

CLÁUDIO MUSSO VELLOSO

**OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DO  
ALTO-FORNO 1 DA V&M DO BRASIL COM  
“STAVE COOLER” ATRAVÉS DA DISTRIBUIÇÃO  
DE CARGA NO TOPO DO FORNO**

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

Cláudio Musso Velloso

OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DO ALTO-FORNO 1 DA  
V&M DO BRASIL COM “STAVE COOLER” ATRAVÉS DA  
DISTRIBUIÇÃO DE CARGA NO TOPO DO FORNO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia  
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Professor Luiz Fernando Andrade de Castro

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2006

## DEDICATÓRIA

À minha amada esposa, Luciana,  
e aos meus filhos Tiago e Lucas

## AGRADECIMENTOS

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

Ao Prof. Luiz Fernando Andrade de Castro, meu amigo e orientador, pela motivação e atenção a mim dedicada;

Aos meus familiares em particular minha esposa Luciana, meus filhos Tiago e Lucas, minha Mãe Lourdes, meu Irmão Leonardo, minha irmã Denise e minha irmã Simone (in memorian);

Ao meu amigo e conselheiro, Tiago Claret Santiago, por sempre estar ao meu lado com sua palavra serena;

Ao meu amigo e parceiro, Rodrigo Camargos Barroso, pela solidariedade e companheirismo;

Ao meu amigo Paulo Miranda Gonçalves, que sempre me mostrou como ser transparente e fiel aos ideais de vida;

À V&M do Brasil que proporcionou esta oportunidade de aprendizagem e desenvolvimento;

Aos meus amigos da Superintendência de Siderurgia que sempre estiveram ao meu lado em especial a equipe das Matérias Primas Siderúrgica - PSP e Altos-Fornos - PSF;

Aos meus amigos e colegas de trabalho Juarez de Sousa Carvalho, José Luiz de Souza, Christian Hahne e Jadir das Graças Cruz companheiros fiéis nas diversas dificuldades do dia a dia.

## SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO .....	1
2 - OBJETIVO.....	3
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 – INTRODUÇÃO - O ALTO-FORNO .....	4
3.2 – O “STAVE COOLER “ E A DISTRIBUIÇÃO DE CARGA.....	12
3.3 - DEFINIÇÃO DE “STAVE COOLER” .....	13
3.4 – TIPOS DE “STAVE COOLER” .....	14
3.4.1– PRIMEIRA GERAÇÃO.....	14
3.4.2– SEGUNDA GERAÇÃO.....	15
3.4.3– TERCEIRA GERAÇÃO .....	15
3.4.4– QUARTA GERAÇÃO .....	15
3.5 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO “STAVE COOLER” DO AF1 DA VMB.....	16
3.6 - DISTRIBUIÇÃO E DIMENSÕES DO “STAVE COOLER” DO AF1 DA VMB.....	17
3.7 - DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE ÁGUA NO “STAVE COOLER” DO AF1 DA VMB .....	18
3.8 – DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO DO AF1 DA VMB.....	19
3.9 - ZONAS DO ALTO-FORNO A REFRIGERAR .....	20
3.10- UTILIZAÇÃO DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO DOS “STAVE COOLER” .....	20
3.11 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CARREGAMENTO DO AF1 DA VMB.....	24
3.12 - DESCRIÇÃO DO TOPO DO AF1 DA VMB.....	25
3.13 - DISTRIBUIÇÃO DE CARGA NO TOPO DO AF1 DA VMB.....	28
3.14 – FATORES QUE AFETAM A DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO GASOSO NO INTERIOR DO ALTO-FORNO .....	30
3.14.1- POSIÇÃO DAS PLACAS MÓVEIS .....	30
3.14.2- BASE DE REDUTOR .....	31
4- METODOLOGIA DE TRABALHO.....	32
4.1 - CÁLCULO DA BASE DE CARVÃO VEGETAL IDEAL PARA O ALTO-FORNO 1 .....	32
4.2 – PROPOSIÇÕES DE TESTES PARA SEQUÊNCIAS DE CARREGAMENTO NO TOPO DO AF1 .....	32
4.3 – AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS INDUSTRIAIS .....	34
4.3.1 – ANOVA DE UM FATOR.....	34
4.3.2 – COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS – TESTE DE TUKEY.....	36
4.3.3 – REGRESSÃO MÚLTIPLA .....	37
4.3.4 – COEFICIENTE DE SPEARMAN .....	37

5- RESULTADOS DOS TESTES INDUSTRIAIS E DISCUSSÃO .....	38
5.1 – ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS.....	38
5.2 – GRÁFICOS BOXPLOT E DE DISPERSÃO PARA AS VARIÁVEIS POR PERÍODO	40
5.3 – TESTE ANOVA PARA COMPARAR AS MÉDIAS DOS PERÍODOS.....	43
5.3.1 – TESTE ANOVA PARA PERDAS TÉRMICAS.....	44
5.3.2 – TESTE ANOVA PARA PRODUÇÃO DE FERRO GUSA .....	54
5.3.3. – TESTE ANOVA PARA CARVÃO VEGETAL BRUTO.....	63
5.3.4 – TESTE ANOVA PARA INJEÇÃO DE CARVÃO VEGETAL PULVERIZADO..	77
5.4 – AVALIAÇÃO DO PERÍODO DE MAIOR PRODUÇÃO DE FERRO GUSA .....	86
6- CONCLUSÕES .....	104
7- BIBLIOGRAFIA .....	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1.1 – Desenho esquemático do processo de Alto-Forno .....	06
Figura 3.1.2 – Desenho esquemático das transformações térmicas e químicas no AF.....	10
Figura 3.1.3 – Esquema da estrutura interna do Alto-Forno mostrando as várias zonas.....	11
Figura 3.3.1 – Desenho esquemático do “stave cooler”.....	14
Figura 3.6.1 – Esquema do corte transversal e longitudinal do AF1 da VMB.....	17
Figura 3.7.1 – Esquema do fluxo de água no “stave cooler” do AF1 da VMB.....	18
Figura 3.11.1 – Desenho esquemático do sistema de carregamento do AF1.....	24
Figura 3.12.1 – Desenho esquemático do sistema de topo do AF1.....	26
Figura 3.12.2 – Desenho esquemático do sistema de topo do AF1 em funcionamento.....	27
Figura 3.13.1 – Desenho esquemático das placas móveis no topo do AF1.....	29
Figura 5.2.1 – Gráfico Boxplot e de Dispersão para a variável “Carvão Bruto”.....	40
Figura 5.2.2 – Gráfico Boxplot e de Dispersão para a variável “Injeção de Carvão”.....	41
Figura 5.2.3 – Gráfico Boxplot e de Dispersão para a variável “Produção de Gusa”.....	41
Figura 5.2.4 – Gráfico Boxplot e de Dispersão para a variável “Perdas Térmicas”.....	42
Figura 5.2.5 – Gráfico Média observada cada período com intervalo de confiança de 95%.....	43
Figura 5.3.1 – Gráfico de Resíduos da ANOVA para a variável “Perdas Térmicas”.....	52
Figura 5.3.2 – Gráfico de curva normal para a variável “Perdas Térmicas”.....	53
Figura 5.3.3 – Gráfico de Resíduos da ANOVA para a variável “Produção de Ferro Gusa”.....	61
Figura 5.3.4 – Gráfico de curva normal para a variável “Produção de Ferro Gusa”.....	62
Figura 5.3.5 – Gráfico de Resíduos da ANOVA para a variável “Carvão Vegetal Bruto”.....	75
Figura 5.3.6 – Gráfico de curva normal para a variável “Carvão Vegetal Bruto”.....	76
Figura 5.3.7 – Gráfico de Resíduos ANOVA para variável “Injeção de Carvão Vegetal”.....	85

Figura 5.3.8 – Gráfico de curva normal para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”.....	85
Figura 5.3.9 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Perda Térmica”.....	86
Figura 5.3.10 – Gráfico Temporal para a variável “Perda Térmica”.....	87
Figura 5.3.11 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”.....	88
Figura 5.3.12 – Gráfico Temporal para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”.....	88
Figura 5.3.13 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Carvão Vegetal Bruto”.....	89
Figura 5.3.14 – Gráfico Temporal para a variável “Carvão Vegetal Bruto”.....	89
Figura 5.3.15 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Produção de Ferro Gusa”.....	90
Figura 5.3.16 – Gráfico Temporal para a variável “Produção de Ferro Gusa”.....	90
Figura 5.3.17 – Resumo Estatístico para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”.....	92
Figura 5.3.18 – Resumo Estatístico para a variável “Carvão Vegetal Bruto”.....	93
Figura 5.3.19 – Resumo Estatístico para a variável “Perdas Térmicas”.....	93
Figura 5.3.20 – Resumo Estatístico para a variável “Produção de Ferro Gusa”.....	94
Figura 5.3.21 – Correlação entre as variáveis “Carvão Vegetal Bruto”, “Injeção de Carvão Vegetal”, “Produção de Ferro Gusa” e “Perdas Térmicas”.....	95
Figura 5.3.22 – Correlação entre as variáveis “Carvão Vegetal Bruto”, “Injeção de Carvão Vegetal”, “Produção de Ferro Gusa” e “Perdas Térmicas”.....	96
Figura 5.3.23 – Gráfico de Resíduos da Análise de Regressão das variáveis “Produção de Ferro Gusa, Carvão Vegetal Bruto e Injeção de Carvão Vegetal”.....	99
Figura 5.3.24 – Gráfico da Curva Normal da Análise de Regressão das variáveis “Produção de Ferro Gusa, Carvão Vegetal Bruto e Injeção de Carvão Vegetal”.....	100
Figura 5.3.25 – Gráfico de Resíduos da Análise de Regressão das variáveis “Perdas Térmicas, Carvão Vegetal Bruto e Injeção de Carvão Vegetal”.....	102
Figura 5.3.26 – Gráfico da Curva Normal da Análise de Regressão das variáveis “Perdas Térmicas, Carvão Vegetal Bruto e Injeção de Carvão Vegetal”.....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Características dimensionais do “stave cooler” do AF1 da VMB.....	17
Tabela III.2 – Vazões de Água das Zonas do Alto-Forno 1 a refrigerar.....	20
Tabela III.3 – Água primária do circuito fechado do AF1.....	21
Tabela III.4 – Água secundária do circuito fechado do AF1.....	21
Tabela III.5 – Vazão de água dos “bicos” de ventaneiras.....	22
Tabela III.6 – Qualidade química da água do circuito fechado de refrigeração do AF1.....	23
Tabela IV.1 – Seqüências de carregamentos propostos para teste industrial no AF1.....	33
Tabela IV.2 – Tabela de Análise de Variância (ANOVA).....	36
Tabela V.1 – Tabela de Análise Descritiva dos Dados.....	38
Tabela V.2 – Tabela ANOVA para a variável “Perdas Térmicas”.....	45
Tabela V.3 – Teste de Tukey para a variável Perdas Térmicas.....	47
Tabela V.4 – Tabela ANOVA para a variável “Produção de Ferro Gusa”.....	54
Tabela V.5 – Teste de Tukey para a variável “Produção de Ferro Gusa”.....	55
Tabela V.6 – Tabela ANOVA para a variável “Carvão Vegetal Bruto”.....	63
Tabela V.7 – Teste de Tukey para a variável “Carvão Vegetal Bruto”.....	64
Tabela V.8 – Tabela ANOVA para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”.....	77
Tabela V.9 – Teste de Tukey para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”.....	78
Tabela V.10 – Coeficiente de Correlação de Spearman.....	97
Tabela V.11 – Análise de Regressão para as variáveis “Produção de Ferro Gusa, Carvão Vegetal Bruto e Injeção de Carvão Vegetal”.....	98
Tabela V.12 – Análise de Regressão para as variáveis “Perdas Térmicas, Carvão Vegetal Bruto e Injeção de Carvão Vegetal”.....	101

## LISTA DE NOTAÇÕES

ANOVA – Nome dado ao teste estatístico que compara três ou mais populações

BC – Base de carvão vegetal do Alto-Forno (t/carga)

CCMM 9011 – Abreviação da seqüência de carregamento e distribuição de carga no topo do AF, onde C é o carvão vegetal, M a carga metálica e 9011 a seqüência desejada para as posições das placas móveis

Dgoela – Diâmetro da goela do Alto-Forno (m)

F – Distribuição de Fischer

$f_c$  – Valor crítico

$H_0$  – Hipótese nula

$H_1$  – Hipótese alternativa

K – Populações

Maximum - maior valor observado

Mean - média aritmética

$\mu_i$  - Média

Median - mediana

Minimum - menor valor observado

N - número de dados

N\* - número de dados faltantes

QM – Quadrado médio

QMD – Quadrado médio do erro

QME – Quadrado médio do tratamento

RC – Região crítica de teste Fisher-Snedecor

SKIP – Nome dado à caçamba que leva a carga até o topo do forno

SQ – Soma de quadrado

StDev - desvio-padrão

$\sigma^2$  - Variância

X'S – Variáveis explicativas

Y – Resposta da análise de regressão

## RESUMO

O Alto-Forno 1 da V&M do Brasil é o primeiro forno no mundo a carvão vegetal a operar com “stave cooler” de cobre.

Por se tratar de uma tecnologia nova, para este tipo de reator, iniciamos a operação do forno levando-se em consideração alguns fundamentos já empregados nos Altos-Fornos a coque.

Porém não foi suficiente, pois, após a entrada em operação, observou-se grande variação nas perdas térmicas do circuito fechado de refrigeração, principalmente na região dos “stave cooler”, fazendo com que houvesse grandes perdas de produção, maior consumo específico de carvão e diversos problemas operacionais, dentre eles, aberturas de bleeders.

Diante deste fato, tornou-se necessário fazer um estudo para entender melhor a operação do Alto-Forno 1, principalmente com relação à distribuição de carga no topo do forno, fator determinante para atingirmos os níveis de produção de gusa e consumo específico de carvão desejados.

Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo determinar qual a melhor seqüência de distribuição de carga no topo do forno, levando-se em consideração alguns parâmetros importantes para a operação como nível de produção de ferro gusa, consumo total de carvão vegetal, perdas térmicas do circuito fechado de refrigeração e taxa de injeção de carvão vegetal pulverizado.

## ABSTRACT

V&M Brazil Blast Furnace 1 is the first charcoal operating furnace in the world with copper "stave cooler".

As a new technology, for this type of reactor, the furnace operation was started taking in account some basis already used in coke Blast furnaces.

But, it was not enough; and after start up, we observed a great variation in thermal losses of refrigeration closed circuit, mainly in the region of "stave cooler", causing production losses, specific charcoal consumption increase and other operational problems, such as, bleeders openings.

Due to this fact, it became necessary to make a study to better understand Blast furnace 1 operation, mainly in relation to furnace load distribution, a important factor to reach the desired pig iron production levels and specific charcoal consumption.

So, the objective of the present study is to determine the best charging sequence to use at the blast furnace top taking into consideration some important operational parameters, such as: production levels, charcoal consumption, thermal losses in the "stave cooler" system and pulverized charcoal injection.

## 1- INTRODUÇÃO

No ano de 1967 foi assinado um acordo entre a Nippon Steel Corporation (NSC) e a USSR licenciando o desenvolvimento e o uso da tecnologia de refrigeração de Alto-Forno com “Stave Cooler”.

A primeira instalação de “Stave Cooler” ocorreu no Alto-Forno 3 de Nagoya, que entrou em operação em Abril de 1969. Os motivos que determinaram o uso de Stave Cooler em substituição às placas de refrigeração de cobre foram o aumento da vida útil do Alto-Forno, o aumento do volume interno sem modificações estruturais significativas, a possibilidade de melhoria do rendimento gasoso devido à maior uniformidade da distribuição de carga, e, conseqüente redução do custo de operação, redução do custo de manutenção para substituição das placas de refrigeração e redução de possíveis problemas ambientais devido à vazamento de gases durante rompimento de caixas e paradas excessivas de forno para substituição de placas de refrigeração.

No caso da VMB, O Alto-Forno 1 foi construído em 1963, com capacidade nominal de 800tgusa/dia para ser operado utilizando-se como redutor coque metalúrgico. Após sua construção, devido às condições de mercado, passou a ser operado utilizando-se o carvão vegetal como principal redutor, sendo que, sua produção média sempre se manteve na casa das 1000 tgusa/dia.

A partir de então, para se manter competitivo no mercado, o AF1 da VMB foi sendo modernizado ao longo de suas diversas campanhas, sendo que, na última reforma, no ano de 2001, ocorreu grande mudança no circuito fechado de refrigeração de água do mesmo, sendo implantado o circuito de refrigeração de água com “stave cooler” de cobre.

Os principais motivos que levaram à implantação deste novo circuito de água foram a possibilidade do aumento da vida útil do forno, objetivando uma campanha de no mínimo 10

anos e o aumento do volume útil do equipamento visando uma produção de 1200 tgusa/dia, utilizando-se carvão vegetal como redutor.

Além da evolução tecnológica, objetivou-se uma redução de gastos com refratários para revestimento do forno uma vez que, na região do “stave cooler” o mesmo não é utilizado e a expectativa é que se consiga eliminar as reformas intermediárias, o que se traduz em maior produção e menor custo operacional.

## 2 - OBJETIVO

O Objetivo deste trabalho é otimizar a operação do Alto-Forno 1 da VMB com “stave cooler” através da definição da melhor seqüência de carregamento e distribuição de carga no topo do Alto-Forno, objetivando melhores níveis de produção e redução do consumo de carvão vegetal total do reator.

### 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 – INTRODUÇÃO - O ALTO-FORNO

O Alto-Forno é um reator que utiliza o princípio de contracorrente, onde, gases em ascensão reagem e transferem calor para sólidos e líquidos descendentes. Neste equipamento ar pré-aquecido é soprado pelas ventaneiras e entra inicialmente em contato com o carvão vegetal na região denominada “*raceway*” ou zona de combustão. O contato do oxigênio do ar soprado com o carbono do carvão vegetal, pré-aquecido na faixa de 1400°C nesta região, provoca inicialmente a reação de produção do dióxido de carbono. Esta reação altamente exotérmica, produz grande quantidade de calor para o processo. Contudo, o dióxido de carbono formado, nesta região de alta temperatura, reage imediatamente com mais carbono do carvão vegetal para formar o monóxido de carbono, reação esta conhecida com de “*solution loss*” ou “*boudouar*”. Por sua vez, a umidade contida no ar soprado entrará em reação com o carbono do carvão vegetal, gerando os gases redutores CO e H<sub>2</sub>. Embora estas reações sejam endotérmicas, ocorrendo portanto absorção de calor, o resultado efetivo associado à saída de gases redutores do “*raceway*” é o aporte de grandes quantidades de calor fornecido para a seqüência do processo, gerando uma temperatura de chama na região que excede 1850°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.

Na medida que os gases (CO e H<sub>2</sub>, além de N<sub>2</sub> de sopro) saem do “*raceway*”, eles ascendem no forno entrando na região de gotejamento da carga metálica. Dentro desta região, o metal líquido e a escória percolam através do leito de carvão vegetal (homem morto) em oposição ao movimento ascendente dos gases. É ainda dentro desta região que o metal atinge o seu teor final de silício, sendo que quanto maiores forem às quantidades de calor disponível e altura de percolação, maior será a transferência de silício para o ferro gusa. As exigências de qualidade do gusa, para sua posterior utilização, geralmente requerem baixos teores de silício neste material. Existem limites, associados à segurança operacional do Alto-Forno, que impedem a queda de temperatura nesta região para o controle do teor de silício final do gusa. Por sua vez,

a pressão interna do aparelho nesta região (refletida na pressão de sopro) também afeta a incorporação de silício no gusa. Assim, Altos-Fornos operando com pressões mais elevadas podem produzir gusa com menores teores de silício. Estas relações entre o teor de silício no gusa, pressão e temperatura podem ser utilizadas para avaliar a performance do Alto-Forno. O gusa e escória acumulados no cadinho do forno são periodicamente removidos através do vazamento pelos furos de gusa.

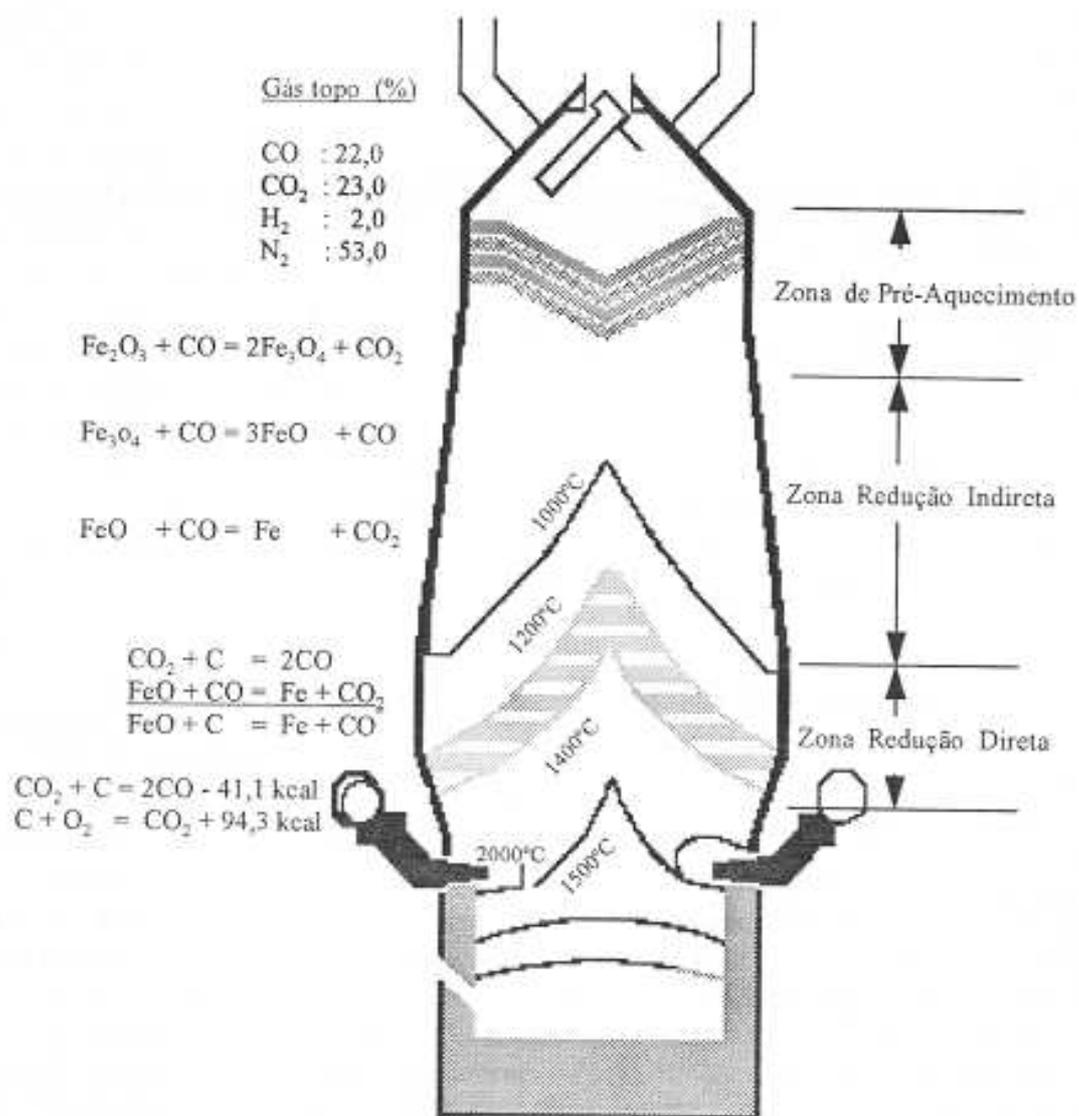


Figura 3.1.1 – Desenho esquemático do processo de Alto-Forno, segundo ULHÔA, M.B., et al (1995).

Seguindo seu caminho ascendente no interior do Alto-Forno, os gases passam através de uma região chamada zona coesiva. A zona coesiva define as fronteiras nas quais a carga ferrífera amolece e funde. É prática comum em Altos-Fornos o carregamento no topo em camadas alternadas de carvão vegetal e carga metálica, que permanecerão separadas até o amolecimento e fusão da carga ferrífera. Durante o processo de amolecimento e fusão as camadas de carga metálica se tornam impermeáveis à passagem dos gases, sendo o fluxo gasoso direcionada para as camadas de carvão vegetal, ou janelas de carvão como são comumente denominadas, o que gera uma grande perda de pressão nesta região do forno. Quando as camadas de material ferrífero atingem esta região, elas já se encontram ou já totalmente reduzidas a ferro metálico, ou na forma mais reduzida dos óxidos de ferro, a wustita (FeO). Como o monóxido de carbono gerado no “*raceway*” se difunde nas camadas deste material ferrífero, o FeO remanescente será então finalmente reduzido a ferro, produzindo mais dióxido de carbono, que por sua vez reage com o carbono do carvão vegetal presente nesta região, a altas temperaturas, transformando em monóxido de carbono. O efeito resultante destas reações é refletido no consumo efetivo de carvão vegetal, sendo esta região referenciada como de redução direta.

Os gases emergentes da zona coesiva atravessam, em seu movimento ascendente no reator, a coluna de carga formada de camadas permeáveis de carvão vegetal e carga metálica, na chamada zona seca do Alto-Forno. Nesta situação, os gases seguem preferencialmente o caminho que imponha a menor resistência ao seu movimento, o que significa que aquelas áreas de maior permeabilidade recebem a maior parte do fluxo gasoso. O controle da permeabilidade na seção radial é, portanto crítico para a operação do forno e será diretamente afetado pela distribuição de carga adotada no topo do reator. De modo geral, a parte da cuba inferior do Alto-Forno esta associada à chamada zona de reserva térmica, uma vez que a temperatura do gás e dos sólidos variam muito pouco, onde há um equilíbrio térmico. Simultaneamente poucas alterações químicas existirão nesta região, ocorrendo apenas reações em pequena extensão, de redução indireta dos óxidos pré-reduzidos na parte superior do Alto-Forno. Todas as reações de redução acima desta região se processarão via consumo de monóxido de carbono, uma vez que as temperaturas reinantes nesta etapa do processo não

permitirão a ocorrência da reação de “*solution loss*” para a regeneração do poder redutor dos gases. A zona de reserva térmica esta associada à temperatura de 800°C para o caso do Alto-Forno a carvão vegetal. Desta forma, todo o dióxido de carbono resultante das reações de redução dos óxidos de ferro nesta região ascendem no forno sem alteração, definindo assim a chamada zona de redução indireta.

Finalmente os gases ascendentes após atravessarem a região de pré-aquecimento sairão no topo do forno em direção ao sistema de limpeza de gás.

O Alto-Forno pode ser relacionado a aspectos térmicos, químicos e estruturais. Do ponto de vista térmico, o calor liberado pela combustão na região das ventaneiras é cedido pelos gases à carga para realização do aquecimento, reações químicas e fusão dos sólidos no processo. Do ponto de vista térmico pode-se dividir o Alto-Forno em duas zonas, são elas a Zona Superior de trocas térmicas com temperaturas inferiores às de reatividade do combustível usado, onde os sólidos são aquecidos rapidamente utilizando o calor dos gases gerado das reações que ocorrem nas regiões inferiores do reator e a Zona Inferior de trocas térmicas com temperaturas superiores às de reatividade do combustível, onde a carga metálica será aquecida até a temperatura de vazamento do forno e o combustível entrará em reação, utilizando o calor fornecido pelos gases gerados no “*raceway*”.

Assim, tanto a partir do topo do forno como do nível das ventaneiras, as temperaturas do gás e dos sólidos da carga convergem para a temperatura de reatividade do combustível no forno, gerando a zona de reserva térmica.

Do ponto de vista químico, três regiões podem ser identificadas no Alto-Forno:

Zona Superior de Trocas Químicas, onde os óxidos de ferro superiores (hematita e magnetita) carregados serão reduzidos indiretamente até no máximo o nível de wustita, pelo monóxido de

carbono e hidrogênio gerado nas regiões inferiores do forno, sendo que o combustível atua como inerte quimicamente.

Zona Intermediária em Equilíbrio Químico, denominada zona de reserva química, onde praticamente todo óxido de ferro se encontra no estado de wustita, sendo a composição gasosa reinante determinada pelo equilíbrio ferro-wustita. As zonas superior e intermediária do Alto-Forno são também conhecidas como zona de preparação.

Zona Inferior de Trocas Químicas, também denominada zona de elaboração, onde a wustita é reduzida a ferro que será posteriormente fundido, ocorrendo simultaneamente a regeneração do CO pela reação de "solution loss", função da entrada em reação do combustível utilizado. A reação de redução direta toma então, progressivamente o lugar sobre a redução indireta.

Do ponto de vista estrutural do processo, cinco principais zonas podem ser identificadas no interior do Alto-Forno. São elas:

Zona Granular, onde a carga sólida mantém a estrutura estratificada, sob a forma de grãos sólidos, decorrentes do carregamento. Nesta zona ocorre reação de redução direta e indireta dos óxidos de ferro pelo gás ascendente.

Zona de Amolecimento e Fusão, esta zona consiste alternadamente de camadas semi-fundidas e amolecidas de material ferrífero semi-reduzido com camadas de carvão vegetal. O gás ascendente no Alto-Forno atravessa esta zona pelas camadas de carvão permeáveis chamadas janelas de carvão. A maioria do oxigênio remanescente, combinado com o ferro da carga metálica é removido pelo carbono nesta região.

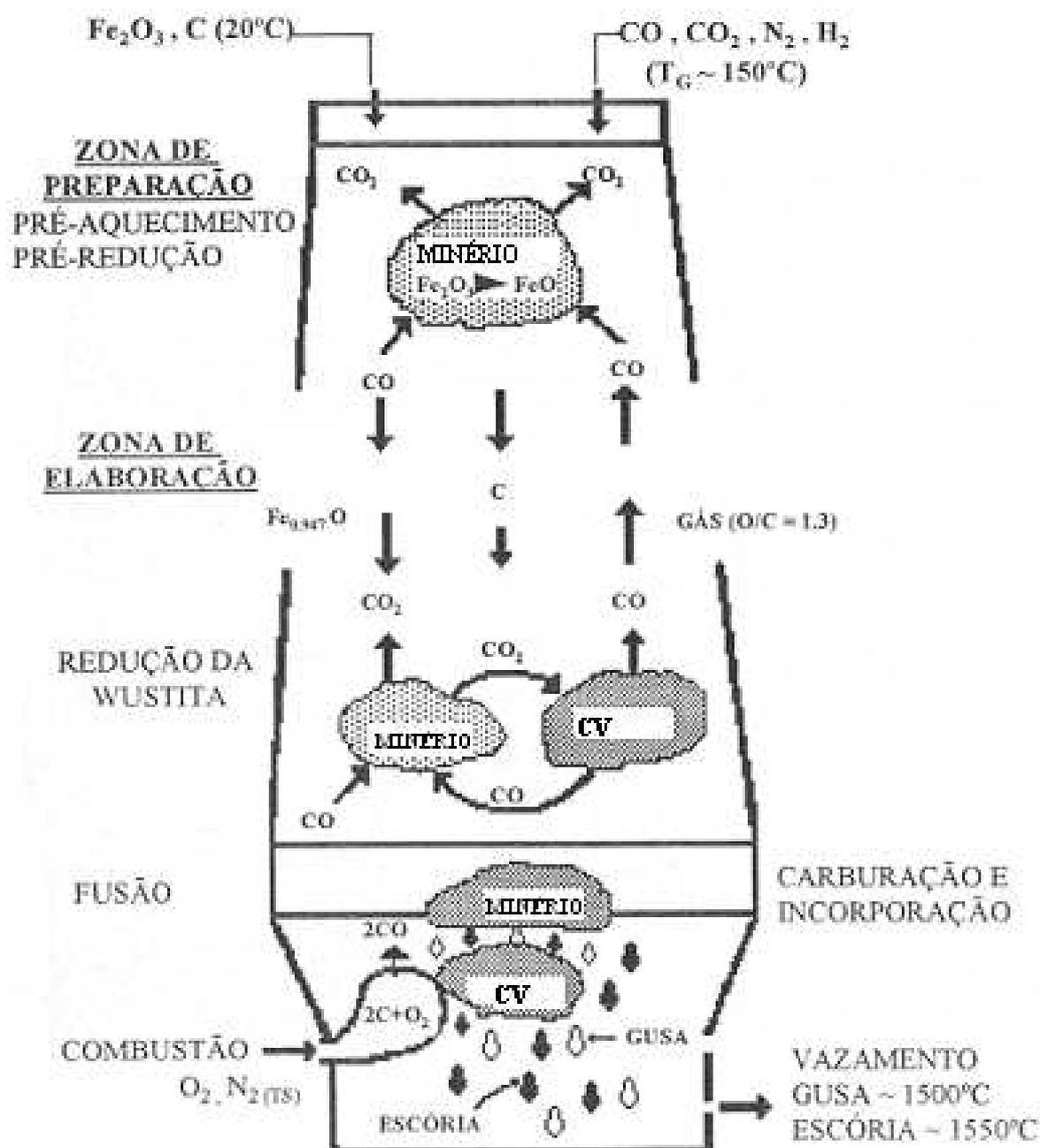


Figura 3.1.2 – Desenho esquemático das transformações térmicas e químicas no Alto-Forno, segundo ULHÔA, M.B., et al (1995).

Zona de Gotejamento, onde o metal e a escória, já sob a forma líquida, escoam em contracorrente com os gases através de um empilhamento de carvão vegetal parcialmente reagido. Este empilhamento, localizado logo abaixo da zona coesiva, fornecerá o carvão vegetal para a combustão nas ventaneiras (zona ativa) e para o homem morto (zona estagnante).

Zona do “*raceway*”, região altamente turbulenta em frente as ventaneiras onde ocorre a combustão do oxigênio do ar soprado com o carbono do carvão da zona ativa, que se move em direção das ventaneiras.

Zona de Cadinho, composta pelo empilhamento de carvão vegetal do homem-morto junto com a escória e gusa depositado no fundo do reator, que serão removidos do forno.

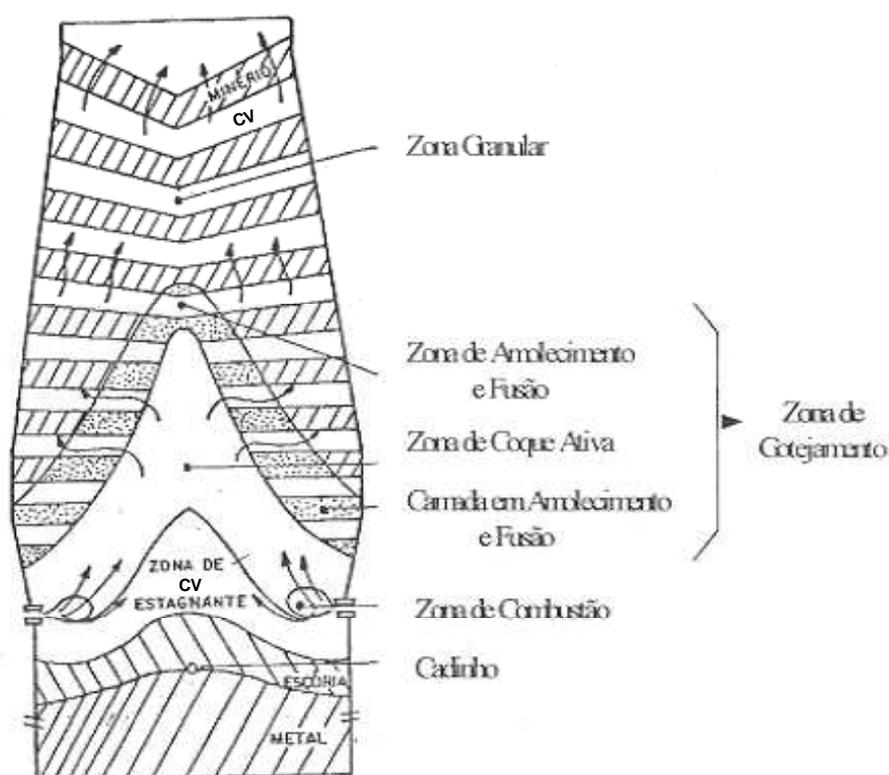


Figura 3.1.3 – Esquema da estrutura interna do Alto-Forno mostrando as várias zonas, segundo CAMPOS, V.F., et al (1984).

### 3.2 – O “STAVE COOLER “ E A DISTRIBUIÇÃO DE CARGA

Na Nippon Steel Corporation (NSC), durante anos o perfil dos “stave cooler” vem sendo estudados com o objetivo de se aumentar a performance e durabilidade do equipamento, porém o grande segredo da durabilidade dos “staves” está relacionado com o controle da camada de proteção do mesmo. Segundo a NSC, para garantir a estabilidade da camada de proteção deve-se manter elevado controle na distribuição do fluxo gasoso na parede do Alto-Forno. Este controle do fluxo gasoso é controlado fortemente pela distribuição de carga.

Em seu trabalho, Klein, C. et al (1999) avaliou o controle da distribuição do fluxo gasoso através das perdas térmicas nos “stave” (fluxo periférico), de utilização de sondas fixas para medição de temperatura do gás de topo e lanças penetrantes na cuba superior para análise de gás e medição de temperatura.

Klein, C. et al (1999) utilizou, para controle do fluxo gasoso, os conceitos de fluxo central e periférico. Para obter tais fluxos, foi utilizado o conceito de ângulo de empilhamento, através da alteração da seqüência de carregamento (adiantamento da posição do primeiro redutor em relação ao segundo) objetivando elevar o ângulo de empilhamento. Com esta alteração da seqüência de carregamento, obteve-se maior estabilidade operacional do Alto-Forno e conseqüente aumento da produção e redução do consumo específico de redutor.

Com o desgaste do refratário do forno, principalmente na região da zona de preparação, Klein, C. et al (1999), observou que não era efetivo o controle da marcha intermediária devido a um abaixamento da zona coesiva, provocada pela formação de uma camada de mistura. De acordo com estudos de Klein, C. et al, a solução foi inverter as posições dos redutores, ou seja, recuar o primeiro redutor para ajuste da marcha periférica e adiantar o segundo redutor para ajuste da marcha central.

Quite, E. et al (1991), relata a importância da distribuição de carga sobre a estabilidade operacional do Alto-Forno e ressalta alguns parâmetros para efetuar este controle como a alteração do nível de carga (“*stock line*”), mudança da base de redutor, minério e da seqüência de carregamento. Observou que, controlando-se estes parâmetros, obteve-se maior controle no fluxo gasoso central e periférico, e, conseqüentes ganhos de produtividade.

Mukherjee. T., et al (1984), desenvolveu modelo estático a frio para poder melhor avaliar a distribuição de carga no interior do Alto-Forno e as variáveis levadas em consideração foram a posição das placas móveis, a segregação dos finos dos materiais, formação da linha de mistura, rendimento gasoso e controle da interface minério/redutor. Constatou a necessidade de se carregar o primeiro redutor mais recuado do que o segundo para garantir maior controle no fluxo central e periférico.

Serrano, A.T.L., et al, relatou em seu trabalho a importância do ângulo de repouso das camadas que após a colisão sobre a superfície da carga o material rola em direção ao centro do forno, formando uma nova superfície. O ângulo formado por este “novo” material da superfície com o plano horizontal é o fator principal que determina a distribuição da carga metálica e do redutor na direção radial do forno.

Estudos conduzidos por Narita, et al, mostraram que o ângulo de superfície da carga é influenciado pelo volume de material presente na seqüência de carregamento e pelo tipo de carga metálica utilizada.

### 3.3 - DEFINIÇÃO DE “STAVE COOLER”

Os “Stave Cooler” são peças fundidas de ferro ou cobre instaladas nas paredes dos Altos-Fornos, entre a carcaça e o revestimento refratário, contendo canais ou tubulações internas, também fundidos, por onde será circulada a água responsável pela refrigeração do forno (esquema abaixo).

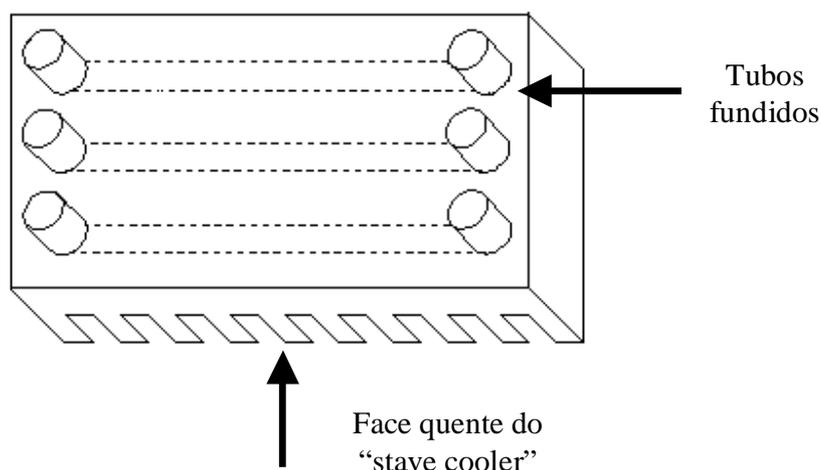


Figura 3.3.1 – Desenho esquemático do “stave cooler”, segundo VELLOSO, C.M., et al (2001).

### 3.4 – TIPOS DE “STAVE COOLER”

#### 3.4.1– PRIMEIRA GERAÇÃO

Os “Stave Cooler” de primeira geração apresentam como principais características o corpo do “stave” de ferro fundido com baixo cromo, tecnologia de refrigeração com base na circulação natural de vapor de água (conceito original desenvolvido na URSS - temperatura da água = 105° C), espessura da face quente do “stave” de 75 mm, cantos ou “corners” dos “staves” com deficiência de refrigeração e revestimento refratário simples do tipo “chamote”.

### 3.4.2– SEGUNDA GERAÇÃO

Os “Stave Cooler” de segunda geração apresentam como principais características o corpo do “stave” de ferro fundido nodular (mais dúctil), tecnologia de refrigeração com base na circulação forçada de água (temperatura da água = 38° C), espessura da face quente do “stave” de 115 mm, refrigeração mais eficiente dos cantos ou “corners”, através de joelhos com 90° e revestimento refratário com alta alumina e carbetto de silício.

### 3.4.3– TERCEIRA GERAÇÃO

Os “Stave Cooler” de terceira geração apresentam como principais características o corpo do “stave” de ferro fundido nodular (mais dúctil) ou cobre, tecnologia de refrigeração com base na circulação forçada de água (temperatura da água » 38° C), incorporação de “degrau” na face quente do “stave” visando melhorar a aderência do revestimento refratário, melhoria da refrigeração dos cantos ou “corners”, revestimento refratário com alta alumina e carbetto de silício e aumento do número de buracos na carcaça do alto forno, garantindo melhor sustentação para o “stave”.

### 3.4.4– QUARTA GERAÇÃO

Os “Stave Cooler” de quarta geração apresentam como principais características o corpo do “stave” de ferro fundido ou cobre, maior espessura do metal fundido, eliminação do revestimento frontal do “stave”, tecnologia de refrigeração com base na circulação forçada de água (temperatura da água = 38° C), instalação de serpentinas na parte traseira, no topo e base do “stave”, aumento da vida útil do refratário em mais de 2 anos e elevação da campanha do alto forno para 10 anos ou mais.

### 3.5 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO “STAVE COOLER” DO AF1 DA VMB

Os “Stave Cooler” instalados no Alto-Forno 1 da VMB são os “staves” de quarta geração descritos acima porém sem serpentinas, ou seja, são peças fundidas de cobre instaladas no forno entre a carcaça e o revestimento refratário, apresentam tubulações de refrigeração fundidas internamente no “stave”, possuem refratários na face de trabalho (quente) para reduzir abrasão e carga térmica (estes refratários são colocados principalmente para proteger o “stave cooler” durante o “Blow in” do Alto-Forno), possui sistema de circulação forçada de água para refrigeração (temperatura da água = 38° C), apresenta pontos para instalação de termopares para medição de temperatura na face quente e apresentam menor espessura de parede aumentando o volume interno do forno (carcaça + refratário).

### 3.6 - DISTRIBUIÇÃO E DIMENSÕES DO “STAVE COOLER” DO AF1 DA VMB

Segue a figura 3.6.1 e tabela III.1 com a distribuição física e dimensional do “Stave Cooler” no AF1 da VMB.

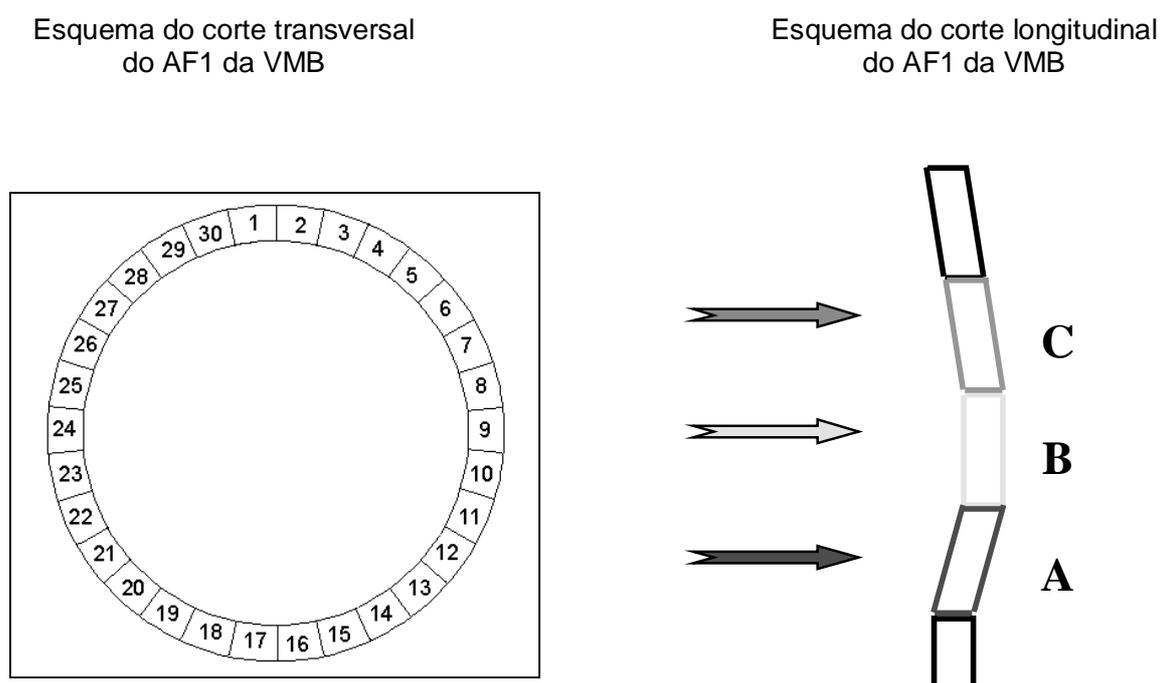


Figura 3.6.1 – Esquema do corte transversal e longitudinal do AF1 da VMB, segundo VELLOSO, C.M., et al (2001).

Tabela III.1 – Características dimensionais do “stave cooler” do AF1 da VMB

Linha	Número de Staves	Altura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
A	30	3030	722	143
B	30	2620	740	116
C	30	3676	709	116

### 3.7 - DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE ÁGUA NO "STAVE COOLER" DO AF1 DA VMB

Segue figura 3.7.1 com a distribuição de água no "Stave Cooler" do AF1 da VMB.

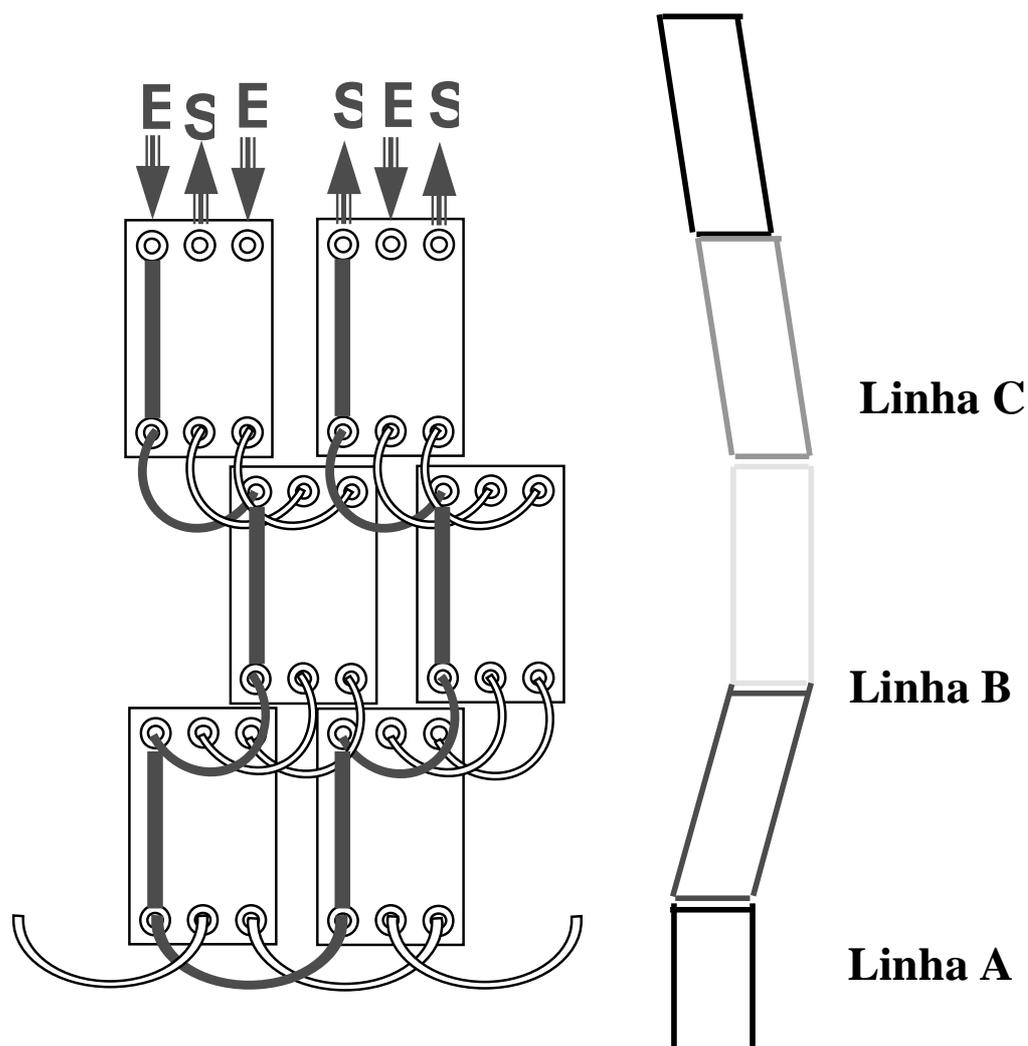


Figura 3.7.1 – Esquema do fluxo de água no "stave cooler" do AF1 da VMB, segundo VELLOSO, C.M., et al (2001).

A circulação de água nos “stave cooler” é sempre feita alternando-se de “stave” para “stave” para garantir uma maior segurança ao sistema, pois caso ocorra algum furo ou rompimento, em algum tubo, será possível isolar apenas ele, de tal forma que, não se perca todo o conjunto do “stave”.

O desenho acima mostra esta distribuição: a água entra pelo topo, no primeiro tubo do “stave” da linha C, sai deste tubo e vai para a linha B de “stave” em outra coluna de “stave”, entra no primeiro tubo, sai deste tubo e vai para a linha A de “stave” no primeiro tubo na mesma coluna da linha C. Ao sair deste tubo a água vai para o primeiro tubo da coluna de “stave” ao lado, na linha A. Ao sair a água vai para a linha B entrando no primeiro tubo. Para finalizar a água vai para a linha de “stave” C, no primeiro tubo e sai acima.

O fato de a água entrar e sair pela parte superior é para garantir que o sistema esteja sempre pressurizado não tendo risco do mesmo ficar vazio.

### 3.8 – DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DE REFRIGERAÇÃO DO AF1 DA VMB

O circuito fechado de refrigeração do AF1 é um circuito complexo e compreende a alimentação de água para os “stave cooler”, ventaneiras, timpas, caixas de cobre, caixas de aço, válvulas de ar quente e unidade hidráulica. Abaixo segue o detalhamento das zonas do Alto-Forno a refrigerar.

### 3.9 - ZONAS DO ALTO-FORNO A REFRIGERAR

Tabela III.2 – Vazões de Água das Zonas do Alto-Forno 1 a refrigerar

<b>ZONA A REFRIGERAR</b>	<b>VAZÃO DE ÁGUA (m<sup>3</sup>/h)</b>
12 timpas de refrigeração das ventaneiras	180
12 ventaneiras – corpo	300
12 ventaneiras – bico	300
3 filas de stave cooler com 30 peças cada	610
5 filas de caixas de cobre com 20 peças em cada	175
4 filas de caixas de aço com 20 e/ou 16 peças em cada	175
Unidade hidráulica do topo	3
Válvulas de ar quente dos cowpers e anel de vento	130

### 3.10- UTILIZAÇÃO DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO DOS “STAVE COOLER”

A água em circulação no circuito fechado de refrigeração é reutilizada diversas vezes, sendo dividida em primária, secundária e terciária.

A água primária é utilizada para as seguintes regiões refrigeradas:

Tabela III.3 – Água primária do circuito fechado do AF1

<b>ZONA A REFRIGERAR</b>	<b>VAZÃO DE ÁGUA (m<sup>3</sup>/h)</b>
12 timpas de refrigeração das ventaneiras	180
12 ventaneiras – corpo	300
5 filas de caixas de cobre com 20 peças em cada	175
4 filas de caixas de aço com 20 e/ou 16 peças em cada	175
Válvulas de ar quente dos cowpers e anel de vento	130
Vazão total	960

O retorno da água de refrigeração das válvulas de ar quente dos “cowpers” e anel de vento, das timpas e dos corpos da ventaneiras é direcionado e reunido em um coletor e em seguida é bombeado para as três fileiras de “stave cooler”. Esta é a chamada água secundária.

Tabela III.4 – Água secundária do circuito fechado do AF1

<b>ZONA A REFRIGERAR</b>	<b>VAZÃO DE ÁGUA (m<sup>3</sup>/h)</b>
3 filas de “stave cooler” com 30 peças cada	610

A água de retorno da refrigeração das caixas de cobre e aço não utilizadas como água secundária é encaminhada para uma tubulação principal. Neste ponto, após sua segunda utilização, entra a água de retorno dos “staves”. Os dois volumes de água se misturam e entram a uma temperatura de equilíbrio. Neste local, é retirada por bombas “booster”, a água de refrigeração dos bicos das ventaneiras.

Tabela III.5 – Vazão de água dos “bicos” de ventaneiras

ZONA A REFRIGERAR	VAZÃO DE ÁGUA (m <sup>3</sup> /h)
12 ventaneiras – bico	300

A partir deste ponto, segue uma vazão de água de 960 m<sup>3</sup>/h que serão refrigeradas nos trocadores de calor. Observar que a água de alimentação dos bicos das ventaneiras não passa pelas torres de refrigeração.

Os trocadores de calor são em número de quatro e apresentam, individualmente, capacidade de resfriar 320 m<sup>3</sup>/h, ou seja, o circuito total apresenta uma capacidade de 1280 m<sup>3</sup>/h.

Toda a água do circuito fechado é tratada e a especificação é dada na tabela abaixo:

Tabela III.6 – Qualidade química da água do circuito fechado de refrigeração do Alto-Forno1 da VMB

PROPRIEDADES	UNIDADE	VALOR
Aparência (água de make-up )	-	Transparente, incolor
Valor do pH ( 20°C )	-	7 - 9
Condutividade	µS/cm	< 250
Sólidos em suspensão	mg / l	< 10
Tamanho das partículas	mm	< 0,2
Contaminação biológica	CFU / ml	< 10 <sup>4</sup>
Cloro (livre / latente)	mg / l	< 50
Dureza dos carbonatos	°dH	< 0,5
M - alcalinidade	ppm CaCo3	< 9
Dureza total	°dH ppm CaCo3	< 10 180
Oxigênio ( O2 )	mg / l	7 - 9
Fe ( total )	mg / l	<1
Manganês ( Mn )	mg / l	< 0,1
Cobre ( Cu )	mg / l	< 0,05
Amônia ( NH3 / NH4 )	mg/l	< 0,05
Nitratos ( NO3 )	mg / l	nenhum
Cloretos ( Cl (-) )	mg / l	< 50
Sulfatos ( SO4(2-) )	mg / l	< 150
Sulfatos	mg / l	nenhum
Óleo e graxa	mg / l	nenhum

### 3.11 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CARREGAMENTO DO AF1 DA VMB

O Alto-Forno 1 possui atualmente um sistema de pesagem com correia transportadora, atendendo os silos de minérios, pelotas, calcário, quartzo, dolomita e minério de manganês, que é um sistema automático de pesagem estático composto de uma balança por silo e uma correia transportadora sobre trilhos com chute para alimentação dos silos intermediários que fazem a transferência de material para os “skips”, que posteriormente irão levar o material para o topo do Alto-Forno de acordo com a seqüência de carregamento pré-determinada.

A figura 3.11.1, representa o principal sistema de pesagem e abastecimento do Alto-Forno 1 com correias transportadoras.

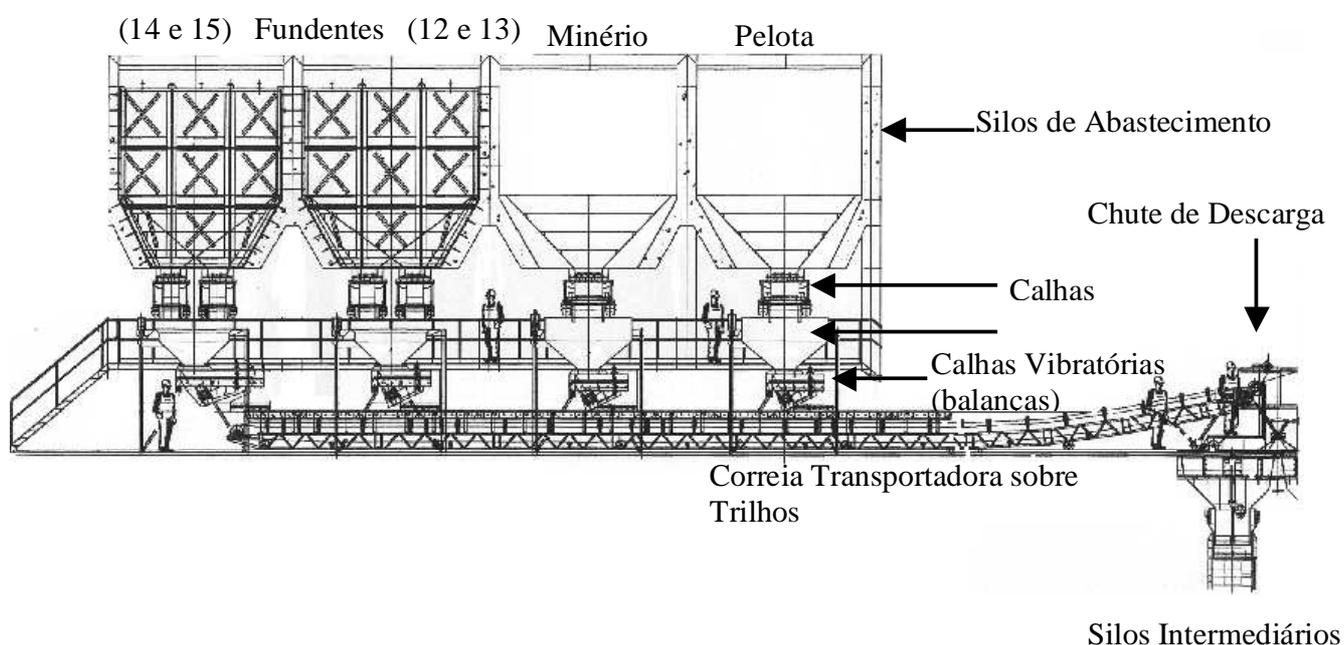


Figura 3.11.1 – Desenho esquemático do sistema de carregamento do AF1, segundo BARROSO, R.C., et al (2003).

### 3.12 - DESCRIÇÃO DO TOPO DO AF1 DA VMB

O topo do Alto-Forno 1 é conhecido como “lock hopper top” que é um topo com duplo cone (superior e inferior), com anel de silicone no cone superior, com a tremonha giratória enclausurada, sendo que, a estanqueidade do topo é feita por duas válvulas de selagem (“skip” direito e esquerdo).

As principais vantagens deste topo são a minimização dos vazamentos de gás no topo diminuindo as emissões ambientais, o aumento da vida útil do cone inferior uma vez que o mesmo deixa de ter funções de estanqueidade, apenas carregamento, diminuição dos custos de manutenção com reparos intermediários dos cones e possível aumento da pressão de trabalho no topo.

As figuras 3.12.1 e 3.12.2, representam o desenho do topo do Alto-Forno 1.

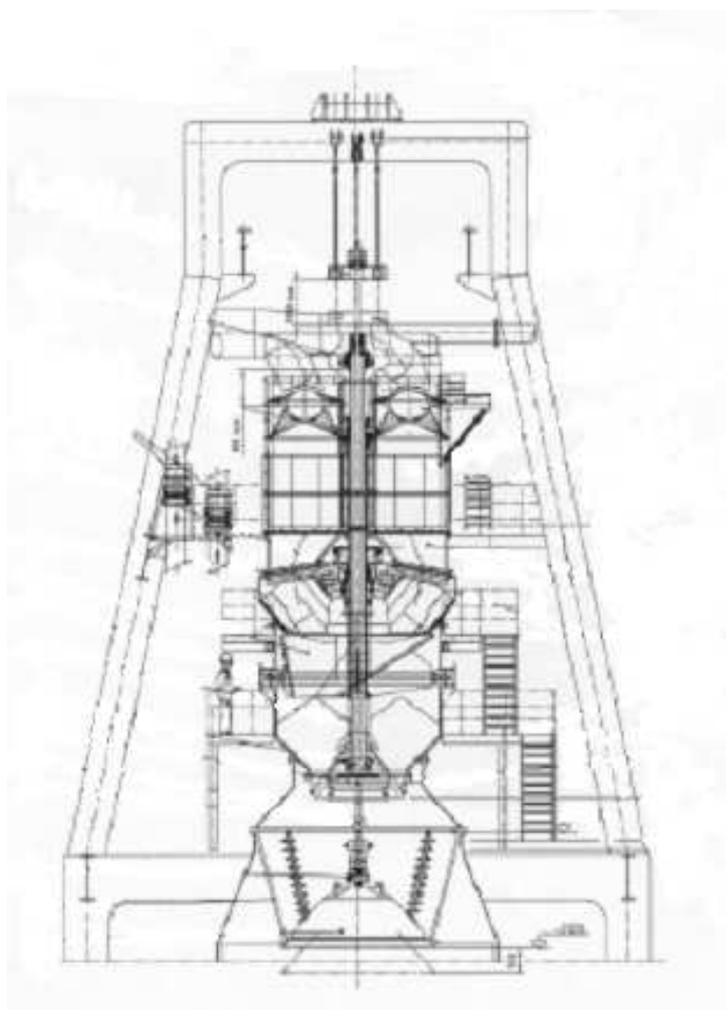


Figura 3.12.1 – Desenho esquemático do sistema de topo do AF1.

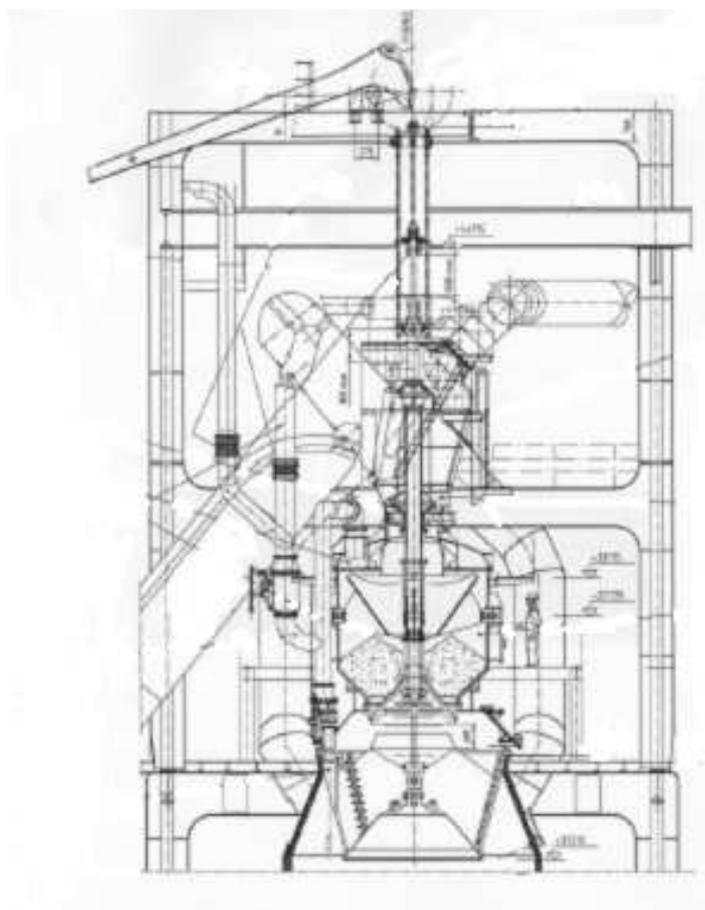


Figura 3.12.2 – Desenho esquemático do sistema de topo do AF1 em funcionamento.

### 3.13 - DISTRIBUIÇÃO DE CARGA NO TOPO DO AF1 DA VMB

A distribuição de carga no topo do Alto-Forno 1 após o descarregamento do material do “skip” é feita, inicialmente, através de um sistema de tremonha giratória com velocidades controladas diferenciadas, para cada tipo de material.

O segundo estágio da distribuição de carga no topo do forno é realizado por um sistema de placas móveis, que são chapas grossas de impacto ajustáveis instaladas em sistemas de fecho tipo campânula debaixo do cone grande.

Estas placas móveis apresentam posições de trabalho diferenciadas podendo variar da posição 0 (mais próximo à parede do forno) a 10 (mais próximo ao centro do forno), onde a posição 0 é a que apresenta o menor ângulo de inclinação e a posição 10 é a que apresenta o maior ângulo de inclinação. É a combinação destas posições que pode proporcionar a melhor distribuição de carga no topo do forno e favorecer a distribuição e aproveitamento dos gases na cuba do Alto-Forno.

A figura 3.13.1, que é um corte radial do Alto-Forno na região das placas móveis, demonstra a situação descrita acima.

Devido a uma boa distribuição de carga na cuba do AF utilizando as placas móveis, pode-se alterar o fluxo de gás de tal forma que, o gás, não passe ao longo das paredes do forno. O revestimento refratário, a refrigeração do forno e a carcaça do forno ficarão, assim, sujeitos a menor desgaste, o que permite operar o Alto-Forno de uma maneira mais estável, conseguindo assim, prolongar a vida útil do forno, e ainda aumentar a produtividade e reduzir o consumo de carvão vegetal.

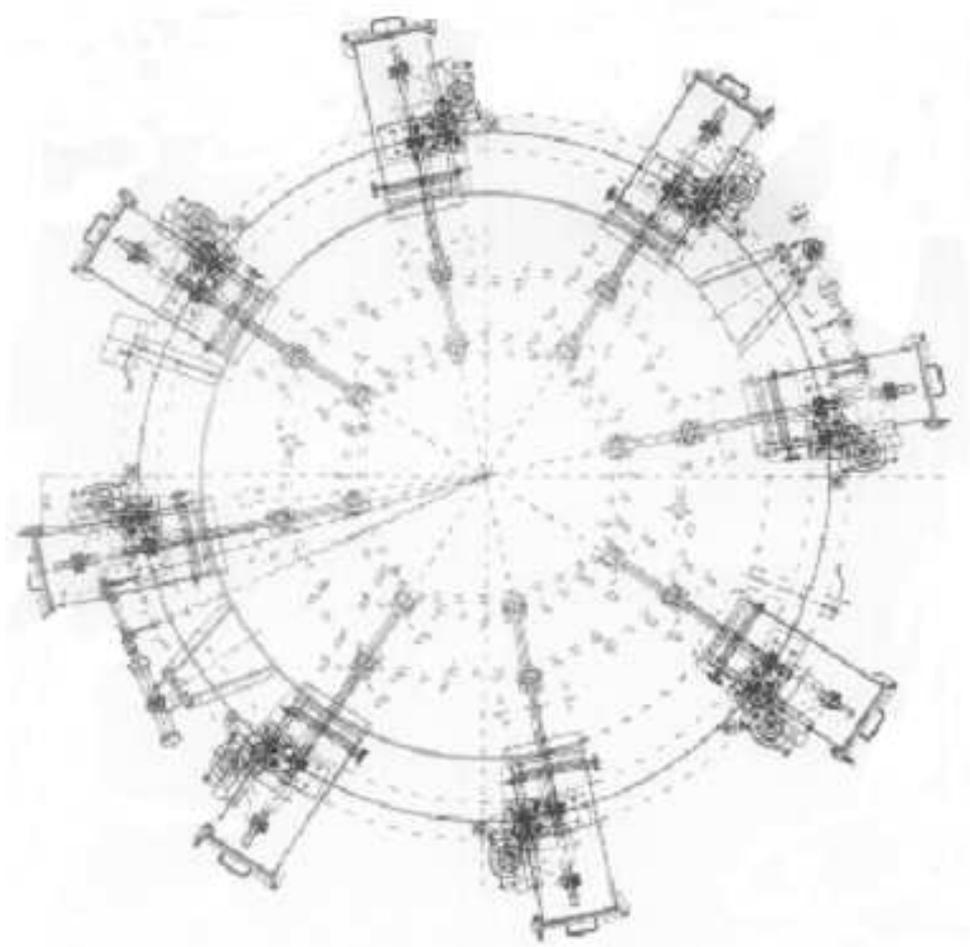


Figura 3.13.1 – Desenho esquemático das placas móveis no topo do AF1.

### 3.14 – FATORES QUE AFETAM A DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO GASOSO NO INTERIOR DO ALTO-FORNO

O controle da distribuição de carga no Alto-Forno tem como objetivo a formação de uma zona coesiva ideal o que se traduz em estabilidade do reator e, conseqüentemente, maior produtividade e menor consumo de reductor.

Para tanto é essencial que se tenha um excelente controle da seqüência de distribuição de carga e da base de reductor do reator.

#### 3.14.1- POSIÇÃO DAS PLACAS MÓVEIS

A definição de qual a melhor seqüência de carregamento a ser utilizada em termos de posição das placas móveis depende do tipo de marcha que se está objetivando no forno: central, periférica e intermediária.

Para se obter uma marcha central deve-se trabalhar com um carregamento central de carvão vegetal, ou seja, objetiva-se colocar a carga metálica na região mais próxima da parede e o carvão vegetal na posição mais central.

Para se obter uma marcha periférica deve-se, de um modo em geral, agir da maneira oposta ao caso acima, ou seja, colocar a carga metálica numa posição central e o carvão vegetal em uma posição periférica.

Para se obter uma marcha intermediária deve-se mesclar os dois carregamentos acima, ou seja, colocar um pouco de carvão no centro do forno e um pouco na região periférica.

Dizendo da maneira acima parece uma fórmula matemática, mas não é, pois, a arte de se definir os tipos de marcha e as seqüências a serem seguidas está totalmente relacionada com a prática e a experiência operacional.

### 3.14.2- BASE DE REDUTOR

Sua função é garantir as “janelas” de carvão vegetal na região de combustão do Alto-Forno, conferindo a melhor permeabilidade possível à passagem dos gases que são gerados nesta região.

A base de carvão vegetal do Alto-Forno é definida, geralmente, em termos estruturais/dimensionais do reator.

Em termos de equipamentos a base de carvão vegetal é calculada em relação ao diâmetro da goela do Alto-Forno.

A equação abaixo demonstra esta relação:

$$\text{LOG BC} = 2,746 \times \text{LOG (Dgoela)} - 1,28$$

Onde:

BC = Base de carvão vegetal (t)

Dgoela = Diâmetro da goela do forno (m).

#### 4- METODOLOGIA DE TRABALHO

##### 4.1 - CÁLCULO DA BASE DE CARVÃO VEGETAL IDEAL PARA O ALTO-FORNO 1

Para se determinar qual a base de carvão vegetal ideal para o AF1 será utilizado a equação:

$$\text{LOG BC} = 2,746 \times \text{LOG (Dgoela)} - 1,28$$

Onde:

BC = Base de carvão vegetal (t)

Dgoela = Diâmetro da goela do forno (m).

##### 4.2 – PROPOSIÇÕES DE TESTES PARA SEQUÊNCIAS DE CARREGAMENTO NO TOPO DO AF1

Para avaliar a melhor seqüência de carregamento para operação do Alto-Forno 1 da VMB, objetivando os melhores níveis de produção, consumo de carvão vegetal total e taxa de injeção de carvão vegetal pulverizado, foram propostos 16 seqüências de carregamentos, que deverão ser testadas industrialmente.

Cabe ressaltar que, as proposições destas seqüências, foram baseadas na experiência operacional e auxiliadas pelos estudos realizados por Klein, C. et al (1999), onde foi utilizado para controle do fluxo gasoso, os conceitos de fluxo gasoso central e periférico, que para serem obtidos utilizam o conceito de ângulo de empilhamento da carga, que por sua vez, são obtidos através da alteração da distribuição de carga, onde, adiantamos o primeiro reductor em relação ao segundo.

Na tabela IV.1, segue a definição das seqüências de carregamentos para testes industriais.

Tabela IV.1 – Seqüências de carregamentos propostos para teste industrial no AF1

<b>TESTE INDUSTRIAL</b>	<b>SEQUÊNCIA DE CARREGAMENTO</b>	<b>POSIÇÃO DAS PLACAS MÓVEIS</b>
1	CCMM	603260326632
2	CCMM	063260326632
3	CCMM	002200225522
4	CCMM	552250225522
5	CCMM	502250225022
6	CCMM	002200225522
7	CCMM	552250225022
8	CCMM	802280228022
9	CCMM	80218021
10	CCMM	80108010
11	CCCCMMMM	80018001
12	CCCCMMMM	80802222
13	CCCCMMMM	90901111
14	CCCCMMMM	90902211
15	CCMM	90901111
16	CCMM	9011

### 4.3 – AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS INDUSTRIAIS

Após a realização dos testes industriais, será feita uma avaliação estatística de cada período em relação ao outro, definindo, assim, qual a melhor seqüência de carregamento e distribuição de carga no topo do forno em termos de produção, consumo de redutor, taxa de injeção de carvão pulverizado e perdas térmicas.

As avaliações estatísticas que serão feitas com os resultados industriais são: Anova de um fator, Comparações Múltiplas – Teste de Tukey, Regressão Múltipla e Coeficiente de Spearman.

Abaixo segue a definição de cada uma destas avaliações estatísticas:

#### 4.3.1 – ANOVA DE UM FATOR

É um método para comparar três ou mais populações, definidas por uma variável qualitativa (fator), através de testes com as correspondentes médias. Um fator (ou tratamento) é uma característica que nos permite distinguir diferentes populações umas das outras.

Suponha que estamos interessados em comparar as médias de K populações, isto é, queremos testar:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k ;$$

$H_1$ : pelo menos uma das médias  $\mu_i$  é diferente das demais.

Valem as seguintes suposições quando testamos a hipótese de que três ou mais amostras provêm de populações com a mesma média:

- As populações têm distribuições normais.

- As populações têm a mesma variância  $\sigma^2$ .
- As amostras são aleatórias e mutuamente independentes.
- As diferentes amostras provêm de populações classificadas em apenas uma categoria.

Com a suposição de que as populações tenham todas a mesma variância  $\sigma^2$ , estimamos seu valor comum utilizando duas abordagens diferentes. A estatística de teste F é a razão dessas duas estimativas, de modo que um valor de F significativamente grande constitui evidência contra a igualdade das médias populacionais. As duas abordagens para estimar o valor comum de  $\sigma^2$  são:

- A variância entre amostras é uma estimativa da variância populacional comum  $\sigma^2$  que se baseia na variabilidade entre as *médias* amostrais.
- A variância dentro das amostras é uma estimativa da variância populacional comum  $\sigma^2$  baseada nas *variâncias* amostrais.

Estatística de Teste:

$$F = \frac{\text{var iância\_entre\_amostras}}{\text{var iância\_dentro\_de\_amostras}} = \frac{QME}{QMD} \text{ onde } F \sim F(K-1, K(m-1)),$$

Isto é, a quantidade F tem distribuição de Fisher-Snedecor com K-1 e K(m-1) graus de liberdade, onde K é o número de amostras independentes, com m indivíduos em cada uma delas. QME é o Quadrado Médio do Tratamento (ou Entre) e QMD é o Quadrado Médio do Erro (ou Dentro). Temos, agora, condições de encontrar o valor crítico  $f_c$  e determinar a região crítica do teste, que será da forma:

$$RC = \{x \in \mathfrak{R}^+ : x > f_c\}.$$

Os diversos programas estatísticos existentes adotam expressões diferentes para F, porém equivalentes, que envolvem a notação SQ (Soma de Quadrados) e QM (Quadrado Médio).

Um exemplo de uma tabela de Análise de Variância para um fator (tratamento) é dada na tabela IV.2.

Tabela IV.2 – Tabela de Análise de Variância (ANOVA).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Tratamento (ou Entre)	$K - 1$	SQE	$QME = SQE/(K-1)$	$QME/QMD$
Erro (ou Dentro)	$K(m - 1)$	SQD	$QMD = SQD/[K(m-1)]$	-
Total	$Km - 1$	SQT	-	-

#### 4.3.2 – COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS – TESTE DE TUKEY

A ANOVA informa somente se há ou não diferença estatisticamente significativa entre dois ou mais grupos, mas não informa qual os grupos envolvidos. Para identificar os grupos, deve-se realizar uma comparação entre os pares - pair wise comparison test - que irá comparar cada grupo com cada um dos outros. O Teste de Tukey é um dos testes capazes de realizar esta análise.

O Teste de Tukey permite estabelecer a diferença mínima significativa ou seja, a menor diferença de médias de amostras que deve ser tomada como estatisticamente significativa, em determinado nível, fornecendo intervalos de confiança para as diferenças entre as médias. Se o intervalo de confiança contiver o valor zero, significa que não há diferença entre as médias. Caso contrário, há diferença estatisticamente significativa.

#### 4.3.3 – REGRESSÃO MÚLTIPLA

Regressão Múltipla é um método que descreve o relacionamento estatístico entre uma resposta (variável dependente), e duas ou mais variáveis explicativas (ou preditores). A regressão utiliza freqüentemente o método de Mínimos Quadrados, que determina qual a melhor equação que minimiza a soma de quadrados dos desvios verticais. Para validar o modelo, temos que avaliar se as seguintes suposições são válidas através dos gráficos de resíduos:

- Resíduos normais;
- Resíduos normalmente distribuídos com média zero e variância  $\sigma^2$ ;
- Resíduos com variância constante.

#### 4.3.4 – COEFICIENTE DE SPEARMAN

Nos casos em que os dados não formam uma nuvem comportada, com alguns pontos bem distantes dos demais, ou em que parece existir uma relação crescente ou decrescente num formato de curva, ou em que os dados não apresentam distribuição normal, o coeficiente de correlação por postos de Spearman é mais apropriado.

Este é um método não-paramétrico que usa somente os postos (ordem crescente), e não faz quaisquer suposições (normalidade, por exemplo). Essencialmente tudo o que faz é calcular o coeficiente de correlação de Pearson nos postos. Este coeficiente avalia a correlação entre duas variáveis com distribuição normal, ou seja, mostram o grau de relacionamento entre as duas variáveis.

## 5- RESULTADOS DOS TESTES INDUSTRIAIS E DISCUSSÃO

### 5.1 – ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

Após a realização do teste industrial sobre as seqüências de carregamento e distribuição de carga no topo do Alto-Forno 1 da VMB, segue a análise descritiva dos dados para os 16 períodos, para cada uma das variáveis:

- Produção de Ferro Gusa (t/dia)
- Carvão Bruto (kg/t)
- Injeção (kg/t)
- Perdas Térmicas (kW/h)

A tabela V.1 explicita para cada variável acima os números de dados (N), números de dados faltantes (N\*), média aritmética (Mean), desvio-padrão (StDev), menor valor observado (Minimum), mediana (Median) e maior valor observado (Maximum).

Tabela V.1 – Tabela de Análise Descritiva dos Dados

<b>Descriptive Statistics: Perdas Térm; Produção Fer; Carvão Bruto; Injeção</b>								
Variable	Período	N	N*	Mean	StDev	Minimum	Median	Maximum
Perda Térmica (kW)	1	54	1	3953	1252	1746	3892	6411
	2	3	0	4461	794	3544	4905	4933
	3	20	0	4515	1068	2603	4570	6632
	4	2	0	5058	468	4727	5058	5389
	5	9	0	4384	1462	1981	4341	6567
	6	4	0	4554	1020	3039	4960	5256
	7	1	0	4344,6	*	4344,6	4344,6	4344,6
	8	79	0	4586,7	863,4	2204,3	4591,1	6763,3
	9	2	0	4189	367	3929	4189	4448
	10	1	0	4731,3	*	4731,3	4731,3	4731,3
	11	1	0	5091,0	*	5091,0	5091,0	5091,0
	12	4	0	4885	390	4502	4804	5429
	13	184	3	4647,2	907,8	2083,4	4571,9	6698,3
	14	1	0	3052,3	*	3052,3	3052,3	3052,3
	15	35	0	4375	947	805	4523	5665
	16	190	1	4854,9	812,2	1302,7	5005,4	7252,5
Produção Gusa	(t) 1	55	0	862,0	79,6	705,8	859,1	1012,5

2	3	0	920,4	111,6	832,0	883,5	1045,8
3	20	0	980,1	108,1	816,0	989,2	1209,5
4	2	0	936,1	45,0	904,3	936,1	968,0
5	9	0	968,9	71,7	885,5	958,0	1127,8
6	4	0	933,5	149,4	776,5	919,4	1118,6
7	1	0	982,22	*	982,22	982,22	982,22
8	79	0	1065,6	106,2	774,1	1069,6	1321,2
9	2	0	1021,2	86,4	960,1	1021,2	1082,3
10	1	0	977,30	*	977,30	977,30	977,30
11	1	0	983,90	*	983,90	983,90	983,90
12	4	0	1035,4	72,2	977,1	1015,4	1133,5
13	187	0	1077,6	111,8	700,2	1082,8	1315,5
14	1	0	1076,0	*	1076,0	1076,0	1076,0
15	35	0	1067,9	108,9	773,5	1062,4	1296,3
16	191	0	1166,4	119,9	713,3	1174,5	1399,7
Carvão Bruto (kg/t)							
1	55	0	838,5	80,1	682,7	836,1	986,2
2	3	0	851,8	112,2	727,4	882,7	945,3
3	20	0	784,3	84,4	662,7	790,3	928,9
4	2	0	685,0	45,3	653,0	685,0	717,0
5	9	0	739,8	84,6	613,4	753,0	892,5
6	4	0	751,8	60,9	663,7	775,5	792,6
7	1	0	738,94	*	738,94	738,94	738,94
8	79	0	711,22	71,47	602,21	713,74	930,28
9	2	0	685,2	107,4	609,2	685,2	761,2
10	1	0	679,91	*	679,91	679,91	679,91
11	1	0	685,07	*	685,07	685,07	685,07
12	4	0	674,0	44,4	619,4	674,6	727,2
13	187	0	723,75	77,33	600,47	708,58	989,39
14	1	0	673,12	*	673,12	673,12	673,12
15	35	0	761,9	89,6	608,4	732,3	938,1
16	191	0	770,69	84,83	610,05	764,87	993,99
Injeção (kg/t)							
1	55	0	141,22	15,52	109,04	140,60	176,26
2	3	0	148,7	20,3	132,3	142,6	171,4
3	20	0	130,98	19,48	96,90	133,98	169,55
4	2	0	132,2	22,2	116,5	132,2	148,0
5	9	0	114,42	16,99	99,57	102,92	142,60
6	4	0	127,7	22,5	109,1	120,7	160,4
7	1	0	132,87	*	132,87	132,87	132,87
8	79	0	145,73	15,44	96,44	147,75	172,93
9	2	0	149,1	16,2	137,7	149,1	160,5
10	1	0	152,48	*	152,48	152,48	152,48
11	1	0	161,55	*	161,55	161,55	161,55
12	4	0	148,28	9,52	136,54	149,27	158,04
13	187	0	130,88	16,58	91,10	131,14	172,24
14	1	0	114,61	*	114,61	114,61	114,61
15	35	0	135,47	13,22	101,15	136,80	156,94
16	191	0	136,78	17,07	77,70	137,92	175,89

## 5.2 – GRÁFICOS BOXPLOT E DE DISPERSÃO PARA AS VARIÁVEIS POR PERÍODO

Na figura 5.2.1, gráfico Boxplot, visualizamos os valores mínimos, máximo, 1º quartil (25% dos dados), 2º quartil ou mediana (50% dos dados) e 3º quartil (75% dos dados).

Além disso, temos uma idéia da variabilidade dos dados. Valores que se diferenciam muito dos outros são chamados “outliers” e representados por \*.

Na figura 5.2.1 (gráfico de dispersão), cada ponto (observação) é visualizado. Serve para nos dar uma idéia da variabilidade dos dados e de onde se concentram mais pontos.

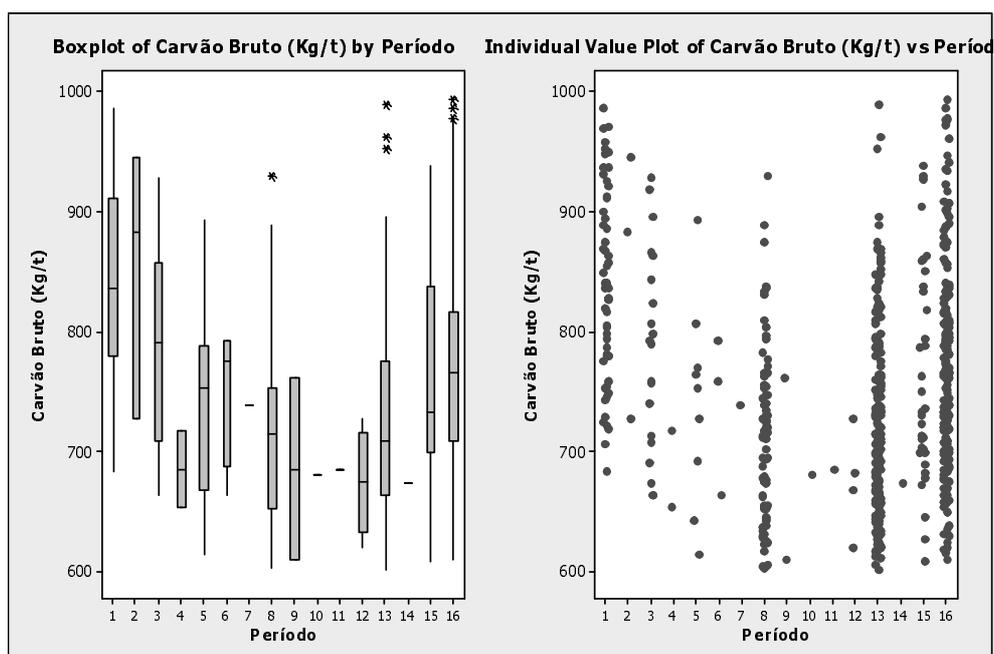


Figura 5.2.1 – Gráfico Boxplot e de Dispersão para a variável “Carvão Bruto”

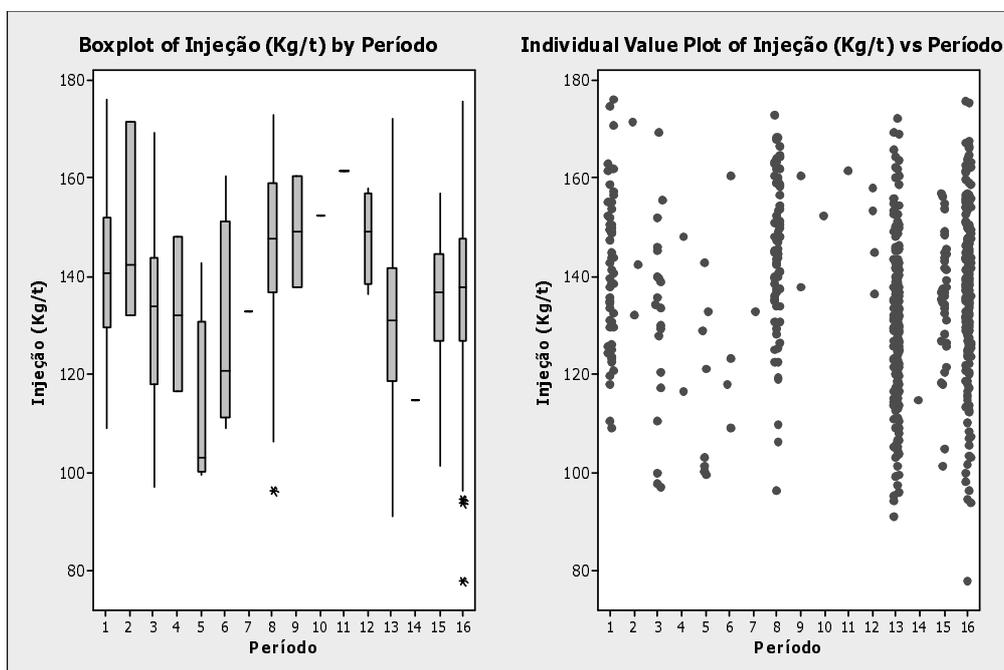


Figura 5.2.2 – Gráfico Boxplot e de Dispersão para a variável “Injeção de Carvão”.

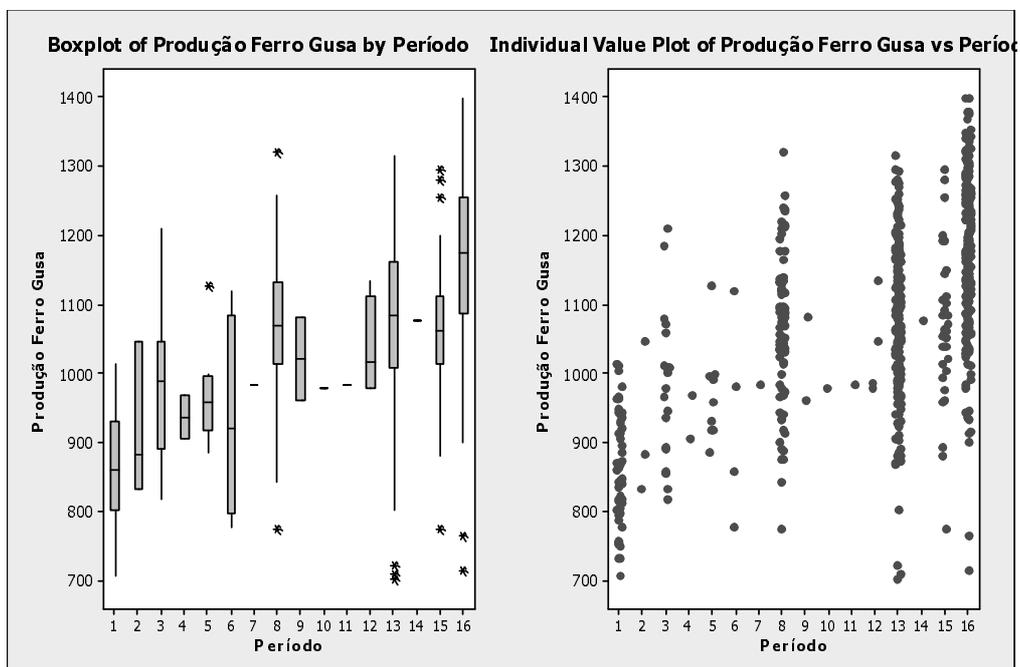


Figura 5.2.3 – Gráfico Boxplot e de Dispersão para a variável “Produção de Gusa”

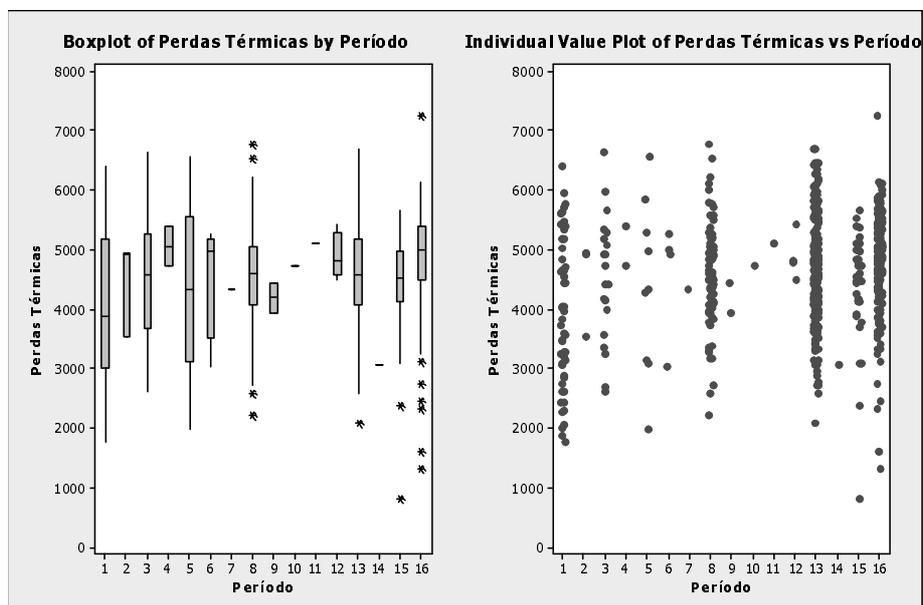


Figura 5.2.4 – Gráfico Boxplot e de Dispersão para a variável “Perdas Térmicas”

Na figura 5.2.5, temos para cada variável, a média observada de cada período indicada em um intervalo de confiança de 95% para cada média.

Vale ressaltar que alguns dos intervalos estão muito grandes, o que deixa claro que os resultados do teste apresentaram baixa performance.

Isto acontece quando o período apresenta, ou o número de dias observados muito pequeno ou o desvio-padrão muito grande.

Estes dois fatores influenciam diretamente na construção do intervalo de confiança.

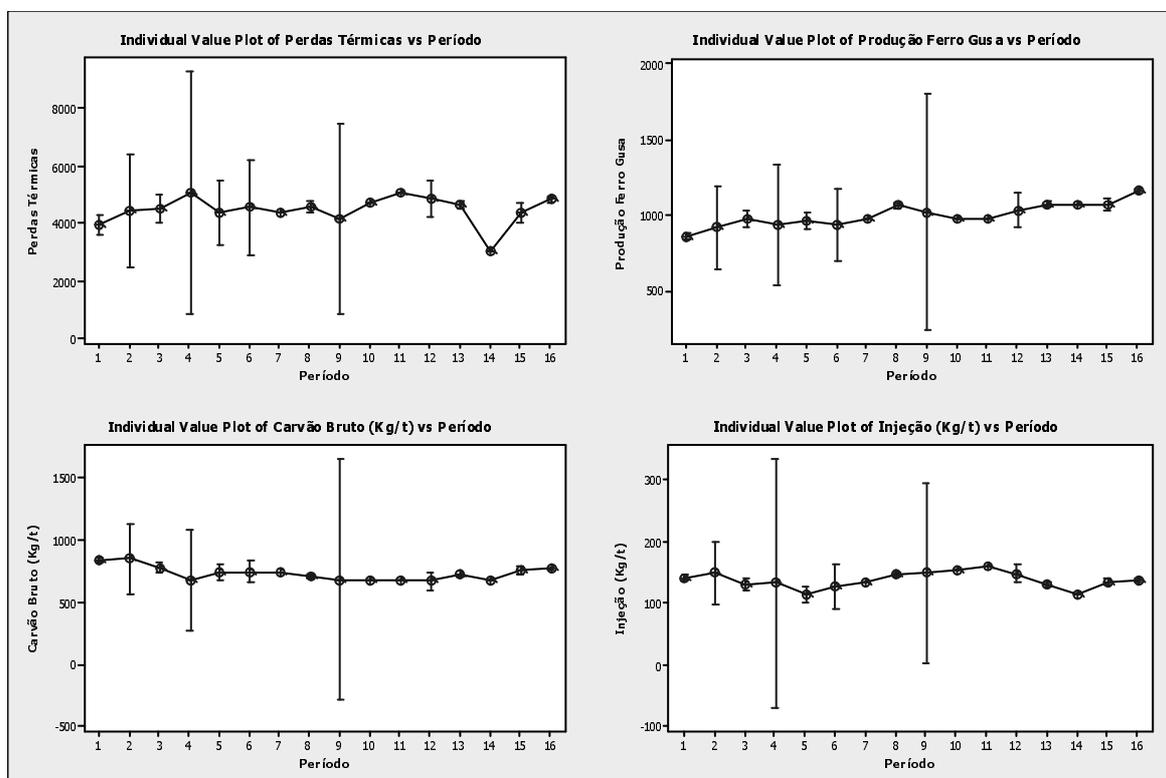


Figura 5.2.5 – Gráfico Média observada de cada período com intervalo de confiança de 95%

### 5.3 – TESTE ANOVA PARA COMPARAR AS MÉDIAS DOS PERÍODOS

Para que as análises de ANOVA sejam válidas, é necessário que os resíduos (diferença entre o valor observado menos o valor ajustado pelo modelo) sejam:

- Normais (distribuição);
- Independentes (uma observação não interfere na outra);
- e com variância constante.

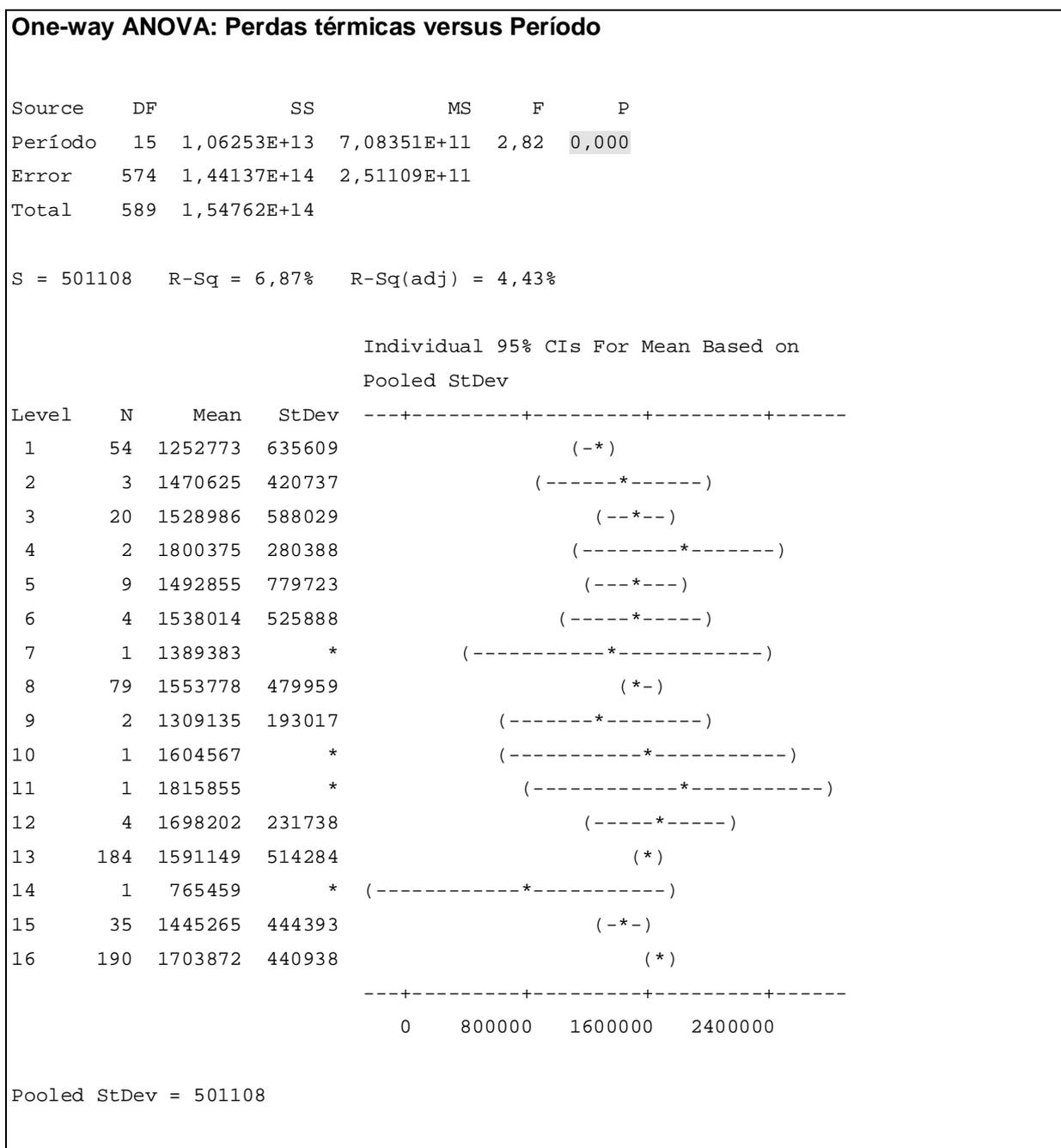
### 5.3.1 – TESTE ANOVA PARA PERDAS TÉRMICAS

Para realizarmos o teste ANOVA, temos que considerar duas hipóteses:

- Hipótese nula: as médias dos 16 períodos da variável “perdas térmicas” são iguais.
- Hipótese alternativa: há pelo menos um período que tem uma média diferente.

O valor-p igual a 0,000 indica que devemos rejeitar a hipótese nula, ou seja, há pelo menos um período em que a média se difere da(s) média(s) de outro(s) período(s).

Tabela V.2 – Tabela ANOVA para a variável “Perdas Térmicas”



Para localizar a(s) diferença(s), realizamos o teste de “Tukey” para fazer as comparações múltiplas (compara-se dois a dois as médias dos períodos).

O resultado do teste é mostrado em forma de intervalos de confiança para a diferença das médias.

Por exemplo, na tabela V.3, compara-se o período 1 com o período 2, e o período 1 com o período 3. Observe que os intervalos de confiança (lower, upper) contém o valor zero.

Quando isso acontece, dizemos que não há diferença entre os períodos, já que dentro de um intervalo de 95% de confiança inclui também a diferença zero.



13	-879727	120525	1120776	(----*----)
14	-2689557	-705166	1279225	(-----*-----)
15	-1059204	-25360	1008485	(----*----)
16	-766751	233247	1233245	(----*----)
-----+-----+-----+-----+-----				
-2000000                    0    2000000    4000000				
Período = 3 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----
4	-1003110	271389	1545887	(----*----)
5	-725927	-36131	653665	(---*--)
6	-932252	9027	950307	(----*----)
7	-1900576	-139603	1621369	(-----*-----)
8	-405385	24792	454969	(-*-)
9	-1494349	-219851	1054647	(----*----)
10	-1685392	75580	1836553	(-----*-----)
11	-1474104	286869	2047841	(-----*-----)
12	-772064	169215	1110495	(----*----)
13	-342459	62163	466785	(-*-)
14	-2524500	-763527	997445	(-----*-----)
15	-565436	-83721	397994	(--*-)
16	-229109	174886	578880	(-*-)
-----+-----+-----+-----+-----				
-2000000                    0    2000000    4000000				
Período = 4 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----
5	-1650959	-307520	1035919	(----*----)
6	-1750655	-262361	1225932	(-----*-----)
7	-2515757	-410992	1693773	(-----*-----)
8	-1477069	-246597	983876	(----*----)
9	-2209773	-491240	1227293	(-----*-----)
10	-2300573	-195808	1908956	(-----*-----)
11	-2089285	15480	2120244	(-----*-----)
12	-1590467	-102173	1386120	(----*----)
13	-1430998	-209226	1012547	(----*----)
14	-3139681	-1034916	1069849	(-----*-----)
15	-1604534	-355110	894314	(----*----)
16	-1318068	-96503	1125062	(-----*-----)
-----+-----+-----+-----+-----				
-2000000                    0    2000000    4000000				

Período = 5 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	
6	-987551	45159	1077868	(----*----)
7	-1914965	-103472	1708021	(-----*-----)
8	-543672	60923	665518	(--*--)
9	-1527159	-183720	1159719	(-----*-----)
10	-1699781	111711	1923204	(-----*-----)
11	-1488493	323000	2134493	(-----*-----)
12	-827363	205347	1238056	(----*----)
13	-488393	98294	684981	(-*--)
14	-2538889	-727396	1084097	(-----*-----)
15	-689877	-47590	594697	(--*--)
16	-375238	211017	797271	(--*--)
				-----+-----+-----+-----+--
				-2000000            0    2000000    4000000
Período = 6 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	
7	-2070009	-148631	1772748	(-----*-----)
8	-864987	15764	896516	(---*---)
9	-1717172	-228878	1259415	(-----*-----)
10	-1854826	66553	1987931	(-----*-----)
11	-1643537	277841	2199219	(-----*-----)
12	-1054998	160188	1375374	(-----*-----)
13	-815421	53136	921692	(---*---)
14	-2693933	-772555	1148824	(-----*-----)
15	-999788	-92749	814291	(----*----)
16	-702406	165858	1034122	(----*----)
				-----+-----+-----+-----+--
				-2000000            0    2000000    4000000
Período = 7 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	
8	-1564980	164395	1893771	(-----*-----)
9	-2185012	-80248	2024517	(-----*-----)
10	-2215189	215184	2645557	(-----*-----)
11	-2003901	426472	2856845	(-----*-----)
12	-1612559	308819	2230197	(-----*-----)
13	-1521430	201767	1924963	(-----*-----)
14	-3054297	-623924	1806449	(-----*-----)

15	-1687028	55882	1798793	(-----*-----)
16	-1408561	314489	2037539	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+--
				-2000000            0    2000000    4000000
Período = 8 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+--
9	-1475115	-244643	985829	(-----*-----)
10	-1678587	50788	1780164	(-----*-----)
11	-1467299	262077	1991452	(-----*-----)
12	-736328	144424	1025175	(-----*-----)
13	-193789	37371	268531	(*)
14	-2517695	-788319	941056	(-----*-----)
15	-457463	-108513	240437	(*--)
16	-79968	150094	380155	(*)
				-----+-----+-----+-----+--
				-2000000            0    2000000    4000000
Período = 9 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+--
10	-1809333	295431	2400196	(-----*-----)
11	-1598045	506720	2611484	(-----*-----)
12	-1099227	389066	1877360	(-----*-----)
13	-939759	282014	1503787	(-----*-----)
14	-2648441	-543676	1561088	(-----*-----)
15	-1113294	136130	1385553	(-----*-----)
16	-826829	394737	1616302	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+--
				-2000000            0    2000000    4000000
Período = 10 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+--
11	-2219085	211288	2641661	(-----*-----)
12	-1827743	93635	2015014	(-----*-----)
13	-1736614	-13417	1709779	(-----*-----)
14	-3269481	-839108	1591265	(-----*-----)
15	-1902212	-159302	1583609	(-----*-----)
16	-1623744	99305	1822355	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+--
				-2000000            0    2000000    4000000
Período = 11 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+--

12	-2039031	-117653	1803725	(-----*-----)
13	-1947902	-224705	1498491	(-----*-----)
14	-3480769	-1050396	1379977	(-----*-----)
15	-2113500	-370590	1372321	(-----*-----)
16	-1835033	-111983	1611067	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+---
				-2000000            0    2000000    4000000
Período = 12 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+---
13	-975609	-107052	761504	(---*---)
14	-2854121	-932743	988636	(-----*-----)
15	-1159976	-252937	654103	(----*---)
16	-862594	5670	873934	(---*---)
				-----+-----+-----+-----+---
				-2000000            0    2000000    4000000
Período = 13 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+---
14	-2548887	-825690	897506	(-----*-----)
15	-462795	-145884	171026	(*--)
16	-65027	112722	290472	(*
				-----+-----+-----+-----+---
				-2000000            0    2000000    4000000
Período = 14 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+---
15	-1063105	679806	2422717	(-----*-----)
16	-784637	938413	2661462	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+---
				-2000000            0    2000000    4000000
Período = 15 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+---
16	-57503	258607	574717	(*--)
				-----+-----+-----+-----+---
				-2000000            0    2000000    4000000

Com relação à variável “Perdas Térmicas” analisada na tabela V.3, o teste de Tukey detectou as seguintes diferenças :

Média do período 1 < Média do período 13

Média do período 1 < Média do período 16

Esta conclusão é obtida, uma vez que, quando se compara a média dos períodos 1, 13 e 16, os intervalos de confiança (lower, upper) não contém o valor zero (tabela V.3).

As médias dos demais períodos não apresentam diferenças estatísticas e são consideradas iguais.

Para confirmar que as análises feitas para a variável “Perdas Térmicas” são válidas, segue abaixo os gráficos de resíduos da ANOVA.

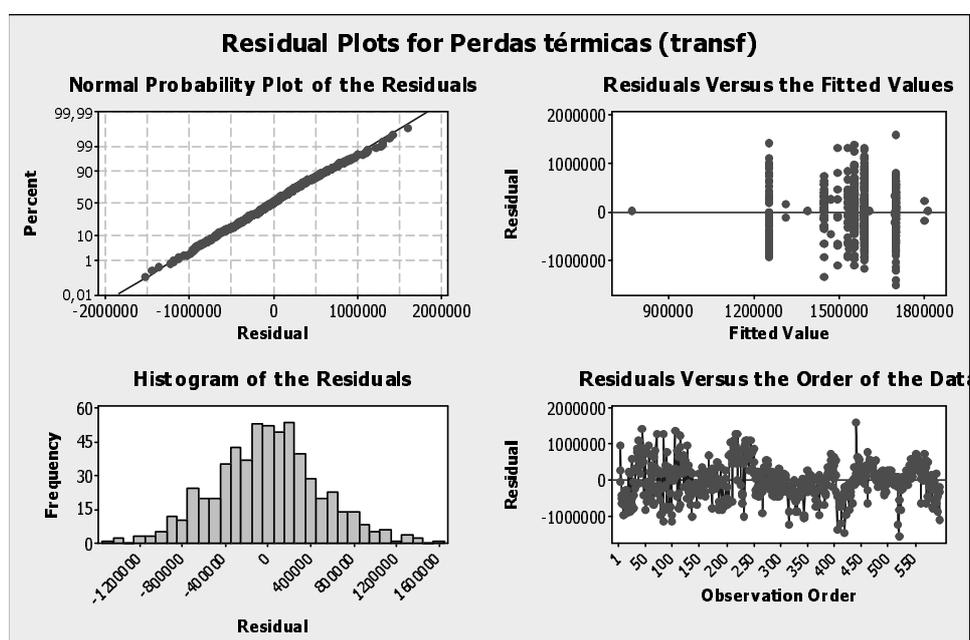


Figura 5.3.1 – Gráfico de Resíduos da ANOVA para a variável “Perdas Térmicas”

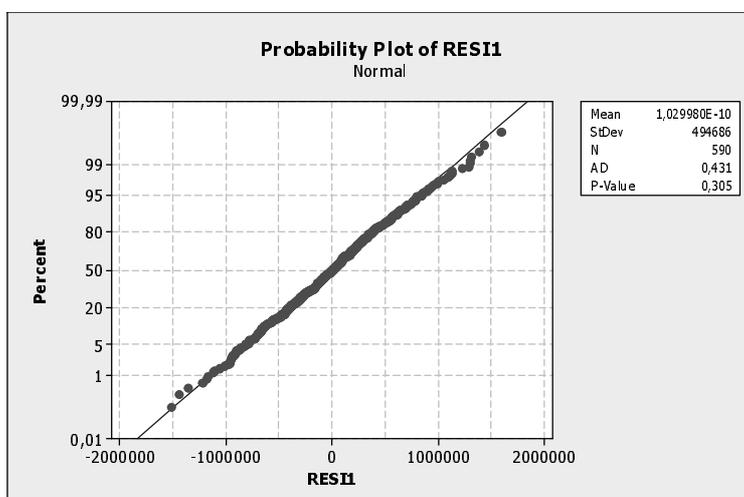


Figura 5.3.2 – Gráfico de curva normal para a variável “Perdas Térmicas”

Interpretação das figuras 5.3.1 e 5.3.2:

O Gráfico “Normal Probability Plot of the Residuals” é usado para avaliar a normalidade dos dados. Espera-se que os dados estejam alinhados sobre a reta. Serve para confirmar a normalidade dos resíduos, já que possui valor-p=0,306 (maior que 5%), não rejeitando a hipótese nula de que os dados são normais.

O Gráfico “Histogram of the Residuals” é usado para avaliar a normalidade dos dados. Espera-se que o gráfico tenha o formato de uma curva normal.

O Gráfico “Residuals versus the fitted values” é usado para avaliar se tem variância constante. Espera-se que os pontos estejam aleatórios sobre a reta, sem nenhum padrão.

O Gráfico “Residuals versus the order of the data” é usado para avaliar a independência dos resíduos. Espera-se que os pontos estejam aleatórios sobre a reta, sem nenhum padrão.

O Gráfico “Probability Plot of RESI2” nos mostra que as suposições foram atendidas, ou seja, A variável é normal, independente e com variância constante.

### 5.3.2 – TESTE ANOVA PARA PRODUÇÃO DE FERRO GUSA

Para realizarmos o teste ANOVA, temos que considerar duas hipóteses:

- Hipótese nula: as médias dos 16 períodos da variável “Produção de Ferro Gusa” são iguais.
- Hipótese alternativa: há pelo menos um período que tem uma média diferente.

O valor-p igual a 0,000 indica que devemos rejeitar a hipótese nula, ou seja, há pelo menos um período em que a média se difere da(s) média(s) de outro(s) período(s).

Tabela V.4 – Tabela ANOVA para a variável “Produção de Ferro Gusa”

One-way ANOVA: Produção Ferro Gusa versus Período					
Source	DF	SS	MS	F	P
Período	15	4613725	307582	25,22	0,000
Error	579	7062201	12197		
Total	594	11675926			
S = 110,4    R-Sq = 39,51%    R-Sq(adj) = 37,95%					
Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev					
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+	
1	55	862,0	79,6	(*-)	
2	3	920,4	111,6	(-----*-----)	
3	20	980,1	108,1	(--*--)	
4	2	936,1	45,0	(-----*-----)	
5	9	968,9	71,7	(----*----)	
6	4	933,5	149,4	(-----*-----)	
7	1	982,2	*	(-----*-----)	
8	79	1065,6	106,2	(-*-)	
9	2	1021,2	86,4	(-----*-----)	
10	1	977,3	*	(-----*-----)	
11	1	983,9	*	(-----*-----)	
12	4	1035,4	72,2	(-----*-----)	

13	187	1077,6	111,8	(*)
14	1	1076,0	*	(-----*-----)
15	35	1067,9	108,9	(-***)
16	191	1166,4	119,9	(*)
-----+-----+-----+-----+				
900      1050      1200      1350				
Pooled StDev = 110,4				

Para localizar a(s) diferença(s), realizamos o teste de “Tukey” para fazer as comparações múltiplas (compara-se dois a dois a média dos períodos).

O resultado do teste é mostrado em forma de intervalos de confiança para a diferença das médias.

Quando isso acontece, dizemos que não há diferença entre os períodos, já que dentro de um intervalo de 95% de confiança inclui também a diferença zero.

Tabela V.5 – Teste de “Tukey” para a variável “Produção de Ferro Gusa”

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals				
All Pairwise Comparisons among Levels of Período				
Individual confidence level = 99,94%				
Período = 1 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+
2	-166,1	58,5	283,0	(-----*-----)
<b>3</b>	<b>19,2</b>	<b>118,1</b>	<b>217,0</b>	<b>(-***)</b>
4	-198,5	74,2	346,8	(-----*-----)
5	-29,3	106,9	243,1	(---*---)
6	-124,6	71,5	267,7	(-----*-----)
7	-261,9	120,3	502,5	(-----*-----)
<b>8</b>	<b>137,1</b>	<b>203,6</b>	<b>270,2</b>	<b>(-***)</b>
9	-113,4	159,2	431,9	(-----*-----)

10	-266,8	115,3	497,5	(-----*-----)
11	-260,2	121,9	504,1	(-----*-----)
12	-22,7	173,4	369,5	(-----*-----)
<b>13</b>	<b>157,6</b>	<b>215,7</b>	<b>273,8</b>	<b>(*-)</b>
14	-168,1	214,0	596,2	(-----*-----)
<b>15</b>	<b>124,1</b>	<b>205,9</b>	<b>287,8</b>	<b>(-*-)</b>
<b>16</b>	<b>246,5</b>	<b>304,5</b>	<b>362,5</b>	<b>(-*)</b>
				-----+-----+-----+-----+
				-350                    0                    350                    700
Período = 2 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+
3	-174,8	59,7	294,2	(-----*-----)
4	-330,0	15,7	361,5	(-----*-----)
5	-204,0	48,5	301,0	(-----*-----)
6	-276,2	13,1	302,3	(-----*-----)
7	-375,5	61,8	499,2	(-----*-----)
8	-77,6	145,2	368,0	(-----*-----)
9	-245,0	100,8	446,5	(-----*-----)
10	-380,5	56,9	494,2	(-----*-----)
11	-373,9	63,5	500,8	(-----*-----)
12	-174,3	114,9	404,2	(-----*-----)
13	-63,2	157,2	377,7	(-----*-----)
14	-281,8	155,6	592,9	(-----*-----)
15	-80,4	147,5	375,3	(-----*-----)
<b>16</b>	<b>25,7</b>	<b>246,0</b>	<b>466,4</b>	<b>(-----*-----)</b>
				-----+-----+-----+-----+
				-350                    0                    350                    700
Período = 3 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+
4	-324,8	-43,9	237,0	(-----*-----)
5	-163,2	-11,2	140,8	(-----*-----)
6	-254,0	-46,6	160,9	(-----*-----)
7	-386,0	2,2	390,3	(-----*-----)
8	-9,3	85,5	180,3	(-*-)
9	-239,8	41,1	322,0	(-----*-----)
10	-390,9	-2,8	385,3	(-----*-----)
11	-384,3	3,8	391,9	(-----*-----)
12	-152,2	55,3	262,7	(-----*-----)

<b>13</b>	<b>8,5</b>	<b>97,6</b>	<b>186,7</b>	<b>(--*--)</b>
14	-292,2	95,9	484,0	(-----*-----)
15	-18,3	87,8	194,0	(---*---)
<b>16</b>	<b>97,4</b>	<b>186,4</b>	<b>275,4</b>	<b>(-*--)</b>
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----				
-350                    0                    350                    700				
Período = 4 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
5	-263,4	32,7	328,8	(-----*-----)
6	-330,7	-2,7	325,3	(-----*-----)
7	-417,8	46,1	510,0	(-----*-----)
8	-141,7	129,5	400,6	(-----*-----)
9	-293,7	85,0	463,8	(-----*-----)
10	-422,7	41,2	505,0	(-----*-----)
11	-416,1	47,8	511,6	(-----*-----)
12	-228,8	99,2	427,2	(-----*-----)
13	-127,8	141,5	410,7	(-----*-----)
14	-324,0	139,9	603,7	(-----*-----)
15	-143,6	131,8	407,1	(-----*-----)
16	-38,9	230,3	499,5	(-----*-----)
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----				
-350                    0                    350                    700				
Período = 5 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
6	-263,0	-35,4	192,2	(-----*-----)
7	-385,9	13,3	412,6	(-----*-----)
8	-36,5	96,7	230,0	(---*---)
9	-243,8	52,3	348,4	(-----*-----)
10	-390,8	8,4	407,7	(-----*-----)
11	-384,2	15,0	414,3	(-----*-----)
12	-161,1	66,5	294,1	(-----*-----)
13	-20,5	108,8	238,0	(---*---)
14	-292,1	107,1	506,4	(-----*-----)
15	-42,5	99,0	240,6	(---*---)
<b>16</b>	<b>68,4</b>	<b>197,6</b>	<b>326,8</b>	<b>(---*---)</b>
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----				
-350                    0                    350                    700				
Período = 6 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----

7	-374,7	48,7	472,2	(-----*-----)
8	-62,0	132,1	326,2	(-----*-----)
9	-240,3	87,7	415,7	(-----*-----)
10	-379,6	43,8	467,3	(-----*-----)
11	-373,0	50,4	473,9	(-----*-----)
12	-165,9	101,9	369,7	(-----*-----)
13	-47,2	144,2	335,6	(-----*-----)
14	-280,9	142,5	566,0	(-----*-----)
15	-65,5	134,4	334,3	(-----*-----)
<b>16</b>	<b>41,6</b>	<b>233,0</b>	<b>424,3</b>	<b>(-----*-----)</b>
				-----+-----+-----+-----+-----
				-350            0            350            700
Período = 7 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----
8	-297,8	83,4	464,5	(-----*-----)
9	-424,9	39,0	502,8	(-----*-----)
10	-540,6	-4,9	530,7	(-----*-----)
11	-534,0	1,7	537,3	(-----*-----)
12	-370,3	53,1	476,6	(-----*-----)
13	-284,4	95,4	475,2	(-----*-----)
14	-441,9	93,8	629,4	(-----*-----)
15	-298,4	85,7	469,8	(-----*-----)
16	-195,5	184,2	564,0	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				-350            0            350            700
Período = 8 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----
9	-315,6	-44,4	226,8	(-----*-----)
10	-469,4	-88,3	292,8	(-----*-----)
11	-462,8	-81,7	299,4	(-----*-----)
12	-224,4	-30,2	163,9	(-----*-----)
13	-38,8	12,0	62,9	(*--)
14	-370,7	10,4	391,5	(-----*-----)
15	-74,6	2,3	79,2	(*--)
<b>16</b>	<b>50,2</b>	<b>100,9</b>	<b>151,5</b>	<b>(*--)</b>
				-----+-----+-----+-----+-----
				-350            0            350            700
Período = 9 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----

10	-507,8	-43,9	420,0	(-----*-----)
11	-501,2	-37,3	426,6	(-----*-----)
12	-313,8	14,2	342,2	(-----*-----)
13	-212,8	56,5	325,7	(-----*-----)
14	-409,1	54,8	518,7	(-----*-----)
15	-228,6	46,7	322,1	(-----*-----)
16	-123,9	145,3	414,5	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-
				-350            0            350            700
Período = 10 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
11	-529,0	6,6	542,2	(-----*-----)
12	-365,4	58,0	481,5	(-----*-----)
13	-279,4	100,3	480,1	(-----*-----)
14	-436,9	98,7	634,3	(-----*-----)
15	-293,5	90,6	474,7	(-----*-----)
16	-190,6	189,1	568,9	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-
				-350            0            350            700
Período = 11 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
12	-372,0	51,4	474,9	(-----*-----)
13	-286,0	93,7	473,5	(-----*-----)
14	-443,5	92,1	627,7	(-----*-----)
15	-300,1	84,0	468,1	(-----*-----)
16	-197,2	182,5	562,3	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-
				-350            0            350            700
Período = 12 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
13	-149,1	42,3	233,7	(----*-----)
14	-382,8	40,7	464,1	(-----*-----)
15	-167,4	32,6	232,5	(----*-----)
16	-60,3	131,1	322,4	(----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-
				-350            0            350            700
Período = 13 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
14	-381,4	-1,6	378,1	(-----*-----)

15	-79,5	-9,7	60,0	(-*-)
16	<b>49,8</b>	<b>88,8</b>	<b>127,8</b>	<b>(-*)</b>
-----+-----+-----+-----+-				
-350                    0                    350                    700				
Período = 14 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
15	-392,2	-8,1	376,0	(-----*-----)
16	-289,3	90,4	470,2	(-----*-----)
-----+-----+-----+-----+-				
-350                    0                    350                    700				
Período = 15 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
16	<b>28,9</b>	<b>98,5</b>	<b>168,2</b>	<b>(-*-)</b>
-----+-----+-----+-----+-				
-350                    0                    350                    700				

Com relação à variável “Produção de Ferro Gusa” analisada na tabela V.5, o teste de “Tukey” detectou as seguintes diferenças :

- Média do período 1 < Média do período 3
- Média do período 1 < Média do período 8
- Média do período 1 < Média do período 13
- Média do período 1 < Média do período 15
- Média do período 1 < Média do período 16
- Média do período 2 < Média do período 16
- Média do período 3 < Média do período 13
- Média do período 3 < Média do período 16
- Média do período 5 < Média do período 16
- Média do período 8 < Média do período 16
- Média do período 13 < Média do período 16
- Média do período 15 < Média do período 16

Esta conclusão é obtida, uma vez que, quando se compara a média dos períodos, os intervalos de confiança (lower, upper) não contém o valor zero (tabela V.5).

As médias dos demais períodos não apresentam diferenças estatísticas e são consideradas iguais.

Para confirmar que as análises feitas para a variável “Produção de Ferro Gusa” são válidas, segue abaixo os gráficos de resíduos da ANOVA.

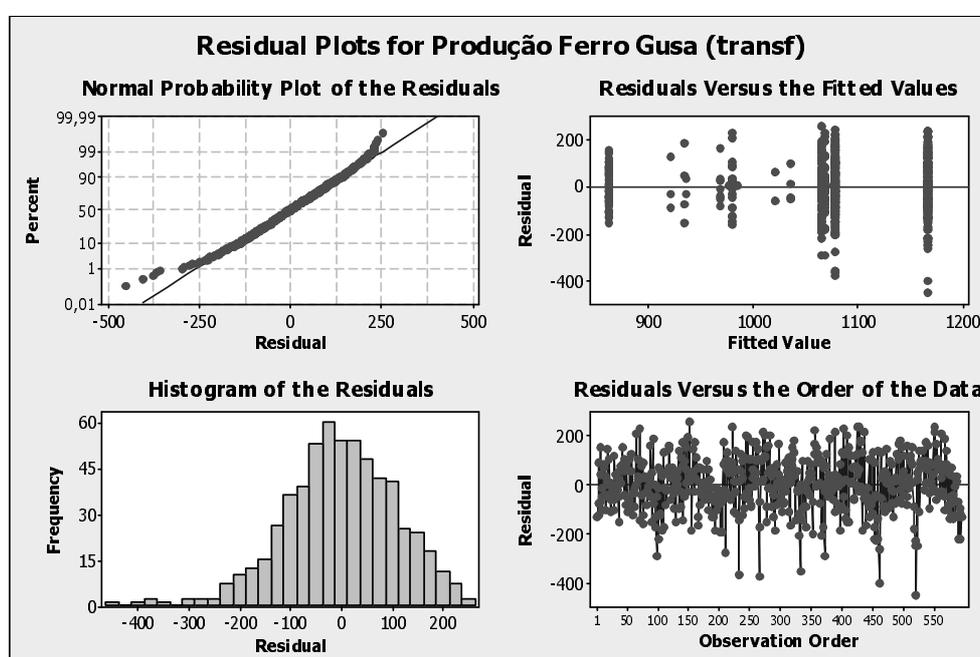


Figura 5.3.3 – Gráfico de Resíduos da ANOVA para a variável “Produção de Ferro Gusa”

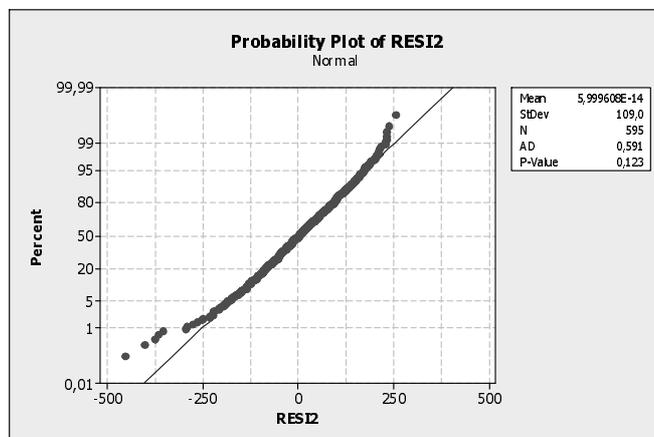


Figura 5.3.4 – Gráfico de curva normal para a variável “Produção de Ferro Gusa”

A figura 5.3.4, “Probability Plot of RESI2” nos mostra que as suposições foram atendidas, ou seja, a variável é normal, independente e com variância constante.



11	1	0,0014597	*	(-----*-----)
12	4	0,0014886	0,0000987	(-----*-----)
13	187	0,0013966	0,0001416	(*)
14	1	0,0014856	*	(-----*-----)
15	35	0,0013298	0,0001517	(-***)
16	191	0,0013128	0,0001407	(*)
-----+-----+-----+-----+				
0,00120    0,00140    0,00160    0,00180				
Pooled StDev = 0,0001391				

Para localizar a(s) diferença(s), realizamos o teste de “Tukey” para fazer as comparações múltiplas (compara-se dois a dois as médias dos períodos).

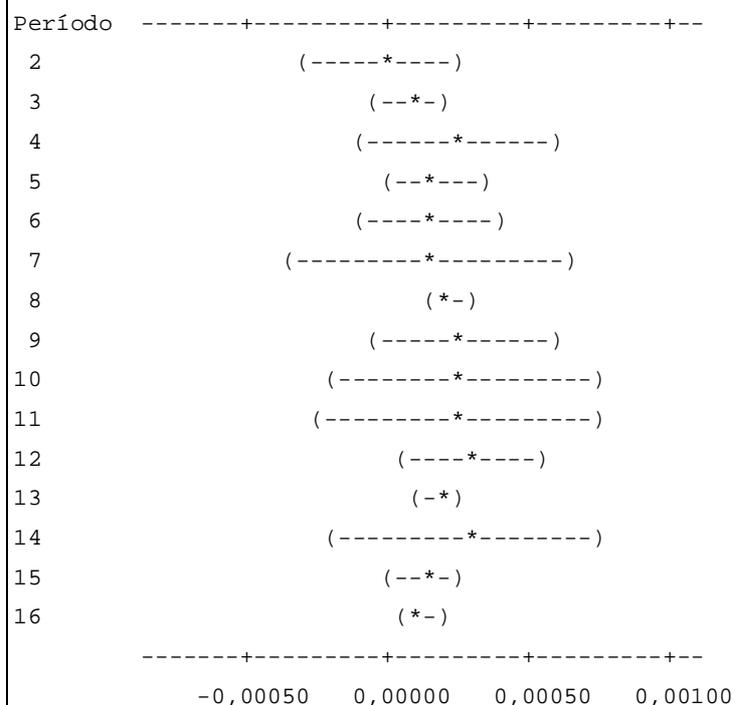
O resultado do teste é mostrado em forma de intervalos de confiança para a diferença das médias.

Quando isso acontece, dizemos que não há diferença entre os períodos, já que dentro de um intervalo de 95% de confiança inclui também a diferença zero.

Tabela V.7 – Teste de “Tukey” para a variável “Carvão Vegetal Bruto”

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals			
All Pairwise Comparisons among Levels of Período			
Individual confidence level = 99,94%			
Período = 1 subtracted from:			
Período	Lower	Center	Upper
2	-0,0002978	-0,0000149	0,0002680
3	-0,0000389	0,0000857	0,0002103
4	-0,0000838	0,0002597	0,0006032
5	-0,0000075	0,0001641	0,0003357
6	-0,0001134	0,0001338	0,0003809
7	-0,0003316	0,0001499	0,0006314

<b>8</b>	<b>0,0001323</b>	<b>0,0002161</b>	<b>0,0002999</b>
9	-0,0000694	0,0002741	0,0006176
10	-0,0002141	0,0002674	0,0007489
11	-0,0002252	0,0002563	0,0007378
<b>12</b>	<b>0,0000381</b>	<b>0,0002852</b>	<b>0,0005324</b>
<b>13</b>	<b>0,0001200</b>	<b>0,0001932</b>	<b>0,0002664</b>
14	-0,0001993	0,0002822	0,0007637
<b>15</b>	<b>0,0000232</b>	<b>0,0001264</b>	<b>0,0002295</b>
<b>16</b>	<b>0,0000364</b>	<b>0,0001094</b>	<b>0,0001824</b>



Período = 2 subtracted from:

Período	Lower	Center	Upper
3	-0,0001949	0,0001006	0,0003960
4	-0,0001610	0,0002746	0,0007102
5	-0,0001391	0,0001790	0,0004972
6	-0,0002158	0,0001487	0,0005131
7	-0,0003862	0,0001648	0,0007158
8	-0,0000497	0,0002310	0,0005117
9	-0,0001466	0,0002890	0,0007247
10	-0,0002687	0,0002823	0,0008333

11	-0,0002798	0,0002712	0,0008222
12	-0,0000643	0,0003001	0,0006646
13	-0,0000696	0,0002081	0,0004858
14	-0,0002539	0,0002971	0,0008481
15	-0,0001458	0,0001413	0,0004283
16	-0,0001534	0,0001243	0,0004020

Período -----+-----+-----+-----+--

3	(-----*-----)
4	(-----*-----)
5	(-----*-----)
6	(-----*-----)
7	(-----*-----)
8	(-----*-----)
9	(-----*-----)
10	(-----*-----)
11	(-----*-----)
12	(-----*-----)
13	(-----*-----)
14	(-----*-----)
15	(-----*-----)
16	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+--

-0,00050	0,00000	0,00050	0,00100
----------	---------	---------	---------

Período = 3 subtracted from:

Período	Lower	Center	Upper
4	-0,0001799	0,0001740	0,0005279
5	-0,0001131	0,0000785	0,0002700
6	-0,0002133	0,0000481	0,0003095
7	-0,0004248	0,0000642	0,0005532
<b>8</b>	<b>0,0000110</b>	<b>0,0001304</b>	<b>0,0002499</b>
9	-0,0001654	0,0001885	0,0005424
10	-0,0003073	0,0001817	0,0006707
11	-0,0003183	0,0001706	0,0006596
12	-0,0000618	0,0001996	0,0004609
13	-0,0000047	0,0001075	0,0002198
14	-0,0002924	0,0001966	0,0006855
15	-0,0000931	0,0000407	0,0001745

```

16      -0,0000884  0,0000237  0,0001359

Período  -----+-----+-----+-----+--
 4              (-----*-----)
 5              (---*---)
 6              (----*----)
 7              (-----*-----)
 8              (---*---)
 9              (-----*-----)
10              (-----*-----)
11              (-----*-----)
12              (----*----)
13              (-*-)
14              (-----*-----)
15              (---*---)
16              (-*---)

-----+-----+-----+-----+--
          -0,00050  0,00000  0,00050  0,00100

```

Período = 4 subtracted from:

Período	Lower	Center	Upper
5	-0,0004686	-0,0000956	0,0002775
6	-0,0005392	-0,0001259	0,0002873
7	-0,0006942	-0,0001098	0,0004746
8	-0,0003852	-0,0000436	0,0002981
9	-0,0004627	0,0000145	0,0004916
10	-0,0005768	0,0000077	0,0005921
11	-0,0005878	-0,0000034	0,0005811
12	-0,0003877	0,0000256	0,0004388
13	-0,0004057	-0,0000665	0,0002728
14	-0,0005619	0,0000225	0,0006070
15	-0,0004803	-0,0001333	0,0002136
16	-0,0004895	-0,0001503	0,0001889

```

Período  -----+-----+-----+-----+--
 5              (-----*-----)
 6              (-----*-----)
 7              (-----*-----)

```

```

8          (-----*-----)
9          (-----*-----)
10         (-----*-----)
11         (-----*-----)
12         (-----*-----)
13         (-----*-----)
14         (-----*-----)
15         (-----*-----)
16         (-----*-----)
-----+-----+-----+-----+---
          -0,00050  0,00000  0,00050  0,00100

```

Período = 5 subtracted from:

Período	Lower	Center	Upper
6	-0,0003171	-0,0000304	0,0002564
7	-0,0005173	-0,0000142	0,0004888
8	-0,0001159	0,0000520	0,0002199
9	-0,0002630	0,0001100	0,0004831
10	-0,0003998	0,0001033	0,0006063
11	-0,0004108	0,0000922	0,0005952
12	-0,0001656	0,0001211	0,0004079
13	-0,0001338	0,0000291	0,0001919
14	-0,0003849	0,0001181	0,0006211
15	-0,0002161	-0,0000378	0,0001406
16	-0,0002175	-0,0000547	0,0001080

```

Período  -----+-----+-----+-----+---
6          (----*-----)
7          (-----*-----)
8          (---*---)
9          (-----*-----)
10         (-----*-----)
11         (-----*-----)
12         (----*-----)
13         (---*---)
14         (-----*-----)
15         (---*---)
16         (---*---)
-----+-----+-----+-----+---

```

	-0,00050	0,00000	0,00050	0,00100
Período = 6 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	
7	-0,0005174	0,0000161	0,0005496	
8	-0,0001622	0,0000824	0,0003269	
9	-0,0002729	0,0001404	0,0005536	
10	-0,0003999	0,0001336	0,0006671	
11	-0,0004110	0,0001226	0,0006561	
12	-0,0001859	0,0001515	0,0004889	
13	-0,0001817	0,0000595	0,0003006	
14	-0,0003851	0,0001485	0,0006820	
15	-0,0002593	-0,0000074	0,0002445	
16	-0,0002655	-0,0000244	0,0002167	
Período -----+-----+-----+-----+--- 7                   (-----*-----) 8                   (----*----) 9                   (-----*-----) 10                   (-----*-----) 11                   (-----*-----) 12                   (-----*-----) 13                   (----*----) 14                   (-----*-----) 15                   (----*----) 16                   (----*----) -----+-----+-----+-----+--- -0,00050   0,00000   0,00050   0,00100				
Período = 7 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	
8	-0,0004140	0,0000662	0,0005464	
9	-0,0004602	0,0001243	0,0007087	
10	-0,0005574	0,0001175	0,0007924	
11	-0,0005684	0,0001064	0,0007813	
12	-0,0003982	0,0001354	0,0006689	
13	-0,0004351	0,0000433	0,0005218	
14	-0,0005425	0,0001323	0,0008072	
15	-0,0005075	-0,0000235	0,0004604	

```

16      -0,0005189  -0,0000405  0,0004380

Período  -----+-----+-----+-----+--
 8              (-----*-----)
 9              (-----*-----)
10              (-----*-----)
11              (-----*-----)
12              (-----*-----)
13              (-----*-----)
14              (-----*-----)
15              (-----*-----)
16              (-----*-----)

-----+-----+-----+-----+--
          -0,00050  0,00000  0,00050  0,00100

Período = 8 subtracted from:
Período   Lower      Center      Upper
 9      -0,0002837  0,0000580  0,0003997
10      -0,0004289  0,0000513  0,0005315
11      -0,0004400  0,0000402  0,0005204
12      -0,0001754  0,0000691  0,0003137
13      -0,0000869 -0,0000229  0,0000411
14      -0,0004141  0,0000661  0,0005463
15      -0,0001866 -0,0000897  0,0000071
16      -0,0001706 -0,0001067 -0,0000429

Período  -----+-----+-----+-----+--
 9              (-----*-----)
10              (-----*-----)
11              (-----*-----)
12              (----*----)
13              (-*)
14              (-----*-----)
15              (-*-)
16              (*)

-----+-----+-----+-----+--
          -0,00050  0,00000  0,00050  0,00100

```

Período = 9 subtracted from:

Período	Lower	Center	Upper
10	-0,0005912	-0,0000068	0,0005777
11	-0,0006023	-0,0000178	0,0005666
12	-0,0004022	0,0000111	0,0004244
13	-0,0004201	-0,0000809	0,0002583
14	-0,0005764	0,0000081	0,0005925
15	-0,0004947	-0,0001478	0,0001992
16	-0,0005039	-0,0001647	0,0001744

Período	-----+-----+-----+-----+--		
10	(-----*-----)		
11	(-----*-----)		
12	(-----*-----)		
13	(-----*-----)		
14	(-----*-----)		
15	(-----*-----)		
16	(-----*-----)		
	-----+-----+-----+-----+--		
	-0,00050	0,00000	0,00050 0,00100

Período = 10 subtracted from:

Período	Lower	Center	Upper
11	-0,0006859	-0,0000111	0,0006638
12	-0,0005157	0,0000179	0,0005514
13	-0,0005526	-0,0000742	0,0004043
14	-0,0006600	0,0000148	0,0006897
15	-0,0006250	-0,0001410	0,0003430
16	-0,0006364	-0,0001580	0,0003205

Período	-----+-----+-----+-----+--		
11	(-----*-----)		
12	(-----*-----)		
13	(-----*-----)		
14	(-----*-----)		
15	(-----*-----)		
16	(-----*-----)		
	-----+-----+-----+-----+--		
	-0,00050	0,00000	0,00050 0,00100

Período = 11 subtracted from:

Período	Lower	Center	Upper
12	-0,0005046	0,0000289	0,0005625
13	-0,0005416	-0,0000631	0,0004154
14	-0,0006489	0,0000259	0,0007008
15	-0,0006139	-0,0001299	0,0003540
16	-0,0006254	-0,0001469	0,0003315

Período	-----+-----+-----+-----+--			
12	(-----*-----)			
13	(-----*-----)			
14	(-----*-----)			
15	(-----*-----)			
16	(-----*-----)			
	-----+-----+-----+-----+--			
	-0,00050	0,00000	0,00050	0,00100

Período = 12 subtracted from:

Período	Lower	Center	Upper
13	-0,0003332	-0,0000920	0,0001491
14	-0,0005365	-0,0000030	0,0005305
15	-0,0004107	-0,0001589	0,0000930
16	-0,0004169	-0,0001759	0,0000652

Período	-----+-----+-----+-----+--			
13	(----*----)			
14	(-----*-----)			
15	(----*----)			
16	(---*---)			
	-----+-----+-----+-----+--			
	-0,00050	0,00000	0,00050	0,00100

Período = 13 subtracted from:

Período	Lower	Center	Upper
14	-0,0003895	0,0000890	0,0005675
15	-0,0001547	-0,0000669	0,0000210
<b>16</b>	<b>-0,0001329</b>	<b>-0,0000838</b>	<b>-0,0000347</b>

Período	-----+-----+-----+-----+--			
---------	----------------------------	--	--	--

```

14      (-----*-----)
15              (-*)
16              (*)
      -----+-----+-----+-----+--
              -0,00050  0,00000  0,00050  0,00100

```

Período = 14 subtracted from:

Período	Lower	Center	Upper
15	-0,0006398	-0,0001559	0,0003281
16	-0,0006513	-0,0001728	0,0003056

```

Período -----+-----+-----+-----+--
15      (-----*-----)
16      (-----*-----)
      -----+-----+-----+-----+--
              -0,00050  0,00000  0,00050  0,00100

```

Período = 15 subtracted from:

Período	Lower	Center	Upper
16	-0,0001047	-0,0000170	0,0000708

```

Período -----+-----+-----+-----+--
16              (-*)
      -----+-----+-----+-----+--
              -0,00050  0,00000  0,00050  0,00100

```

Com relação à variável “Carvão Vegetal Bruto” analisada na tabela V.7, o teste de “Tukey” detectou as seguintes diferenças :

Média do período 1 < Média do período 8

Média do período 1 < Média do período 12

Média do período 1 < Média do período 13

Média do período 1 < Média do período 15

Média do período 1 < Média do período 16

Média do período 3 < Média do período 8

Média do período 8 > Média do período 16

Média do período 13 > Média do período 16

Esta conclusão é obtida, uma vez que, quando se compara à média dos períodos, os intervalos de confiança (lower, upper) não contém o valor zero (tabela V.7).

As médias dos demais períodos não apresentam diferenças estatísticas e são consideradas iguais.

Para confirmar que as análises feitas para a variável “Carvão Vegetal Bruto” são válidas, segue a figura 5.3.5 de resíduos da ANOVA.

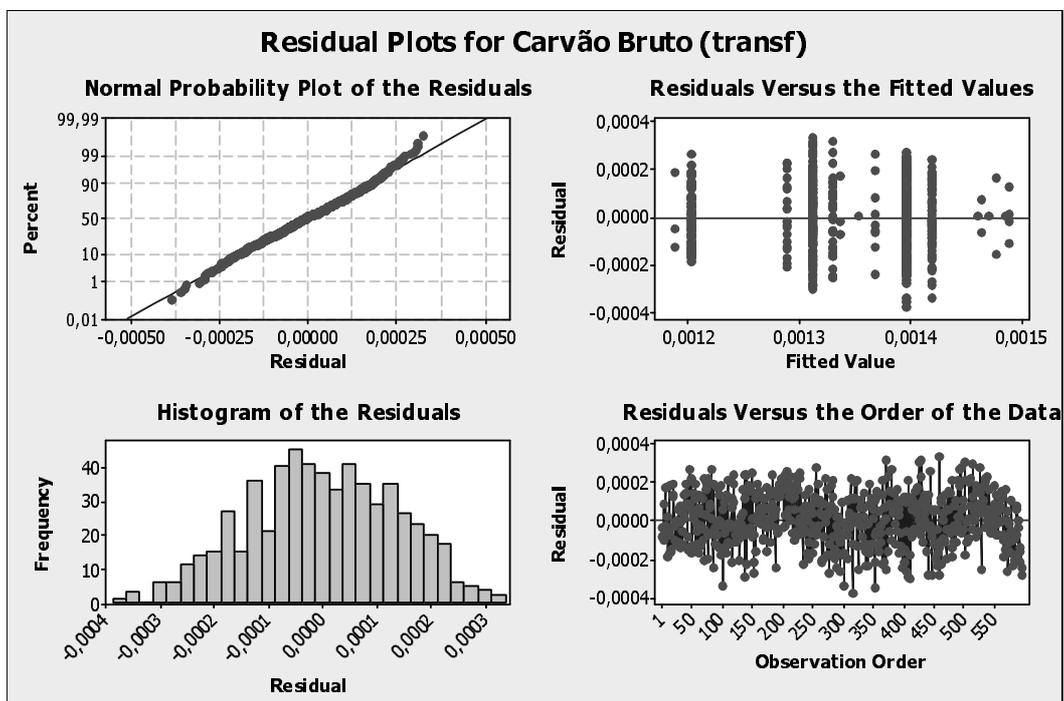


Figura 5.3.5 – Gráfico de Resíduos da ANOVA para a variável “Carvão Vegetal Bruto”

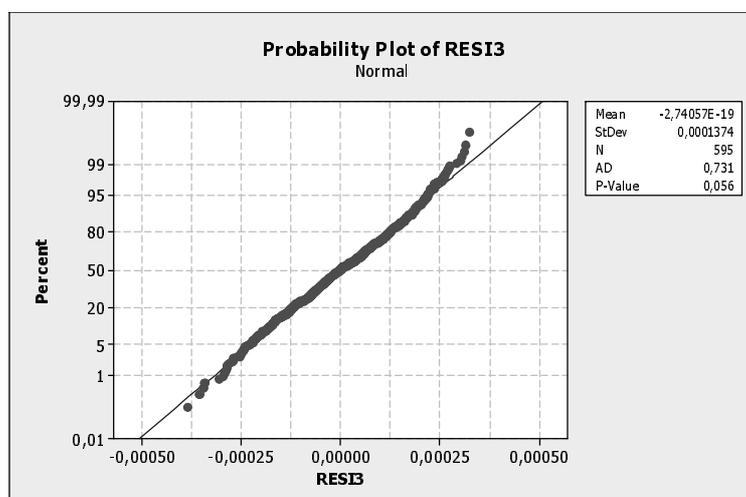


Figura 5.3.6 – Gráfico de curva normal para a variável “Carvão Vegetal Bruto”

A figura 5.3.6, “Probability Plot of RESI2” nos mostra que as suposições foram atendidas, ou seja, a variável é normal, independente e com variância constante.

### 5.3.4 – TESTE ANOVA PARA INJEÇÃO DE CARVÃO VEGETAL PULVERIZADO

Para realizarmos o teste ANOVA, temos que considerar duas hipóteses:

- Hipótese nula: as médias dos 16 períodos da variável “Injeção de Carvão Vegetal” são iguais.
- Hipótese alternativa: há pelo menos um período que tem uma média diferente.

O valor-p igual a 0,000 indica que devemos rejeitar a hipótese nula, ou seja, há pelo menos um período em que a média se difere da(s) média(s) de outro(s) período(s).

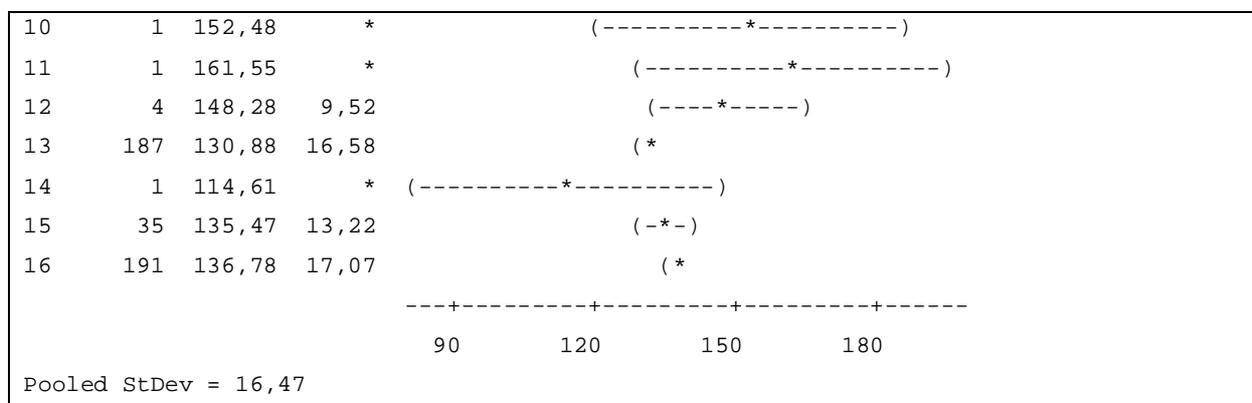
Tabela V.8 – Tabela ANOVA para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”

One-way ANOVA: Injeção (kg/t) versus Período					
Source	DF	SS	MS	F	P
Período	15	21826	1455	5,37	0,000
Error	579	156966	271		
Total	594	178792			

S = 16,47    R-Sq = 12,21%    R-Sq(adj) = 9,93%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	CI
1	55	141,22	15,52	(*-)
2	3	148,74	20,26	(-----*-----)
3	20	130,98	19,48	(--*-)
4	2	132,25	22,25	(-----*-----)
5	9	114,42	16,99	(--*---)
6	4	127,72	22,55	(-----*-----)
7	1	132,87	*	(-----*-----)
8	79	145,73	15,44	(-*)
9	2	149,09	16,16	(-----*-----)



Para localizar a(s) diferença(s), realizamos o teste de “Tukey” para fazer as comparações múltiplas (compara-se dois a dois as médias dos períodos).

O resultado do teste é mostrado em forma de intervalos de confiança para a diferença das médias.

Quando isso acontece, dizemos que não há diferença entre os períodos, já que dentro de um intervalo de 95% de confiança inclui também a diferença zero.

Tabela V.9 – Teste de “Tukey” para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals				
All Pairwise Comparisons among Levels of Período				
Individual confidence level = 99,94%				
Período = 1 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----
2	-25,95	7,52	41,00	(----*----)
3	-24,98	-10,23	4,51	(--*--)
4	-49,62	-8,97	31,67	(-----*-----)
<b>5</b>	<b>-47,10</b>	<b>-26,79</b>	<b>-6,49</b>	<b>(--*--)</b>
6	-42,74	-13,50	15,75	(----*----)
7	-65,32	-8,35	48,63	(-----*-----)

8	-5,40	4,51	14,43	(-*)
9	-32,78	7,87	48,52	(-----*-----)
10	-45,71	11,26	68,24	(-----*-----)
11	-36,64	20,33	77,31	(-----*-----)
12	-22,18	7,06	36,30	(---*---)
<b>13</b>	<b>-19,00</b>	<b>-10,34</b>	<b>-1,68</b>	<b>(-*)</b>
14	-83,59	-26,61	30,37	(-----*-----)
15	-17,96	-5,75	6,46	(-*--)
16	-13,08	-4,44	4,20	(*--)
				-----+-----+-----+-----+-----+-----
				-70                    0                    70                    140
Período = 2 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----+-----
3	-52,72	-17,76	17,20	(----*----)
4	-68,04	-16,50	35,05	(-----*-----)
5	-71,96	-34,32	3,33	(----*----)
6	-64,15	-21,02	22,11	(----*----)
7	-81,07	-15,87	49,33	(-----*-----)
8	-36,23	-3,01	30,20	(----*----)
9	-51,20	0,35	51,89	(-----*-----)
10	-61,46	3,74	68,94	(-----*-----)
11	-52,39	12,81	78,01	(-----*-----)
12	-43,59	-0,46	42,66	(-----*-----)
13	-50,72	-17,86	15,00	(---*---)
14	-99,33	-34,13	31,07	(-----*-----)
15	-47,24	-13,27	20,70	(----*----)
16	-44,82	-11,97	20,89	(---*---)
				-----+-----+-----+-----+-----+-----
				-70                    0                    70                    140
Período = 3 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----+-----
4	-40,62	1,26	43,14	(-----*-----)
5	-39,22	-16,56	6,11	(---*---)
6	-34,19	-3,26	27,66	(----*----)
7	-55,97	1,89	59,75	(-----*-----)
<b>8</b>	<b>0,61</b>	<b>14,75</b>	<b>28,88</b>	<b>(-*--)</b>
9	-23,77	18,10	59,98	(-----*-----)

10	-36,36	21,50	79,36	(-----*-----)
11	-27,29	30,57	88,43	(-----*-----)
12	-13,63	17,29	48,22	(---*---)
13	-13,39	-0,11	13,18	(-*--)
14	-74,24	-16,37	41,49	(-----*-----)
15	-11,35	4,48	20,31	(--*--)
16	-7,48	5,79	19,06	(-*--)
				-----+-----+-----+-----+-
				-70                    0                    70                    140
Período = 4 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
5	-61,96	-17,82	26,32	(-----*-----)
6	-53,43	-4,52	44,38	(-----*-----)
7	-68,53	0,63	69,78	(-----*-----)
8	-26,95	13,48	53,91	(-----*-----)
9	-39,63	16,84	73,31	(-----*-----)
10	-48,92	20,24	89,39	(-----*-----)
11	-39,85	29,31	98,46	(-----*-----)
12	-32,87	16,03	64,93	(-----*-----)
13	-41,51	-1,37	38,77	(-----*-----)
14	-86,79	-17,64	51,52	(-----*-----)
15	-37,83	3,22	44,27	(-----*-----)
16	-35,61	4,53	44,67	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-
				-70                    0                    70                    140
Período = 5 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
6	-20,64	13,30	47,23	(-----*-----)
7	-41,07	18,45	77,97	(-----*-----)
<b>8</b>	<b>11,44</b>	<b>31,31</b>	<b>51,17</b>	<b>(-*--)</b>
9	-9,48	34,66	78,80	(-----*-----)
10	-21,46	38,06	97,58	(-----*-----)
11	-12,39	47,13	106,65	(-----*-----)
12	-0,08	33,85	67,79	(-----*-----)
13	-2,82	16,45	35,72	(-*--)
14	-59,34	0,19	59,71	(-----*-----)

15	-0,06	21,04	42,15	(--*--)
<b>16</b>	<b>3,09</b>	<b>22,35</b>	<b>41,61</b>	<b>(--*--)</b>
-----+-----+-----+-----+-				
-70                    0                    70                    140				
Período = 6 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
7	-57,98	5,15	68,28	(-----*-----)
8	-10,93	18,01	46,95	(----*----)
9	-27,54	21,37	70,27	(-----*-----)
10	-38,37	24,76	87,89	(-----*-----)
11	-29,30	33,83	96,96	(-----*-----)
12	-19,37	20,56	60,49	(-----*-----)
13	-25,38	3,16	31,69	(---*---)
14	-76,24	-13,11	50,02	(-----*-----)
15	-22,06	7,75	37,55	(---*---)
16	-19,47	9,05	37,58	(---*---)
-----+-----+-----+-----+-				
-70                    0                    70                    140				
Período = 7 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
8	-43,96	12,86	69,68	(-----*-----)
9	-52,94	16,21	85,37	(-----*-----)
10	-60,25	19,61	99,46	(-----*-----)
11	-51,18	28,68	108,53	(-----*-----)
12	-47,72	15,41	78,54	(-----*-----)
13	-58,61	-1,99	54,62	(-----*-----)
14	-98,12	-18,26	61,59	(-----*-----)
15	-54,67	2,59	59,86	(-----*-----)
16	-52,71	3,90	60,52	(-----*-----)
-----+-----+-----+-----+-				
-70                    0                    70                    140				
Período = 8 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
9	-37,07	3,36	43,79	(----*----)
10	-50,07	6,75	63,57	(-----*-----)

11	-41,00	15,82	72,64	(-----*-----)
12	-26,39	2,55	31,49	(---*---)
<b>13</b>	<b>-22,43</b>	<b>-14,85</b>	<b>-7,28</b>	<b>(*)</b>
14	-87,94	-31,12	25,70	(-----*-----)
15	-21,73	-10,26	1,20	(-*)
<b>16</b>	<b>-16,51</b>	<b>-8,95</b>	<b>-1,40</b>	<b>(*)</b>
				-----+-----+-----+-----+-
				-70                    0                    70                    140
Período = 9 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
10	-65,76	3,39	72,55	(-----*-----)
11	-56,69	12,46	81,62	(-----*-----)
12	-49,71	-0,81	48,09	(-----*-----)
13	-58,35	-18,21	21,93	(----*-----)
14	-103,63	-34,48	34,68	(-----*-----)
15	-54,67	-13,62	27,43	(-----*-----)
16	-52,45	-12,31	27,83	(----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-
				-70                    0                    70                    140
Período = 10 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
11	-70,79	9,07	88,93	(-----*-----)
12	-67,33	-4,20	58,93	(-----*-----)
13	-78,22	-21,60	35,01	(-----*-----)
14	-117,73	-37,87	41,98	(-----*-----)
15	-74,28	-17,01	40,25	(-----*-----)
16	-72,32	-15,71	40,91	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-
				-70                    0                    70                    140
Período = 11 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
12	-76,40	-13,27	49,86	(-----*-----)
13	-87,29	-30,67	25,94	(-----*-----)
14	-126,80	-46,94	32,91	(-----*-----)
15	-83,35	-26,08	31,18	(-----*-----)
16	-81,39	-24,78	31,84	(-----*-----)

				-----+-----+-----+-----+-
				-70            0            70            140
Período = 12 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
13	-45,93	-17,40	11,13	(----*---)
14	-96,80	-33,67	29,46	(-----*-----)
15	-42,61	-12,81	16,99	(---*---)
16	-40,03	-11,50	17,02	(---*---)
				-----+-----+-----+-----+-
				-70            0            70            140
Período = 13 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
14	-72,88	-16,27	40,35	(-----*-----)
15	-5,81	4,59	14,99	(-*)
16	0,09	5,90	11,71	(*)
				-----+-----+-----+-----+-
				-70            0            70            140
Período = 14 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
15	-36,41	20,86	78,12	(-----*-----)
16	-34,45	22,17	78,78	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-
				-70            0            70            140
Período = 15 subtracted from:				
Período	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-
16	-9,07	1,31	11,69	(*--)
				-----+-----+-----+-----+-
				-70            0            70            140

Com relação à variável “Injeção de Carvão Vegetal” analisada na tabela V.8, o teste de “Tukey” detectou as seguintes diferenças :

Média do período 1 > Média do período 5

Média do período 1 > Média do período 13

Média do período 3 < Média do período 8

Média do período 5 < Média do período 8

Média do período 5 < Média do período 16

Média do período 8 > Média do período 13

Média do período 8 > Média do período 16

Média do período 13 < Média do período 16

Esta conclusão é obtida, uma vez que, quando se compara a média dos períodos, os intervalos de confiança (lower, upper) não contém o valor zero (tabela V.9).

As médias dos demais períodos não apresentam diferenças estatísticas e são consideradas iguais.

Para confirmar que as análises feitas para a variável “Injeção de Carvão Vegetal” são válidas, segue abaixo os gráficos de resíduos da ANOVA.

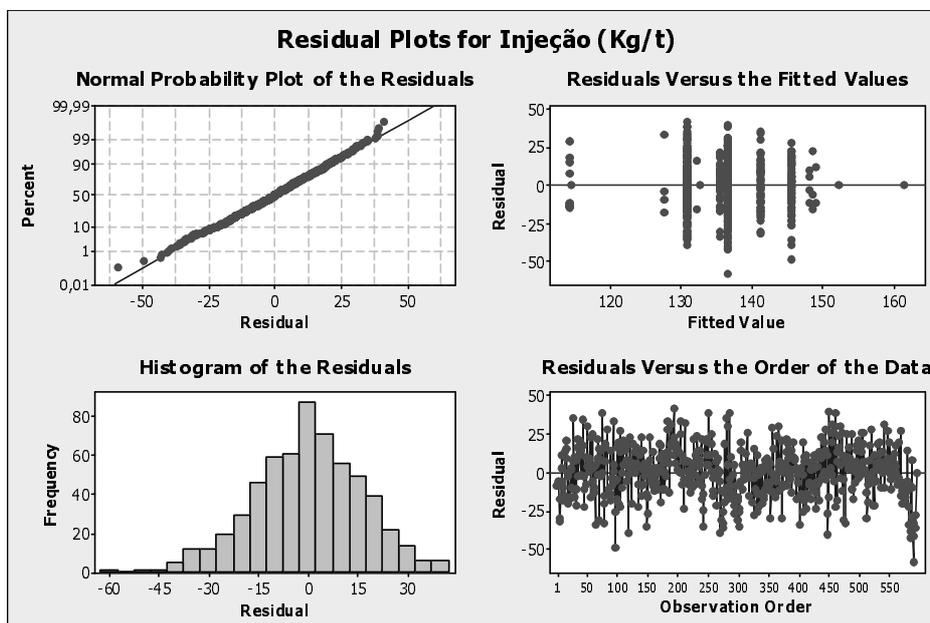


Figura 5.3.7 – Gráfico de Resíduos da ANOVA para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”

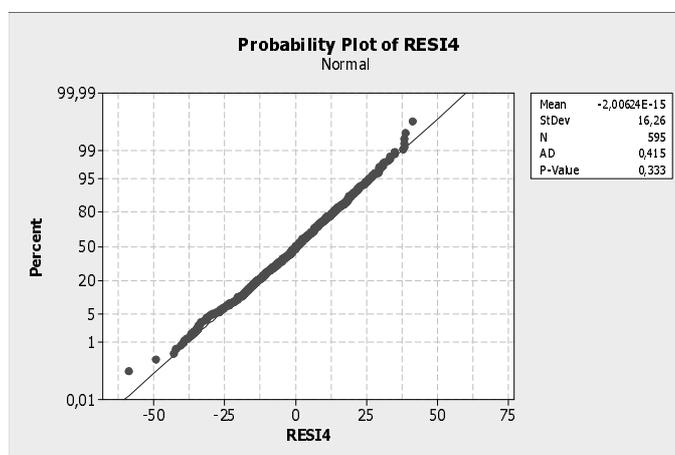


Figura 5.3.8 – Gráfico de curva normal para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”

A figura 5.3.8, “Probability Plot of RESI2” nos mostra que as suposições foram atendidas, ou seja, a variável é normal, independente e com variância constante.

#### 5.4 – AVALIAÇÃO DO PERÍODO DE MAIOR PRODUÇÃO DE FERRO GUSA

Segue abaixo a avaliação das variáveis “Perdas Térmicas”, “Produção de Ferro Gusa”, “Carvão Vegetal Bruto” e “Injeção de carvão vegetal” para o período 16.

Perdas Térmicas:

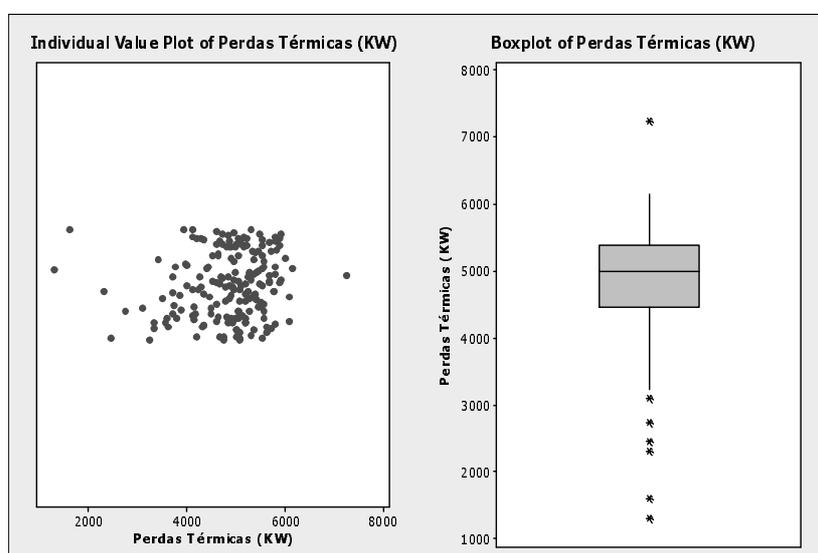


Figura 5.3.9 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Perda Térmica”

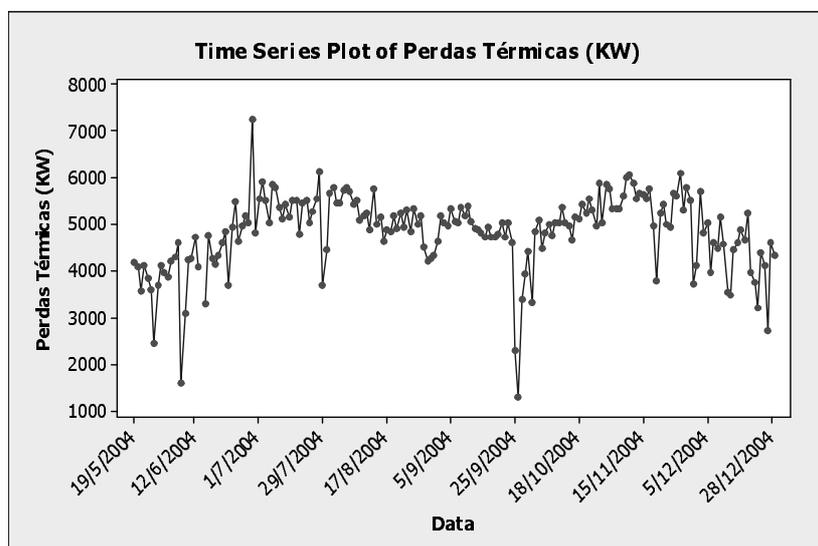


Figura 5.3.10 – Gráfico Temporal para a variável “Perda Térmica”

## Injeção de Carvão Vegetal

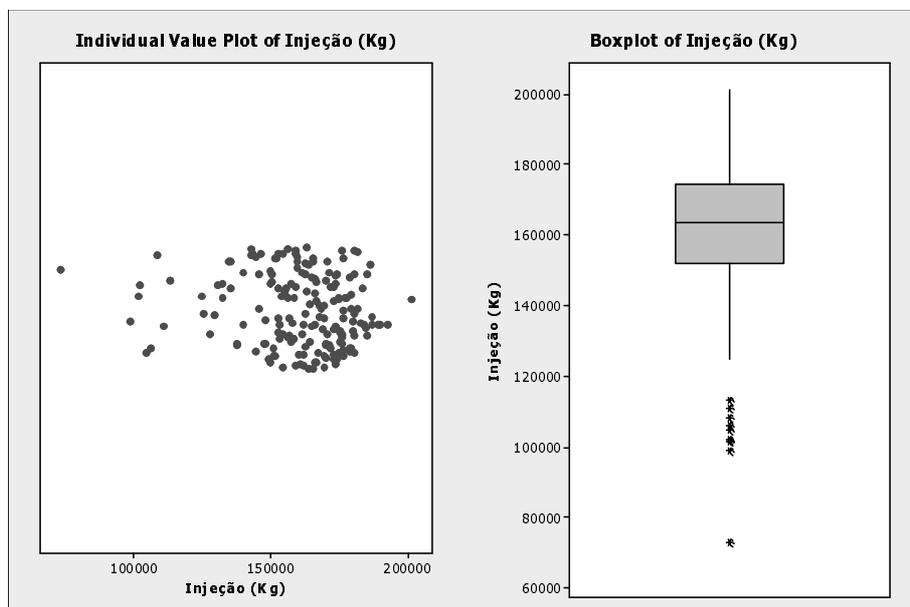


Figura 5.3.11 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”

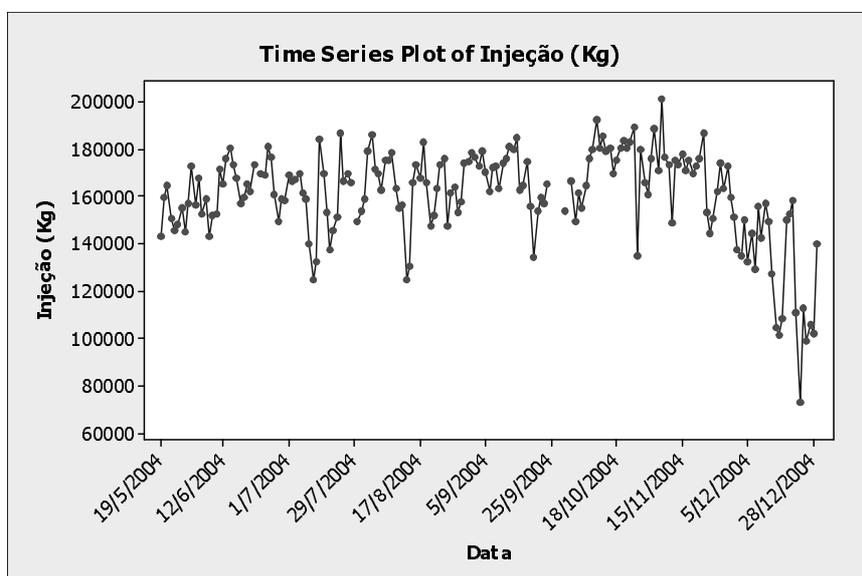


Figura 5.3.12 – Gráfico Temporal para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”

Carvão Vegetal Bruto:

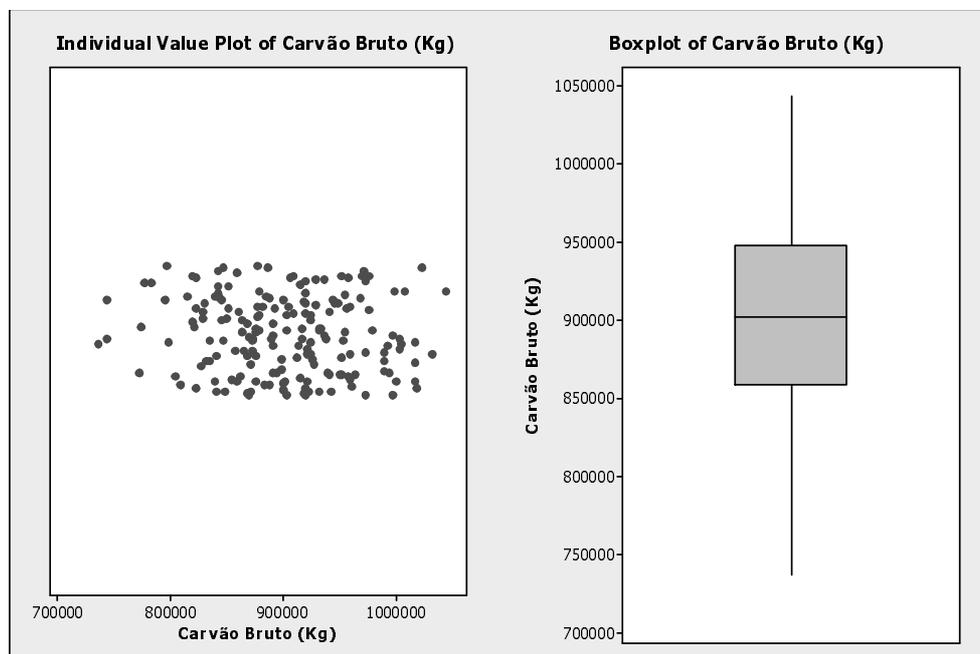


Figura 5.3.13 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Carvão Vegetal Bruto”

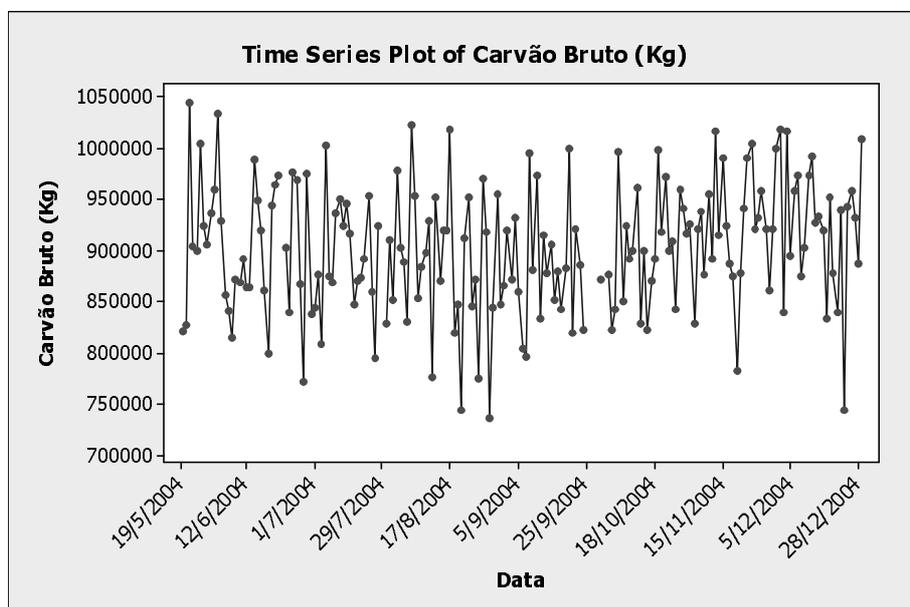


Figura 5.3.14 – Gráfico Temporal para a variável “Carvão Vegetal Bruto”

## Produção de Ferro Gusa

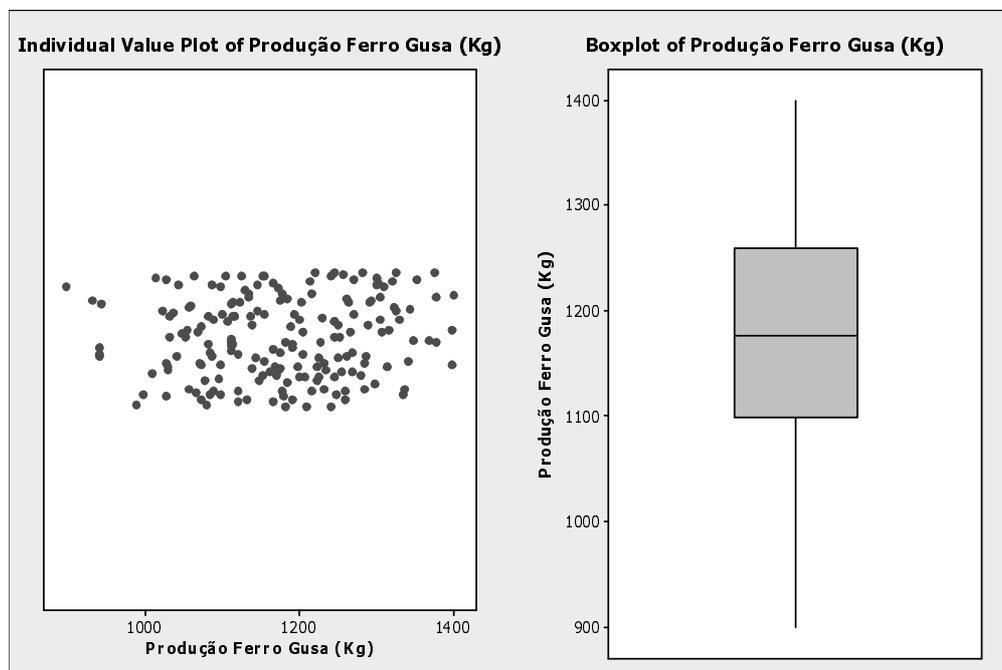


Figura 5.3.15 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Produção de Ferro Gusa”

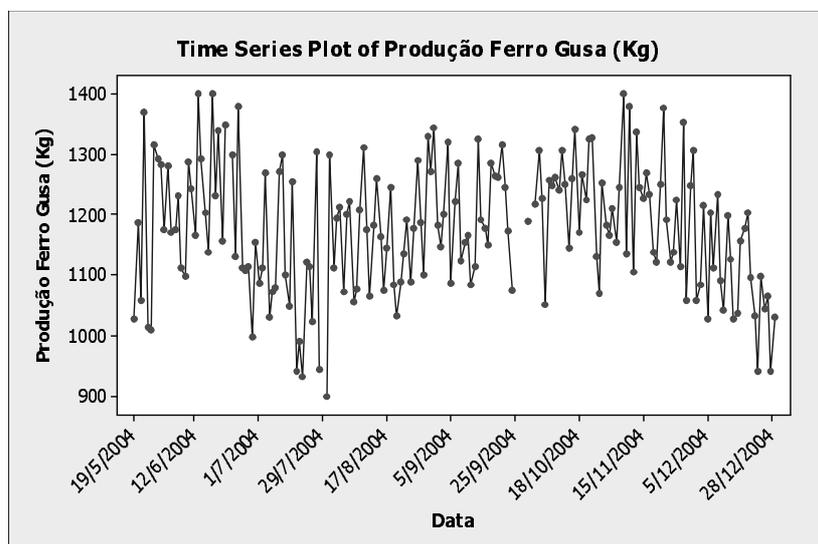


Figura 5.3.16 – Gráfico Temporal para a variável “Produção de Ferro Gusa”

Avaliando as variáveis acima podemos dizer que, quando observamos a variável “Perdas Térmicas”, apenas o período 1 apresentou média menor que o período 16, as demais médias são consideradas iguais a do período 16. Em compensação, quando olhamos as variáveis “Produção de Ferro Gusa”, a média do período 1 é bem menor que a média do período 16.

A produção média de Ferro Gusa no período 16 é superior às médias dos períodos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15 . Não há nenhum período que apresentou produção média de Ferro Gusa superior a do período 16.

O consumo médio de “Carvão Bruto” do período 16 é inferior aos consumos médios dos períodos 8 e 13. Embora o consumo médio de “Carvão Bruto” no período 1 tenha se destacado sendo menor que os consumos médios nos períodos 8, 12, 13, 15 e 16, vimos que ele apresentou uma produção média de “Ferro Gusa” baixa, estatisticamente inferior as dos períodos 3, 8, 13, 15 e 16.

Olhando a variável “Injeção de Carvão Vegetal”, a média do período 16 foi superior às médias dos períodos 5 e 13, os quais apresentaram menor produção de ferro gusa e maior consumo de carvão bruto que o período 16.

Nas figuras 5.3.17, 5.3.18, 5.3.19 e 5.3.20, seguem resumos de estatísticas das variáveis “Perdas Térmicas”, “Produção de Ferro Gusa”, “Carvão Vegetal Bruto” e “Injeção de carvão vegetal” para o período 16 (teste de normalidade, média, desvio-padrão, mínimo, máximo, quartis, intervalos de confiança para a média, a mediana e o desvio-padrão):

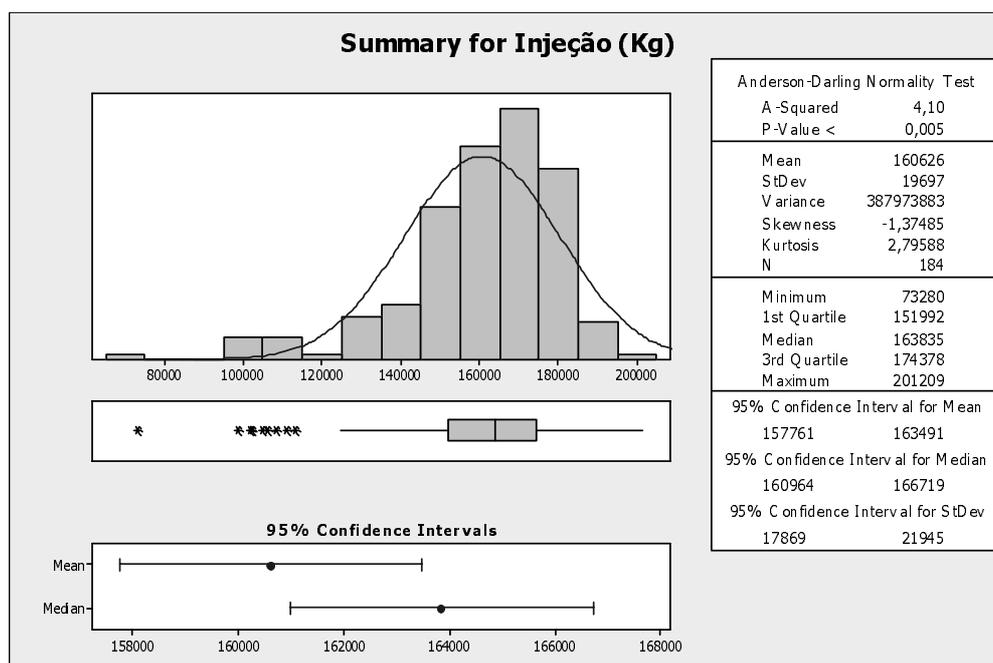


Figura 5.3.17 – Resumo Estatístico para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”

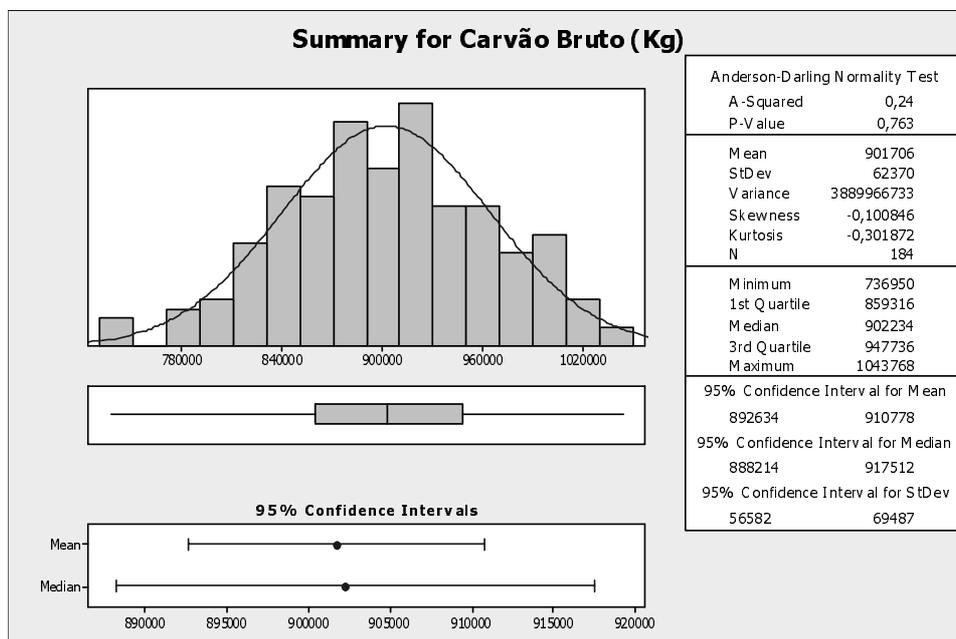


Figura 5.3.18 – Resumo Estatístico para a variável “Carvão Vegetal Bruto”

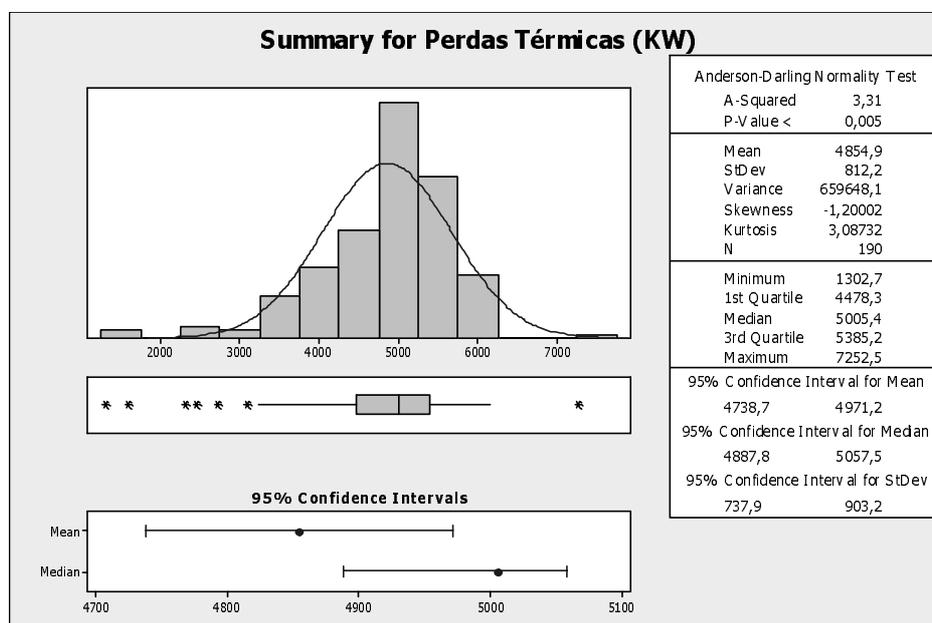


Figura 5.3.19 – Resumo Estatístico para a variável “Perdas Térmicas”

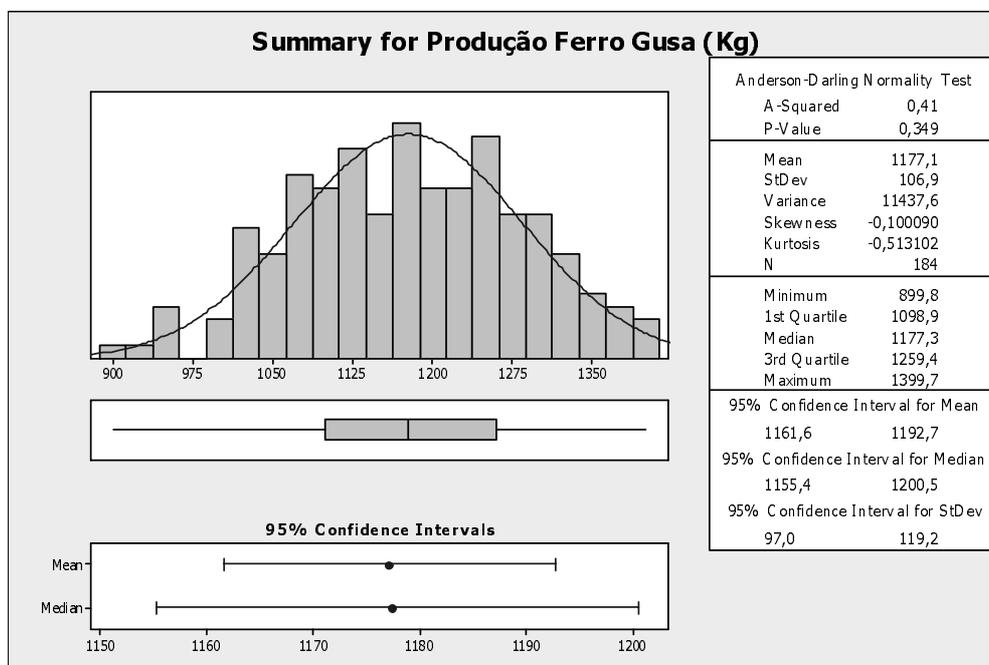


Figura 5.3.20 – Resumo Estatístico para a variável “Produção de Ferro Gusa”

Na figura 5.3.21, os gráficos de dispersão mostram a relação entre as variáveis:

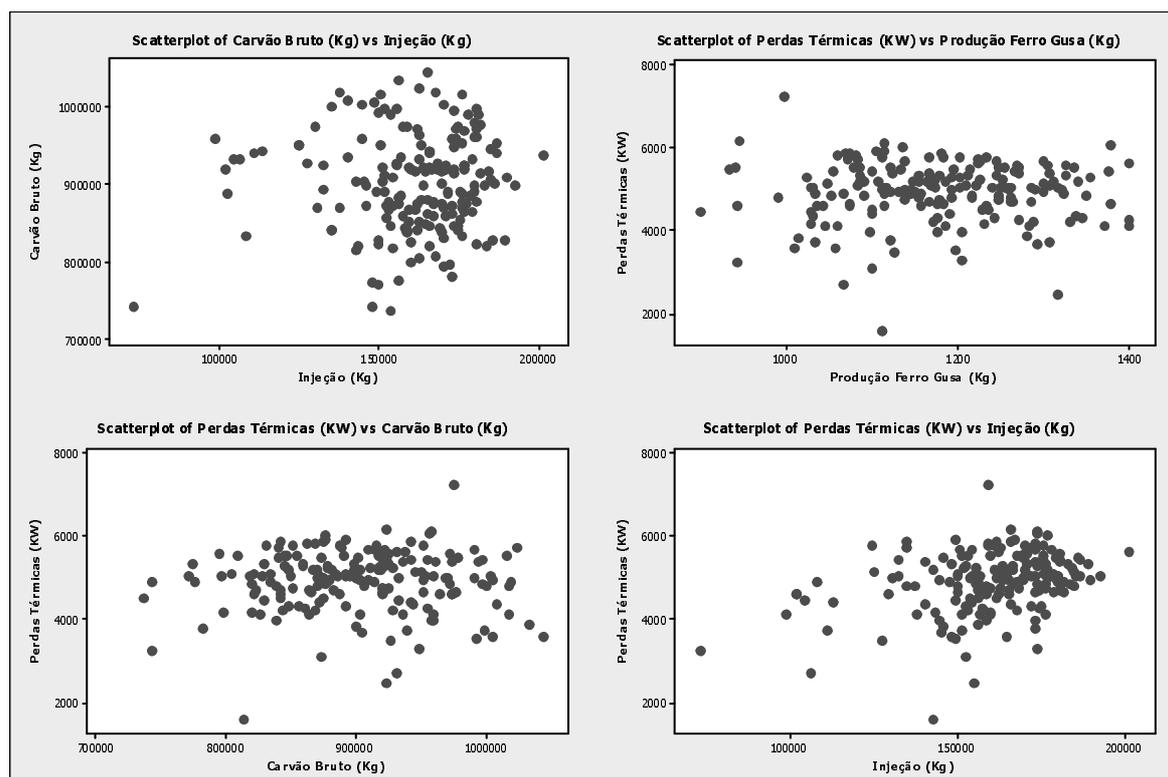


Figura 5.3.21 – Correlação entre as variáveis “Carvão Vegetal Bruto”, “Injeção de Carvão Vegetal”, “Produção de Ferro Gusa” e “Perdas Térmicas”.

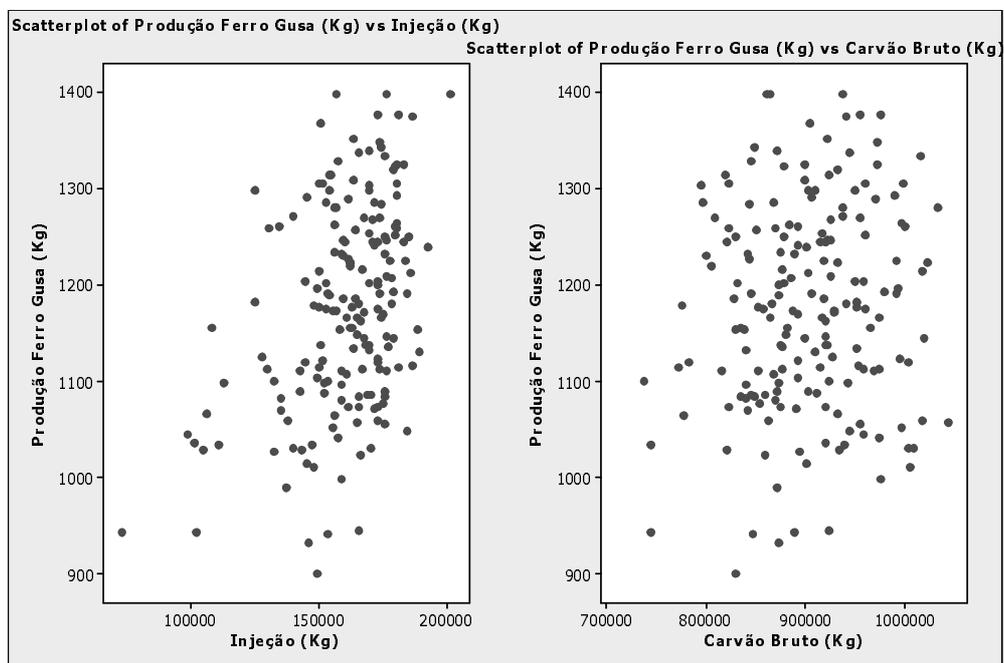


Figura 5.3.22 – Correlação entre as variáveis “Carvão Vegetal Bruto”, “Injeção de Carvão Vegetal”, “Produção de Ferro Gusa” e “Perdas Térmicas”.

Coeficiente de Correlação de “Spearman”:

Tabela V.10 – Coeficiente de Correlação de “Spearman”

		Correlations				
		PERD_TER	PROD_FER	CARVAO_B	INJECAO	
Spearman's rho	PERD_TER	Correlation	1,000	,008	-,009	,301(**)
		Coefficient				
		Sig. (2-tailed)	.	,911	,906	<b>,000</b>
		N	190	183	183	183
	PROD_FER	Correlation	,008	1,000	,085	,352(**)
		Coefficient				
		Sig. (2-tailed)	,911	.	,252	<b>,000</b>
		N	183	184	184	184
	CARVAO_B	Correlation	-,009	,085	1,000	,047
		Coefficient				
		Sig. (2-tailed)	,906	,252	.	,525
		N	183	184	184	184
	INJECAO	Correlation	,301(**)	,352(**)	,047	1,000
		Coefficient				
		Sig. (2-tailed)	<b>,000</b>	<b>,000</b>	,525	.
		N	183	184	184	184

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Correlações Estatisticamente Significativas:

Perdas Térmicas e Injeção de Carvão Vegetal:

Correlação positiva. Quanto maior o valor de injeção de carvão vegetal, maior o valor de perda térmica. Valor do coeficiente de “Spearman”: 0,301 – valor-p: 0,000 (menor que 5%).

Produção de Ferro Gusa e Injeção de Carvão Vegetal:

Correlação positiva. Quanto maior o valor de injeção de carvão vegetal (até o limite de 150kg/t) maior o valor de produção de ferro gusa. Valor do coeficiente de “Spearman”: 0,352 – valor-p: 0,000 (menor que 5%).

Análise de regressão:

O melhor modelo ajustado foi:

Y = resposta = Produção de Ferro Gusa (kg)

X's = variáveis explicativas = Carvão bruto (kg) e Injeção (kg)

Tabela V.11 – Análise de Regressão para as variáveis “Produção de Ferro Gusa”, “Carvão Vegetal Bruto” e “Injeção de Carvão Vegetal”.

### Regression Analysis: Produção Fer versus Carvão Bruto; Injeção

The regression equation is

Produção Ferro Gusa (t/dia) = 0,737 Carvão Bruto (Kg/t) + 3,18 Injeção (Kg/t)

184 cases used, 7 cases contain missing values

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Noconstant				
Carvão Bruto (Kg)	0,00073675	0,00006370	11,57	0,000
Injeção (Kg)	0,0031762	0,0003558	8,93	0,000

S = 106,645 R<sup>2</sup> = 99,19%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	254979858	127489929	11209,80	0,000
Residual Error	182	2069900	11373		
Total	184	257049758			

Source	DF	Seq SS
Carvão Bruto (Kg)	1	254073411
Injeção (Kg)	1	906448

Podemos explicar a produção de ferro gusa pelas variáveis Carvão Vegetal Bruto e Injeção de Carvão Vegetal através do modelo destacado acima.

É um ótimo modelo, já que explica cerca de 99,2% da variação dos dados e atende as suposições de normalidade, independência e variância constante dos resíduos (figura 5.3.23).

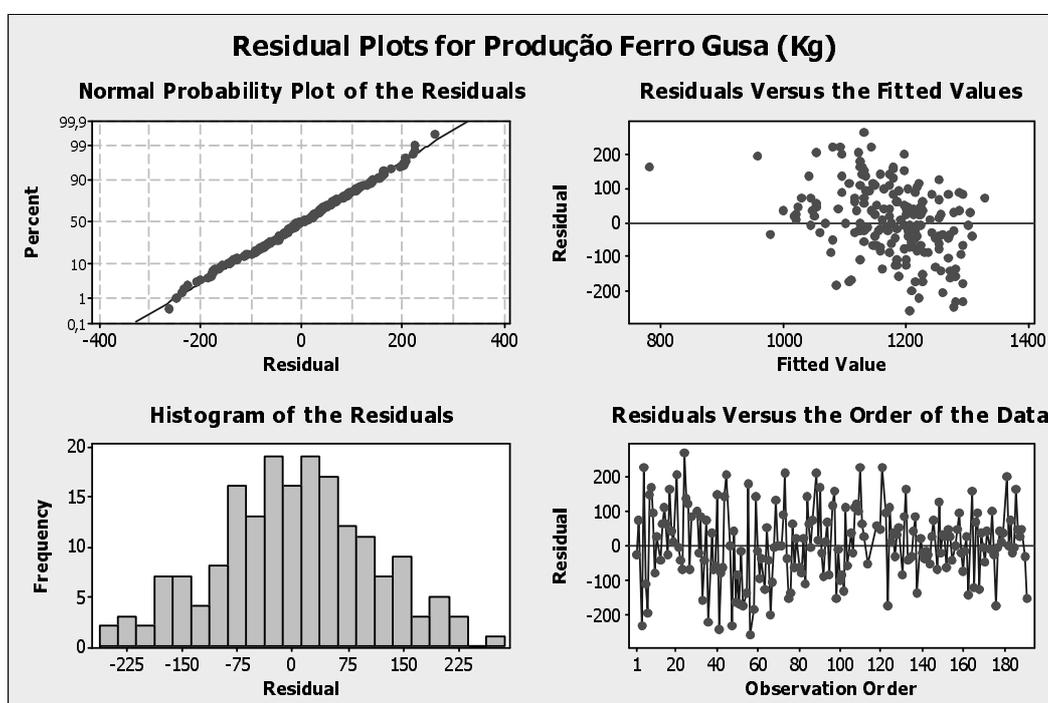


Figura 5.3.23 – Gráfico de Resíduos da Análise de Regressão das variáveis “Produção de Ferro Gusa, Carvão Vegetal Bruto e Injeção de Carvão Vegetal”

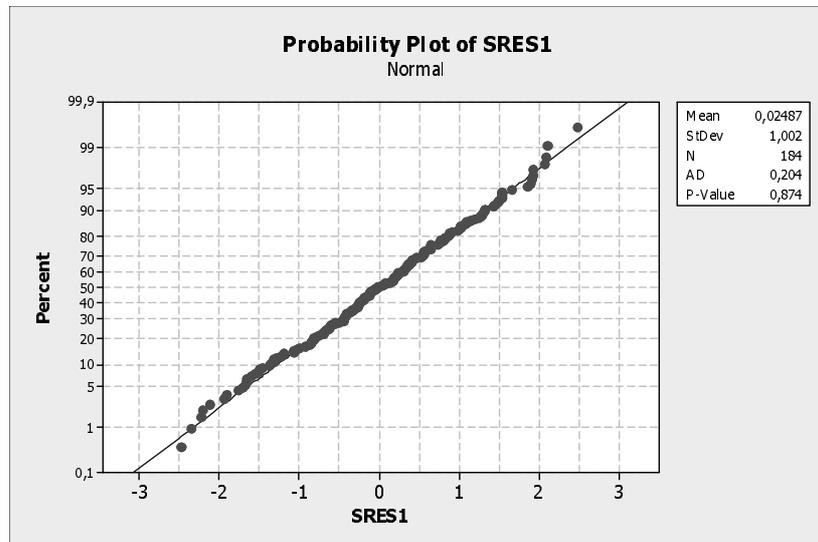


Figura 5.3.24 – Gráfico da Curva Normal da Análise de Regressão das variáveis “Produção de Ferro Gusa, Carvão Vegetal Bruto e Injeção de Carvão Vegetal”.

Análise de regressão:

O melhor modelo ajustado foi:

Y = resposta = Perda

X's = variáveis explicativas = Carvão bruto e Injeção

Tabela V.12 – Análise de Regressão para as variáveis “Perdas Térmicas”, “Carvão Vegetal Bruto” e “Injeção de Carvão Vegetal”

### Regression Analysis: Perdas Térmicas versus Carvão Bruto; Injeção

The regression equation is

Perdas Térmicas (KW/h) = 2,41 Carvão Bruto (Kg/t) + 17,1 Injeção (Kg/t)

181 cases used, 10 cases contain missing values

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Noconstant				
Carvão Bruto (Kg)	0,0024077	0,0003966	6,07	0,000
Injeção (Kg)	0,017085	0,002214	7,72	0,000

S = 662,786 R<sup>2</sup> = 98,24%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	4396348884	2198174442	5003,98	0,000
Residual Error	179	78632068	439285		
Total	181	4474980952			

Source	DF	Seq SS
Carvão Bruto (Kg)	1	4370188372
Injeção (Kg)	1	26160513

Podemos explicar a perda térmica pelas variáveis carvão vegetal bruto e injeção de carvão vegetal através do modelo destacado acima.

Também é um ótimo modelo, já que explica cerca de 98,2% da variação dos dados e atende as suposições de normalidade, independência e variância constante dos resíduos (figura 5.3.25).

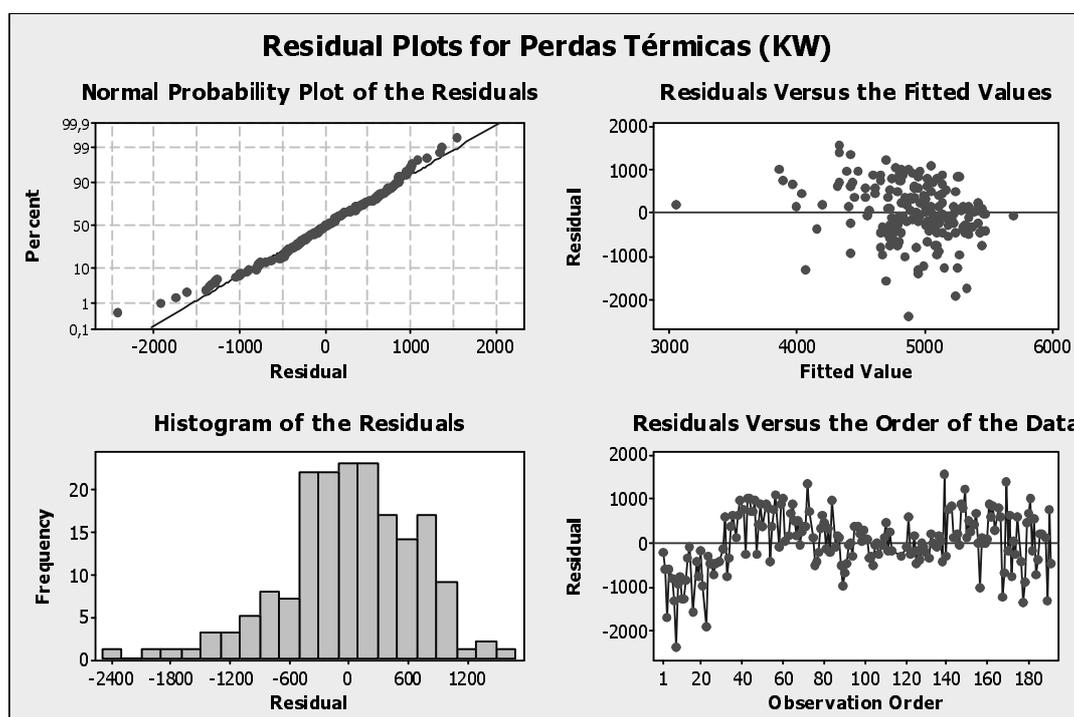


Figura 5.3.25 – Gráfico de Resíduos da Análise de Regressão das variáveis “Perdas Térmicas, Carvão Vegetal Bruto e Injeção de Carvão Vegetal”

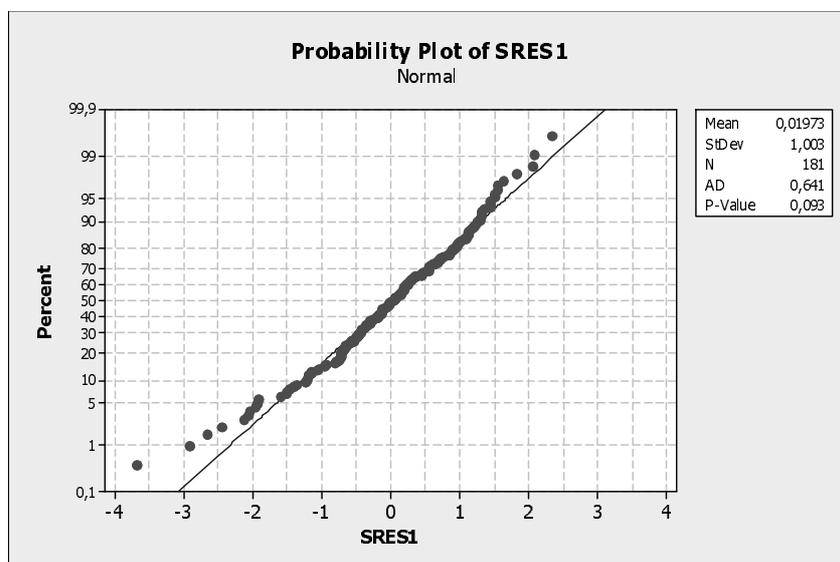


Figura 5.3.26 – Gráfico da Curva Normal da Análise de Regressão das variáveis “Perdas Térmicas, Carvão Vegetal Bruto e Injeção de Carvão Vegetal”.

## 6- CONCLUSÕES

Neste trabalho foram testadas várias seqüências de carregamentos e distribuição de carga no topo do Alto-Forno 1 da VMB. Após análise estatística dos resultados, podem-se obter várias conclusões, dentre as quais destacam-se:

I – A melhor seqüência de carregamento e distribuição de carga no topo do Alto-Forno 1, considerando as variáveis “Produção de Ferro Gusa”, “Consumo de Carvão Bruto” e “Taxa de Injeção de Carvão Pulverizado” da VMB, e, observando os 16 testes industriais realizados, com intervalo de confiança de 95%, é a seqüência:

CCMM – 9011

Este resultado está de acordo com o trabalho realizado por Klein, C. et al (1999), onde foi adiantada a posição do primeiro redutor em relação ao segundo, objetivando maior estabilidade operacional do Alto-Forno e conseqüente aumento da produção e redução do consumo específico de redutor.

II – Utilizando o método de Análise de Regressão dos dados de produção de Ferro Gusa pelas variáveis de Consumo de Carvão Vegetal Bruto e Taxa de Injeção de Carvão Vegetal, podemos obter o seguinte modelo para representar a correlação dos dados:

$$\text{Produção Ferro Gusa (t/dia)} = 0,737 \times \text{Carvão Bruto (kg/t)} + 3,18 \times \text{Taxa Injeção (kg/t)}$$

Este é um modelo matemático confiável, já que estatisticamente explica cerca de 99,2% da variação dos dados e atende as suposições de normalidade, independência e variância constante dos resíduos.

Esta equação se aplica para o caso específico do Alto-Forno 1 da VMB, onde, a partir de um consumo específico de carvão vegetal bruto e taxa de injeção de carvão específica, pode-se determinar a produção de ferro gusa do reator.

III – Da mesma maneira, utilizando o método de Análise de Regressão dos dados de Perdas Térmicas do Circuito de Refrigeração de Água pelas variáveis de Consumo de Carvão Vegetal Bruto e Taxa de Injeção de Carvão Vegetal, podemos obter o seguinte modelo para representar a correlação dos dados:

$$\text{Perdas Térmicas (kW/h)} = 2,41 \times \text{Carvão Bruto (kg/t)} + 17,1 \times \text{Taxa Injeção (kg/t)}$$

Podemos explicar a perda térmica pelas variáveis carvão vegetal bruto e injeção de carvão vegetal através do modelo destacado acima.

Este, também é um modelo matemático confiável, já que estatisticamente explica cerca de 98,2% da variação dos dados e atende as suposições de normalidade, independência e variância constante dos resíduos.

Esta equação se aplica para o caso específico do Alto-Forno 1 da VMB, onde, a partir de um consumo específico de carvão vegetal bruto e taxa de injeção de carvão específica, pode-se determinar qual a perda térmica do circuito fechado de refrigeração do “Stave cooler” do reator.

IV – A Base de Carvão Vegetal do Alto Forno pode ser calculada, com segurança, pela relação abaixo:

$$\text{LOG BC} = [2,746 \times \text{LOG}(\text{Dgoela})] - 1,28$$

Onde:

BC é a base de carvão vegetal em toneladas,

Dgoela é o diâmetro da goela do forno em metros.

Para o caso do Alto-Forno 1 da VMB, o valor calculado para a base de carvão vegetal deverá ser:

3,27 toneladas de carvão vegetal

## 7- BIBLIOGRAFIA

BAYLIS, M., MILLER, K. Cast copper staves: an economic alternative. Steel World, v.5, n.1, p.24-29.

Blast Furnace Phenomena and Modelling – ISIJ.

CAMPOS, V.F., et al. Tecnologia de Fabricação de Ferro Gusa em Alto-Forno, Março 1984.

CARMICHAEL, F., et al. New Concepts and Designs for Blast Furnace Linings and Coolings Systems. Iron and Steel Engineer, August 1996.

CHEMOROV, M., et al. Hearth wall and Stave Repair of USS/Kobe's Blast Furnace N<sup>o</sup>. Iron and Steel Engineer, September 1992.

FERREIRA, J. P., et al. Modelo Geométrico de Distribuição de Carga no Topo com Placas Móveis para o Alto-Forno 3 da Usiminas.

GÓES, J.J.P., et al. Distribuição da carga no Alto-Forno 2 da Cosipa – Medições Efetuadas Durante o Carregamento – Segunda Campanha. XXXIX Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, Julho 1984.

HAMILIUS, A. Blast furnace practice with stave-coolers and with a rotating chute for burden distribution Sidmar - Gent. IRONMAKING CONFERENCE, 37, 1978, Chicago. Proceedings. New York: AIME , 1978. p.160-168.

HATHAWAY, W.R., et al. Copper stave installation in H-4 blast furnace stack: first results. IRONMAKING CONFERENCE, 58, 1999, Chicago. Proceedings. Chicago, Iron & Steel Society, 1999. p.35-45.

HAYCOCK, W.F, THOM, G.W. Stelco's experience with stave cooling and philosophy for future application. Iron and Steel Engineer, v.51, n.4, p.25-30, Mar. 1980.

HEINRICH, P., et al. Copper Blast Furnace Staves Developed for Multiple Campaigns. Iron and Steel Engineer, February 1992.

HELENBROOK, R.G., ROY, P.F. Water requirements for blast furnace copper staves. Iron & Steelmaker, v.27, n.6, p.45-51, June 2000.

HILLE, H., et al. Copper Stave Cooling System for Blast Furnace Walls. Metallurgical Plant and Technology International, April 1992.

INABA, M., et al. Development of Blast Furnace Burden Distribution Control Expert System. NKK TECHNICAL REVIEW N°65 (1992).

JAMES, J.D., et al. LTV Steel's First Experience with Stack Staves. Ironmaking Conference Proceedings (1992).

KAPTEIN, F.et al. Cooling and lining systems for blast furnaces by Danieli Corus (Hoogovens). CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2000, Rio de Janeiro p.665-675.

KLEIN, C.A., et al. Evolução da distribuição de carga com a injeção de carvão no AF1 da CST. XXX Seminário de Redução de Minério de Ferro, Belo Horizonte, Dezembro 1999.

MILLER, K., GOODE, K. Mini copper staves for blast furnace stack repairs. Steel Times International, v.26, n.9, p.20-21, Sept. 2002.

MONTGOMERY, D. C., Runger, G.C. e Hbele, N. F. Estatística Aplicada à Engenharia. Rio de Janeiro: LTC

MUKHERJEE, T., et al. Burden Distribution in Blast Furnace with Movable Trota Armour – Model Studies at Tata Steel. Institute of Metals, April 1984.

NARITA, K., et al. Relationship of the Gas Temperature Distribution with the Descending Rate and Layer Thickness of Burden in the Trota of Blast Furnace. Japan 1979.

NASH, A. D., et al. Stave Utilization in North American Blast Furnaces. Iron and Steel Engineer, December 1992.

NASH, A.D. Stave utilization in North American blast furnaces. Iron and Steel Engineer, v.69, n.12, p.26-29, Dec. 1992.

ODA, S., et al. Operational results of shaft repair by installing stave type cooler at Kimitsu nos. 3 and 4 blast furnaces. IRONMAKING CONFERENCE, 56, 1997, Chicago, 1997. p.293-296.

OLIVEIRA, M. A , et al. Aspectos Relativos à Distribuição de Carga e à Combustão do Redutor, Considerando a Injeção de Carvão Pulverizados em Altos-Fornos. 51º Congresso Anual da ABM, Porto Alegre, Agosto 1996.

OLIVEIRA, W.H., et al. Principais melhorias implantadas na 2a. reforma do alto-forno da Açominas. SEMINÁRIO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, Vila Velha, 2002. p.437-447.

PASCHMANN, D., WINZER, D. Theoretical aspects and practical experience with stave coolers on a blast furnace. Iron and Steel Engineer, v.56, n.1, p.30-34, Jan. 1979.

POVEROMO, J. J.. "Blast Furnace Burden and Gás Distribution" – Iron and Steelmaking, July 1979, pp 22-34.

QUITES, E.E.C., et al. Modelo Físico Reduzido para simulação da Distribuição de Carga no Alto-Forno 2 da Cosipa. XXXXVI Congresso Anual da ABM, São Paulo, Setembro 1991.

SANTIAGO, T.C..Avaliação de Minérios de Ferro para Utilização em Altos-Fornos – IV Simpósio Minero-Metalúrgico da UFMG, Belo Horizonte, Outubro 1993.

SANTOS, E..B., et al. Análise do desempenho do mecanismo de distribuição de carga do Alto-Forno 5 da Belgo Mineira. Seminário de Redução e Matérias Primas, Belo Horizonte, Dezembro 1991.

SERRANO, A.T.L.. Distribuição de carga no topo do Alto-Forno 1 da Mannesmann – Modelamento Físico – Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, Fevereiro 1998.

SILVA, L.C.L., et al. Influência da Distribuição de Carga na Operação do Alto-Forno – Exemplo Prático na Açominas. Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Pimas, Belo Horizonte, Dezembro 1991.

STAVE cooling for prolonged BF campaigns. Steel Times International, v.19, n.2, p.30, March 1995.

STAVE cooling for prolonged BF campaigns. Steel times international, March 1995.

TRIOLA, M.F. (1998). Introdução à Estatística. Rio de Janeiro: LTC.

ULHÔA, M.B., et al. Carvão Aplicado à Fabricação de Coque de Alto-Forno – Curso Ministrado à Companhia Belgo Mineira, João Monlevade, Novembro 1995.

WAKELIN, D.H., et al. Stave and intensified plate cooled blast furnace at LTV steel. Iron and Steel Engineer, v.68, n.12, p.40-47, Dec. 1991.

WAKELIN, D.H., et al. Stave and intensified plate cooled blast furnaces at LTV Steel. Iron and Steel Engineer, v.68, n.12, p.40-47, Dec. 1991.