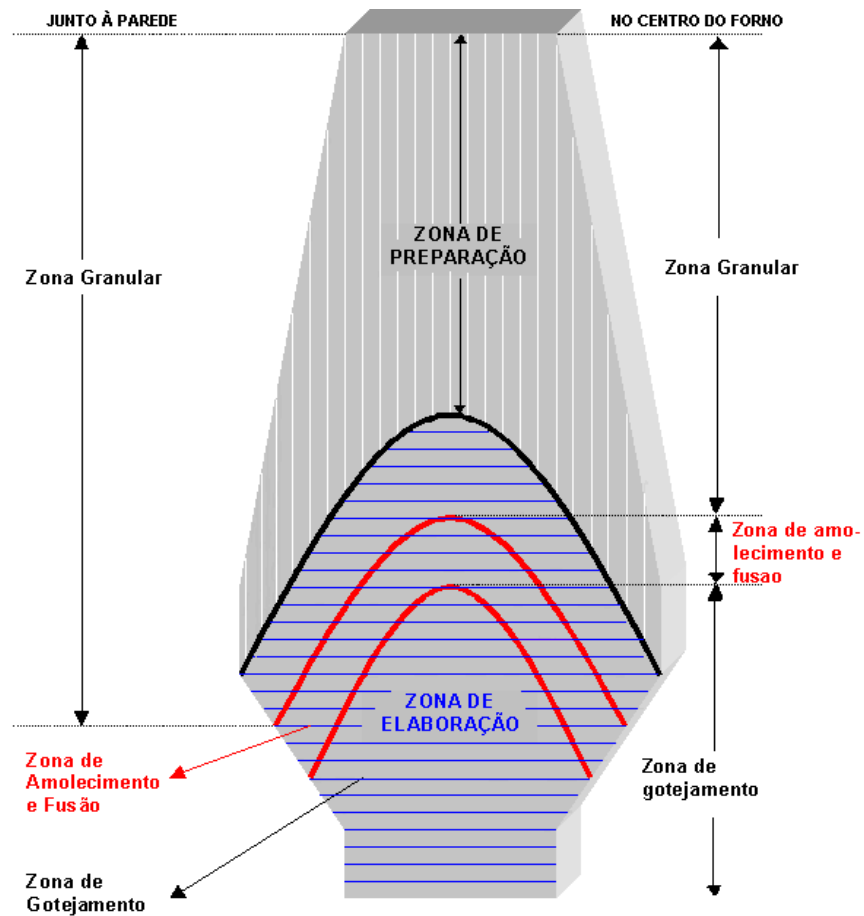


Figura 3.11: Esquema de divisão do alto-forno: modelo operacional e dissecção (CASTRO, 2002)

A zona de amolecimento e fusão tem um papel muito importante na operação do alto-forno, pois nela é realizada toda a fusão do metal e da escória primária e ocorre a maior perda de carga (maior resistência ao escoamento gasoso) no alto-forno (Figura 3.12). Pela Figura 3.12 é observado que na zona de amolecimento e fusão o escoamento gasoso é feito em grande parte pelas camadas de coque, que apresentam uma permeabilidade muito melhor do que as camadas de carga metálica em amolecimento.

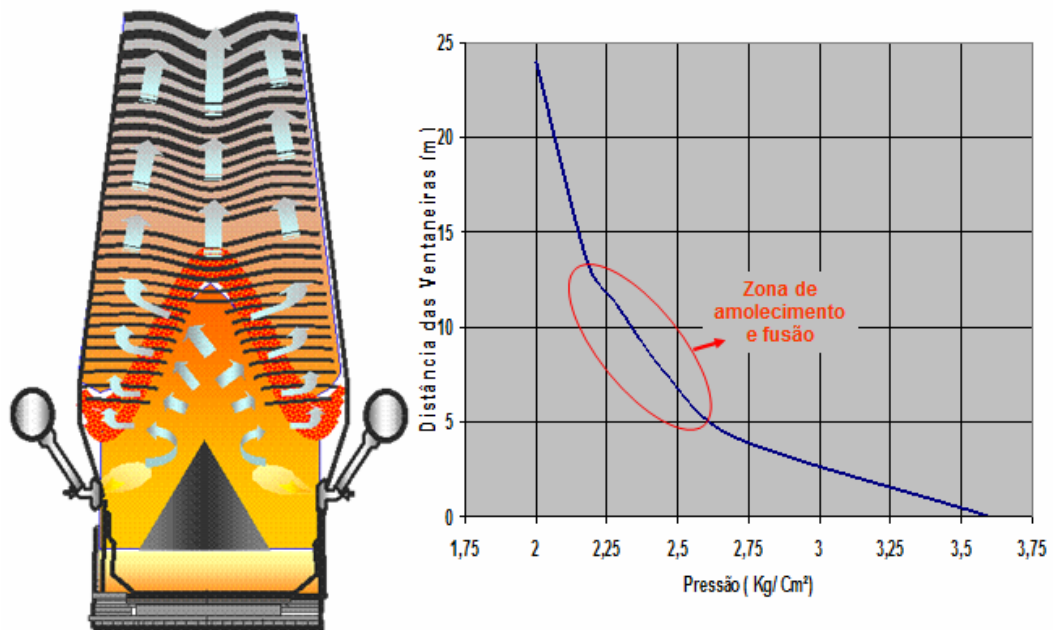


Figura 3.12: Perda de carga no alto-forno (GUIMARÃES, 2003)

Um importante índice calculado para análise do processo do alto-forno é chamado de fator alfa (α). Este índice representa a razão térmica sólido/gás e afeta a posição e formato da zona de amolecimento e fusão. O fator alfa é definido pela equação 3.13: (CASTRO e TAVARES, 1998)

$$\text{Fator Alfa} = \frac{G_s \times C_{ps}}{G_g \times C_{pg}} \quad (3.13)$$

Onde:

G_s e G_g = Vazão mássica dos sólidos e dos gases, respectivamente (kg/s);

C_{ps} e C_{pg} = Calor específico dos sólidos e dos gases, respectivamente (kcal/kg/°C).

A alteração do fator alfa altera a altura da zona de amolecimento e fusão, alterando assim o estado térmico do alto-forno. Como os valores de calor específico variam pouco no alto-forno, pois os sólidos e os gases sempre são os mesmos, as vazões mássicas de sólidos e gases é que vão determinar as variações do fator alfa. Por exemplo, para uma vazão mássica de sólido constante (produção constante), uma diminuição na vazão mássica dos gases aumentará o fator alfa. Isso na prática acontece quando o consumo específico de carbono (kg/t gusa) diminui. Isto é, um maior ou menor consumo específico de carbono no alto-forno altera a razão térmica

sólido/gás, o que afeta a zona de amolecimento e fusão (Figura 3.13). Com o aumento do fator alfa a zona de amolecimento e fusão abaixa (menor nível térmico do alto-forno). Portanto uma operação com baixo consumo de carbono tende a ter uma zona de amolecimento e fusão mais embaixo e o alto-forno trabalha com níveis térmicos mais baixos. (CASTRO e TAVARES, 1998)

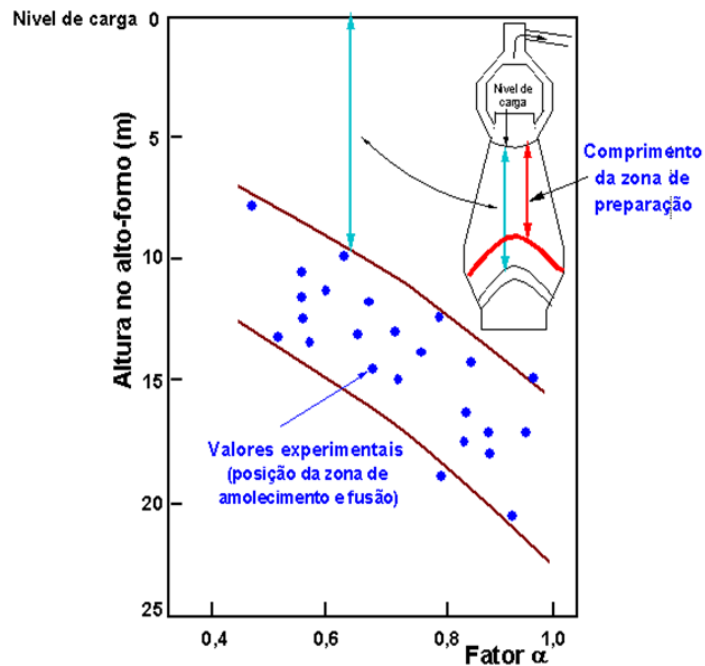


Figura 3.13: Variação da altura da zona de amolecimento e fusão com o fator alfa (TAVARES, 2005)

Analisando a Figura 3.13 observa-se que altos valores de alfa leva a uma altura da zona de amolecimento e fusão mais baixa e zona de preparação mais extensa. Desse modo, tem-se um tempo maior para acontecer a redução dos óxidos de ferro na zona de preparação.

O efeito do fator alfa pode, então, ser resumido da seguinte forma:

- Alfa baixo: níveis térmicos elevados e zona de preparação curta, ou seja, a reação de redução é rápida, entretanto, tem-se pouco tempo para que ela desenvolva;
- Alfa alto: zona de preparação extensa e níveis térmicos baixos, ou seja, tem-se bastante tempo para a reação se desenvolver; contudo, a sua velocidade será baixa.

Em nenhum dos dois casos mencionados acima, as condições de redução são as mais adequadas. Existe um valor de alfa intermediário que maximiza o grau de redução da carga metálica na zona de preparação (fator ômega baixo) e leva a consumos de carbono mais baixo no alto-forno. Isso é confirmado através da Figura 3.14.

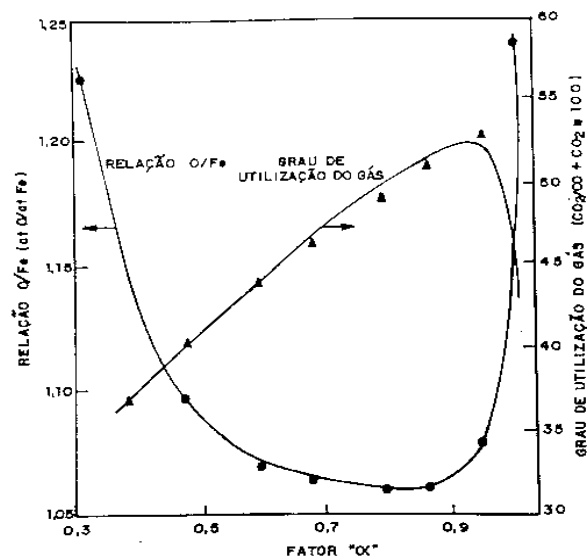


Figura 3.14: Efeito do fator alfa sobre o grau de redução da carga metálica na zona de preparação (CASTRO e TAVARES, 1998)

A Figura 3.15 mostra a posição e formato da zona de amolecimento e fusão para diferentes valores do fator alfa segundo TASHIRO *et al.* (1980) apud CASTRO e TAVARES (1998)

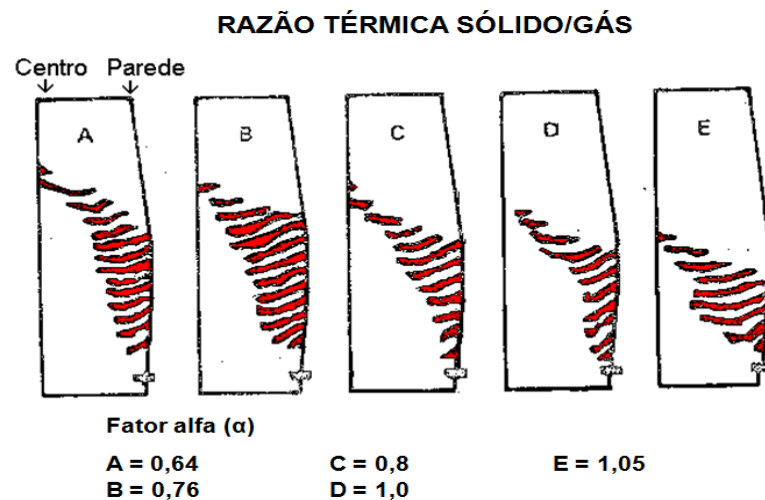


Figura 3.15: Relação entre fator alfa e a forma da zona de amolecimento e fusão segundo TASHIRO *et al.* (1980) apud CASTRO e TAVARES (1998)

3.4- Operação do Alto-Forno

O objetivo da área de redução de uma usina siderúrgica é produzir gusa com segurança ao menor custo e de acordo com a especificação da aciaria. Para atingir esse objetivo, muitos esforços têm sido feitos nos últimos anos, como melhoria da qualidade da matéria-prima, melhoria de equipamentos e instalações e investigações teóricas dos mecanismos do processo.

Especificamente no alto-forno, instrumentos modernos para observação, controle operacional de equipamentos e supervisão da operação por computadores estão sendo instalados. Entretanto, vários fenômenos que ocorrem no interior do alto-forno ainda não são perfeitamente explicados. Por isso, a maioria dos altos-fornos em operação ainda depende, em muitos pontos, da experiência dos operadores. Aí reside a principal dificuldade de se operar um alto-forno. (ZENG *et al.*, 2010)

A operação se apoia, na realidade, em vários dados como:

- Propriedades e composição do gusa e escória;
- Temperatura e composição do gás do topo;
- Pressão de sopro;
- Condição de descida da carga;
- Temperaturas nas paredes do alto-forno;
- Observação da frente da ventaneira (zona de combustão).

Esses dados são usados para avaliação, num esforço para se obter uma operação estável. A estabilidade é um aspecto fundamental na operação do alto-forno, principalmente com a atual tendência de se ter altos-fornos cada vez maiores. E, uma vez iniciada a operação do alto-forno, ela deve se manter praticamente ininterrupta por vários anos. A campanha dos altos-fornos de projetos mais antigos é de 5 a 8 anos. Os altos-fornos mais modernos já possuem campanhas de mais de 20 anos (AF1 da ArcelorMittal Tubarão e AF6 de CHIBA).

A operação do alto-forno pode ser dividida nos seguintes controles (GUIMARÃES, 2003):

- Controle de equipamentos;

- Controle de vazamento de gusa e escória (drenagem cadinho);
- Controle operacional.

Controle de equipamentos

O bom funcionamento dos equipamentos auxiliares é fundamental para se garantir a estabilidade do alto-forno. Os equipamentos da área de corrida (canhões e perfuradores), do carregamento (peneiras e balanças), da distribuição de carga, de refrigeração, regeneradores e limpeza de gás, tem influência direta nos parâmetros operacionais como drenagem do cadinho, permeabilidade da carga, temperatura de sopro entre outros.

Controle de vazamento do gusa e escória (drenagem cadinho)

O controle do nível de líquidos no cadinho é também de fundamental importância na obtenção de uma operação estável do alto-forno. Um aumento no nível de líquidos no cadinho pode resultar na alteração do fluxo gasoso no interior do alto-forno e redução da permeabilidade na rampa. (SPENCE *et al.*, 1997)

Se por algum motivo, o material residual no cadinho aumenta excessivamente, algumas anormalidades operacionais podem ocorrer, tais como: (GAMERO *et al.*, 2006)

- Aumento da pressão de sopro, redução da permeabilidade na parte inferior do alto-forno;
- Arriamentos (descida rápida da carga);
- Engaiolamentos (parada de descida da carga).

A Figura 3.16 mostra a condição do cadinho com baixo nível de líquidos e conseqüentemente boa permeabilidade. A Figura 3.17 mostra a situação contrária, onde se observa alto nível de líquidos no cadinho e pouco espaço para passagem do gás. (TAVARES, 2005)

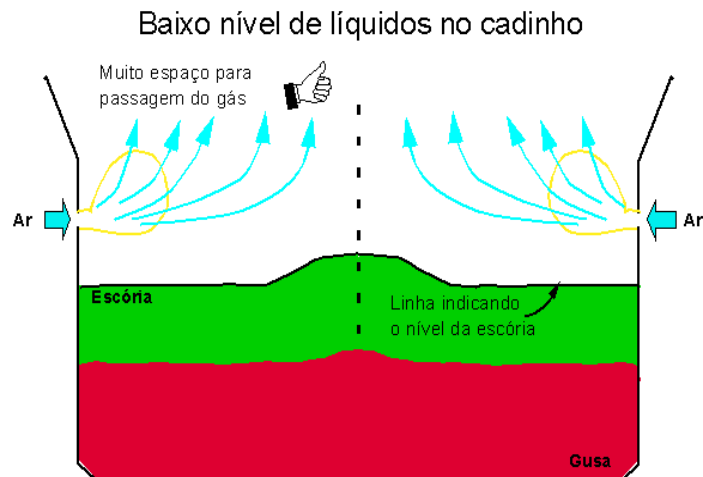


Figura 3.16: Cadinho com baixo nível de líquidos segundo TAVARES (2005)

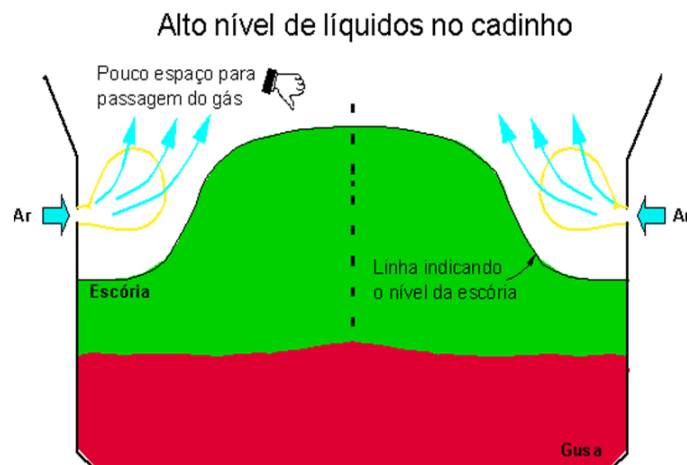


Figura 3.17: Cadinho com alto nível de líquidos segundo TAVARES (2005)

Controle operacional

O controle operacional do alto-forno envolve o conhecimento das reações e formação das zonas no seu interior, de forma a se ter um maior controle para manter a estabilidade do alto-forno.

O controle operacional pode ser dividido nos seguintes itens: (GUIMARÃES, 2003)

- 1) Controle de carga;
- 2) Controle de sopro;
- 3) Controle da qualidade do gusa e escória;
- 4) Controle térmico.

1) CONTROLE DE CARGA:

A “carga” é uma unidade básica do carregamento do alto-forno. É composta de um carregamento de coque e outro de sinter, minérios, pelotas e fundentes. O carregamento de coque de uma carga é denominado base de coque.

Sendo um fator básico do carregamento, a base de coque afeta grandemente a distribuição da carga e o escoamento gasoso; sendo seu ajuste apropriado muito importante. Na zona de amolecimento e fusão as camadas de carga metálica tornam-se pastosas (baixa permeabilidade). Desta forma, as camadas de coque (base de coque) têm influência direta na permeabilidade da carga, pois as “janelas” permeáveis por onde passam os gases dependem do tamanho da base de coque. A Figura 3.18 mostra a passagem do gás pela “janela” de coque na zona de amolecimento e fusão.

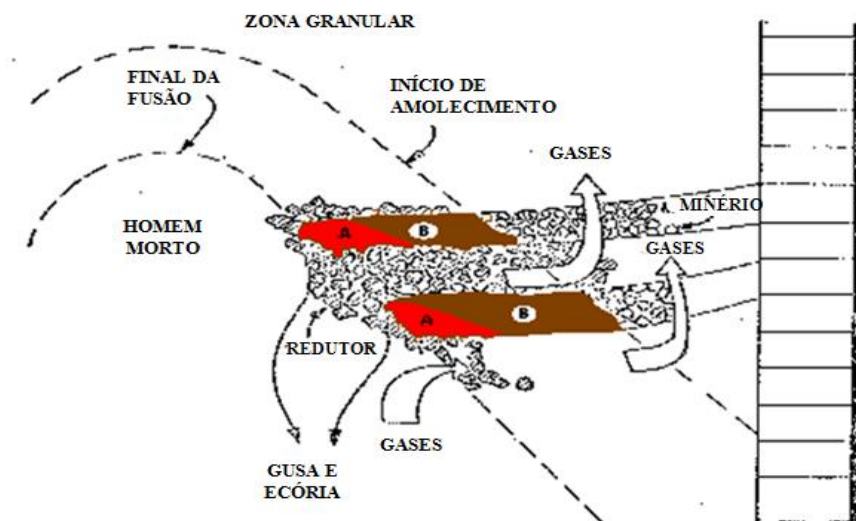


Figura 3.18: Zona de amolecimento e fusão com destaque a passagem do gás pelas camadas de coque segundo CASTRO e TAVARES (1998)

A proporção entre sinter, pelotas e minérios é determinada pelas condições das matérias-primas, suas características químicas e físicas, sua distribuição no alto-forno e pelo seu custo.

As premissas utilizadas no cálculo de carga são: (GUIMARÃES, 2003)

- Basicidade binária da escória (relação CaO/SiO_2):

É determinada em função da necessidade de maior ou menor dessulfuração do gusa e visando favorecer o escoamento da escória. É, portanto, um dado de entrada.

- Silício do gusa:

É um dado de entrada no cálculo de carga em função do nível térmico com que se deseja operar o alto-forno.

- Algumas considerações são feitas para o cálculo de carga: (GUIMARÃES, 2003)

- Todo CaO , MgO e Al_2O_3 carregado pelas matérias-primas vai para a escória;
- Do fósforo carregado, considera-se que 10% vão para a escória sob a forma de P_2O_5 ;
- Considera-se que do manganês carregado, 80% vai para o gusa;
- Do enxofre carregado, considera-se que 85% vai para a escória sob a forma de CaS e os 15% restante vai para o gusa;
- A sílica (SiO_2) para a escória será aquela que sobra após retirada a quantidade necessária para a incorporação do Si do gusa, ou seja, parte da sílica será reduzida a silício e incorporada ao gusa e o restante formará a escória;
- Do ferro carregado, considera-se que 0,5% vai para a escória em forma de FeO e 0,5% se perde na poeira do topo. Portanto, 99% do ferro carregado irá formar o gusa;
- Do óxido de titânio (TiO_2) carregado, considera-se que 75% vai para a escória.

Com as premissas e considerações feitas anteriormente e, tendo-se estabelecidos a base de coque, relação minério/coque e proporção dos constituintes da carga metálica são calculados:

- Massa dos constituintes da carga metálica (sinter, minério, pelotas);
- Análise prevista do gusa (%Mn, S, P e Ti);
- Análise prevista da escória (% Al_2O_3 , MgO , CaO , SiO_2 e TiO_2);
- Massa de escória por carga e por tonelada de gusa produzido (*slag rate*);
- Massa de gusa por carga.

2) CONTROLE DE SOPRO

A vazão de sopro é o parâmetro principal para se garantir a produção prevista, porém, a determinação do seu valor depende de algumas limitações:

- Capacidade do soprador;
- Condições do alto-forno: em função da permeabilidade da carga há restrição quanto ao aumento da vazão de sopro.

Em função desses limites, uma alternativa utilizada é o enriquecimento do ar com oxigênio (O₂). Com o enriquecimento de O₂ é possível aumentar a produção sem elevar a vazão de sopro.

Para definição da vazão de sopro é necessário saber a produção desejada para o alto-forno e o consumo específico de oxigênio (CEO). O CEO depende basicamente do consumo de combustível do alto-forno. Caso tenha alteração significativa no consumo de combustível (*fuel rate*) a vazão de sopro deve ser alterada para ajustar a produção desejada.

O consumo específico de oxigênio em função do *fuel rate* pode ser obtido pela utilização da equação empírica 3.14: (GUIMARÃES, 2003)

$$CEO = (0,71 \times FR - 107) \quad (3.14)$$

Onde:

FR = *Fuel rate* (kg/t)

CEO = Consumo específico de oxigênio (Nm³/t)

Conhecendo o CEO, utiliza-se a equação 3.15 para definir a vazão de sopro:

$$VS = \frac{CEO \times Prod}{\left(1440 \times \left(\frac{21 + E_{O_2}}{100}\right)\right)} \quad (3.15)$$

Onde:

VS = vazão de sopro (Nm³/min)

Prod = produção de gusa diária (t)

E_{O₂} = enriquecimento do ar com oxigênio (%)

3) CONTROLE DA QUALIDADE DO GUSA E ESCÓRIA

Como dito anteriormente, o objetivo da operação do alto-forno é produzir gusa com segurança ao menor custo e de acordo com a especificação da aciaria. A seguir são descritas as ações e influências dos parâmetros operacionais para se ajustar a qualidade do gusa e atender a especificação da aciaria: (GUIMARÃES, 2003)

QUALIDADE DO GUSA

▪ Silício (Si)

O ajuste do teor de silício no gusa é feito pelo ajuste do nível térmico, porém, sofre influências de outros fatores como: (SAIZ *et al.*, 1999)

- Produtividade (altura da zona de amolecimento e fusão);
- % de cinza do coque;
- Qualidade da escória;
- Temperatura de chama;
- Pressão de base;
- Entre outros.

▪ Enxofre (S)

O teor de enxofre no gusa é determinado principalmente pela quantidade carregada, nível térmico, basicidade binária da escória (relação CaO/SiO_2) e volume de escória (*slag rate*). O enxofre absorvido pelo gusa reage com o CaO ao atravessar a camada de escória. Esta reação é endotérmica e conhecida como reação de dessulfuração ($\text{CaO} + \text{S} + \text{C} \rightarrow \text{CaS} + \text{CO}$). Desta forma, o enxofre do gusa diminui com a elevação do nível térmico, aumento da basicidade e volume de escória (maior disponibilidade de CaO).

▪ Manganês (Mn)

Cerca de 80% do Mn carregado é incorporado ao gusa. Quanto maior o nível térmico do alto-forno, maior é a percentagem de MnO reduzido para Mn e incorporado ao gusa. O ajuste do

Mn do gusa é feito alterando o Mn da carga, através do sinter ou carregamento de minério de Mn no alto-forno.

- Fósforo (P)

Quase todo o P carregado na matéria-prima é reduzido e incorporado ao gusa. O ajuste só pode ser feito através do P da carga.

- Titânio (Ti)

Do TiO_2 carregado, 20 a 40% é incorporado ao gusa sob forma de Ti. Parte dele se deposita no fundo do cadinho sob a forma de TiN e TiC. Esses compostos são muito densos e estáveis. Por isso mesmo o TiO_2 é carregado no alto-forno com o intuito de proteger o cadinho contra a erosão. Por outro lado, tanto o gusa como a escória têm sua fluidez piorada quando se usa o carregamento intensivo de TiO_2 , provocando dificuldades no escoamento com possível prejuízo da estabilidade do alto-forno.

- Carbono (C)

O teor de carbono no gusa é de grande importância na qualidade do gusa devido ~80% de toda energia de reações no processo de “refino” do aço vem da oxidação do carbono do gusa. Segundo RAIPALA (2003), o carbono no gusa não atinge o valor de saturação, sendo o carbono de saturação ~0,77% maior que o carbono real conforme Figura 3.19.

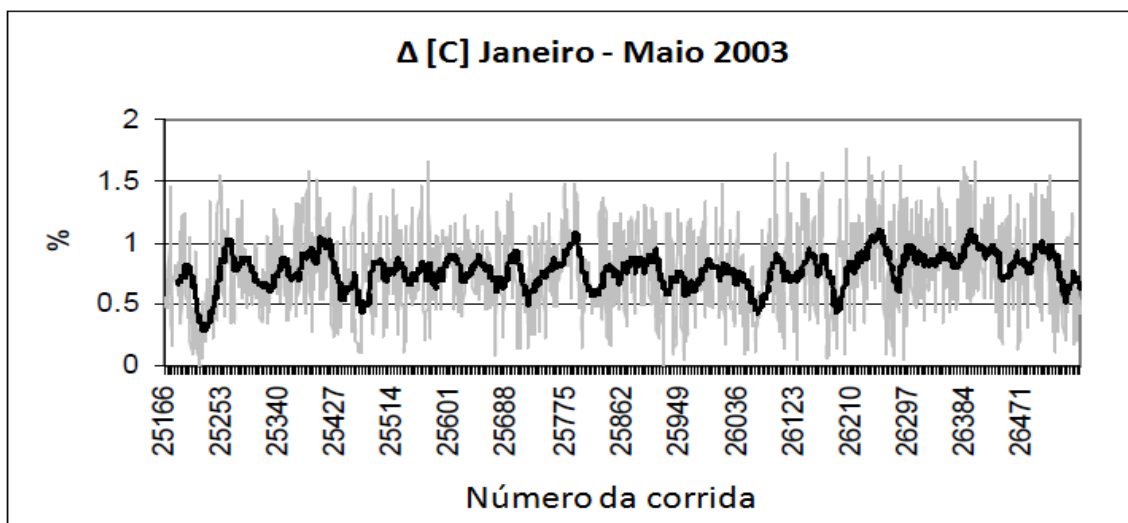


Figura 3.19: Gráfico do $\Delta\%C$ gusa, onde: $\Delta\%C = \%C_{\text{saturação}} - \%C_{\text{real}}$ (RAIPALI, 2003)

Com objetivo de encontrar o valor da diferença entre o carbono de saturação e real, uma análise de regressão foi realizada em diversos altos-fornos da Suécia e Finlândia. A fórmula da equação 3.16 apresenta a incorporação de carbono no gusa: (RAIPALI, 2003)

$$[\%C]_{\text{real}} = k_0 + k_{\theta_{\text{HM}}} \times \theta_{\text{HM}} + k_{\text{Si}} \times [\%Si] + k_{\text{P}} \times [\%P] + k_{\text{S}} \times [\%S] + k_{\text{Mn}} \times [\%Mn] \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde:

k_0 : constante da equação de incorporação do carbono ao gusa;

$k_{\theta_{\text{HM}}}$: constante relacionada a temperatura do gusa;

θ_{HM} : temperatura do gusa ($^{\circ}\text{C}$);

k_{Si} : constante relacionada ao %silício do gusa;

k_{P} : constante relaciona ao %fósforo do gusa;

k_{S} : constante relacionada ao %enxofre do gusa;

k_{Mn} : constante relacionada ao %mangânês do gusa.

Os resultados da regressão são apresentados na Tabela III.1.

Tabela III.1: Resultados da regressão de $\%C_{\text{real}}$ para diferentes altos-fornos (RAPALI, 2003)

AF (planta)	k_0	$k_{\theta_{\text{HM}}}$	k_{Si}	k_{P}	k_{S}	k_{Mn}	R^2	n
A	0.095	0.00306	0.206	-0.594	-5.48	0.629		3000
A	0.405	0.00288	0.171	-0.903	-6.01	0.650	0.580	3359
A	0.181	0.00322	0.156	-4.91	-5.68	0.440	0.584	1679
A	0.423	0.00286	0.174	-0.649	-6.07	0.642	0.607	3359
B	4.36	0.00006	0.606	-4.40	-4.63	0.553		1600
B	1.44	0.00351	0.540	3.96	-1.33	0.819	0.399	1239
C	-0.47	0.00347	0.294	-8.92	-2.14	0.159	0.730	1926
C	1.82	0.00215	0.231	-10.7	-4.59	0.114	0.604	1775
D	3.50	0.00098	0.130	-18.3	-6.53	1.45	0.818	3473

R^2 – grau de correlação

n – número de observações

QUALIDADE DA ESCÓRIA

A composição da escória também deve ser controlada de modo que ela seja suficientemente fluida para se separar facilmente do gusa e possua condições adequadas de promover a dessulfuração. A quantidade de escória gerada no alto-forno é normalmente de 200 a 400kg/t gusa.

- Basicidade binária (CaO/SiO_2)

Como já foi visto, quanto maior a basicidade binária, maior a capacidade de dessulfuração da escória. Porém, com elevação da basicidade binária, seu ponto de fusão torna-se mais alto, piorando a fluidez. Normalmente, a basicidade é de 1,15 a 1,25 para altos-fornos a coque. (CASTRO e TAVARES, 1998)

- Alumina (Al_2O_3)

O teor de alumina afeta fortemente a viscosidade da escória. Quanto maior o teor de Al_2O_3 , maior a viscosidade da escória; normalmente o teor de Al_2O_3 é mantido na faixa de 12,00 a 14,00%.

- Óxido de magnésio (MgO)

O MgO aumenta a fluidez da escória e também contribui para a dessulfuração. Se a percentagem de Al_2O_3 é alta, MgO deve ser adicionado para manter a basicidade quaternária (equação 3.17).

$$B4 = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \text{ entre } 0,95 \text{ e } 1,05 \text{ para altos-fornos a coque} \quad (3.17)$$

4) CONTROLE DO NÍVEL TÉRMICO

Para uma operação estável do alto-forno é necessário manter o nível térmico, dentro de uma faixa fixada. A temperatura e o teor de Si no gusa são geralmente utilizados como índices do nível térmico do alto-forno.

Quando o nível térmico cai a percentagem de Si diminui e a percentagem do S aumenta. Isto ocorre porque as reações de incorporação do Si ao gusa e dessulfuração do gusa são

endotérmicas. Por outro lado, se o nível térmico aumenta muito, a percentagem de Si no gusa também aumentará muito, a sílica (SiO_2) da escória será reduzida, resultando num aumento da basicidade da escória.

Para controle do nível térmico, as ações são tomadas em:

- Temperatura de sopro;
- Umidade de sopro;
- Relação minério/coque (*coke rate*);
- Taxa de injeção auxiliar (carvão, óleo ou gás natural);
- Volume de sopro.

Segundo WRIGHT *et al.* (2009), o controle térmico do processo é crítico para produção de gusa em alto-forno, visto que, a melhora no controle térmico proporciona uma melhor qualidade do produto (gusa) e maior eficiência no processo como redução do consumo total de energia (combustível).

3.4- Controle Térmico do Alto-Forno

Segundo SPENCE *et al.* (1997), para o controle térmico do alto-forno deve-se utilizar a relação entre os parâmetros analisados e o *coke rate*, conforme Tabela III.2.

Tabela III.2: Correlações para controle térmico estudados por SPENCE *et al.* (1997)

Parâmetro	Varição	Efeito no <i>Coke Rate</i> (kg/t)
Temperatura de sopro	+ 100°C	- 8,6
Umidade de sopro	+ 10g/Nm ³	+ 5,9
%Si no gusa	+ 0,1%	+ 5,0
Temperatura do gusa	+ 10°C	+ 4,0
Rendimento gasoso (CO)	+ 1%	- 4,6
Cinza do coque	+ 1%	+ 5,0
Volume de escória	+ 10kg/t	+ 2,5

Para evitar sobreposição de análise e erro na avaliação do operador, é necessário considerar o tempo de resposta de cada parâmetro ou atuação no combustível na temperatura e qualidade do gusa. Este tempo de resposta proposto por SPENCE *et al.* (1997) pode ser observado na Tabela III.3.

Tabela III.3: Tempo de resposta das variáveis na temperatura do gusa (SPENCE *et al.* 1997)

Parâmetro	Tempo para afetar a temperatura do gusa	
	Efeito inicial	Efeito total
Temperatura de sopro	3 horas	5 horas
Umidade de sopro	3 horas	5 horas
Relação minério/coque (M/C)	10 horas	24 horas
Volume de ar soprado	3 horas	5 horas
Rendimento gasoso (CO)	5 horas	7 horas
Perda térmica	3 horas	5 horas
Injeção Auxiliar	3 horas	12 horas

O rendimento gasoso (aproveitamento do CO) ou relação CO/CO₂ citado por SPENCE *et al.* (1997) também foi discutido por HARVEY *et al.* (2014). A Figura 3.20 ilustra a relação entre consumo de coque e CO/CO₂ no gás de topo, onde é possível observar que uma menor relação CO/CO₂ ou maior aproveitamento do gás CO resulta em um menor consumo de coque.

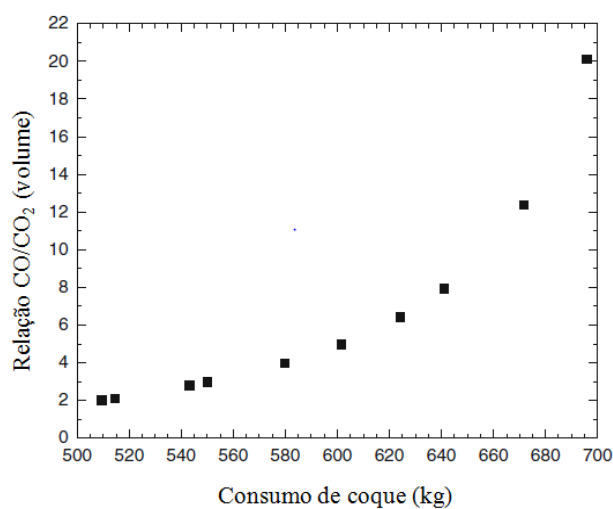


Figura 3.20: Relação entre consumo de coque e CO/CO₂ (HARVEY *et al.*, 2014)

WRIGHT *et al.* (2009) desenvolveram e implementaram um modelo de controle térmico no Alto-Forno 6 de Port Kembla. O objetivo deste modelo foi recomendar alterações na entrada de energia do alto-forno na forma de carvão pulverizado para manter o balanço térmico do sistema. O modelo foi desenvolvido baseado em padrões operacionais existentes, estudos acadêmicos e conhecimento prático. Segundo WRIGHT *et al.* (2009) o modelo não mostrou melhora significativa no controle térmico e foi descontinuado em 2010.

Segundo GUIMARÃES (2003), dentre os fatores que afetam o nível térmico do alto-forno pode-se destacar:

- Fatores relativos ao carregamento;
- Fatores relativos ao sopro;
- Fatores diversos (entrada de água, etc.).

3.4.1- Fatores Relativos ao Carregamento

a) Consumo específico de coque (*coke rate*) – kg/t

Em altos-fornos de grande porte, por ser o tempo de residência da carga grande (tempo de resposta lento) não se utiliza, rotineiramente, a alteração do consumo específico de coque para a correção de distúrbios ocorridos no controle térmico (esta correção é feita normalmente pela taxa de injeção de carvão e/ou pela temperatura de sopro – tempo de resposta rápido). Este recurso só é utilizado quando é verificada uma tendência brusca de variação no nível térmico com risco de resfriamento do alto-forno. (GUIMARÃES, 2003)

b) Participação relativa dos componentes da carga metálica

Como citado anteriormente, a carga metálica do alto-forno pode ser formada por sinter, pelota e minério de ferro granulado em diversas proporções. Esses materiais além de propriedades físicas e metalúrgicas particulares, que afetam a permeabilidade da carga, possuem composições químicas também diferentes. Portanto, a alteração da participação relativa dos mesmos no leito de fusão, acarreta alterações em alguns parâmetros operacionais, e de qualidade, tais como: geração específica de escória (*slag rate*), teores de manganês e fósforo do gusa e de Al_2O_3 e MgO da escória. Quanto maior o volume de escória gerado, maior será o

calor necessário para o seu aquecimento, acarretando num maior consumo específico de carbono. (CASTRO, 2002)

Por outro lado, a alteração destes parâmetros operacionais e de qualidade provocam alterações nas necessidades térmicas do processo. Assim, quando da alteração da participação relativa dos componentes da carga metálica, deve-se alterar o consumo específico de coque de modo a não ocorrer variações térmicas no alto-forno. Pode-se determinar estas compensações térmicas através das correlações obtidas por Flint, que são apresentadas na Tabela III.4.

Tabela III.4: Resumo – Correlações de Flint (GUIMARÃES, 2003)

Variável	Unidade	Variação no <i>Coke Rate</i> (kg/t)
Slag Rate	+/- 1,0 kg/t	+/- 0,150
Mn Gusa	+/- 1,0%	+/- 10,00
P Gusa	+/- 1,0%	+/- 10,00

c) Composição química dos componentes de carga

Assim como a alteração da participação relativa dos componentes da carga metálica, a alteração da composição química dos componentes da carga também leva a alterações em parâmetros operacionais e de qualidade. Portanto, o mesmo procedimento deve ser realizado.

Neste caso, além dos parâmetros citados, podem ocorrer alterações em outros, para as quais as correlações de Flint são apresentadas na Tabela III.5.

Tabela III.5: Resumo – Correlações de Flint (GUIMARÃES, 2003)

Variável	Unidade	Variação no <i>coke rate</i> (kg/t)
Escória da cinza do coque	+/- 1,0 kg/t	+/- 0,60
Enxofre carregado	+/- 1,0 kg/t	+/- 5,00

d) Umidade dos materiais carregados

Ao se carregar o material no alto-forno deve-se processar a correção da massa do material de massa úmida para massa seca. Caso não se processe esta correção, por exemplo, no coque, o nível térmico do alto-forno tenderá diminuir (“esfriar”), uma vez que será carregado menos coque que o requerido pelo processo.

No caso de materiais ferrosos, caso não se processe a correção da umidade, o nível térmico do alto-forno tenderá a aumentar (“esquentar”), uma vez que parte da carga metálica será substituída por água, aumentando assim o *coke rate* real.

e) Distribuição de carga

A distribuição de carga no alto-forno tem um papel primordial no controle da estabilidade de “marcha” e vida útil do alto-forno pelo controle da distribuição do fluxo gasoso no interior do mesmo. Conseqüentemente, tal distribuição irá afetar diretamente no aproveitamento do gás no interior do alto-forno, como pode ser verificado pela Figura 3.21.

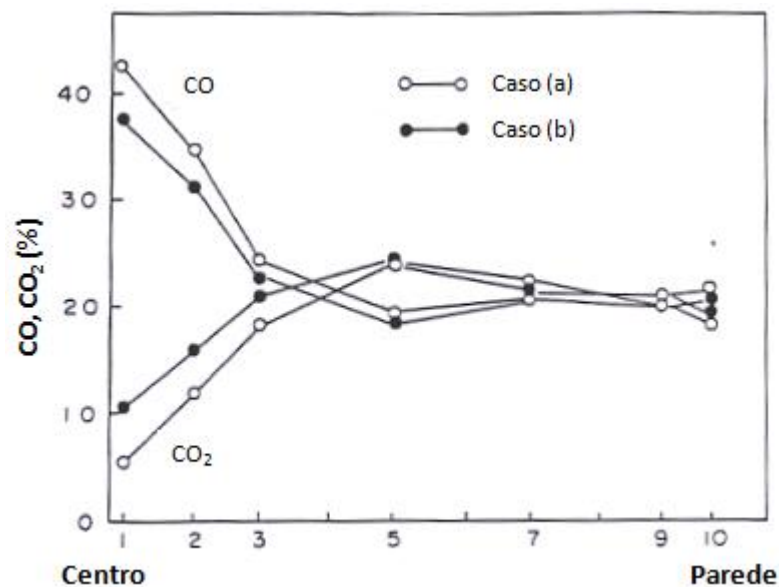


Figura 3.21: Variação do %CO e %CO₂ ao longo do raio do alto-forno para padrões de distribuição de carga distintos (GUIMARÃES, 2003)

Segundo GUIMARÃES (2003), +1% de variação no rendimento gasoso ($\text{CO}_2/(\text{CO} + \text{CO}_2)$) corresponde uma variação de aproximadamente -5kg/t no consumo específico de combustível (*fuel rate*).

Apesar desta grande influência no nível térmico do alto-forno, normalmente a distribuição de carga não é rotineiramente utilizada no controle térmico do processo, uma vez que a mesma tem influência marcante em outros fatores operacionais.

f) Nível de carga

Durante o período em que se opera com o nível de carga abaixo do visado de projeto devido problemas em equipamentos ou arriamentos, ocorre uma grande perda térmica no processo, uma vez que o calor utilizado para aquecimento da carga é perdido através do gás de topo, além da perda em rendimento gasoso. Consequentemente, durante a recuperação de nível, o material é carregado frio no alto-forno em níveis nos quais já deveria estar aquecido. Logicamente ocorre uma alteração nas isotermas do alto-forno, o que traz grandes distúrbios operacionais. (GUIMARÃES, 2003)

No que diz respeito ao nível térmico, deve-se então compensar a perda de calor verificada com adição de coque, durante a recuperação do nível de carga.

Como exemplo de perda de calor durante um abaixamento do nível de carga, considerando apenas a perda relativa ao calor absorvido pelo gás:

Elevação da temperatura de topo de 127°C para 227°C

- Análise do gás do topo: 23% de CO, 19% de CO₂, 2% de H₂ e 56% de N₂;

- Geração específica de gás 1.600Nm³/t gusa.

Tem-se então:

Volume de CO = 0,23 x 1.600 = 368Nm³/t gusa

Volume de CO₂ = 0,19 x 1.600 = 304Nm³/t gusa

Volume de H₂ = 0,02 x 1.600 = 32Nm³/t gusa

Volume de N₂ = 0,56 x 1.600 = 896Nm³/t gusa

Como o volume ocupado por 1mol de gás é de $22,4 \times 10^{-3} \text{m}^3$, tem-se:

Número de moles de CO = $368 / 22,4 \times 10^{-3} = 16.428,57 \text{ moles/t gusa}$

Número de moles de CO₂ = $304 / 22,4 \times 10^{-3} = 13.571,42 \text{ moles/t gusa}$

Número de moles de H₂ = $32 / 22,4 \times 10^{-3} = 1.428,57 \text{ moles/t gusa}$

Número de moles de N₂ = $896 / 22,4 \times 10^{-3} = 40.000,00 \text{ moles/t gusa}$

Na Tabela III.6 é apresentada a quantidade de calor necessária para aquecer 1 mol de cada componente do gás de 127°C para 227°C. (CARVALHO *et al.*, 1977)

Tabela III.6: Quantidade de calor para aquecimento do gás de 127°C a 227°C

COMPONENTE	H° (227 – 127°C) cal/mol
CO	705
CO ₂	1.030
H ₂	700
N ₂	705

Logo, a quantidade de calor perdida através do gás:

$$Q = 16.428,57 \times 0,705 + 13.571,43 \times 1,030 + 1.428,57 \times 0,700 + 40.000 \times 0,705$$

$$Q = 54.760,71 \text{ kcal/t gusa}$$

Portanto, a perda de calor considerando somente a perda pelo gás do topo, quando do abaixamento do nível de carga para as condições citadas anteriormente corresponde a um maior consumo de carbono por tonelada de gusa. (GUIMARÃES, 2003)

Segundo SPENCE *et al.* (1997) deve-se alterar o *coke rate* quando ocorre abaixamento de carga conforme Tabela III.7:

Tabela III.7: Correção do *coke rate* devido abaixamento de carga (SPENCE *et al.*, 1997)

Desvio nível de carga	Elevação no <i>coke rate</i> durante recuperação de carga
< 3m	não atuar
3 a 4,5m	+ 5kg/t
4,5 a 6m	+ 10kg/t
> 6m	+ 20kg/t

g) Erro de pesagem

Erros de pesagem dos materiais da carga fazem com que a relação Minério/Coque altere, ou seja, o consumo específico de combustível fique alterado (*coke rate*), alterando assim o nível térmico do alto-forno.

3.4.2- Fatores Relativos ao Sopro

a) Vazão do ar soprado

Flint correlacionou a influência da alteração da vazão de sopro com a variação do nível térmico do alto-forno em termos de consumo de coque. Segundo Flint, para o acréscimo de 100Nm³ de ar/min/m³ de volume de trabalho do alto-forno deve-se elevar o *coke rate* em 56,18kg/t para uma perfeita compensação térmica. (GUIMARÃES, 2003)

Por exemplo, para uma variação de vazão de sopro de 100Nm³/min em um alto-forno com volume de trabalho de 2652m³, deve-se fazer uma compensação térmica equivalente a 2,12kg/t.

Tal compensação é calculada pela equação 3.18:

$$\Delta CR = \frac{100\text{Nm}^3/\text{min}}{2652\text{m}^3} \times 56,18 \text{ kg/t} = 2,12\text{kg/t} \quad (3.18)$$

b) Temperatura do ar soprado

O ar quente soprado no alto-forno é a segunda maior fonte de energia para o processo, depois dos combustíveis carbonosos (coque e carvão injetado ou carvão vegetal).

O aquecimento do ar é realizado com fontes energéticas internas da usina, utilizando-se gás de alto-forno e gás de coqueria (GAF e GCO). Caso o ar soprado fosse injetado no alto-forno a temperatura ambiente, uma parte significativa do calor gerado na combustão do coque seria perdida para aquecer o ar. Portanto, a temperatura de sopro deve ser a maior possível dentro dos limites operacionais e de segurança do alto-forno e dos regeneradores (equipamento destinado ao aquecimento do ar soprado). Os altos-fornos a coque possuem temperatura de sopro de aproximadamente 1100°C a 1200°C. (SPENCE *et al.*, 1997)

Quanto maior for a temperatura do ar soprado, maior será o calor que está entrando no processo (zona de elaboração) e, como consequência, menor será a necessidade de carbono por tonelada de gusa. Uma temperatura de sopro alta gera uma temperatura de chama maior e um maior volume de gases dentro do alto-forno. Um volume de gases muito grande pode levar a problemas de permeabilidade, portanto, a temperatura de sopro deve ser a mais alta possível e a carga permeável para suportar o aumento do volume dos gases sem problemas no escoamento gasoso. (CASTRO, 2002)

Flint também determinou que uma variação de $+10^{\circ}\text{C}$ na temperatura de sopro corresponde a uma variação de $-1,1\text{kg/t}$ no *coke rate*.

TORSSELL *et al.* (1992) também estudaram a influência da temperatura de sopro no consumo de combustível através de modelo matemático. Na Figura 3.22 pode ser observado o efeito previsto pelo modelo matemático da temperatura de sopro no consumo de coque. A redução do consumo de coque prevista pelo modelo é de $2,2\%/100^{\circ}\text{C}$ quando a temperatura foi aumentada de 1033°C para 1133°C .

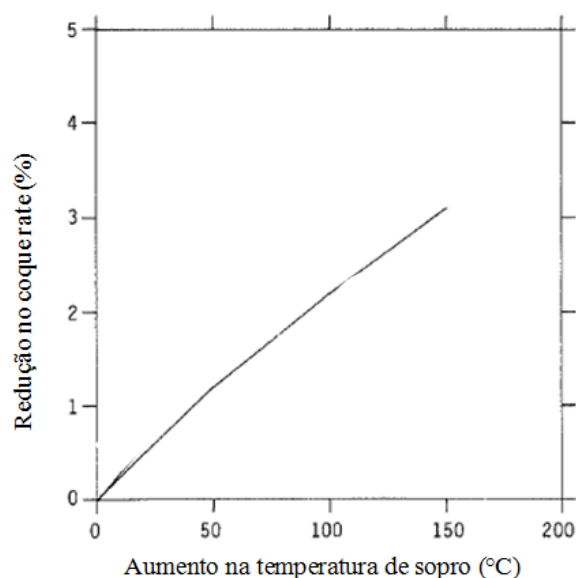


Figura 3.22: Predição do efeito de elevação de temperatura de sopro no consumo de coque

(TORSSELL *et al.*, 1992)

c) Umidade do sopro

Assim como a temperatura, a umidade de sopro é outro parâmetro operacional usado com frequência no controle térmico do alto-forno, pela facilidade de alteração da mesma e rapidez de resposta do processo.

A umidade de sopro também é muito usada para melhorar a permeabilidade da carga, devido ao efeito do H_2 , gerado pela dissociação do vapor d'água frente às ventaneiras. Porém, este efeito só é efetivo para teores de H_2 frente às ventaneiras menor que 4% (Figura 3.23), o que corresponde a uma umidade de sopro em torno de $42g/Nm^3$ na operação “*all coke*” (sem injeção auxiliar). Em relação ao gás CO, o hidrogênio é mais eficaz para a redução sob temperaturas abaixo de $800^\circ C$ devido átomo de hidrogênio ser muito pequeno (em relação ao CO), ele se difunde facilmente para o centro do minério. Assim como a injeção de carvão pela ventaneira, a injeção de umidade reduz a temperatura de chama (temperatura dos gases na saída da zona de combustão), desta forma, quando se opera com injeção de carvão não é comum a injeção de vapor para evitar maior redução na temperatura de chama.

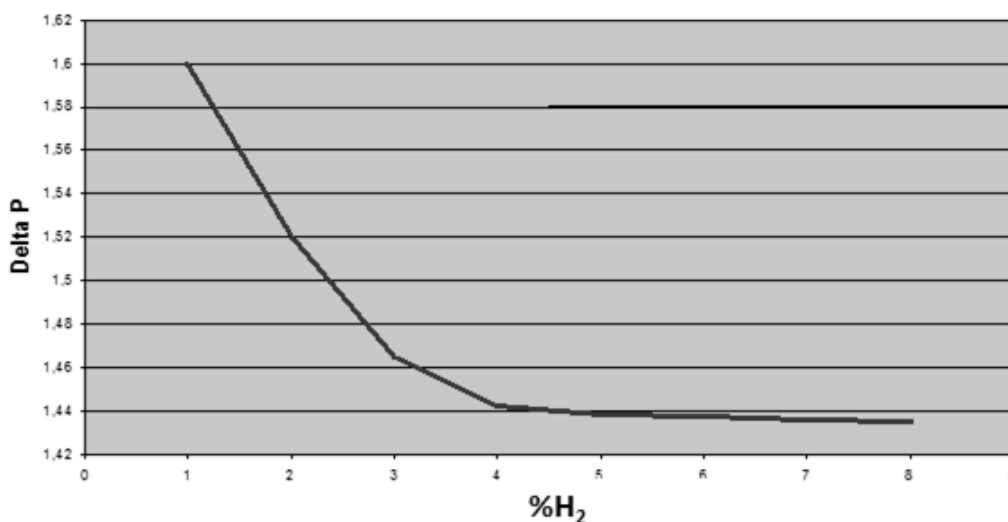


Figura 3.23: Influência do %H₂ em frente às ventaneiras na permeabilidade do alto-forno segundo GUIMARÃES (2003)

A percentagem de H_2 frente às ventaneiras, quando se está operando “*All Coke*”, é calculada pela equação 3.19: (GUIMARÃES, 2003)

$$\%H_2 = \frac{1,244 \times 10^{-3} \times U_{\text{sopro}}}{1,21 + 2,488 \times 10^{-3} \times U_{\text{sopro}}} \times 100 \quad (3.19)$$

Onde:

U_{sopro} = umidade do ar soprado (g/Nm³)

Segundo Flint, para cada 1,0g/Nm³ de vapor injetado no alto-forno, corresponde a uma elevação de 0,80kg/t de gusa no *coke rate*. (GUIMARÃES, 2003)

d) Injeções auxiliares

A injeção auxiliar de combustível é utilizada com o objetivo de substituir parte do coque que é carregado no topo do alto-forno. Sabe-se que o coque, além de ser o combustível principal tem uma importância fundamental no processo que é a de permeabilizante da carga. Portanto, a utilização de injeções auxiliares requer procedimentos e cuidados especiais, pois produz modificações sensíveis no processo tais como alteração das posições das isothermas no interior do alto-forno. Consequentemente, alterações nos níveis de injeção provocam alterações no nível térmico do alto-forno.

A Tabela III.8 apresenta a taxa de substituição de coque para os diversos tipos de combustíveis auxiliares. Taxa de substituição é a quantidade de coque substituído por quantidade de combustível auxiliar (kg de coque/kg de combustível). Convém ressaltar que a taxa de substituição varia com a qualidade do combustível utilizado, e com a taxa de injeção em kg/t praticada.

Tabela III.8: Taxa de substituição de coque vs combustíveis auxiliares (CASTRO e TAVARES, 1998)

COMBUSTIVEL	TAXA DE SUBSTITUIÇÃO (kg de coque / kg de combustível)
Óleo	0,95
Gás natural	1,10
Finos de carvão mineral	0,90
Finos de carvão vegetal	0,70

e) Injeção de Oxigênio

A injeção de combustível auxiliar pelas ventaneiras normalmente é acompanhada da injeção de oxigênio para controle da temperatura de chama.

A injeção de oxigênio pelas ventaneiras (enriquecimento do ar) altera sensivelmente a altura da zona de amolecimento e fusão, uma vez que reduz as trocas térmicas entre o gás e carga sólida, devido redução do volume de gás e elevação do fluxo de produção (descida de carga). (TORSSELL *et al.*, 1992)

Apesar de o enriquecimento do ar soprado com oxigênio elevar a temperatura de chama, o mesmo provoca uma queda do nível térmico do alto-forno. Portanto, o enriquecimento do ar soprado deve ser mantido o mais constante possível para evitar alterações no perfil térmico do alto-forno. (TORSSELL *et al.*, 1992).

A Figura 3.24 ilustra o impacto do enriquecimento do ar soprado com O₂ no consumo de coque no alto-forno.

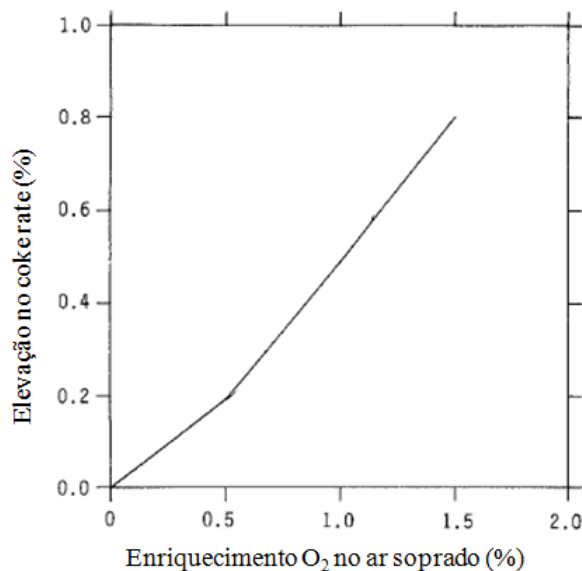


Figura 3.24: Predição do efeito do enriquecimento (O₂) do ar soprado no consumo de coque (TORSSELL *et al.*, 1992)

Como citado, uma variação no enriquecimento do ar interfere na troca térmica entre a carga sólida e o gás. Este efeito é medido pelo fator alfa. A Figura 3.25 mostra a relação entre o enriquecimento de oxigênio e fator alfa.

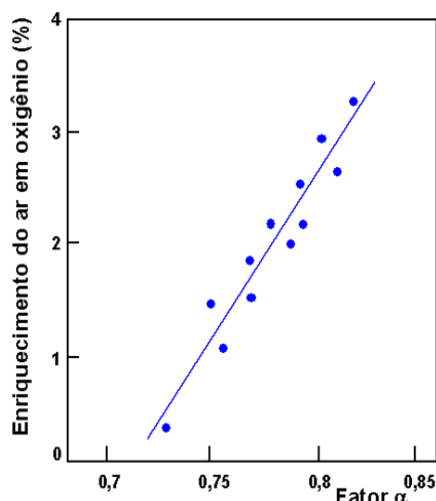


Figura 3.25: Relação entre fator alfa e enriquecimento de oxigênio (TAVARES, 2005)

3.4.3- Fatores Diversos

a) Entrada de água no alto-forno

Já foi comentado sobre a entrada de água no alto-forno via umidade das matérias-primas. Porém, este não é o único meio, sendo possível a entrada de água através das placas de refrigeração, staves, ventaneiras e caixas de ventaneiras quando apresentam vazamento.

A quantidade de calor gasto para aquecer e vaporizar 1,0kg de água é equivalente a 0,14kg de coque e que no caso da água proveniente da umidade das matérias-primas o processo praticamente não é influenciado uma vez que se tem energia de sobra no gás do topo para vaporizar a água. Porém, o mesmo não acontece com a água proveniente de queima de placas e ventaneiras, por exemplo, pois neste caso a mesma entra numa região onde a perda de energia altera o processo, podendo causar danos tal como um resfriamento do alto-forno. (GUIMARÃES, 2003)

Os principais “sintomas” de entrada de água no alto-forno são:

- Elevação do teor de H_2 no gás do topo;

- Elevação do teor de enxofre no gusa, nem sempre acompanhado de uma diminuição do teor de silício;
- Irregularidade de descida de carga (“marcha”);
- Queda brusca do nível térmico do alto-forno.

Como o resfriamento do alto-forno deve ser evitado a todo custo, convém estar atento aos sintomas de entrada de água de modo a detectar e localizar o ponto de entrada de água o mais rápido possível.

b) Perdas térmicas

As perdas térmicas no alto-forno representam as perdas por condução e convecção para as vizinhanças através das paredes do alto-forno. Estas perdas variam com as dimensões do alto-forno, condições de operação e sistema de refrigeração. (CASTRO, 2002)

Com o aumento das dimensões do aparelho, a área externa por unidade de volume diminui e a capacidade de produção aumenta. Consequentemente as perdas térmicas por tonelada de metal vazado diminuem. O mesmo é obtido se a taxa de produção aumentar.

Uma distribuição periférica dos gases no interior do alto-forno contribuirá para o aumento do fluxo de calor junto às paredes do revestimento ocasionando aumento das perdas térmicas.

As perdas térmicas na zona de elaboração influenciam o consumo específico de carbono. Com uma refrigeração mais eficiente da parte inferior do alto-forno, a perda de calor é maior e o consumo específico de carbono aumenta. Essa refrigeração tem o fator positivo de aumentar a durabilidade do refratário do alto-forno. Deve ser encontrado um ponto de equilíbrio entre os dois fatores.

Para altos-fornos com refrigeração da carcaça através de staves (sistema fechado de água com trocador de calor) a perda térmica pode ser calculada através do delta de temperatura da água na entrada e saída do sistema e vazão de água de refrigeração. A equação 3.20 mostra a fórmula de cálculo da perda térmica segundo SANTOS (2005).

$$\text{Perda térmica} \left(\frac{\text{Mcal}}{\text{h}} \right) = \frac{V \times \rho \times C_p \times \Delta T}{1000} \quad (3.20)$$

Onde:

V = vazão de água no sistema (m³/h);

C_p = calor específico da água de refrigeração (cal/g.K) = 1cal/g.°C;

ρ = densidade da água (kg/m³) = 1000kg/m³;

ΔT = diferença de temperatura entre entrada e saída de água (°C).

Conhecendo a perda térmica geral do reator, a dificuldade para aplicação do modelo operacional termoquímico, é equacionar as perdas na zona de preparação e elaboração. MELGAÇO *et al.* (1981) atribuem 30% das perdas totais às perdas na zona de preparação e 70% às perdas da zona de elaboração, mas sem nenhuma confirmação prática dessa distribuição. CASTRO (1983), através de cálculos termodinâmicos, chegou à conclusão que 84% das perdas térmicas ocorrem na zona de elaboração e 16% na zona de preparação. (CASTRO, 1983)

3.5- Controle de Processo

Para uma operação eficiente e estável do alto-forno, com máxima produção e mínimo consumo específico de carbono, conforme citado anteriormente, os seguintes parâmetros têm que ser controlados: (CASTRO, 2002)

- Nível de carga no topo do reator;
- Grau de redução da carga metálica na zona de preparação (fator ômega);
- Altura da zona de gotejamento;
- Zona de combustão (penetração do ar e temperatura de chama);
- Distribuição de carga;
- Distribuição do fluxo gasoso;
- Posição e formato da zona de amolecimento e fusão;
- Eficiência da drenagem de líquidos no cadinho;
- Permeabilidade do alto-forno;

- Perdas térmicas (desgastes dos refratários, formação de cascão - incrustações de carga na parede do alto-forno);
- Qualidade da carga metálica;
- Qualidade do coque.

Para o controle desses parâmetros são necessárias informações adquiridas através de instrumentações e equipamentos de medida e do desenvolvimento de modelos matemáticos. A Figura 3.26 mostra diversas informações possíveis de serem adquiridas no processo de produção de gusa em altos-fornos, segundo KALLO *et al.* (1999).

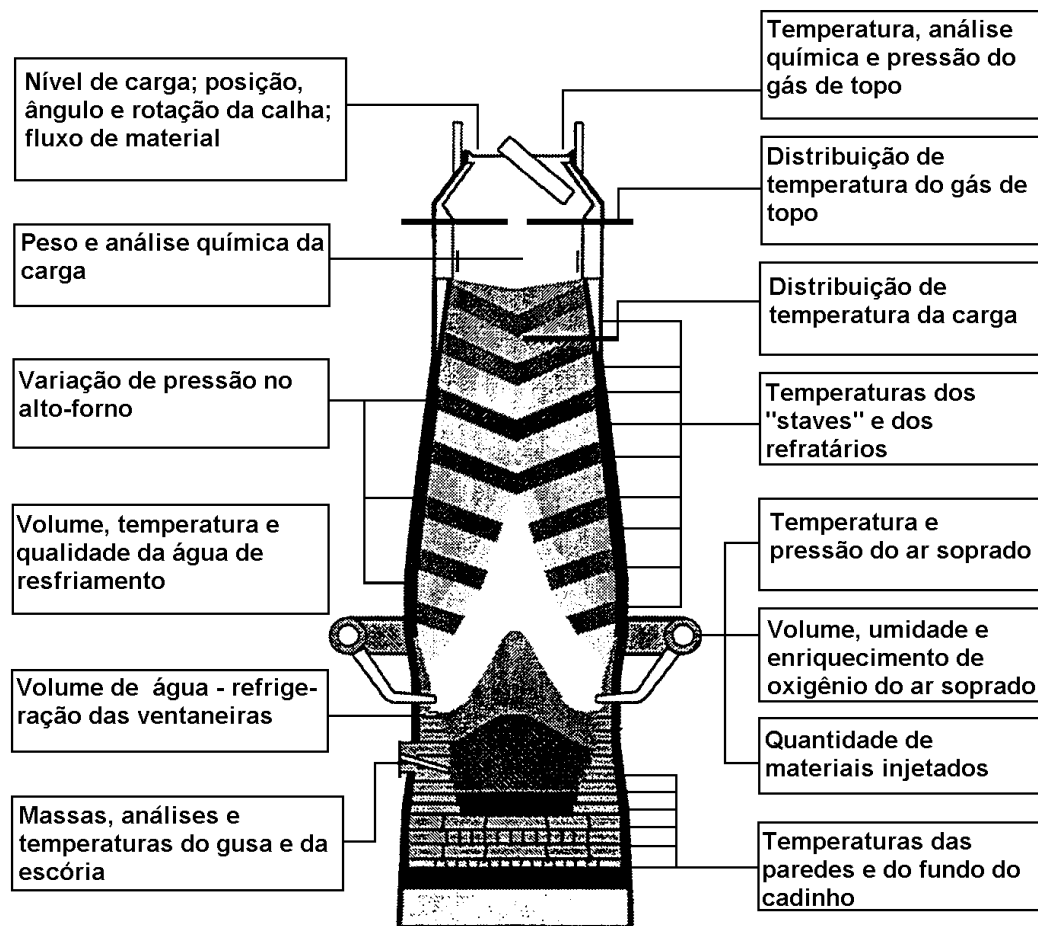


Figura 3.26: Informações necessárias para o controle de processo de produção de gusa em altos-fornos (KALLO *et al.*, 1999)

Alguns parâmetros podem ser controlados apenas através de instrumentações (ou sensores), mas outros necessitam de um modelo matemático envolvido no controle. A Tabela III.9 mostra o resumo de como se dá esse controle.

Tabela III.9: Resumo – Controle de processo do alto-forno (CASTRO, 2002)

Parâmetro de controle	Informações necessárias	Instrumentação ou sensor	Modelo matemático
Nível de carga	- Nível de carga contínuo	Sonda automática	Não é necessário
Grau de redução da carga metálica na zona de preparação (fator ômega, consumo de carbono)	- Composição e temperatura dos gases do topo; - Massas e composições químicas da carga.	- Termopares - Analisador da composição dos gases de topo - Balanças - Instrumentações para análises químicas dos materiais	É necessário
Altura da zona de gotejamento (nível térmico, temperatura do gusa, consumo específico de carbono)	- Composição e temperatura dos gases de topo - Pesos e composições química da carga - Dados do ar soprado - Quantidade de injeção - Pesos, composições e temperaturas do gusa e da escória	- Termopares - Analisador da composição dos gases de topo - Balanças - instrumentações para análises químicas dos materiais - Medidor de vazão de ar	É necessário
Zona de combustão (penetração e temperatura de chama)	- Dados do ar soprado - Resistência do coque	- Termopar - Medidor de vazão de ar - Testes de qualidade do coque	Pode ser usado juntamente com as medições
Distribuição de carga	- Massas dos materiais - Programação da calha rotativa	- Balanças - Medidores de perfil da carga	É necessário
Distribuição do fluxo gasoso	- Distribuição de temperatura dos gases - Variações de pressão	- Sondas horizontais - Termopares - Medidores de pressão	Pode ser usado juntamente com medições
Posição e formato da zona de amolecimento e fusão	- Distribuição de temperaturas e gases - Dados do ar soprado - Pesos e composições químicas da carga	- Sondas verticais - Termopares - Medidor de vazão de ar - Analisador dos gases - Instrumentações para análise	É necessário
Eficiência de drenagem de líquidos no cadinho	- Massas, composições e temperaturas do gusa e escória	- Termopares - Instrumentações para análises químicas do gusa e escória	É necessário
Permeabilidade do alto-forno	- Variações de pressão - Dados do ar soprado - Dados dos gases do topo	- Medidores de pressão - Medidor de vazão do ar - Termopares - Analisador dos gases de topo	Existem modelos, mas a permeabilidade pode ser determinada sem eles
Perdas térmicas (desgastes de refratários, formação de cascão, desgaste do cadinho, refrigeração)	- Variações de pressão - Volume e temperatura da água de refrigeração - Temperatura dos refratários	- Medidores de pressão - Termopares	É necessário
Qualidade de carga metálica e do coque	- Composição química - Propriedades físicas e metalúrgicas	- Instrumentações para análises - Testes físicos e metalúrgicos	Não é necessário

A operação do alto-forno é normalmente investigada com dois objetivos, predição dos indicadores de processo e compreensão dos fenômenos internos do alto-forno. Esses dois objetivos podem ser estudados por diferentes métodos incluindo investigações em escala industrial, experimentos em escala piloto (laboratório) e através de modelos matemáticos. Investigações em escala industrial contribuíram para o entendimento dos aspectos internos do alto-forno através da dissecação de altos-fornos e podem ser conduzidas também através de amostragem de material em frente às ventaneiras, mas essas técnicas são de difícil implantação devido à necessidade de parada do alto-forno e aos altos custos. Os experimentos em escala piloto também são utilizados para entender os fenômenos internos do alto-forno, mas não é possível refletir totalmente todos os fenômenos de um alto-forno real; e também possui custos elevados. Desta forma, os modelos matemáticos tem sido importante na predição de indicadores de processo e investigação dos fenômenos internos do alto-forno. (SHEN *et al.*, 2015)

Um exemplo de modelo físico de experimentos em escala piloto (laboratório) foi desenvolvido por SANTOS *et al.* (2011) com objetivo de estudar os fenômenos relacionados a drenagem e escoamento de líquidos no cadinho do alto-forno. A Figura 3.27 mostra detalhes da montagem experimental.



Figura 3.27: Modelo físico experimental do cadinho: ponto 1 e 2 são os furos de gusa sobre os quais estão instalados condutivímetros; ponto 3 é o sistema radial e rotativo de aspersão (SANTOS *et al.*, 2011)

O desenvolvimento do sistema de controle do alto-forno pode ser dividido em dois tipos de modelos de simulação: (KOSTIAL *et al.*, 2002)

- Modelos estáticos: modelos que visam representar o estado de um sistema em um instante ou que em suas formulações não se leva em conta a variável tempo;
- Modelos dinâmicos: são formulados para representarem as alterações de estado do sistema ao longo da contagem do tempo de simulação.

Existem na literatura diversas divisões de modelos matemáticos para alto-forno, segue divisão realizada por OMORI (1987) e IRONS (1999):

- Modelos estatísticos;
- Modelos termodinâmicos;
- Modelos de redes neurais artificiais;
- Modelos cinéticos;
- Modelos para prever a situação interna do alto-forno;
- Modelos específicos (distribuição de carga, drenagem de líquidos no cadinho, desgaste do cadinho, zona de combustão e previsão do teor de silício no gusa);
- Modelos de controle global (“*Expert Systems*”).

3.5.1- Modelos Estatísticos

O modelo estatístico mais importante e conhecido é de autoria de FLINT (1952), citado por TAMBASCO (1977), e é denominado de “FÓRMULA DE FLINT”. Nesse trabalho foi desenvolvida uma expressão algébrica que permite correlacionar o consumo específico de carbono com um grande número de variáveis do processo de fabricação de ferro-gusa no alto-forno. Os impactos de algumas variáveis já foram citados anteriormente na revisão bibliográfica.

A “Fórmula de Flint” é uma expressão algébrica simples da forma:

$$CR = K + \sum_{i=1}^n C_i V \quad (3.21)$$

onde:

CR = consumo específico de carbono, kg/t gusa;

K = constante de regressão, específica para cada alto-forno;

Vi = variável que afeta o consumo de carbono, na sua unidade conveniente;

Ci = coeficiente de correlação que quantifica o efeito da variável, adimensional.

A Tabela III.10 mostra as variáveis da “Fórmula de Flint” com as suas respectivas unidades e coeficientes de correlação.

Tabela III.10: Variáveis da “Fórmula de Flint”, suas unidades e seus coeficientes de correlação (TAMBASCO, 1977)

Categoria	Nº (i)	Variável (Vi)	Unidade	Coeficiente (Ci)
Escória	1	Cinza do coque	kg/t gusa	+ 0,60
	2	Carbonatos não calcinados	kg/t gusa	+ 0,60
	3	Outros	kg/t gusa	+ 0,15
Faixa granulométrica da carga metálica	4	Fração < 1 mm	kg/t gusa	+ 0,08
	5	Fração de 1 a 10 mm	kg/t gusa	+ 0,04
	6	Fração de 25 a 50 mm	kg/t gusa	+ 0,03
	7	Fração de 50 a 100 mm	kg/t gusa	+ 0,06
	8	Fração > 100 mm	kg/t gusa	+ 0,10
Composição da carga	9	Enxofre carregado	kg/t gusa	+ 5,00
	10	Metal livre carregado	kg/t gusa	- 0,45
	11	Fe sob forma de silicato	kg/t gusa	- 0,30
	12	H ₂ O combinado carregado	kg/t gusa	+ 0,45
Composição do gusa	13	Teor de silício	%	+ 60,00
	14	Teor de manganês	%	+10,00
	15	Teor de fósforo	%	+ 10,00
	16	Teor de enxofre	%	variável
Ar soprado	17	Volume de ar soprado	Nm ³ /min/ m ³ (volume útil do forno)	+ 50,00
	18	Temperatura do ar soprado (10°C)	° C	- 1,10
	19	Umidade do ar soprado	kg/t gusa	+ 0,25
Combustíveis auxiliares (injeções)	20	Gás de coqueria	kg/t gusa	- 0,80
	21	Gás natural	kg/t gusa	- 1,05
	22	Óleo combustível	kg/t gusa	- 0,85
	23	Alcatrão	kg/t gusa	- 0,90
	24	Carvão alto volátil	kg/t gusa	- 0,75
	25	Carvão baixo volátil	kg/t gusa	- 0,80
	26	Umidade do carvão injetado	kg/t gusa	- 0,35
Variáveis não ligadas ao processo	27	Dias de campanha	dias	+ 0,015
	28	Perdas de gusa no canal e panela	%	+ 5,00

Os coeficientes de cada variável têm um sinal, positivo ou negativo, conforme o sentido de sua contribuição para o consumo específico de carbono. Todos os coeficientes são constantes, com exceção do coeficiente correspondente ao teor de enxofre do gusa. Isso significa que a correlação entre o consumo de carbono e o teor de enxofre não é linear. Com as outras variáveis a correlação é linear. O coeficiente de correlação do teor de enxofre depende do próprio teor de enxofre e do teor de silício da seguinte maneira:

$$C_{16} = \left[\frac{0,013}{(\%S/100) + 0,232(\%Si/100)^2 - 0,00009} - 57 \right] \times 0,5 \quad (3.22)$$

para $\%S/100 \leq 0,00032 - 0,232 \times (\%Si/100)^2$

e

$$C_{16} = \left[\frac{0,002}{(\%S/100) + 0,232(\%Si/100)^2 - 0,00022} - 20 \right] \times 0,5 \quad (3.23)$$

para $\%S/100 > 0,00032 - 0,232 \times (\%Si/100)^2$

onde:

C_{16} = coeficiente de correlação do teor de enxofre no gusa;

$\%S$ = teor de enxofre no gusa;

$\%Si$ = teor de silício no gusa.

O primeiro passo para aplicação da “Fórmula de Flint” a um dado alto-forno é a determinação da constante de regressão, K. Isso só é possível a partir da análise de dados históricos, subtraindo do consumo específico de carbono conhecido as parcelas devidas às diferentes variáveis. É conveniente a utilização de valores médios mensais de períodos mais extensos possíveis, 2 a 3 anos. Os períodos de “marcha” anormal (instabilidade do processo) ou fora de controle devem ser eliminados. (CASTRO, 2002)

Outros modelos estatísticos foram implementados em altos-fornos a coque, como um exemplo, BHAGAT *et al.* (1991, 2011) desenvolveram a seguinte correlação:

$$Y1(\text{kg/t}) = 251 + 0,195 \times X11 - 0,182 \times X13 + 13,49 \times X14 - 0,032 \times X1 + 0,07 \times X10 + 2,24 \times X9 - 4,26 \times X3 \quad (r = 0,89) \quad (3.24)$$

onde:

Y1 = consumo específico de carbono, kg/t gusa;

X11 = peso da carga por tonelada de gusa, kg/t gusa;

X13 = temperatura média do ar soprado, K;

X14 = percentual de cinza no coque, %;

X1 = consumo específico de sinter, kg/t gusa;

X10 = consumo específico de calcário, kg/t gusa;

X9 = percentual do minério de ferro abaixo de 12mm, %;

X3 = redutibilidade do sinter, %;

r = coeficiente de correlação.

A expressão de BHAGAT *et al.* (1991, 2011) correlaciona um número de variáveis bem menor do que a “Fórmula de Flint” e não foram considerados muitos outros fatores que afetam o consumo de carbono. Desta forma, pode-se dizer que o alto-forno de Bhilai Steel Palnt (BSP), que foi a referência de BHAGAT *et al.* (1991), tinha uma operação muito estável, com poucas variações no processo, o que justifica a eficiência da expressão (3.24) no cálculo do consumo específico de carbono. A Figura 3.28 mostra o resultado de predição do carbono através da equação 3.24.

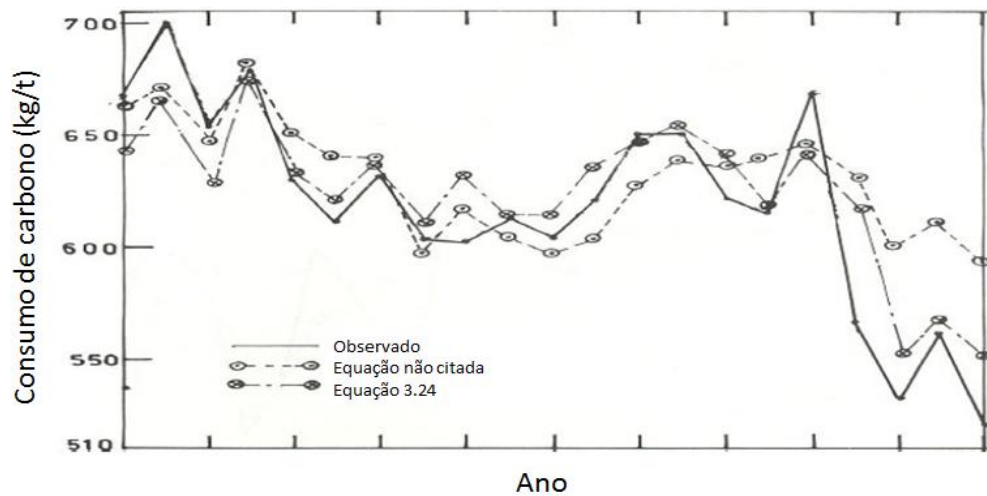


Figura 3.28: Predição de carbono pela equação 3.24 (BHAGAT, 2011)

BHAGAT *et al.* (1985) também utilizou métodos estatísticos para avaliar relações empíricas entre produtividade e teor de finos do minério. A Figura 3.29 mostra a relação entre produtividade e teor de finos encontrada por BHAGAT *et al.* (1985).

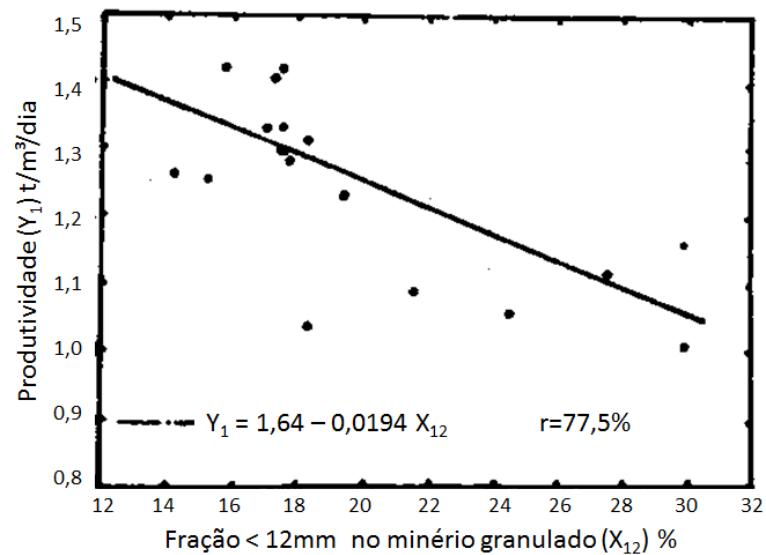


Figura 3.29: Relação empírica entre produtividade e fração de finos do minério de ferro granulado (BHAGAT *et al.*, 1985)

3.5.2- Modelos Termodinâmicos

Os modelos termodinâmicos são baseados em balanços de massa e térmicos e eles são utilizados, principalmente, para o cálculo do grau de redução da carga metálica na zona de preparação e para o controle da altura da zona de amolecimento e fusão (cálculo do consumo específico de carbono). (KUNDRAT, 1989)

Além da termodinâmica, esses modelos utilizam os conceitos da divisão do alto-forno em zona de preparação e zona de elaboração e são conhecidos também como “Modelos Termoquímicos”. (SAIZ, 1999)

JINDAL *et al.* (2007) propôs a utilização de modelo termoquímico por possuir baixa necessidade e tempo de computação e ter uma grande assertividade. A literatura disponível sugere modelos 2-D e 3-D, porém esses modelos levam bastante tempo para convergir e muitas vezes não convergem para precisão desejada com utilização de dados industriais. O modelo termoquímico foi desenvolvido para utilização em tempo real. Segundo JINDAL *et al.* (2007), a modelagem da cuba do alto-forno deve ser realizada a partir de condições de contornos divididas em múltiplos estágios (zonas). As equações do modelo para simular a cuba do alto-forno consistem do balanço de massa e energia em cada etapa da cuba. Um procedimento iterativo com convergência de loop duplo é empregado para gerar a solução.

Em 2002, CASTRO desenvolveu um modelo de controle de processo para altos-fornos a carvão vegetal baseado na divisão do alto-forno em zonas de preparação e elaboração (modelo termoquímico). Através das simulações do modelo foi possível mostrar a tendência de que o processo seria mais estável se o operador utilizasse essa ferramenta. A maior dificuldade da implantação do modelo em alto-forno a carvão vegetal é a variação de qualidade e teor de voláteis do carvão.

SAIZ, 1999, desenvolveu um modelo termoquímico para auxiliar o operador no controle da umidade do ar soprado. Segundo SAIZ, 1999, as vantagens de um controle automático da umidade do ar soprado são difíceis de calcular economicamente, mas foi percebido pela equipe que a eficiência térmica e química do processo melhorou.

Devido sua importância, os modelos termodinâmicos estão presentes em diversas análises combinados com outros modelos. Por exemplo, HARVEY *et al.* (2014), MATSUZAKI *et al.* (2006), FU *et al.* (2012), BERNASOWSKI *et al.* (2011), VEHEC *et al.* (2011) utilizaram os conceitos do modelo termodinâmico (termoquímico) para desenvolver modelos matemáticos com objetivo de prever as condições operacionais do alto-forno e reduzir o consumo de combustível.

As informações necessárias para a utilização de modelos termodinâmicos são em menor quantidade e mais simples do que as necessárias para os modelos cinéticos e os modelos de previsão da situação interna do alto-forno. A Tabela III.11 mostra as informações, periodicidade e instrumentações usadas pelos modelos termodinâmicos.

Tabela III.11: Informações, periodicidade e instrumentações necessárias ao controle de processo de um alto-forno, com a utilização de modelos termodinâmicos (CASTRO, 2002)

Tipo de informação	Periodicidade	Instrumentação necessária
1) Dados do gás de topo - %CO, %CO ₂ , %H ₂ - Temperatura	Instantânea Instantânea	Analizador de gás Termopares
2) Dados da carga - Massa dos constituintes - Análise química - Massa de carvão injetado	Cada carga Cada 8h Instantânea	Balanças Laboratório de análises Balança/Célula de carga
3) Dados de sopro - Temperatura - Umidade do ar - Vazão de ar	Instantânea Cada 8h Instantânea	Termopar Higrômetro Transmissor de vazão
4) Dados de corrida - Temperatura do gusa - Composição do gusa - Composição da escória	Cada corrida Cada corrida Cada corrida	Termopar Laboratório de análises Laboratório de análises
5) Perdas térmicas	Instantânea	Calculada - Termopares e transmissor de vazão de água

A Tabela III.12 detalha os índices calculados pelos modelos termodinâmicos, com suas periodicidades, as informações necessárias, os objetivos de cada índice e os tipos de cálculo.

Tabela III.12: Dados operacionais, calculados pelos modelos termodinâmicos, necessários ao controle de processo dos altos-fornos (CASTRO, 2002)

Dados ou índices calculados	Periodicidade	Informações necessárias para o cálculo	Objetivos dos dados ou índices	Tipo de cálculo
Massa das matérias-primas carregadas (leito de fusão)	1 hora	. Análise química: matérias-primas, gusa e escória	Manter constantes o volume e a composição da escória	Balanco de massa
Temperatura de chama	1 hora	. Temperatura do ar soprado . Umidade do ar soprado	Controle da temperatura do gusa	Balanco térmico
Consumo instantâneo de carbono (kg/t gusa)	1 hora	. Análise gás de topo . Temperatura gás de topo . Leito de fusão . Temperatura ar soprado . Umidade ar soprado . Vazão ar soprado . Temperatura/composição gusa e escória	Manter a coluna de carvão vegetal ou coque dentro do alto-forno constante para o controle do nível térmico	Modelo Termoquímico
Fator Ômega	1 hora	. As mesmas do item anterior	Conhecer a eficiência de redução da carga metálica na zona de preparação	Modelo Termoquímico

O modelo termoquímico, que calcula o consumo instantâneo de carbono (kg/t gusa), fator Ômega e a vazão específica de ar ($\text{Nm}^3/\text{t gusa}$), é composto por vários balanços de massas e térmicos das zonas de preparação e elaboração do alto-forno. (KUNDRAT, 1986)

A composição do gás de topo é uma informação muito importante para a aplicação do modelo termoquímico e a periodicidade de sua análise determina a periodicidade do uso do modelo e da obtenção das informações: consumo específico de carbono, vazão específica de ar e fator ômega.

Portanto, o modelo termoquímico calcula a quantidade de carbono consumida num determinado momento, que pode ser diferente da quantidade que está sendo carregada. Para manter o nível térmico do alto-forno constante os dois valores devem ser iguais. A diferença entre esses valores é:

$$\Delta C = C_{\text{carregado}} - C_{\text{consumido}} \quad (3.25)$$

onde:

$C_{\text{carregado}}$ = quantidade de carbono (kg/t gusa) carregada no alto-forno;

$C_{\text{consumido}}$ = quantidade de carbono (kg/t gusa) consumida no alto-forno.

Devido o alto-forno ser o processo de maior consumo de energia em uma siderúrgica integrada, diversos estudos tem sido realizado com objetivo de reduzir o consumo de carbono no alto-forno (PAUL *et al.*, 2013). Além do objetivo de reduzir custos, a redução do consumo de carbono tem sido perseguida devido ao aquecimento global. (UEDA *et al.*, 2010)

O conceito do modelo termoquímico também tem sido utilizado com objetivo de melhorar o aproveitamento do gás CO na zona de preparação e conseqüentemente reduzir o consumo de carbono no alto-forno. Trabalhos neste sentido foram apresentados por KASAI *et al.* (2004), UJISAWA *et al.* (2005), NAITO *et al.* (2006), BERNASOWSKI *et al.* (2011) e VEHEC *et al.* (2011).

3.5.3- Modelos de Redes Neurais Artificiais

Segundo SANTOS (2008), Redes Neurais Artificiais (RNA) são baseadas na estrutura e função de neurônios biológicos e visam solucionar problemas não-algorítmicos por meio da associação de sistemas simples, denominados neurônios artificiais. Estes sistemas simples calculam paralelamente determinadas funções matemáticas. Uma importante característica das RNAs é a capacidade de aprender. Semelhante ao cérebro humano, as redes neurais conseguem generalizar as informações durante o aprendizado e produzir saídas adequadas para dados que não estavam presentes no treinamento.

Resultados de predição do %silício e temperatura do gusa foram obtidos por SANTOS (2008) através de redes neurais. A Figura 3.30 e 3.31 mostra respectivamente o gráfico de predição e resultado real do %Si e temperatura do gusa. A predição tem como objetivo auxiliar o operador na tomada de decisão que, segundo SANTOS (2008) atingiu erros aceitáveis.

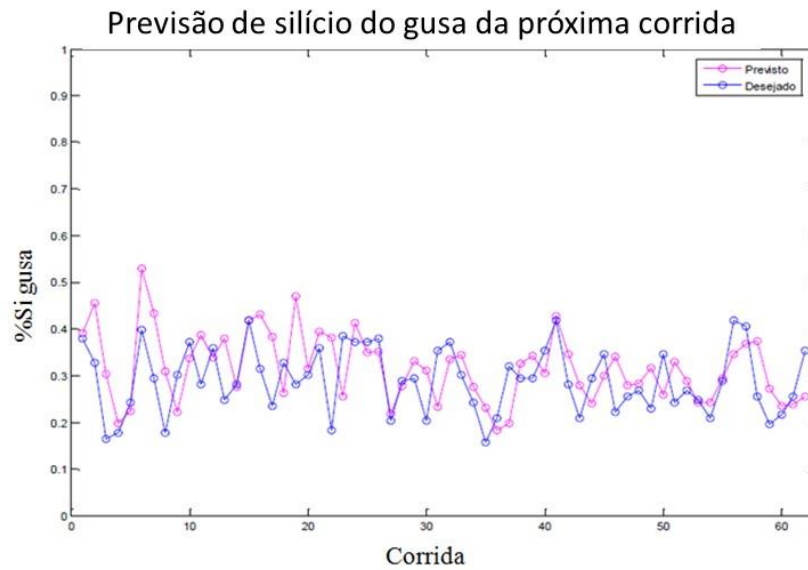


Figura 3.30: Previsão do teor de silício do gusa para próxima corrida (SANTOS, 2008)

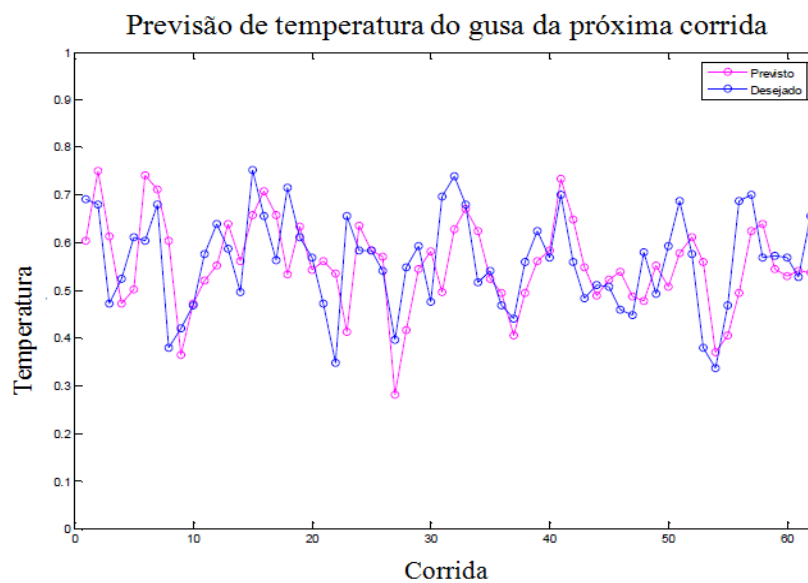


Figura 3.31: Previsão da temperatura do gusa para próxima corrida (SANTOS, 2008)

Medeiros *et al.* (2006 e 2007) também desenvolveram um modelo baseado em redes neurais para auxiliar decisões estratégicas e dar suporte aos operadores. A Figura 3.32 possibilita visualizar a utilização do modelo na operação dos altos-fornos.

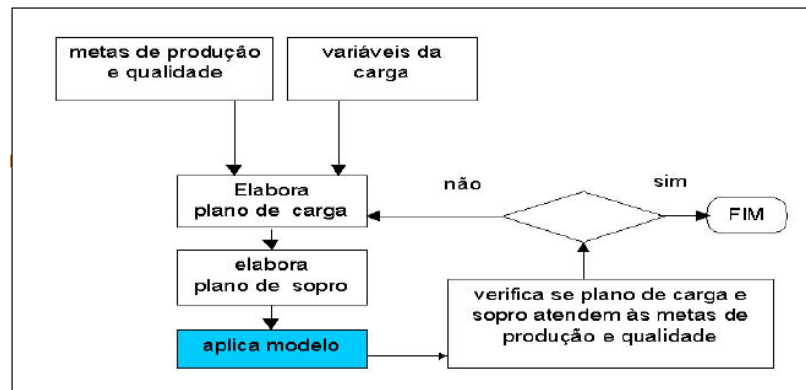


Figura 3.32: Fluxograma do modelo proposto por MEDEIROS *et al.* (2006)

O modelo foi utilizado “*off line*” com objetivo de predição de consumo de coque (CR), teor de silício, resistência do fluxo gasoso (K) e teor de enxofre. Conforme Figura 3.33, os resultados do modelo mostraram bom desempenho para consumo de coque, teor de silício e resistência do fluxo gasoso. (MEDEIROS, 2006)

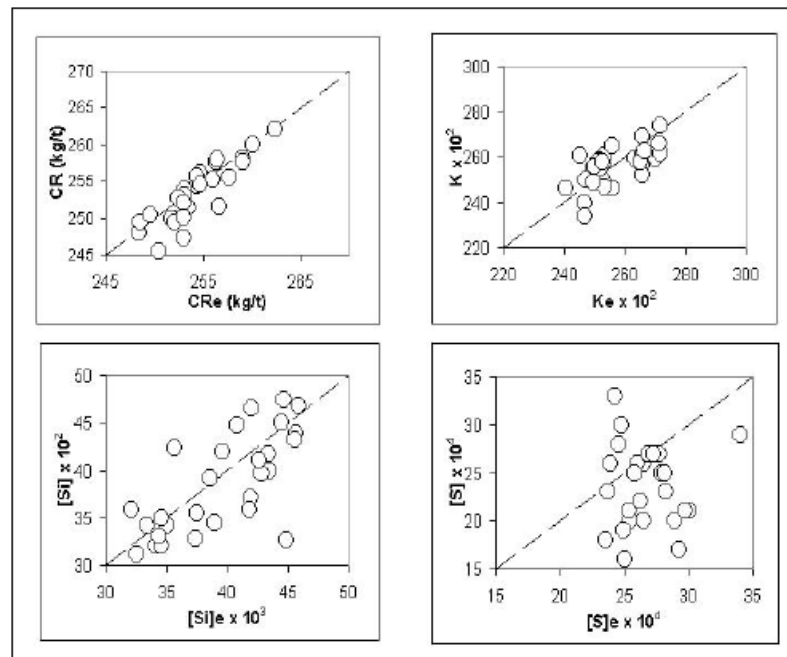


Figura 3.33: Comparação entre valores estimados e reais para as variáveis de controle no teste industrial *off line* (MEDEIROS *et al.*, 2006)

Com utilização industrial para suporte na operação do alto-forno, pode-se observar na Figura 3.34 bons resultados de consumo de combustível (FR – *Fuel Rate*).

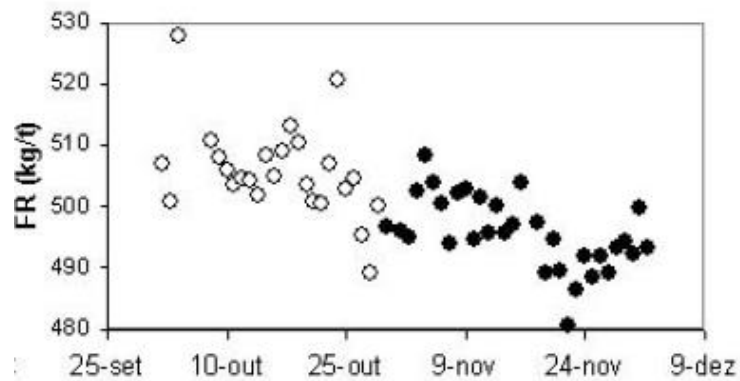


Figura 3.34: Comparação entre resultados de *fuel rate* dos períodos sem suporte do modelo (o) e com suporte do modelo (•) (MEDEIROS *et al.*, 2007)

RADHAKRISHNAN e MOHAMED (2000) utilizaram redes neurais para realizar predição da qualidade do gusa e escória. A Figura 3.35 mostra os resultados obtidos para o %enxofre do gusa. Foi observado melhora considerável no controle de enxofre com o auxílio do sistema de controle.

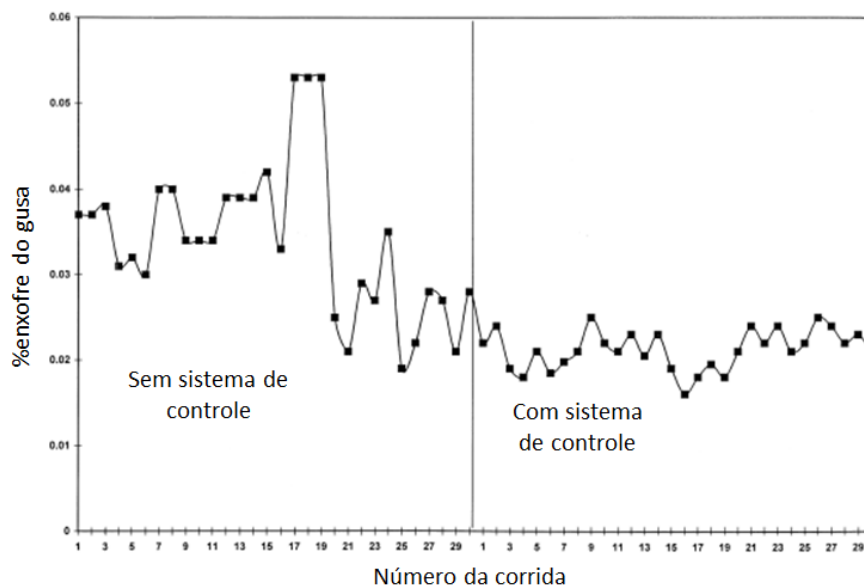


Figura 3.35: Comparação do %enxofre antes e depois da implantação do sistema de controle (RADHAKRISHNAN e MOHAMED 2000)

3.5.4- Modelos Cinéticos

Os modelos cinéticos, além dos balanços de massa e térmico, introduzem as velocidades das reações com o objetivo de determinar a extensão delas ao longo do alto-forno. Hoje em dia, não existe um modelo puramente cinético porque outros cálculos são incorporados para a previsão da situação interna do alto-forno.

3.5.5- Modelos Para Prever a Situação Interna do Alto-Forno

Com o objetivo de prever a distribuição do fluxo gasoso, a extensão das reações químicas ao longo do reator, a posição e o formato da zona de amolecimento e fusão, isto é, de ter o controle da situação interna do alto-forno, foram desenvolvidos vários modelos matemáticos. Esses modelos são em duas ou três dimensões e são baseados em balanços de massas e térmicos; transferências de calor, de massa e de momento e cinética das reações químicas. Alguns exemplos serão citados a seguir. (HARVEY et al, 2014)

Os modelos para previsão da situação interna do alto-forno podem ser utilizados na avaliação de grandes mudanças operacionais. No Alto-Forno 6 de Chiba (KOBAYASHI *et al.*, 1995 apud CASTRO, 2002), o modelo para prever o formato e a posição da zona de amolecimento e fusão foi utilizado para modificar as espessuras das camadas de carga metálica e coque carregado no topo do alto-forno. A Figura 3.36 mostra como a zona de amolecimento e fusão foi modificada com o tempo, a partir de alterações no carregamento (consumo de combustível) e produção. O formato dessa zona foi determinado pelo modelo matemático.

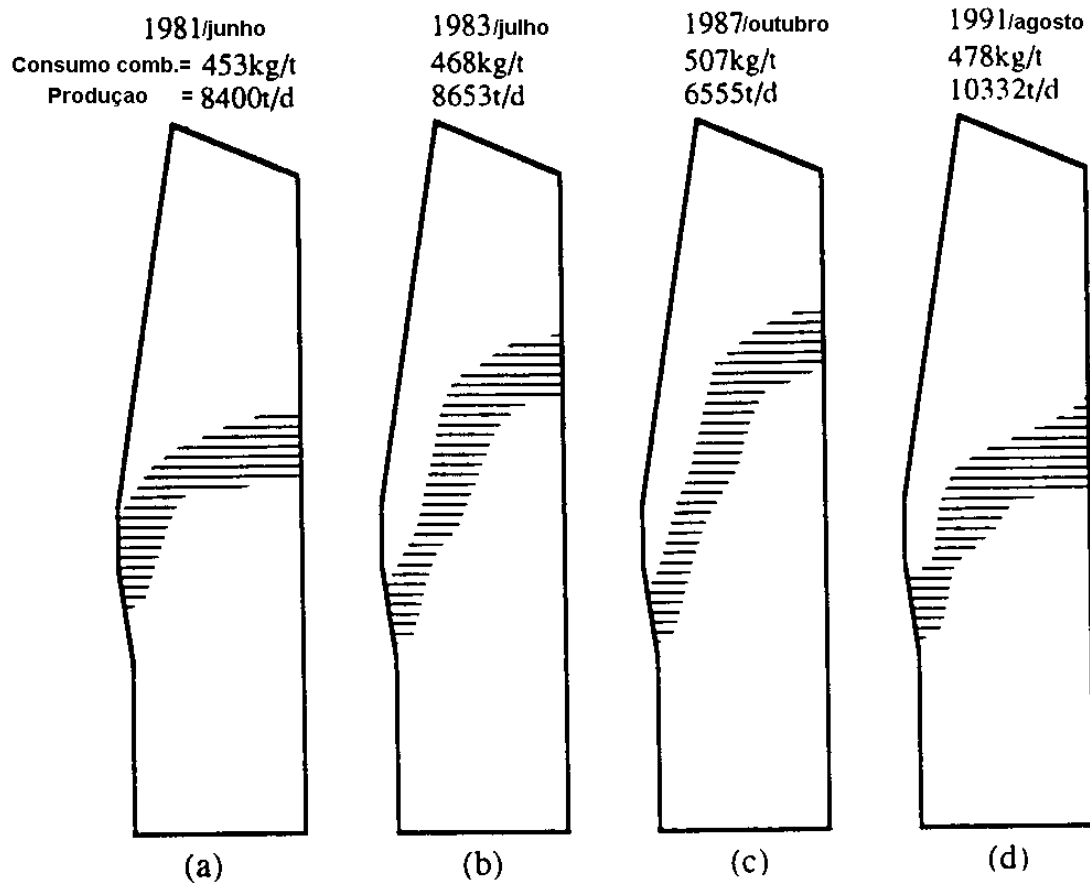


Figura 3.36: Formato e posição da zona de amolecimento e fusão do Alto-Forno 6 de Chiba, estimados pelo modelo matemático (KOBAYASHI *et al.*, 1995 apud CASTRO, 2002)

CASTRO, NOGAMI e YAGI (2002) desenvolveram um modelo matemático tridimensional e multifásico. Cinco fases foram consideradas: gás, sólidos (minério de ferro, sínter, pelotas e coque), ferro-gusa, escória e carvão pulverizado. O sistema de equações (baseadas na conservação de massa, momento e energia e nas reações químicas) foi resolvido pelo método de elementos finitos. Como resultados, a Figura 3.37 mostra as distribuições tridimensionais de temperatura das cinco fases consideradas.

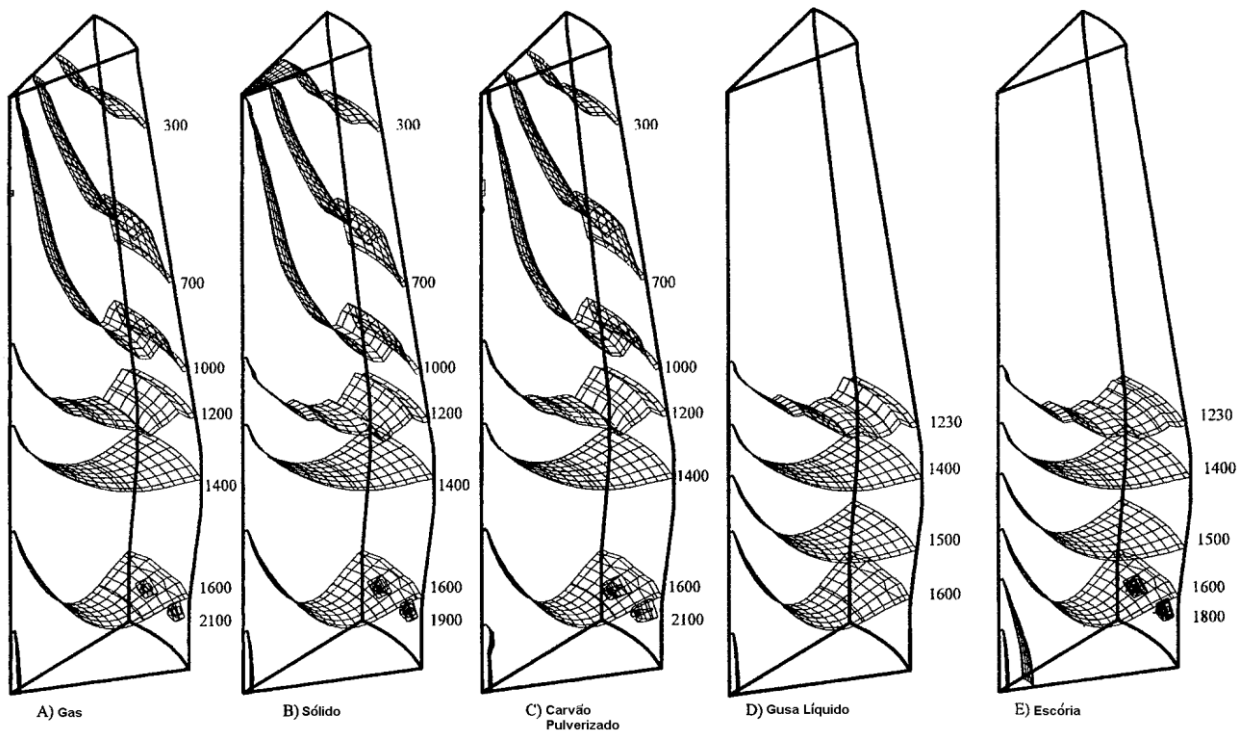


Figura 3.37: Distribuições tridimensionais de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para várias fases no alto-forno, calculadas pelo modelo desenvolvido por CASTRO, NOGAMI e YAGI (2002)

SHEN *et al.* (2015) desenvolveram um modelo 3D baseado no software comercial ANSYS-CFX com objetivo de descrever o complexo comportamento sólido-gás-líquido, transferência de calor e massa e reações químicas no alto-forno.

Através do modelo eles visualizaram a posição da zona de amolecimento e fusão (para o alto-forno simulado) e seu formato. A Figura 3.38 mostra o formato V invertido da zona de amolecimento e fusão, sendo a espessura bem uniforme na maior extensão e ligeiramente mais espessa próxima as paredes. A relação minério/coque considerada na simulação também pode ser observada na Figura 3.38.

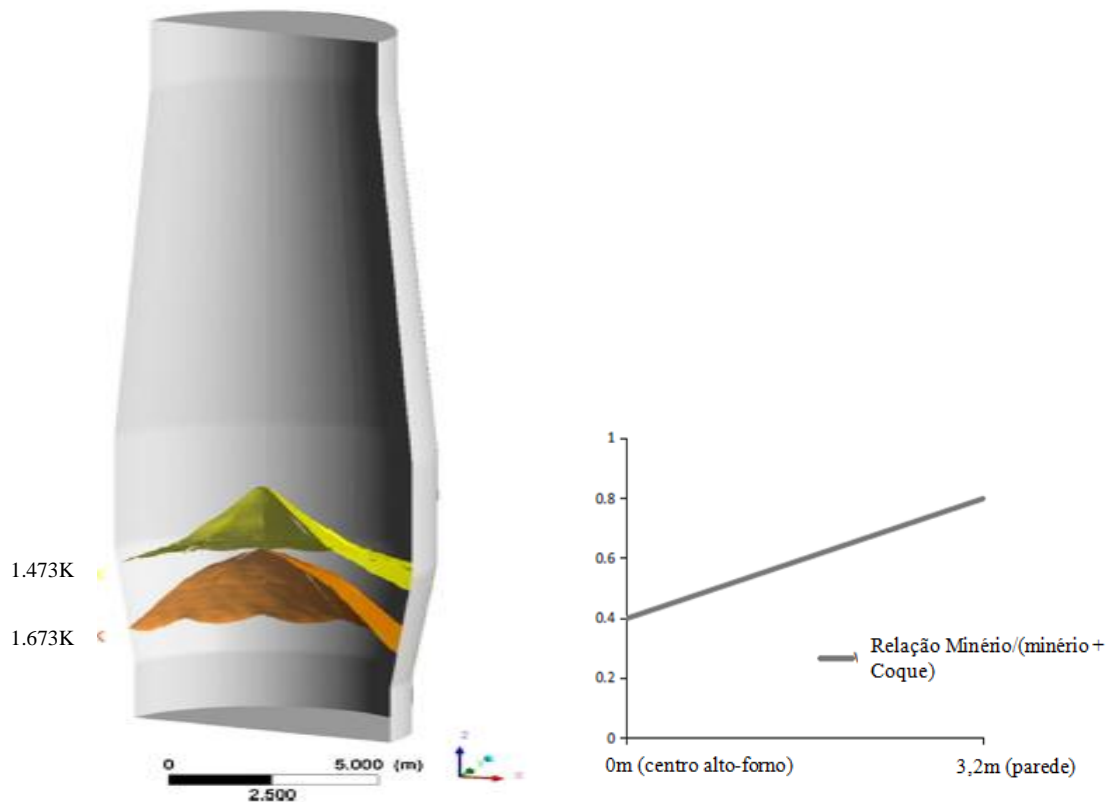


Figura 3.38: Posição e formato da zona de amolecimento e fusão segundo SHEN *et al.* (2015) e relação minério/coque utilizada na simulação

Com relação a distribuição do gás CO no alto-forno, SHEN *et al.* (2015) observaram que a concentração de CO é maior na região central do alto-forno devido a maior permeabilidade e menor relação minério/coque na região, conforme Figura 3.39. Abaixo da zona de amolecimento e fusão, a concentração de CO não muda significativamente devido a sua regeneração pela reação de *solution loss*. Após passar pela zona de amolecimento e fusão, durante a ascensão do gás, o gás CO é gradualmente consumido na zona de preparação (granular) como resultado da redução “indireta” da carga metálica. Os resultados de concentração de CO encontrados por SHEN *et al.* (2015) são similares aos encontrados por AUSTIN *et al.* (1997) através do desenvolvimento de um modelo bi-dimensional (2-D). A Figura 3.40 mostra a concentração de CO e CO₂ encontrados por AUSTIN *et al.* (1997).

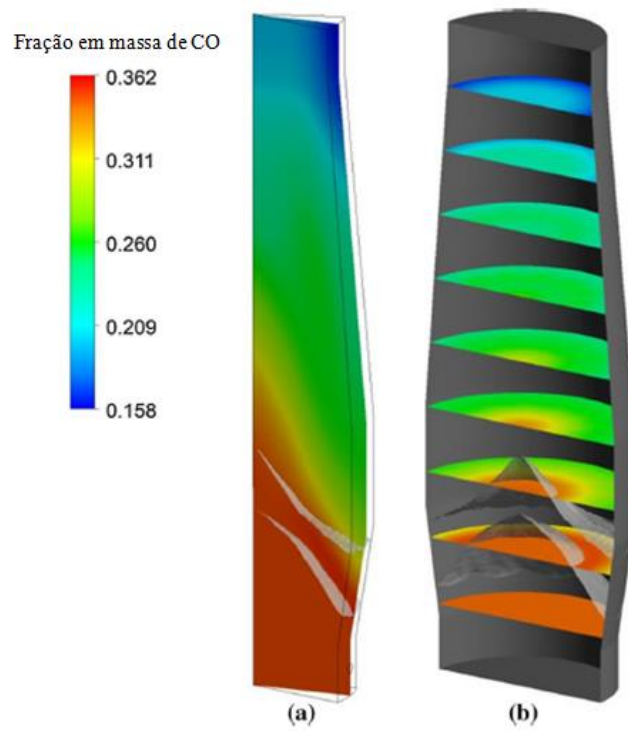


Figura 3.39: Distribuição da concentração do gás CO no alto-forno: a) corte vertical do alto-forno; b) cortes horizontais em diferentes alturas (SHEN *et al.*, 2015)

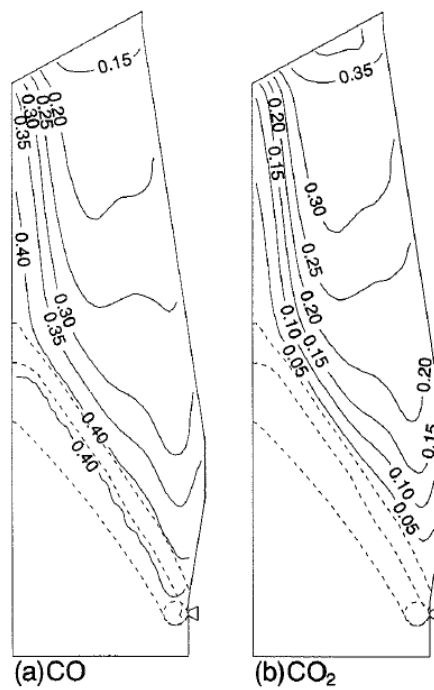


Figura 3.40: Concentração do gás CO e CO₂ simulado por AUSTIN *et al.* (1997)

O modelo desenvolvido por SHEN *et al.* (2015) é uma importante ferramenta para entender os fenômenos internos do alto-forno. Este modelo pode ser utilizado para investigar efeitos de mudanças operacionais na performance do alto-forno e identificar métodos de melhorar a eficiência energética do reator.

3.5.6- Modelos Específicos

Existem alguns modelos matemáticos específicos que são utilizados em conjunto com os modelos descritos anteriormente. Esses modelos têm as seguintes funções: 1) calcular a distribuição de carga; 2) calcular a eficiência da drenagem de líquidos no cadinho; 3) controlar o desgaste do cadinho; 4) controlar a zona de combustão.

Distribuição de carga

Os instrumentos para o controle do nível de carga no topo do alto-forno são os mais variados e vão desde o mais simples (sonda mecânica) até o perfilômetro de micro-ondas que, além de controlar o nível da carga, informa também o perfil de assentamento da carga dentro do alto-forno.

Mesmo contando com a instrumentação sofisticada para controle da distribuição de carga, alguns modelos matemáticos são utilizados para prever a trajetória de cada tipo de material carregado, para cada posição de calha ou de placa de carregamento, e a espessura das camadas de materiais formadas. DANLOY *et al.* (2001) mostraram os resultados do modelo matemático desenvolvido pela Sidmar. A Figura 3.41 ilustra esses resultados.

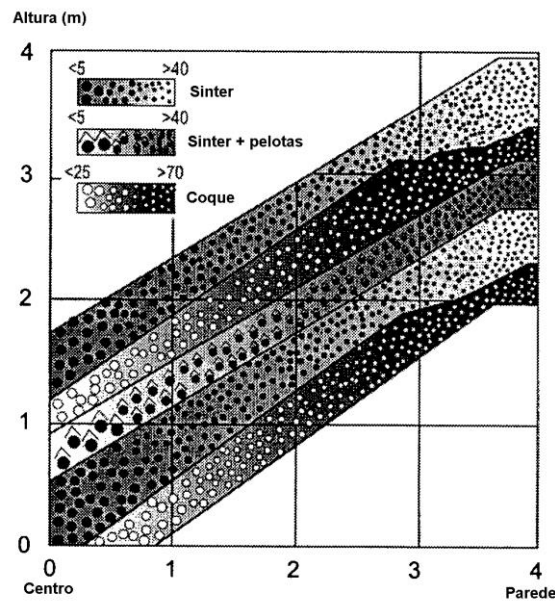


Figura 3.41: Exemplo de distribuição de carga calculada pelo modelo e utilizado no Alto-Forno B da Sidmar (DANLOY *et al.*, 2001)

Drenagem de cadinho

O controle do nível dos líquidos (gusa e escória) no cadinho é muito importante para que a permeabilidade do alto-forno não seja prejudicada. Normalmente, os modelos desenvolvidos com essa finalidade são baseados em balanços de massa associados às características dos líquidos e do leito de coque no cadinho. A Figura 3.42 ilustra os resultados do controle do nível dos líquidos no cadinho em função do tempo, apresentados por BRYER (1999).

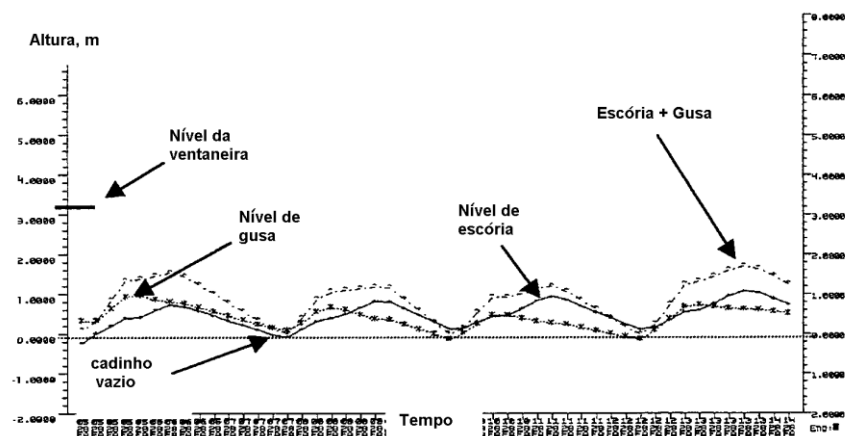


Figura 3.42: Controle do nível de líquidos no cadinho (BRYER, 1999)

Desgaste do cadinho

Nos grandes altos-fornos a coque, o desgaste acentuado dos refratários do cadinho tem determinado o final da campanha do reator. Portanto, vários controles e medidas têm sido implantados com o objetivo de prolongar a vida útil do cadinho. Como exemplo, KOBAYASHI *et al.* (1995) citam um modelo matemático baseado nas informações das temperaturas dos refratários do cadinho, obtidas através de diversos termopares. Esse modelo estima a máxima linha de erosão dos refratários em função dessas temperaturas. Esse resultado permite adotar medidas operacionais para minimizar a linha de erosão e com isso prolongar a campanha do alto-forno. A Figura 3.43 é um exemplo de aplicação desse modelo matemático.

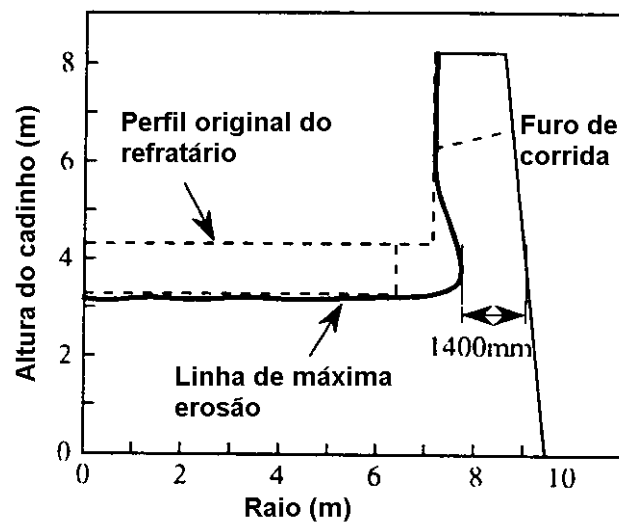


Figura 3.43: Máxima linha de erosão dos refratários do cadinho, estimada por um modelo matemático (KOBAYASHI *et al.*, 1995 apud CASTRO, 2002)

SESHADRI *et al.* (2009) também desenvolveram um modelo de avaliação do desgaste do cadinho a partir de temperaturas máximas históricas de cada termopar. A Figura 3.44 mostra o perfil de desgaste encontrado, onde se observa desgaste apenas na base do cadinho. Na parede do cadinho, como a linha de desgaste está à frente do bloco de carbono, conclui-se que existe uma camada agregada.

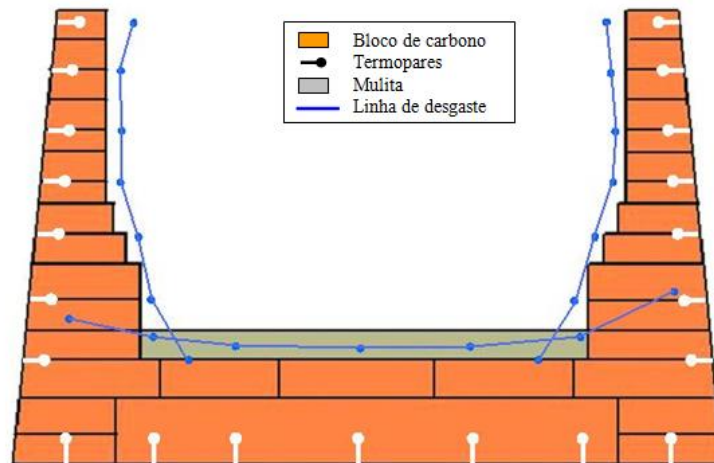


Figura 3.44: Perfil de desgaste do cadinho na direção 190° (SESHADRI *et al.*, 2009)

A Figura 5.45 mostra o gráfico de evolução do desgaste para um termopar da base, onde houve desgaste do copo cerâmico (mulita). Estes gráficos têm como objetivo, ilustrar a variação da espessura com a temperatura e avaliar a evolução da espessura do refratário. Como pode ser observado, quando a temperatura se eleva, a camada agregada diminui de espessura até que desaparece completamente e o refratário começa a ser atacado. Quando a temperatura volta a diminuir, a camada agregada se forma novamente em frente ao desgaste voltando a proteger o cadinho. (SESHADRI *et al.*, 2009)

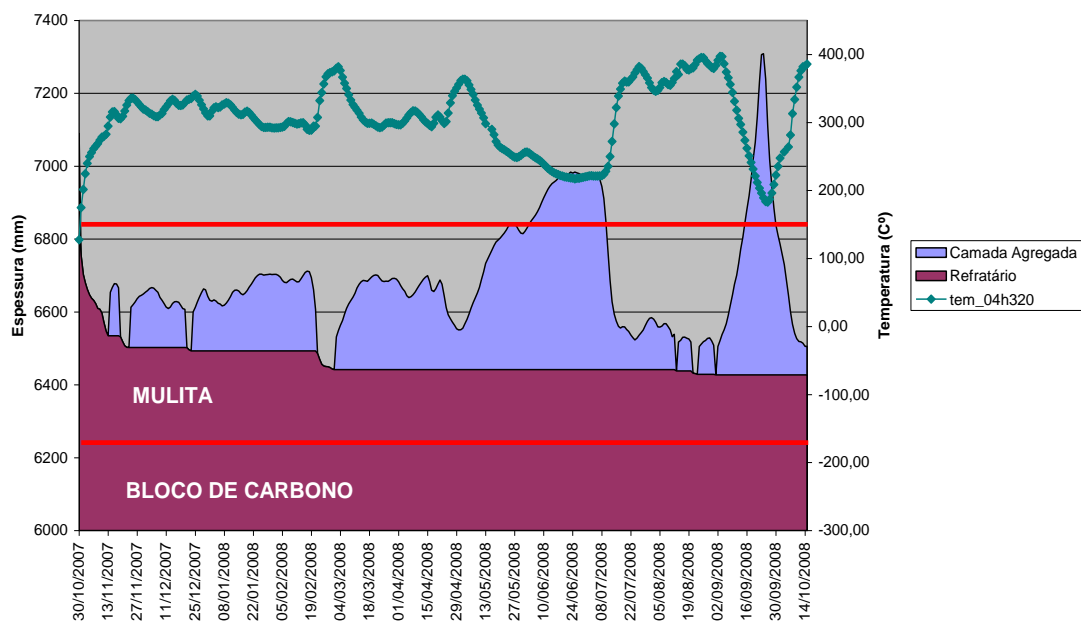


Figura 3.45: Evolução da espessura da camada agregada e do refratário localizado na base do cadinho (SESHADRI *et al.*, 2009)

Zona de combustão

As características da zona de combustão afetam o escoamento gasoso ao longo do reator e o desempenho do processo. Vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para relacionar as variáveis do processo com a penetração dessa zona e com a velocidade das partículas dentro dela, conforme exemplifica a Figuras 3.46 (OMORI, 1987).

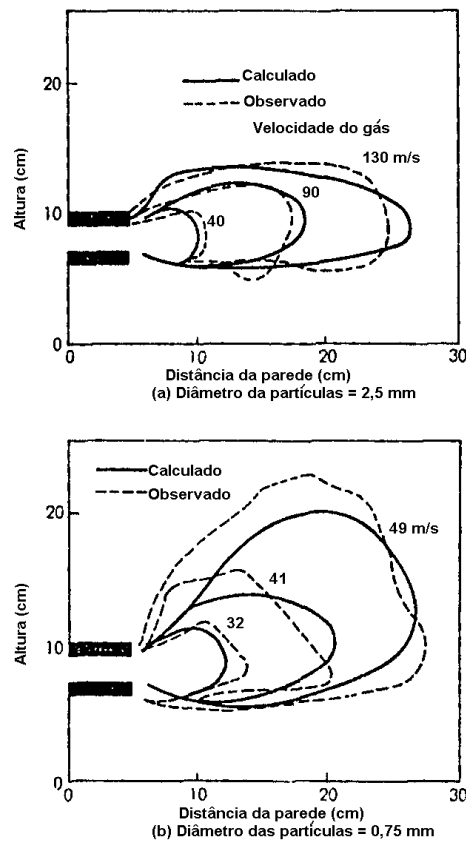


Figura 3.46: Relação entre a velocidade do sopro e a penetração da zona de combustão, previstos através de um modelo a frio (OMORI, 1987)

3.5.7- Modelos de Controle Global (“Expert System”)

Algumas empresas, que têm altos-fornos a coque, desenvolveram um controle que agrega os diversos modelos matemáticos, as informações coletadas por instrumentações, sensores e análises e a experiência operacional de seu quadro de técnicos. Esse é um controle fechado que visa a adoção de medidas com o mínimo de intervenção do operador. O sistema interpreta o

processo, implanta ações corretivas e detalha os resultados obtidos. Ele é chamado de “*Expert System*”. (LAZARIC *et al.*, 2003)

Apesar dos modelos especialistas utilizarem diferentes técnicas e ferramentas, eles compartilham as mesmas fases (etapas): (KLINGER *et al.*, 2010, 2012)

- Na primeira fase desse sistema a situação do alto-forno é diagnosticada pelos modelos matemáticos e pela experiência dos operadores. Nesse momento é realizada uma análise da situação, onde o sistema examina se alguma coisa anormal está ocorrendo.

- A segunda fase é o reconhecimento do fenômeno, onde as seguintes perguntas são respondidas: o fenômeno que está ocorrendo é realmente anormal e qual é o grau de anormalidade?

- A terceira fase é a determinação da ação, recomendada ao operador através da tela do computador. Após a tomada de ação, o sistema faz um diagnóstico do alto-forno para confirmar se o processo voltou à normalidade e se os parâmetros operacionais voltaram aos valores iguais aos antes do distúrbio.

Modelos de controle global utilizam vários tipos de modelos matemáticos em conjunto, por exemplo: modelo de distribuição de carga, modelo dos regeneradores (aquecimento do ar), modelo da zona de amolecimento e fusão, modelo do cadinho, modelo cinético, modelo da zona de combustão. (MAKI *et al.*, 2000 e ZAIMI *et al.*, 2011)

Modelos de controle especialista (*Expert System*) foram desenvolvidos por KLINGER *et al.* (2010, 2012), MAKI *et al.* (2000) e JEAN-PAUL *et al.* (2011).

4- METODOLOGIA

4.1- Reator Industrial

O modelo termoquímico foi aplicado nos Altos-Fornos 1 e 2 (denominação utilizada na tese). Na Tabela IV.1 e IV.2 pode-se observar os dados de projeto e parâmetros operacionais respectivamente.

Tabela IV.1: Dados de projeto dos Altos-Fornos

	ALTO-FORNO 1	ALTO-FORNO 2
Volume Interno	3.050m ³	1.750m ³
Volume de Trabalho	2.650m ³	1.490m ³
Diâmetro do Cadinho	11,5m	9,4m
Número de Ventaneiras	28	24
Diâmetro das Ventaneiras	150mm	130mm
Sistema de Refrigeração	Stave cooler (água desmineralizada)	Stave cooler (água desmineralizada)
Número de Furos de Gusa	4	2
Injeção de Combustível	Carvão pulverizado	Carvão pulverizado
Sistema de Distribuição de carga	Topo sem cone (PW)	Topo sem cone (PW)
Regeneradores	03-Cowpers	03-Cowpers

Tabela IV.2: Parâmetros operacionais de projeto dos Altos-Fornos

	ALTO-FORNO 1	ALTO-FORNO 2
Coque Rate	355kg/t	360kg/t
Taxa de carvão pulverizado (PCR)	140kg/t	140kg/t
Fuel Rate	495kg/t	500kg/t
Temperatura de Sopros	1.150°C	1.200°C
Volume de Sopros	5.000Nm ³ /min	3.000Nm ³ /min
Enriquecimento de oxigênio	4 a 6%	3 a 5%
Pressão de sopros	3,5 a 3,6kgf/cm ²	3,5 a 3,6kgf/cm ²
Pressão de Topo	2kgf/cm ²	2kgf/cm ²
Slag Rate	290kg/t	300kg/t
Carga Metálica	85% Sinter / 15% Minério	90% Sinter / 10% Minério

4.2- Avaliação da Instrumentação do Alto-Forno

O controle termoquímico proposto neste trabalho é baseado em cinco tipos distintos de informações: dados dos gases do topo, da carga, do sopros, do gusa e escória e das perdas térmicas. As informações dos gases do topo são as mais importantes (sensor principal) neste tipo de controle, porque qualquer alteração de “marcha” se reflete instantaneamente em mudanças na temperatura e composição destes gases. A Tabela IV.3 mostra toda instrumentação necessária para o modelo termoquímico e sua periodicidade.

Tabela IV.3: Informações, periodicidade e instrumentações necessárias para implantação do modelo termoquímico

Tipo de informação	Periodicidade	Instrumentação necessária
1) Dados do gás de topo - %CO, %CO ₂ , %H ₂ - Temperatura	Instantânea Instantânea	Analizador de gás Termopares
2) Dados da carga - Massa dos constituintes - Análise química - Massa de carvão injetado	Cada carga Cada 8h Instantânea	Balanças Laboratório de análises Balança/Célula de carga
3) Dados de sopro - Temperatura - Umidade do ar - Vazão de ar	Instantânea Cada 8h Instantânea	Termopar Higrômetro Transmissor de vazão
4) Dados de corrida - Temperatura do gusa - Composição do gusa - Composição da escória	Cada corrida Cada corrida Cada corrida	Termopar Laboratório de análises Laboratório de análises
5) Perdas térmicas	Instantânea	Calculada - Termopares e transmissor de vazão de água

Os valores de perda térmica utilizados no modelo são calculados conforme equação 3.20 (Revisão Bibliográfica). As perdas térmicas também podem ser calculadas através de balanço térmico do alto-forno quando o consumo de carbono é conhecido.

4.2.1- Instrumentação dos Altos-Fornos 1 e 2

A instrumentação existente nos altos-fornos analisados condiz com as necessidades para desenvolvimento do modelo proposto. Os principais instrumentos de medição presentes são:

- 4 lanças fixas de medição de temperatura radial no topo;
- 4 termopares para medição da temperatura de topo;

- Analisador de gás de topo (%CO, %CO₂, %H₂, %N₂) – existem dois tipos de analisadores do gás de topo, cromatógrafo e analisador contínuo;
- Termopares para medição de temperatura no corpo do alto-forno (staves);
- 12 tomadas de pressão no corpo do alto-forno;
- Análise da qualidade das matérias-primas (coque e carvão PCI; minério, sinter e pelota);
- Balanças para pesagem da carga;
- Termopar para medição da temperatura de sopro;
- Transmissor de vazão de ar e % de enriquecimento de O₂;
- Análise da umidade do ar soprado;
- Análise química do gusa e escória por corrida;
- Medição da temperatura de gusa a cada uma hora;
- Medição da temperatura e vazão de água de refrigeração dos staves para cálculo da perda térmica.

4.3- Modelo Termoquímico

4.3.1- Índices Operacionais

Os índices operacionais calculados pelo modelo estão listados na Tabela IV.4.

Tabela IV.4: Principais índices operacionais do modelo termoquímico (CASTRO, 1983)

PARÂMETRO	DEFINIÇÃO	FAIXA DE VARIAÇÃO
ω (fator ômega ou desvio de RIST)	$\omega = \left \frac{O}{Fe} \right - 1,05$ Onde $\left \frac{O}{Fe} \right $ é relação de moles de oxigênio sobre moles de ferro da carga metálica ao sair da zona de preparação.	Normal → 0 a 0,45
ΔC	$\Delta C = C_R - C_C$ Onde C_R é a quantidade de coque (úmido) sendo carregada e C_C a quantidade de coque (úmido) sendo consumida	Objetiva-se sempre $\Delta C = 0$

O índice “fator ômega (ω)” mede o desempenho da transferência de massa no alto-forno. Este índice influi fortemente no consumo de carvão e é impactado principalmente por dois fatores: distribuição da carga e gases e redutibilidade da carga metálica.

O índice “ ΔC ” compara a quantidade de combustível sendo carregada com aquela sendo consumida instantaneamente, mostrando a tendência do nível térmico do forno e quantificando a modificação a ser realizada na carga.

4.3.2- Desenvolvimento do Modelo de Controle

O modelo de controle, é dividido em três partes:

- 1) organização e entrada de dados;
- 2) memória de cálculo do modelo;
- 3) saída de dados;
- 4) atuação do operador.

Organização e entrada de dados

O operador tem acesso a um computador de controle de processo que executa o programa de controle com as entradas das informações coletadas.

Foram definidos limites para as variáveis de entradas para facilitar a detecção de instrumentos danificados / descalibrados, de modo a evitar erros e decisões erradas com base no modelo.

Um conjunto de entradas de dados, correspondente a um determinado momento, tem as seguintes informações:

- . proporção da carga metálica (% de cada constituinte da carga metálica);
- . análises químicas dos constituintes da carga metálica e fundentes;
- . análises químicas do coque, finos de carvão pulverizado e cinza de ambos;
- . massa do coque carregado pelo topo;
- . taxa de injeção de finos de carvão;

- . umidade, % de oxigênio de enriquecimento e temperatura do ar soprado;
- . perda térmica da zona de elaboração;
- . análise química e temperatura do ferro gusa;
- . massa e análise química da escória;
- . massa e análise química do pó do topo;
- . %H₂, CO/CO₂ e temperatura do gás de topo.

Memória de cálculo

O objetivo principal do modelo de controle é calcular o peso de carbono consumido num determinado momento para que o operador possa agir no sentido de carregar a mesma quantidade que está sendo efetivamente consumida e, assim, manter o processo estável sob esse ponto de vista. O melhor modelo para essa finalidade é o modelo termoquímico. A memória de cálculo desenvolvida neste trabalho é similar a apresentada por CASTRO (1983), porém para alto-forno a coque.

Como o carvão vegetal e o coque não têm as mesmas propriedades físicas (ex.: densidade) e químicas (ex.: matéria volátil); a utilização de um ou outro no alto-forno faz com que o processo de produção seja diferente; exemplo, diferente tempo de residência da carga na zona de preparação e proporção de matéria volátil. Isso reflete no controle de processo, isto é, um modelo de controle para altos-fornos a carvão vegetal e coque possuem premissas diferentes.

O conjunto de cálculos descritos abaixo constituem o modelo termoquímico:

1) Leito de fusão (balanço de massa)

O objetivo do leito de fusão é calcular as quantidades das matérias-primas necessárias para produzir 1 tonelada de gusa.

Dados de entrada:

- . análises químicas das matérias-primas:
 - . carga metálica: minério de ferro granulado, sinter e pelota
 - . quartzo

- . proporção dos componentes da carga metálica;
- . análises químicas das cinzas do coque e carvão injetado;
- . análise química do gusa;
- . massa e análise química da escória;

Como os consumos específicos são dados de entrada do modelo (leito de fusão calculado pelo operador), estes resultados são comparados com os dados reais para verificar erro no modelo, entrada de dados ou cálculo do operador.

2) Balanço de oxigênio da zona de elaboração

O balanço de massa na zona de elaboração permite calcular uma expressão de volume de ar soprado (V_{ar} , em Nm^3/t gusa) em função do grau de redução da carga metálica proveniente da zona de preparação (Fator Ômega – ω) e do carbono que está sendo consumido (C , em kg/t gusa). ($V_{ar} = f(C, \omega)$).

Dados de entrada:

- . todos os dados do balanço de massa;
- . resultados do balanço de massa;
- . proporções de CO , CO_2 e H_2 dos voláteis que passam para a zona de elaboração;
- . análises químicas do coque e do carvão injetado;
- . umidade do ar (g/Nm^3);
- . percentagem de enriquecimento de oxigênio no ar.

O resumo do balanço de oxigênio na zona de elaboração é apresentado na Tabela IV.5.

Tabela IV.5: Balanço de oxigênio na zona de elaboração

ENTRADAS DE OXIGÊNIO	SAÍDAS DE OXIGÊNIO
<p>1. Número de átomos de oxigênio que entra na zona de elaboração sob forma de óxidos e carbonatos provenientes da zona de preparação;</p> <p>2. Número de átomos de oxigênio que entra na zona de elaboração através do ar, da umidade do ar ou enriquecimento de oxigênio;</p> <p>3. Número de átomos de oxigênio que entra na zona de elaboração através do CO e CO₂ dos voláteis.</p>	<p>1. Número de átomos de oxigênio que sai da zona de elaboração na forma de CO, CO₂ e H₂O (gases).</p>

3) Balanço térmico da zona de elaboração

Após o balanço de oxigênio na zona de elaboração, onde foi obtido o valor de $V_{ar} = f(C, \omega)$, o balanço térmico pode ser calculado. Se as perdas térmicas são conhecidas o objetivo é calcular o consumo de carbono (C). Desta forma, o balanço térmico da zona de elaboração permite calcular a quantidade de calor consumido (e portanto o consumo de carbono) e o volume de ar específico.

Dados de entrada:

- . todos do balanço de massa;
- . todos do balanço de oxigênio da zona de elaboração;
- . resultados do balanço de massa;
- . resultado do balanço de oxigênio;
- . temperaturas do ferro-gusa, da escória e do ar soprado;
- . perdas térmicas da zona de elaboração.

O resumo do balanço térmico da zona de elaboração é apresentado na Tabela IV.6.

Tabela IV.6: Balanço térmico da zona de elaboração

ENTRADAS DE CALOR	SAÍDAS DE CALOR
1. Calor de resfriamento da carga proveniente da zona de preparação (a 950°C) 2. Calor de resfriamento do ar soprado 3. Calor das reações exotérmicas $C + O_2 = CO_2$ $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$ $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$	1. Calor de aquecimento do gusa 2. Calor de aquecimento da escória 3. Calor de aquecimento dos gases que saem da zona de elaboração (a 950°C) 4. Calor das reações endotérmicas 5. Perdas térmicas

Solução: Consumo de carbono (C), volume de ar soprado (V_{ar}).

4) Balanço de massa dos gases da zona de preparação

Com o valor calculado do peso de carbono pode-se calcular a relação CO/CO₂ do gás de topo conhecendo-se a composição do H₂ nesse mesmo gás.

Dados de entrada:

- . todos os anteriores;
- . todos os resultados das etapas anteriores;
- . CO/CO₂ do gás de topo;
- . %H₂ do gás de topo.

Balanços de CO, CO₂ e H₂, para o cálculo de CO/CO₂ do gás de topo e assim comparar com o dado de entrada para o acerto do fator ômega real.

Resultados: consumo de carbono (C), vazão de ar soprado (V_{ar}) e fator ômega (w).

O fluxograma desses cálculos é mostrado na Figura 4.1.

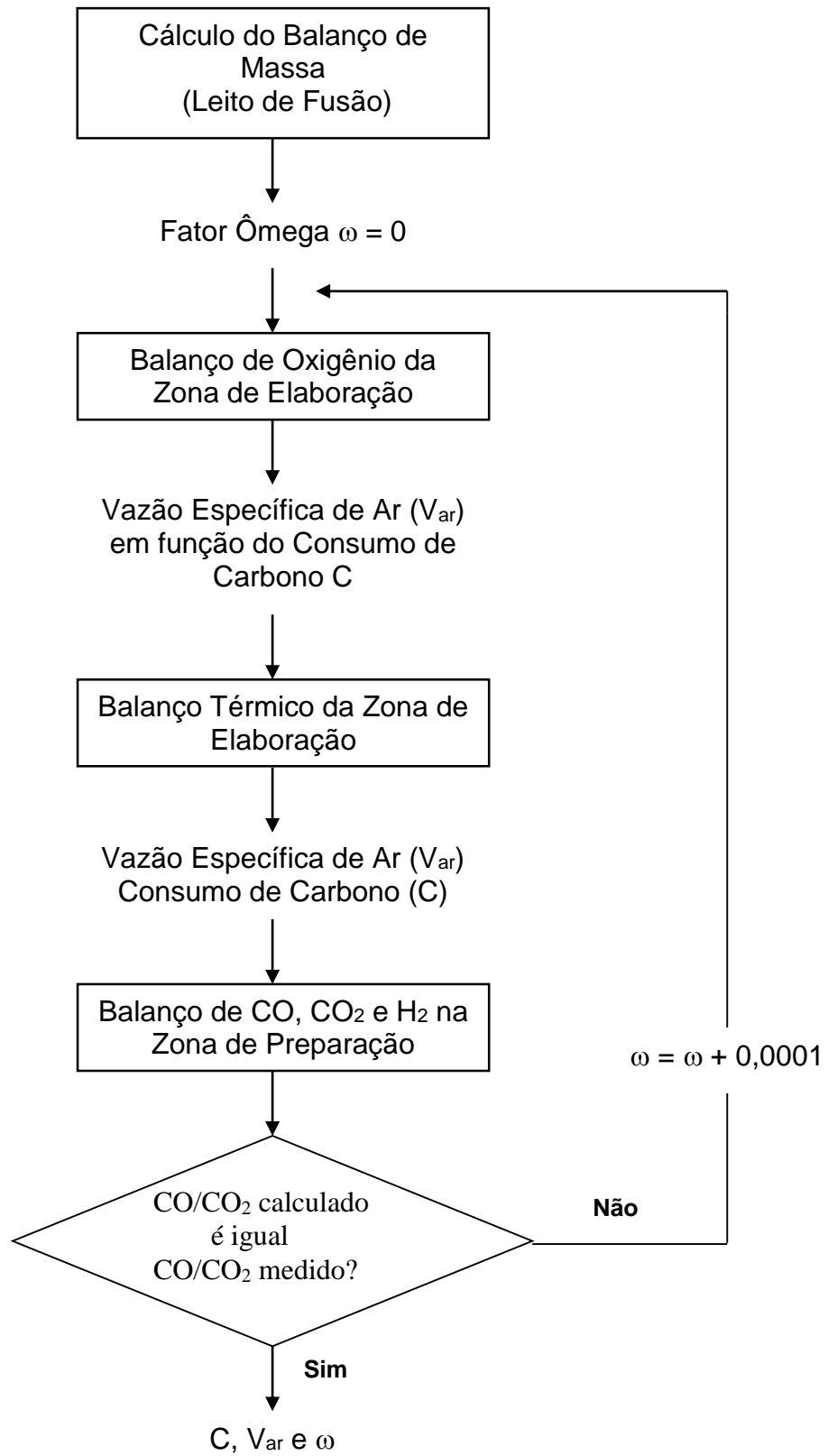


Figura 4.1: Esquema de cálculo do modelo termoquímico

Algumas premissas para o cálculo do consumo de carbono foram consideradas:

- Temperatura da zona de reserva térmica 950°C (alto-forno a coque);
- Os gases saem da zona de elaboração em equilíbrio termodinâmico com Fe-FeO_{1,05};
- Perda térmica da zona de elaboração correspondente a 70% da perda térmica global;
- Temperatura da escória = temperatura do gusa + 50°C (devido calor específico da escória);
- Fases do óxido de ferro presentes para diferentes valores de fator ômega:
 - $\omega < 0,28 \rightarrow \text{FeO}_{1,05}$ e Fe_3O_4 (mais $\text{FeO}_{1,05}$ carregado);
 - $\omega \geq 0,28 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ e Fe_3O_4 (mais $\text{FeO}_{1,05}$ carregado);
 - $\omega = 0 \rightarrow \text{FeO}_{1,05}$.

Saída de dados

Para cada conjunto de dados de entrada, o programa calcula um conjunto correspondente de variáveis, chamadas de dados de saída. No caso do modelo operar online com o processo, a entrada e saída de dados ocorrerá de maneira instantânea juntamente com as variações do processo.

A Figura 4.2 mostra o esquema de como é o modelo de controle proposto.

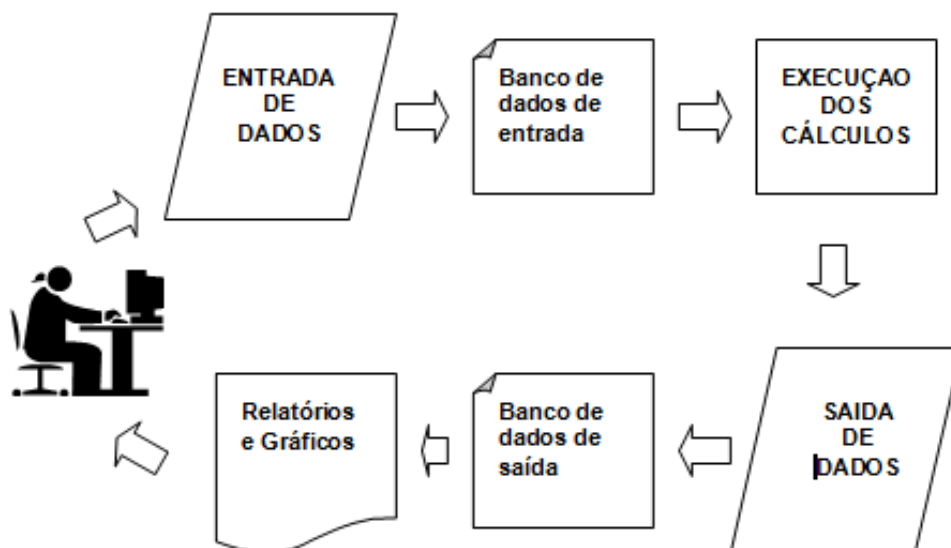


Figura 4.2: Esquema do modelo de controle proposto

4.4- Simulação do Modelo na Operação do Alto-Forno

Após desenvolvimento do modelo termoquímico para altos-fornos a coque, foi definido e coletado um banco de dados reais do processo e esses dados serão simulados no modelo com objetivo de validar os cálculos e verificar existência de erros de algum instrumento de medição. Nesta etapa foram obtidos os resultados de consumo de carbono calculado pelo modelo termoquímico.

4.5- Comparação Entre os Dados Calculados e Reais

Após simulação com dados reais e obtenção do consumo de carbono calculado, os dados reais e calculados de carbono serão comparados. Nesta etapa será verificada a sensibilidade do modelo com relação aos principais parâmetros operacionais.

Validando as análises realizadas, o modelo foi utilizado pelo operador para controle do processo buscando maior assertividade na definição do carbono carregado em relação ao carbono consumido (calculado pelo modelo termoquímico).

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1- Desenvolvimento e Utilização do Modelo Termoquímico

Com base nos cálculos termoquímicos (balanço de massa e térmico do alto-forno) foi desenvolvido modelo conforme Figura 5.1.

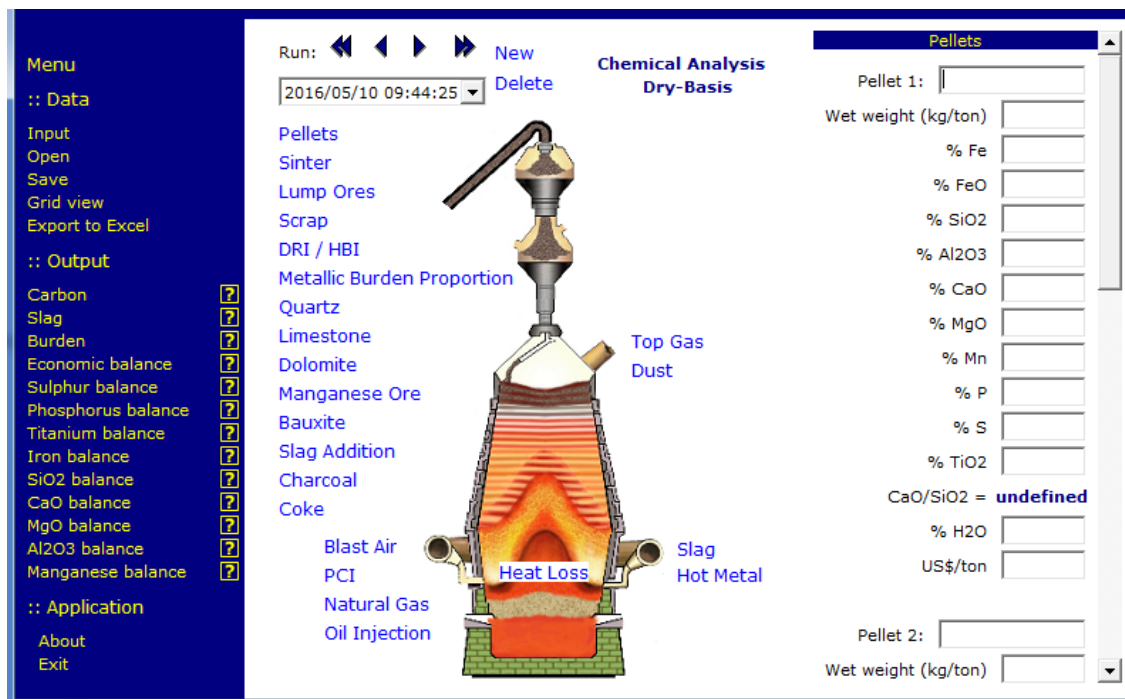


Figura 5.1: Tela inicial do modelo termoquímico

O modelo desenvolvido realiza uma avaliação estática do processo, sendo o consumo de carbono no momento do cálculo, o principal parâmetro calculado. Desta forma, o modelo deve ser utilizado para ajuste “fino” do processo. Em caso de situações operacionais de grande instabilidade, por exemplo, engaiolamento e arriamento; o modelo não deve ser utilizado, pois outros parâmetros não considerados no modelo estarão impactando o resultado do consumo de carbono.

A Figura 5.1 mostra os dados de entrada listados na tela do modelo. Estas informações foram coletadas com média diária. Com os dados coletados foram feitas as primeiras análises no modelo. As variáveis de entradas foram inseridas conforme telas da Figura 5.2 e 5.3.

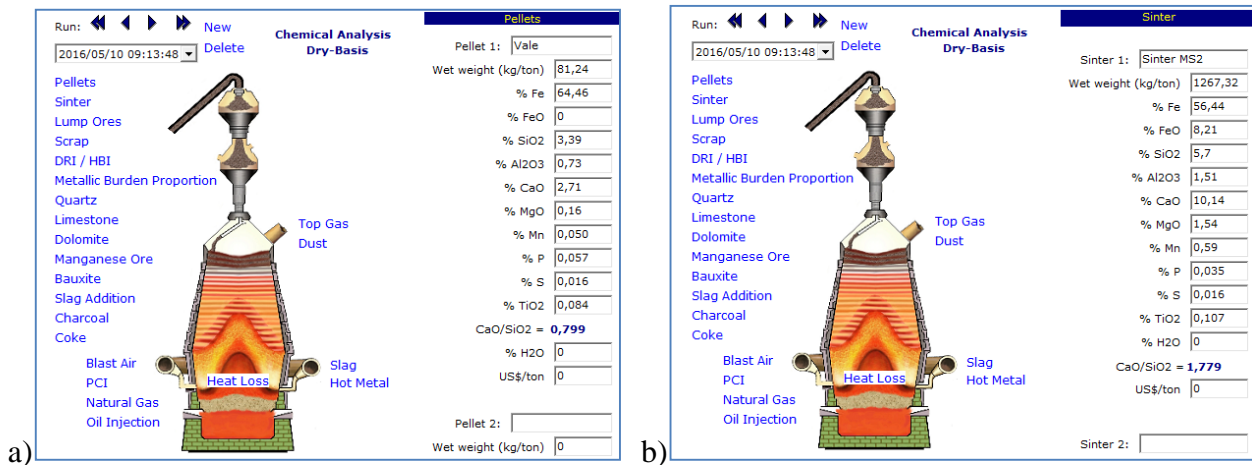


Figura 5.2: Tela exemplificando a entrada de variáveis. a) Input Pelota; b) Input Sinter

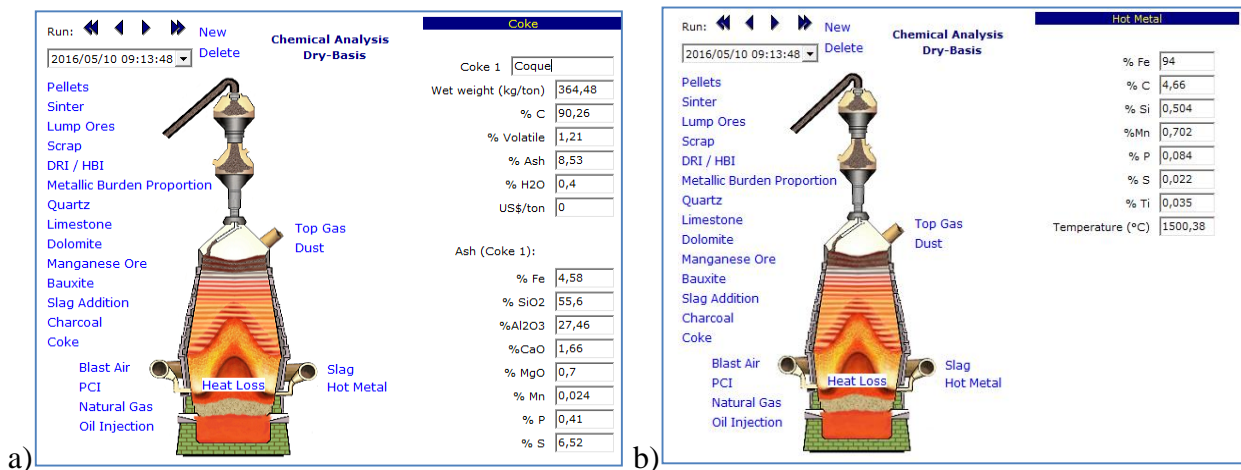


Figura 5.3: Tela exemplificando a entrada de variáveis. a) Input (Coque); b) Input Gusa

Como principais resultados do modelo são apresentados na tela da Figura 5.4 o consumo esperado de carbono, além de outros parâmetros calculados como, temperatura de chama e fator ômega.

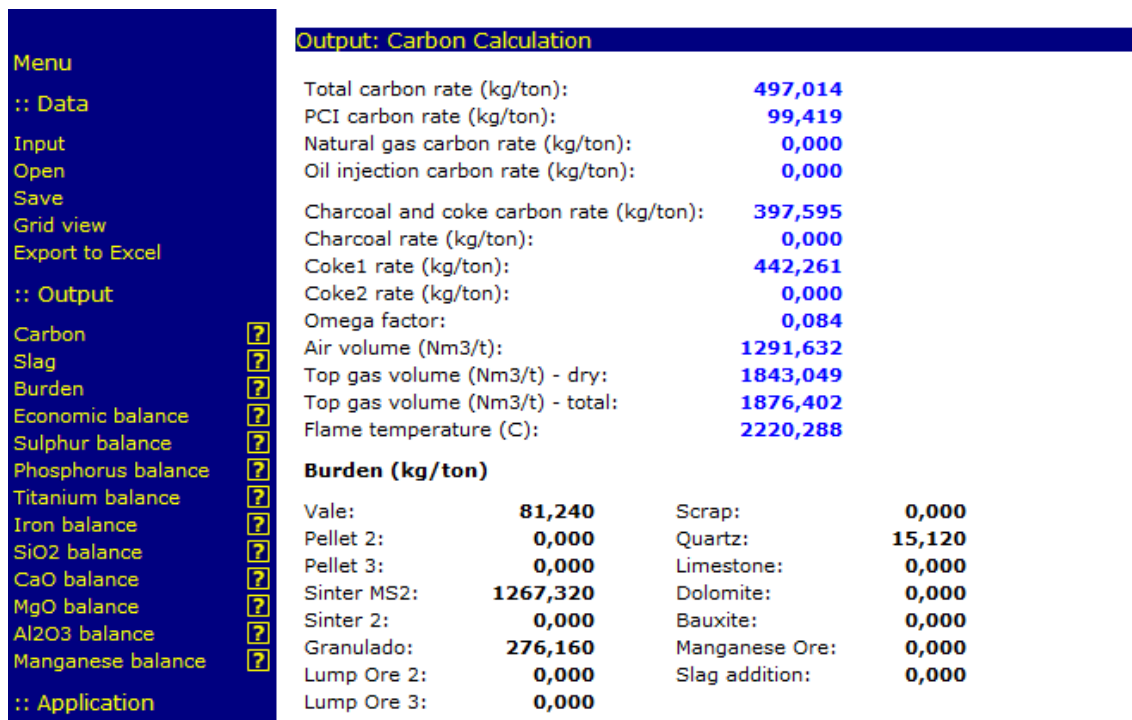


Figura 5.4: Tela de resultados do modelo com foco no consumo de carbono

5.2- Resultados Alto-Forno 1

5.2.1- Definição e Avaliação Banco de Dados do AF1

Para simulação dos resultados reais utilizando modelo termoquímico foi definido como período de referência janeiro 2016 a junho 2016 (6 meses). Para este período foram coletados os dados diários para os dois altos-fornos com todas as informações necessárias para o modelo.

Para evitar erros na análise dos resultados do modelo termoquímico, os dados dos Altos-Fornos 1 e 2 foram avaliados com o objetivo de eliminar dados de dias com paradas operacionais, falhas na instrumentação do topo, entre outros erros que podem impactar no modelo.

A Figura 5.5 mostra o gráfico de produção e índice de utilização (tempo de operação/tempo calendário total) do Alto-Forno 1 no período base. Para avaliação do modelo, foram descartados os dias com parada do alto-forno conforme destacado na Figura 5.5. A Figura 5.6 mostra os dados do Alto-Forno 1 desconsiderados os dias com paradas de produção. Os dias com paradas do alto-forno devem ser desconsiderados devido influência do tempo de parada no

consumo de combustível. Conforme citado anteriormente, o modelo deve ser utilizado para situações em que é necessário ajuste “fino” do consumo de combustível.

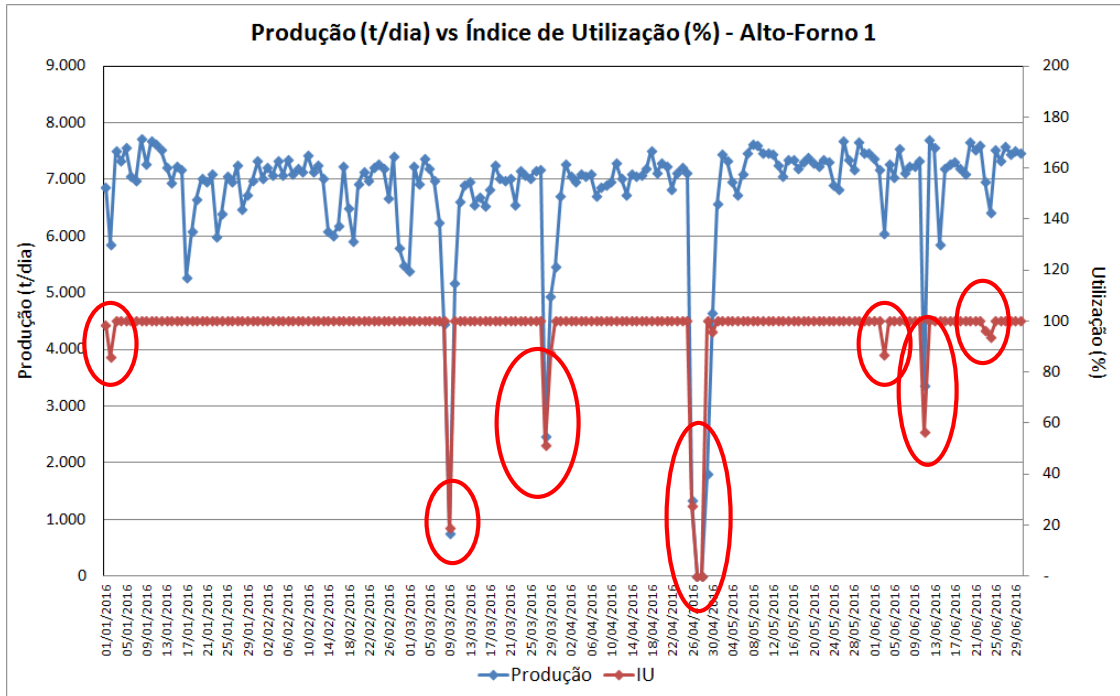


Figura 5.5: Gráfico de sequência de Produção e Índice de Utilização do Alto-Forno 1

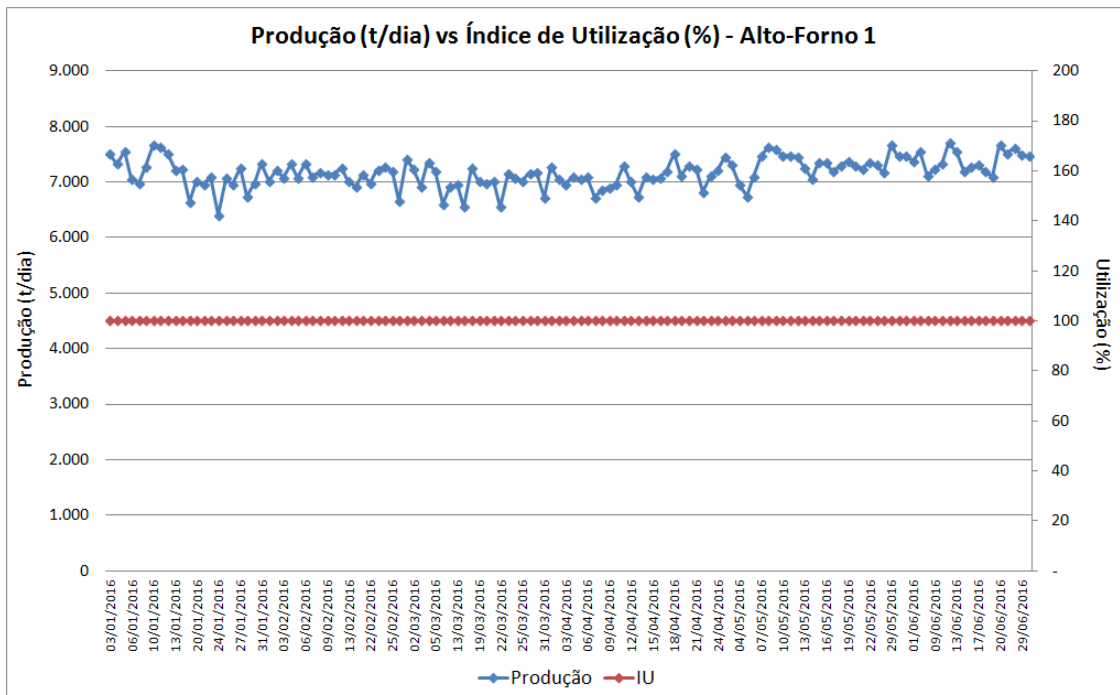


Figura 5.6: Gráfico de sequência de Produção e Índice de Utilização do Alto-Forno 1 desconsiderados os dias de paradas operacionais

Foram avaliados também os principais parâmetros operacionais do alto-forno no período base. A Figura 5.7 ilustra a carga metálica utilizada pelo Alto-Forno 1 (AF1) no período. Esta análise é importante tendo em vista o impacto da redutibilidade da carga e volume de escória gerado no consumo de combustível do alto-forno. A Figura 5.8 mostra o volume de escória gerado.

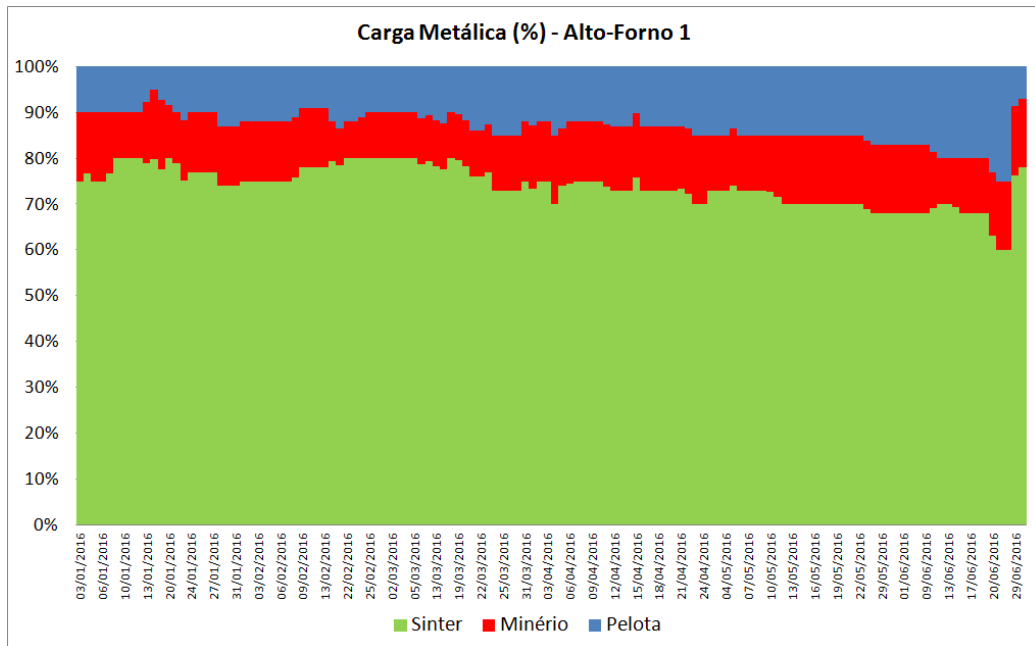


Figura 5.7: Carga metálica utilizada no Alto-Forno 1 de jan/16 a jun/16

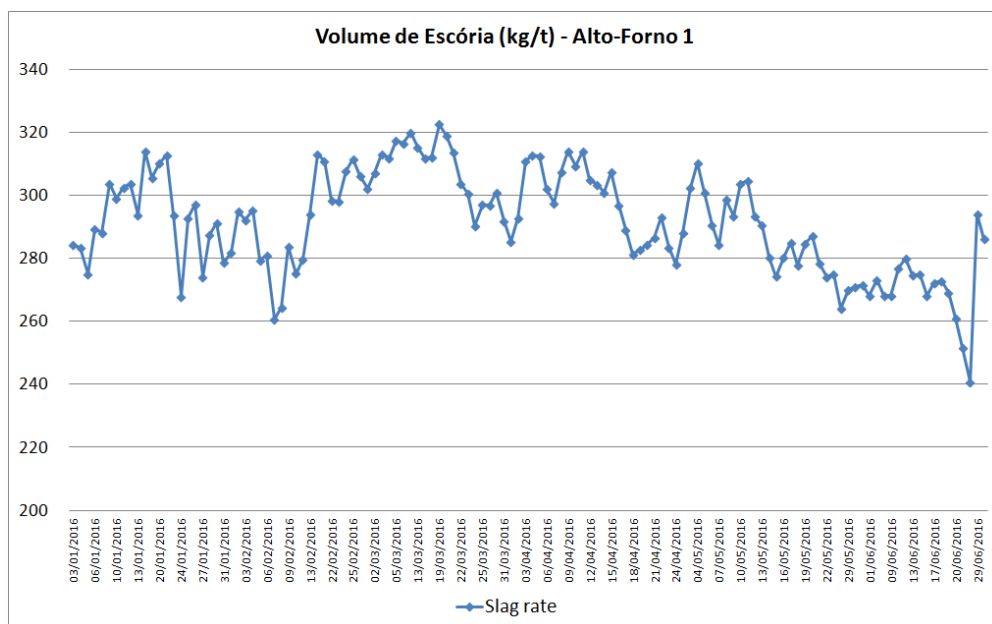


Figura 5.8: Volume de escória gerado no Alto-Forno 1

Pode-se observar na Figura 5.7 uma queda no consumo de sinter no AF1 durante o primeiro semestre de 2016 e conseqüentemente elevação no consumo de granulado e pelota. Isto se deve a indisponibilidade momentânea de sinter (estoque baixo). No final de junho/16, após normalização do estoque de sinter, ocorreu elevação do %sinter na carga. Com a redução do %sinter na carga do AF1 pode-se observar também a redução provocada no volume de escória (Figura 5.8) devido ao maior teor de ferro do minério granulado e pelota em relação ao sinter. A Tabela V.1 mostra as médias mensais da carga metálica, volume de escória e minério/gusa do Alto-Forno 1. A utilização de pelota no AF1 tem como objetivo controlar o volume de escória devido limitações de drenagem do cadinho.

Tabela V.1: Dados mensais da carga metálica do Alto-Forno 1

Mês	%Sinter	%Pelota	%Minério	Minério/Gusa (kg/t)	Vol. Escória (kg/t)
jan/16	77,32%	9,77%	12,91%	1.611,25	294,97
fev/16	77,71%	11,18%	11,11%	1.604,44	292,14
mar/16	77,28%	11,67%	11,04%	1.618,11	308,47
abr/16	73,17%	13,04%	13,79%	1.611,78	296,66
mai/16	70,48%	15,50%	14,01%	1.605,18	283,97
jun/16	69,86%	16,17%	13,97%	1.570,96	271,46
Média	74,24%	12,93%	12,83%	1.603,24	290,82

A Figura 5.9 mostra a temperatura do gusa do AF1. É observado que a temperatura do gusa é aproximadamente 1500°C, temperatura visada no padrão de controle térmico dos Altos-Fornos 1 e 2. O nível térmico visado no alto-forno também tem forte impacto no consumo de carbono. A temperatura do gusa de 1500°C é visada para garantir a fluidez da escória, dessulfuração do gusa e acerto do %silício do gusa na faixa determinada pela Aciaria. O %silício do gusa pode ser observado na Figura 5.10. Conforme discutido na revisão bibliográfica a incorporação de silício ao gusa depende de muitos parâmetros, entre eles o nível térmico. O %silício visado no gusa é 0,35% de acordo com necessidade da Aciaria. Observa-se que o valor médio do silício do gusa do 1º semestre/2016 está próximo do especificado (Tabela V.2), porém com elevada dispersão na média diária (Figura 5.10). Devido a característica endotérmica da reação de incorporação de silício, este parâmetro é muito importante para controle do consumo de carbono no alto-forno.

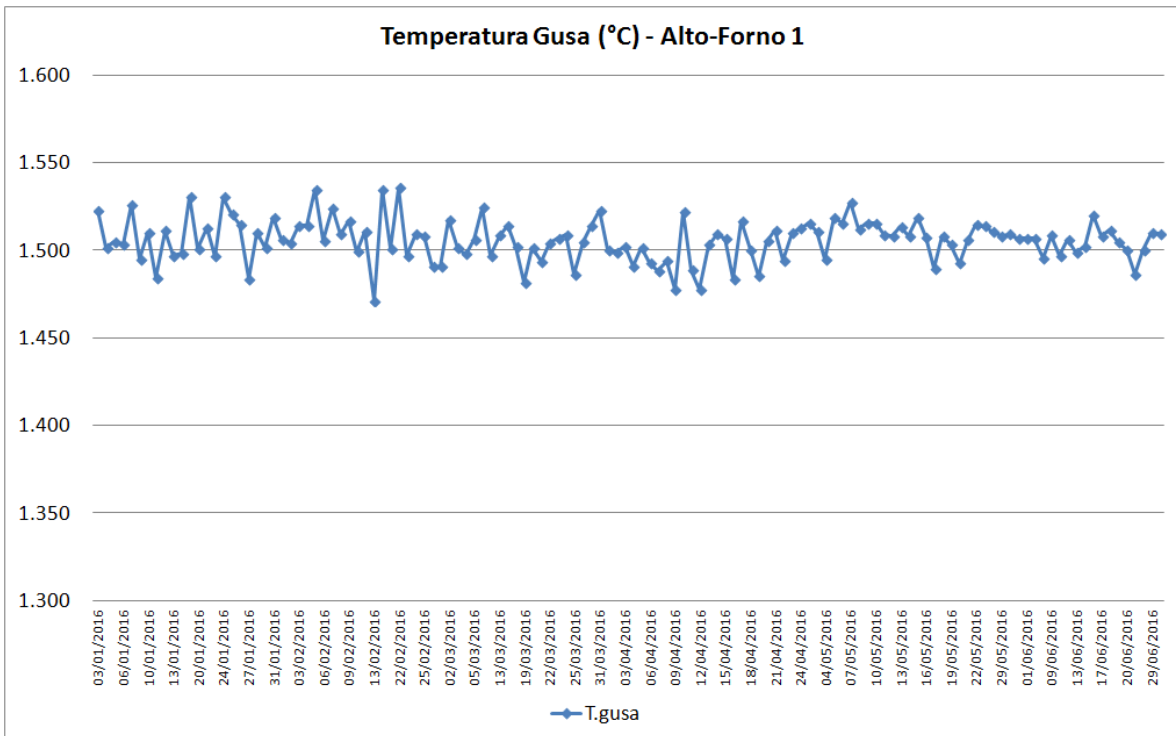


Figura 5.9: Temperatura do Gusa do Alto-Forno 1

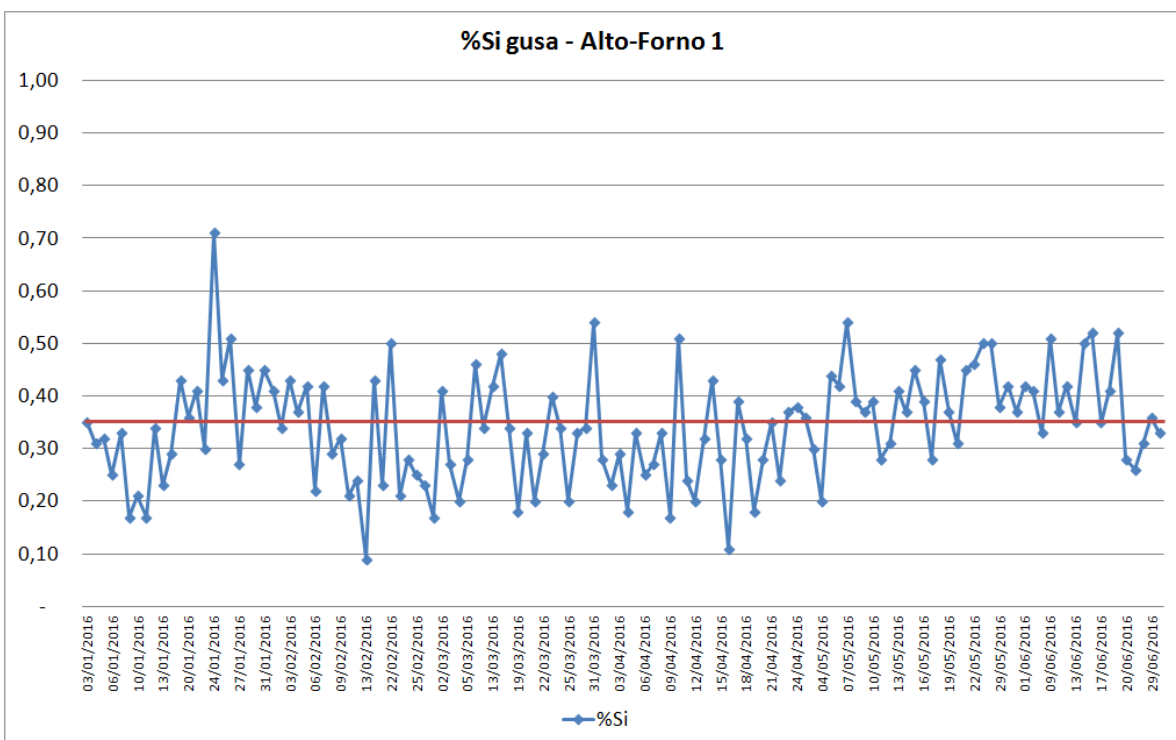


Figura 5.10: %Silício do Gusa do Alto-Forno 1

Tabela V.2: Dados mensais AF1: coque, gusa, ar soprado e gás de topo

Mês	%Cz Coque	T.gusa °C	%Si gusa	T.sopro °C	%O ₂ enriq.	CO/CO ₂ topo	Rend. Gasoso	%H ₂ topo
jan/16	8,55	1.506	0,34	1.173	3,96	1,18	45,98	3,09
fev/16	8,55	1.505	0,29	1.153	3,82	1,12	47,10	3,09
mar/16	8,91	1.498	0,34	1.165	4,00	1,19	45,68	3,01
abr/16	8,97	1.499	0,32	1.178	4,14	1,20	45,54	2,92
mai/16	8,85	1.509	0,40	1.168	4,09	1,17	46,14	2,83
jun/16	8,09	1.501	0,37	1.150	4,06	1,09	47,81	2,71
Média	8,65	1.503	0,34	1.165	4,01	1,16	46,38	2,94

Conforme pode-se observar na Tabela V.2, a temperatura de sopro e %O₂ enriquecido no ar soprado não possuem grande variação. Isto ocorre devido operador visar o máximo de temperatura de sopro com objetivo de reduzir o consumo de carbono e o %O₂ ser utilizado para controle de produção e não ter atuação direta do operador.

Outro parâmetro de grande impacto no consumo de combustível é o %cinza do coque. Quanto menor o %cinza, maior o %carbono e consequentemente menor o consumo de combustível. Quando avaliado o consumo de carbono este parâmetro de qualidade do coque não tem o mesmo impacto, pois é considerado no cálculo do consumo de carbono (%carbono matéria-prima x consumo da matéria-prima kg/t). A Figura 5.11 mostra o %cinza do coque que abastece os dois altos-fornos. Como pode ser observado no gráfico da Figura 5.11, o %cinza sofre grandes alterações em alguns momentos, isto se deve a alterações na mistura de carvão. Observa-se também uma redução considerável no %cinza do coque a partir de abril, isto se deve a utilização de carvões com menor teor de cinza na mistura de carvões.

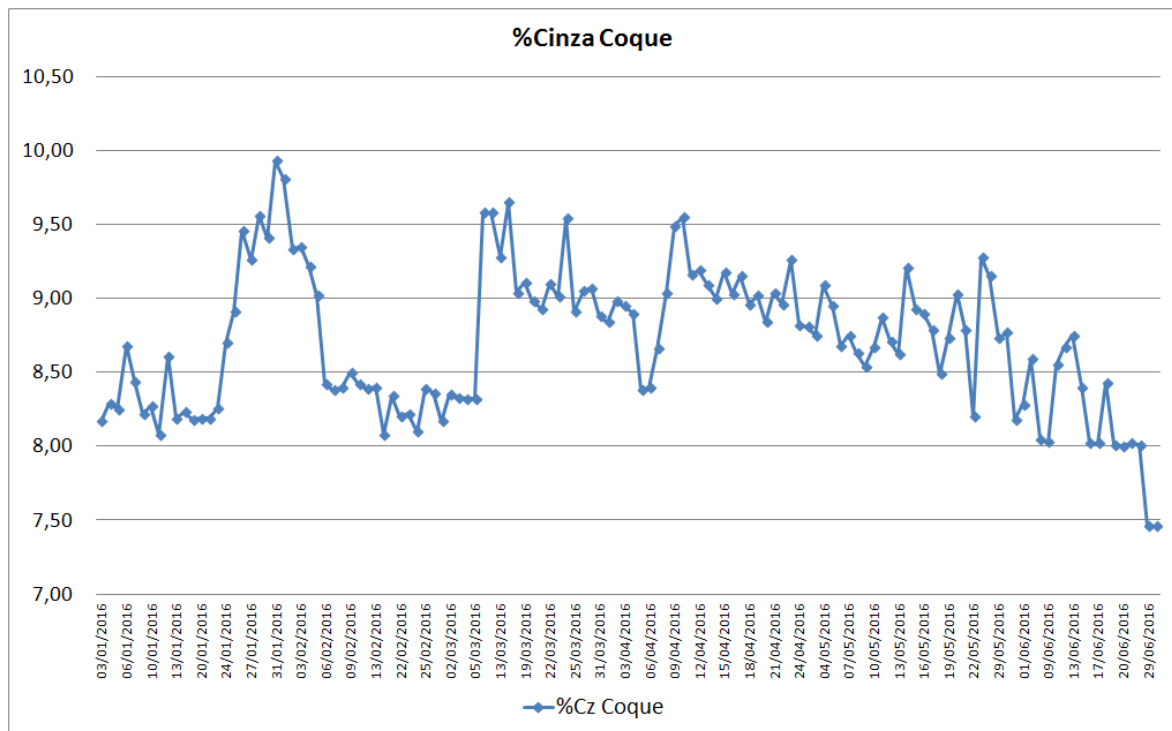


Figura 5.11: Gráfico do %cinza do coque

O principal sensor do modelo, como citado, é o analisador de gás do topo. Desta forma é avaliada a confiabilidade desses dados. Para garantir a confiabilidade do analisador do gás do topo são realizadas calibrações periódicas. Porém em alguns momentos ocorrem falhas no equipamento ou até mesmo intervenção da manutenção. Uma forma de verificar inconsistências na medição é a somatória dos gases do topo (%CO, %CO₂, %H₂, %N₂) que deve aproximar de 100%. A Figura 5.12 mostra a variação da somatória dos gases do AF1. Os dias com valores em destaque devem ser descartados para evitar erros no modelo.

Considerando os dias em que as informações do gás do topo são confiáveis, podemos verificar a variação do %H₂ e da relação CO/CO₂ nas Figuras 5.13 e 5.14 respectivamente. O %H₂ está relacionado em sua maior parte a taxa de injeção de carvão pulverizado (PCR), pois o AF1 não utiliza injeção de vapor de água junto com injeção de carvão. A umidade considerada no processo é, portanto apenas a umidade ambiente, que no caso da cidade de onde se encontra os altos-fornos em estudo, não tem variações significativas. A relação CO/CO₂ no gás de topo mostra uma elevação no período entre final de abril e início de maio/16.

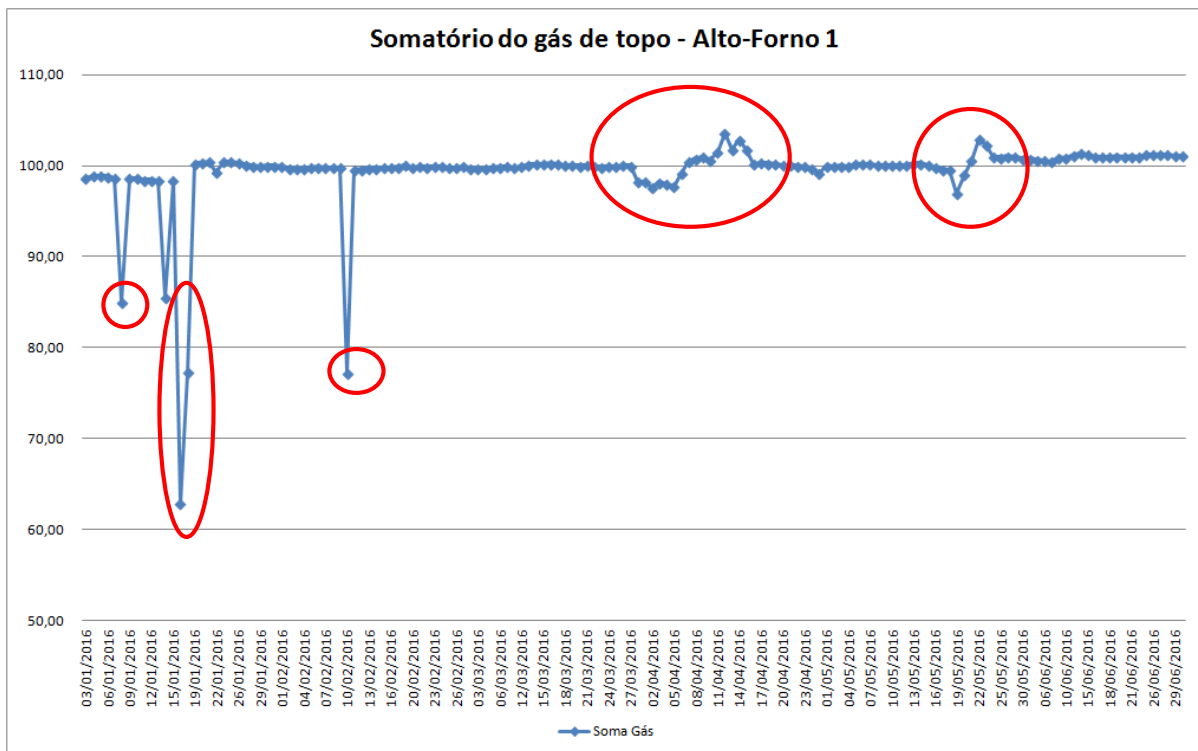


Figura 5.12: Gráfico do somatório dos gases de topo do Alto-Forno 1

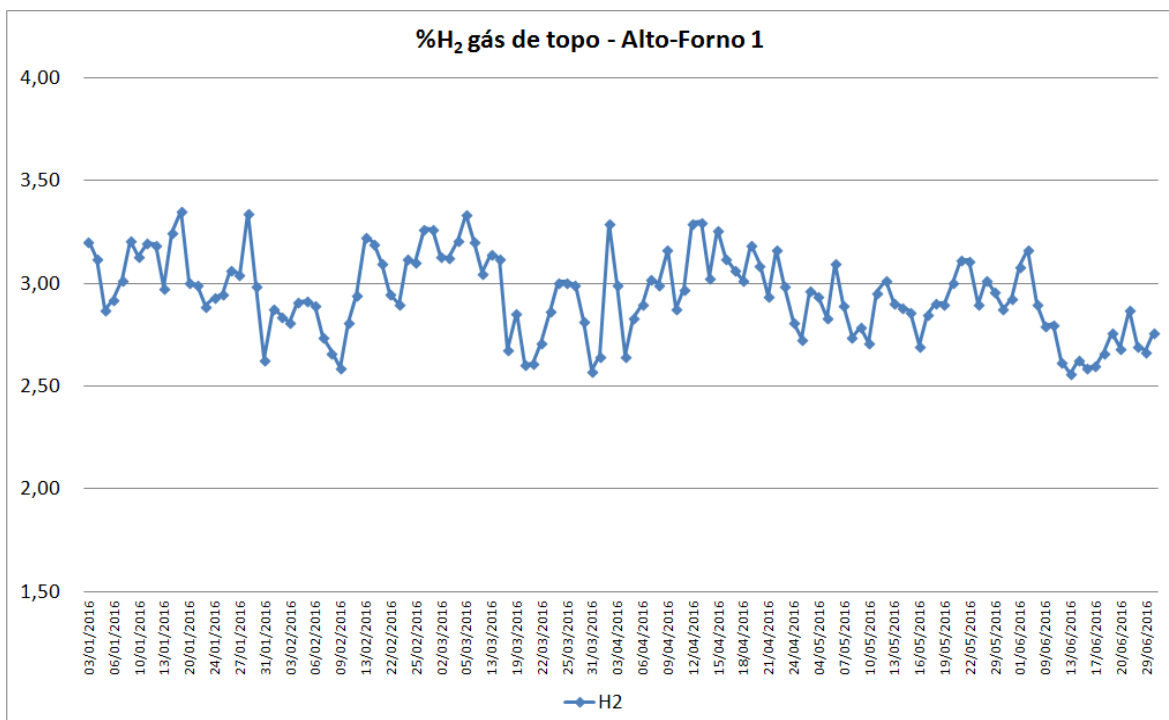


Figura 5.13: %H₂ no gás de topo do Alto-Forno 1

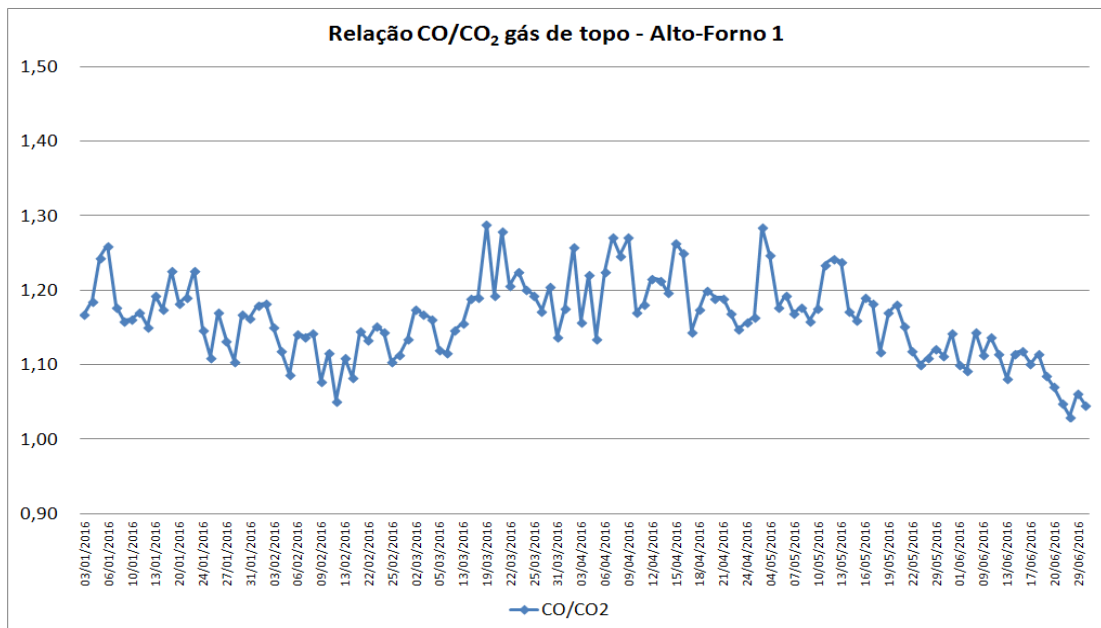


Figura 5.14: Relação CO/CO₂ do gás de topo do Alto-Forno 1

A Figura 5.15 mostra a variação do consumo de carbono no AF1. Analisando em conjunto os gráficos da Figura 5.14 e 5.15, é possível observar que existe relação entre o consumo de carbono e a relação CO/CO₂.

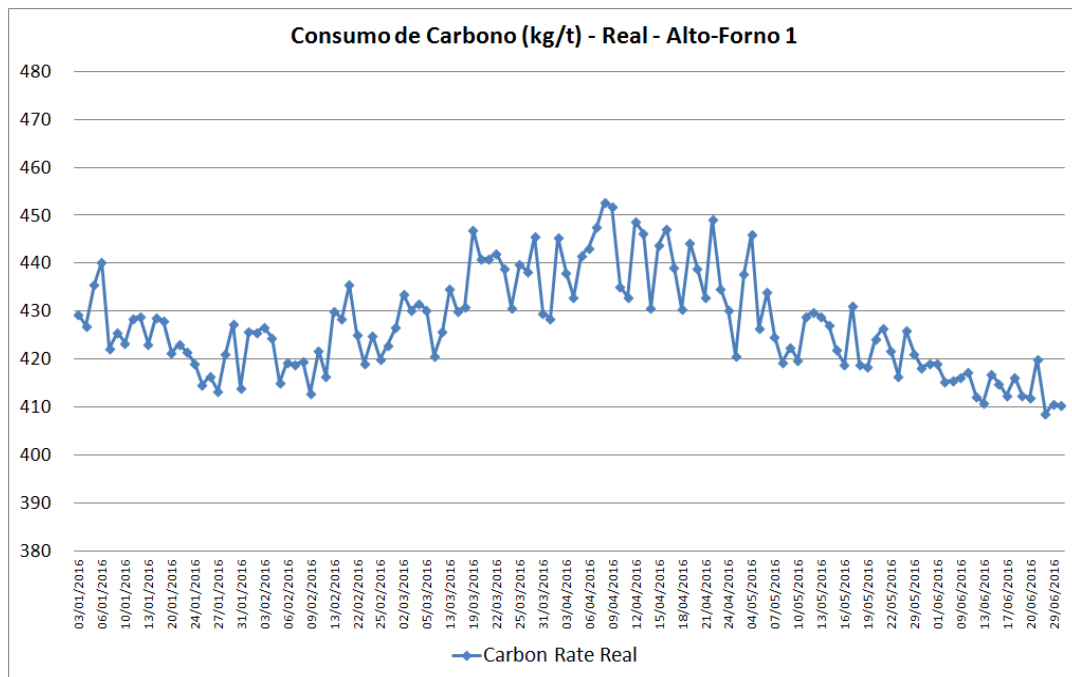


Figura 5.15: Consumo de carbono do Alto-Forno 1

Finalizando a análise dos dados do AF1, a Figura 5.16 mostra o consumo de coque e de carvão injetado (PCI) e também a soma dos dois que resulta o consumo total de combustível (*fuel rate*).

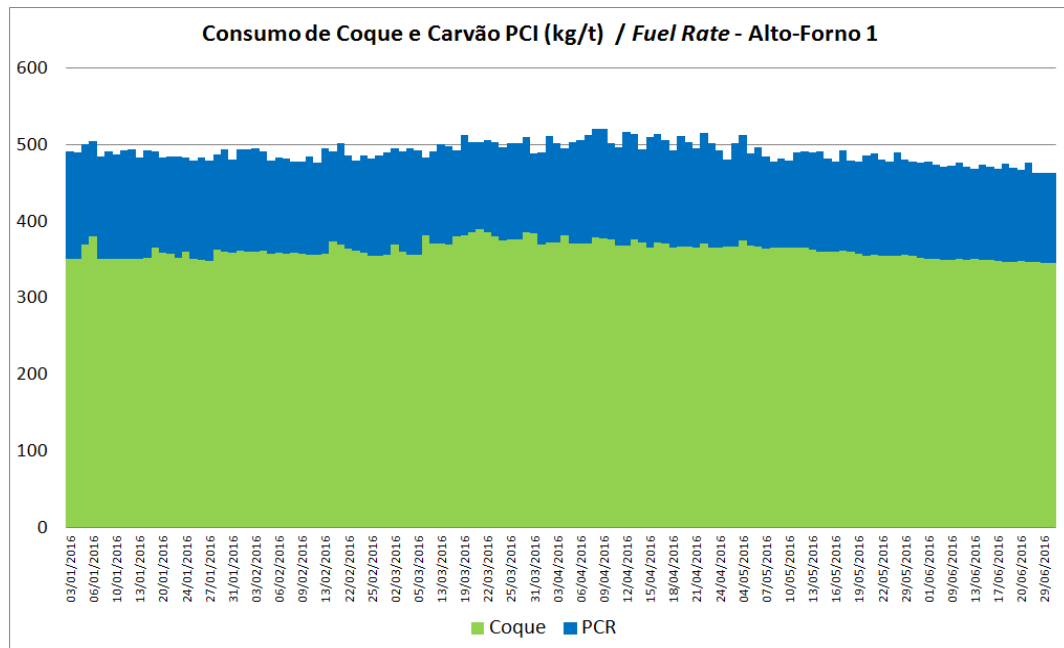


Figura 5.16: Consumo de coque, carvão injetado e combustível total do Alto-Forno 1

A Tabela V.3 mostra a média mensal de consumo de combustível (coque, carvão PCI, carbono total, *fuel rate*), produtividade do alto-forno (t de gusa/dia/m³ de volume interno) e índice de utilização (IU).

Tabela V.3: Dados mensais AF1: produção, utilização, combustível

Mês	Produtividade t/m ³ /dia	IU (%)	Coke Rate kg/t	Carvão PCI kg/t	Fuel Rate kg/t	Consumo carbono kg/t
jan/16	2,29	99,49	357,58	133,55	491,13	427,35
fev/16	2,25	100,00	362,12	127,14	489,25	425,86
mar/16	2,16	95,41	379,12	121,31	500,42	437,51
abr/16	2,22	90,78	377,12	128,38	505,50	441,71
mai/16	2,39	100,00	362,65	121,83	484,48	424,12
jun/16	2,38	97,78	349,42	121,69	471,11	415,02
Média	2,28	97,24	364,16	125,61	489,77	428,14

Verificado a qualidade das informações do banco de dados, todos os dias com resultados válidos foram simulados utilizando o modelo termoquímico.

5.2.2- Análise dos Resultados AF1: Comparação dos Resultados Calculados e Reais

Para avaliação dos resultados foi utilizado o software Minitab com objetivo de obter comprovação estatística das análises realizadas. Foram utilizados como referência para as análises no Minitab os estudos de CAMPOS (2003).

O volume de escória calculado e real para o AF1 no período base foi comparado com objetivo de avaliar o balanço de massa do modelo, erro de informações no banco de dados ou erros no laboratório de análise. A Figura 5.17 mostra um gráfico de sequência comparando valores de volume de escória reais e calculados pelo modelo termoquímico.

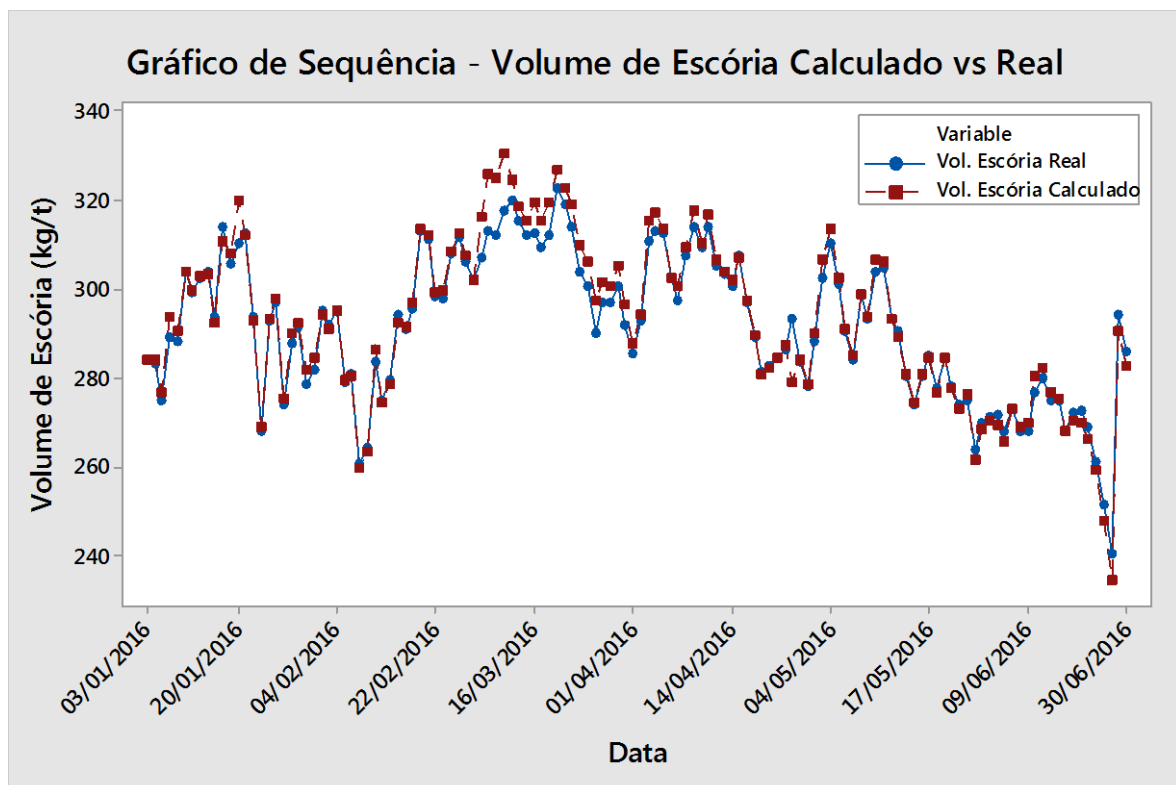


Figura 5.17: Gráfico de sequência para volume de escória calculado vs real AF1

Foi realizado também teste de hipótese para verificar se existe diferença significativa entre os resultados de volume de escória calculado e real. Conforme Tabela V.4, $P\text{-value} > 0,05$, desta forma rejeita-se a hipótese de que as médias são diferentes.

Tabela V.4: Teste de hipótese – diferença entre volume de escória real vs calculado AF1
(Software Minitab)

Two-Sample T-Test and CI: Vol. Escória Real; Vol. Escória Calculado				
Two-sample T for Vol. Escória Real vs Vol. Escória Calculado				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Vol. Escória Real	130	291,8	16,2	1,4
Vol. Escória Calculado	130	293,1	18,2	1,6
Difference = μ (Vol. Escória Real) - μ (Vol. Escória Calculado)				
Estimate for difference: -1,28				
95% CI for difference: (-5,49; 2,93)				
T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -0,60 P-Value = 0,550 DF = 254				

O gráfico *Boxplot* é utilizado para avaliação da localização e dispersão do conjunto de dados. A localização é representada pela mediana e a dispersão pode ser visualizada pelo valor mínimo, 1º quartil, 3º quartil e valor máximo, conforme Figura 5.18. A Figura 5.19 mostra um gráfico *Boxplot* dos valores calculados e reais de escória do AF1. É observado que a mediana, média e dispersão são visualmente parecidas para as duas amostras.

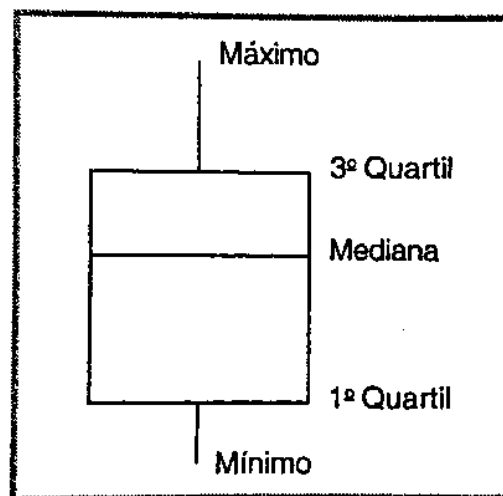


Figura 5.18: Parâmetros utilizados para construção do gráfico *Boxplot* (CAMPOS,2003)

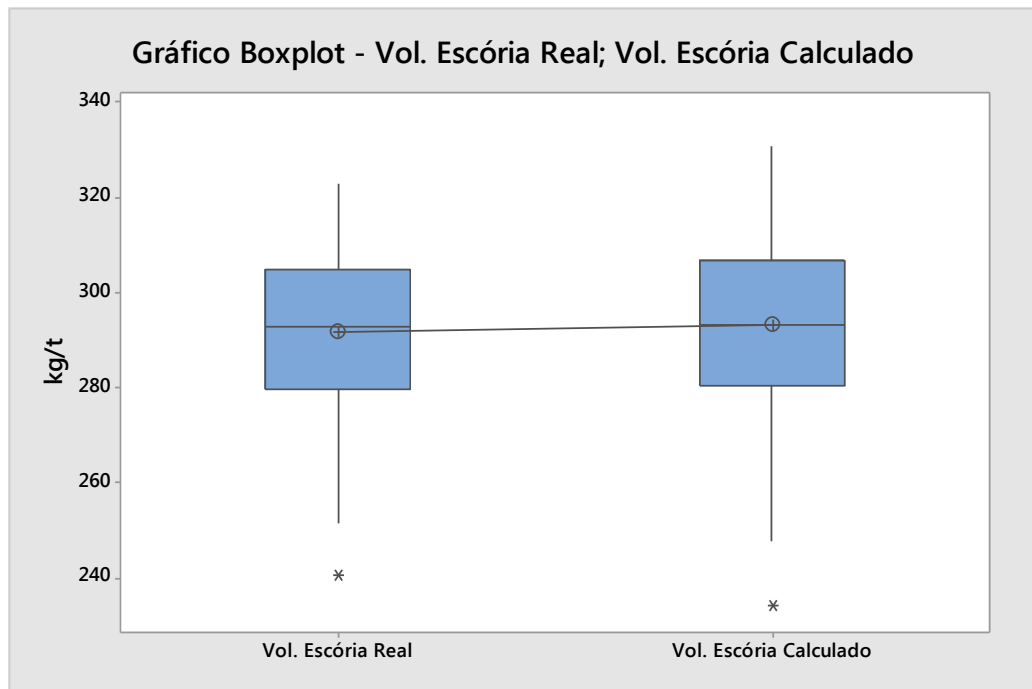


Figura 5.19: Gráfico *Boxplot* para volume de escória calculado vs real AF1

Finalizando a análise do balanço de massa do modelo, observa-se na Figura 5.20 o gráfico de correlação entre o volume de escória calculado e real.

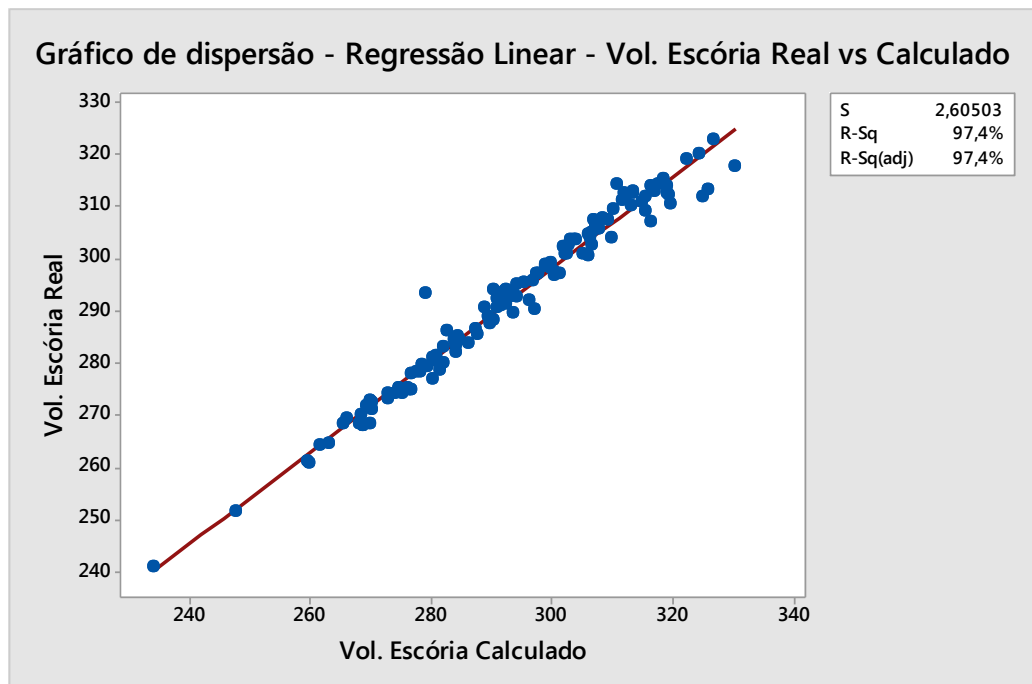


Figura 5.20: Gráfico Correlação para volume de escória calculado vs real AF1

O coeficiente $R^2 = 97,4\%$ indica correlação muito forte entre as duas variáveis. Segundo CAMPOS (2003), a correlação entre variáveis pode ser avaliada conforme Tabela V.5.

Tabela V.5: Grau de correlação segundo CAMPOS (2003)

R^2	GRAU DA CORRELAÇÃO
1,0	Correlação perfeita
> 0,9	Correlação muito forte
> 0,6	Correlação forte
> 0,3	Correlação moderada
> 0,2	Correlação fraca
0,0	Correlação inexistente

A significância da correlação é confirmada pelo valor de *P-value*, conforme Tabela V.6, onde $P\text{-value} < 0,05$.

Tabela V.6: Regressão linear – Volume de escória real vs calculado AF1

Regression Analysis: Vol. Escória Real versus Vol. Escória Calculado					
The regression equation is					
Vol. Escória Real = 33,46 + 0,8815 Vol. Escória Calculado					
S = 2,60503 R-Sq = 97,4% R-Sq(adj) = 97,4%					
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	33076,2	33076,2	4874,06	0,000
Error	128	868,6	6,8		
Total	129	33944,8			

Desta forma, pode-se concluir que o balanço de massa realizado no modelo termoquímico é totalmente coerente com o balanço de massa real e, podemos afirmar que os dados de entrada do modelo são confiáveis (análise de matérias-primas, gusa e escória).

Validado os cálculos do balanço de massa, foi analisado o principal resultado do modelo termoquímico, o consumo de carbono calculado. A Figura 5.21 e 5.22 mostram o gráfico de sequência e *boxplot*, respectivamente, comparando os resultados de consumo de carbono

calculado vs real do AF1 no período base. Para comprovar similaridade dos resultados foi realizado teste de hipótese no software Minitab conforme Tabela V.7. Como resultado de $P\text{-value} > 0,05$, deve-se rejeitar a hipótese de que as médias são diferentes.

Tabela V.7: Teste de hipótese – diferença entre consumo de carbono real vs calculado AF1
(Software Minitab)

Two-Sample T-Test and CI: Carbono Real; Carbono Calculado				
Two-sample T for Carbono Real vs Carbono Calculado				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Carbono Real	115	430,2	10,7	0,99
Carbono Calculado	115	430,8	10,2	0,95
Difference = μ (Carbono Real) - μ (Carbono Calculado)				
Estimate for difference: -0,54				
95% CI for difference: (-3,25; 2,18)				
T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -0,39 P-Value = 0,697 DF = 227				

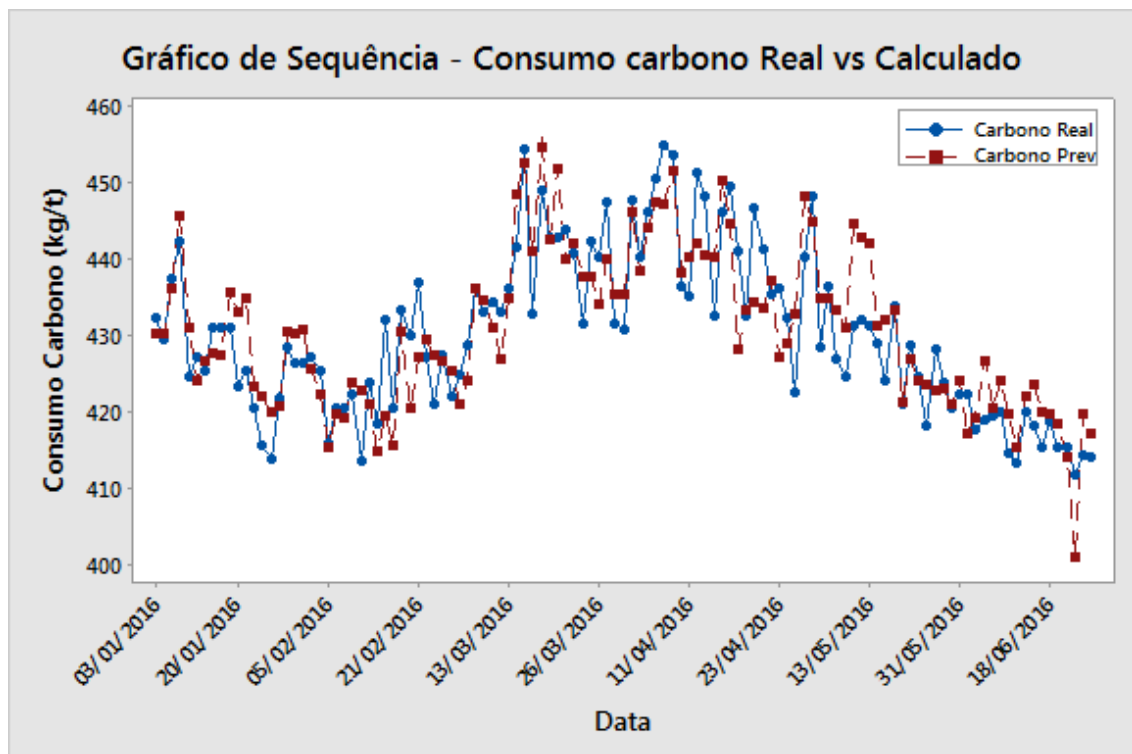


Figura 5.21: Gráfico de sequência para consumo de carbono calculado vs real AF1

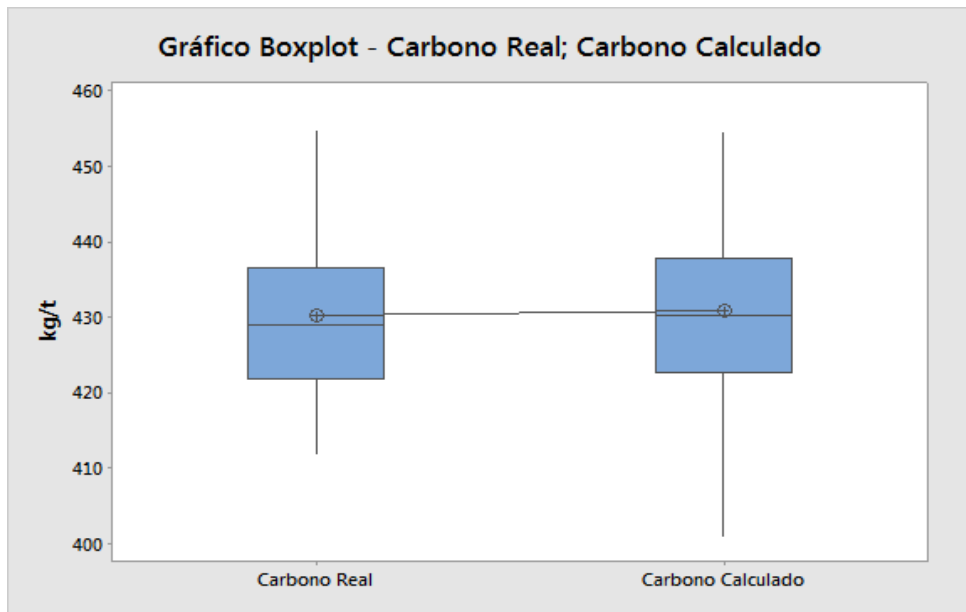


Figura 5.22: Gráfico *Boxplot* para consumo de carbono calculado vs real AF1

O gráfico de dispersão da Figura 5.23 mostra a correlação entre o consumo de carbono calculado e real (R^2). Analisando o coeficiente de correlação (R^2) conclui-se que existe uma correlação forte entre as variáveis que pode ser comprovada estatisticamente através da análise do valor de $P\text{-value} = 0,000$ (conforme Tabela V.8). Para valor de $P\text{-value} < 0,05$ conclui-se que existe correlação significativa entre as variáveis.

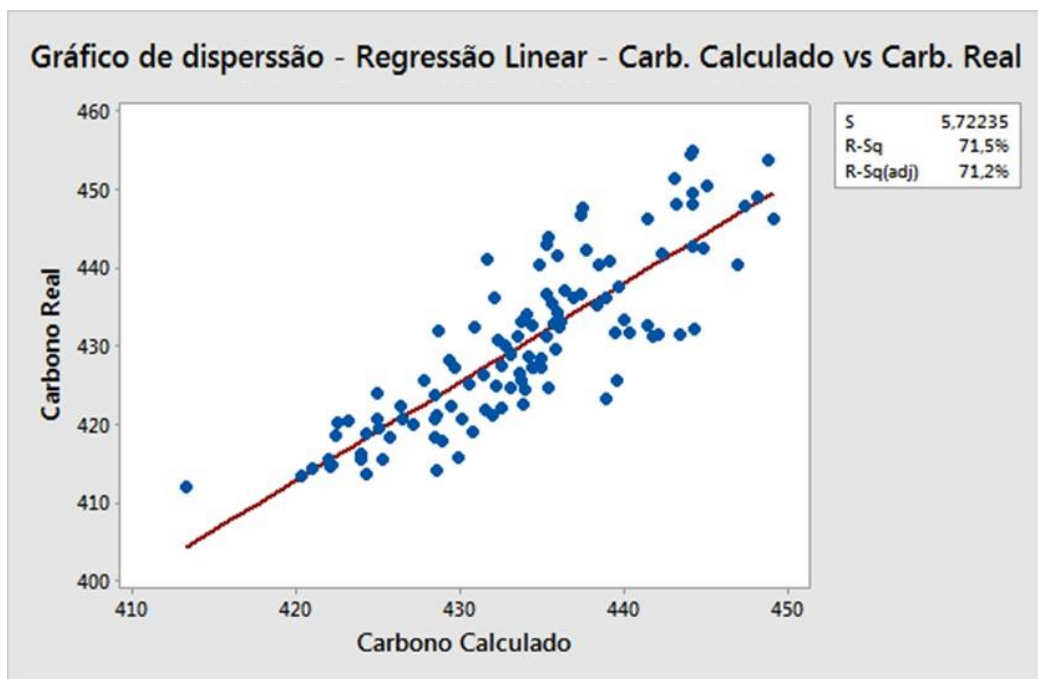


Figura 5.23: Gráfico Correlação para consumo carbono calculado vs real AF1

Tabela V.8: Análise de regressão – consumo de carbono real vs calculado AF1
(Software Minitab)

Regression Analysis: Carbono Real versus Carbono Calculado						
The regression equation is						
Carbono Real = - 119,2 + 1,266 Carbono Calculado						
S = 5,72235 R-Sq = 71,5% R-Sq(adj) = 71,2%						
Analysis of Variance						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Regression	1	9272,5	9272,51	283,17	0,000	
Error	113	3700,2	32,75			
Total	114	12972,7				

Além da análise de correlação e regressão, deve-se analisar os resíduos da equação de regressão. Resíduos são os erros entre os valores calculados pela equação e resultados reais da variável resposta. Para validação da equação, os resíduos devem ter distribuição normal e não apresentar sazonalidade nos dados de predição. Conforme análise de resíduos (Figura 5.24) realizada pelo software Minitab pode-se validar o resultado da regressão. Os dados de resíduos possuem distribuição normal conforme gráficos de distribuição e histograma da Figura 5.24 e também são aleatórios em relação ao tempo e valor calculado.

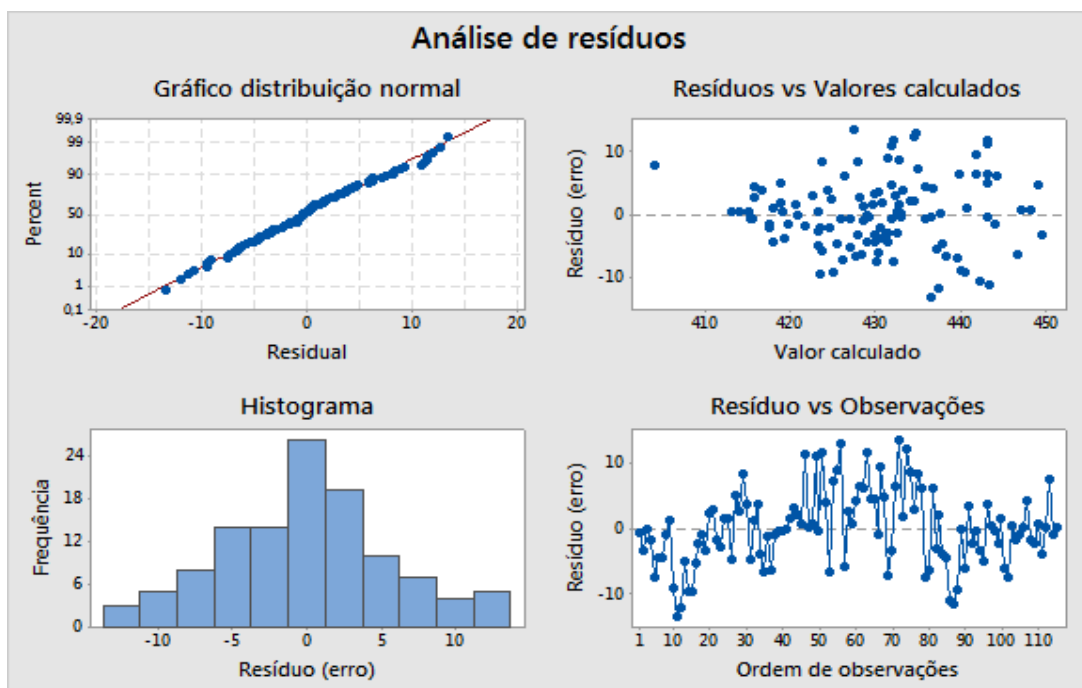


Figura 5.24: Análise de resíduos da regressão entre consumo de carbono real e calculado

Desta forma podemos afirmar que o modelo termoquímico é aplicável para o cálculo do consumo de carbono do AF1 podendo ser utilizado para ajuste “fino” de processo com objetivo de antecipar a atuação sobre o consumo de combustível pelo operador.

Outro resultado importante do modelo termoquímico é o cálculo do fator ômega (ω), que está diretamente relacionado ao consumo de carbono. A Figura 5.25 mostra a relação entre fator ômega e consumo de carbono real. Observa-se que existe uma forte correlação entre as variáveis, totalmente condizente com a proposta do modelo termoquímico e similar aos resultados citados por CASTRO e TAVARES (1998). Quando comparado o consumo de carbono calculado pelo modelo e o fator ômega, o coeficiente de correlação aumenta, o que é esperado pois o modelo é calculado com base no fator ômega (Figura 5.26). Como observado nas Figuras 5.25 e 5.26, os valores de fator ômega do AF1 são > 0 , ou seja, existe possibilidade de aumentar a eficiência de redução dos óxidos de ferro na zona de preparação.

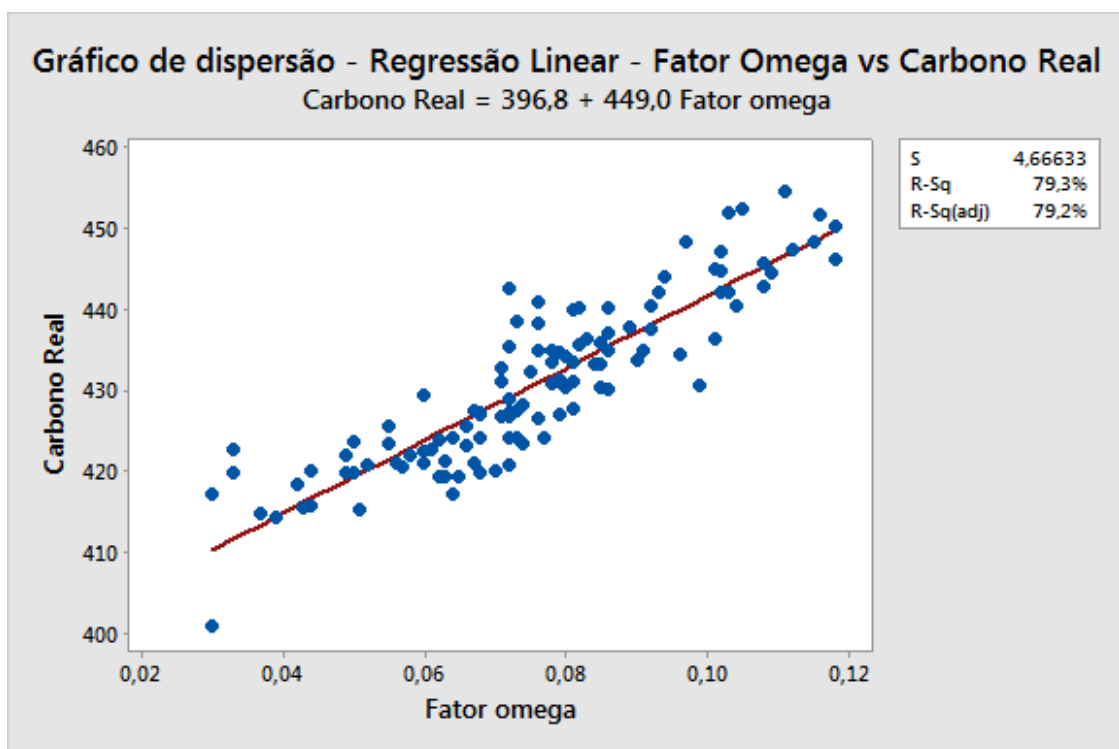


Figura 5.25: Gráfico dispersão - correlação entre consumo carbono real vs fator ômega (AF1)

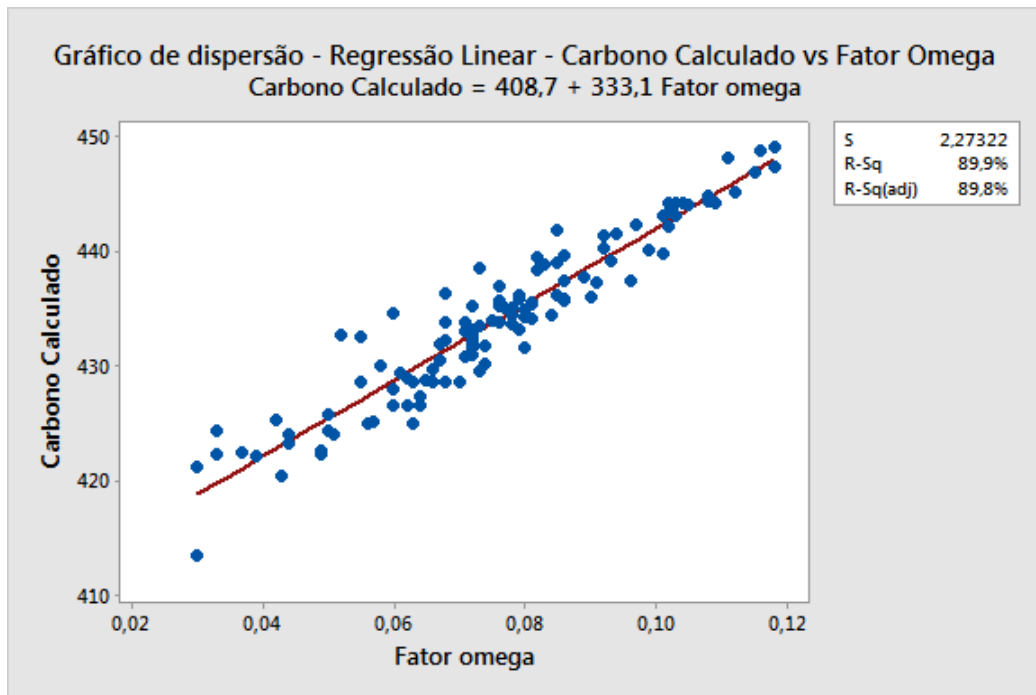


Figura 5.26: Gráfico Correlação para consumo carbono calculado vs fator ômega (AF1)

5.2.3- Análise dos Resultados AF1: Operação do Modelo Online

Após validação dos resultados do modelo termoquímico com os dados operacionais do AF1, foi feita análise do modelo online no processo. A análise online do modelo termoquímico é o último passo para implantação do modelo para auxiliar o operador. A avaliação online foi realizada utilizando média dos parâmetros a cada 2 horas. Desta forma, a cada 2 horas o operador terá um novo resultado de consumo de combustível para auxiliar na tomada de decisão na atividade de controle térmico do alto-forno. A Figura 5.27 mostra o consumo de combustível visado pelo operador (“real”) vs o consumo de combustível calculado pelo modelo termoquímico. Através das setas vermelhas e azuis na Figura 5.27, é possível observar que o carbono calculado pelo modelo termoquímico antecede a atuação do operador. Isso ocorre devido o modelo termoquímico calcular o consumo de carbono com base nos parâmetros internos do alto-forno, como exemplo o resultado do gás de topo, e o operador realizar suas atuações no consumo de carbono através da análise da temperatura do gusa, ou seja, de forma corretiva.

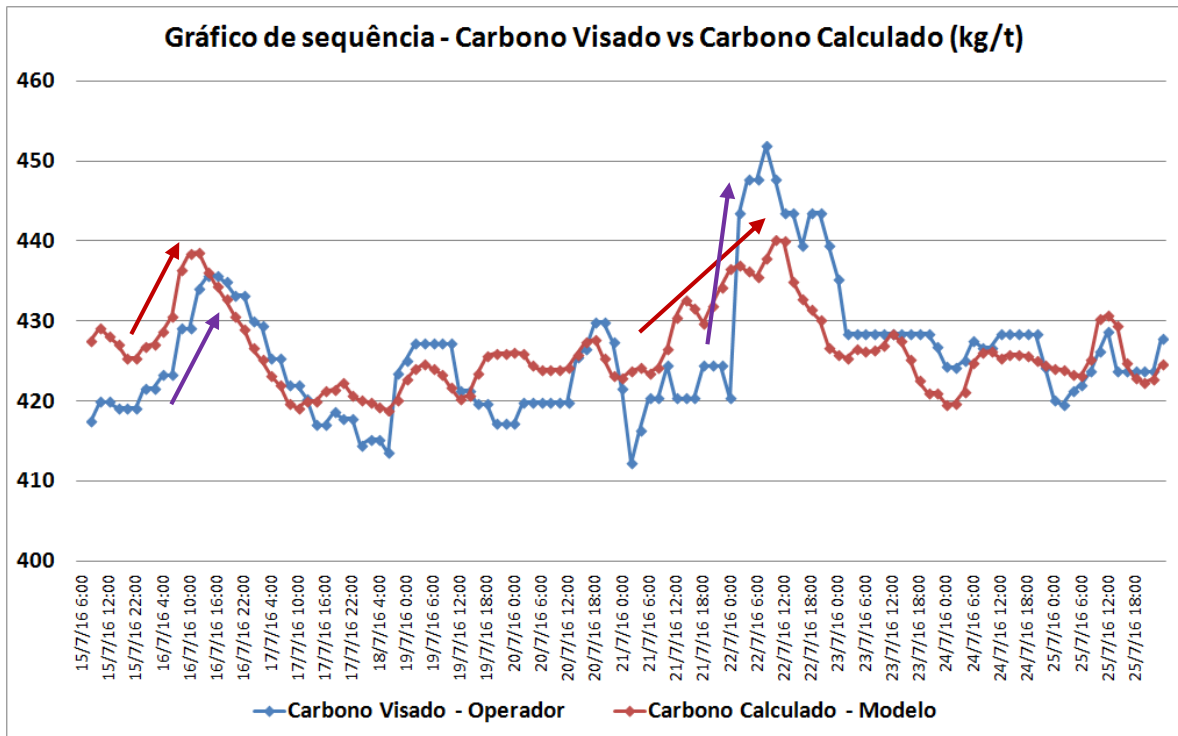


Figura 5.27: Gráfico de sequência – Carbono visado vs carbono calculado AF1

A diferença de patamar do consumo de carbono visado pelo operador e calculado pelo modelo não é o objetivo do trabalho. Desta forma, o modelo tem como objetivo auxiliar o operador na análise do consumo de combustível para antecipar suas atuações e evitar grandes variações na temperatura do gusa. As tendências do modelo permitem o operador a antecipar suas atuações e reduzir a variação do nível térmico do alto-forno. Esta avaliação será implementada no padrão de controle térmico, porém, a atuação corretiva continuará sendo feita devido o modelo termoquímico não avaliar todos os parâmetros que impactam no nível térmico do alto-forno. Como exemplos de situações onde não é recomendada a utilização do modelo, podemos citar: entrada de água no alto-forno (vazamento nos staves ou ventaneiras) e situações de grande instabilidade do processo.

A Figura 5.28 mostra a relação entre o consumo de carbono visado (operador) e %CO/%CO₂ do gás de topo, principal sensor do modelo termoquímico. Assim como o consumo de carbono calculado é possível verificar que variações na relação %CO/%CO₂ antecedem a elevação do consumo de combustível pelo operador.

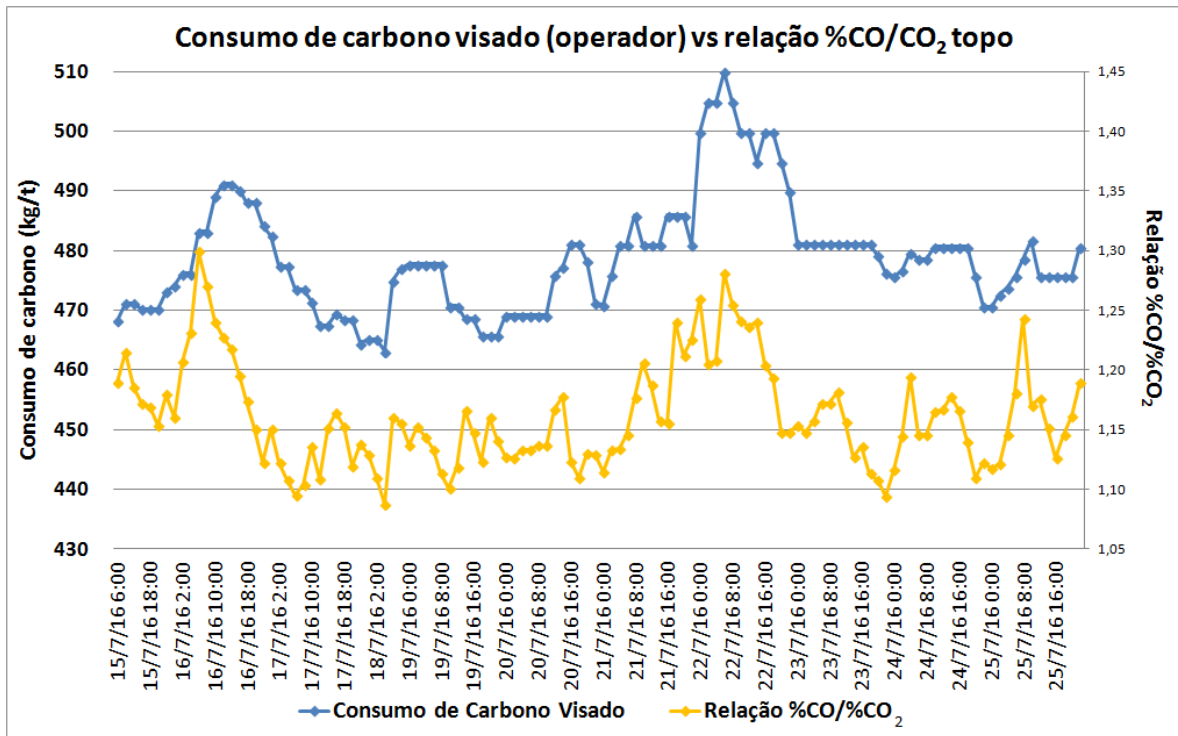


Figura 5.28: Gráfico de sequência – Carbono visado vs relação %CO/%CO₂ AF1

5.3- Resultados Alto-Forno 2

5.3.1- Definição e Avaliação Banco de Dados

Para avaliação do modelo termoquímico no AF2 (Alto-Forno 2) o período de referência e as análises realizadas foram similares ao AF1.

As Figuras 5.29 e 5.30 mostram a avaliação de produção e paradas do AF2. No gráfico da Figura 5.29 observa-se maior frequência de paradas em relação ao AF1 e duas grandes paradas; os motivos das paradas são para reparo de staves danificados e trincas na carcaça. Devido ao problema de staves no AF2, pode haver interferência no H₂ do topo e no cálculo do consumo de carbono. A Figura 5.30 mostra o gráfico de produção e índice de utilização desconsiderados as paradas do alto-forno.

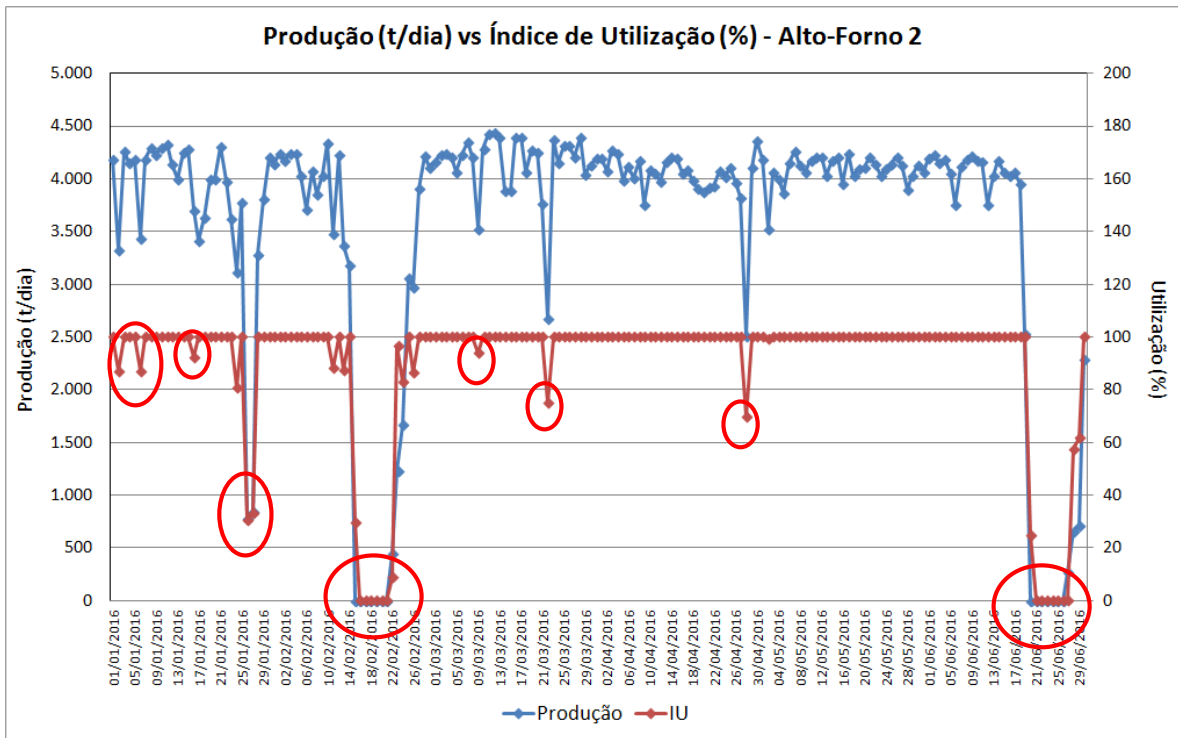


Figura 5.29: Gráfico de sequência de Produção e Índice de Utilização do Alto-Forno 2

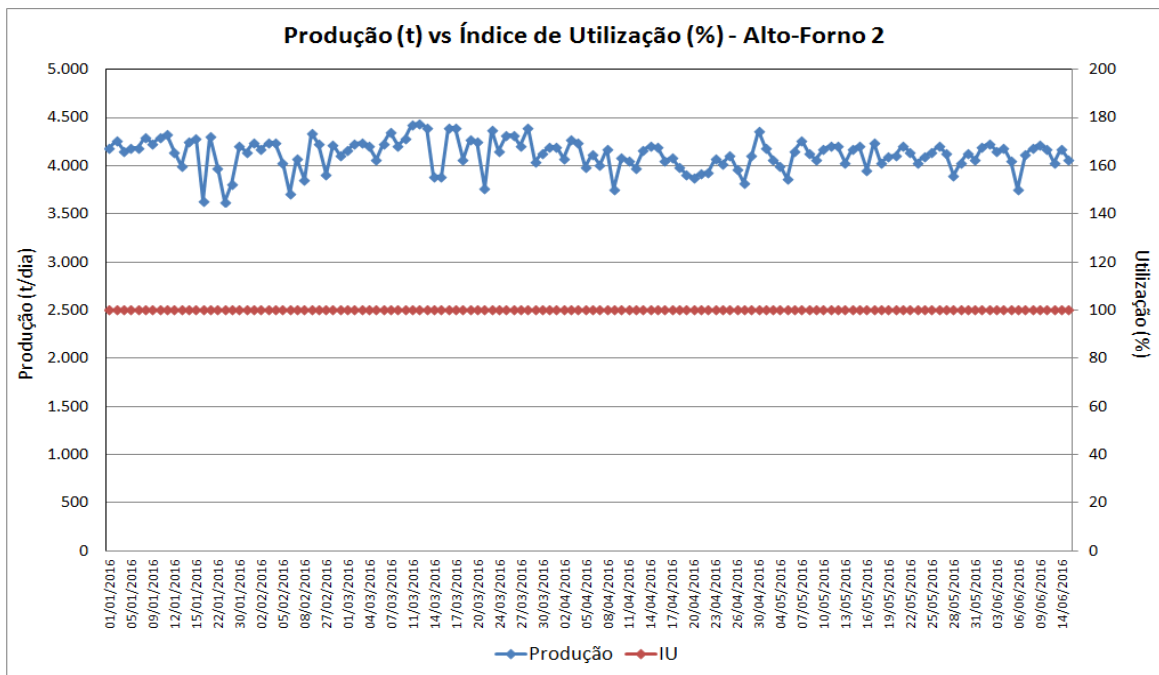


Figura 5.30: Gráfico de sequência de Produção e Índice de Utilização do AF2 desconsiderados os dias de paradas operacionais

As mesmas análises dos parâmetros do AF1 foram realizadas para os dados do AF2 e estão ilustradas nas Figuras 5.31 a 5.37. Como observado na Figura 5.31, o AF2 utiliza uma maior quantidade de sinter na carga e menor quantidade de pelota em relação ao AF1; consequentemente possui também maior volume de escória conforme Figura 5.32.

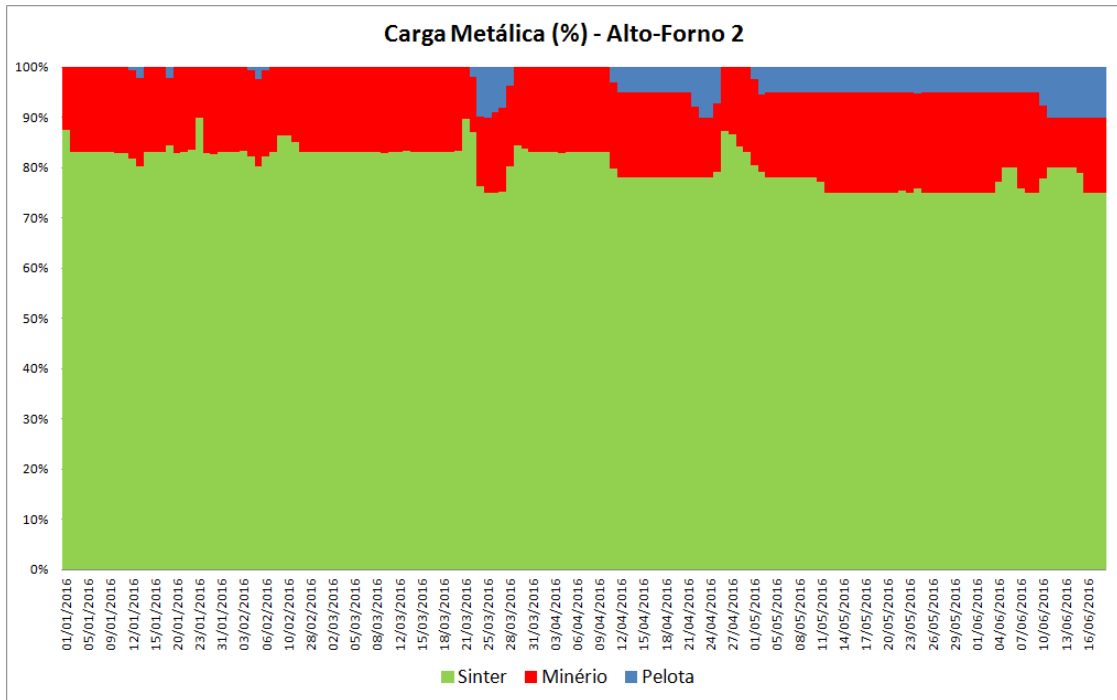


Figura 5.31: Carga metálica utilizada no AF2 de jan/16 a jun/16

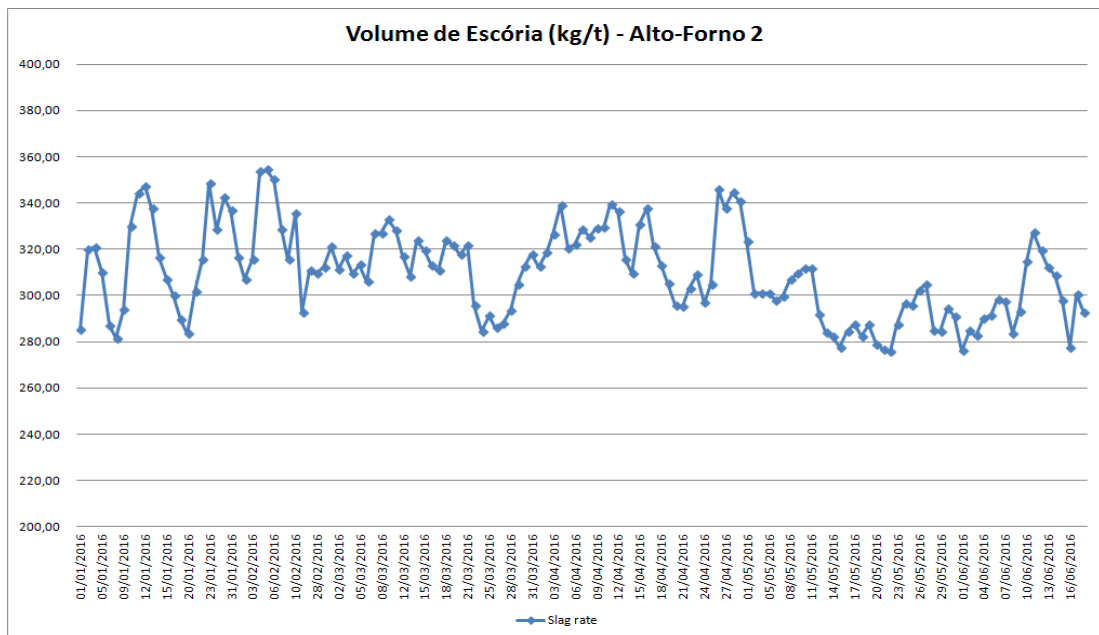


Figura 5.32: Volume de escória gerado no AF2

A Figura 5.33 ilustra a somatória do gás de topo destacando os desvios. As Figuras 5.34 e 5.35 mostram a análise do gás do topo do AF2 através do %H₂ e relação CO/CO₂ respectivamente. Como observado na Figura 5.33, a somatória do gás de topo do AF2 é mais constante que os resultados do AF1.

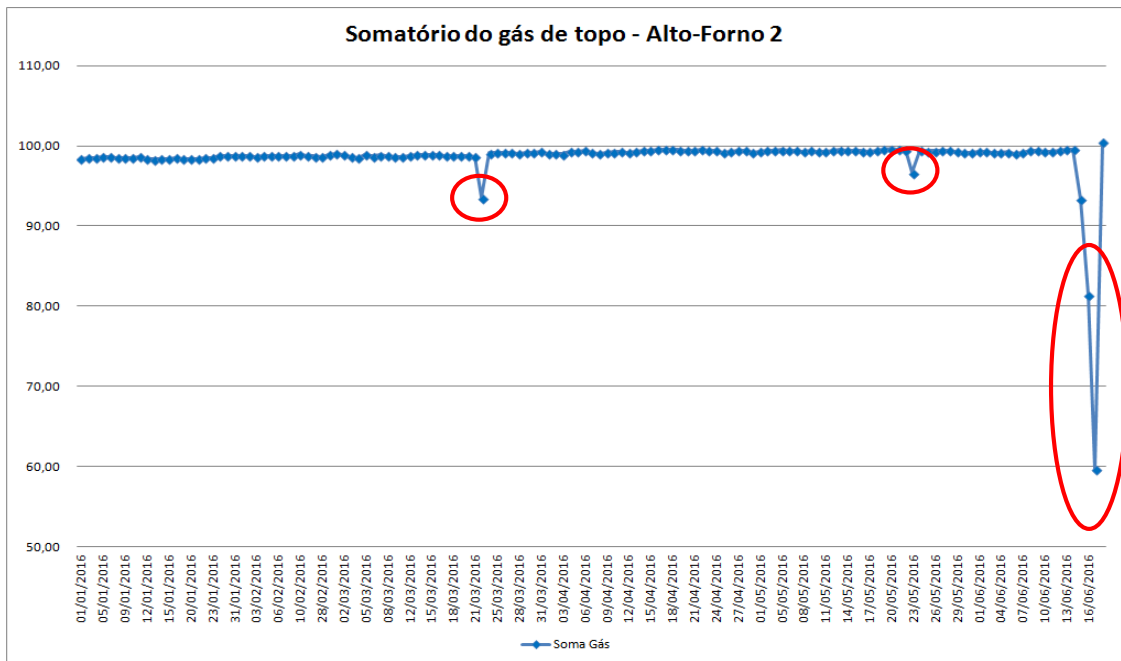


Figura 5.33: Gráfico da somatório dos gases de topo do AF2

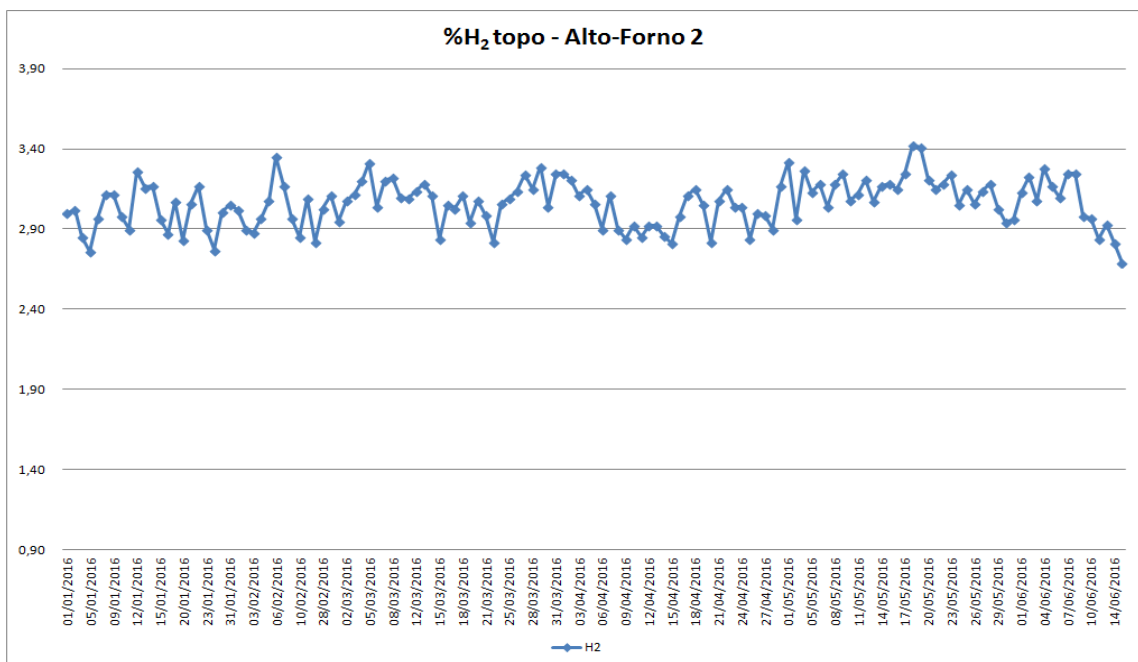


Figura 5.34: %H₂ no gás de topo do Alto-Forno 2

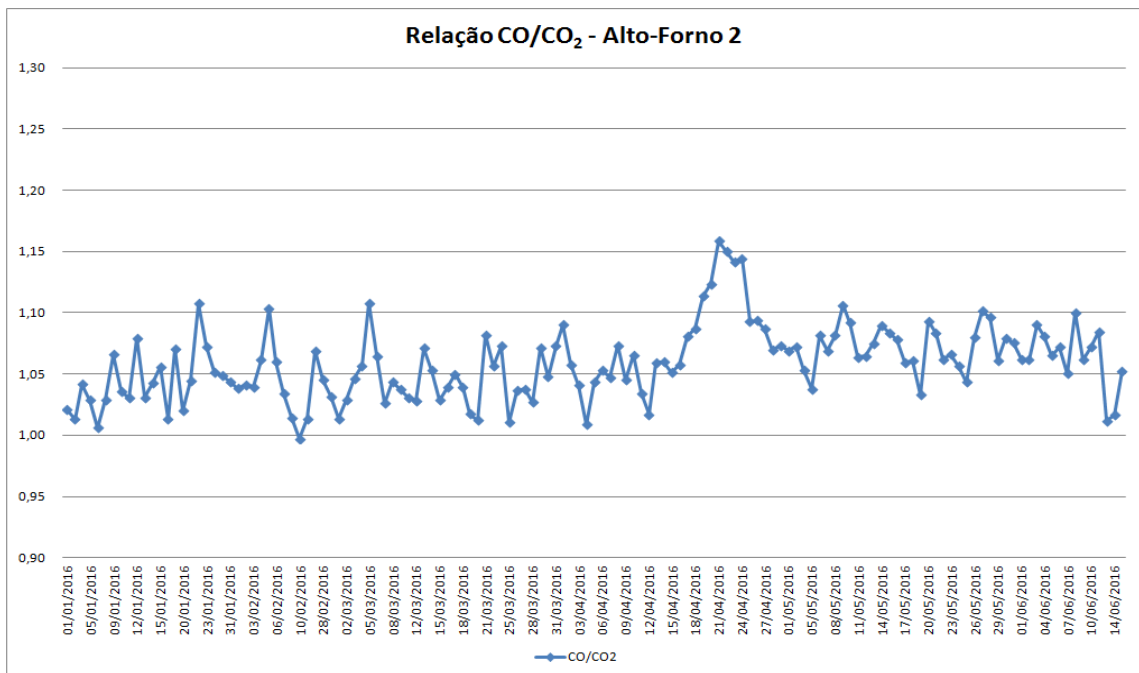


Figura 5.35: Relação CO/CO₂ do gás de topo do AF2

As Figuras 5.36 e 5.37 mostram os resultados de consumo de carbono, coque, carvão PCI e *Fuel Rate* do Alto-Forno 2. Através das Figuras 5.35 e 5.36, não é possível constatar correlação forte entre consumo de carbono e relação CO/CO₂ no gás de topo do AF2.

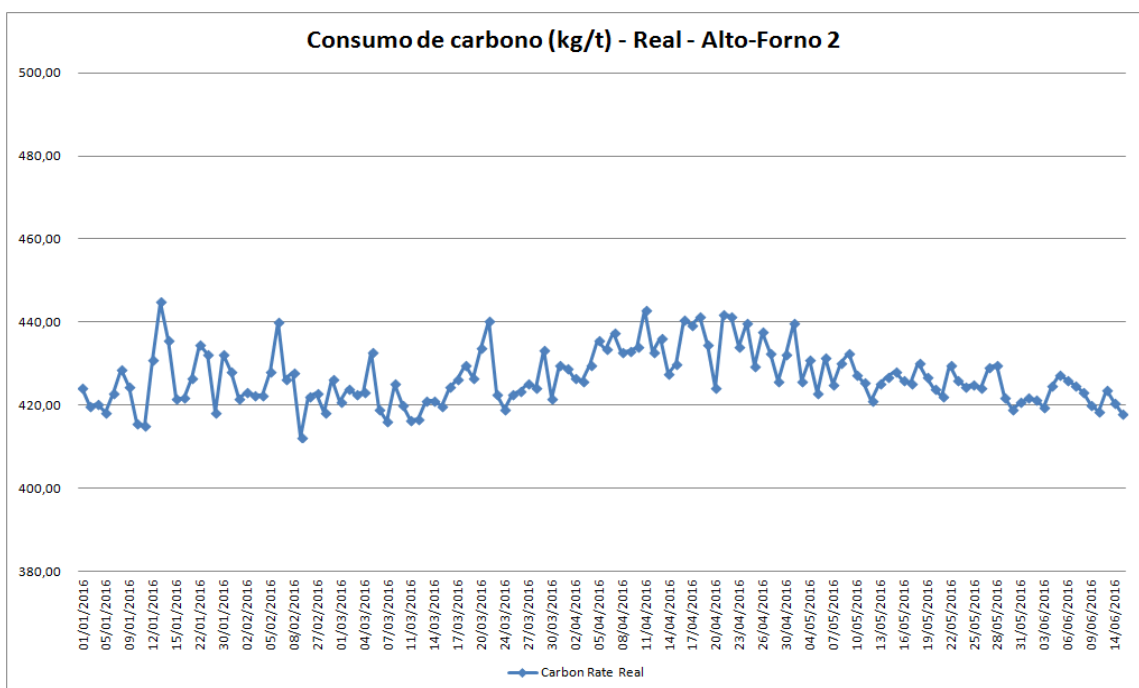


Figura 5.36: Consumo de carbono do AF2

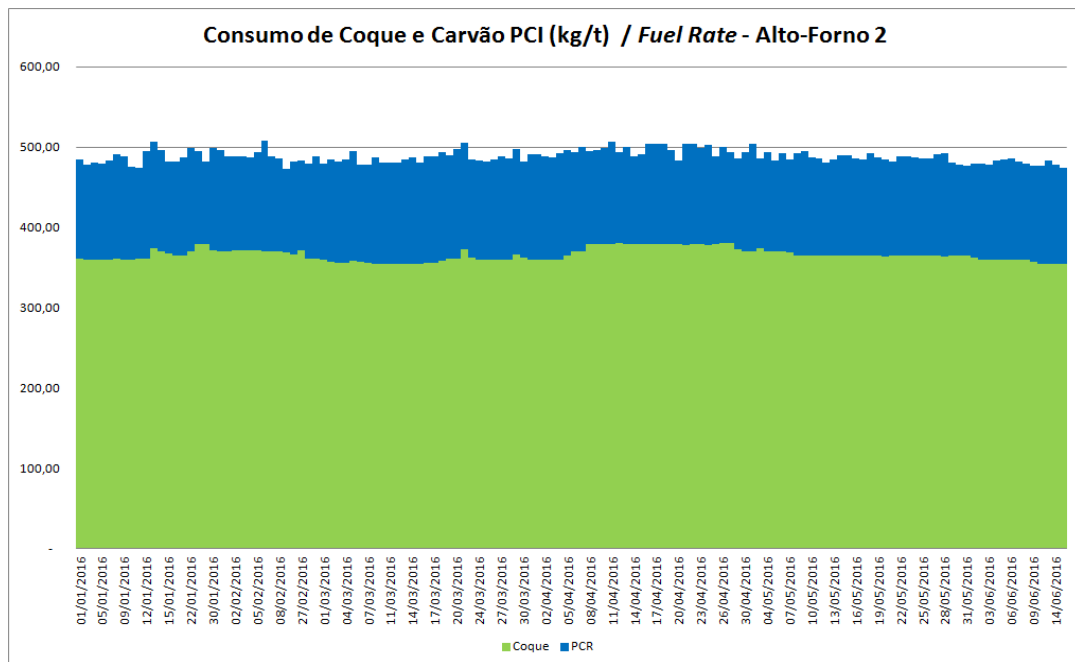


Figura 5.37: Consumo de coque, carvão injetado e combustível total do AF2

5.3.2- Análise dos Resultados AF2: Comparação dos Resultados Calculados e Reais

Similar a análise realizada para o AF1, o volume de escória do AF2 apresentou correlação forte entre os resultados reais e calculados pelo modelo. O gráfico de dispersão da Figura 5.38 mostra a forte correlação entre as variáveis ($R^2=98,1\%$).

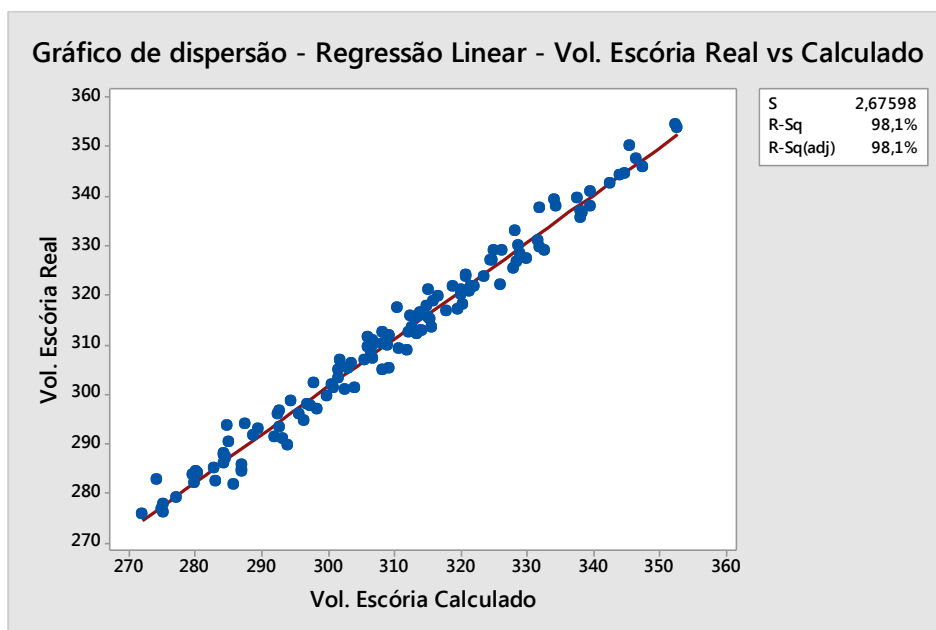


Figura 5.38: Gráfico dispersão para volume de escória calculado vs real AF2

Validado o cálculo do balanço de massa do modelo termoquímico e confiabilidade das variáveis de entrada através da análise do volume de escória, foram analisados os resultados de consumo de carbono do modelo termoquímico para o AF2.

As Figuras 5.39 e 5.40 mostram o gráfico de sequência e *boxplot*, respectivamente, comparando os resultados de consumo de carbono calculado vs real do AF2 no período base. O Gráfico de sequência e *boxplot* não são conclusivos com relação à assertividade do modelo, desta forma, foi realizada análise estatística de teste de hipótese para diferença das amostras e regressão linear para avaliar correlação entre os resultados.

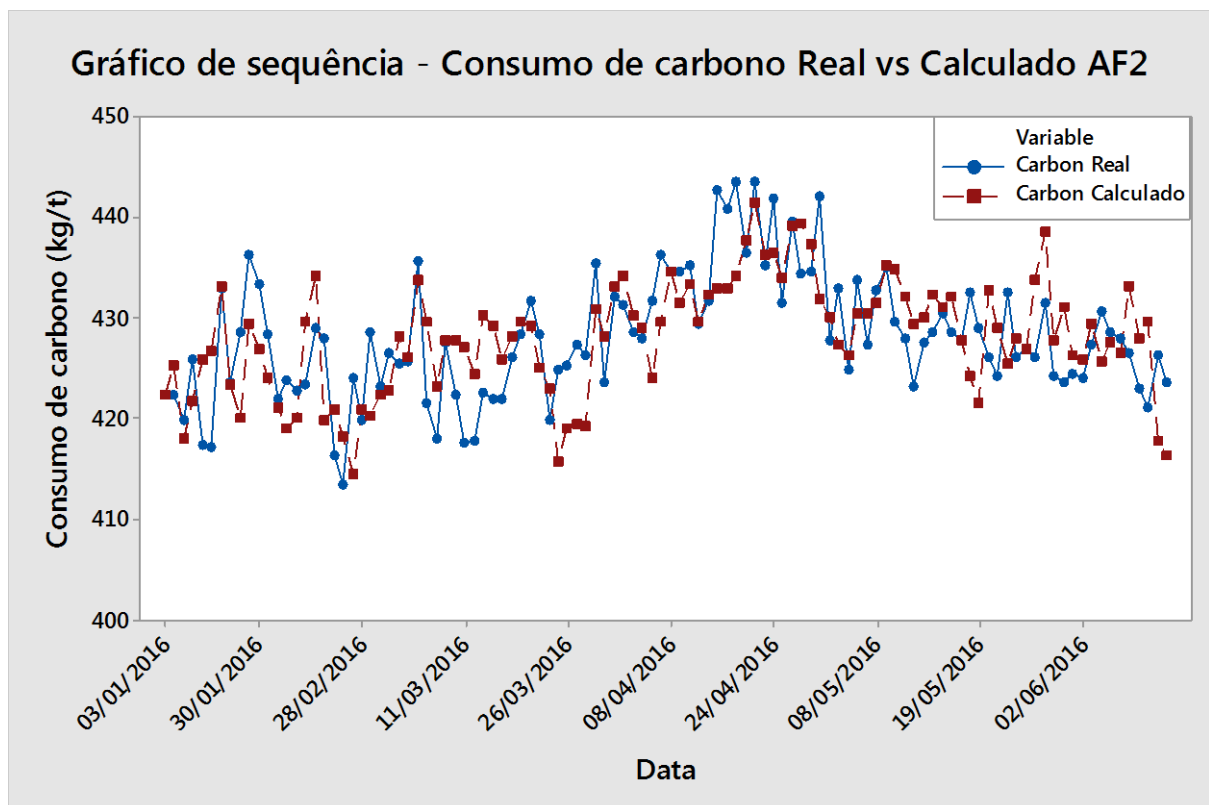


Figura 5.39: Gráfico de sequência para consumo de carbono real vs calculado AF2

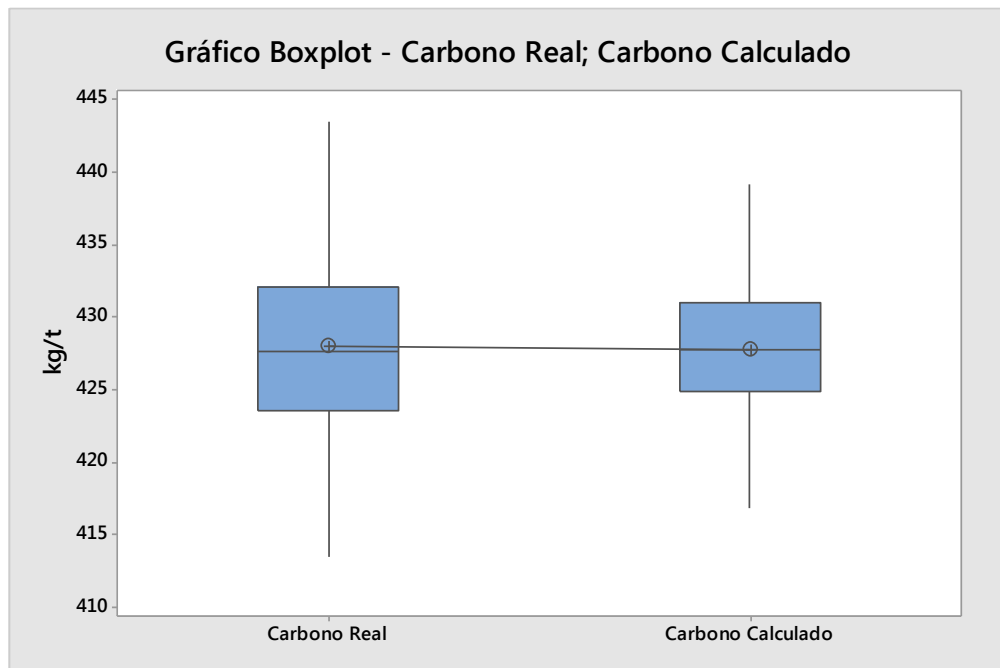


Figura 5.40: Gráfico *Boxplot* para consumo de carbono calculado vs real AF1

O teste de hipótese realizado no software Minitab conforme Tabela V.9. Como resultado de $P\text{-value} > 0,05$, deve-se rejeitar a hipótese de que as médias são diferentes. Porém, com este resultado não é possível concluir que os resultados do modelo têm correlação com os dados reais; é necessário realizar análise de regressão linear.

Tabela V.9: Análise de regressão – consumo de carbono real vs calculado AF1
(Software Minitab)

Two-Sample T-Test and CI: Carbono Calculado; Carbono Real				
Two-sample T for ViU vs Carbon Real				
	N	Mean	StDev	SE Mean
ViU	108	427,79	4,58	0,44
Carbon Real	108	428,08	6,19	0,60
Difference = μ (ViU) - μ (Carbon Real)				
Estimate for difference: -0,297				
95% CI for difference: (-1,757; 1,164)				
T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -0,40 P-Value = 0,689 DF = 197				

A Figura 5.41 mostra o gráfico de dispersão e resultado do coeficiente de correlação da regressão linear. Com base no $R^2 = 25,3\%$, conclui-se que a correlação entre as variáveis é baixa.

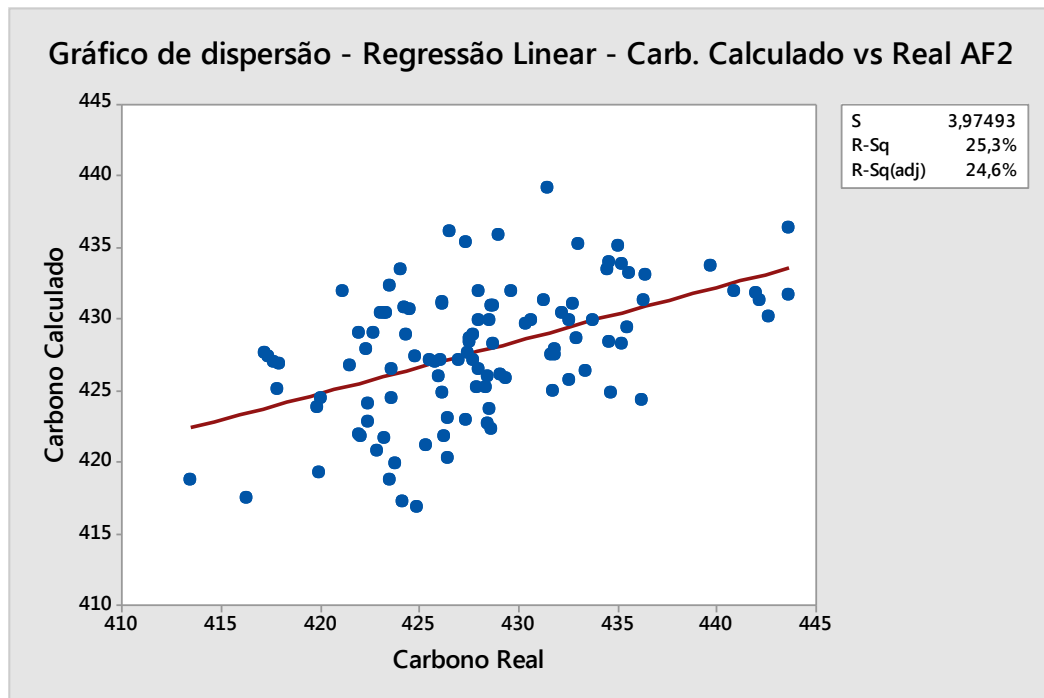


Figura 5.41: Gráfico Correlação para consumo carbono calculado vs real AF2

Com base nas análises estatísticas, apesar de as médias e resultados se aproximarem, o modelo termoquímico não pode ser aplicado para cálculo do consumo de carbono do AF2. Isto se deve ao impacto de variáveis não consideradas no modelo termoquímico no consumo de combustível, por exemplo, entrada de água proveniente de vazamento no sistema de refrigeração (staves) que impacta no consumo de combustível e análise de H₂ do gás de topo.

5.4- Sensibilidade do Modelo Termoquímico

Com objetivo de entender melhor o impacto e sensibilidade de parâmetros de processo, matéria-prima, gusa e escória foi realizada uma análise com base nos cálculos e resultados do modelo termoquímico utilizando o software Minitab. A Figura 5.42 mostra o impacto de algumas variáveis sobre o consumo de carbono. Como pode ser observado na Figura 5.42, a inclinação da reta indica se a variável em análise é diretamente (correlação positiva) ou inversamente (correlação negativa) proporcional ao consumo de carbono e quanto maior a inclinação, maior o impacto. Desta forma, a variável de maior impacto é a relação %CO/%CO₂ no gás de topo, comprovando a importância de uma análise confiável do gás. Vale ressaltar que

esses resultados são válidos apenas para as faixas de valores das variáveis utilizadas na simulação do modelo termoquímico.

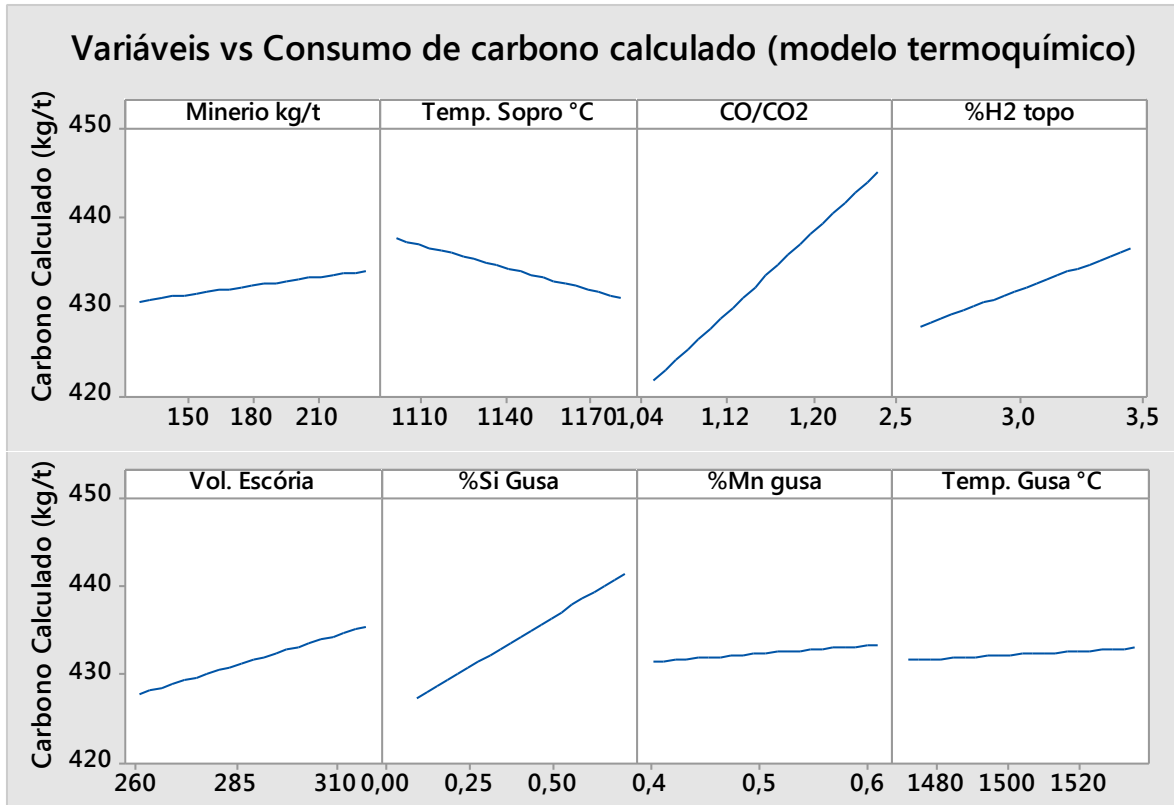


Figura 5.42: Gráfico de impacto de variáveis vs consumo de carbono

Analisando individualmente cada variável, pode-se concluir:

- Minério granulado: a elevação do consumo de minério resulta em elevação do consumo de carbono devido a sua baixa redutibilidade em comparação com sinter e pelota;
- Temperatura de sopro: a elevação da temperatura de sopro resulta na redução do consumo de combustível, devido maior aporte de calor na zona de elaboração;
- Relação %CO/%CO₂: variável com reta de maior inclinação, ou seja, maior impacto no consumo de combustível. Está relacionada ao aproveitamento do gás CO na zona de elaboração. Quanto menor a relação %CO/%CO₂ menor o consumo de carbono;
- %H₂ topo: indica a utilização de H₂ na zona de elaboração, mas não deve ser analisada sozinha devido impacto da taxa de injeção de carvão no %H₂ no topo, ou seja, uma elevação do %H₂ pode estar associada a elevação da taxa de injeção e não ao aproveitamento do H₂ na zona de elaboração. Portanto, para uma taxa de injeção fixa, a elevação do %H₂ resulta em elevação do consumo de carbono;

- Volume de escória: elevação do volume de escória resulta na elevação do consumo de carbono, devido necessidade de calor para aquecer e fundir a escória;
- %Si gusa: quanto maior %silício no gusa maior o consumo de carbono. Está associado ao reação de endotérmica de incorporação do silício ao gusa;
- %Mn gusa: mesma análise do silício, porém reação necessita de menos calor e por isso a inclinação da reta é diferente (menor);
- Temperatura do gusa: quanto maior a temperatura de trabalho do gusa maior o consumo de carbono necessário para elevar a temperatura da carga metálica a temperatura desejada.

Alguns trabalhos da literatura utilizam o conceito de rendimento gasoso (η) ao invés da relação %CO/%CO₂ no gás de topo. A equação 5.1 mostra o cálculo do rendimento gasoso, em outras palavras, utilização ou aproveitamento do gás CO. A equação 5.2 correlaciona o rendimento gasoso com relação %CO/%CO₂.

$$\eta = \frac{\%CO_2}{\%CO + \%CO_2} \times 100 \quad (5.1)$$

$$\eta = \frac{1}{\%CO / \%CO_2 + 1} \quad (5.2)$$

O impacto calculado pelo modelo termoquímico de parâmetros como: volume de escória, %granulado na carga metálica, %Si do gusa, %Mn do gusa, temperatura de sopro e rendimento gasoso podem ser observadas na Tabela V.10. Esses resultados foram comparados com resultados da literatura apresentados por CASTRO e TAVARES (1998), GUIMARÃES (2003) e SPENCE *et al.* (1997). Conforme análise da Tabela V.10, pode-se concluir que os resultados do modelo termoquímico são condizentes aos encontrados por outros estudos e empresas. A maior divergência encontrada foi com relação ao impacto do %silício do gusa, onde o resultado do modelo termoquímico foi condizente aos resultados encontrados pela Nippon Steel e JFE segundo GUIMARÃES (2003) porém muito diferentes dos resultados encontrados por SPENCE *et al.* (1997) e FLINT segundo CASTRO e TAVARES (1998).

Tabela V.10: Tabela de impactos obtida através do modelo termoquímico vs trabalhos da literatura (CASTRO e TAVARES, 1998; GUIMARÃES, 2003; SPENCE *et al.* 1997)

Variável	Variação	Impacto no consumo de combustível (kg/t)				
		Modelo Termoquímico	Flint	Spence <i>et al.</i> 1997	Nippon Steel	JFE
Slag Rate	+10kg/t	1,49	1,50	2,50	1,50	2,00
% Granulado	+1%	0,52	-	-	1,00	1,00
%Si gusa	+1%	22	60	50	20	21
%Mn	+1%	5,10	10,00	-	11,00	-
Temp. Sopro	+10°C	-0,99	-1,10	-0,86	-1,00	-1,20
Rendimento gasoso (CO)	+1%	-5,71	-	-4,60	-5,00	-4,00

5.4.1- Cálculo do Fator Ômega

Através de análise utilizando os resultados do modelo termoquímico e software estatístico Minitab, é possível definir uma equação de predição do fator ômega. Como o fator ômega está relacionado ao grau de redução que o óxido de ferro chega à zona de elaboração, é importante considerar o aproveitamento de CO e H₂ na zona de preparação. O aproveitamento de %H₂ na zona de preparação é difícil de ser calculado devido haver nesta região H₂O_(g) proveniente da evaporação da água (umidade) das matérias-primas. Desta forma foi criada uma equação para correlacionar o %H₂ no topo com a taxa de injeção de carvão e %H₂ do carvão. Equação 5.3:

$$\text{Relação } \frac{H_2 \text{ carvão}}{H_2 \text{ topo}} = \frac{\%H_2 \text{ carvão} \times \text{PCR}}{\%H_2 \text{ topo}} \quad (5.3)$$

Onde:

PCR = taxa de injeção de carvão em kg/t.

Fica claro que qualquer variação de outra fonte de H₂ no processo irá impactar no cálculo do fator ômega, como: variação na umidade de injeção e entrada de água em regiões do alto-forno com temperaturas suficientes para ocorrer a dissociação da água.

A análise de regressão avalia o relacionamento entre variáveis independentes (variáveis preditoras) e uma variável dependente (resposta), fornecendo uma equação que descreve este relacionamento.

A Tabela V.11 mostra a análise de regressão tendo como variáveis preditivas relação %CO/%CO₂ e relação %H₂carvão/%H₂topo e variável resposta fator ômega. Avaliando o *P-value* para cada variável preditiva pode-se concluir a significância devido *P-value* < 0,05, conforme destacado na Tabela V.11. Com relação ao coeficiente de correlação entre o fator ômega calculado pela regressão e fator ômega modelo termoquímico, obteve-se excelente resultado com $R^2 = 98,31\%$. A equação de regressão para predição do fator ômega está em destaque na Tabela V.11. O parâmetro estatístico VIF (*variance inflation factor*) é utilizado para detectar a presença de multicolinearidade (associação linear forte) entre as variáveis preditoras. Se VIF ~ 1, indica que não há associação linear e se VIF > 10, indica que há multicolinearidade grave. Na Tabela V.11 também está destacado o valor de VIF para regressão do fator ômega, igual a 1,01, que indica que não há multicolinearidade.

Tabela V.11: Análise de regressão para fator ômega (Software Minitab)

Análise Regressão: Fator Omega versus %CO/%CO₂; %H₂ carvão / %H₂ Topo						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	2	0,046051	0,023026	3296,71	0,000	
%CO/%CO ₂	1	0,040906	0,040906	5856,81	0,000	
%H ₂ carvão / %H ₂ Topo	1	0,003099	0,003099	443,72	0,000	
Error	111	0,000775	0,000007			
Total	113	0,046827				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
0,0026428	98,34%	98,31%	98,23%			
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	-0,22071	0,00713	-30,98	0,000		
%CO/%CO ₂	0,33737	0,00441	76,53	0,000	1,01	
%H ₂ carvão / %H ₂ Topo	-0,05069	0,00241	-21,06	0,000	1,01	
Regression Equation						
Fator Omega = -0,22071 + 0,33737 %CO/%CO ₂ - 0,05069 %H ₂ carvão / %H ₂ Topo						

A análise de resíduos para a regressão do fator ômega pode ser observada na Figura 5.44. Conforme análise da Figura 5.43 (Minitab), os resíduos apresentam distribuição normal e são aleatórios em relação ao tempo e valor calculado.

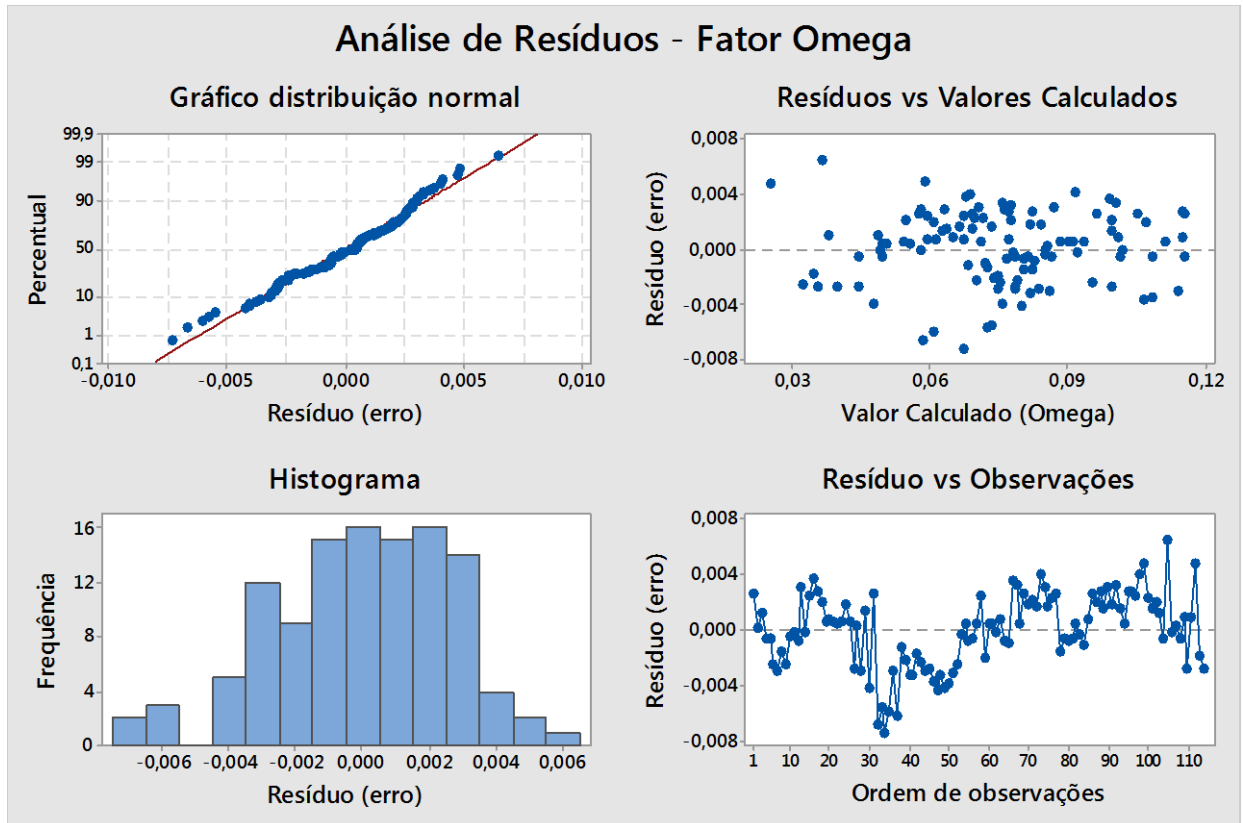


Figura 5.43: Análise de resíduos para regressão do fator ômega

A Figura 5.44 mostra a correlação entre os valores de fator ômega calculado pelo modelo termoquímico para o AF1 e calculado pela regressão. A $R^2 = 98,3\%$ indica forte correlação entre as variáveis.

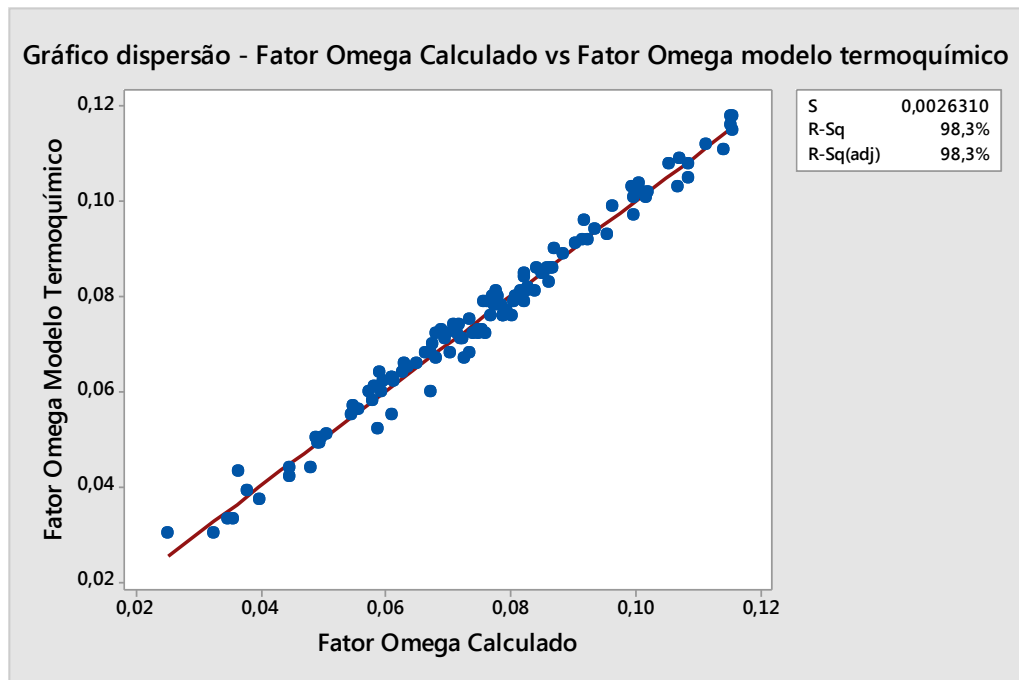


Figura 5. 44: Gráfico de dispersão e correlação para fator ômega calculado vs modelo termoquímico

A Figura 5.45 mostra o impacto calculado pelo Minitab através da equação da regressão múltipla sobre o fator ômega. Pode ser observado uma correlação positiva entre relação CO/CO₂ e fator ômega e correlação negativa entre H₂ carvão/H₂ topo. A maior inclinação da reta de correlação entre CO/CO₂ e fator ômega indica maior correlação em relação ao H₂ carvão/H₂ topo.

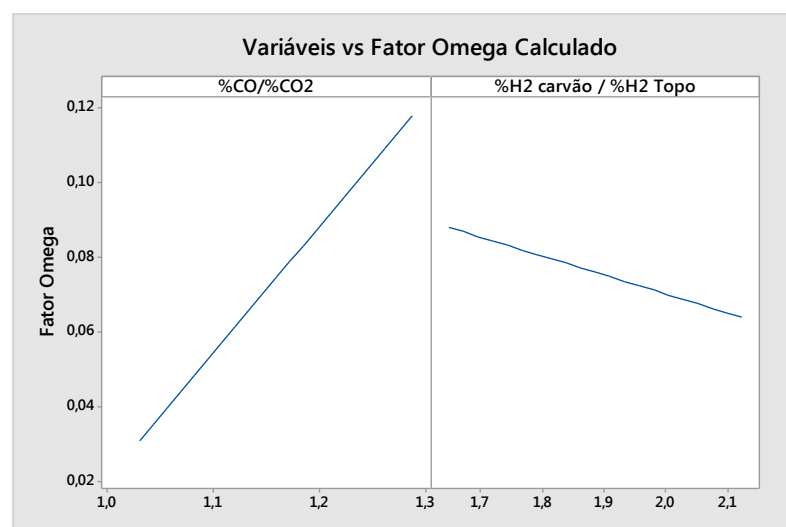


Figura 5.45: Gráfico com impacto das variáveis preditivas no fator ômega

O gráfico de contorno da Figura 5.46 mostra de maneira visual as regiões onde o valor ômega pode ser minimizado ou maximizado. Como pode ser observado, o fator ômega possui menor valor para menores valores de relação CO/CO₂ e maiores valores de relação H₂ carvão/H₂ topo.

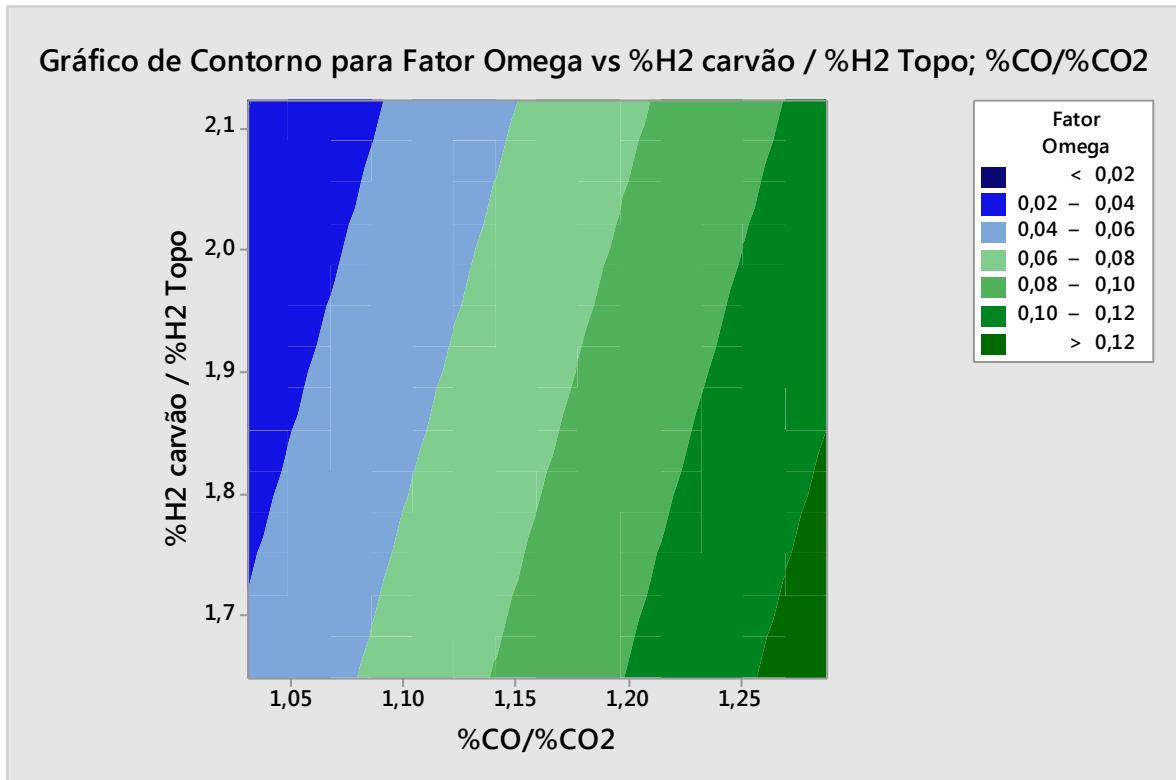


Figura 5.46: Gráfico de contorno com campos coloridos para cada faixa de fator ômega

6- CONCLUSÕES

A análise e discussão dos resultados, deste trabalho, permitiram que fossem obtidas as seguintes conclusões:

- O modelo termoquímico desenvolvido para o controle de um alto-forno a coque é perfeitamente aplicado em altos-fornos a coque, porém devem ser avaliados outros parâmetros não contemplados no modelo, a exemplo do Alto-Forno 2.
- A partir das simulações do modelo termoquímico foi calculado o fator ômega e conclui-se que ele varia sensivelmente com a relação CO/CO₂ e %H₂ do gás de topo. O fator ômega tem grande efeito sobre o consumo de carbono. A relação encontrada é:

$$\text{Consumo de carbono real} = 396,8 + 449,0 \times \text{Fator } \hat{\Omega} \quad (R^2=79,3\%)$$

- O fator ômega pode ser calculado a partir dos dados de %CO/%CO₂ do gás de topo e relação %H₂ carvão/%H₂ topo, conforme equação:

$$\text{Fator } \hat{\Omega} = -0,22071 + 0,33737 \times \frac{\%CO}{\%CO_2} - 0,05069 \times \frac{\%H_2 \text{ carvão}}{\%H_2 \text{ topo}}$$

(R²=98,31%)

- A grande contribuição do modelo de controle desenvolvido é a possibilidade de calcular a quantidade de carbono consumida, de hora em hora, e, com isso, possibilitar ao operador visar a mesma quantidade de carbono.
- Com a utilização do modelo foi possível mostrar que o operador consegue antecipar suas atuações no carbono visado e evitar grandes variações no nível térmico do alto-forno, proporcionando maior segurança operacional (menor risco de resfriamento). Ou seja, o controle térmico deixou de ser corretivo e passou a ser preventivo.
- Através da comparação dos resultados do AF1 e AF2 é possível concluir que o modelo trabalha melhor em condições estáveis e no caso do AF2 não foi possível aplicar o modelo

termoquímico devido impacto de outras variáveis no processo, como vazamento de água dos staves, não contemplada nos cálculos do modelo termoquímico.

7- CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO

Os conhecimentos necessários para o desenvolvimento do modelo termoquímico de controle de um alto-forno a coque são conhecidos. Porém neste caso foi desenvolvido um modelo específico para os Altos-Fornos 1 e 2, sendo este utilizado juntamente com o Software Minitab com o objetivo de estabilizar o processo de produção de gusa.

Apesar do conhecimento do modelo termoquímico, sua utilização em altos-fornos a coque no Brasil com nível de detalhe, computação e instrumentação apresentada é inédita. Atualmente no Brasil os operadores de alto-forno utilizam os dados operacionais para realizar uma análise qualitativa. Desta forma, o modelo termoquímico irá contribuir para análise via processamento matemático dos dados operacionais.

8- RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

- O desenvolvimento do processo de produção de gusa em altos-fornos é fundamental para o resultado financeiro das usinas siderúrgicas;
- Existe uma deficiência de modelos capazes de antecipar a atuação do operador no consumo de combustível do alto-forno na siderurgia brasileira;
- A utilização de modelo termoquímico se destaca por possuir baixa necessidade e tempo de computação e ter uma grande assertividade. A literatura sugere modelos 2-D e 3-D disponíveis, porém estes modelos levam bastante tempo para convergir e muitas vezes não convergem para precisão desejada com utilização de dados industriais;
- Os altos-fornos são e permanecerão sendo os equipamentos dominantes no setor siderúrgico de grande porte;
- A operação de altos-fornos é normalmente constituída de ajustes em reação a alterações observadas no processo decorrente de variações nas características dos materiais empregados, dependendo fortemente da experiência dos operadores;
- Existe na indústria siderúrgica uma demanda por uma ferramenta capaz de apoiar a operação de altos-fornos às condições de matéria-prima;
- Os modelos fenomenológicos globais de simulação trabalham com elevado número de relações e variáveis e exigem longos períodos de processamento e análise;
- O modelo ajudou a desenvolver um melhor conhecimento e previsibilidade do processo.

9- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilização do modelo termoquímico desenvolvido nesse trabalho em conjunto com redes neurais, com objetivo de aumentar a abrangência para outros fenômenos não avaliados pelo modelo termoquímico.
- Desenvolvimento de um modelo de distribuição de carga com objetivo de aumentar a eficiência de redução na zona de preparação, tendo em vista que o fator ω do AF1 > 0 .

10- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, L.A.; Manual de siderurgia; v.1 Produção. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997, 470p.

AUSTIN, P.R.; NOGAMI, H.; YAGI, J. A mathematical model for blast furnace reaction analysis based on the four fluid model. ISIJ International, Sendai, v.37, n.8, p.748-755, abril 1997.

BERNASOWSKI, M.; LEDZKI, A.; STACHURA, R.; KLIMCZYK, A. The fuel rate optimization model as a tool for the blast-furnace process control. METEC InSteelCon 2011, Dusseldorf, session 13, 5p., 2011.

BHAGAT, R.P.; GUPTA, S.K.; RAY.H.S. Performance analysis of a blast furnace at Bhilai Steel Plant. Progress in Metallurgical Research: Fundamental and Applied Aspects, Kanpur (Índia), p.175-183, fev 1985.

BHAGAT, R. P.; RAY, H. S.; GUPTA, S. K. Improvement in performance of the blast furnace at Bhilai through statistical analysis and improvement in burden preparation. ISIJ International, Tokyo, v. 31, n. 7, p. 669-676, 1991.

BHAGAT, R.P. Inter-influencing factors in affecting blast furnace coke rate – statistical approach. International Conference on Energy Efficiency in Steel Industry. New Delhi, India, p.1-11, dez. 2011.

BRYER, G. R. Blast furnace modeling and control strategy development at Lake Erie Steel. In: McMaster Symposium on Iron and Steelmaking, Hamilton, n°27, p.49-64, 1999.

CAMPOS, V. F. Desenvolvimento da tecnologia do alto-forno; Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, 1984.

CAMPOS, M.S. Desvendando o Minitab; Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2003, 261p.

CARVALHO, J. L. et al. Dados termodinâmicos para Metalurgistas; Belo Horizonte: UFMG, 1977. 391p.

CASTRO, J. A., NOGAMI, H. e YAGI, J. Three-dimensional multiphase mathematical modeling of the blast furnace based on the multfluid model. ISIJ International, Tokyo, v. 42, n. 1, p. 44-52, 2002.

CASTRO, L.F.A.; Desenvolvimento de um Sistema de Supervisão para Altos-Fornos a Carvão Vegetal; Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG; 1983; 157p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica)

CASTRO, L. F. A e CAMPOS, V. F. Controle de processo para altos-fornos a carvão vegetal. Controle termoquímico. Metalurgia-ABM, São Paulo, v. 40, n. 321, p. 435-440, agosto 1984.

CASTRO; L.F.A e TAVARES; R.P; Tecnologia de Fabricação de Ferro-Gusa em Altos-Fornos. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (Apostila); 1998; 854p.

CASTRO, L.F.A.; Desenvolvimento de um Modelo de Controle de Processo para Altos-Fornos a Carvão Vegetal; Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG; 2002; 155p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica)

DANLOY, G. *et al.* A blast furnace model to optimize the burden distribution. In: IRONMAKING CONFERENCE, 60th , 2001, Baltimore Proceeding: Iron and Steel Society, 2001, p.37-48.

FU, D.; CHEN, Y.; RAHMAN, T.; ZHOU, C.Q.; ZHAO, Y.; ALESSIO, J.; FERRON, K.J. Validation of the numerical model for blast furnace shaft process. AISTech 2012 Proceedings, p.417-427, 2012.

GAMERO, F.I.; COLOMER, J.; MELENDEZ, J.; WARREN, P. Predicting aerodynamic instabilities in a blast furnace. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Inglaterra, p.103-111, 2006.

GUIMARÃES, V.A.; *Princípios Básicos de Fabricação de Gusa em Altos-Fornos*, 81p. (Apostila), 2003.

HARVEY, J.P.; GHERIBI, A.E. Process simulation and control optimization of a blast furnace using classical thermodynamics combined to a direct search algorithm. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v.45B, 2014, p. 307-327.

IRONS, G. A. (ed) Use of models to optimize blast furnace operations. *McMaster Symposium on Iron and Steelmaking*, Hamilton, n°27, 1999, 232p.

JEAN-PAUL, S.; PAUL, T.; PHILIPP, B.; GIANLUCA, O.; CARLO, M.; FABRICE, H.; PAUL, G.; LIONEL, H. BFXpert – Paul Wurth’s integrated blast furnace level 2 system for best practice blast furnace operation. *METEC InSteelCon 2011*, Dusseldorf, session 21, 8p., 2011.

JINDAL, A.; PUJARI, S.; SANDILYA, P.; GANGULY, S. A reduced order thermo-chemical model for blast furnace for real time simulation. *Computers and Chemical Engineering*, v.31, 2007, p.1484-1485.

KALLO, S.; INKALA, P.; KARJALAHTI, T. Practical use of models and BF expert system to improve blast furnace operation at Rautaruukki Steel, Raahe. In: *McMaster Symposium on Iron & Steelmaking*, Hamilton, n°27, p.132-152, 1999.

KANBARA, K. et al.; Dissection of blast furnace and their internal state; *Transactions ISIJ*, Tokyo, v.17, p.371-380, 1977 apud CASTRO; L.F.A e TAVARES; R.P; *Tecnologia de Fabricação de Ferro-Gusa em Altos-Fornos*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (Apostila); 1998; 854p.

KASAI, A.; MATSUI, Y. Lowering of thermal reserve zone temperature in blast furnace by adjoining carbonaceous material and iron ore. *ISIJ International*, v.44, n.12, p.2073-2078, 2004.

KITAEV, B. I., YAROSHENKO, Yu. G.; SUCHKOV, V. D.; Heat exchange in shaft furnaces; London: Pergamon Press, 1967, 301p. apud CASTRO, L.F.A.; Desenvolvimento de um Modelo de Controle de Processo para Altos-Fornos a Carvão Vegetal; Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG; 2002; 155p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica).

KLINGER, A.; KRONBERGER, T.; SCHALER, M.; SCHURZ, B.; STOHL, K. Expert systems controlling the iron making process in closed loop operation. *Expert Systems, INTECH*, Croácia, p.117-136, 2010.

KLINGER, A.; KRONBERGER, T.; SCHALER, M.; SHURZ, B. Improving the ironmaking process with expert systems in closed-loop operation. *AISTech 2012 Proceedings*, p.395-405, 2012.

KOBAYASHI, K. *et al.* Technology for prolonging campaign life of blast furnace. *Kawasaki Steel Technical Report*, n. 32, p. 9-18, March 1995 apud CASTRO, L.F.A.; Desenvolvimento de um Modelo de Controle de Processo para Altos-Fornos a Carvão Vegetal; Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG; 2002; 155p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica).

KOSTIAL, I.; NEMCOVSKY, P.; ROGAL, M.; GABOR, D.; DORCAK, L.; TERPAK, J. Blast furnace knowledge-based control by means of simulation. 15th Triennial World Congress, In: Barcelona, Spain; 2002, 6p.

KUNDRAT, D.M. Development of an analytical equation for calculation of the blast furnace fuel rate. *Metallurgical Transaction B*, v.17B, p.705-724, 1986.

KUNDRAT, D.M. Conceptual model of the iron blast furnace considering thermodynamic and kinetic constraints on the process. *Metallurgical Transactions B*, v.20B, p.205-218, 1989.

LAZARIC, N.; MANGOLTE, P.A.; MASSUÉ, M.L. Articulation and codification of collective know-how in the steel industry: evidence from blast furnace control in France. *Research Policy*, Elsevier Science, v.32, p.1829-1847, fev. 2003.

MAKI, Y.; INAYAMA, A.; INO, K. The latest technologies for process control and automation in blast furnace. *Kawasaki Steel Technical Report*, n.43, p.61-67, out. 2000.

MATSUZAKI, S.; NISHIMURA, T.; SHINATAKE, A.; KUNITOMO, K.; NAITO, M.; SUGIYAMA, T. Development of mathematical model of blast furnace. *Nippon Steel Technical Report*, n°94, p.87-95, jul. 2006.

MEDEIROS, F.T.P.; Desenvolvimento de um modelo de predição de condições operacionais de altos-fornos siderúrgicos com base em redes neurais artificiais; Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2006; 134p. (Tese, Doutorado em Engenharia Química)

MEDEIROS, F.T.P.; CUNHA, A.P.; FILETI, A.M. Neural modelling as a tool to support blast furnace ironmaking. *International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes (ADCHEM)*. In Gramado, Brazil., p.777-782, apr. 2006.

MEDEIROS, F.T.P.; NOBLAT, S.J.X.; FILETI, A.M.F. Reviving traditional blast furnace model with new mathematical approach. *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 34, n. 5, p.410-414, 2007.

MELGAÇO Jr, H.A. et al. Análise do processo de alto-forno pelo diagrama de trocas térmicas. *Seminário COMIN/COMAP, ABM, Rio de Janeiro*, 1981.

NAITO, M.; OKAMOTO, A.; YAMAGUCHI, K.; YAMAGUCHI, T.; INOUE, Y. Improvement of blast furnace reaction efficiency by temperature control of thermal reserve zone. *Nippon Steel Technical Report*, n°94, p.103-108, jul. 2006.

OMORI, Y. (ed). Blast furnace phenomena and modelling. London: Elsevier Applied Science, 1987, 631p.

PAUL, S.; ROY, S.K.; SEN, R.K. Approach for minimizing operating blast furnace carbon rate using carbon-direct reduction (C-DRR) diagram. Metallurgical and Materials Transactions B. Kharagpur, Índia, v. 44B, p.20-27, fev. 2013.

RADHAKRISHNAN, V.R.; MOHAMED, A.R. Neural networks for the identification and control of blast furnace hot metal quality. Journal of Process Control, n.10, p.509-524, 2000.

RAIPALA, K. On hearth phenomena and hot metal carbon content in blast furnace; Helsinki, Filand, Helsinki University of Technology, 2003, 87p. (Tese, Doutorado em Engenharia de Materiais).

RICKETTS, J. A.; The history of ironmaking; Warrendale: Iron & Steel Society, 2000, 194p.

SAIZ, J.; FORMOSO, A.; MOCHÓN, J.; Advanced modellisation for blast furnace control; European Commission. Technical Steel Research. In: Luxemburgo; 1999, 88p.

SANTOS, R.J. Controle das temperaturas dos blocos de carbono do alto-forno, através de seu sistema de refrigeração, visando o prolongamento de campanha; Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG; 2005; 110p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica)

SANTOS, H.S.O.; Desenvolvimento de Modelos de Predição das Condições Operacionais de Altos-Fornos Siderúrgicos; Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG; 2008; 72p. (Projeto Final de Curso, Engenharia de Controle e Automação)

SANTOS, E.T.B.; SILVA, C.A.; GUSHIKEN, J.I.; WASEM, L.A.; SILVA, I.A.; MANSUR, F.; SESHADRI, V. Physical and mathematical modeling of transient thermal and liquid flow inside a blast furnace hearth during the tapping period. METEC InSteelCon, Modelling in coke and ironmaking, In Dusseldorf, Alemanha, session 18, p.1-9, jul. 2011.

SESHADRI, I.V.; SILVA, C.A.; SILVA, I.A.; RODRIGUES, E.F.; GASPARINI, V.M.; GABRIEL, W.V. Evaluation of the wear of blast furnace hearth refractory by thermal modeling. AISTech Proceedings, In St. Louis, USA , p.443-454, may 2009.

SHEN, Y.; GUO, B.; CHEW, S.; AUSTIN, P.; YU, A. Three-dimensional modeling of flow and thermo-chemical behavior in a blast furnace. Metallurgical and Materials Transactions B, v. 46B, p.432-448, fev. 2015.

SPENCE, A.; PRITCHARD, W.; Development of expert systems for blast furnace operation and control; European Commission. Technical Steel Research. In: Luxemburgo; 1997, 117p.

TAMBASCO, M. J. (ed.). Redução de minério de ferro em alto-forno. 4.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1977.

TASHIRO, K. et al. Comportement de La zone cohesive au haut fourneau. Revue de Metallurgie – CIT, p.1027-1035, dec. 1980 apud CASTRO; L.F.A e TAVARES; R.P; Tecnologia de Fabricação de Ferro-Gusa em Altos-Fornos. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (Apostila); 1998; 854p.

TAVARES; R.P; Aerodinâmica e hidrodinâmica do Alto-Forno. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (Apostila); 2005; 84p.

TORSSELL, K.; BI, X.; WIJK, O. Prediction of the blast furnace process by a mathematical model. ISIJ International, vol. 32, n. 4, p.481-488, jan. 1992.

TURKDOGAN, E.T. Blast Furnace Reactions. Metallurgical Transactions B, v.9B, p.163-179, 1978.

UEDA, S.; NATSUI, S.; NOGAMI, H.; YAGI, J.; ARIYAMA, T. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace. ISIJ International, v.50, n.7, p.914-923, jan. 2010.

UJISAWA, Y.; NAKANO, K.; MATSUKURA, Y.; SUNAHARA, K.; KOMATSU, S.; YAMAMOTO, T. Subjects for achievement of blast furnace operation with low reducing agent rate. *ISIJ International*, v.45, n.10, p.1379-1385, 2005.

VEHEC, J.; ZHOU, C.Q. State-of-the-art blast furnace model for minimization of fuel rates. *METEC InSteelCon 2011, Dusseldorf*, session 9, 10p., 2011.

WRIGHT, B. D.; ZULLI, P. Application of decision support system for thermal balance control in the ironmaking blast furnace. *BlueScope Steel Research*, In Port Kembla, Australia, 2009, 9p.

ZAIMI, S.A.; BENNANI, M.; CAMPOS, T.; IEZZI, J.; DANLOY, G.; EYMOND, J.L.; BEGREM, E.; DEGRAVE, S.; MUCHEMBLE, F.; RINGOT, S.; ROUSSELLE, T. Deployment and use of R&D models at ArcelorMittal Dunkerque blast furnaces. *METEC InSteelCon 2011, Dusseldorf*, p.1-6, 2011.

ZENG, J.; CHUAN, C.; SU, H. Data-driven predictive control for blast furnace ironmaking process. *Computers and Chemical Engineering*, Hangzhou, China, v.34, 2010, p.1854-1862.