

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

Tese de Doutorado

“Modelamento estatístico do consumo de carvão vegetal
dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil em função da
produção de ferro-gusa e das cargas ferrosas”

Autora: Rosiane Mary Rezende Faleiro

Orientador: Luiz Fernando Andrade de Castro

Co-orientadores: Cláudio Musso Velloso e Ronaldo Santos Sampaio

Novembro/2013

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

Rosiane Mary Rezende Faleiro

MODELAMENTO ESTATÍSTICO DO CONSUMO DE
CARVÃO VEGETAL DOS ALTOS-FORNOS DA
VALLOUREC TUBOS DO BRASIL EM FUNÇÃO DA
PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA E DAS CARGAS
FERROSAS

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

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Luiz Fernando Andrade de Castro

Co-orientadores: Cláudio Musso Velloso e Ronaldo Santos Sampaio

Belo Horizonte
Escola de Engenharia
2013

Aos meus amados pais:

Edgar e Roza Helena

AGRADEDIMENTOS:

O autor agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular:

A Deus, por iluminar sempre os meus caminhos e estar sempre presente em minha vida.

Ao Cláudio Musso Velloso, por ter semeado a idéia do doutorado, pelas oportunidades de conhecimento e desenvolvimentos profissionais e pessoais. Sua motivação, dedicação, orientação e atenção diárias fazem toda diferença.

Aos Professores Luiz Fernando Andrade de Castro e Ronaldo Santos Sampaio pela orientação e confiança em mim depositadas.

Aos meus familiares, em especial meus pais Edgar e Roza Helena, minhas irmãs Letícia e Samara, meu marido Wagner e minha pequena Clara, que são a razão de todo o meu esforço.

À Vallourec Tubos do Brasil que me proporcionou esta oportunidade de aprendizagem e desenvolvimento, em especial ao Marcelo Ferreira e ao Paulo Miranda por acreditarem no meu trabalho.

A todos os meus amigos e colegas de trabalho pela torcida, ensinamentos, sugestões e incentivos para a conclusão dessa grande e importante etapa da minha vida.

RESUMO

O processo de fabricação de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal, além de complexo, representa o maior custo de uma usina integrada devido aos altos preços das matérias-primas.

Um grande desafio desse tipo de operação é manter a estabilidade, que se deve principalmente às variações nos parâmetros de qualidade das matérias-primas, do carvão vegetal em especial, sendo importante conhecer bem as suas características e as suas consequências para a operação.

A Vallourec Tubos do Brasil desenvolveu projetos Seis Sigma baseados na metodologia DMAIC para reduzir a variabilidade inerente aos processos de amostragem de matérias-primas. Além disso, vem conduzindo estudos para reduzir o custo da produção de ferro-gusa dos altos-fornos utilizando dados históricos reais de consumo de matérias-primas e produção que a todo o momento podem ser usados para avaliar o custo de produção e conseguir um melhor planejamento e resultados para a empresa. Tais estudos permitiram o desenvolvimento de uma abordagem estatística para prever o consumo de carvão vegetal em altos-fornos baseada em Modelos de Superfície de Resposta (MSR) e Modelos de Regressão Linear (MRL).

Os modelos desenvolvidos nesse trabalho apresentaram bons níveis de confiança e permitem que a empresa atue preventivamente para fazer negócio inovador e no planejamento de ações para reduzir o custo da produção de ferro-gusa, visando melhorar o beneficiamento de matérias-primas e outras ações para fornecer para os altos-fornos matérias-primas a um custo mínimo. Representa um grande passo na operação de altos-fornos a carvão vegetal, com um diferencial para a Vallourec Tubos do Brasil, que deixou de trabalhar com carga ferrosa padrão e começou a operar com maior flexibilidade e variabilidade de tipo de carga usada para alcançar melhores resultados econômicos.

ABSTRACT

Hot metal manufacturing process in charcoal blast furnaces, besides complex, represents the largest cost of an integrated plant due to the high prices of the raw materials.

A great problem of this operation type is the low stability, which is due mainly to variations in the raw materials quality parameters, charcoal especially, being important to know well their characteristics and consequences for the operation.

Vallourec Tubos do Brasil developed Six Sigma projects based in DMAIC methodology to reduce the variability of raw materials sampling process. In addition, it has been carrying out studies to reduce hot metal production cost, using historical data on raw materials consumption and hot metal production in the blast furnaces. Afterwards, these data are turned into information that can be used to evaluate production cost and achieve better planning and results for the company. These studies allowed the development of a statistical approach to predict charcoal consumption in blast furnaces based on Response Surface Models (RSM) and Linear Regression Models (LRM).

The developed models in this work provide a high level of confidence and allow the company to act preemptively fostering innovative business and in the action plan to reduce hot metal production cost, to improve raw materials processing and other actions in order to provide the blast furnaces with raw materials at minimal cost. It is special particularity and represents a great step in Vallourec Tubos do Brasil blast furnaces' operation which no longer uses standard ferrous load and started to operate with greater flexibility and variability concerning the types of ferrous load applied to achieve better economic results.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Alto-forno	5
3.1.1. Aspectos internos	7
3.1.2. Princípio	10
3.1.3. Funções da carga sólida.....	10
3.1.4. Características dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil	12
3.2. Controle operacional e de processo do alto-forno	13
3.2.1. Modelos de controle operacional	14
3.2.2. Modelos para previsão do teor de silício.....	15
3.2.3. Modelos para controle do nível térmico	17
3.2.4. Modelos CFD	18
3.2.5. Modelos para controlar ou prever o consumo de redutor.....	18
3.3. Qualidade das matérias-primas	23
3.3.1. Origem da heterogeneidade atual do carvão vegetal.....	24
3.3.2. Avaliação da qualidade.....	26
3.4. Metodologias Estatísticas	27
3.4.1. Superfície de Resposta e Regressão	27
3.4.2. ANOVA Hierárquica.....	32
4. METODOLOGIA DE TRABALHO	34
4.1. DMAIC (Define, Measure, Analyse, Improve, Control)	34
4.2. Redução da variabilidade inerente à amostragem	34
4.2.1. Carvão vegetal	34
4.2.2. Minério de ferro	38
4.3. Modelamento estatístico do consumo de carvão vegetal	40
4.3.1. Base de dados	40
4.3.2. Modelos de superfície de resposta (MSR).....	44
4.3.3. Modelos de regressão linear.....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1. Análise descritiva dos dados	46
5.2. Redução da variabilidade inerente às amostragens	64
5.3. Modelos da “Etapa 1” - dados de 2003 a 2010	66
5.4. Modelos da “Etapa 2” - dados de 2003 a 2011	82
5.4.1. Fatores para corrigir as qualidades do carvão vegetal e da carga ferrosa	97

5.5. Validação dos modelos	99
5.6. Modelo de Otimização	100
6. CONCLUSÕES.....	101
7. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO	102
8. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS.....	103
9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1:	Processo de redução de óxidos de ferro no alto-forno (CASTRO, 2002). ..	6
Figura 3.2:	Esquema da região interna do alto-forno, mostrando as várias zonas (CASTRO, 2002).....	8
Figura 3.3:	Esquema de divisão do alto-forno: modelo operacional e dissecação pelos japoneses (CASTRO, 2002).....	9
Figura 3.4:	Comparação entre os processos antigo e atual de produção de carvão vegetal (SAMPAIO et. al., 2006).	24
Figura 3.5:	Planejamento hierárquico em dois estágios (fatores A e B).	32
Figura 4.1:	Ilustração da proposta de redução da variabilidade do método de amostragem antes e depois do projeto do programa Seis Sigma.....	35
Figura 4.2:	Esquema do experimento de balanço de massas do carvão vegetal.	36
Figura 4.3:	Fluxograma do experimento hierárquico para quantificar separadamente as variabilidades do material e do método de amostragem.	37
Figura 4.4:	Fluxo de recebimento e beneficiamento de minério de ferro da Vallourec Tubos do Brasil.	39
Figura 4.5:	Planejamento hierárquico do experimento para estimar os componentes de variação da amostragem de minério na Vallourec Tubos do Brasil.	40
Figura 4.6:	Balanço de massas do carvão vegetal utilizado na rotina da Vallourec Tubos do Brasil.	42
Figura 5.1:	Evolução da produção diária de ferro-gusa (t) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	48
Figura 5.2:	Evolução do consumo de CV de topo (kg/t gusa) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	51
Figura 5.3:	Evolução da taxa de injeção de CV (kg/t gusa) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	53
Figura 5.4:	Evolução do teor de carbono fixo do carvão vegetal consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.....	58
Figura 5.5:	Evolução do teor de cinzas do carvão vegetal consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	58
Figura 5.6:	Evolução da umidade do carvão vegetal consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	59
Figura 5.7:	Evolução do tamanho médio do carvão vegetal consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	59
Figura 5.8:	Evolução do percentual de finos do carvão vegetal consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.....	60

Figura 5.9:	Diversidade da carga ferrosa utilizada pelos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	61
Figura 5.10:	Evolução dos teores de ferro, alumina e sílica da carga ferrosa dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.....	63
Figura 5.11:	Novo procedimento de preparação de amostras de carvão vegetal.	64
Figura 5.12:	Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 1 – “Etapa 1”. 70	
Figura 5.13:	Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 2 – “Etapa 1”. 70	
Figura 5.14:	Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (chuva) com produção diária variando de 700 a 900t de ferro-gusa – “Etapa 1”.....	73
Figura 5.15:	Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (chuva) com produção diária variando de 1.000 a 1.200t de ferro-gusa – “Etapa 1”.....	74
Figura 5.16:	Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (seca) com produção diária variando de 700 a 900t de ferro-gusa – “Etapa 1”.....	75
Figura 5.17:	Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (seca) com produção diária variando de 1.000 a 1.200t de ferro-gusa – “Etapa 1”.....	76
Figura 5.18:	Curvas de níveis do Alto-Forno 2 (chuva) com produção diária variando de 400 a 600t de ferro-gusa – “Etapa 1”.....	77
Figura 5.19:	Curvas de níveis do Alto-Forno 2 (seca) com produção diária variando de 400 a 600t de ferro-gusa – “Etapa 1”.....	78
Figura 5.20:	Determinação do percentual de pelotas a ser utilizado na carga ferrosa em função da produção diária (t) de ferro-gusa do Alto-Forno 1 – “Etapa 1”... 79	
Figura 5.21:	Determinação do percentual de pelotas a ser utilizado na carga ferrosa em função da produção diária (t) de ferro-gusa do Alto-Forno 2 – “Etapa 1”... 80	
Figura 5.22:	Estimativa do consumo de carvão vegetal de topo (kg/t gusa) do Alto-Forno 1 em função do percentual de pelotas na carga ferrosa – “Etapa 1”.	81
Figura 5.23:	Estimativa do consumo de carvão vegetal de topo (kg/t gusa) do Alto-Forno 2 em função do percentual de pelotas na carga ferrosa – “Etapa 1”.	81
Figura 5.24:	Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 1 – “Etapa 2”, chuva.	85
Figura 5.25:	Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 1 – “Etapa 2”, seca.	86
Figura 5.26:	Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 2 – “Etapa 2”, chuva.	86
Figura 5.27:	Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 2 – “Etapa 2”, seca.	87

Figura 5.28:	Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (chuva) com produção diária variando de 700 a 900t de ferro-gusa – “Etapa 2”.....	89
Figura 5.29:	Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (chuva) com produção diária variando de 1.000 a 1.200t de ferro-gusa – “Etapa 2”.....	90
Figura 5.30:	Curvas de níveis do Alto-forno 1 (seca) com produção diária variando de 700 a 900t de ferro-gusa – “Etapa 2”.....	91
Figura 5.31:	Curvas de níveis do Alto-Forno 2 (chuva) com produção diária variando de 300 a 400t de ferro-gusa – “Etapa 2”.....	92
Figura 5.32:	Curvas de níveis do Alto-Forno 2 (chuva) com produção diária variando de 500 a 600t de ferro-gusa – “Etapa 2”.....	93
Figura 5.33:	Determinação do percentual de pelotas na carga ferrosa em função da produção diária (t) de ferro-gusa do Alto-Forno 1 – “Etapa 2”.	95
Figura 5.34:	Determinação do percentual de pelotas na carga ferrosa em função da produção diária (t) de ferro-gusa do Alto-Forno 2 – “Etapa 2”.	95
Figura 5.35:	Estimativa do consumo de carvão vegetal de topo (kg/t gusa) do Alto-Forno 1 em função do percentual de pelotas na carga ferrosa – “Etapa 2”.	96
Figura 5.36:	Estimativa do consumo de carvão vegetal de topo (kg/t gusa) do Alto-Forno 2 em função do percentual de pelotas na carga ferrosa – “Etapa 2”.	96
Figura 5.37:	Fatores de correção do consumo de carvão vegetal de topo em função da variação da qualidade da carga ferrosa do mix dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	98
Figura 5.38:	Fatores de correção do consumo de carvão vegetal de topo em função da variação da qualidade do carvão vegetal do mix dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	98
Figura 5.39:	Diferenças entre os consumos de carvão vegetal de topo reais x estimativas dos modelos desenvolvidos nas “Etapas 1 e 2”.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1:	Características dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	12
Tabela III.2:	Variáveis da “Fórmula de Flint”, suas unidades e seus coeficientes de regressão (FLINT, 1952).	21
Tabela III.3:	Análise de variância de uma ANOVA Hierárquica.	33
Tabela IV.1:	Resumo da metodologia DMAIC.	34
Tabela IV.2:	Variáveis utilizadas para o desenvolvimento dos modelos estatísticos.	41
Tabela IV.3:	Exemplos de 20 cenários do AF1 (no total são 88 cenários) considerando % de diferentes tipos de minérios (T1, T2...T4) e % de pelota.	43
Tabela IV.4:	Exemplos de 20 cenários do AF2 (no total são 147 cenários) considerando % de diferentes tipos de minérios (T1, T2...T7) e % de pelota.	43
Tabela V.1:	Estatísticas descritivas da produção diária de ferro-gusa (t) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	47
Tabela IV.2:	Estatísticas descritivas do consumo de CV de topo (kg/t gusa) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	50
Tabela V.3:	Estatísticas descritivas da taxa de injeção de CV (kg/t gusa) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	52
Tabela V.4:	Estatísticas descritivas das análises imediata e granulométrica do CV consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.	55
Tabela V.5:	Comparação da variabilidade da amostragem de carvão vegetal antes e depois da revisão dos procedimentos.	65
Tabela V.6:	Comparação da variabilidade (variância) da amostragem de minério de ferro antes e depois da revisão dos procedimentos.	66

LISTA DE NOTAÇÕES

AF = alto-forno

AF1 = Alto-Forno 1

AF2 = Alto-Forno 2

β = coeficientes de regressão

B2 = basicidade binária

CFD = *Computational Fluid Dynamics*

C_i = coeficiente de correlação da variável i (“Fórmula de Flint”, equação 3.7)

CR = consumo específico de carbono (kg/t gusa) (“Fórmula de Flint”, equação 3.7)

CV = carvão vegetal

CVG = carvão vegetal grosso (32 a 125mm)

CVM = carvão vegetal médio (10 a 32mm)

ϵ = erros com distribuição Normal, média 0 e desvio-padrão σ

H_0 = hipótese nula

H_1 = hipótese alternativa

IC = intervalo de confiança

K = constante de regressão específica para cada alto-forno (“Fórmula de Flint”, equação 3.7)

LRM = *Linear Regression Models*

MSR = Modelo de Superfície de Resposta

MRL = Modelo de Regressão Linear

PCI = *Pulverized Coal Injection*

r = coeficiente de correlação

R^2 = coeficiente de determinação múltipla

RDI = *Reduction Degradation Indices*

RSM = *Response Surface Models*

V_i = variável i que afeta o consumo de carbono (“Fórmula de Flint”, equação 3.7)

X_i = variável explicativa / fator

Y_i = variável resposta

RESUMO

O processo de fabricação de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal, além de complexo, representa o maior custo de uma usina integrada devido aos altos preços das matérias-primas.

Um grande desafio desse tipo de operação é manter a estabilidade, que se deve principalmente às variações nos parâmetros de qualidade das matérias-primas, do carvão vegetal em especial, sendo importante conhecer bem as suas características e as suas consequências para a operação.

A Vallourec Tubos do Brasil desenvolveu projetos Seis Sigma baseados na metodologia DMAIC para reduzir a variabilidade inerente aos processos de amostragem de matérias-primas. Além disso, vem conduzindo estudos para reduzir o custo da produção de ferro-gusa dos altos-fornos utilizando dados históricos reais de consumo de matérias-primas e produção que a todo o momento podem ser usados para avaliar o custo de produção e conseguir um melhor planejamento e resultados para a empresa. Tais estudos permitiram o desenvolvimento de uma abordagem estatística para prever o consumo de carvão vegetal em altos-fornos baseada em Modelos de Superfície de Resposta (MSR) e Modelos de Regressão Linear (MRL).

Os modelos desenvolvidos nesse trabalho apresentaram bons níveis de confiança e permitem que a empresa atue preventivamente para fazer negócio inovador e no planejamento de ações para reduzir o custo da produção de ferro-gusa, visando melhorar o beneficiamento de matérias-primas e outras ações para fornecer para os altos-fornos matérias-primas a um custo mínimo. Representa um grande passo na operação de altos-fornos a carvão vegetal, com um diferencial para a Vallourec Tubos do Brasil, que deixou de trabalhar com carga ferrosa padrão e começou a operar com maior flexibilidade e variabilidade de tipo de carga usada para alcançar melhores resultados econômicos.

ABSTRACT

Hot metal manufacturing process in charcoal blast furnaces, besides complex, represents the largest cost of an integrated plant due to the high prices of the raw materials.

A great problem of this operation type is the low stability, which is due mainly to variations in the raw materials quality parameters, charcoal especially, being important to know well their characteristics and consequences for the operation.

Vallourec Tubos do Brasil developed Six Sigma projects based in DMAIC methodology to reduce the variability of raw materials sampling process. In addition, it has been carrying out studies to reduce hot metal production cost, using historical data on raw materials consumption and hot metal production in the blast furnaces. Afterwards, these data are turned into information that can be used to evaluate production cost and achieve better planning and results for the company. These studies allowed the development of a statistical approach to predict charcoal consumption in blast furnaces based on Response Surface Models (RSM) and Linear Regression Models (LRM).

The developed models in this work provide a high level of confidence and allow the company to act preemptively fostering innovative business and in the action plan to reduce hot metal production cost, to improve raw materials processing and other actions in order to provide the blast furnaces with raw materials at minimal cost. It is special particularity and represents a great step in Vallourec Tubos do Brasil blast furnaces' operation which no longer uses standard ferrous load and started to operate with greater flexibility and variability concerning the types of ferrous load applied to achieve better economic results.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de se produzir ferro-gusa em altos-fornos com custos cada vez mais baixos tem levado a análises mais profundas dos fatores que afetam o custo e o comportamento destes reatores. Minimizar o custo de operação e melhorar a qualidade de produção ao longo do percurso de todo o processo são os principais fatores para uma produção competitiva e lucrativa.

Um grande desafio enfrentado na operação dos altos-fornos é a baixa estabilidade, que se deve principalmente às variações nos parâmetros de qualidade das matérias-primas, do carvão vegetal em especial. Por isso, é muito importante conhecer bem as características das matérias-primas que abastecem os altos-fornos e suas consequências para a operação, principalmente do carvão vegetal, que representa cerca de 47% do custo do ferro-gusa, e das demais matérias-primas, como o minério de ferro granulado, a pelota e os fundentes.

O processo de fabricação de ferro-gusa é um grande desafio em termos de complexidade e de custo, uma vez que representa o maior de custo de uma usina integrada devido aos altos preços das matérias-primas.

A Vallourec Tubos do Brasil está conduzindo estudos para reduzir o custo de produção de ferro-gusa, utilizando dados históricos de consumo de matérias-primas e produção dos altos-fornos, e transformando-os em informação que a todo o momento pode ser usada para avaliar o custo de produção e conseguir um melhor planejamento e resultado para a empresa. Esta flexibilidade tem sido fundamental para minimizar os custos, principalmente frente a um cenário de aumento constante dos preços de matérias-primas.

De um modo geral, no mercado são definidas cargas ferrosas padrão para os altos-fornos (por exemplo: 70% de sinter, 10% de pelota e 20% de minério), e a operação mantém constantes esses percentuais de cargas. Esse trabalho representa um grande passo na operação dos altos-fornos, com um diferencial para a Vallourec Tubos do Brasil, que deixou de trabalhar com carga ferrosa padrão e começou a operar com maior flexibilidade e variabilidade de tipo de carga usada para alcançar melhores resultados econômicos.

Em 2009, quando se deu o início deste trabalho, os estudos baseavam-se em curvas de superfície de resposta que representavam os diferentes níveis de consumos de carvão vegetal. Com limites pré-estabelecidos de porcentagem de pelota na carga ferrosa e da taxa de injeção de carvão vegetal, tais curvas mostravam as possíveis formas de operar

os altos-fornos. Como exemplo de aplicação, se em um determinado mês havia uma oferta de minério com menor custo no mercado, podia ser uma oportunidade para se trabalhar com maior porcentagem de minério na carga ferrosa dos altos-fornos, dentro das porcentagens mínimas e máximas já utilizadas. Utilizando as curvas elaboradas, fazia-se uma previsão imediata do custo de se utilizar maior porcentagem de minério, considerando a taxa de injeção de carvão vegetal dentro dos limites pré-estabelecidos, o respectivo consumo de carvão vegetal. Em busca de se obter um melhor resultado econômico, tomava-se a decisão de aproveitar ou não a oportunidade da oferta de minério. Se autorizado a fazer, o minério adicional era comprado, utilizado e verificava se realmente havia sido possível conseguir o ganho no consumo de carvão vegetal, mantendo a produção planejada. Dessa forma, havia um retorno financeiro imediato naquele mês.

Trabalhando dessa maneira, passou-se a avaliar a carga ferrosa do alto-forno com maior frequência, e, a cada quinze dias, os altos-fornos operavam com percentuais de cargas ferrosas diferentes para atender ao custo. Sendo assim, a Vallourec Tubos do Brasil passou a trabalhar com o custo minimizado.

O caminho encontrado de constante mudança na operação dos altos-fornos não é o que mais agrada aos profissionais da operação, uma vez que tira a estabilidade operacional. No entanto, dá uma prerrogativa de custo que nunca antes se havia conseguido. Dizer que o consumo de carvão vegetal tem que ser mais alto porque tem que trabalhar com o mínimo de porcentagem de pelota, em busca de menor custo de produção de ferro-gusa, é uma quebra de paradigma na área de alto-forno, a qual tem enraizado a busca de menor consumo de carvão vegetal.

Uma vez estabelecidos os modelos iniciais, surgiu a necessidade de transformá-los em modelos que correlacionem as características de qualidade das matérias-primas recebidas, com cada vez mais heterogeneidade, para avaliar seus impactos no consumo de carvão vegetal.

Nesse trabalho foram elaborados modelos estatísticos com bom nível de confiança para prever o consumo de carvão vegetal em altos-fornos fundamentados nas metodologias de Superfície de Resposta e Regressão Linear (MONTGOMERY, 2004). Com base nas características de qualidade e nas variações esperadas das matérias-primas e suas interações, os modelos permitem prever o custo de produção de ferro-gusa, a atuação preventiva da empresa para tornar o negócio inovador e auxiliam no planejamento de

ações para reduzir o custo de produção de ferro-gusa, como por exemplo: lavrar a mina de minério de ferro em outra região, buscar carvão vegetal de outras fazendas, negociar contratos, ter visibilidade das matérias-primas que serão utilizadas, do preço da carga ferrosa que pode pagar, dentre outras ações para se trabalhar no abastecimento dos altos-fornos com matérias-primas com custo mínimo.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é elaborar modelos estatísticos capazes de prever o consumo de carvão vegetal dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil em função da mudança na carga ferrosa.

Os demais objetivos são: i) desenvolver modelos que permitam simular cenários que tragam maior competitividade às operações dos altos-fornos a carvão vegetal; ii) quantificar a heterogeneidade do carvão vegetal e do minério de ferro; iii) desenvolver modelos estatísticos que elevem o índice de acerto para o planejamento macro da produção de ferro-gusa convivendo com a heterogeneidade das matérias-primas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Alto-forno

O alto-forno é um reator metalúrgico empregado na produção de ferro-gusa através da fusão redutora dos óxidos de ferro (minério de ferro e/ou sinter e/ou pelota) em presença de carbono do redutor (carvão vegetal e/ou coque) e fundentes.

Estes materiais, conhecidos como carga sólida, são carregados pelo topo na temperatura ambiente e, na descida, são transformados pela ação dos gases ascendentes, provenientes da reação de combustão do carbono dos redutores com o oxigênio do ar de combustão aquecido (500 a 1.200°C ou mais) soprado pelas ventaneiras, enriquecido ou não com oxigênio.

O oxigênio do ar soprado (O₂) entra em contato com o carbono (C) do redutor incandescente e reage segundo a reação 3.1 de produção de dióxido de carbono (CO₂). Esta reação altamente exotérmica produz grande quantidade de calor para o processo:



O CO₂ formado nesta região de alta temperatura reage novamente com o carbono do redutor formando o monóxido de carbono (2CO). Esta reação (3.2) altamente endotérmica é conhecida como “*Solution loss*” ou “*Boudouard*”:



A umidade contida no ar soprado entrará em reação (3.3) com o carbono do redutor gerando os gases redutores CO e H₂, cujo resultado é o aumento das percentagens de H₂ e CO no gás:



Embora as reações 3.2 e 3.3 sejam endotérmicas, ou seja, absorvem calor, o resultado efetivo associado à saída de gases redutores é o aporte de grandes quantidades de calor fornecido para a seqüência do processo, gerando uma temperatura de chama na região que excede 1.850°C. Durante o restante do seu caminho pelo alto-forno, o gás ascendente suprirá calor para as camadas de carga metálica descendentes, saindo no topo do forno ainda com temperaturas acima de 100°C (VELLOSO, 2006).

Também ocorrem reações da carga ferrosa com o redutor. No interior do alto-forno estão reagindo sólidos, líquidos e gases. A temperatura varia de 150°C no topo até cerca de 2.100°C nas regiões inferiores.

A partir do topo do forno, os óxidos de ferro sofrem as reduções, conforme mostram as reações simultâneas 3.4 a 3.6:



Os produtos obtidos no alto-forno são o ferro-gusa e a escória (da ordem de 150 a 180kg/t gusa), depositados no cadinho, e as poeiras e os gases no topo (da ordem de 1.750 a 2.300Nm³/t gusa).

A Figura 3.1 mostra um esquema simplificado do processo de produção de ferro-gusa no alto-forno.

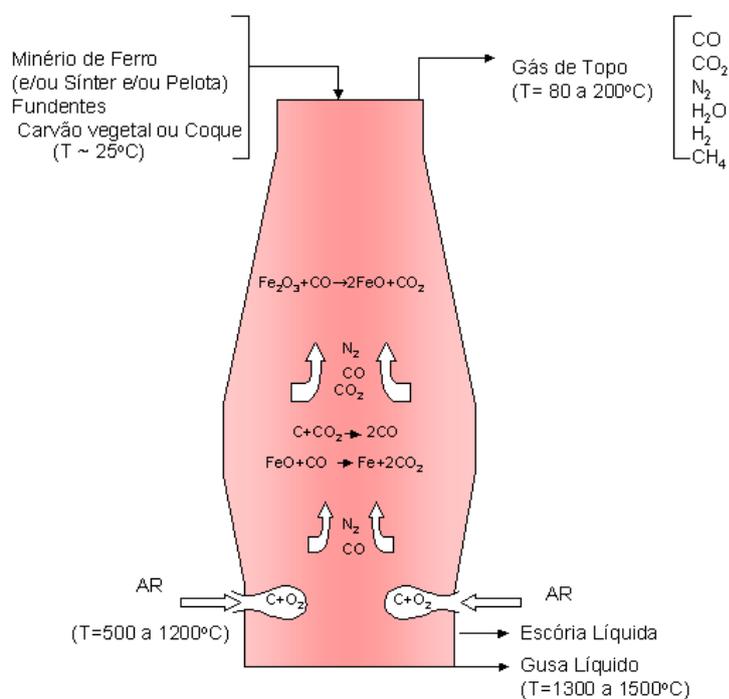


Figura 3.1: Processo de redução de óxidos de ferro no alto-forno (CASTRO, 2002).

3.1.1. Aspectos internos

Apesar de o alto-forno ser um equipamento que tem sido utilizado desde o século XV, somente nos meados do século XIX os fenômenos químicos e físicos, que ocorrem dentro do alto-forno, começaram a ser entendidos. Com base em estudos de dissecação de altos-fornos realizados na década de 1970 no Japão, onde altos-fornos em operação foram congelados, além de sondagens com fornos em operação e diversos outros estudos em vários países, três zonas internas principais nos altos-fornos foram definidas (CASTRO, 2002). As características principais de cada zona interna do alto-forno são descritas a seguir e mostradas esquematicamente na Figura 3.2.

Zona granular: É a região do alto-forno onde todos os componentes da carga se encontram no estado sólido. Nesta zona, a carga metálica (sinter, e/ou pelota e/ou minério), o termo redutor (coque e/ou carvão vegetal) e os fundentes mantêm a sua configuração em camadas, tais como foram carregados (em camadas alternadas), e descem sólidos em contracorrente com os gases. Nesta região pode ocorrer uma excessiva degradação da carga por deficiências no controle de qualidade das matérias-primas, afetando a permeabilidade e o fluxo gasoso ascendente.

Zona de amolecimento e fusão: Região constituída de camadas de carvão vegetal e/ou coque e camadas coesivas alternadas e onde os componentes da carga metálica e fundentes iniciam o amolecimento e se fundem. As camadas coesivas são formadas de massas semifundidas de partículas de minério de ferro, praticamente impermeáveis ao fluxo gasoso, que passa preferencialmente através das camadas de carvão vegetal e/ou coque. Nesta zona, a carga metálica fica no estado de amolecimento até a fusão completa.

Zona de gotejamento: É a zona ativa do combustível onde ocorre a movimentação do carvão vegetal e/ou coque no sentido da zona de combustão e onde os materiais já fundidos permeiam o homem morto em direção ao cadinho. O metal e a escória, já líquidos, escoam através do carvão vegetal e/ou coque na forma sólida, em contracorrente com os gases. Esta zona engloba duas subzonas: o homem morto e a zona de combustão. O homem morto é a coluna de carvão vegetal e/ou 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-se ao fundo e é responsável também por auxiliar na sustentação da coluna de carga.



Figura 3.2: Esquema da região interna do alto-forno, mostrando as várias zonas (CASTRO, 2002).

De acordo com CASTRO (2002), 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) ou 800 °C (carvão vegetal), 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 3.3 ilustra essas divisões ao longo de duas regiões do forno junto à parede e no centro.

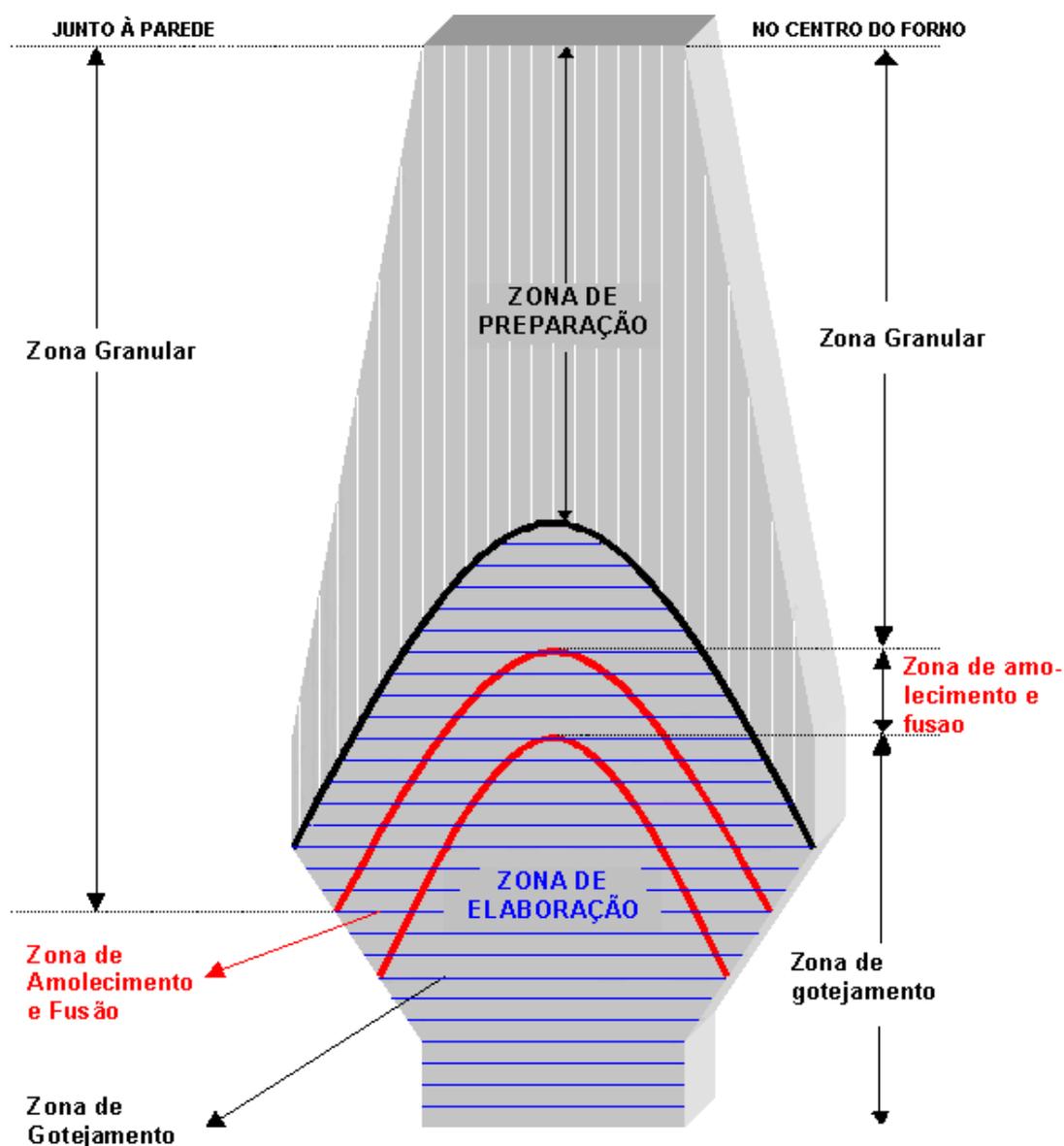


Figura 3.3: Esquema de divisão do alto-forno: modelo operacional e dissecção pelos japoneses (CASTRO, 2002).

Quanto maior for a eficiência de redução da carga ferrosa na zona de preparação, menor será o consumo de carbono (kg/t gusa). Dentre os fatores que influenciam nessa eficiência estão: i) o contato gás-sólido na zona de preparação em função da granulometria dos materiais; ii) a qualidade da carga ferrosa, principalmente a redutibilidade; iii) a temperatura da zona de preparação e iv) o tempo de residência da carga ferrosa na zona de preparação (CASTRO, 2002).

3.1.2. Princípio

O principal objetivo do alto-forno é reduzir quimicamente e converter fisicamente óxidos de ferro em ferro líquido chamado ferro-gusa. O processo de fabricação de ferro-gusa consome cerca de 70% de toda energia de entrada da rota integrada de fabricação de aço. Recentemente, devido ao crescimento da necessidade social e industrial para ferro e aço, e os elevados preços das matérias-primas e agentes redutores, também cresce a demanda para modelagem e controle deste complexo processo para aumentar a produtividade e reduzir os custos. Contudo, os fenômenos internos de fabricação de ferro-gusa desafiam extremamente a mente humana, devido às altas temperaturas e pressão, às diversas fases simultaneamente existentes e a interação entre elas, e às trocas de momento, massa e energia, o que impossibilita medidas diretas de muitas variáveis dentro do alto-forno (GAO et al., 2009).

Em termos de exigências de qualidade, busca-se obter durante o processo de fabricação, ferro-gusa homogêneo e com parâmetros dentro dos limites especificados, sendo os principais parâmetros a temperatura e os teores de silício e fósforo. Geralmente são requeridos baixos teores de silício no ferro-gusa, do ponto de vista de economia de energia e de desempenho estável do alto-forno, porém considerando os limites de valores de temperatura associados à segurança operacional do alto-forno.

Outros importantes objetivos do processo de fabricação de ferro-gusa são a redução do consumo de energia e o aumento da produtividade enquanto mantém longa vida para o alto-forno.

3.1.3. Funções da carga sólida

Para permitir a fabricação de ferro-gusa com qualidade, a carga sólida carregada no alto-forno possui determinadas funções.

O redutor, carvão vegetal e/ou coque, além da função de remover o oxigênio da carga ferrosa a partir do carbono, atua como fonte de energia (calor + reserva térmica), estrutura de sustentação da carga e é o principal responsável pela permeabilidade do processo, pois ocupa cerca de 80% do volume da carga do alto-forno. É o material de menor densidade e o único que chega à baixa cuba no estado sólido, sendo fundamental

possuir qualidade adequada e que a sua forma e tamanho sejam preservados até ser queimado na região das ventaneiras (CRUZ e BARROSO, 2007).

O carvão vegetal e o coque apresentam significativas diferenças físicas, químicas e metalúrgicas. A utilização de carvão vegetal granulado em altos-fornos de grande porte é dificultada porque a sua resistência mecânica ($10\text{-}80\text{kgf/cm}^2$) é bem inferior a do coque ($130\text{-}160\text{kgf/cm}^2$) (CASTRO, 2002). Os maiores altos-fornos a carvão vegetal produzem aproximadamente 1.200t gusa/dia, enquanto altos-fornos a coque podem produzir mais de 10.000t gusa/dia.

Como fonte do metal (Fe) a ser extraído, o alto-forno utiliza como carga ferrosa o minério de ferro em forma de granulados (6 a 32mm) e/ou aglomerados de finos de minérios, na forma de sinter ou pelotas. Esses produtos trazem consigo impurezas combinadas química ou fisicamente, como a (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3), compostos que apresentam elevados pontos de fusão (1.710°C e 2.030°C , respectivamente) e que fundidas formarão a escória, um produto composto de silicatos complexos que será separada do ferro-gusa durante a operação de vazamento do alto-forno.

Os fundentes são utilizados para controlar o teor das impurezas no ferro-gusa e para facilitar a separação do ganga do minério de ferro, conferindo às escórias uma proporção adequada de seus quatro óxidos principais ($\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) variando em quantidade e tipo, em função da composição química do restante da carga. Os principais fundentes são: quartzo (fonte de SiO_2), calcário (fonte de CaO) e dolomita (fonte de CaO e MgO). A tendência é que se exija a presença desses óxidos nos aglomerados para minimizar ou eliminar o carregamento dos fundentes diretamente no alto-forno.

Redutores, carga ferrosa e fundentes são carregados camada por camada pelo topo do alto-forno, e requerem de 6 a 8 horas para descer até a região inferior, onde chegam transformados em ferro-gusa e escória e são drenados em intervalos regulares. A descida da carga sólida procede de forma gradual devido à combustão do redutor, fusão e amolecimento dos óxidos de ferro. Tanto o carregamento quanto a descida da carga são continuamente monitorados por sonda mecânica ou radar. Os gases formados na região interior do forno, onde o ar quente é soprado, ascendem rapidamente (6 a 8 segundos) até o topo, em contracorrente com os sólidos que descem, após participar de inúmeras reações químicas.

3.1.4. Características dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil

As capacidades de produção de ferro-gusa dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil variam de 700 a 1.200t/dia para o Alto-Forno 1, e de 300 a 700t/dia para o Alto-Forno 2. A Tabela III.1 apresenta as principais características dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

Tabela III.1: Características dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

Parâmetro	Alto-Forno 1	Alto-Forno 2
Volume Total (m ³)	593	290
Volume Útil (m ³)	503	249
Altura Útil (m)	19	16
Área do Cadinho (m ²)	23,75	13,85
Diâmetro do Cadinho (m)	5,5	4,2
Diâmetro da Goela (m)	4,8	3,52
Número de Ventaneiras	12	10
Diâmetro das Ventaneiras (mm)	140	110
Número de Lanças	12 lanças duplas	10 lanças duplas
Diâmetro das Lanças (mm)	10	10
Sopradores	PGW 3100 KW / DEMAG 3100 kW	DEMAG 3100 KW / DEMAG 2580 KW
Vazão de Sopro (Nm ³ /h)	Máx 60.000	Máx 36.000
Pressão de Sopro (kgf/cm ²)	Máx 1,16	Máx 1,04
Pressão de Topo (mCA)	Máx 3,2	Máx 3,2
Enriquecimento com Oxigênio (%)	Máx 6,0	Máx 6,0
Carregamento	Skip/Tremonha giratória Duplo Cone / Placas móveis	Correia/Tremonha giratória/ Duplo Cone/Placas móveis
Revestimento Refratário	Cadinho = Bloco de carbono; Rampa, Ventre e Baixa Cuba = Staves Cobre; Média e Alta cuba = Sílico-Aluminoso (45%)	Cadinho = Bloco de Carbono; Rampa = Blocos de Grafite e Semi-grafite; Ventre = Grafite e Carbetos de Silício; Baixa e Média Cuba = Carbetos de Silício; Alta Cuba = Aluminoso
Vazamento de Gusa	Intermitente (7corridas/dia)	Intermitente (7 corridas/dia)
Pré-Aquecedores de Ar	3 Regeneradores	Glendons
Temperatura de Ar Quente (°C)	Máx 1.050	Máx 850
Sistema de Depuração de GAF	1 coletor de pó; 2 torres saturadoras e 2 venturis	1 coletor de pó; 2 torres saturadoras e 4 venturis

3.2. Controle operacional e de processo do alto-forno

Para obter condições adequadas para o controle térmico, a permeabilidade e o esgotamento do cadinho, em busca de uma operação eficiente e estável, com alta produtividade e baixo consumo de redutor, é fundamental adquirir informações de parâmetros de controle através de equipamentos de medições ou, em alguns casos, através do desenvolvimento de modelos matemáticos, estatísticos, termodinâmicos, cinéticos, dentre outros.

Mesmo em operação normal, existe a necessidade constante de atuação no controle térmico do processo, uma vez que uma série de variáveis aleatórias, ligadas principalmente às variações nas propriedades das matérias-primas, pode afetar o estado térmico do forno. Essas variações térmicas se não controladas, podem ter consequências graves, como desvios de qualidade do ferro-gusa, perdas de produção ou até mesmo o resfriamento do cadinho.

Um dos parâmetros utilizados para medição de nível térmico é a temperatura do ferro-gusa, mas outros aspectos podem ser utilizados, como as análises de ferro-gusa e de escória. Nas análises de ferro-gusa, o silício (Si) e o enxofre (S) são excelentes indicadores térmicos, e atenção deve ser dada ao efeito das matérias-primas nesses teores. A basicidade binária das análises de escória ($B_2 = \%CaO/\%SiO_2$) também é utilizada porque tem influência nos níveis de Si no ferro-gusa.

Os valores desses parâmetros são obtidos somente após a ocorrência de fenômenos que ocasionaram a redução do nível térmico do alto-forno, ou seja, servem para confirmação do estado térmico causando algum atraso na execução de contramedidas necessárias para promover as devidas correções. Outros parâmetros utilizados são:

- Análise e rendimento do gás de topo (principal);
- Pressões: base, topo, ar;
- Temperatura de gás de topo;
- Avaliação de aspectos visuais: ferro-gusa, escória e ventaneiras;
- Comportamento da sonda que acompanha a descida da carga;
- Drenagem do cadinho;
- Preparação, composição e carregamento da carga enforada.

É necessário manter o nível térmico sob controle, mas muitas vezes torna-se necessário utilizar-se de recursos para controlar e corrigir o nível térmico de um alto-forno, como por exemplo, alterar a vazão de vento e da temperatura de chama para corrigir a anormalidade.

3.2.1. Modelos de controle operacional

CASTRO (2002) desenvolveu um modelo de controle para altos-fornos a carvão vegetal baseado no modelo termoquímico (modelo termodinâmico). O objetivo principal do modelo 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 modelo foi aplicado no Alto-Forno 2 da Gerdau Barão de Cocais e as simulações realizadas mostraram que o modelo é uma ferramenta importante para uma operação estável do processo de produção de ferro-gusa num alto-forno a carvão vegetal.

THOMSEN (2005) propôs em sua dissertação a implementação em nível operacional do controle do processo de produção do alto-forno da SIDERPA utilizando técnicas de estatística multivariada, como Análise de Componentes Principais (MINGOTI, 2005), T2 de Hotelling (HOTELLING, 1947) e outros, para desenvolver gráficos de controle para médias e desvios-padrão do processo. As principais variáveis utilizadas foram: pressão de topo, vazão de ar e temperatura da coroa. Apesar de considerar a permeabilidade uma variável importante, esta não foi considerada porque poderia apresentar o mesmo valor em processos com vazão e pressão diferentes.

DRUCKENTHNER *et al.* (1997) introduziram como potencial máximo de redução de custos na operação do alto-forno, a aplicação de um sistema de automação do processo de alto-forno que compreende processos físicos, químicos e funções matemáticas, destacando um modelo de simulação de cinética on-line e o sistema de expertise. O sistema baseia-se em modelos existentes e *know-how* de operação, e os principais modelos de processos avaliados foram: gráficos bi ou tridimensionais dos parâmetros de controle, otimização de cargas (baseado em análises das matérias-primas, produção e consumo), distribuição de carga, precisão de balanças, análise de gás, previsão de parâmetros que não podem ser diretamente medidos, previsão de silício para a próxima corrida, controle dos cowpers, desgaste do cadinho e previsão da composição química do ferro-gusa e da escória.

LIAN *et al.* (2010) propuseram um diagnóstico de falha de alto-forno através de uma descrição quantitativa da probabilidade de falha baseando em um modelo de rede Bayesiana. A inferência Bayesiana (STIGLER, 1982) é um tipo de inferência estatística que descreve as incertezas sobre quantidades desconhecidas de forma probabilística. Incertezas são modificadas periodicamente após observações de novos dados ou resultados. Com um sumário de experiências de excelentes operadores, descreveram uma operação unificada e padronizada através do estabelecimento de um modelo de diagnóstico inteligente para prever on-line tão bem quanto guiar na prática as condições do alto-forno.

3.2.2. Modelos para previsão do teor de silício

A previsão de silício tem se tornado uma significativa e grande prática através de modelos analíticos, correlações entre variáveis, redes neurais, análise de séries temporais não-lineares, mínimos quadrados parciais e modelos de regressão.

Para ZENG *et al.* (2008) o controle automático da produção de ferro-gusa é um desafio, devido à complexidade de todo o processo e da temperatura extrema ser muito alta (em torno de 1.600°C) e mudar constantemente, dificultando manter-se em nível estável. Assim como a temperatura é um indicador de estado térmico do alto-forno, o mais importante índice de qualidade do ferro-gusa é o teor de silício, o qual deve ser mantido em um nível apropriado para facilitar a produção de ferro-gusa com alta qualidade e corrida estável no processo de fabricação de ferro-gusa. Com isso, para melhorar o controle do processo, é necessário um modelo para previsão consistente do silício observado no ferro-gusa.

Ainda de acordo com ZENG *et al.* (2008), muito estudo tem sido feito sobre esse assunto, entre eles estão modelos estocásticos como os modelos de regressão, modelos neurais e modelos determinísticos como modelos matemáticos. Estes modelos podem produzir bons resultados em algumas situações e não tão bons em outras. Como os processos de larga escala industrial são influenciados por vários tipos de ruído, modelos com combinações estocásticas e determinísticas podem ser mais robustos. Por essa razão, ZENG *et al.* (2008) adotaram em seu trabalho o algoritmo sub-espço para identificação determinística e estocástica para estabelecer um modelo de previsão, considerando o teor de silício como uma variável de saída, e como variáveis de entrada: quantidade,

temperatura e pressão de sopro; permeabilidade; quantidade de pulverizado; porcentagem de CO₂ no gás de topo e pressão do gás de topo.

QIU *et al.* (2009) mostraram uma aplicação de modelo de previsão em altos-fornos do teor de silício no ferro-gusa baseado em redes neurais e considerando como variáveis de entrada: diferença no teor de ferro, permeabilidade, produção, injeção de carvão, volume de ar, temperatura de sopro, sílica na escória, intensidade da redução, consumo de coque, velocidade do sopro, energia cinética e basicidade da escória. Dados normalizados de produção normal de um longo período foram utilizados para treinar e simular a rede. Os resultados mostraram uma melhoria significativa no índice de acerto de silício.

PAN *et al.* (2010) também consideram a previsão de teor de silício no ferro-gusa uma etapa importante no controle de processo dos altos-fornos na redução de custos e melhoria da eficiência. Segundo eles, como o processo é muito complexo, o desempenho dos ajustes dos modelos de previsão diminuiu quando a produção é instável, o que significa perda de muita informação valiosa contida nessas variáveis. Atualmente, os resíduos do modelo consistem de duas partes: informação não modelada e ruído. Nesse artigo, um tipo de modelo de regressão com autocorrelação e variâncias não constantes para as observações (heterocedasticidade) é utilizado para prever o teor de silício no ferro-gusa e os resíduos foram modelados pelo filtro de *Kalman* (WELCH e BISHOP, 2006), usado para separar a informação não modelada do ruído, que captura a informação e a incorpora dentro do modelo original. O método proposto foi testado nos dados coletados de um alto-forno de tamanho médio, e os resultados da simulação mostraram que o filtro de *Kalman* melhora bem a acurácia do modelo de regressão.

LIU *et al.* (2011) interpretam a complexidade do processo de fabricação de ferro-gusa em altos-fornos através dos aspectos técnico e teórico. O aspecto técnico compõe o status de diagnóstico do alto-forno, o controle de previsão de teor de silício do ferro-gusa e uma combinação deles. O aspecto de controle teórico baseia-se na inferência e na otimização computacional. A estrutura do modelo matemático discutido inclui dinâmica, inferência, otimização, equação de controle de previsão do silício e uma integração hierárquica inteligente das quatro classes dos modelos.

3.2.3. Modelos para controle do nível térmico

TSHUMURA (1999) propõe a utilização de simuladores numéricos de modelos físicos para modelar o nível térmico do alto-forno, considerado ser um sistema complexo e de larga escala. Isso porque é necessário muito conhecimento e tempo para introduzir equações de reações químicas ou fenômeno de transporte no processo e a dificuldade com equações que, quando podem ser derivadas, são sempre compostas por muitas equações diferenciais parciais não lineares.

SHUR (2008) considera a modelagem matemática como uma ferramenta para estudar o processo de fabricação de ferro-gusa em altos-fornos, considerando as leis que governam as dinâmicas do estado térmico do alto-forno e baseado na frase do físico *I. Pomeranchuk*: “Para construir uma teoria, é necessário executar um experimento. Porém, para saber que experimento executar, é necessário construir uma teoria”. Para ele, o uso efetivo da modelagem matemática na área requer interagir modelos diferentes de complexidade diferenciada e considera dois modelos, um para pesquisadores (modelo teórico) e outro para operadores (modelo baseado em experimentos), levando em conta os três fenômenos que considera serem os mais importantes: redução do ferro, gaseificação do carbono e troca de calor.

Para prever e controlar o estado térmico de um alto-forno através do teor de silício no ferro-gusa, GAO *et al.* (2009) utilizaram um preditor multi-passo repetido baseado em uma série temporal não aleatória, denominada caos. A concordância razoável entre os valores previstos e os valores observados indicou que o modelo tem uma boa previsão e forte existência de um mecanismo determinístico que rege as dinâmicas do complexo processo de fabricação de ferro-gusa em alto-forno, isto é, um sistema caótico de alta dimensão é satisfatório para representar o sistema do alto-forno. Utilizando conhecimentos metalúrgicos e estatísticos, foram selecionadas as seguintes variáveis independentes para serem utilizadas no modelo: volume do alto-forno, pressão, temperatura, permeabilidade do gás, enriquecimento de oxigênio, taxa de injeção de carvão pulverizado, razão minério/coque, temperatura de chama, energia das ventaneiras, reação de *Boudouard*, perda de calor nas ventaneiras, utilização de gás CO, soma de CO e CO₂, temperatura do gás de topo e tempo decorrido desde a última corrida.

3.2.4. Modelos CFD

Outra técnica que tem sido muito utilizada para modelagem matemática e física é a denominada CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*. Basicamente, a tecnologia CFD consiste na solução computacional por métodos numéricos das equações diferenciais de *Navier-Stokes* que regem a mecânica de fluidos. O equacionamento e modelagem dos fenômenos de transferência de calor e combustão são incorporados nas soluções tornando o CFD aplicável aos equipamentos industriais e capaz de simular diversos processos.

SOUZA *et al.* (2009) descreveram em seu trabalho exemplos de aplicações de CFD na indústria siderúrgica. A região de combustão de um alto-forno foi modelada para análise de parâmetros operacionais conduzindo a maximização de PCI (*Pulverized Coal Injection*) nas ventaneiras.

FRANÇA *et al.* (2009) utilizaram modelos CFD e redes neurais artificiais com o propósito de antever, prever e quantificar parâmetros importantes para previsão do comportamento e o conhecimento dos fenômenos que ocorrem no processo do alto-forno. Um modelo CFD foi utilizado para analisar a sensibilidade da produção diária e a razão CO/CO₂ aos parâmetros: temperatura de sopro, enriquecimento de O₂ no sopro e porcentagem de sinter na carga. Os dados obtidos com a simulação em CFD foram utilizados para treinar duas redes neurais para previsão de resultados do alto-forno.

3.2.5. Modelos para controlar ou prever o consumo de redutor

SOARES *et al.* (2009) utilizaram uma abordagem baseada em técnicas de inteligência artificial, mais especificamente, redes neurais, para auxiliar a operação e melhorar o controle de alto-forno, com objetivo de otimizar e reduzir o consumo de redutor. A sinergia entre o conhecimento fenomenológico do processo e as informações contidas nos dados históricos possibilitou o desenvolvimento de um modelo matemático condizente com a realidade do processo, podendo servir como base para o projeto de um controlador multivariável. Os resultados esperados envolveram principalmente a otimização do uso de carvão, após encontrar associações entre as variáveis de processo e direcionar a maneira mais eficiente da operação, que reduz a variabilidade do produto final e garante uma matéria-prima mais adequada para a etapa seguinte do processo.

Uma das etapas mais importantes de SOARES *et al.* (2009) foi determinar as variáveis mais relevantes para o controle do nível térmico. Com base em revisão bibliográfica, entrevistas com os profissionais responsáveis pela gestão e operação do alto-forno, utilização de funções de autocorrelação e correlação cruzada, foi possível determinar que as variáveis mais importantes são: carregamento de carvão, minério e quartzo; características do gás de topo (rendimento do gás e concentração de H₂); variáveis de sopro (temperatura de chama, vazão e umidade do ar e injeção de carvão) e algumas características das matérias-primas, como umidade e teor de carbono fixo do carvão vegetal.

Um modelo estatístico importante é conhecido como “Fórmula de Flint”, uma expressão algébrica que permite correlacionar o consumo específico de carbono (*coke-rate*) com um grande número de variáveis do processo de fabricação de ferro-gusa no alto-forno a coque (FLINT, 1952):

$$CR = K + \sum_{i=1}^n C_i V_i \quad (3.7)$$

Onde:

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

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

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

C_i = coeficiente de regressão que quantifica o efeito da variável i, adimensional.

Essa expressão teve origem na correlação estatística e na análise de dados operacionais de altos-fornos a coque, cujos resultados foram suplementados por cálculos teóricos e, quando possível, por informações experimentais, e envolve 28 variáveis conforme Tabela III.2.

Os coeficientes das variáveis possuem sinal positivo ou negativo, conforme o sentido de sua contribuição para com o consumo de carbono. Todos os coeficientes são constantes, o que indica correlação linear entre as variáveis, exceto o coeficiente do teor de enxofre no ferro-gusa (variável 16), cuja correlação não é linear, e depende do próprio teor de enxofre e do teor de silício. Dessa forma, o coeficiente do teor de enxofre do modelo precisa ser calculado utilizando a equação 3.8 ou a equação 3.9:

$$C_{16} = \left[\frac{0,013}{\left(\frac{\%S}{100} \right) + 0,232 \left(\frac{\%Si}{100} \right)^2 - 0,00009} - 57 \right] \times 0,5 \quad (3.8)$$

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

$$C_{16} = \left[\frac{0,002}{\left(\frac{\%S}{100} \right) + 0,232 \left(\frac{\%Si}{100} \right)^2 - 0,00022} - 20 \right] \times 0,5 \quad (3.9)$$

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

C_{16} = coeficiente de regressão do teor de enxofre no ferro-gusa;

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

$\%Si$ = teor de silício no ferro-gusa.

Tabela III.2: Variáveis da “Fórmula de Flint”, suas unidades e seus coeficientes de regressão (FLINT, 1952).

Categoria	Nº (i)	Variável (V_i)	Unidade	Coefficiente (C_i)
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	+ 50,00
	18	Temperatura do ar soprado	forno	- 1,80
	19	Umidade do ar soprado	° C 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

Para aplicar a “Fórmula de Flint” a um dado alto-forno a coque, o primeiro passo é determinar a constante K 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, e excluir os dados referentes aos períodos de marcha anormal ou fora de controle.

De acordo com CASTRO (2002), devido às grandes variações no processo e nas qualidades das matérias-primas de um alto-forno a carvão vegetal, um modelo puramente estatístico para alto-forno a carvão vegetal ainda não foi aplicado. MAPA *et al.* em 1990 fizeram uma tentativa similar à “Fórmula de Flint” para altos-fornos a carvão vegetal de usinas não integradas. Como o processo tem uma baixa estabilidade e uma pequena confiabilidade nos dados operacionais medidos, e, na época, os conhecimentos sobre métodos estatísticos eram precários, não foi possível estabelecer uma correlação das variáveis do processo com o consumo específico de carbono para os altos-fornos a carvão vegetal dessas usinas. Outros modelos estatísticos foram implementados em altos-fornos a coque, como por exemplo, a correlação desenvolvida por BHAGAT *et al.* em 1991, que correlaciona um número menor de variáveis que a “Fórmula de Flint”. Provavelmente, o alto-forno referência do estudo tinha uma operação muito estável, com poucas variações no processo, o que justifica a eficiência da expressão (3.10) no cálculo do consumo específico de carbono:

—

(3.10)

Sendo:

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

X11 = peso da carga por tonelada de ferro-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 12 mm, %;

X3 = redutibilidade do sinter, %;

R² = coeficiente de determinação simples

3.3. Qualidade das matérias-primas

Um grande problema enfrentado na operação dos altos-fornos é a baixa estabilidade (bom funcionamento) que se deve principalmente às variações nos parâmetros de qualidade das matérias-primas. Para que as matérias-primas possam cumprir as suas determinadas funções e produzir ferro-gusa com qualidade, é muito importante conhecer bem as suas características (físicas, químicas, granulométricas e metalúrgicas) e suas consequências para a operação.

Para atender ao objetivo de produzir cada vez mais a um custo cada vez menor, cresce a demanda dos altos-fornos por matérias-primas elaboradas. Mineradoras e usinas siderúrgicas passaram a implantar processos de beneficiamento de matérias-primas buscando melhor preparação das cargas através da formação de blends, secagem e melhor classificação granulométrica.

Carvão vegetal, minérios de ferro e pelota que abastecem os altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil são avaliados na rotina em termos de umidade, composições química e granulométrica. Além disso, são feitas melhorias na qualidade dos mesmos para torná-los mais homogêneos e estáveis, a fim de se ter uma menor variabilidade dos parâmetros de qualidade do ferro-gusa e da escória. Para os minérios de ferro, a planta de beneficiamento na usina permite a formação homogênea de pilhas, a secagem e o peneiramento para retirada dos finos. Para o carvão vegetal, tem-se o peneiramento para retirada de finos e a classificação do material em faixas granulométricas (CRUZ e BARROSO, 2007).

A elevada incerteza física e química do carvão vegetal, o uso de minério de ferro com significativa heterogeneidade física e química, a grande influência do clima na qualidade do redutor e as incertezas amostrais e analíticas das matérias-primas, fazem com que o atendimento aos parâmetros de qualidade seja complexo, e, para obter uma análise precisa dos resultados, a amostra a ser coletada precisa ser muito grande, o que passa a ser uma dificuldade prática. Tudo isso dificulta o uso de modelos termoquímicos. Até que essa variabilidade seja minimizada com melhores tecnologias de carbonização e recursos para beneficiamento das matérias-primas, faz-se necessário a utilização de ferramentas estatísticas (SAMPAIO et. al., 2006).

Projetos do programa Seis Sigma foram desenvolvidos na Vallourec Tubos do Brasil para quantificar e reduzir a variabilidade inerente ao processo de amostragem de carvão

vegetal e minério de ferro a fim de se obter resultados mais confiáveis. Através desses trabalhos, estimou-se que cerca de 20% da variabilidade total desses materiais se deve aos procedimentos de amostragem (coleta, preparação e análise).

3.3.1. Origem da heterogeneidade atual do carvão vegetal

Segundo SAMPAIO et. al. (2006), a heterogeneidade do carvão vegetal teve origem com a demanda da logística para o atendimento da produção de grandes toneladas de carvão vegetal, o que implicou na mecanização das unidades de reflorestamento, colheita e carbonização e no desenvolvimento de grandes unidades produtoras de carvão vegetal como mostra a Figura 3.4. A enorme heterogeneidade granular e geométrica do carvão vegetal é a principal dificuldade na realização de testes, principalmente os metalúrgicos. A obtenção de uma amostra de carvão vegetal representativa do lote de interesse é uma tarefa árdua e não dominada, pois o tamanho dessas amostras precisa ser muito grande.

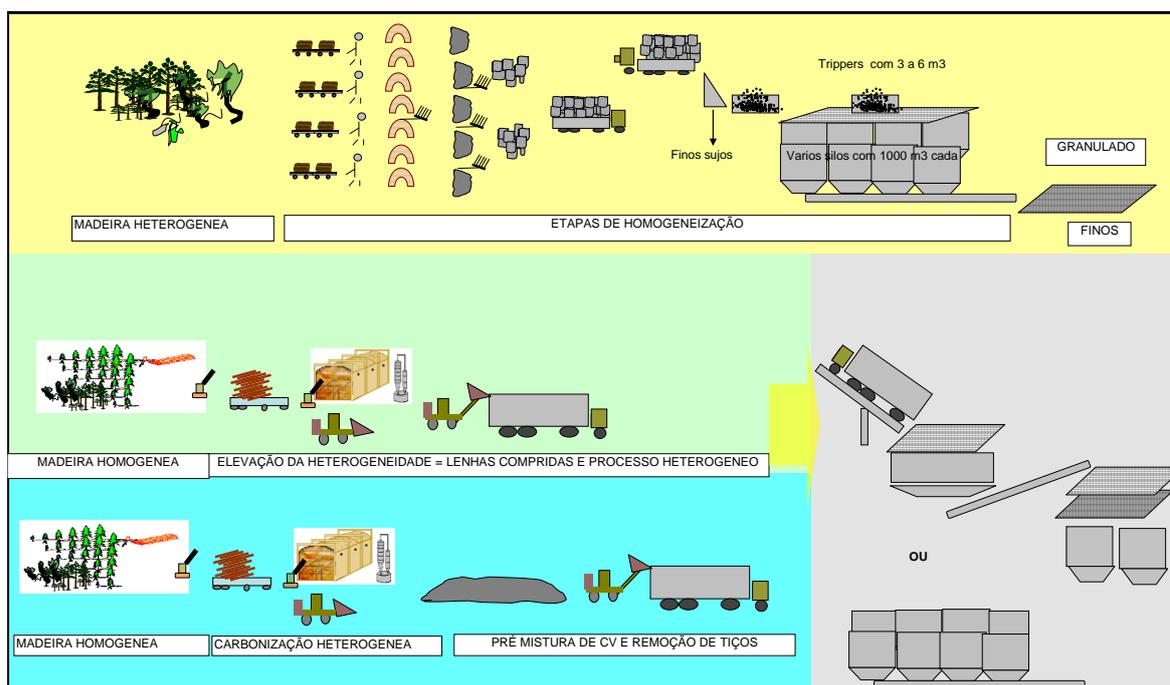


Figura 3.4: Comparação entre os processos antigo e atual de produção de carvão vegetal (SAMPAIO et. al., 2006).

De acordo com o trabalho de WINTER e MORAIS (2008), o início da colheita da Florestal, empresa do grupo Vallourec Tubos do Brasil, se deu em 1977; o início da mecanização em 1998 e a adequação da tecnologia foi feita em 2008.

Antes da mecanização da colheita, SAMPAIO et. al. (2006) define a fonte de madeira heterogênea, com densidade mais alta, em formato de pequenos troncos de madeiras não cilíndricos. Com colheita manual, o transporte era feito em caminhões pequenos e as unidades de carbonização também eram pequenas: fornos, lotes e produções menores. O carvão vegetal era vendido por volume e os finos não eram carregados. Era conferido e com alto padrão de qualidade, principalmente para os itens densidade a granel, umidade, finos e carbono fixo. As etapas realizadas na colheita, no transporte e na descarga permitiam a homogeneização do material. O carvão vegetal era transportado em pequenos caminhões dentro de pequenos sacos. Para encher os sacos, eram utilizados garfos e o carvão vegetal era quebrado em pedaços para permitir melhor enchimento, com cuidado para não gerar finos, uma vez que o interesse era o volume e não o peso. Durante o processo de recebimento dos caminhões, era possível avaliar visualmente a qualidade do carvão vegetal e coletar diversos incrementos para formar a amostra que representava bem o carvão vegetal daquele caminhão. Também era possível retirar os finos ricos em contaminação através de uma classificação granulométrica do carvão vegetal nos silos, utilizando grades, e depois no peneiramento.

Ainda de acordo com SAMPAIO et. al. (2006), com a necessidade de atender à produção de grandes tonelagens, foi necessário desenvolver grandes unidades produtoras de carvão vegetal. Com isso, passou-se a ter uma madeira homogênea com as plantações de clones idênticos, e a utilização de grandes pedaços de madeira em formato mais cilíndrico e menos granular. No entanto, o processo de carbonização tornou-se muito heterogêneo, com fornos grandes, mecânicos e a utilização de lenhas compridas gerando boa parte de tiço. A assimetria dos fornos retangulares utilizados no processo de carbonização provoca a heterogeneidade da temperatura dentro dos mesmos. A falta de rigor no manuseio e na estocagem permite elevar a umidade, a geração de finos e a variabilidade geométrica e química do carvão vegetal.

Não existe ainda uma definição precisa e contundente para a qualidade siderúrgica do carvão vegetal devido principalmente à natureza de seu processo de produção e à elevada heterogeneidade resultante dos processos atuais de carbonização. Testes para esse tipo de avaliação da qualidade ainda estão em desenvolvimento com o uso de testes similares aos utilizados para o coque. Ainda será necessário muito experimento e

estudos fundamentais para melhor compreender e estabelecer uma definição do carvão vegetal ótimo.

3.3.2. Avaliação da qualidade

A caracterização do carvão vegetal é dada por suas propriedades físico-químicas (análise química, granulométrica e densidade) e depende em linhas gerais da madeira utilizada como matéria-prima, do método e da temperatura final de carbonização.

Em termos da composição química, a análise mais praticada para o carvão vegetal é a análise imediata onde são analisados os teores de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis, além da umidade.

A densidade, relação massa/volume (kg/m^3), é um parâmetro fácil de ser medido e é influenciado pela temperatura de carbonização e a densidade da madeira. De um modo geral, existem três métodos para se expressar a densidade do carvão vegetal: 1) relação entre a massa obtida e o volume, denominada por densidade a granel; 2) subtração do volume dos vazios entre os vários pedaços de carvão da medida realizada para densidade a granel, denominada por densidade aparente; 3) subtração do volume da porosidade interna que é considerada na densidade aparente, denominada por densidade verdadeira. Geralmente utiliza-se a densidade a granel, que é calculada pela própria massa e volume da carreta, não necessitando de realizar ensaio em laboratório.

A espécie e a qualidade da madeira oriunda de florestas nativas ou de eucalipto respondem, dentre outras coisas, pela densidade do carvão vegetal. Segundo Oliveira e Almeida (1980), a densidade da madeira tem relação direta e linear com a densidade do carvão vegetal. Espécies de maior densidade aparente produzem carvões com densidades mais elevadas para o mesmo teor de carbono fixo.

A distribuição granulométrica do carvão vegetal depende diretamente da sua resistência mecânica, principalmente abrasão e queda, e pode variar de acordo com a espécie e a metodologia de carbonização adotada. A curva de distribuição granulométrica, o tamanho médio, em mm, e o percentual de finos, definido como a fração menor que 10mm na Vallourec Tubos do Brasil, são os principais parâmetros de interesse.

A carga ferrosa tem a qualidade avaliada em termos de características físicas, químicas e metalúrgicas. Em termos de composição química, os principais elementos analisados são

Fe, SiO₂, Al₂O₃, Mn e P, os quais são utilizados para cálculo do balanço de massa e avaliação da escória.

Para análise granulométrica da carga ferrosa, também são importantes o tamanho médio, em mm, e o percentual de finos (para os altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil, a fração inferior a 6,35mm). A distribuição granulométrica está relacionada com os índices de permeabilidade da coluna de carga e fluxo gasoso.

Os principais testes metalúrgicos realizados para a carga ferrosa são: i) Tamboramento, para avaliar a resistência mecânica (abrasão e impacto) durante o transporte e manuseio; ii) Crepitação, para avaliar os finos gerados por choque térmico; iii) Redutibilidade, para avaliar a velocidade de remoção de oxigênio do óxido de ferro e iv) Índice de Degradação sob Redução (*Reduction Degradation Indices - RDI*), para avaliar a degradação durante a redução.

Carvão vegetal, minérios de ferro e pelota que abastecem os altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil são avaliados na rotina em termos de umidade, composições química e granulométrica e são feitas melhorias da qualidade dos mesmos. Para os minérios, a planta de beneficiamento na usina permite a formação homogênea de pilhas, a secagem e o peneiramento para retirada dos finos. Para o carvão vegetal, tem-se o peneiramento para retirada de finos e classificação do material em faixas granulométricas.

3.4. Metodologias Estatísticas

3.4.1. Superfície de Resposta e Regressão

A metodologia de superfície de resposta, ou MSR, é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são úteis para modelagem e análise nas aplicações em que a variável resposta (dependente) de interesse é influenciada por muitas variáveis explicativas (independentes) e o objetivo é determinar o valor ótimo da variável resposta (MONTGOMERY, 2001).

Segundo Montgomery (2001), as equações definidas de superfície de resposta podem ser representadas graficamente e utilizadas de três formas: i) para descrever como as variáveis afetam as respostas; ii) para determinar as inter-relações entre as variáveis; e iii) para descrever efeitos combinados de todas as variáveis sobre a resposta.

Com o objetivo de visualizar a forma de uma superfície de resposta, utilizam-se gráficos tridimensionais, nos quais a superfície de resposta é representada em um espaço tridimensional em função de duas variáveis, x_1 e x_2 . Utilizam-se também gráficos de contornos (*contour plot*), também conhecidos como curvas de nível, úteis no estudo dos níveis das variáveis x_1 e x_2 que resultam nas mudanças na forma ou na altura da superfície de resposta.

Na maioria dos problemas de MSR, é desconhecida a forma da relação entre a variável resposta e as variáveis independentes, sendo então, o primeiro passo, identificar uma aproximação adequada para esta relação. Em geral, utiliza-se um polinômio de baixo grau em alguma região dos fatores. Se a resposta for bem modelada por uma função linear dos fatores, então a função de aproximação será o modelo de primeira ordem:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3.11)$$

onde y = variável resposta, x_1, x_2, \dots, x_k são as variáveis explicativas (ou independentes), $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são os parâmetros do modelo de regressão e ε são os erros aleatórios com distribuição normal com média 0 e desvio padrão σ .

Se houver interação entre os efeitos principais, denominado curvatura, então um polinômio de maior grau tem de ser usado, como o modelo de segunda ordem:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon \quad (3.12)$$

Para estimar os parâmetros do modelo utiliza-se o método dos Mínimos Quadrados (MONTGOMERY et al., 2004), que é o método utilizado para estimar os coeficientes de regressão no modelo de Regressão Múltipla (MONTGOMERY et al., 2004). As equações 3.11 e 3.12 podem ser expressas na notação matricial como:

$$Y = XB + E \quad (3.13)$$

sendo:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad E = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Em que Y é um vetor de dimensão $(n \times 1)$ com os valores das observações, X é uma matriz de dimensão $(n \times p)$ com os níveis das variáveis explicativas, B é um vetor de dimensão $(p \times 1)$ dos coeficientes de regressão e E é um vetor $(n \times 1)$ dos erros aleatórios, sendo $p = k + 1$ o número de parâmetros do modelo.

A estimativa de mínimos quadrados de B é:

$$\hat{B} = (X'X)^{-1}X'Y \quad (3.14)$$

Observe que há $p = k + 1$ equações normais para $p = k + 1$ incógnitas (os valores de $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k$).

A estimativa de cada parâmetro β_k representa a variação esperada na resposta y por unidade de variação unitária em x_k , quando todas as outras variáveis são mantidas constantes.

Após estimar os parâmetros dos modelos de regressão múltipla, testes de hipóteses relativos a estes parâmetros são realizados para medir a adequação do modelo.

Para determinar se existe uma relação linear entre a variável resposta e um subconjunto de variáveis (ou fatores), realiza-se o teste para a significância da regressão. As hipóteses nula (H_0) e alternativa (H_1) são:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ para no mínimo um } j.$$

Rejeitar a hipótese nula significa que no mínimo uma das variáveis explicativas contribui significativamente para o modelo.

Para testar a significância da regressão utiliza-se a análise de variância (ANOVA). O procedimento divide a variabilidade total da variável resposta em dois componentes: a variação devido ao modelo ajustado e a variação residual (dos erros de ajuste):

$$(3.15)$$

sendo:

é a média de todas as observações ;

é a estimativa de produzida pela modelo ajustado.

Geralmente, esses termos respectivamente são chamados de: soma quadrática total, soma quadrática da regressão e soma quadrática do erro ou residual. Sendo assim, a equação 3.15 pode ser escrita como:

$$SQ_T = SQ_R + SQ_E \quad (3.16)$$

A SQ_T corrigida tem $n-1$ graus de liberdade. Se a hipótese nula for verdadeira, então SQ_R / σ^2 é uma variável aleatória com distribuição qui-quadrado com k (número de variáveis ou fatores) graus de liberdade, SQ_E / σ^2 é uma variável aleatória com distribuição qui-quadrado com $n-p$ graus de liberdade e SQ_E e SQ_R são independentes.

A estatística de teste utilizada para testar a hipótese nula é:

$$F_0 = \frac{MQ_R}{MQ_E}, \text{ onde } MQ_R = \frac{SQ_R}{k} \text{ e } MQ_E = \frac{SQ_E}{n-p} \text{ (estimativa de mínimos quadrados da variância dos resíduos)} \quad (3.17)$$

A hipótese nula é rejeitada se o valor da estatística de teste (F_0) for maior do que o valor $f_{\alpha, k, n-p}$ determinado usando a distribuição F de Fisher e Snedecor e cuja área acima de $f_{\alpha, k, n-p}$ é igual ao nível de significância do teste ,

Também temos interesse em testar hipóteses para os coeficientes individuais de regressão para determinar o valor potencial de cada uma das variáveis (ou fatores) no modelo. Isso auxilia na melhoria da efetividade do modelo, através da inclusão de

variáveis adicionais ou retirada de uma ou mais variáveis atualmente no modelo. As hipóteses são:

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

A estatística de teste é:

$$T_0 = \frac{\hat{\beta}}{\sqrt{\sigma^2 C_{jj}}} \quad (3.18)$$

sendo C_{jj} o j -ésimo elemento da diagonal da matriz $(X'X)^{-1}$, correspondente a $\hat{\beta}_j$.

A hipótese nula é rejeitada se $|T_0| > t_{\alpha/2, n-k}$, que é o valor da distribuição t-Student com $n-k$ graus de liberdade e tal que a área acima de $t_{\alpha/2, n-k}$ é igual ao nível de significância do teste α .

A medida de adequação mais comumente usada é o coeficiente de determinação R^2 , que representa a proporção da variabilidade da variável resposta que é explicada pelo modelo ajustado.

$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T} = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T}, \quad 0 \leq R^2 \leq 1. \quad (3.19)$$

Associado ao R^2 está o coeficiente de determinação ajustado pelo número de parâmetros inseridos no modelo (R^2_{aj}). Considera o fato de que R^2 tende a superestimar a quantidade atual de variação contabilizada para a população. Também é fato que a inclusão de muitos parâmetros no modelo de regressão aumenta substancialmente o valor de R^2 . Se o modelo recebeu parâmetros desnecessários haverá um incremento em R^2 sem haver, necessariamente, melhoria de precisão da resposta. Por isso o R^2_{aj} é mais indicado para comparar modelos com números diferentes de parâmetros e, ainda, ajustados com número de observações diferentes. O coeficiente de determinação ajustado para graus de liberdade e número de parâmetros (p) é definido por:

(3.20)

Nota: O R^2 é sempre menor que o R^2 e só será igual quando $p=1$.

3.4.2. ANOVA Hierárquica

Em certos experimentos multifatoriais, nos quais os níveis de um fator são semelhantes mas não idênticos para os diferentes níveis de outro fator, utiliza-se a disposição chamada de planejamento aninhado ou hierárquico, com os níveis de um fator aninhados abaixo dos níveis de outro fator (NETER, 2008). A Figura 3.5 é um exemplo de planejamento hierárquico em dois estágios (fatores A e B).

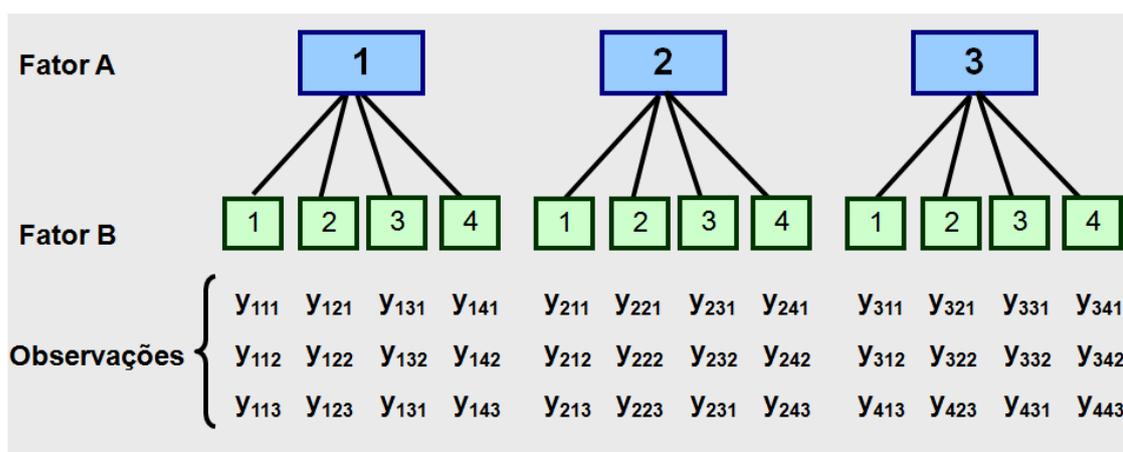


Figura 3.5: Planejamento hierárquico em dois estágios (fatores A e B).

O modelo ANOVA hierárquico para um planejamento balanceado (mesmo número de níveis) com dois fatores aleatórios, A e B é:

(3.21)

Onde μ , α_i e β_j são variáveis aleatórias, independentes, com distribuição normal, médias zero e variâncias σ^2 , σ^2 e σ^2 , respectivamente.

A soma de quadrados total (SQT) é decomposta em soma de quadrados do fator A (SQF_A), soma de quadrados do fator B (SQF_B) e soma de quadrados dos resíduos (SQR):

$$SQT = SQF_A + SQF_B + SQR \quad (3.22)$$

As estimativas das somas de quadrados são:

$$, \quad e \quad (3.23)$$

E a tabela de análise de variância:

Tabela III.3: Análise de variância de uma ANOVA Hierárquica.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F
Fator A	SQF_A	$a - 1$	_____	_____
B dentro de A	$SQF_{B(A)}$	$a(b - 1)$	_____	_____
Resíduo	SQR	$ab(n - 1)$	_____	
Total	SQT	$abn - 1$		

4. METODOLOGIA DE TRABALHO

4.1. DMAIC (Define, Measure, Analyse, Improve, Control)

DMAIC é uma versão atualizada da metodologia PDCA utilizada na condução de programas de melhoria, como por exemplo, o programa Seis Sigma, que tem foco na redução da variabilidade. A Tabela IV.1 resume as fases e objetivos dessa metodologia.

Tabela IV.1: Resumo da metodologia DMAIC.

	FASES:	OBJETIVOS:
D	DEFINE (DEFINIR)	Definir o problema, a meta, a equipe e o cronograma.
M	MEASURE (MEDIR)	Avaliar a situação atual, mapear os processos críticos e refinar o escopo do projeto.
A	ANALYSE (ANALISAR)	Identificar as causas do problema.
I	IMPROVE (MELHORAR)	Desenvolver e implementar soluções para eliminar as causas vitais do problema.
C	CONTROL (CONTROLAR)	Garantir e monitorar os resultados.

4.2. Redução da variabilidade inerente à amostragem

4.2.1. Carvão vegetal

No ano de 2006 foi desenvolvido um projeto do programa Seis Sigma na Vallourec Tubos do Brasil intitulado como “Desenvolvimento de uma técnica de amostragem de carvão vegetal mais representativa”. Os objetivos desse projeto eram determinar a variabilidade inerente ao material (qualidade e heterogeneidade) e ao método utilizado na amostragem do carvão vegetal e reduzir em 30% a variabilidade devido ao processo de coleta, preparação e análise do carvão vegetal (método), conforme ilustrado na Figura 4.1. A alta

variabilidade dos resultados leva à falta de confiabilidade dos mesmos e a impactos negativos na operação dos altos-fornos.

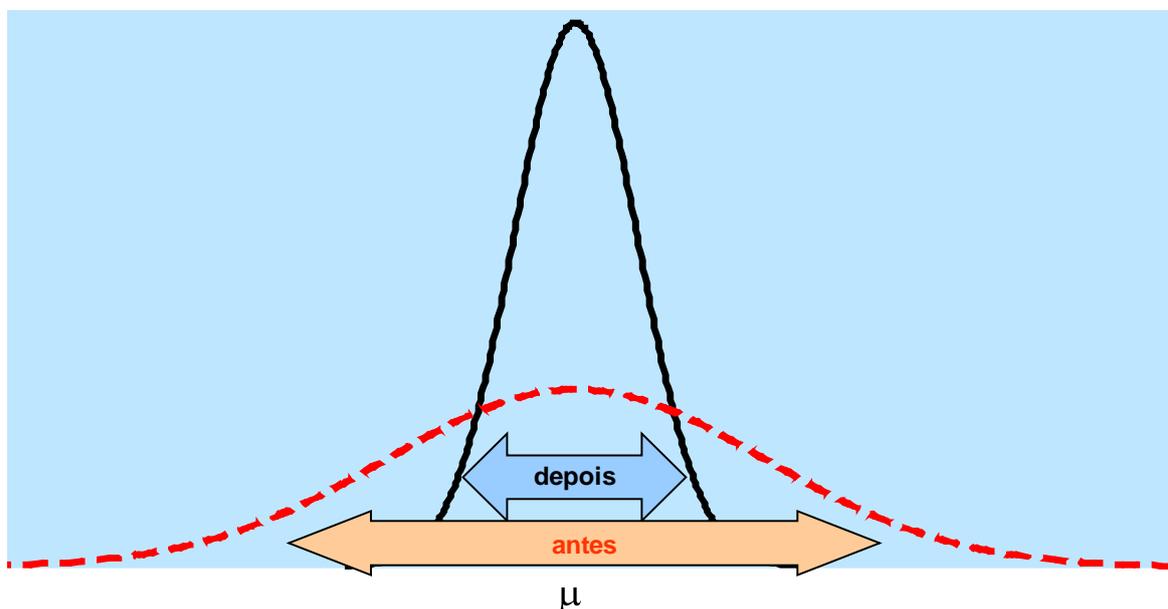


Figura 4.1: Ilustração da proposta de redução da variabilidade do método de amostragem antes e depois do projeto do programa Seis Sigma.

O escopo do projeto consistia em avaliar o processo de amostragem de carvão vegetal no pátio de recebimento de matérias primas da Vallourec Tubos do Brasil, observando os seguintes aspectos: i) coleta da amostra de carvão vegetal no amostrador automático *cross-belt*; ii) avaliação do processo de preparação da amostra no laboratório físico (equipamentos e procedimentos); e iii) avaliação das análises granulométrica, imediata e de umidade das amostras.

Para avaliar a situação atual da amostragem do carvão vegetal na Vallourec Tubos do Brasil, dados históricos foram analisados, foram realizadas visitas à área, reuniões com os operadores responsáveis pelas atividades de amostragem, comparações dos procedimentos operacionais com normas técnicas, bibliografias e procedimentos de empresas consideradas *benchmark*, e um primeiro experimento de balança de massa, conforme mostra a Figura 4.2, foi realizado para confrontar com resultados de amostragem.

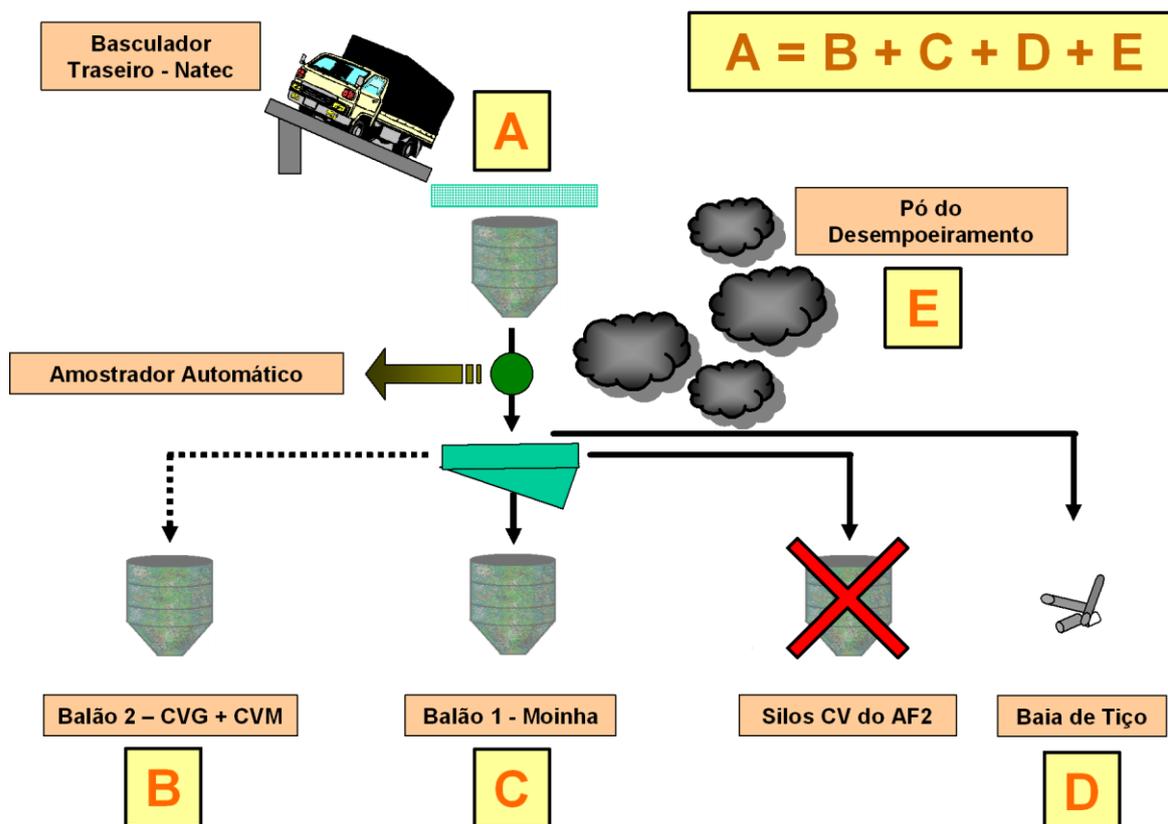


Figura 4.2: Esquema do experimento de balanço de massas do carvão vegetal.

Um segundo experimento foi realizado para quantificar as variabilidades inerentes ao material e a cada etapa da amostragem (coleta, preparação e análise) separadamente. Para isso, amostras foram coletadas de cinco carretas, em duplicata, preparadas em duplicata e analisadas também em duplicata, conforme planejamento hierárquico em três estágios mostrado na Figura 4.3. Durante o experimento, além das análises já realizadas na rotina de trabalho da empresa (em verde), foram obtidas análises consideradas fora da rotina já que não são feitas usualmente (em laranja).

Planejamento hierárquico em 3 estágios para estimativa dos componentes de variação com o procedimento atual de amostragem, preparação e análise:

Varição total= variação entre carretas +
 variação entre amostras dentro da carreta
 variação entre análises (preparação da amostra e análise)

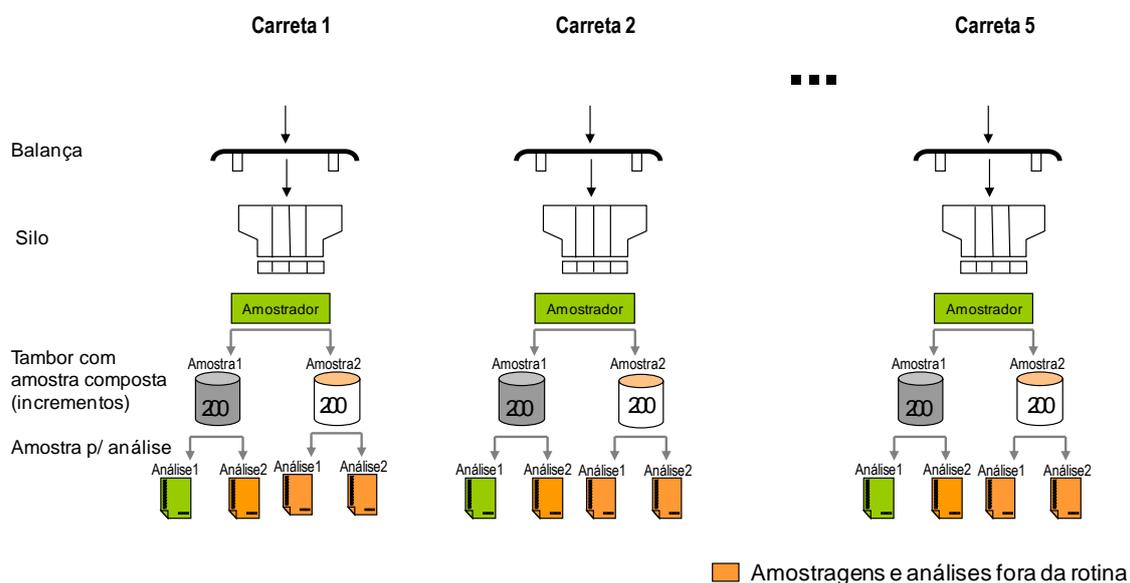


Figura 4.3: Fluxograma do experimento hierárquico para quantificar separadamente as variabilidades do material e do método de amostragem.

Por exemplo: para a carreta 1 coleta-se na rotina uma amostra (Amostra 1). Durante o experimento, para quantificar o erro de coleta da amostragem, foram coletadas duas amostras semelhantes (Amostras 1 e 2). Na rotina, a Amostra 1 é quarteada e preparada e obtém-se os resultados da Amostra 1 com a Análise 1. Durante o experimento, a Amostra 1 foi quarteada e preparada gerando duas amostras semelhantes para análise: Análise 1 (rotina, em verde) e Análise 2 (fora da rotina, em laranja). Para a Amostra 2, foram feitos os mesmos procedimentos, gerando também duas amostras semelhantes para análise: Análise 1 e Análise 2 (ambas fora da rotina, em laranja). Essas divisões permitem quantificar os erros inerentes à preparação e à análise da amostragem separadamente. A variabilidade entre as carretas é a variabilidade própria do carvão vegetal, sem o efeito da amostragem.

Com os resultados obtidos com a realização do segundo experimento, o próximo passo foi estudar os fatores que estariam contribuindo para a variabilidade do método de amostragem (coleta, preparação e análise): i) momento de coleta da amostra; ii) intervalo de coleta dos incrementos da amostra; iii) etapa de preparação das amostras.

4.2.2. Minério de ferro

Em 2008 foi desenvolvido um novo projeto do programa Seis Sigma na Vallourec Tubos do Brasil com objetivo de revisar a metodologia de amostragem de minério de ferro. Isso porque havia divergência entre os resultados de análise química e granulométrica enviados pelo fornecedor e os resultados obtidos na Vallourec Tubos do Brasil, os quais são utilizados para o cálculo do leito do alto-forno que determina a composição química do ferro-gusa produzido.

Os resultados de composição química de amostras de ferro-gusa coletadas no canal de corrida, quando comparado com os resultados simulados pelo leito de fusão, também apresentavam divergências, independente da origem dos resultados de entrada (fornecedor ou Vallourec Tubos do Brasil). A falta de confiabilidade desses resultados pode ocasionar descontrole do processo, consumo inadequado de matéria-prima (maior desperdício) e perda de rendimento.

Além de revisar e melhorar a metodologia da amostragem de minério de ferro, o projeto permitiu fazer ruma avaliação macro do desempenho dos sistemas de beneficiamento do minério de ferro (homogeneização, secagem e peneiramento) mostrados na Figura 4.4, levantar pontos críticos e definir melhores condições operacionais em função das características do minério de ferro de entrada.

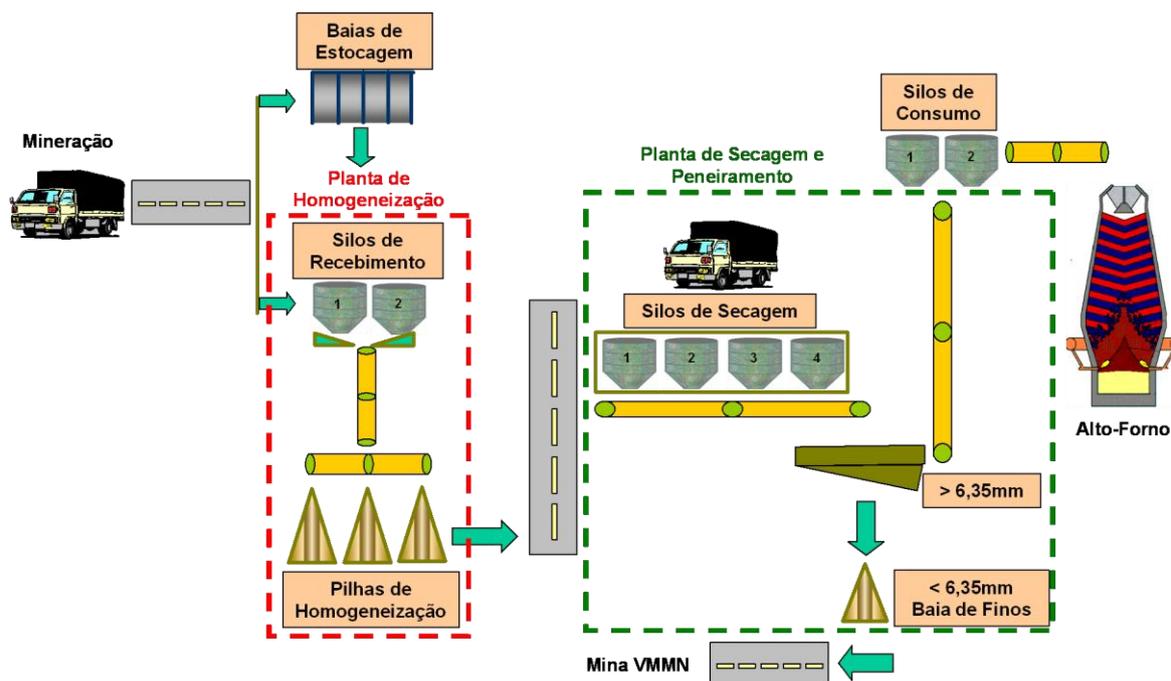


Figura 4.4: Fluxo de recebimento e beneficiamento de minério de ferro da Vallourec Tubos do Brasil.

Para avaliar a situação atual da amostragem dos minérios de ferro na Vallourec Tubos do Brasil, foram realizadas visitas à área, *brainstorming* com os operadores responsáveis pelas atividades de coleta, preparação e análise (física e química), comparação dos padrões operacionais existentes com normas técnicas (BS 5660, NBR 5734, NBR 8856, NBR 8956, ISO 3082, ISO 3084, ISO 3085 e ISO 3086) e bibliografias relacionadas ao assunto, além de visitas técnicas a outras empresas para conhecer melhores práticas de amostragem.

Um primeiro experimento foi realizado para avaliar a metodologia de amostragem atual, estimar os componentes de variabilidade devido à coleta, preparação e análise e avaliar as alterações sofridas pelo material ao longo do processo de beneficiamento. Amostras foram coletadas de dez caminhões, em duplicata, preparadas em duplicata e analisadas também em duplicata, conforme planejamento hierárquico mostrado na Figura 4.5 ao longo de todo o fluxo de recebimento de minério de ferro na Vallourec Tubos do Brasil.

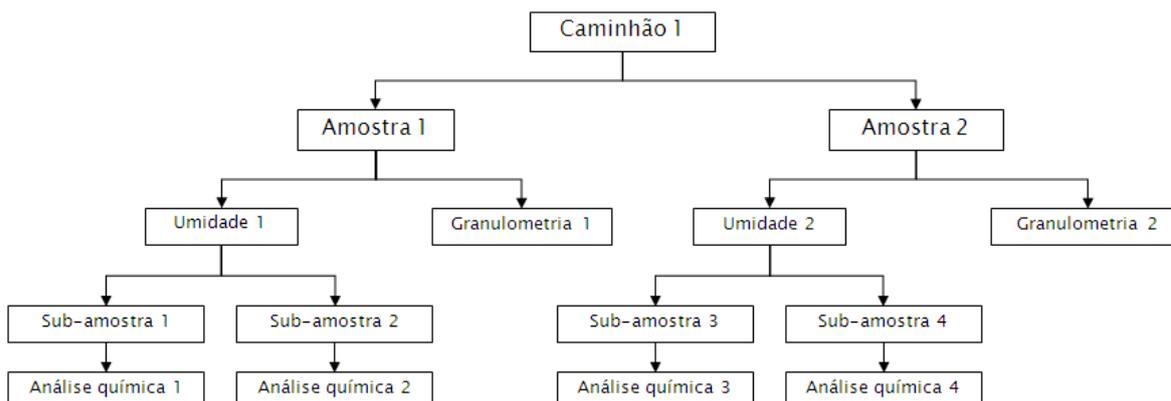


Figura 4.5: Planejamento hierárquico do experimento para estimar os componentes de variação da amostragem de minério de ferro na Vallourec Tubos do Brasil.

Por exemplo: foram coletadas duas amostras semelhantes para o Caminhão 1: Amostra 1 e Amostra 2, para quantificar o erro de amostragem inerente à coleta. A Amostra 1 foi quarteada e dividida em duas: uma parte foi utilizada para realizar análise de granulometria (Granulometria 1) e a outra parte foi utilizada para a análise de umidade (Umidade 1). Após obter o valor da umidade, todo o conteúdo da amostra Umidade 1 foi homogeneizado e quarteado em duas sub-amostras: Sub-amostra 1 e Sub-amostra 2. Obteve-se a análise química de cada sub-amostra. Os mesmos procedimentos foram repetidos para a Amostra 2 do Caminhão 1. Essas repetições e subdivisões permitiram quantificar os erros inerentes à preparação e à análise da amostragem separadamente. A variabilidade entre os caminhões é a variabilidade própria do minério de ferro, sem o efeito da amostragem.

4.3. Modelamento estatístico do consumo de carvão vegetal

4.3.1. Base de dados

Como a Vallourec Tubos do Brasil possui dois altos-fornos com características bem distintas, faz-se necessário trabalhar com informações de cada alto-forno e ajustar modelos específicos para cada um.

O banco de dados utilizado para construção dos modelos é composto de informações diárias de consumos reais dos altos-fornos, em kg, e da qualidade química e física do carvão vegetal, dos minérios de ferro e da pelota, de maio de 2003 a dezembro de 2011.

Sendo assim, o banco de dados é composto por cerca de 3.000 linhas de dados diários dos altos-fornos.

Na preparação dos dados, assim como foi feito na “Fórmula de Flint” (FLINT, 1952), foram excluídos os “outliers”, que são os dias em que ocorreram desligamentos ou religadas dos altos-fornos, uma vez que poderiam interferir na adequação dos modelos ajustados.

Os dados divulgados nesse trabalho estão baseados nos dados que foram divulgados nos “Encontros de Especialistas em Altos-Fornos a Carvão Vegetal” de números 55 a 73.

As variáveis de consumo dos altos-fornos utilizados nos modelos ajustados estão resumidos na Tabela IV.2:

Tabela IV.2: Variáveis utilizadas para o desenvolvimento dos modelos estatísticos.

Variáveis:	Unidade
Resposta:	
Consumo de Carvão Vegetal de Topo	(kg/t gusa)
Variáveis:	
Produção	(t gusa/dia)
Taxa de Injeção de Carvão Vegetal	(kg/t gusa)
Tipo de Minério de Ferro	(%)
Pelota	(%)

A quantidade total de carvão vegetal que chega à usina é denominada “Consumo de Carvão Vegetal Total”. Após a etapa de peneiramento, se divide em “Consumo de Carvão Vegetal de Topo” (granulado de 10 a 125mm), “Consumo de Carvão Vegetal Injetado” ou “Taxa de Injeção de Carvão Vegetal” (finos menor que 10mm) e “Perdas do Processo” (pó de desempoeiramento, tiço, moinha vendida e outros). A soma de “Consumo de Carvão Vegetal de Topo” e “Taxa de Injeção de Carvão Vegetal” é denominada “Consumo de Carvão Vegetal Enfornado”. A Figura 4.6 ilustra esse balanço de massa.

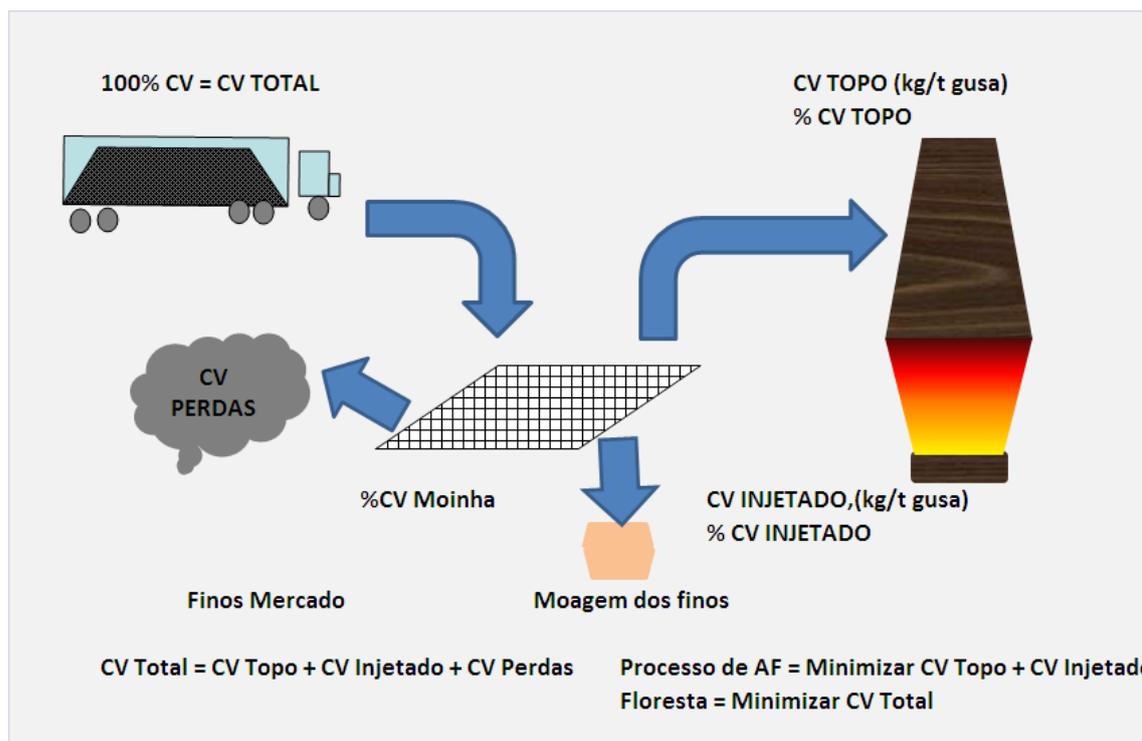


Figura 4.6: Balanço de massas do carvão vegetal utilizado na rotina da Vallourec Tubos do Brasil.

Os dados foram agrupados em cenários de acordo com a composição da carga ferrosa, ou seja, em grupos de dias com consumos em porcentagens similares de carga ferrosa (% de cada tipo de minério e % de pelotas).

No período estudado (2003 a 2011), os dados foram agrupados em 88 cenários para o Alto-Forno 1 (AF1). Para o Alto-Forno 2 (AF2), que apresenta uma diversidade maior, os dados foram agrupados em 147 cenários. Exemplos de cenários do AF1 e do AF2 estão ilustrados nas Tabelas IV.3 e IV.4 a seguir.

Tabela IV.3: Exemplos de 20 cenários do AF1 (no total são 88 cenários) considerando % de diferentes tipos de minérios (T1, T2...T4) e % de pelota.

Cenário	Minério T1 (%)	Minério T2 (%)	Minério T3 (%)	Minério T4 (%)	Pelota (%)
1	0	45	0	0	55
2	45	0	0	0	55
3	0	50	0	0	50
4	25	25	0	0	50
5	38	13	0	0	50
6	23	23	0	0	55
7	20	20	0	0	60
8	30	30	0	0	40
9	28	28	0	0	45
10	24	24	0	0	53
11	15	15	0	0	70
12	18	18	0	0	65
13	16	16	8	0	60
14	20	0	20	0	60
15	20	10	10	0	60
16	12	12	6	0	70
17	15	8	8	0	70
18	8	8	15	0	70
19	14	7	14	0	65
20	11	11	14	0	65

Tabela IV.4: Exemplos de 20 cenários do AF2 (no total são 147 cenários) considerando % de diferentes tipos de minérios (T1, T2...T7) e % de pelota.

Cenário	Minério T1 (%)	Minério T2 (%)	Minério T3 (%)	Minério T4 (%)	Minério T5 (%)	Minério T6 (%)	Minério T7 (%)	Pelota (%)
1	65	35	0	0	0	0	0	65
2	66	0	0	0	0	34	0	66
3	55	0	0	0	0	45	0	55
4	41	30	0	0	0	30	0	41
5	40	60	0	0	0	0	0	40
6	0	0	100	0	0	0	0	0
7	0	0	95	0	0	0	0	0
8	49	51	0	0	0	0	0	49
9	13	75	0	0	0	0	0	13
10	0	0	70	0	0	0	0	0
11	0	0	85	0	0	0	0	0
12	0	0	75	0	0	0	0	0
13	0	0	65	0	0	0	0	0
14	0	0	60	0	0	0	0	0
15	0	0	80	0	0	0	0	0
16	0	0	90	0	0	0	0	0
17	0	0	54	0	27	0	0	0
18	0	0	47	0	23	0	0	0
19	0	0	60	0	30	0	0	0
20	0	0	67	0	33	0	0	0

Normalmente os cenários vão se modificando ao longo dos meses e dos anos. Por exemplo: para o AF2, os cenários de 1 a 10 correspondem ao ano 2003. Os cenários 11 a 16 pertencem ao ano 2004, e assim por diante. Os últimos cenários, em termos de numeração, pertencem ao último ano.

Para cada cenário foram obtidas as médias e os desvios-padrão das variáveis: consumo de carvão vegetal de topo, produção e taxa de injeção, separados (por um método qualitativo) por períodos de chuva (meses de janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro) e de seca (meses de abril, maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro). Isso porque a operação dos altos-fornos muda muito com a utilização de carvão vegetal com maior teor de umidade. A geração de finos aumenta com a saída de água dentro dos altos-fornos e a degradação do carvão vegetal, tornando os altos-fornos menos permeáveis. Além disso, a utilização de carvão vegetal úmido reduz a temperatura do gás de topo, prejudica a produtividade e aumenta o consumo de carvão vegetal.

Também foram acrescentadas as variáveis de qualidade a cada um dos cenários, que são os resultados médios de características de qualidade do carvão vegetal: carbono fixo (%), cinzas (%), umidade (%), finos menores que 10mm (%) e tamanho médio (mm); e da carga ferrosa total: ferro (%), alumina (%) e sílica (%).

4.3.2. Modelos de superfície de resposta (MSR)

O método estatístico utilizado para modelar e analisar os dados foi o método de Modelagem de Superfície de Resposta (MSR), escolhido por ser útil em aplicações onde a resposta de interesse, no caso o consumo de carvão vegetal de topo (kg/t gusa), é influenciada por muitas variáveis e o objetivo é “otimizar” essa resposta.

Os modelos foram divididos em duas etapas: “Etapa 1”, com dados de 2003 a 2010, e “Etapa 2”, com dados de 2003 a 2011.

Para cada alto-forno foram construídos modelos de superfície de resposta utilizando o software estatístico MINITAB 16 (MINITAB, 2010), considerando os efeitos principais, os quadráticos e as interações das variáveis listadas na Tabela IV.2, para a “Etapa 1”. Para a “Etapa 2”, também foram adicionados os efeitos das variáveis de qualidade do redutor e da carga ferrosa. Para isso, foi considerado um nível de significância de 10% para os

testes de hipóteses dos parâmetros dos modelos para definir se era significativo ou não e se deveria permanecer ou ser retirado do modelo.

Definido o melhor modelo para cada alto-forno, com maior coeficiente de determinação R^2 ajustado, o qual é utilizado como medida de ajuste de modelos, o próximo passo foi o de elaborar gráficos de curvas de níveis. Essas curvas consideram a variação de duas variáveis nos eixos x e y, baseando-se em valores reais já utilizados nos altos-fornos, e como resposta, a variável “Consumo de Carvão Vegetal de Topo” (kg/t gusa), visualmente diferenciada por cores nas curvas de nível e quantificada em intervalos de valores. As demais variáveis dos modelos foram fixadas.

4.3.3. Modelos de regressão linear

Com o objetivo de facilitar a utilização das informações obtidas com os gráficos das curvas de níveis para os planejamentos macro mensais e anuais de produção de ferro-gusa e consumo de carga ferrosa e carvão vegetal dos altos-fornos, foram elaborados modelos de regressão com base nos pontos médios de cada um desses gráficos. Primeiro, foram elaborados modelos para prever o “Percentual de Pelotas” em função da “Produção Diária (t) de Ferro-Gusa”. Depois, foram elaborados modelos para prever o “Consumo de Carvão Vegetal de Topo” (kg/t gusa) em função do “Percentual de Pelotas” utilizado na carga ferrosa total.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise descritiva dos dados

Para análise descritiva dos dados de 2003 a 2011 dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil, foram utilizados gráficos de intervalo de 95% de confiança para a média, construídos no software estatístico MINITAB 16 (MINITAB, 2010), sob a suposição de normalidade dos dados (cerca de 3.000 dados no total). Os dados também estão apresentados em formato de tabelas, separados por período de chuva e seca, e contém as principais informações de estatísticas descritivas: média, desvio-padrão (d.p.) e tamanho de amostra (n).

A Tabela V.1 e os gráficos da Figura 5.1 mostram a “Produção Média Diária de Ferro-Gusa (t)” durante o período estudado. Em 2009 observa-se uma queda na produção em função principalmente à situação de crise econômica nesse período. Em 2010 e 2011, as produções continuaram menores, reflexo ainda da situação econômica e dos planos de produção da empresa voltados para menor produção, porém com produtos mais elaborados, para atender ao mercado. As diferenças entre os períodos de chuva e seca podem estar ligadas a diversos fatores, como: demandas de produção, diferentes cargas ferrosas, interferência da qualidade das matérias-primas na produtividade dos altos-fornos, dentre outros.

Tabela V.1: Estatísticas descritivas da produção diária de ferro-gusa (t) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

Alto-Forno	Ano	Período	Média	d.p.	n	
AF1	2003	Chuva	1.119	125	54	
		Seca	1.064	121	168	
	2004	Chuva	1.121	113	129	
		Seca	1.176	129	163	
	2005	Chuva	1.127	112	109	
		Seca	1.144	140	181	
	2006	Chuva	1.174	112	114	
		Seca	1.163	113	190	
	2007	Chuva	1.131	124	106	
		Seca	1.217	122	203	
	2008	Chuva	1.137	135	140	
		Seca	1.225	137	188	
	2009	Chuva	813	104	125	
		Seca	799	104	131	
	2010	Chuva	958	145	136	
		Seca	1.119	113	205	
	2011	Chuva	976	97	142	
		Seca	987	108	198	
	AF2	2003	Chuva	548	59	54
			Seca	519	61	182
2004		Chuva	572	66	145	
		Seca	568	59	206	
2005		Chuva	571	65	140	
		Seca	554	69	187	
2006		Chuva	600	83	119	
		Seca	563	71	204	
2007		Chuva	581	91	138	
		Seca	589	57	211	
2008		Chuva	541	83	149	
		Seca	543	60	153	
2009		Chuva	327	50	118	
		Seca	376	89	194	
2010		Chuva	404	101	122	
		Seca	457	67	202	
2011		Chuva	435	75	139	
		Seca	455	51	199	

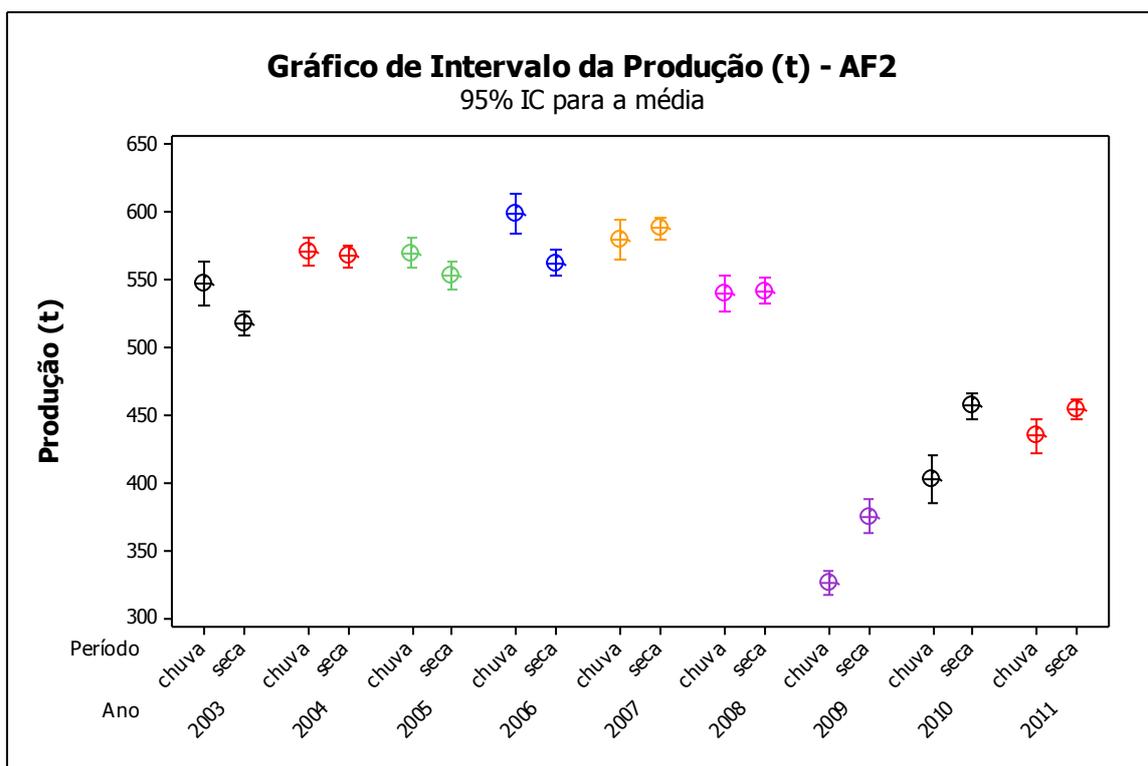
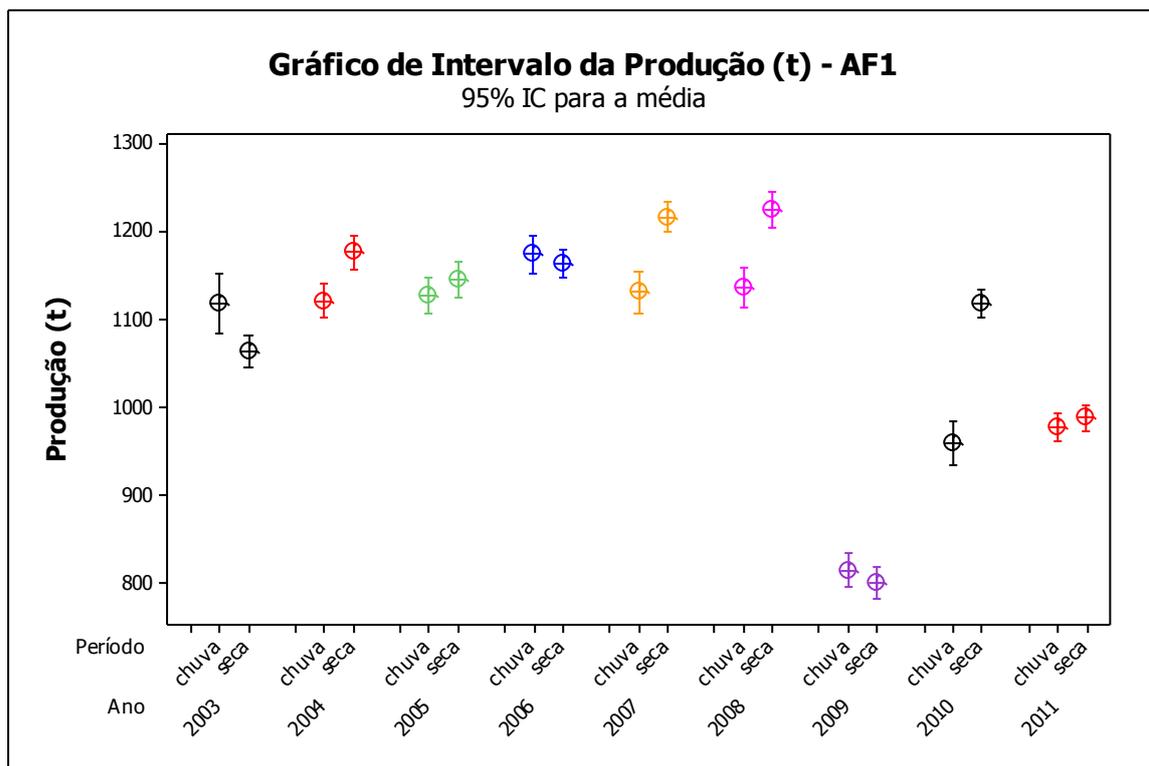


Figura 5.1: Evolução da produção diária de ferro-gusa (t) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

A Tabela V.2 e os gráficos da Figura 5.2 mostram a evolução do “Consumo de Carvão Vegetal de Topo (kg/t gusa)” ao longo dos anos. Já a Tabela V.3 e os gráficos da Figura 5.3, mostram a evolução da “Taxa de Injeção de Finos de Carvão Vegetal (kg/t gusa)”.

Desde 2007, os valores de consumo de carvão vegetal de topo têm sido menores, o que é consequência do aumento da taxa de injeção de finos de carvão vegetal a partir deste período. A operação dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil com maiores taxas de injeção a partir de 2007 ocorreu principalmente devido às mudanças de comportamento e operacionais com a adequação de padrões associados a três investimentos: i) nova instalação de moagem (Moagem III); ii) início de operação da Unidade de Peneiramento de Carvão Vegetal (UPC) em Paraopeba; e iii) projeto de dupla lança de injeção no Alto-Forno 1.

Observam-se também nos dois altos-fornos que, durante o período de seca, o consumo de carvão vegetal de topo é menor e a taxa de injeção é maior. O teor de umidade das matérias-primas, do carvão vegetal em especial, é um dos fatores que justifica essa diferença.

Tabela IV.2: Estatísticas descritivas do consumo de CV de topo (kg/t gusa) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

Alto-Forno	Ano	Período	Média	d.p.	n
AF1	2003	Chuva	546	52	53
		Seca	514	47	164
	2004	Chuva	552	46	127
		Seca	531	43	162
	2005	Chuva	554	42	108
		Seca	507	43	181
	2006	Chuva	508	58	114
		Seca	505	50	190
	2007	Chuva	494	43	105
		Seca	450	39	202
	2008	Chuva	469	42	140
		Seca	433	34	185
	2009	Chuva	492	43	123
		Seca	479	37	127
	2010	Chuva	487	49	132
		Seca	435	35	205
	2011	Chuva	485	48	137
		Seca	455	41	197
AF2	2003	Chuva	595	58	54
		Seca	614	81	182
	2004	Chuva	601	51	145
		Seca	585	46	206
	2005	Chuva	628	47	140
		Seca	585	57	187
	2006	Chuva	589	56	119
		Seca	534	53	204
	2007	Chuva	545	54	138
		Seca	485	40	211
	2008	Chuva	522	45	149
		Seca	489	40	153
	2009	Chuva	538	64	118
		Seca	517	52	194
	2010	Chuva	521	59	122
		Seca	516	41	202
	2011	Chuva	565	55	139
		Seca	522	45	199

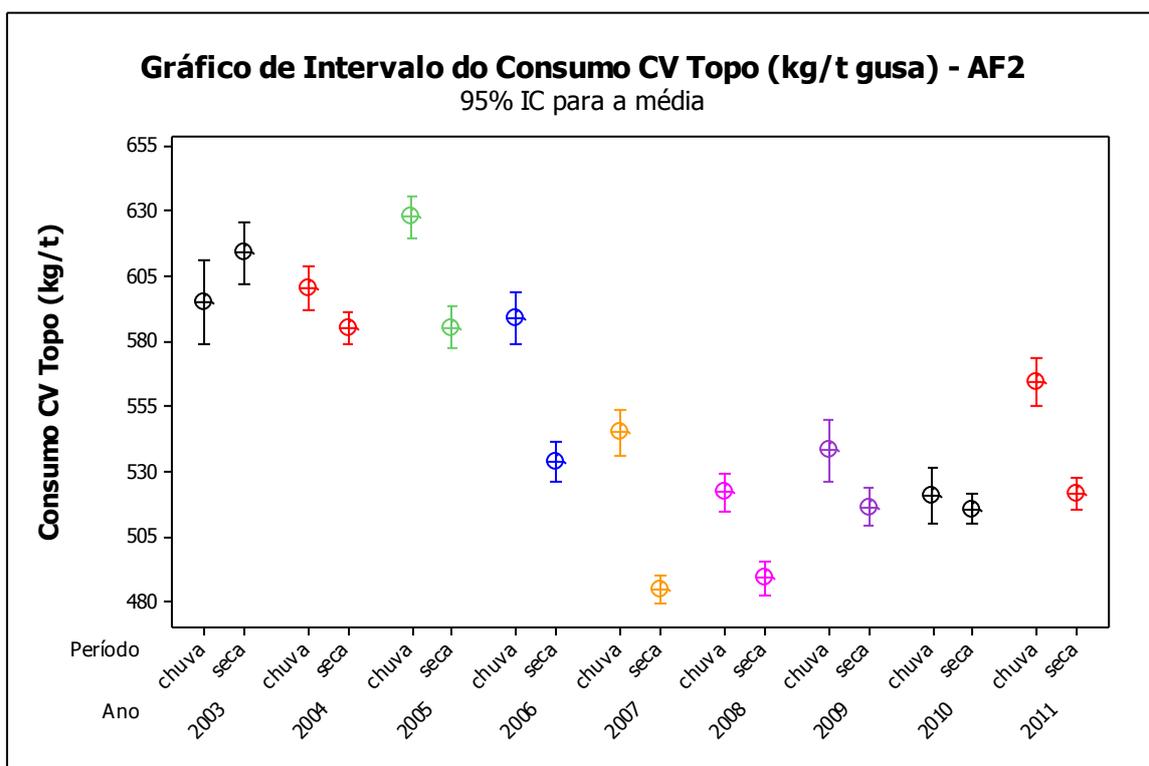
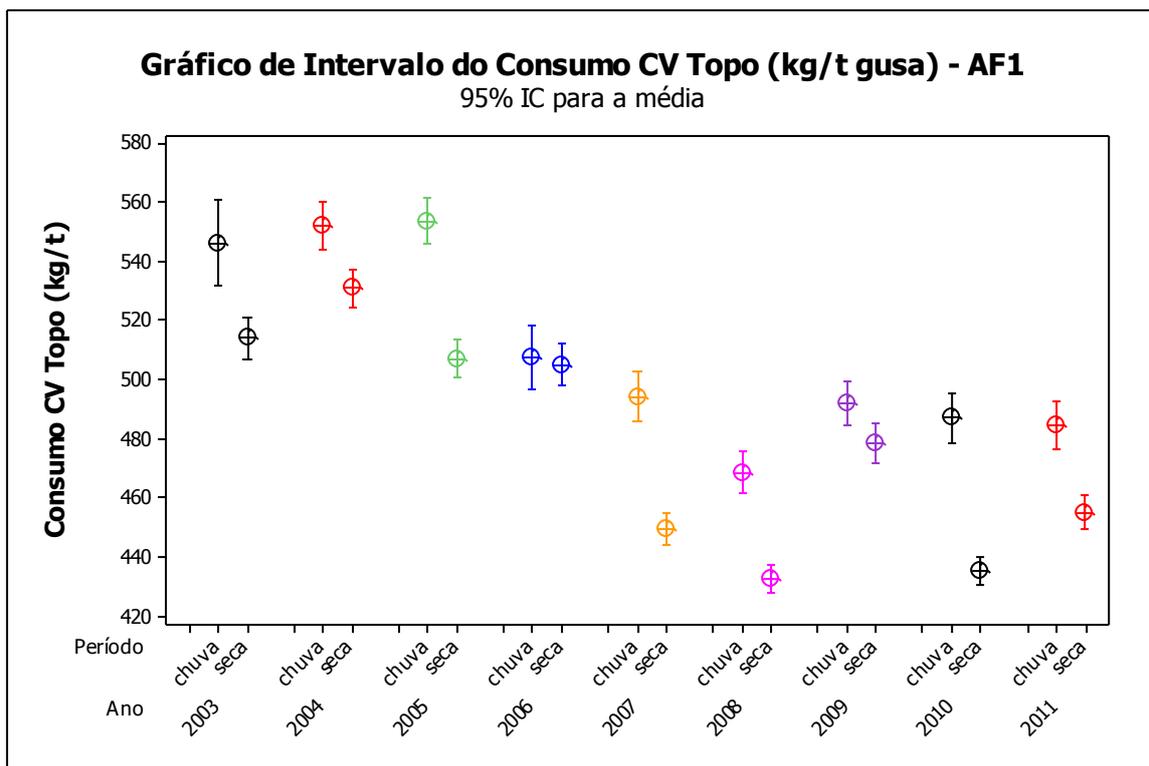


Figura 5.2: Evolução do consumo de CV de topo (kg/t gusa) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

Tabela V.3: Estatísticas descritivas da taxa de injeção de CV (kg/t gusa) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

Alto-Forno	Ano	Período	Média	d.p.	n
AF1	2003	Chuva	128	19	54
		Seca	140	18	164
	2004	Chuva	128	15	128
		Seca	137	16	162
	2005	Chuva	134	21	109
		Seca	148	18	181
	2006	Chuva	150	22	114
		Seca	154	19	190
	2007	Chuva	163	20	106
		Seca	174	19	202
	2008	Chuva	183	16	140
		Seca	179	15	185
	2009	Chuva	188	16	123
		Seca	183	18	127
	2010	Chuva	190	16	132
		Seca	186	16	205
	2011	Chuva	181	25	137
		Seca	184	18	196
AF2	2003	Chuva	107	11	54
		Seca	102	13	182
	2004	Chuva	98	12	145
		Seca	99	12	206
	2005	Chuva	93	14	140
		Seca	106	15	187
	2006	Chuva	108	24	119
		Seca	126	24	204
	2007	Chuva	135	19	138
		Seca	148	17	211
	2008	Chuva	142	12	149
		Seca	130	24	153
	2009	Chuva	156	20	118
		Seca	167	16	194
	2010	Chuva	153	21	122
		Seca	173	17	202
	2011	Chuva	154	27	139
		Seca	157	17	199

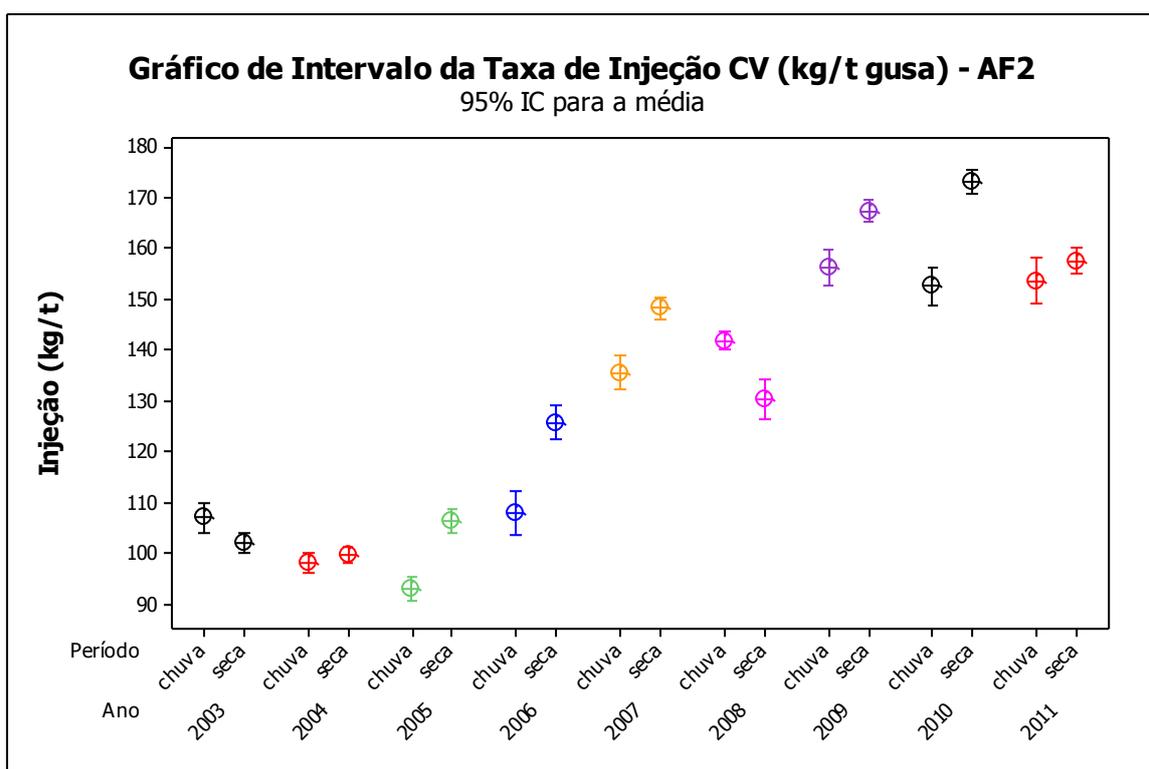
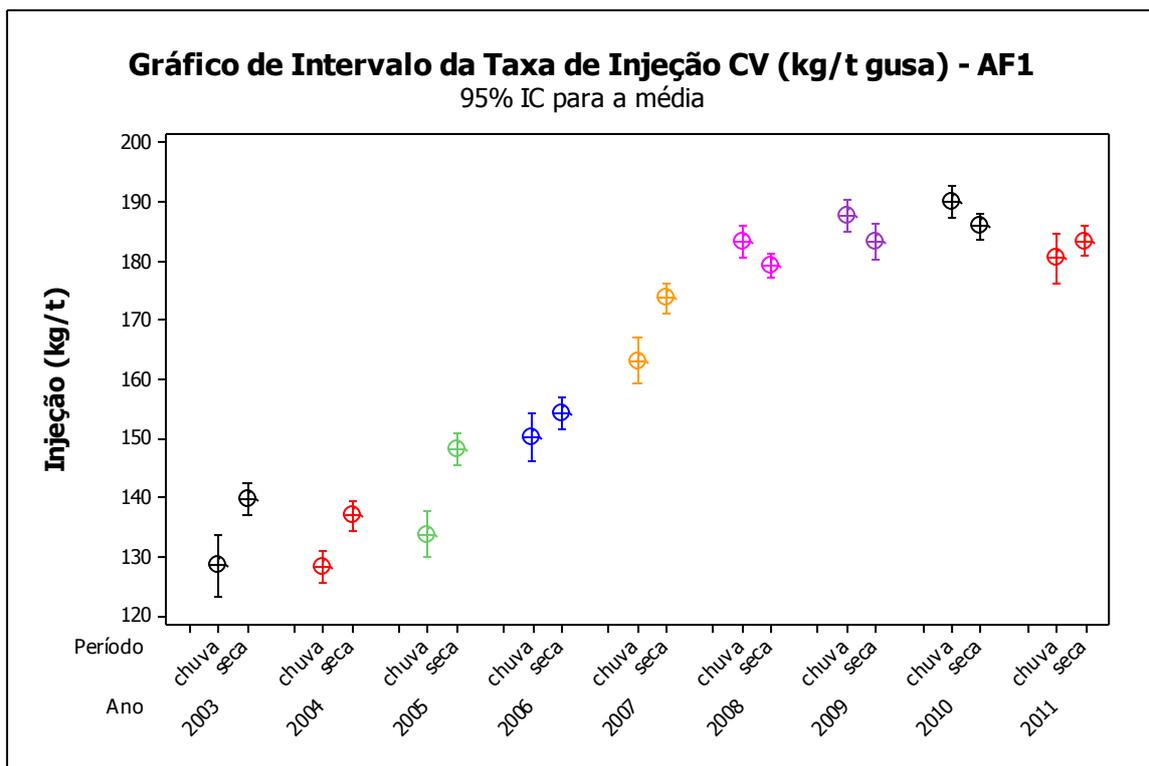


Figura 5.3: Evolução da taxa de injeção de CV (kg/t gusa) dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

Os resultados de análise imediata (carbono fixo, materiais voláteis, cinzas e umidade) e granulométrica do carvão vegetal consumido nos altos-fornos variaram bastante desde 2003, conforme pode ser visto na Tabela V.4 e nas Figuras 5.4 a 5.8. O teor de carbono fixo apresentou uma queda de 2003 a 2006, voltou a subir em 2007, e, nos últimos dois anos, apresentou os maiores valores do período. Os teores de cinzas e umidade subiram de 2003 a 2005, e, a partir de 2006, demonstraram uma tendência de queda.

O início da operação do peneiramento do carvão vegetal na UPC no final de 2006 permitiu uma maior retirada dos finos e, conseqüentemente, reduziu o teor de cinzas e aumentou o teor de carbono fixo. Um maior controle das características de qualidade, em especial da umidade, recusando o recebimento de carretas com carvão vegetal muito úmido ou com muitos finos, por exemplo, fez com que houvesse também uma redução no teor da umidade. Além disso, adequações na tecnologia de fabricação do carvão vegetal pela Florestal a partir de 2008, como a alteração da temperatura de carbonização e do método de resfriamento de carvão vegetal, fez com que a qualidade do carvão vegetal se alterasse. Uma das alterações foi a elevação da temperatura de carbonização, a qual tende a aumentar o teor de carbono fixo. Isso é interessante do ponto de vista energético para os altos-fornos, entretanto, reduz o rendimento do processo de carbonização.

As justificativas citadas no parágrafo anterior também servem para explicar a variação da análise granulométrica do carvão vegetal consumido nos altos-fornos no período estudado, além das variações dos tipos de fazendas e das diferentes porcentagens de carvão vegetal de estoque utilizado. As evoluções do tamanho médio e da porcentagem de finos podem ser vistas na Tabela V.4 e nas Figuras 5.7 e 5.8. Os anos de 2004, 2005 e 2011 foram os que apresentaram menores valores de tamanho médio.

Observa-se também que as características de qualidade do carvão vegetal estudadas, tendem a apresentar piores resultados durante o período chuvoso.

Tabela V.4: Estatísticas descritivas das análises imediata e granulométrica do CV consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

Teor (%)	Ano	Período	Média	d.p.	n	
Carbono Fixo do CV	2003	Chuva	74,9	0,2	61	
		Seca	75,7	1,0	184	
	2004	Chuva	74,6	0,7	152	
		Seca	75,0	0,4	214	
	2005	Chuva	73,2	1,2	151	
		Seca	74,3	1,1	214	
	2006	Chuva	72,9	1,4	146	
		Seca	72,6	1,8	213	
	2007	Chuva	74,0	1,0	146	
		Seca	75,0	1,1	210	
	2008	Chuva	73,8	1,0	148	
		Seca	74,0	1,1	204	
	2009	Chuva	74,5	1,5	148	
		Seca	73,5	1,4	142	
	2010	Chuva	75,9	1,2	147	
		Seca	76,5	1,1	213	
	2011	Chuva	75,8	0,9	150	
		Seca	75,7	0,9	211	
	Cinzas do CV	2003	Chuva	2,3	0,1	61
			Seca	2,1	0,1	184
2004		Chuva	2,5	0,1	152	
		Seca	2,4	0,2	214	
2005		Chuva	3,1	0,2	151	
		Seca	2,4	0,3	214	
2006		Chuva	2,5	0,7	146	
		Seca	2,7	0,6	213	
2007		Chuva	1,9	0,6	146	
		Seca	1,7	0,4	210	
2008		Chuva	1,5	0,4	148	
		Seca	1,6	0,5	204	
2009		Chuva	1,3	0,4	148	
		Seca	1,3	0,4	142	
2010		Chuva	1,3	0,4	147	
		Seca	1,3	0,3	213	
2011		Chuva	1,1	0,3	150	
		Seca	1,3	0,4	211	

Tabela V.4: Estatísticas descritivas das análises imediata e granulométrica do CV consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil (continuação).

Teor (%)	Ano	Período	Média	d.p.	n	
Umidade do CV	2003	Chuva	5,7	0,3	61	
		Seca	4,8	0,5	184	
	2004	Chuva	6,3	0,8	152	
		Seca	5,4	0,8	214	
	2005	Chuva	6,5	0,4	151	
		Seca	5,4	0,6	214	
	2006	Chuva	6,0	1,0	145	
		Seca	5,0	1,1	211	
	2007	Chuva	5,4	1,3	146	
		Seca	3,9	0,4	210	
	2008	Chuva	5,5	0,6	148	
		Seca	4,6	0,7	201	
	2009	Chuva	5,2	0,6	149	
		Seca	4,5	0,6	140	
	2010	Chuva	4,9	0,6	148	
		Seca	4,4	0,6	213	
	2011	Chuva	4,8	0,7	150	
		Seca	3,8	0,5	210	
	Tamanho Médio do CV	2003	Chuva	33,8	0,4	61
			Seca	37,2	1,2	184
2004		Chuva	31,8	1,7	152	
		Seca	34,5	1,9	214	
2005		Chuva	33,7	0,5	151	
		Seca	34,3	0,7	214	
2006		Chuva	37,2	3,3	146	
		Seca	38,2	2,7	213	
2007		Chuva	37,3	2,9	146	
		Seca	39,7	2,2	210	
2008		Chuva	41,1	2,1	148	
		Seca	39,7	2,5	204	
2009		Chuva	39,6	1,4	148	
		Seca	39,0	1,8	141	
2010		Chuva	38,3	1,9	144	
		Seca	39,4	1,5	212	
2011		Chuva	35,6	2,1	149	
		Seca	34,7	1,3	210	

Tabela V.4: Estatísticas descritivas das análises imediata e granulométrica do CV consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil (continuação).

Teor (%)	Ano	Período	Média	d.p.	n
Finos do CV	2003	Chuva	5,2	0,0	61
		Seca	5,4	0,7	184
	2004	Chuva	1,3	0,0	152
		Seca	1,3	0,0	214
	2005	Chuva	1,7	0,1	151
		Seca	1,8	0,0	214
	2006	Chuva	2,1	1,0	146
		Seca	4,2	2,5	213
	2007	Chuva	2,3	0,7	146
		Seca	2,5	0,8	210
	2008	Chuva	2,4	0,5	148
		Seca	2,6	0,6	204
	2009	Chuva	2,0	0,6	148
		Seca	2,1	0,6	141
	2010	Chuva	2,2	0,6	144
		Seca	2,2	0,4	212
	2011	Chuva	3,1	0,4	149
		Seca	2,7	0,5	210

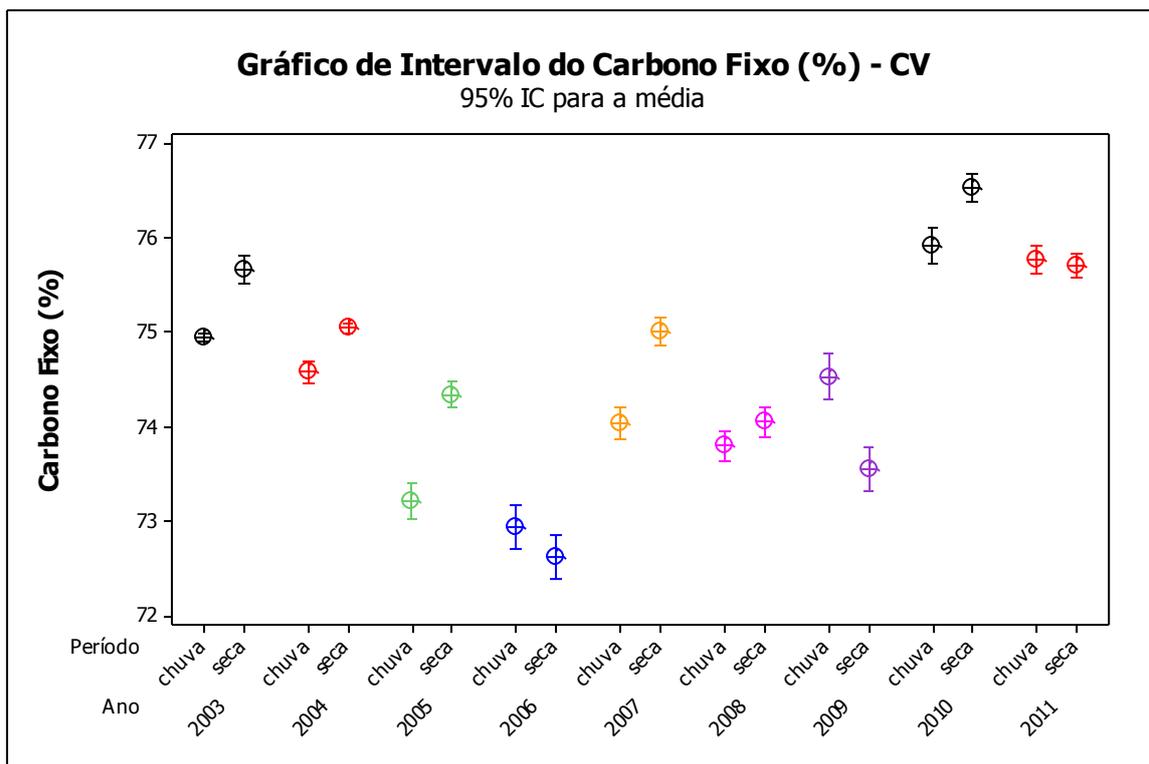


Figura 5.4: Evolução do teor de carbono fixo do carvão vegetal consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

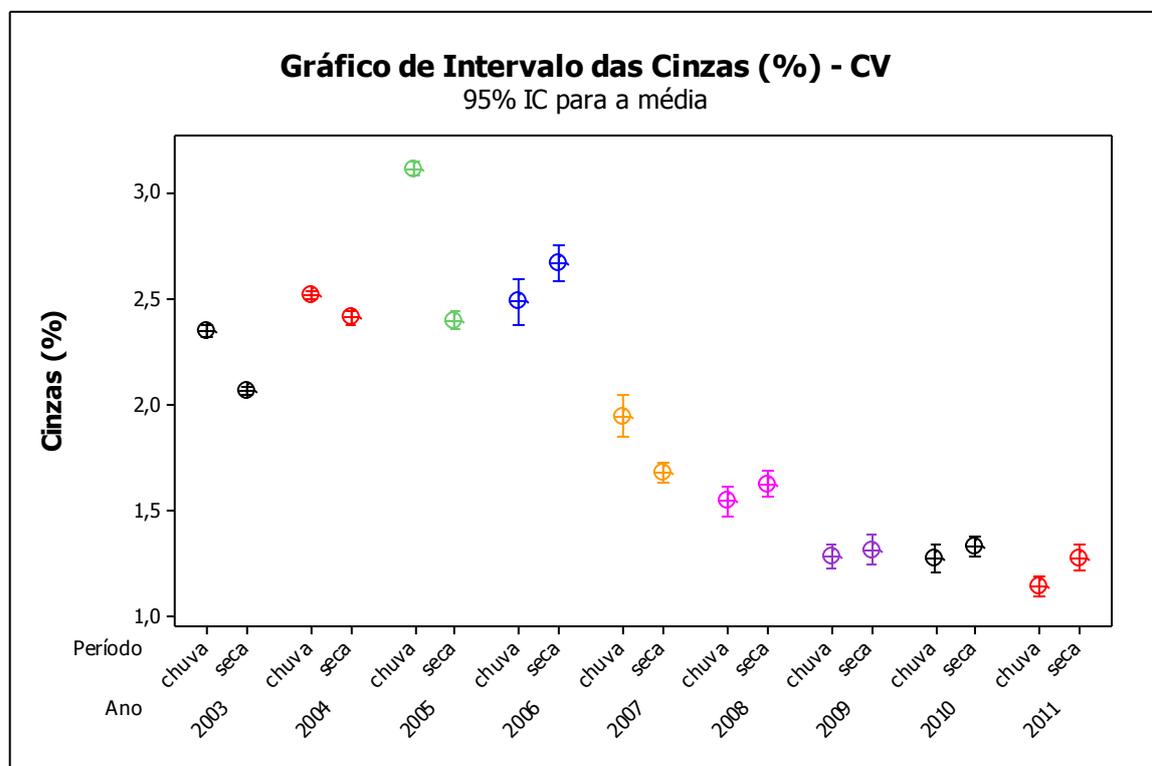


Figura 5.5: Evolução do teor de cinzas do carvão vegetal consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

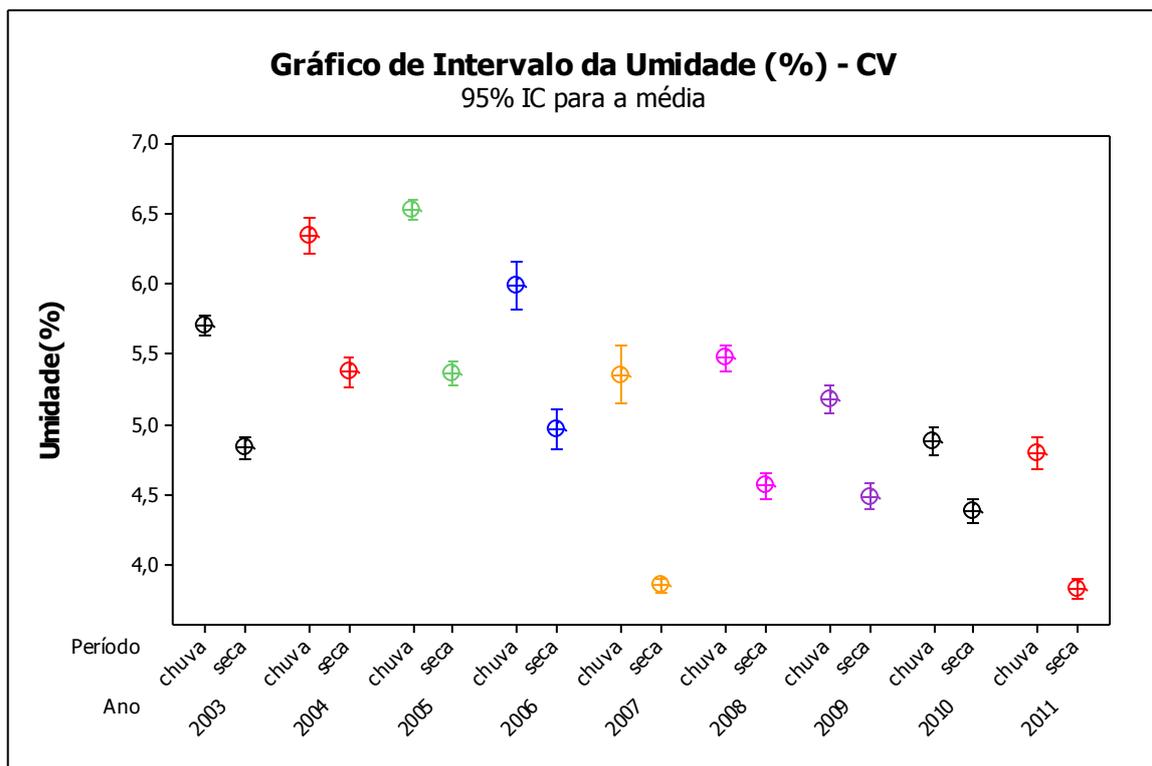


Figura 5.6: Evolução da umidade do carvão vegetal consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

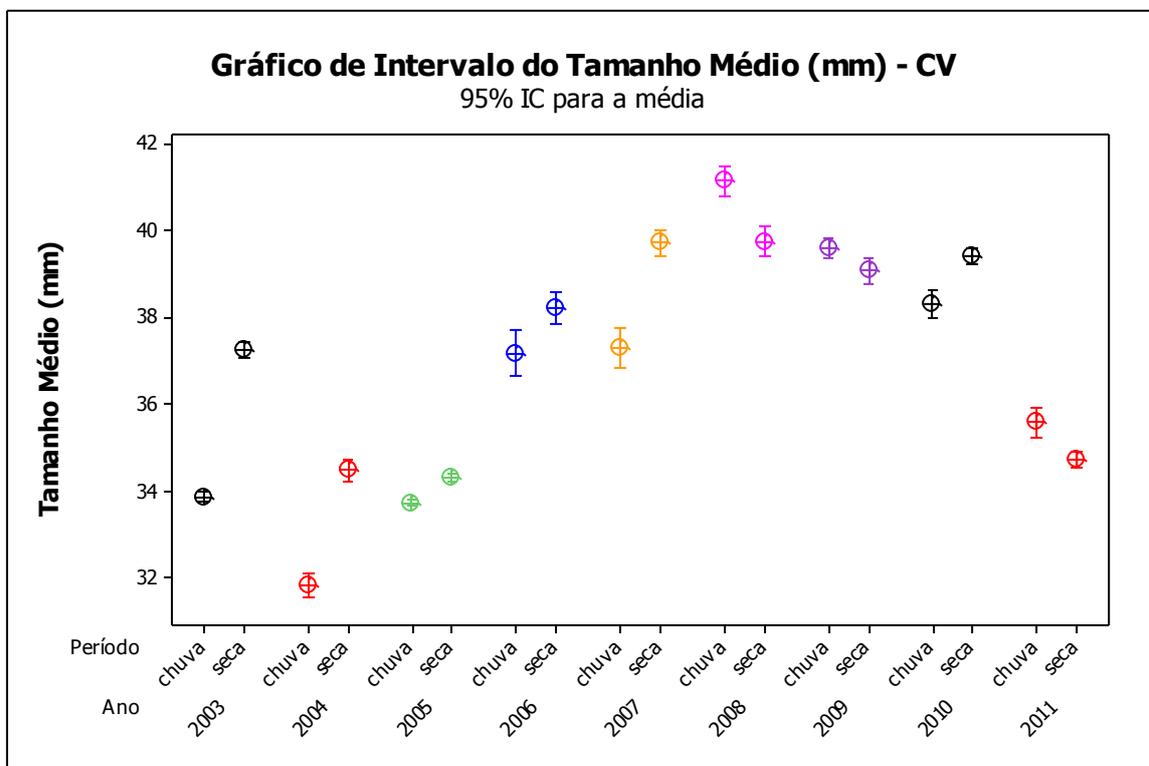


Figura 5.7: Evolução do tamanho médio do carvão vegetal consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

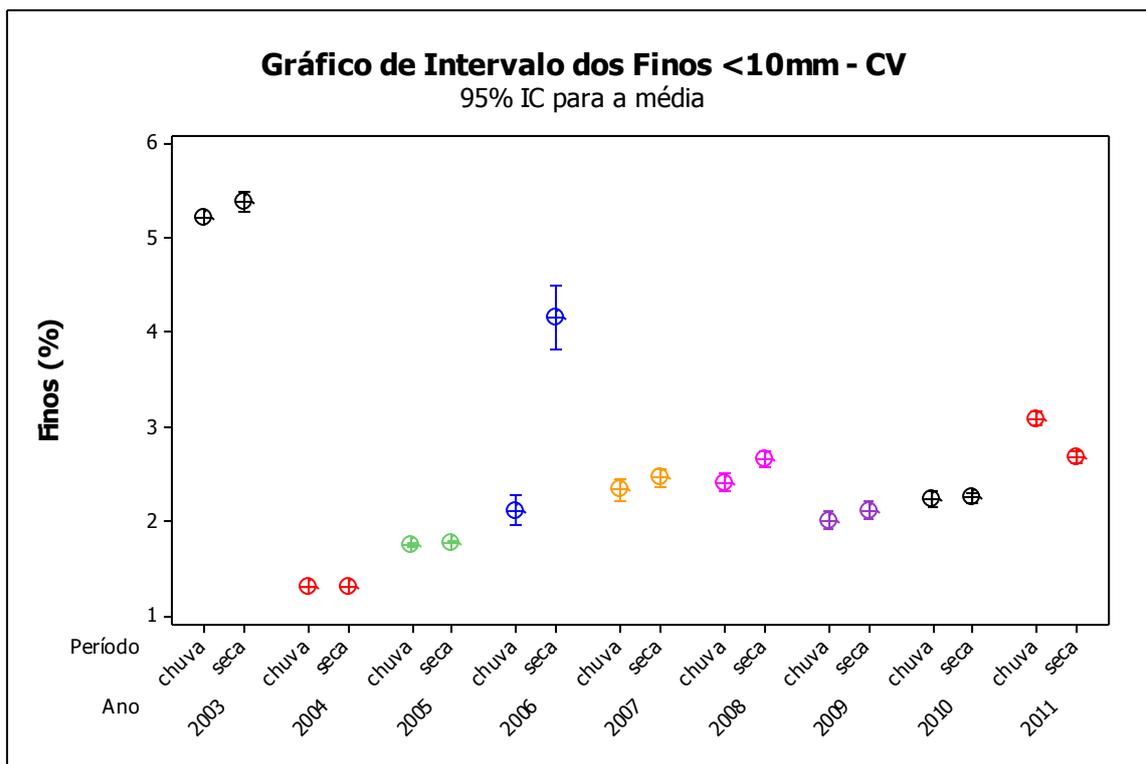


Figura 5.8: Evolução do percentual de finos do carvão vegetal consumido nos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

A Figura 5.9 mostra a diversidade de tipos de carga ferrosa utilizadas no Alto-Forno 1 e no Alto-Forno 2 da Vallourec Tubos do Brasil, respectivamente.

O Alto-Forno 1 utilizou pelota e quatro tipos diferentes de minério de ferro durante o período estudado, enquanto o Alto-Forno 2 utilizou pelota e sete diferentes tipos de minérios. As variações ocorreram em função de preços, ofertas de mercado (reservas mineralógicas) e planos de experiências. Em 2009, ano de crise econômica, e, conseqüentemente, menor produção, trabalhou-se com cargas ferrosas mais baratas, com maior porcentagem de minério de ferro e menor porcentagem de pelotas.

Uma alteração na composição da carga ferrosa também acarretará em alteração na distribuição da carga e conseqüentemente na distribuição do fluxo gasoso. Cargas com maior ou menor porcentagem de pelotas ou de minério terão comportamento diferente quanto à sua distribuição no interior do alto-forno. A maior eficiência operacional de um alto-forno e, conseqüentemente, a obtenção de menores consumos de carvão, estão diretamente relacionadas com a melhor distribuição do fluxo gasoso.

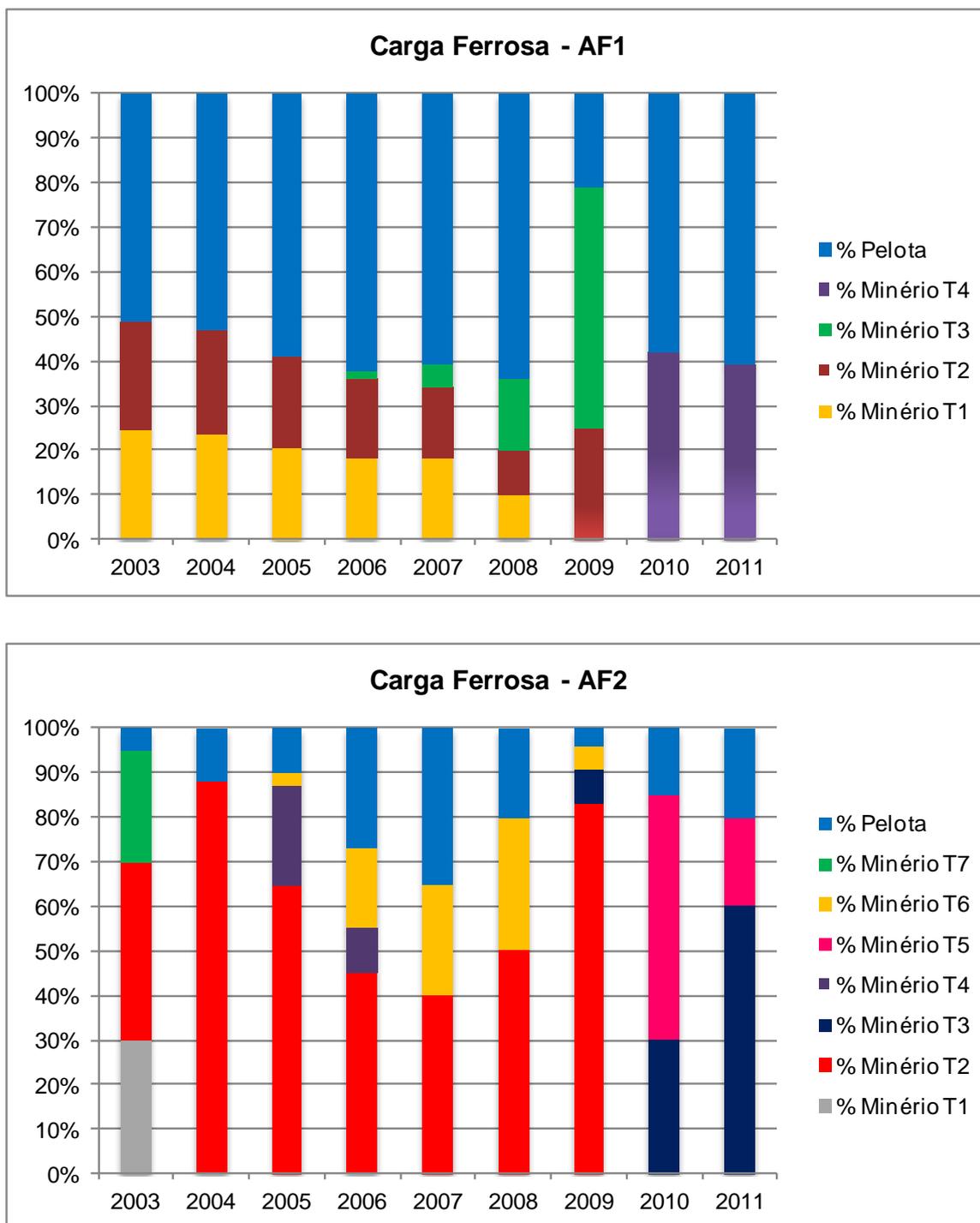


Figura 5.9: Diversidade da carga ferrosa utilizada pelos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

A Figura 5.10 mostra a qualidade química do mix da carga ferrosa dos altos-fornos, em termos de teores de ferro (%), alumina (%) e sílica (%). A qualidade do mix nos últimos três anos tem variado muito. Nos últimos dois anos, a carga ferrosa apresentou menor teor de ferro e maior teor de sílica. Isso em função da nova frente de lavra do minério de ferro que apresenta maior quantidade de itabirito e menor quantidade de hematita na composição.

Em 2009, os altos-fornos operaram com baixo percentual de pelotas (média anual de 20% para o Alto-Forno 1, e 5% para o Alto-Forno 2), chegando a operar até mesmo com 100% de minério de ferro em alguns meses. Durante esse período, o minério de ferro utilizado apresentava alto teor de alumina e baixo teor de sílica.

Na operação de altos-fornos, é esperado uma relação sílica/alumina de no mínimo 1. Com uma relação sílica/alumina muito baixa, em torno de 0,4, por exemplo, os altos-fornos passam a ser operados com grande risco, com temperatura de fusão da escória alta em torno de 1550°C, estreitando a região de ponto de fusão da escória. Como é desejado que a escória primária amoleça rápido iniciando a 1050°C e fique líquida, uma temperatura de fusão da escória em 1550°C representa um problema para a formação desse tipo de escória, para a permeabilidade da zona de amolecimento e fusão, e dificulta a saída da escória e do ferro-gusa. Para contornar o problema, é necessário aumentar o consumo de fundentes e, conseqüentemente, o volume de escória dos altos-fornos, aumentando também o custo de fabricação do ferro-gusa. E bem mais ainda, aumentar o consumo de carvão vegetal enornado com a calcinação extra dos carbonatos.

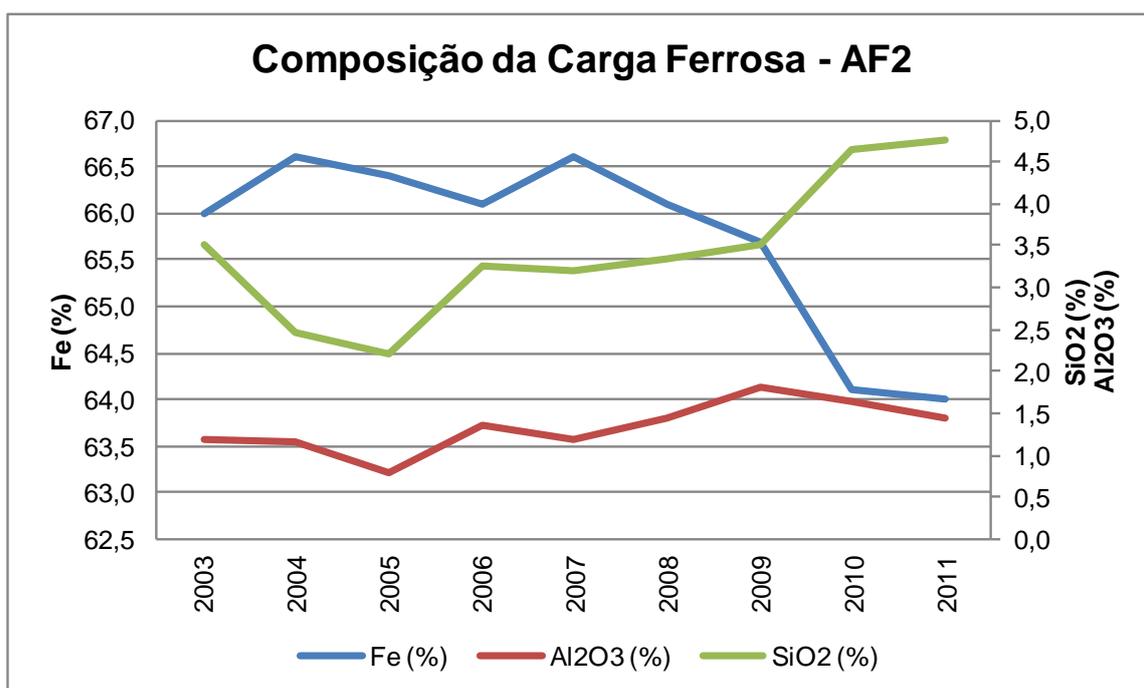
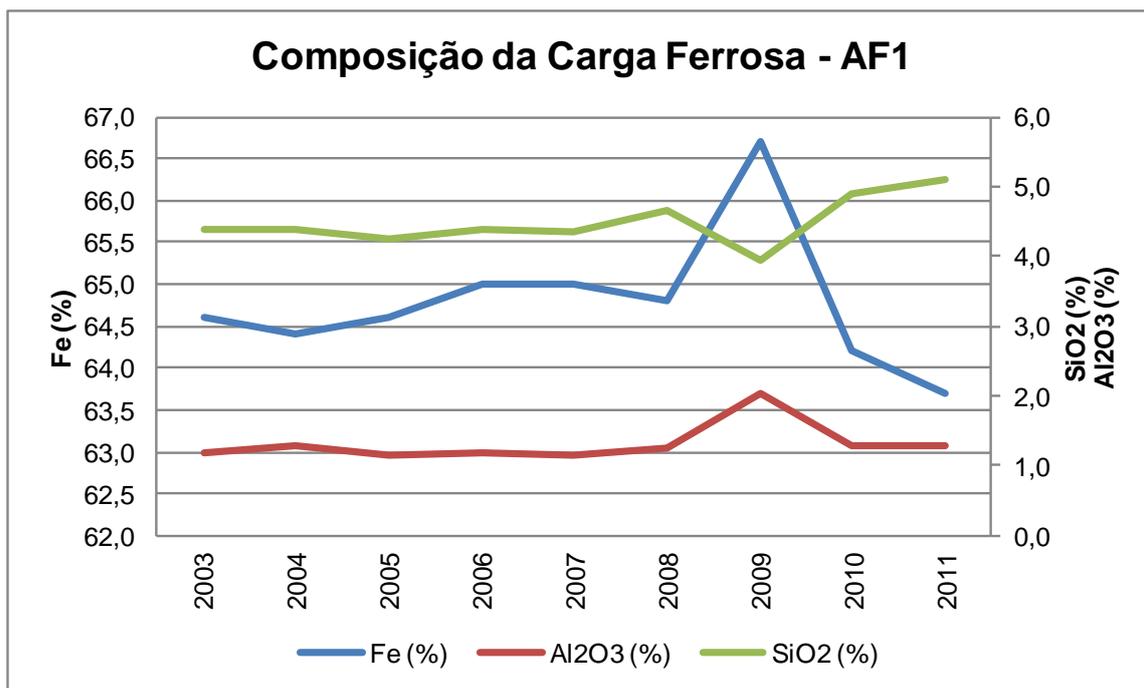


Figura 5.10: Evolução dos teores de ferro, alumina e sílica da carga ferrosa dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

5.2. Redução da variabilidade inerente às amostragens

Após avaliar a situação atual de amostragem de carvão vegetal e minério de ferro, foram identificados os pontos mais problemáticos, alguns com ações imediatas, outros com ações a serem desenvolvidas dentro do projeto, e foram levantadas as principais necessidades dos altos-fornos (cliente).

No caso do carvão vegetal, os experimentos mostraram que o melhor intervalo de tempo para a coleta dos incrementos da amostra era a cada 2 minutos. Intervalos de tempo maiores tendem a não atingir o volume definido para a amostra de 200L, caso seja amostrada uma carreta de menor tamanho. Intervalos menores de tempo geram uma quantidade muito grande de amostra de material dificultando o seu manuseio, transporte e preparação.

Com base nas normas técnicas estudadas, na literatura e nas boas práticas de empresas *benchmark*, foi elaborado um novo procedimento de preparação das amostras de carvão vegetal, resumido na Figura 5.11:

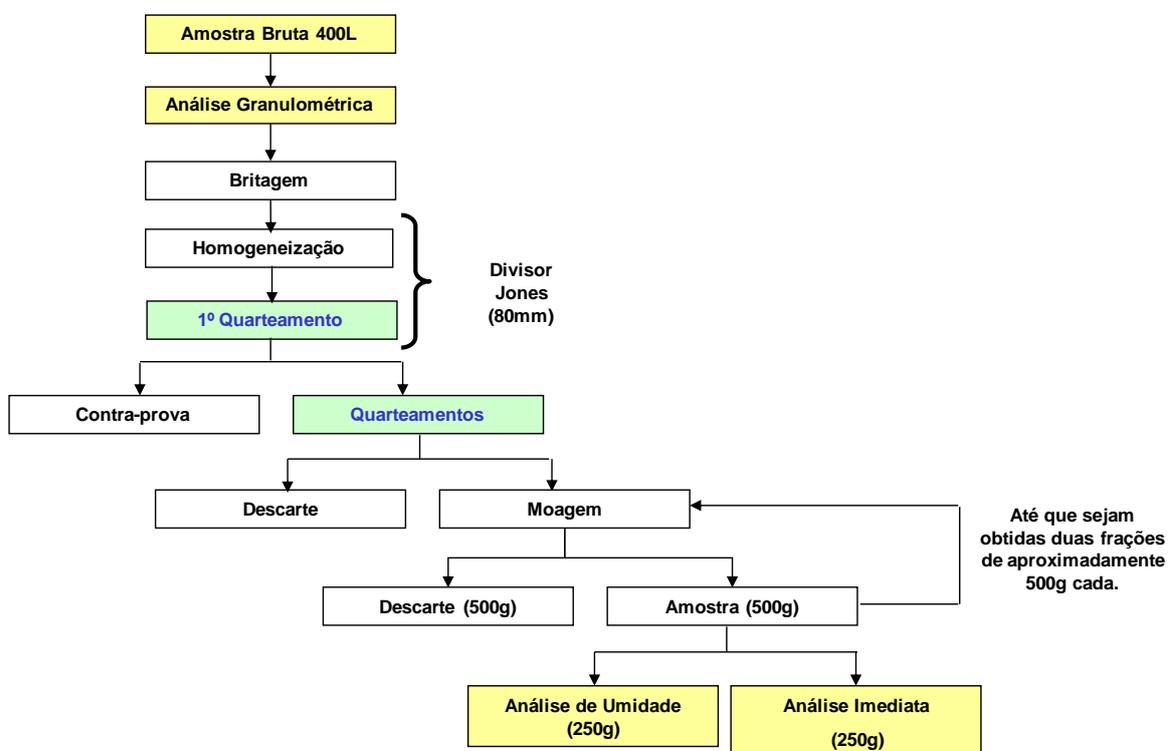


Figura 5.11: Novo procedimento de preparação de amostras de carvão vegetal.

Para avaliar os impactos das alterações realizadas nos métodos de coleta e preparação das amostras de carvão vegetal, foram repetidos os experimentos de balanço de massa e de planejamento hierárquico. Os resultados amostrais apresentaram maior coerência quando comparados com os resultados dos experimentos de balanço de massa. Para os experimentos de planejamentos hierárquicos, a Tabela V.5 resume as informações de variabilidade (variância) inerente à amostragem para cada um dos parâmetros avaliado com os métodos anterior e proposto obtidos com o método ANOVA Hierárquica.

Tabela V.5: Comparação da variabilidade da amostragem de carvão vegetal antes e depois da revisão dos procedimentos.

Variável	Variabilidade (variância) inerente à amostragem de carvão vegetal (coleta + preparação + análise)		
	Método anterior	Método proposto	Redução (%)
Umidade (%)	1,89	0,20	89
Carbono Fixo (%)	4,90	3,41	30
Cinzas (%)	9,77	0,25	97
Materiais Voláteis (%)	2,90	1,72	41
Tamanho Médio (mm)	1,75	1,06	39
Finos <10mm (%)	2,07	0,53	74

Para o minério de ferro, amostras coletadas sobre pilhas apresentaram maior variabilidade devido à segregação de material, enquanto que amostras coletadas em pontos de queda mostraram ser mais representativas por permitir coletar amostra de todo o fluxo estando em conformidade com a literatura e com as melhores práticas de amostragem.

Após revisar os procedimentos operacionais com base nas normas técnicas e nas melhores práticas de amostragem de minério de ferro, e tomar ações de melhoria no fluxo de recebimento e beneficiamento, um segundo experimento similar ao primeiro foi realizado. A Tabela V.6 resume as informações do antes (amostra coletada em pilha) e depois da revisão dos procedimentos no melhor ponto escolhido para avaliar a qualidade

do minério de ferro recebido (calhas vibratórias após os silos de recebimento) obtidas com o método ANOVA Hierárquica.

Tabela V.6: Comparação da variabilidade (variância) da amostragem de minério de ferro antes e depois da revisão dos procedimentos.

Variável	Variabilidade (variância) inerente à amostragem de minério de ferro (coleta + preparação + análise)		
	Método anterior (pilhas)	Método proposto (calhas)	Redução (%)
Ferro (%)	0,884	0,531	40
Sílica (%)	0,200	0,070	65
Alumina (%)	0,604	0,187	69
Manganês (%)	0,110	0,070	36
Fósforo (%)	0,001	0,000	78

Considerando todos os pontos de coleta de minério de ferro utilizados no estudo, foi calculado um indicador de variabilidade global que consiste da soma das variâncias dos elementos químicos de todos os pontos. Para o primeiro experimento, o valor desse indicador foi 9,8. No segundo experimento, após as modificações realizadas com o projeto, o valor do indicador caiu para 1,7 (uma redução de mais de 80%).

5.3. Modelos da “Etapa 1” - dados de 2003 a 2010

Na “Etapa 1” foram considerados os resultados médios e os desvios-padrão das variáveis: consumo de carvão vegetal de topo (kg/t gusa), produção (t), taxa de injeção (kg/t gusa) e período (chuva ou seca) de 2003 a 2010. A variável “período” é uma variável binária: chuva = 1 e seca = 0.

Os melhores modelos de superfície de resposta ajustados na “Etapa 1”, considerando somente efeitos significativos (efeitos principais, quadráticos e interações) a um nível de significância de 10%, apresentaram coeficientes de determinação R^2 ajustado de 89,4% para o Alto-Forno 1 e de 83,3% para o Alto-Forno 2. Os modelos, em unidades

codificadas (nível mais alto de cada variável = 1; nível médio = 0; nível mais baixo = -1), estão mostrados a seguir:

Modelo Etapa 1 – AF1:

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Consumo cv média (kg/t)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	528,036	47,888	14,576	0,000
Pelota	-105,549	22,568	-4,677	0,000
Período_	16,226	14,137	1,148	0,260
Injeção média (Kg/t)	-18,678	74,680	-0,250	0,804
Injeção d.p. (Kg/t)	-23,211	12,475	-1,861	0,072
Produção média (t)	49,118	21,251	2,311	0,027
Produção d.p. (t)	-85,770	15,930	-5,384	0,000
Consumo cv d.p. (kg/t)	179,988	42,175	4,268	0,000
Produção média (t)* Produção média (t)	-103,689	24,407	-4,248	0,000
Produção d.p. (t)*Produção d.p. (t)	-29,212	19,039	-1,534	0,135
Consumo cv d.p. (kg/t)* Consumo cv d.p. (kg/t)	-82,441	15,707	-5,249	0,000
Pelota*Período_	22,344	7,150	3,125	0,004
Pelota*Produção d.p. (t)	138,070	27,209	5,074	0,000
Pelota*Consumo cv d.p. (kg/t)	-251,280	44,291	-5,673	0,000
Período_*Injeção média (Kg/t)	9,790	9,310	1,052	0,301
Período_*Produção d.p. (t)	-34,035	10,391	-3,275	0,003
Período_* Consumo cv d.p. (kg/t)	38,233	12,240	3,124	0,004
Injeção média (Kg/t)* Injeção d.p. (Kg/t)	63,379	24,722	2,564	0,015
Injeção média (Kg/t)* Produção média (t)	-57,137	29,370	-1,945	0,061
Injeção média (Kg/t)* Produção d.p. (t)	61,146	18,502	3,305	0,002
Injeção média (Kg/t)* Consumo cv d.p. (kg/t)	-86,828	38,515	-2,254	0,031
Injeção d.p. (Kg/t)* Produção média (t)	-101,131	28,877	-3,502	0,001
Injeção d.p. (Kg/t)* Produção d.p. (t)	71,235	23,630	3,015	0,005
Injeção d.p. (Kg/t)* Consumo cv d.p. (kg/t)	70,257	43,721	1,607	0,118
Produção média (t)* Consumo cv d.p. (kg/t)	192,565	43,301	4,447	0,000
Produção d.p. (t)* Consumo cv d.p. (kg/t)	98,337	33,948	2,897	0,007

S = 16,8508 PRESS = 83552,7

R-Sq = 95,08% R-Sq(pred) = 54,75% R-Sq(adj) = 89,39%

Modelo Etapa 1 – AF2

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Consumo cv média (kg/t)

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1046,76	93,721	2,625	0,012
Período	-525,40	121,664	-4,318	0,000
Pelota (%)	-7,63	3,172	-2,406	0,020
Injeção média (kg/t)	0,27	2,869	0,093	0,926
Injeção dp (kg/t)	-7,10	2,380	-2,983	0,004
Produção média (t)	0,24	1,300	0,181	0,857
Produção dp (t)	7,77	2,456	3,164	0,003
Consumo CV dp (kg/t)	-9,05	2,406	-3,761	0,000
Pelota (%)*Pelota (%)	-0,06	0,020	-3,120	0,003
Injeção média (kg/t)* Injeção média (kg/t)	-0,01	0,009	-1,246	0,219
Injeção dp (kg/t)*Injeção dp (kg/t)	0,19	0,060	3,151	0,003
Produção média (t)* Produção média (t)	-0,00	0,001	-1,641	0,107
Produção dp (t)*Produção dp (t)	-0,01	0,004	-1,481	0,145
Período*Injeção média (kg/t)	0,82	0,440	1,862	0,069
Período*Injeção dp (kg/t)	1,87	1,477	1,268	0,211
Período*Produção média (t)	0,67	0,140	4,763	0,000
Período*Consumo CV dp (kg/t)	1,05	0,379	2,777	0,008
Pelota (%)*Injeção dp (kg/t)	0,20	0,039	5,138	0,000
Pelota (%)*Produção média (t)	0,02	0,006	3,110	0,003
Pelota (%)*Produção dp (t)	-0,03	0,013	-2,146	0,037
Pelota (%)* Consumo CV dp (kg/t)	-0,03	0,014	-1,883	0,066
Injeção média (kg/t)* Produção média (t)	0,00	0,003	1,191	0,239
Injeção média (kg/t)*Produção dp (t)	-0,02	0,009	-2,377	0,021
Injeção média (kg/t)* Consumo CV dp (kg/t)	0,03	0,010	2,604	0,012
Injeção dp (kg/t)*Produção dp (t)	-0,08	0,027	-2,868	0,006
Produção média (t)*Produção dp (t)	-0,00	0,003	-1,406	0,166
Produção média (t)* Consumo CV dp (kg/t)	0,01	0,003	3,984	0,000

S = 21,0270 PRESS = 99993,9

R-Sq = 90,82% R-Sq(pred) = 57,63% R-Sq(adj) = 83,33%

As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam os gráficos dos resíduos padronizados dos modelos. Resíduo é a diferença entre o valor ajustado pelo modelo e o valor real do banco de dados. Resíduo padronizado é o valor do resíduo dividido pelo desvio-padrão de todos os resíduos. Para verificar se os resíduos seguem uma distribuição Normal, utilizam-se os gráficos “Probabilidade Normal” e “Histograma”, sendo que no primeiro gráfico o perfil esperado é o de uma reta, e, no segundo, o de um sino. Para verificar a aleatoriedade dos resíduos em torno do valor zero, utiliza-se o gráfico “Resíduos X Valores Ajustados”. Para verificar se a variabilidade dos resíduos é constante, utiliza-se o gráfico “Resíduos X Ordem”. Esses dois últimos gráficos precisam apresentar pontos aleatórios, sem nenhum padrão definido.

Os perfis dos gráficos apresentados nas Figuras 5.12 e 5.13 atendem aos requisitos de normalidade, média em torno de zero e variância constante, validando os pré-requisitos da metodologia.

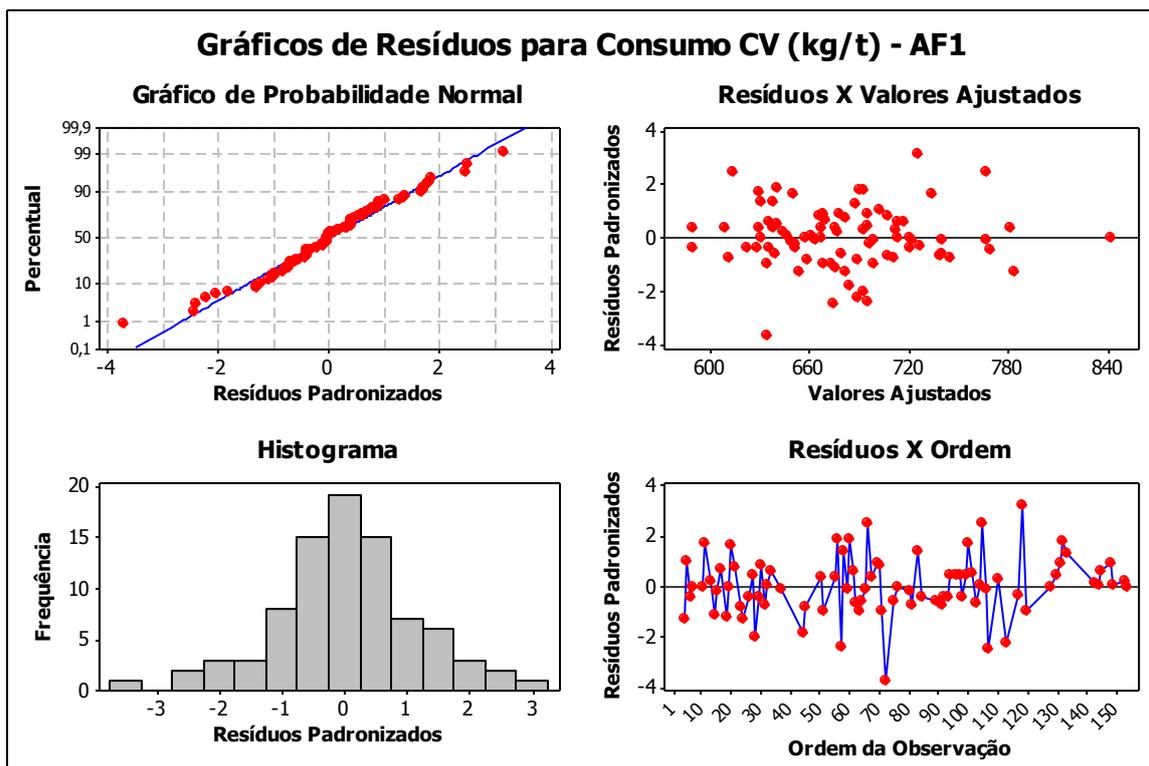


Figura 5.12: Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 1 – “Etapa 1”.

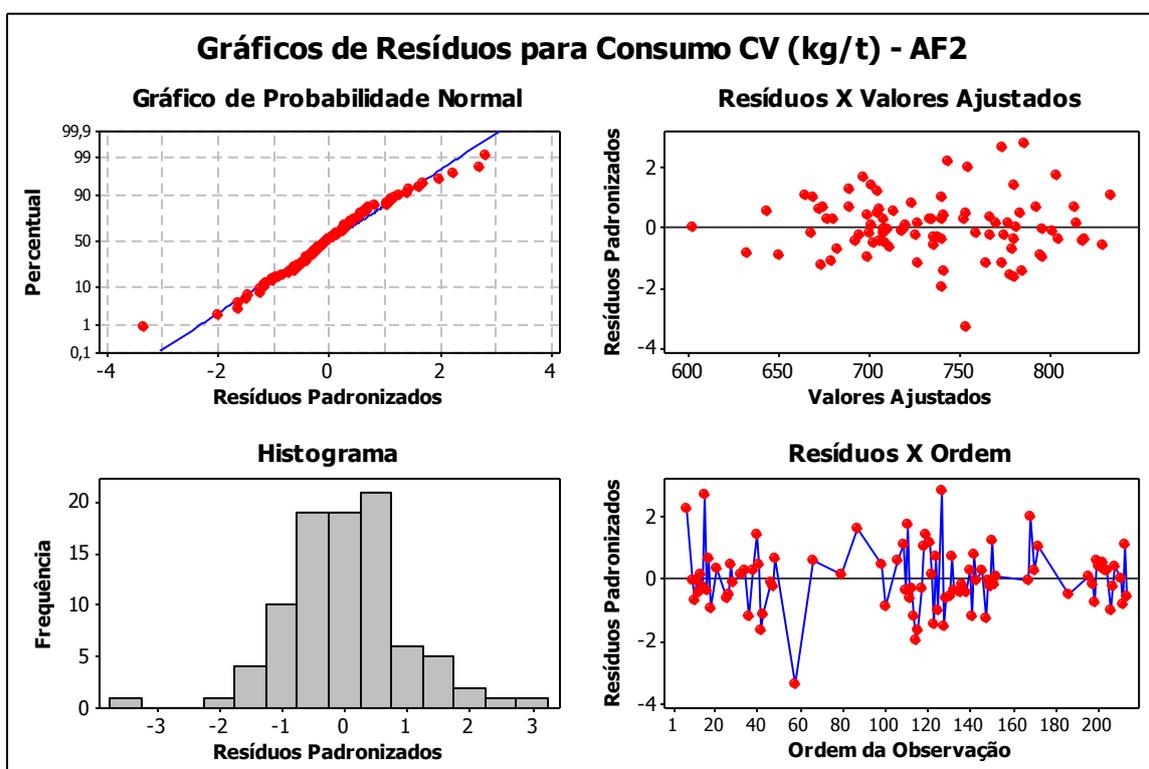


Figura 5.13: Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 2 – “Etapa 1”.

Gráficos de curvas de níveis foram elaborados considerando no eixo x “Pelota (%) utilizada na Carga Ferrosa” e no eixo y “Taxa de Injeção de Carvão Vegetal (kg/t gusa)”, considerando valores reais já utilizados nos altos-fornos. A resposta, “Consumo de Carvão Vegetal de Topo (kg/t gusa)”, está visualmente diferenciada por cores nas curvas de nível. Os dados de Pelota, Taxa de Injeção e de Consumo de Carvão Vegetal de Topo estão baseados nos dados divulgados nos “Encontros de Especialistas em Altos-Fornos a Carvão Vegetal” de números 55 a 73.

Essas curvas permitem ter uma estimativa imediata do custo e são usadas estrategicamente em frente às ofertas e oportunidades no mercado de pelota e minério de ferro com retorno financeiro imediato a fim de se alcançar melhores resultados econômicos.

As Figuras 5.14 a 5.17 exemplificam curvas de níveis do Alto-Forno 1, meses de chuva e seca respectivamente, considerando a produção diária de ferro-gusa variando de 700 a 1200t (de 100 em 100t) e mantendo fixas as demais variáveis do modelo.

Para o Alto-Forno 2, exemplos das curvas de níveis podem ser visualizadas nas Figuras 5.18 e 5.19, chuva e seca respectivamente, considerando a produção diária de ferro-gusa variando de 400 a 600t (de 100 em 100t) e mantendo fixas as demais variáveis do modelo.

Para construir gráficos de curvas de níveis como os mostrados nas Figuras 5.14 a 5.19, os eixos x e y precisam contemplar faixas de valores reais de operação e as demais variáveis do modelo de superfície de resposta precisam ser fixadas. Como exemplo de interpretação das curvas de níveis, para produzir 800t/dia (valor fixo) de ferro-gusa no Alto-Forno 1 em período de chuva, pode-se usar de 22 a 53,5% de pelota, com taxa de injeção de carvão vegetal variando de 159,4 a 178,7kg/t gusa. Para esses valores, o gráfico mostra que à medida que se aumentam a porcentagem de pelotas e a taxa de injeção de carvão vegetal, menor será o consumo de carvão vegetal de topo. Nesse exemplo, o consumo de carvão vegetal de topo está variando de 486 a 504kg/t gusa.

Como a pelota possui maior estabilidade de análise química, melhores resultados de crepitação, RDI e redutibilidade, uma maior quantidade de pelota na carga ferrosa melhora a permeabilidade dos gases dentro dos altos-fornos. Essas características, associadas com uma boa distribuição e granulometria da carga, melhoram o contato gás-sólido na zona de preparação e permitem reduzir a temperatura de gusa e o consumo de carvão vegetal.

O aumento da taxa de injeção de finos, até o limite que proporcione uma boa taxa de substituição e não reduza a permeabilidade, também beneficiam a redução do consumo de carvão vegetal de topo. Principalmente em conjunto com um sistema de injeção que permite uma melhor distribuição do carvão pulverizado por lança e garante um melhor fluxo de gases e calor no interior do forno.

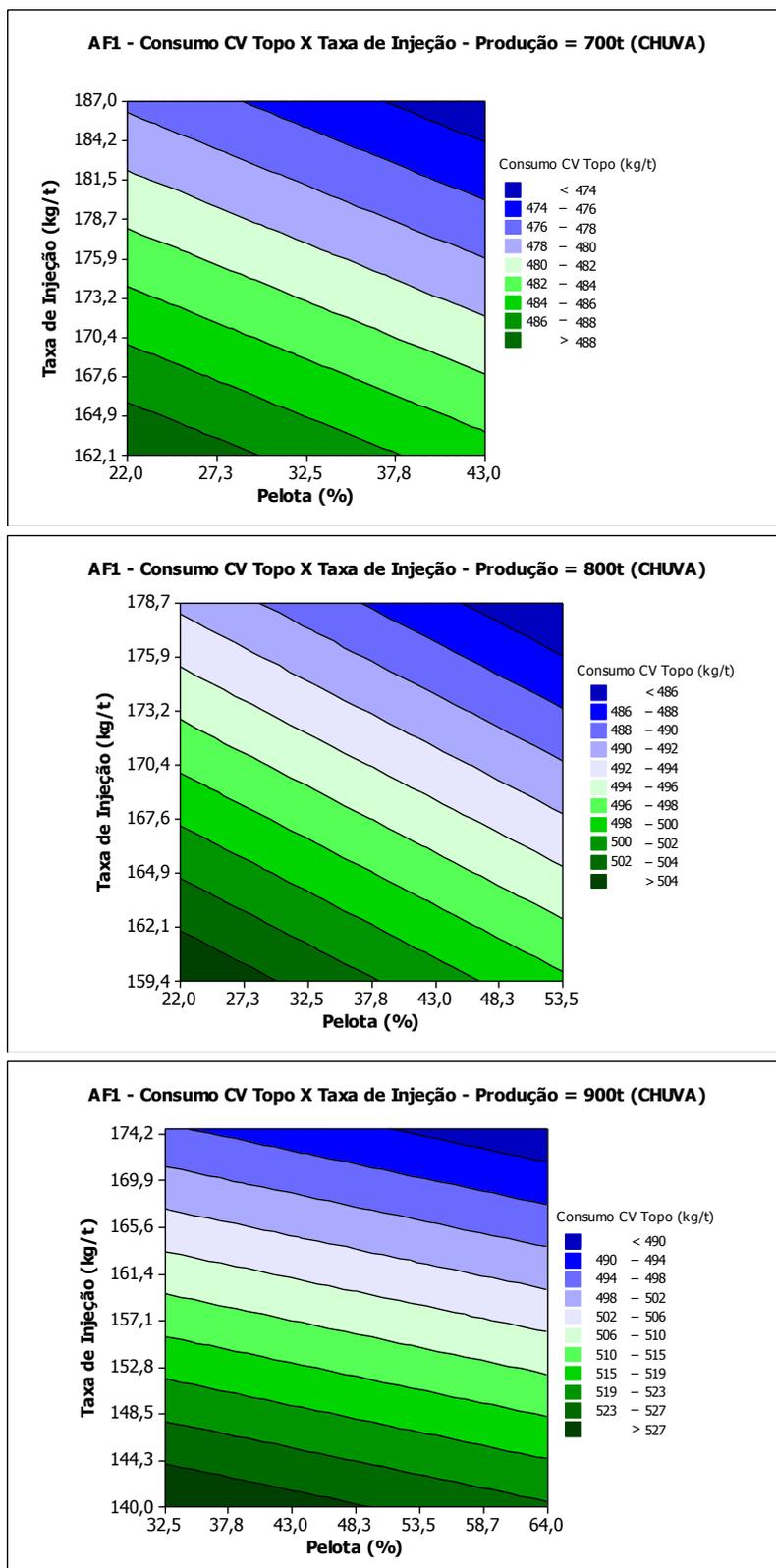


Figura 5.14: Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (chuva) com produção diária variando de 700 a 900t de ferro-gusa – “Etapa 1”.

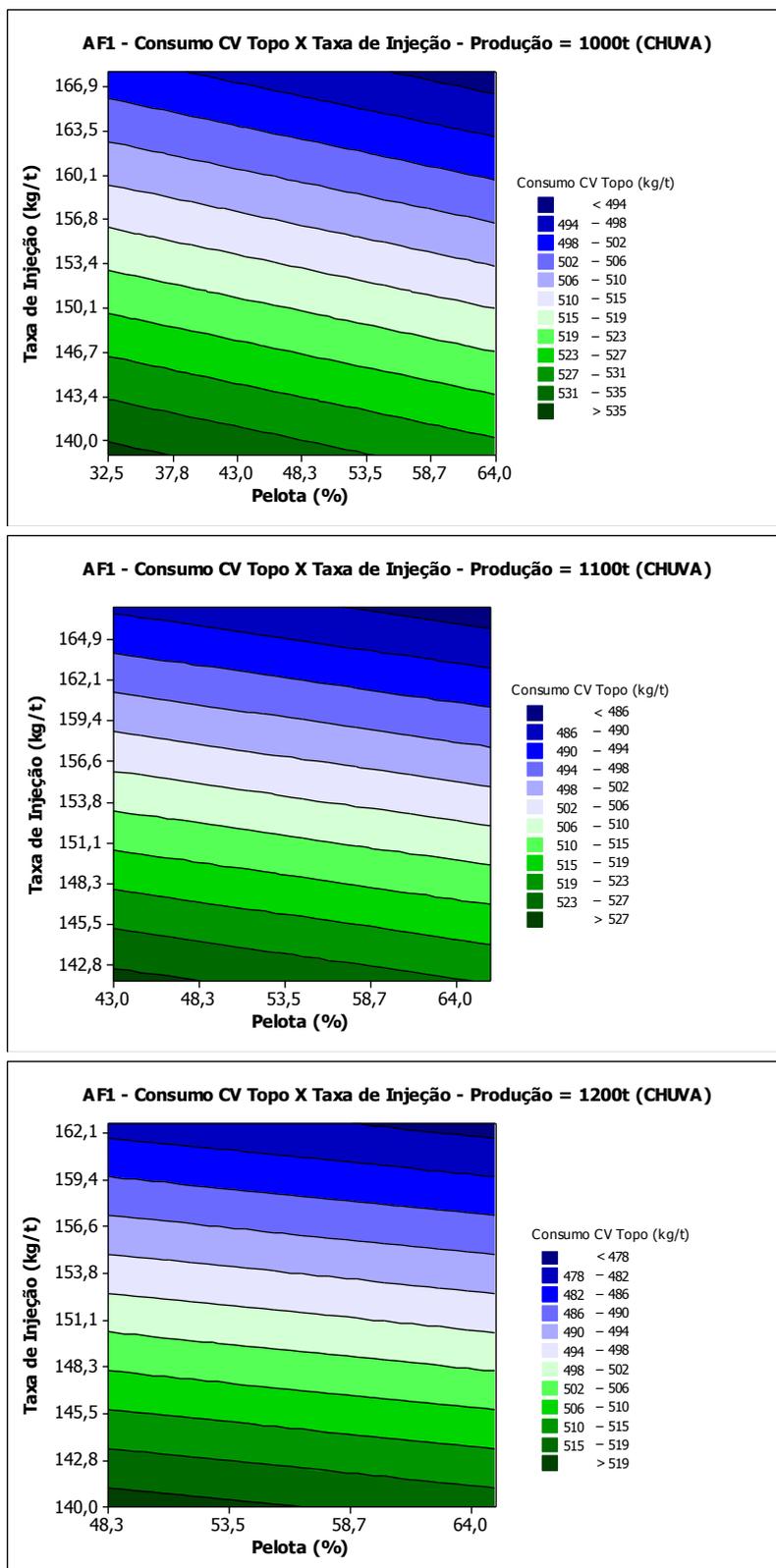


Figura 5.15: Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (chuva) com produção diária variando de 1.000 a 1.200t de ferro-gusa – “Etapa 1”.

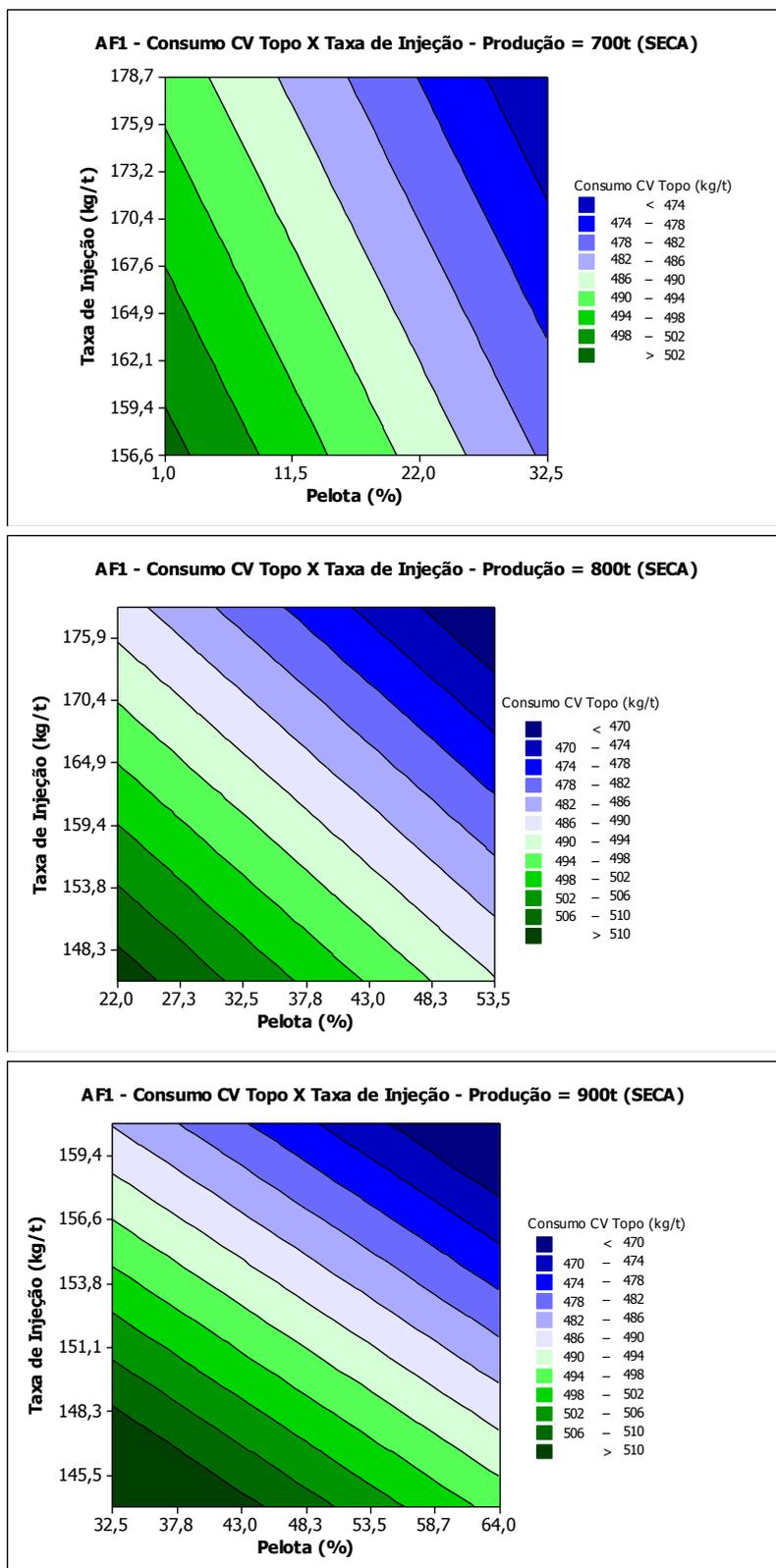


Figura 5.16: Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (seca) com produção diária variando de 700 a 900t de ferro-gusa – “Etapa 1”.

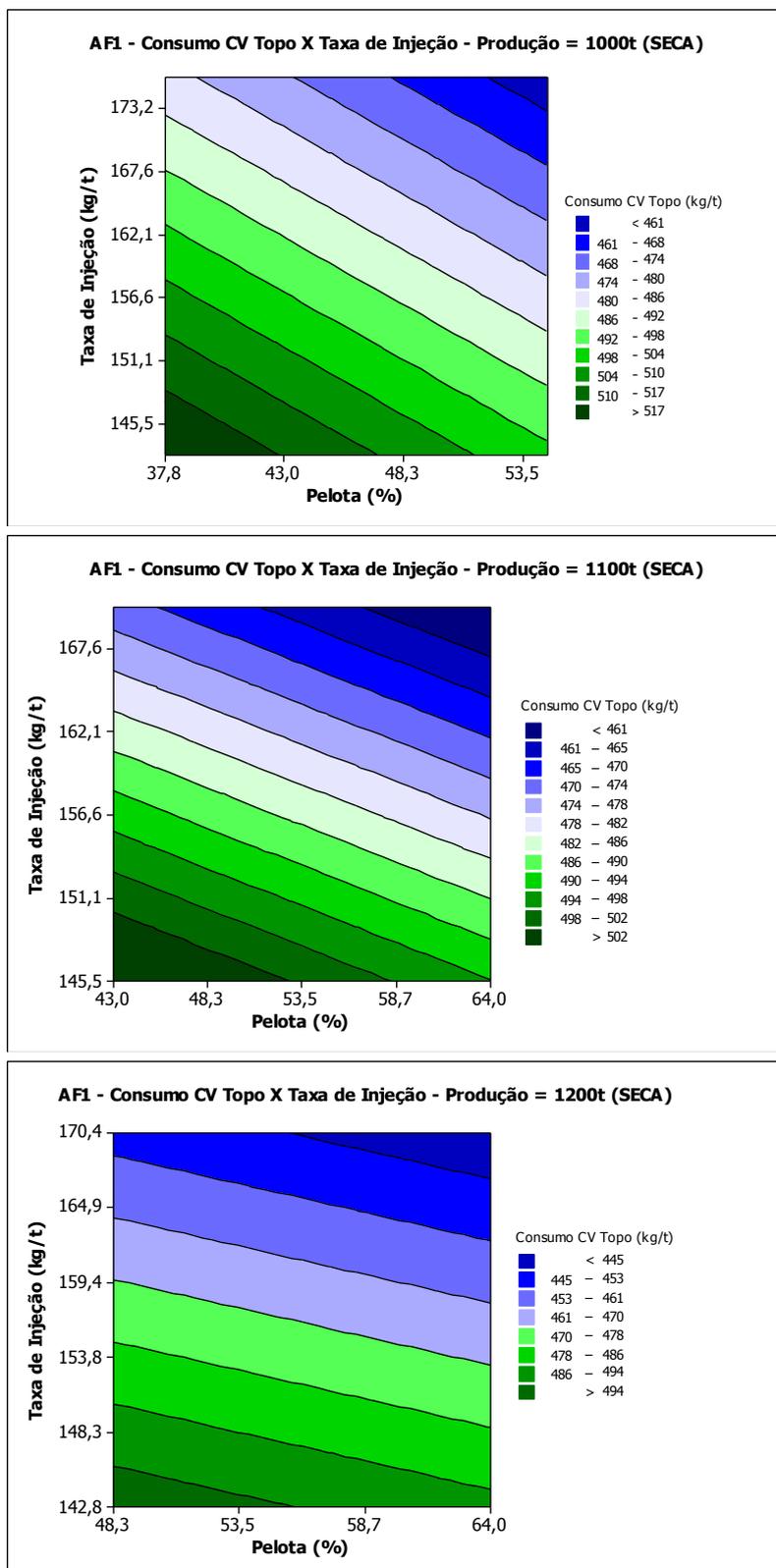


Figura 5.17: Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (seca) com produção diária variando de 1.000 a 1.200t de ferro-gusa – “Etapa 1”.

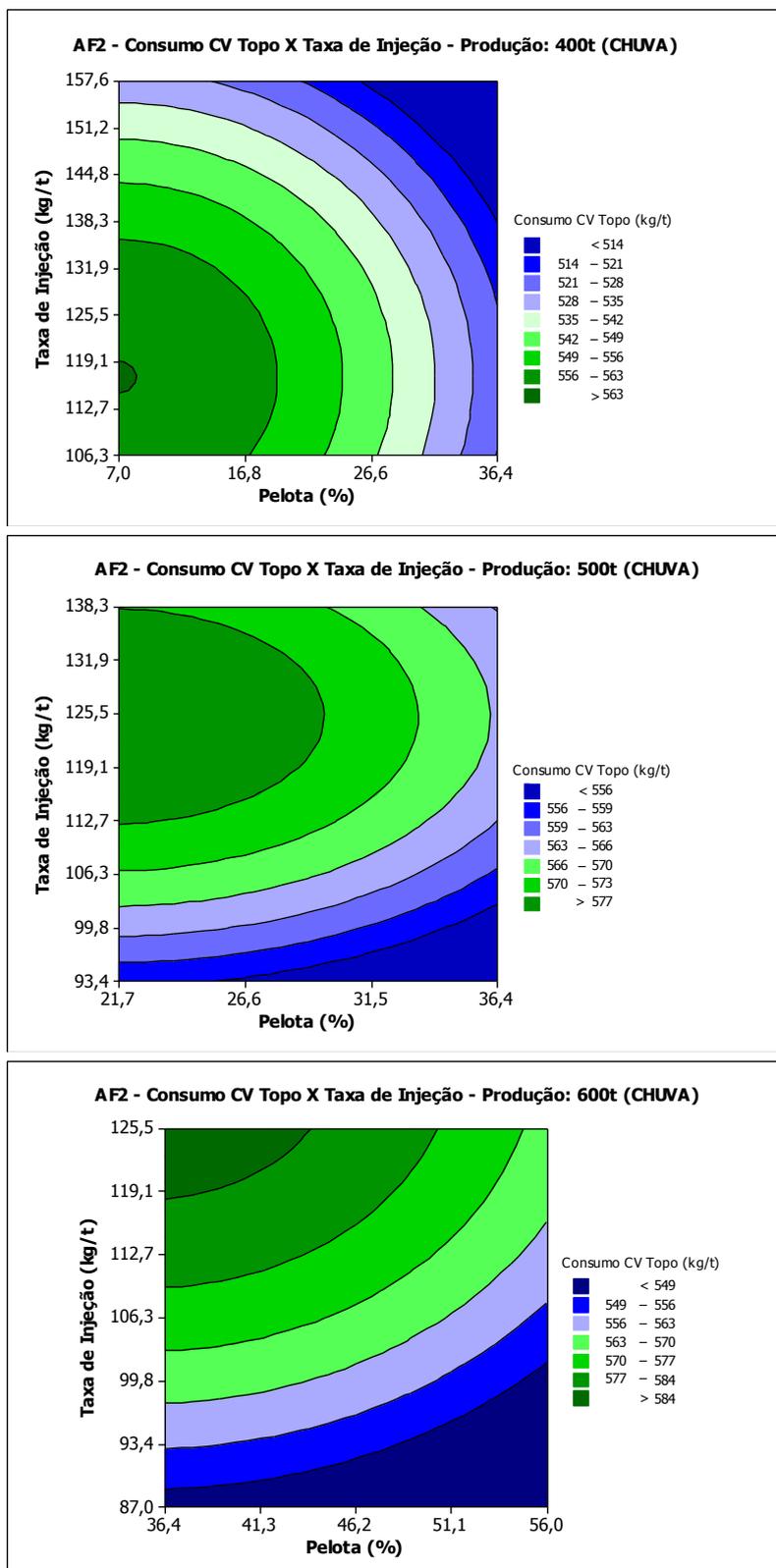


Figura 5.18: Curvas de níveis do Alto-Forno 2 (chuva) com produção diária variando de 400 a 600t de ferro-gusa – “Etapa 1”.

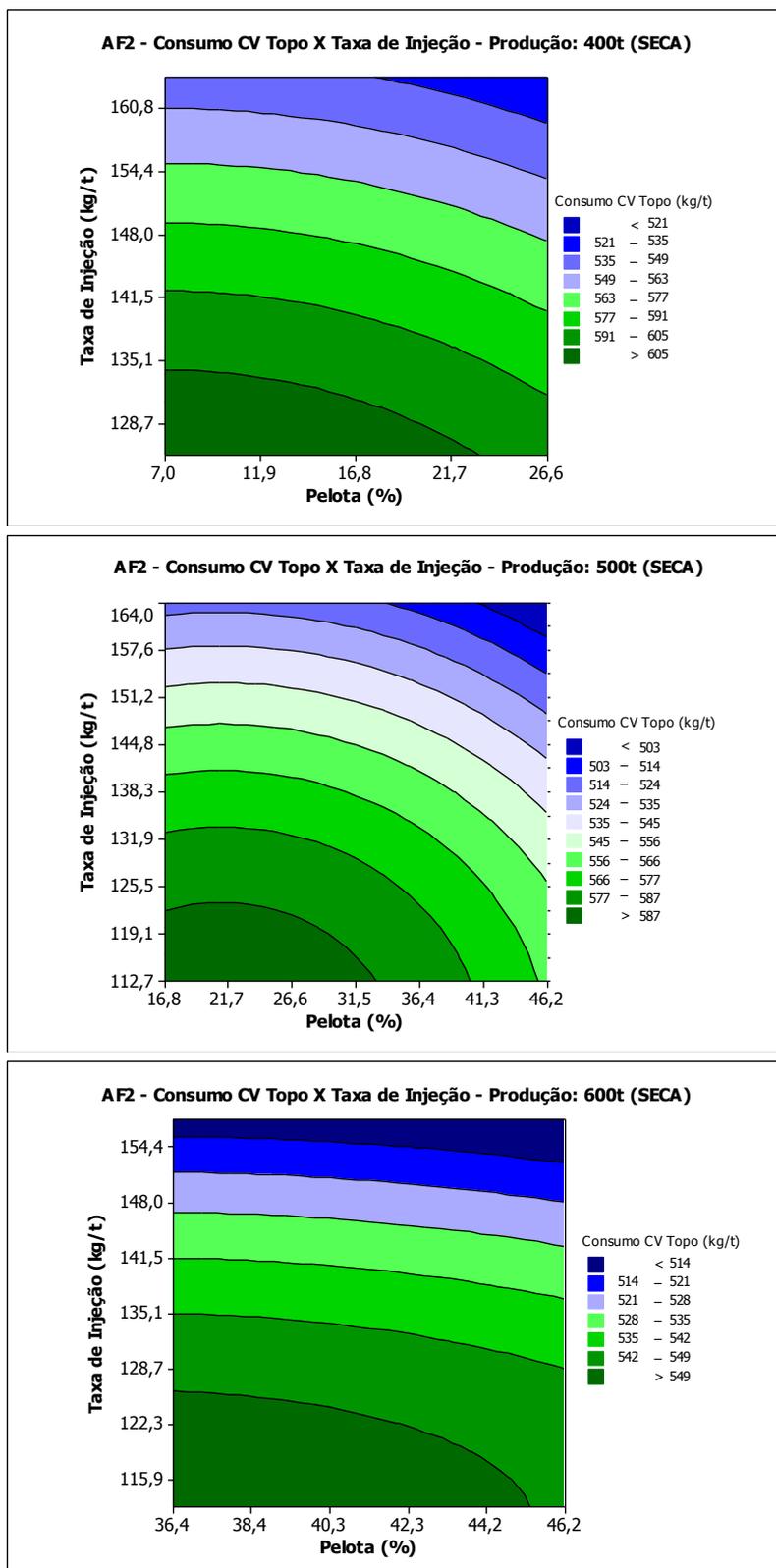


Figura 5.19: Curvas de níveis do Alto-Forno 2 (seca) com produção diária variando de 400 a 600t de ferro-gusa – “Etapa 1”.

Os modelos de regressão construídos com os pontos médios das diversas curvas de níveis, com o objetivo de facilitar a utilização das informações obtidas, estão ilustrados nas Figuras 5.20 a 5.23.

Após definir o plano de produção diária de ferro-gusa dos altos-fornos, calcula-se qual o percentual de pelotas a ser utilizado no Alto-Forno 1 utilizando o modelo da Figura 5.20, e do Alto-Forno 2 utilizando o modelo da Figura 5.21.

Devido a pelota ser um produto produzido industrialmente através da aglomeração de finos de minério, ela possui propriedades físicas, químicas e metalúrgicas (RDI, redutibilidade, amolecimento e fusão) bem mais homogêneas que o minério de ferro, o qual é um recurso natural direto. O percentual de pelotas utilizado na carga ferrosa apresenta uma correlação positiva com a produção de ferro-gusa. Isto é, de um modo em geral, quanto maior a porcentagem de pelotas, maior será produção de ferro-gusa.

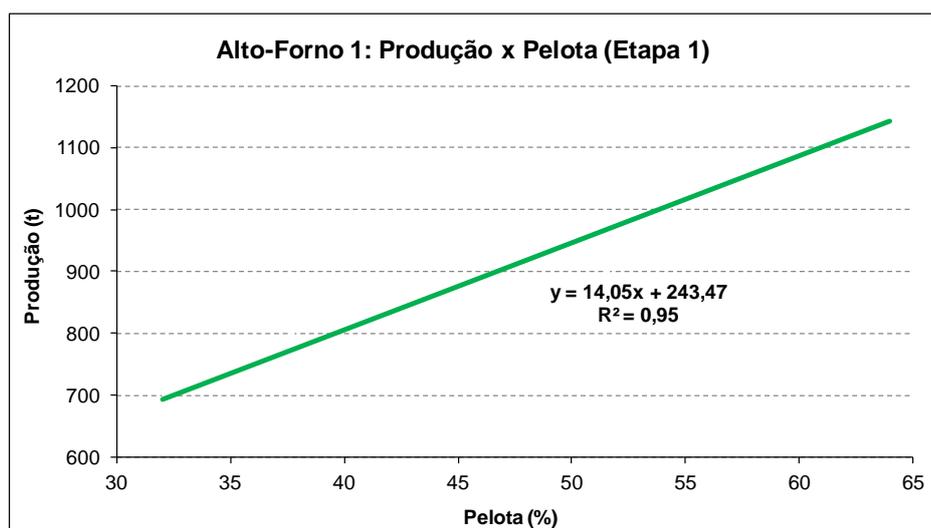


Figura 5.20: Determinação do percentual de pelotas a ser utilizado na carga ferrosa em função da produção diária (t) de ferro-gusa do Alto-Forno 1 – “Etapa 1”.

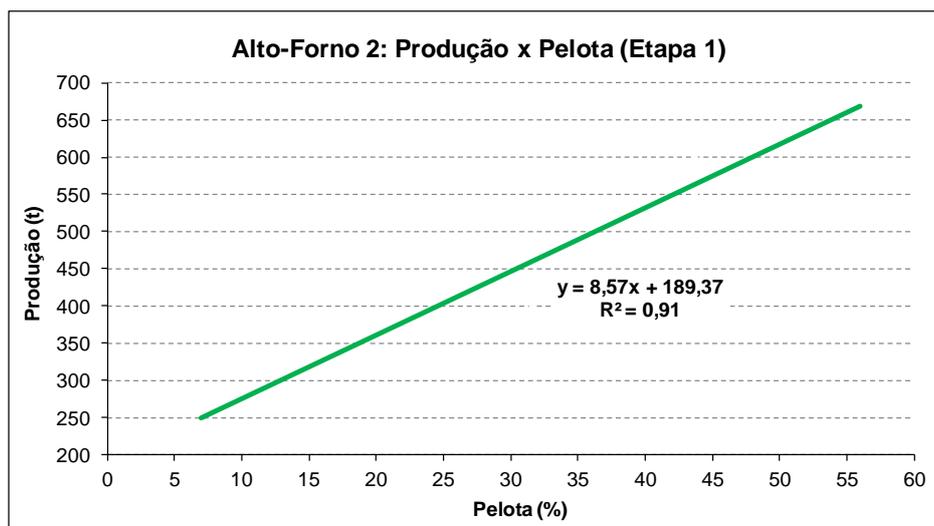


Figura 5.21: Determinação do percentual de pelotas a ser utilizado na carga ferrosa em função da produção diária (t) de ferro-gusa do Alto-Forno 2 – “Etapa 1”.

Definidos os percentuais de pelota na carga ferrosa dos altos-fornos, o próximo passo é estimar os consumos de carvão vegetal de topo (kg/t gusa) levando em consideração se o período é de chuva ou de seca. No período de chuva, os consumos de carvão vegetal são maiores devido aos maiores teores de umidade das matérias-primas. As Figuras 5.22 e 5.23 mostram os modelos para o Alto-Forno 1 e Alto-Forno 2, respectivamente.

Lembrando que o consumo de carvão vegetal é maior no período chuvoso porque a operação dos altos-fornos muda muito com a utilização de carvão vegetal com maior teor de umidade. A geração de finos aumenta com a saída de água dentro dos altos-fornos, tornando-os menos permeáveis e prejudicando a produtividade.

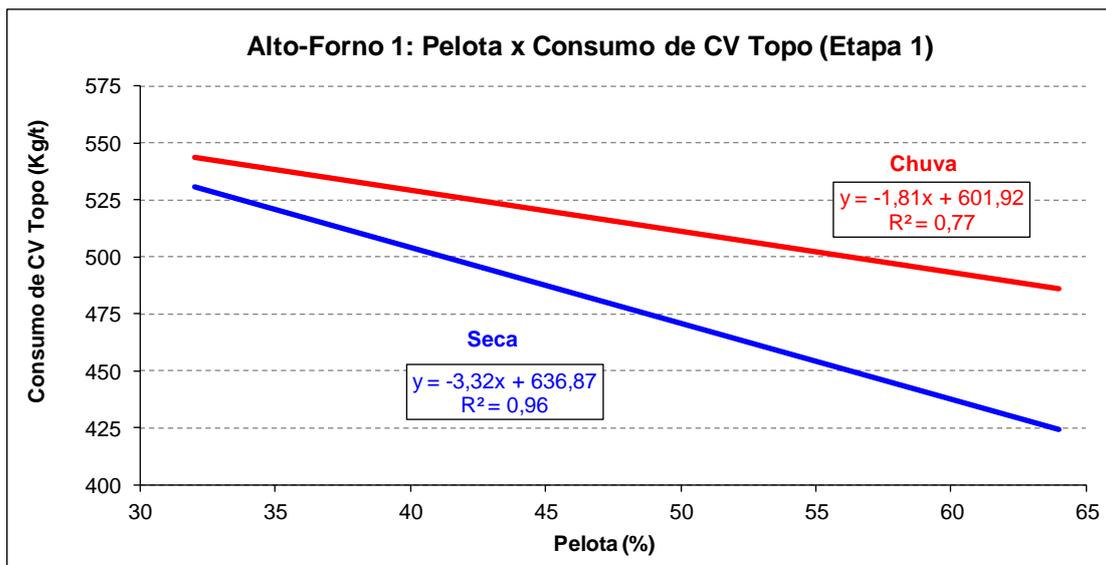


Figura 5.22: Estimativa do consumo de carvão vegetal de topo (kg/t gusa) do Alto-Forno 1 em função do percentual de pelotas na carga ferrosa – “Etapa 1”.

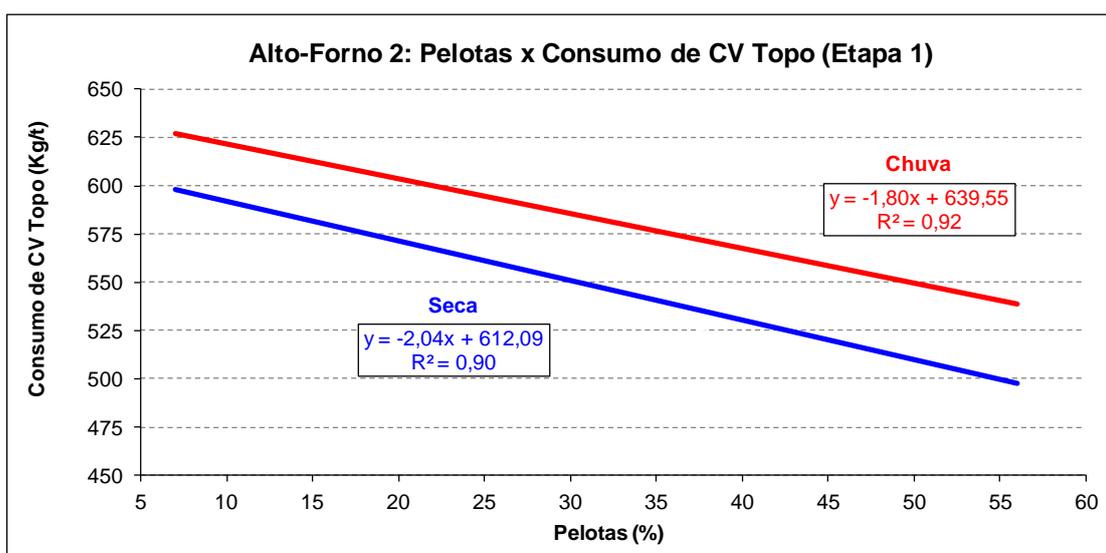


Figura 5.23: Estimativa do consumo de carvão vegetal de topo (kg/t gusa) do Alto-Forno 2 em função do percentual de pelotas na carga ferrosa – “Etapa 1”.

5.4. Modelos da “Etapa 2” - dados de 2003 a 2011

Na “Etapa 2” do trabalho, foram considerados os resultados médios e os desvios-padrão das variáveis: consumo de carvão vegetal de topo, produção e taxa de injeção, separados pelo período de chuva e de seca, de 2003 a 2011, além das variáveis relacionadas às qualidades do carvão vegetal e da carga ferrosa. Os dados estão baseados nos dados divulgados nos “Encontros de Especialistas em Altos-Fornos a Carvão Vegetal” de números 55 a 73.

O primeiro passo foi correlacionar todas as variáveis duas a duas. Foram selecionadas as variáveis que apresentaram maior impacto no consumo de carvão vegetal e descartadas as variáveis com baixo ou nenhum impacto. Também foram excluídas as variáveis que apresentavam alto índice de correlação com alguma variável dentre as já selecionadas para o modelo a fim de evitar o problema de multicolinearidade (problema comum em regressões onde as variáveis independentes possuem relações lineares exatas ou aproximadamente exatas).

Diferente da “Etapa 1”, na qual havia uma variável binária “período” para identificar se era período de chuva ou seca, na “Etapa 2” foram ajustados modelos separados para os períodos de chuva e para os períodos de seca. Isso porque, ao trabalhar com um número maior de variáveis, havia uma limitação computacional - o MINITAB 16 (MINITAB, 2010) apresenta um limite para o número de variáveis em modelos de superfície de resposta - e optou-se por eliminar a variável “período”.

Os melhores modelos de superfície de resposta ajustados na “Etapa 2”, considerando somente efeitos significativos a um nível de significância de 10%, apresentaram coeficientes de determinação R^2 de 88,3% e 87,1% para o Alto-Forno 1, chuva e seca, respectivamente, e de 76,2% e 70,1% para o Alto-Forno 2, chuva e seca, respectivamente. Os modelos estão mostrados a seguir considerando as variáveis em unidades codificadas.

Modelo Etapa 2 - Chuva – AF1

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for Consumo CV (Kg/t) Média

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1063,6	396,7	2,680	0,013
Pelota (%)	246,4	36,7	6,706	0,000
Injeção (kg/t) Média	23,6	28,7	0,823	0,418
Produção (t) Média	-47,3	5,7	-8,306	0,000
Carbono Fixo (%) Média	-406,7	318,0	-1,279	0,212
TM (mm) Média	70,9	201,0	0,353	0,727
Fe (%) Média	-352,0	68,6	-5,132	0,000
Injeção (kg/t) Média*	0,1	0,0	5,381	0,000
Injeção (kg/t) Média				
Carbono Fixo (%) Média*	2,0	1,8	1,081	0,290
Carbono Fixo (%) Média				
TM (mm) Média*TM (mm) Média	-2,8	1,0	-2,875	0,008
Pelota (%)*Injeção (kg/t) Média	0,1	0,0	2,554	0,017
Pelota (%)*Carbono Fixo (%) Média	-2,5	0,4	-5,700	0,000
Pelota (%)*TM (mm) Média	-0,3	0,2	-1,389	0,177
Pelota (%)*Fe (%) Média	-1,0	0,1	-6,495	0,000
Injeção (kg/t) Média*	-1,3	0,3	-4,580	0,000
Carbono Fixo (%) Média				
Injeção (kg/t) Média*TM (mm) Média	-0,7	0,2	-2,998	0,006
Injeção (kg/t) Média*Fe (%) Média	0,9	0,3	3,322	0,003
Produção (t) Média*	0,4	0,1	6,316	0,000
Carbono Fixo (%) Média				
Produção (t) Média*TM (mm) Média	0,1	0,0	3,693	0,001
Produção (t) Média*Fe (%) Média	0,2	0,0	8,463	0,000
Carbono Fixo (%) Média*TM (mm) Média	2,5	2,4	1,074	0,293

S = 16,3716 PRESS = 32409,5

R-Sq = 94,47% R-Sq(pred) = 74,30% R-Sq(adj) = 88,31%

Modelo Etapa 2 - Seca – AF1

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for CV Consumo CV (Kg/t) Média

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1110,7	166,32	6,657	0,000
Pelota (%)	68,1	34,36	1,981	0,057
Injeção (kg/t) Média	-103,3	19,36	-5,336	0,000
Produção (t) Média	-17,2	3,40	-5,075	0,000
Carbono Fixo (%) Média	1,7	6,20	0,267	0,791
Finos (%) Média	12,5	4,79	2,615	0,014
Fe (%) Média	-527,2	85,58	-6,161	0,000
Al2O3 (%) Média	58,2	21,57	2,697	0,011
Pelota (%)*Pelota (%)	0,3	0,04	6,153	0,000
Injeção (kg/t) Média*	0,1	0,01	5,850	0,000
Injeção (kg/t) Média				
Produção (t) Média*	0,0	0,00	2,317	0,027
Produção (t) Média				
Pelota (%)*Carbono Fixo (%) Média	-0,6	0,45	-1,440	0,160
Pelota (%)*Finos (%) Média	-2,2	0,30	-7,397	0,000
Pelota (%)*Al2O3 (%) Média	-15,5	2,07	-7,497	0,000
Injeção (kg/t) Média*Fe (%) Média	1,3	0,28	4,609	0,000
Produção (t) Média*Fe (%) Média	0,3	0,05	5,003	0,000

S = 15,0082 PRESS = 25373,3

R-Sq = 92,85% R-Sq(pred) = 74,03% R-Sq(adj) = 87,09%

Modelo Etapa 2 – Chuva – AF2

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for Consumo CV (Kg/t) Média

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	418,04	283,41	1,475	0,145
Pelota (%)	-23,28	8,62	-2,702	0,009
Produção (t) Média	-0,24	0,08	-2,979	0,004
Carbono Fixo (%)	0,74	3,61	0,206	0,838
Cinzas (%) Média	31,90	8,97	3,555	0,001
Umidade CV (%) Média	252,13	77,72	3,244	0,002
TM CV (mm) Média	-18,72	6,97	-2,687	0,009
Umidade CV (%) Média*	-22,02	6,99	-3,150	0,003
Umidade CV (%) Média				
Pelota (%)*TM CV (mm) Média	0,65	0,23	2,797	0,007

S = 32,2309 PRESS = 114857

R-Sq = 81,17% R-Sq(pred) = 65,86% R-Sq(adj) = 76,22%

Modelo Etapa 2 – Seca – AF2

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for Consumo CV (kg/t) Média

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-6852	1503,8	-4,556	0,000
Pelota (%)	-215	40,9	-5,246	0,000
Produção (t) Média	-15	4,4	-3,377	0,001
Carbono Fixo (%) Média	1469	462,4	3,177	0,002
Umidade CV (%) Média	3605	984,5	3,662	0,001
TM CV (mm) Média	1501	327,5	4,584	0,000
Fe (%)	1196	387,2	3,088	0,003
Carbono Fixo(%)Média*Carbono Fixo(%)Média	-7	2,7	-2,586	0,012
Fe(%)*Fe(%)	-5	2,7	-1,884	0,064
Pelota (%)*Produção (t) Média	-0	0,0	-2,373	0,021
Pelota (%)*Carbono Fixo (%) Média	2	0,4	4,264	0,000
Pelota (%)*Umidade CV (%) Média	-1	0,4	-2,878	0,005
Pelota (%)*Fe (%)	2	0,3	4,741	0,000
Produção (t) Média*	1	0,1	5,940	0,000
Umidade CV (%) Média				
Produção(t) Média*TM CV(mm) média	0	0,0	3,604	0,001
Produção (t) Média*Fe	0	0,1	2,034	0,046
Carbono Fixo (%) Média*	-29	8,3	-3,482	0,001
Umidade CV (%) Média				
Carbono Fixo (%) Média*TM CV(mm) Média	-8	2,6	-3,281	0,002
Umidade CV(%) Média*Fe (%)	-26	7,8	-3,313	0,002
TM CV(mm) Média*Fe (%)	-14	3,0	-4,690	0,000

S = 29,4189 PRESS = 114205

R-Sq = 78,72% R-Sq(pred) = 56,13% R-Sq(adj) = 70,08%

As Figuras 5.24 a 5.27 apresentam os gráficos dos resíduos padronizados dos modelos mostrando que os mesmos atenderam aos requisitos de normalidade, média em torno de zero e variância constante.

O resíduo padronizado é a diferença entre o valor ajustado pelo modelo e o valor real do banco de dados, dividido pelo valor do desvio-padrão dos resíduos puros. Para verificar se os resíduos seguem uma distribuição Normal, utilizam-se os gráficos de “Probabilidade Normal” e o “Histograma”, sendo que no primeiro gráfico o perfil esperado é o de uma reta, e, no segundo, o de um sino. Para verificar a aleatoriedade dos resíduos em torno do valor zero utiliza-se o gráfico “Resíduos X Valores Ajustados”, e, para verificar se a variabilidade dos resíduos é constante, o gráfico “Resíduos X Ordem”. Esses dois últimos gráficos precisam apresentar pontos aleatórios, sem nenhum padrão definido.

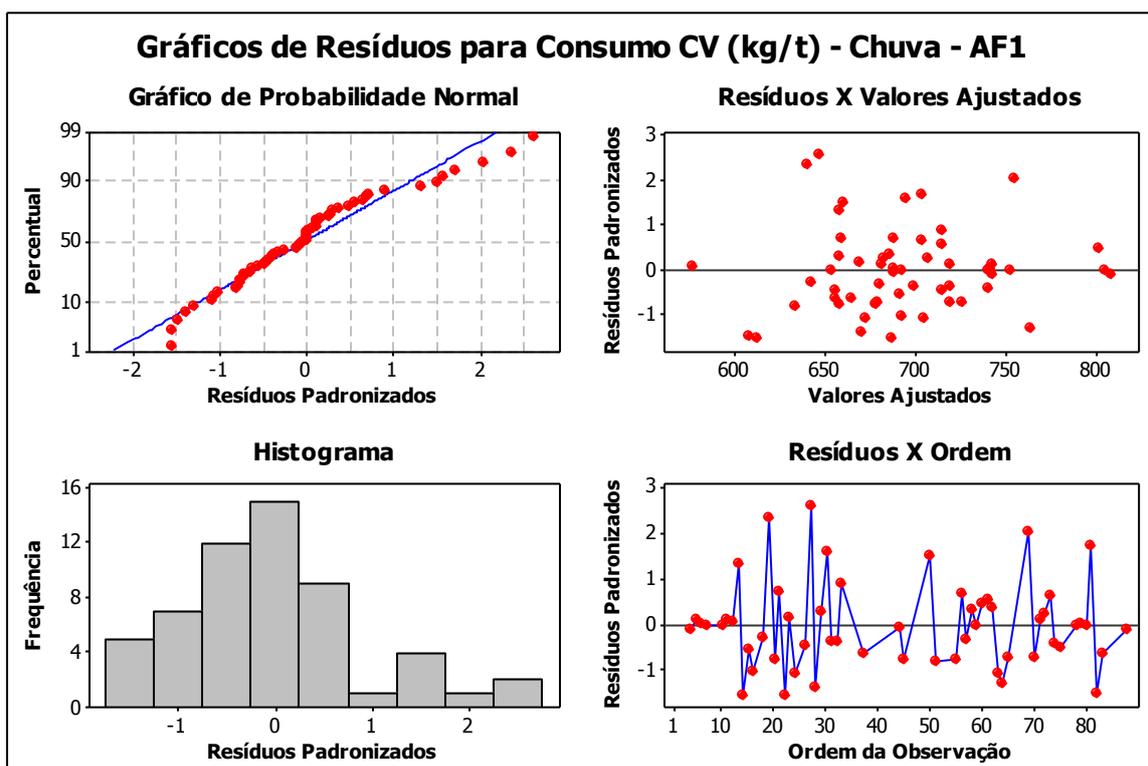


Figura 5.24: Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 1 – “Etapa 2”, chuva.

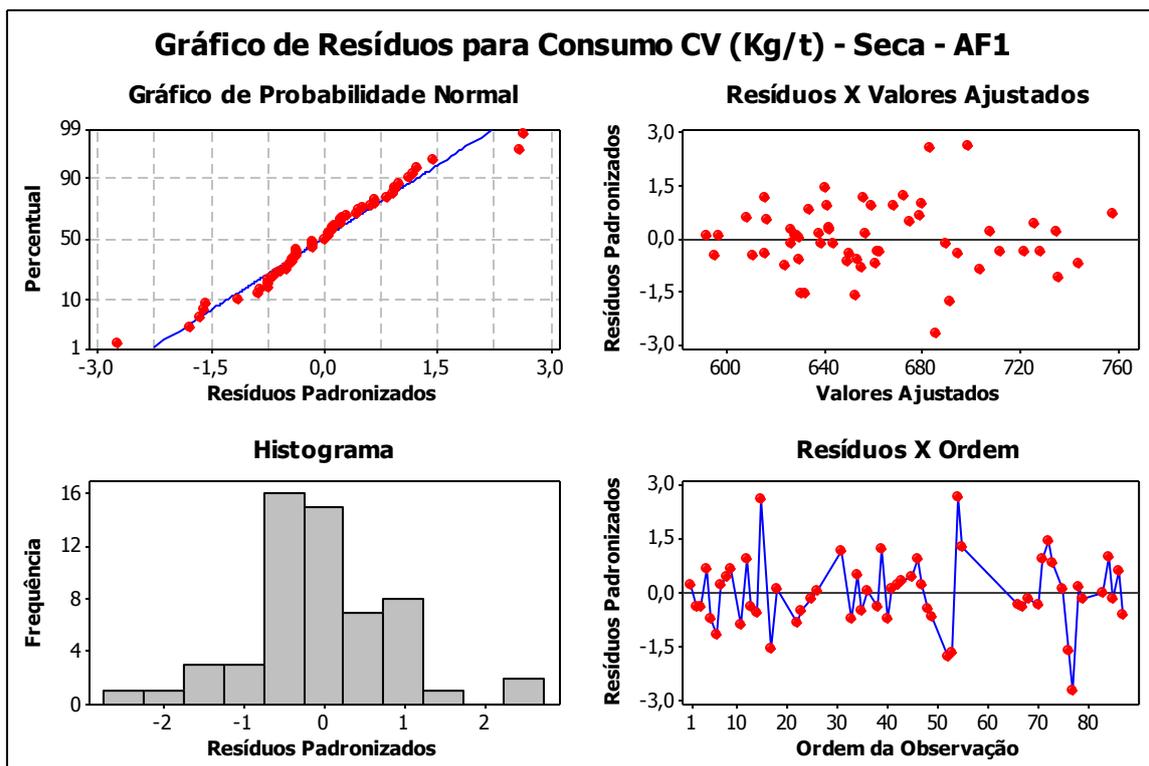


Figura 5.25: Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 1 – “Etapa 2”, seca.

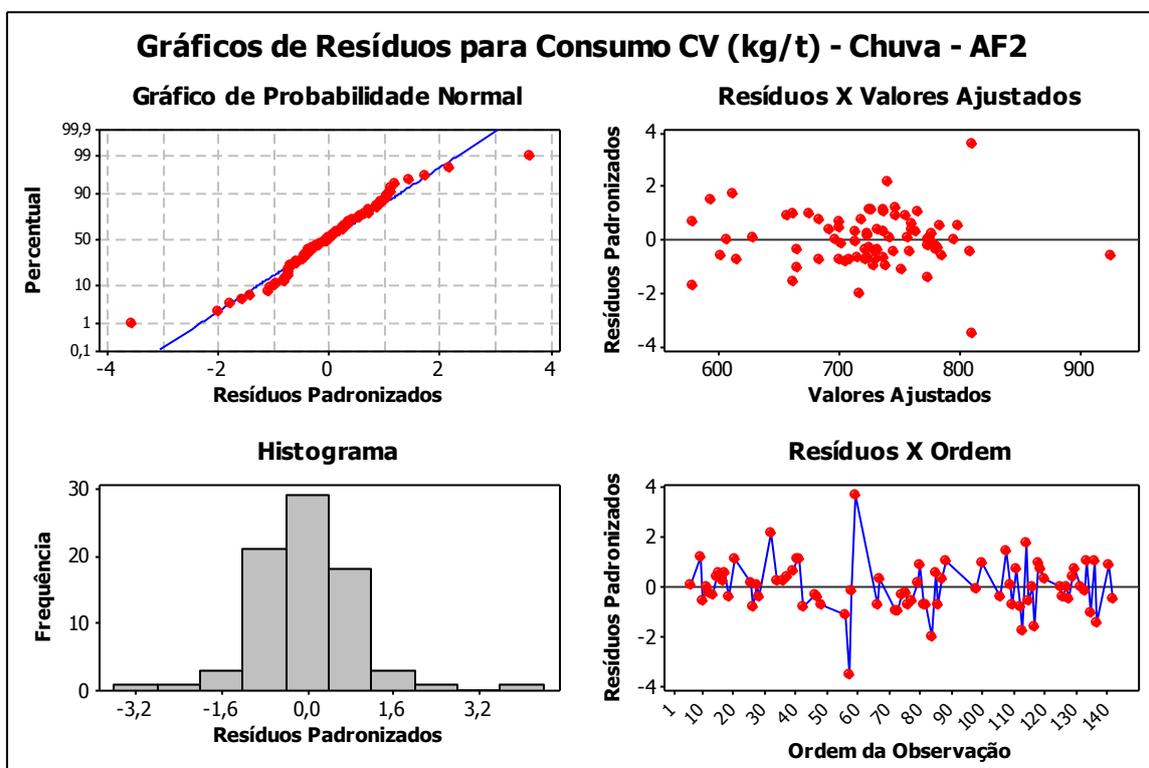


Figura 5.26: Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 2 – “Etapa 2”, chuva.

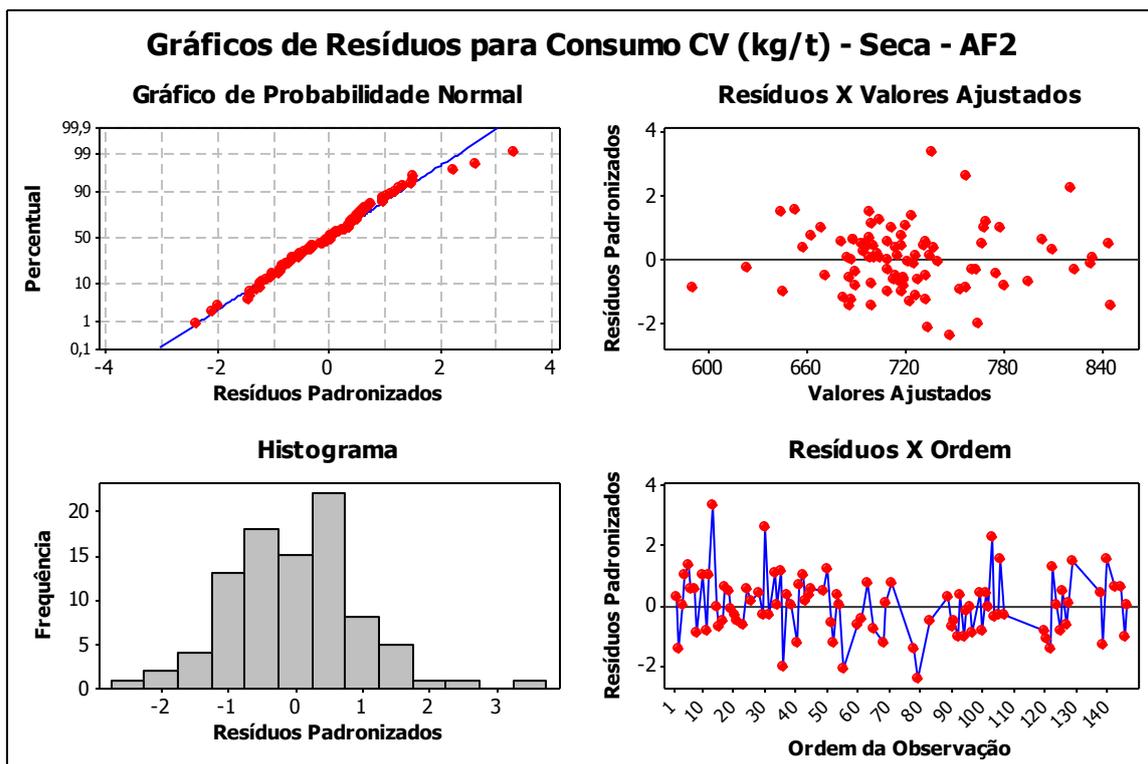


Figura 5.27: Gráficos de resíduos padronizados do MSR do Alto-Forno 2 – “Etapa 2”, seca.

Gráficos de curvas de níveis foram elaborados para o Alto-Forno 1 considerando no eixo x “Pelota (%) utilizada na Carga Ferrosa” e no eixo y “Ferro (%) na Carga Ferrosa”. Os gráficos de curvas de níveis elaboradas para o Alto-Forno 2 consideram no eixo x “Pelota (%) utilizada na Carga Ferrosa” e no eixo y “Carbono Fixo do Carvão Vegetal (%)”. A resposta, “Consumo de Carvão Vegetal de Topo (kg/t gusa)”, está visualmente diferenciada por cores nas curvas de nível. As faixas de valores consideradas nos gráficos são baseadas em valores reais já utilizados nos altos-fornos. Os dados estão baseados nos dados divulgados nos “Encontros de Especialistas em Altos-Fornos a Carvão Vegetal” de números 55 a 73.

As Figuras 5.28 a 5.30 exemplificam curvas de níveis do Alto-Forno 1, meses de chuva e seca respectivamente, considerando que a produção diária de ferro-gusa pode variar de 700 a 1200t (de 100 em 100t) e mantendo fixos os parâmetros que foram significativos para os modelos:

Chuva:

Taxa de injeção = valor de 160 a 180kg/t gusa (varia conforme a produção)

Carbono fixo do carvão vegetal = 75,7% (resultado médio de 2011)

Tamanho médio do carvão vegetal = 34,8mm (resultado médio de 2011)

Seca:

Taxa de injeção = valor de 185 a 195kg/t gusa (varia conforme a produção)

Carbono fixo do carvão vegetal = 75,7% (resultado médio de 2011)

Finos de carvão vegetal = 2,6 % (resultado médio de 2011)

Alumina da carga ferrosa = 1,2% (resultado médio de 2011).

Também nas Figuras 5.28 a 5.30, é possível perceber que a combinação ótima para um menor consumo de carvão vegetal de topo é a de maior porcentagem de pelota, que, conseqüentemente, também tem um maior teor de ferro.

Observe que o gráfico de produção de 800t de ferro-gusa no Alto-Forno 1 durante o período de chuva difere dos demais. Isso porque, nessa condição, o Alto-Forno 1 só operou com uma porcentagem de pelota (56%), por isso as curvas estão constantes.

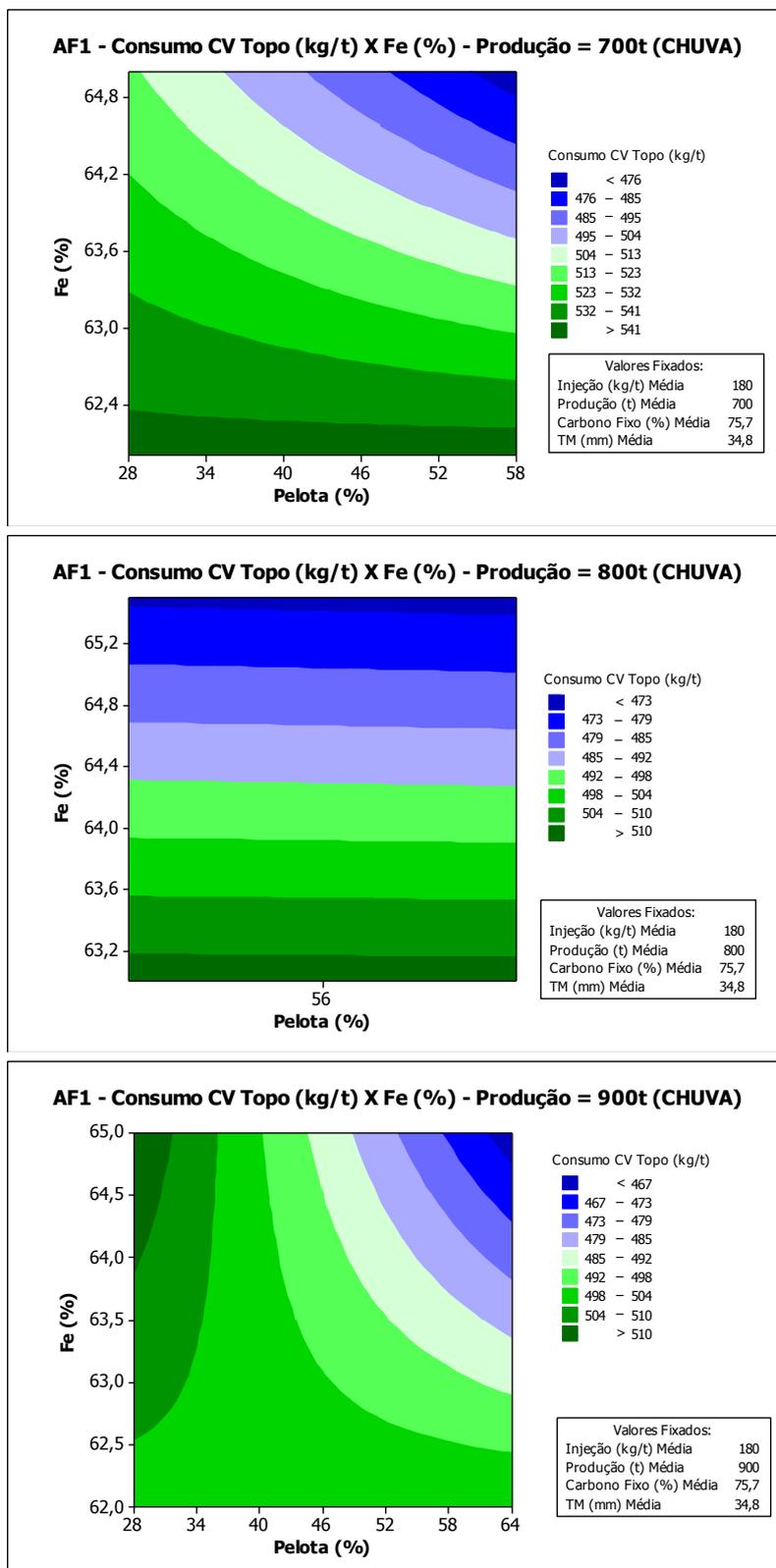


Figura 5.28: Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (chuva) com produção diária variando de 700 a 900t de ferro-gusa – “Etapa 2”.

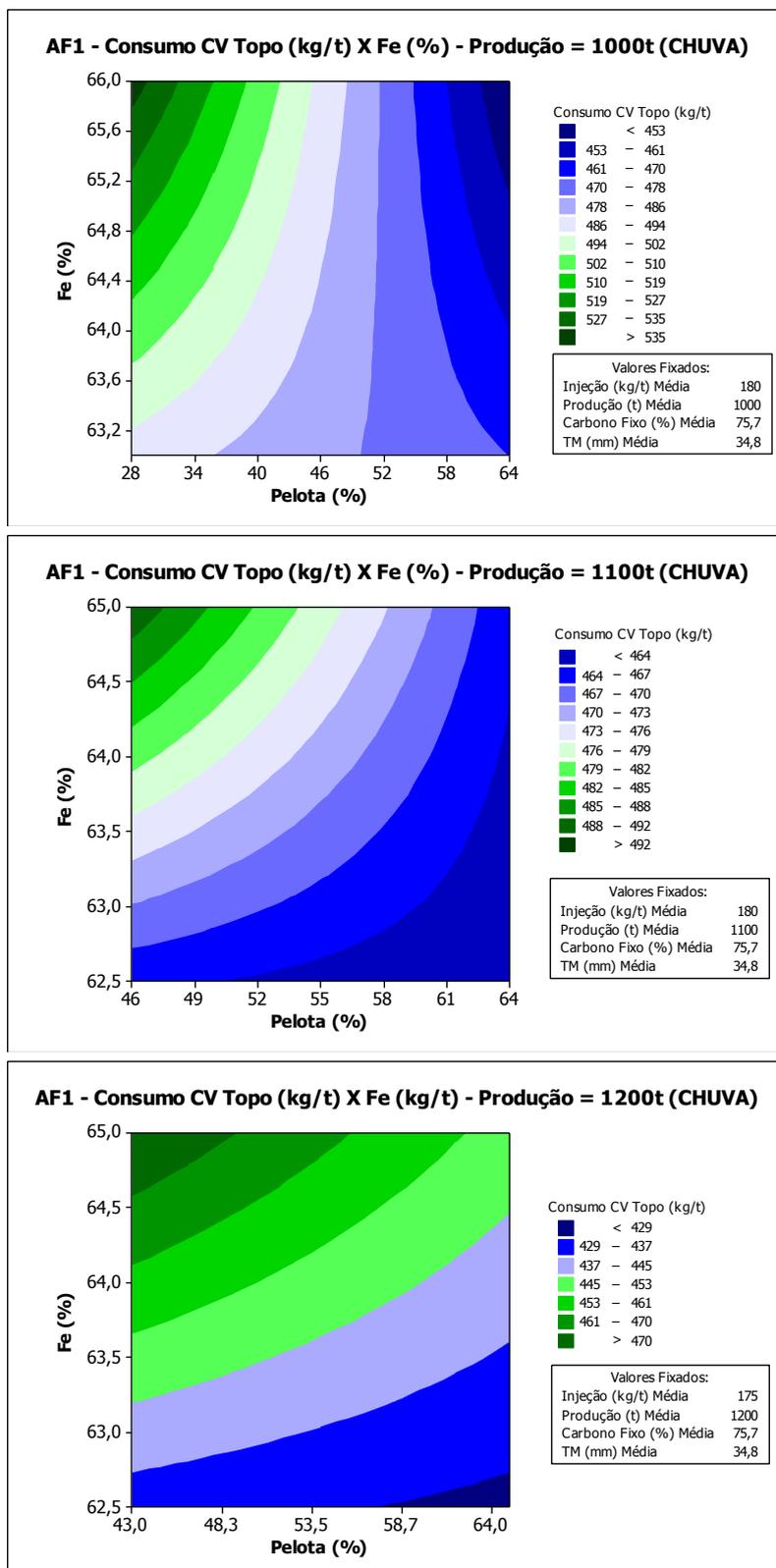


Figura 5.29: Curvas de níveis do Alto-Forno 1 (chuva) com produção diária variando de 1.000 a 1.200t de ferro-gusa – “Etapa 2”.

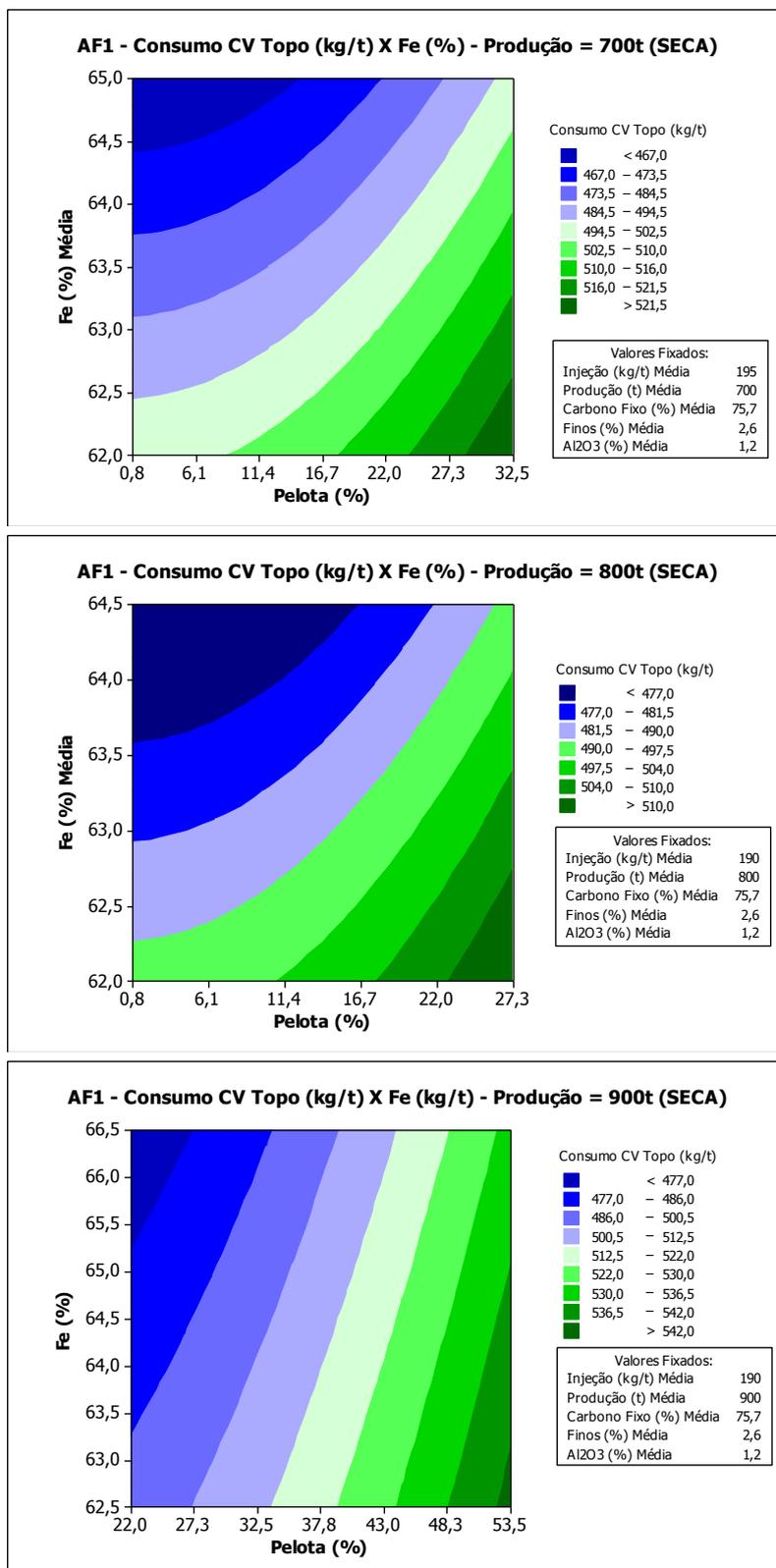


Figura 5.30: Curvas de níveis do Alto-forno 1 (seca) com produção diária variando de 700 a 900t de ferro-gusa – “Etapa 2”.

Para o Alto-Forno 2, exemplos de curvas de níveis do período de chuva são mostradas nas Figuras 5.31 e 5.32, considerando que a produção diária de ferro-gusa pode variar de 300 a 600t (de 100 em 100t) e mantendo fixos os parâmetros:

Cinzas do carvão vegetal = 1,3% (resultado médio de 2011)

Umidade do carvão vegetal = 4,1% (resultado médio de 2011)

Tamanho médio do carvão vegetal = 31,7mm (resultado médio de 2011)

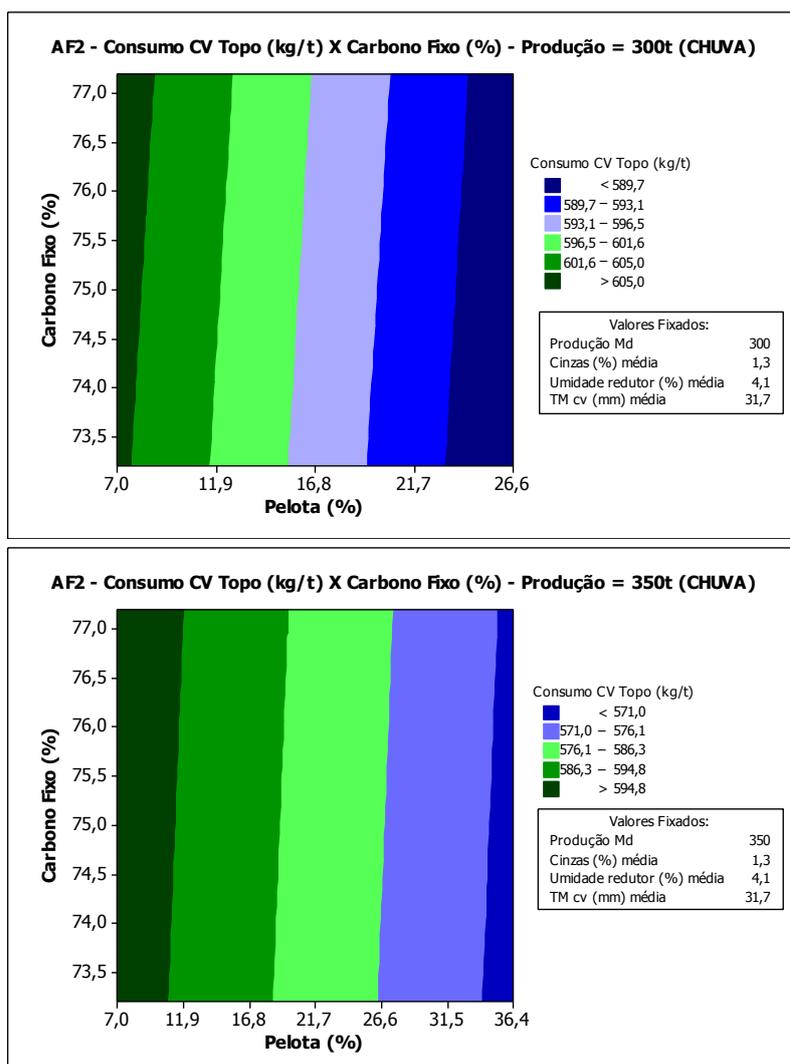


Figura 5.31: Curvas de níveis do Alto-Forno 2 (chuva) com produção diária variando de 300 a 400t de ferro-gusa – “Etapa 2”.

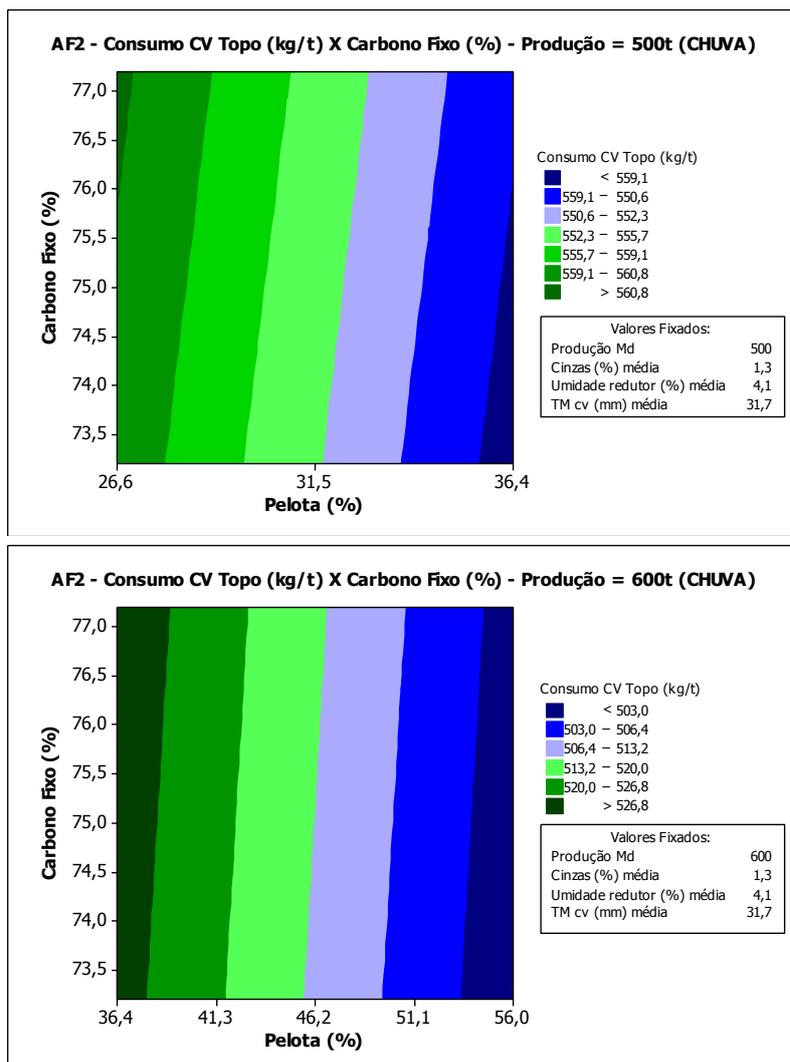


Figura 5.32: Curvas de níveis do Alto-Forno 2 (chuva) com produção diária variando de 500 a 600t de ferro-gusa – “Etapa 2”.

As Figuras 5.31 e 5.32 mostraram que quanto maior o percentual de pelotas na carga ferrosa, menor será o consumo de carvão vegetal no topo. No entanto, o teor de carbono fixo no carvão vegetal, não mostrou ser um parâmetro muito significativo para o consumo de carvão vegetal de topo. Outros parâmetros que não foram considerados nesse trabalho, como resistência mecânica e densidade, poderiam ter mostrado uma melhor relação.

Modelos de regressão foram construídos considerando os pontos médios das curvas de níveis com o objetivo de facilitar a utilização das informações obtidas. Tais modelos estão ilustrados nas Figuras 5.33 a 5.36.

Após a definição do plano de produção diária de ferro-gusa dos altos-fornos, calcula-se qual o percentual de pelotas a ser usado na carga ferrosa do Alto-Forno 1 utilizando o modelo da Figura 5.33, e do Alto-Forno 2 utilizando o modelo da Figura 5.34. Também, como mostrado nos modelos da “Etapa 1”, quanto maior a porcentagem de pelotas, maior é a produção de ferro-gusa.

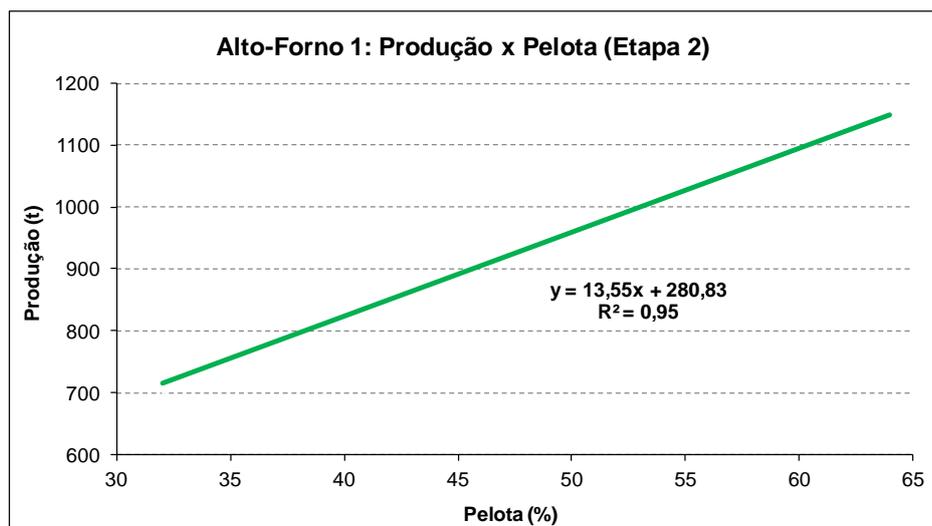


Figura 5.33: Determinação do percentual de pelotas na carga ferrosa em função da produção diária (t) de ferro-gusa do Alto-Forno 1 – “Etapa 2”.

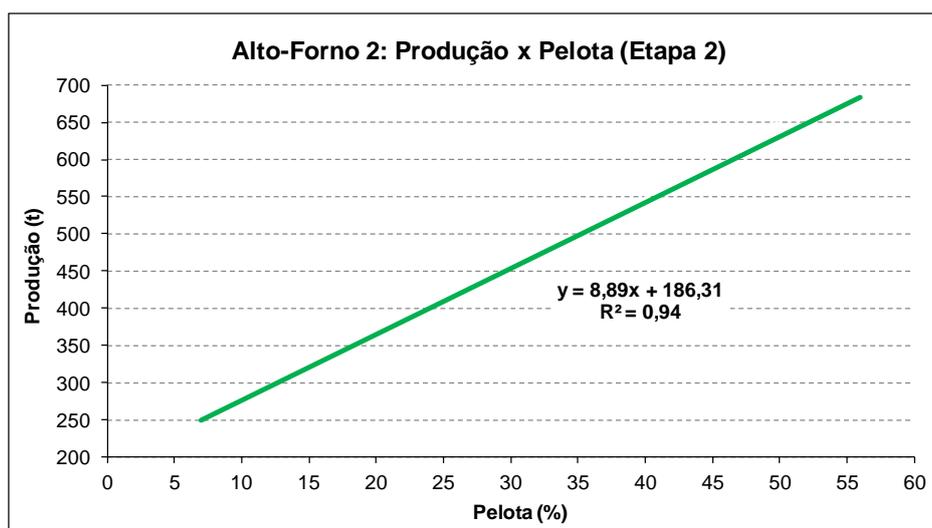


Figura 5.34: Determinação do percentual de pelotas na carga ferrosa em função da produção diária (t) de ferro-gusa do Alto-Forno 2 – “Etapa 2”.

Definidos os percentuais de pelota na carga ferrosa dos altos-fornos, o próximo passo é estimar os consumos de carvão vegetal de topo (kg/t gusa) também considerando se o período é de chuva ou de seca. As Figuras 5.35 e 5.36 mostram os modelos para o Alto-Forno 1 e Alto-Forno 2, respectivamente. Assim como na “Etapa 1”, o período chuvoso apresentou maior consumo de carvão vegetal de topo em função da umidade maior presente nos materiais.

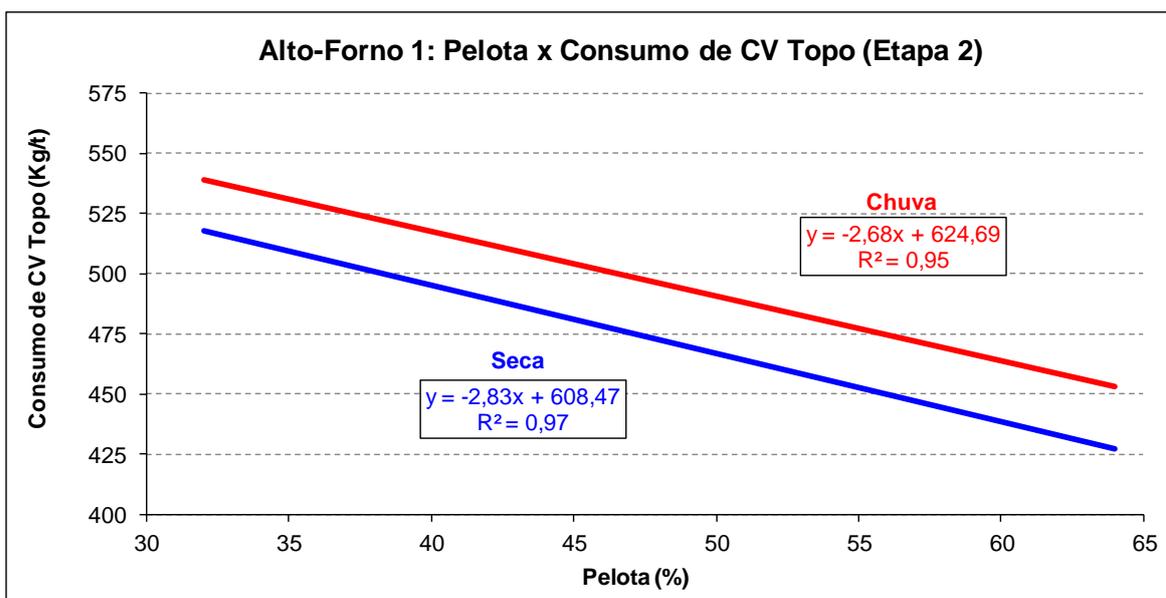


Figura 5.35: Estimativa do consumo de carvão vegetal de topo (kg/t gusa) do Alto-Forno 1 em função do percentual de pelotas na carga ferrosa – “Etapa 2”.

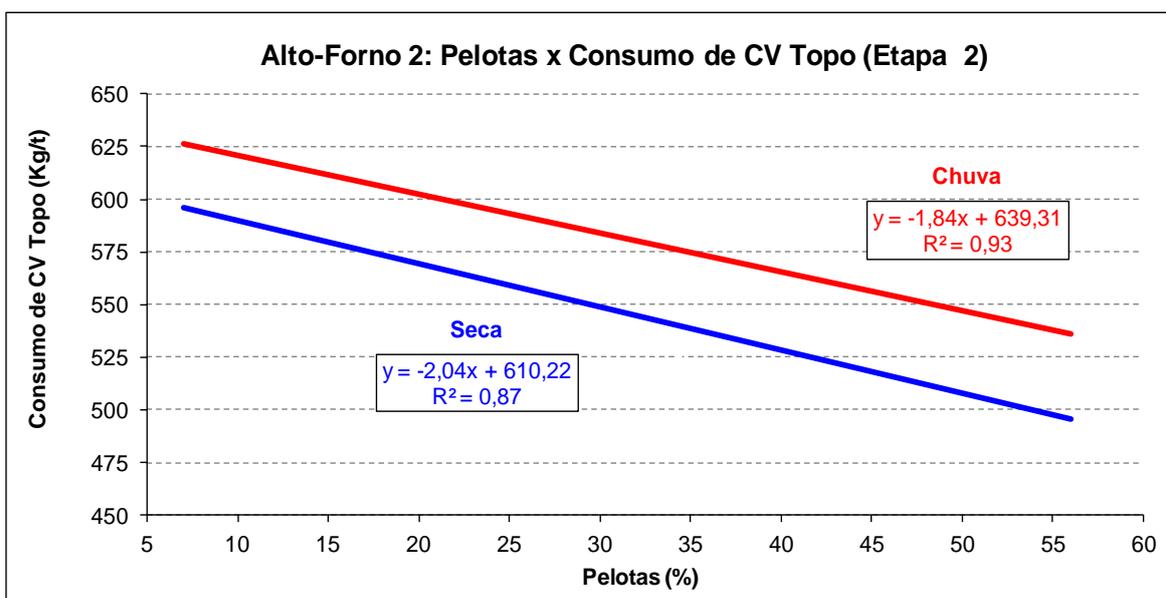


Figura 5.36: Estimativa do consumo de carvão vegetal de topo (kg/t gusa) do Alto-Forno 2 em função do percentual de pelotas na carga ferrosa – “Etapa 2”.

5.4.1. Fatores para corrigir as qualidades do carvão vegetal e da carga ferrosa

Utilizando o modelo termoquímico *Optimum* (macros no Excel), o qual simula cenários de produção e operação para altos-fornos a carvão vegetal, desenvolvido pelas empresas Vallourec Tubos do Brasil e RSConsultants, PEREIRA (2013) simulou diversos cenários variando uma unidade de cada variável enquanto mantinha as demais constantes (% de minério, % de pelota, basicidade, temperatura de gusa, temperatura de sopro, silício, produção, dentre outras variáveis que foram mantidas constantes), e calculou fatores de correção do consumo de carvão vegetal de topo do mix dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

A Figura 5.37 ilustra os fatores para as variáveis de qualidade dos minérios de ferro e da pelota: umidade (%), ferro (%), alumina (%) e finos menores que 6,35mm (%). A Figura 5.38 ilustra os fatores para as variáveis de qualidade do carvão vegetal: umidade (%), carbono fixo (%), cinzas (%) e finos menores que 10mm (%).

Como o modelo termoquímico não considera os resultados de granulometria, somente resultados de análises químicas, os fatores das variáveis de finos de carvão vegetal, minério de ferro e pelota, foram obtidos através de correlações com resultados da variável rendimento gasoso do alto-forno.

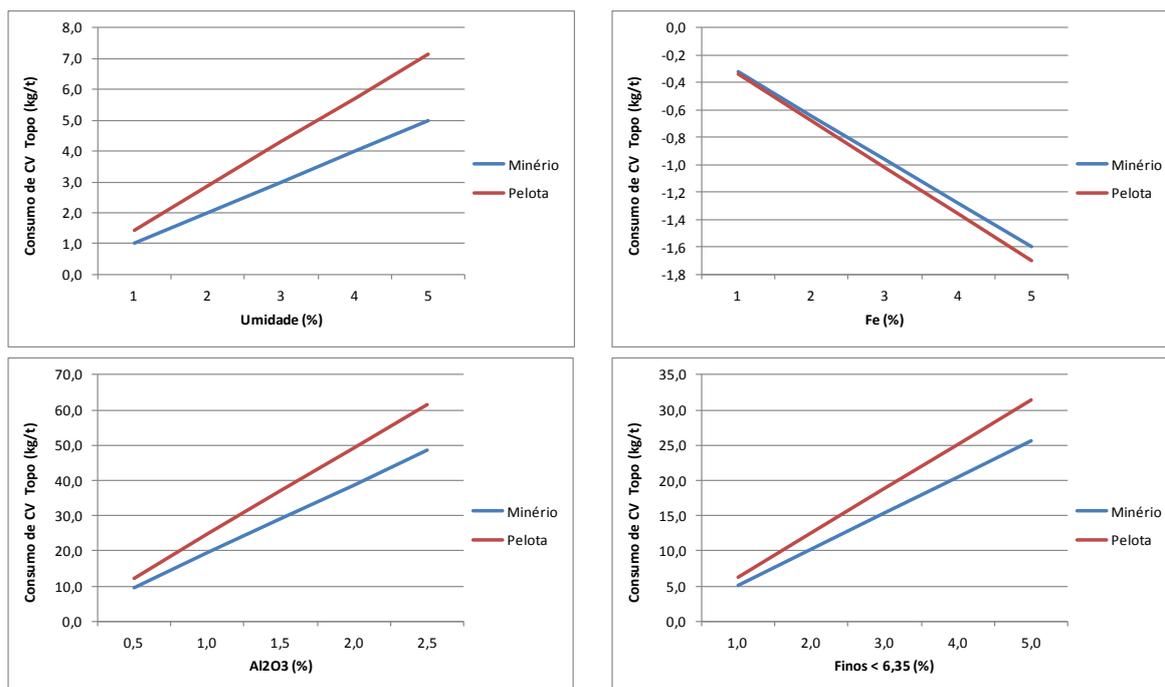


Figura 5.37: Fatores de correção do consumo de carvão vegetal de topo em função da variação da qualidade da carga ferrosa do mix dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

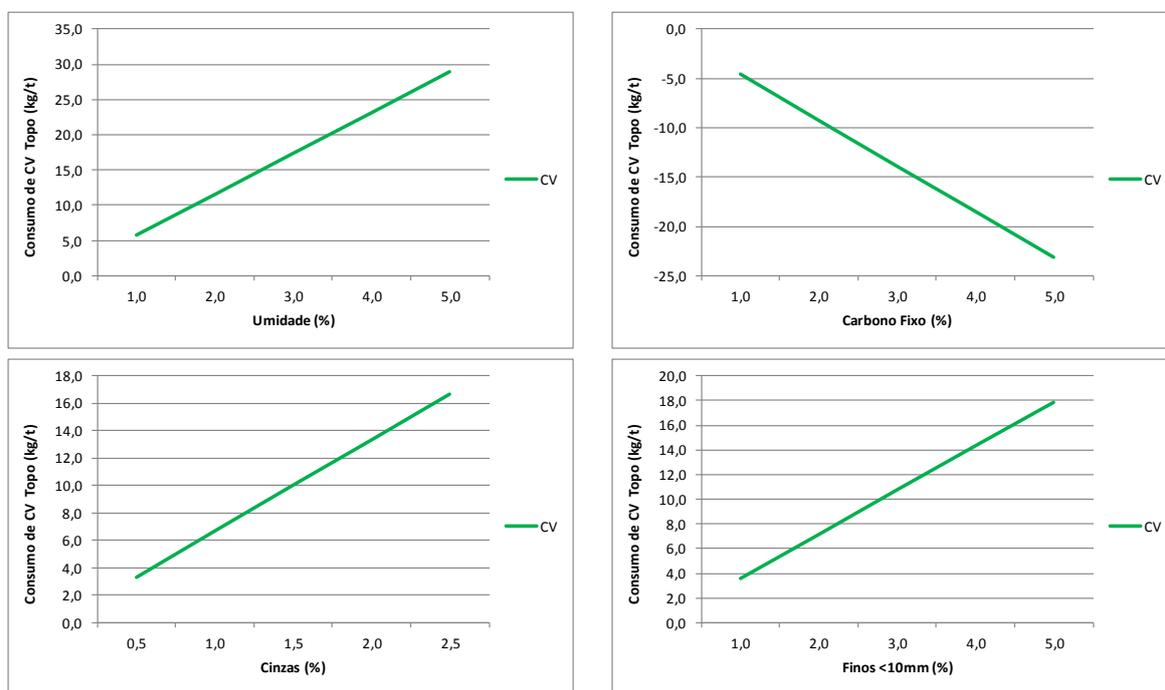


Figura 5.38: Fatores de correção do consumo de carvão vegetal de topo em função da variação da qualidade do carvão vegetal do mix dos altos-fornos da Vallourec Tubos do Brasil.

Tais fatores são utilizados para corrigir as estimativas de consumo de carvão vegetal de topo dos modelos elaborados no item 5.4 caso as qualidades reais das cargas ferrosas ou do carvão vegetal apresentem valores diferentes dos que foram considerados para a elaboração dos modelos.

5.5. Validação dos modelos

A Figura 5.39 apresenta o gráfico das diferenças médias entre os consumos reais de carvão vegetal de topo, de janeiro de 2010 a dezembro de 2012 e os valores estimados pelas curvas elaboradas nas “Etapas 1 e 2” que permitem a validação dos modelos. Observa-se que tanto os modelos desenvolvidos na “Etapa 1” quanto na “Etapa 2” apresentaram resultados bem satisfatórios, sendo as diferenças médias de 2,1% e de 0,8%, respectivamente.

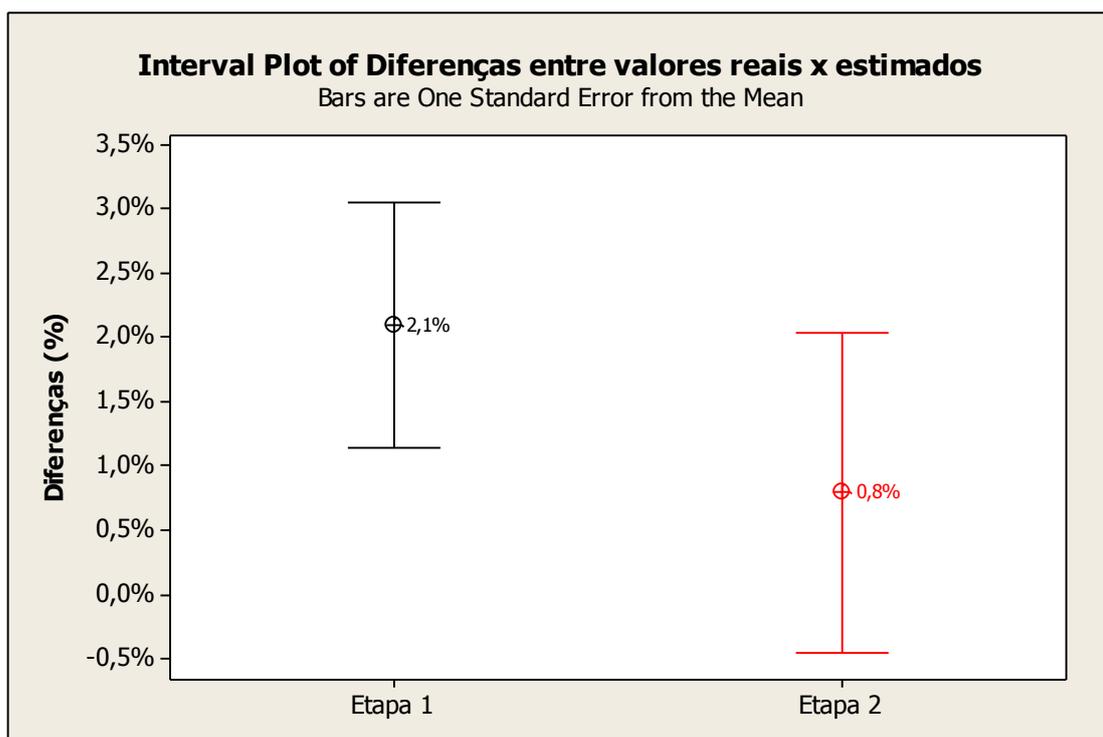


Figura 5.39: Diferenças entre os consumos de carvão vegetal de topo reais x estimativas dos modelos desenvolvidos nas “Etapas 1 e 2”.

5.6. Modelo de Otimização

Para completar o trabalho, foi elaborado no Excel um modelo de otimização que contempla as curvas elaboradas na “Etapa 2”, a qual apresentou menor diferença de estimativas de consumos, para calcular a quantidade de pelotas necessária em cada alto-forno para a produção diária desejada e os respectivos consumo de carvão vegetal de topo e injetado. Através do “*so/ver*”, o programa considera os custos de carvão vegetal, pelotas e minério de ferro e otimiza a melhor forma de divisão de produção de ferro-gusa entre os altos-fornos e a melhor composição de carga metálica objetivando o custo mínimo de produção.

6. CONCLUSÕES

De julho de 2010 a dezembro de 2012 os modelos elaborados na “Etapa 1” foram utilizados para estabelecer metas para consumo de carvão vegetal e carga ferrosa com boa previsão dos resultados. A “Etapa 1” considera dados de 2003 a 2010 de consumo de carvão vegetal de topo, produção e taxa de injeção por período de chuva e seca.

A partir de 2013, os novos modelos elaborados na “Etapa 2”, que consideram os mesmos dados da “Etapa 1” atualizados até 2011 e, além deles, correlacionam a qualidade e heterogeneidade das matérias-primas, substituíram os modelos da “Etapa 1” para a definição de metas. Com eles, está sendo possível avaliar o impacto da qualidade das matérias-primas e do carvão vegetal sobre o consumo de carvão vegetal dos altos-fornos, além de prever o custo e avaliar o atendimento em relação à margem que a empresa quer para sua estrutura interna de custo.

Os modelos desenvolvidos apresentam bons níveis de confiança e permitem que a empresa aja preventivamente para fazer negócio inovador e no planejamento de ações para reduzir o custo de produção de ferro-gusa, visando melhorar o beneficiamento de matérias-primas e outras ações para fornecer para altos-fornos matérias-primas a um custo mínimo, enquanto o esforço em novas tecnologias de fabricação de carvão vegetal que estão sendo testadas e desenvolvidas para melhorar sua qualidade e homogeneidade.

7. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS AO CONHECIMENTO

As ferramentas estatísticas utilizadas de Modelos de Superfície de Resposta e Regressão são de domínio da comunidade técnica e científica, porém, a aplicação dessas ferramentas com o objetivo de desenvolver um modelo para prever o consumo de carvão vegetal dos altos-fornos, utilizando dados históricos de produção de ferro-gusa e consumo de cargas ferrosas, nunca foi realizada antes.

Além disso, o modelo desenvolvido é o primeiro e o único aplicado especificamente em altos-fornos a carvão vegetal e representa um grande passo na operação dos altos-fornos, com um diferencial para a Vallourec Tubos do Brasil, que deixou de trabalhar com carga ferrosa padrão e começou a operar com maior flexibilidade e variabilidade de tipo de carga usada para alcançar melhores resultados econômicos.

8. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

Esse trabalho é pioneiro no desenvolvimento de modelos para previsão do consumo de carvão vegetal específicos para o processo de fabricação de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal, processo que praticamente só existe no Brasil e, portanto, teria que ser desenvolvido internamente.

A abordagem estatística utilizada apresenta bom nível de confiança e permite que a empresa atue preventivamente para fazer negócio inovador e no planejamento de ações para reduzir o custo de produção de ferro-gusa, visando melhorar o beneficiamento de matérias-primas e outras ações para fornecer para altos-fornos matérias-primas a um custo mínimo.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os modelos desenvolvidos atendem às necessidades atuais de planejamento e definição de metas de consumo de carvão vegetal. Porém, uma melhoria importante seria avaliar as qualidades físico-químicas das matérias-primas através de ensaios metalúrgicos e físicos, como tamboramento, RDI, redutibilidade e densidade, e correlacionar com o consumo de carvão vegetal e desempenho dos altos-fornos.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-5734; Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1988. 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-8856; Minério de ferro: determinação de umidade. Rio de Janeiro, 1985. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR-8956; Preparação de amostras de minério de ferro para análise química, granulométrica e de umidade. Rio de Janeiro, 1985. 14p.

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.

BRITISH STANDARD. BS-5660; Methods of sampling iron ores Mechanical method of increment sampling and sample preparation. 2001. 44p.

CASTRO, L. F. A. *Desenvolvimento de um modelo de controle de processo para altos-fornos a carvão vegetal*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. 155p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica).

CRUZ, J. G., BARROSO, R. C. *Fabricação de ferro gusa em altos-fornos a carvão vegetal*. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 108p.

DRUCKENTHANER, H., SCHEIDL, J. SCHÜRZ, B. VAI blast furnace automation – A powerful solution for highest production economy. In: ANNUAL MEETING, 1997, New Orleans. *Proceedings...* IEEE Industry Applications Society, 1997, p.2182-2186.

FLINT, R. V. Multiple correlation of blast furnace variables. In: BLAST FURNACE, COKE OVEN AND RAW MATERIALS CONFERENCE, 11, 1952. *Proceedings...*AIME, 1952, p. 49-73 apud TAMBASCO, M. J. (ed.). *Redução de minério de ferro em alto-forno*. 4.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1977.

FRANÇA, A. B., FEITEIRA, J. F. S., CASTRO, J. A. Utilização de redes neurais artificiais e modelo CFD como estratégia para tomada de decisões no processo do alto-forno. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 39, 2009, Ouro Preto. *Anais...*São Paulo: ABM, 2009.

GAO, C., CHEN, J., ZENG, J., LIU, X., SUN, Y. A chaos-based iterated multistep predictor for blast furnace ironmaking process. *AIChE Journal*, v.55, n.4, p947s-962s, April 2009.

HOTELLING, H. *Multivariate Quality Control Illustrated by Air Testing of Sample Bombsights*. C. Eisenhart et. Al., 1947, p.111-184.

INTERNATIONAL STANDARD, Switzerland. ISO-3082; Iron ores: Sampling and sample preparation procedures. Switzerland, 2008. 77p.

INTERNATIONAL STANDARD, Switzerland. ISO-3084; Iron ores: Experimental methods for evaluation of quality variation. Switzerland, 1998. 19p.

INTERNATIONAL STANDARD, Switzerland. ISO-3085; Iron ores: Experimental methods for checking the precision of sampling, sample preparation and measurement. Switzerland, 2002. 21p.

INTERNATIONAL STANDARD, Switzerland. ISO-3086; Iron ores: Experimental methods for checking the bias of sampling. Switzerland, 2006. 23p.

LIAN, P., NING, N., AIPING, C., YAOBIN, T. Fault diagnosis of the blast furnace based on the Bayesian network model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND CONTROL ENGINEERING, 2010. *Proceedings...* IEEE Computer Society, 2010, p.990-993.

LIU, X., AN, T. Mathematical modeling of closed-loop intelligent control for b.f iron-making process. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION, 14, 2011. *Proceedings...* IIEE Computer Society, 2011, p.438-441.

MAPA, G. M. O.; CASTRO, L. F. A. & FILHO, O. D. Controle estatístico de processo aplicado a produção de gusa em usinas não integradas a carvão vegetal. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 45, 1990, Rio de Janeiro. *Anais...* São Paulo: ABM, 1990, p.125-140.

MINGOTI, S. A. *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 295p.

MINITAB. 2010. Minitab for Windows [Minitab-Inc, USA] Versão 16. English Ink Copyright [C]

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C., HUBELE, N. F. *Estatística Aplicada à Engenharia*. 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 335p.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 2001. 527p.

NETER, J., WASSERMAN, W., KUTNER, M. H. *Applied Linear Statistical Models*. Second Edition. Irwin Inc: 2008.

OLIVEIRA, L. T.; ALMEIDA, M. R. 1980. *Aplicação de Carvão Vegetal*. Uso da Madeira para Fins Energéticos, Série Publicações Técnicas. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, volume 1, p. 45-53.

PAN, W., LIU, S., ZENG, J., GAO, C. A refined prediction model of silicon content based on the Kalman Filter. In: CHINESES CONTROL CONFERENCE, 29, 2010, Beijing. *Proceedings...* Beijing: 2010, p.3153-3156.

PEREIRA, B. M. O. Determinação dos parâmetros do carvão vegetal e da carga metálica para uso em altos-fornos. Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica da UFMG. No prelo 2013.

QIU, D., ZHANG, D., YOU, W., ZHANG, N., LI, H. An application of prediction model in blast furnace hot metal silicon content based on neural network. *IEEE*, p61s-64s, 2009.

SAMPAIO R. S., PINHEIRO P. C. C., REZENDE M. E. A. Exigências metalúrgicas para o carvão vegetal em mini altos-fornos e fornos elétricos de redução. In: SEMINÁRIO PRÁTICA, LOGÍSTICA, GERENCIAMENTO E ESTRATÉGIAS PARA O SUCESSO DA CONVERSÃO DAMATÉRIA LENHOSA EM CARVÃO VEGETAL PARA USO EM METALURGIAE INDÚSTRIA, 2006, Belo Horizonte.

SHUR, A. B. Dynamics models of blast furnace smelting for trainers and researchers. *metallurgist*, Alchevsk, v.52, n.3-4, p141s-147, March 2008.

SOARES, M. I., CARVALHO, D. H. D., BAYER, D. S. Modelagem do nível térmico de um alto-forno para aumento da eficiência operacional utilizando redes neurais artificiais. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 39, 2009, Ouro Preto. *Anais...*São Paulo: ABM, 2009.

SOUZA, J. B., KANKAMBY, N. H., LOCKWOOD, F. C. Aplicações da mecânica dos fluidos computacional na indústria siderúrgica. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 39, 2009, Ouro Preto. *Anais...* São Paulo: ABM, 2009.

STIGLER, S. M. Thomas Bayes's Bayesian Inference. *Journal of the Royal Statistical Society*, v.145, n.2, p.250s-258, 1982.

THOMSEN, E. P. R. Controle do processo de produção do alto-forno por meio de técnicas estatísticas multivariadas. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 180p. (Dissertação, Mestrado em Estatística).

TSHUMURA, K. Modeling for control of blast furnace. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS, 1999, Kohala Coast-Island of Hawaii. *Proceedings...* IEEE, 1999, p1-6.

VELLOSO, C. M. *Otimização da operação do alto-forno 1 da V & M do BRASIL com "Stave Cooler" através da distribuição de carga no topo do forno*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2006. 111p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

ZENG, J., LIU, X., GAO, C., LUO, S. Subspace method of identification and control of blast furnace ironmaking process. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2008, Washington. *Proceedings...* AACC, 2008, p.2481-2485.

WELCH, G., BISHOP, G. An Introduction to the Kalman Filter. University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC, TR95-041, 2006.

WINTER, M. MORAIS, E. Gestão de máquinas de colheita florestal V & M do BRASIL. In: SIMPÓSIO BIANUAL DE FUNDAMENTOS, TECNOLOGIAS E PRÁTICAS DE CARBONIZAÇÃO. Belo Horizonte, 2008.