

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

Cláudio Musso Velloso²
Luiz Fernando Andrade de Castro³

Resumo

O Alto-Forno 1 da VMB 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, fator determinante para atingirmos os níveis de produção e consumo 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 CV.

Palavras-chave: Stave cooler; Distribuição de carga; Perdas térmicas.

V&M DO BRASIL BLAST FURNACE 1 OPERATION OPTIMIZATION WITH "STAVE COOLER" USING CHARGE DISTRIBUTION AT THE FURNACE TOP

Abstract

VMB 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.

Key words: stave cooler – charge distribution - thermal losses

¹ Contribuição técnica ao XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 18 a 21 de setembro de 2007, Salvador - BA, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerente de Departamento de Matérias Primas, Laboratórios e Logística Siderúrgica da V&M do Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Dr., Professor do Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais.

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 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 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).

4 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.

5 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.

6 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.

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.

7 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, conforme a Tabela 1.

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

TESTE INDUSTRIAL	SEQUÊNCIA DE	POSIÇÃO DAS PLACAS
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

8 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

Após a realização dos testes industriais sobre as seqüências de carregamento e distribuição de carga no topo do Alto-Forno 1 da VMB, segue na Figura 1 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) e Perdas Térmicas (kW/h).

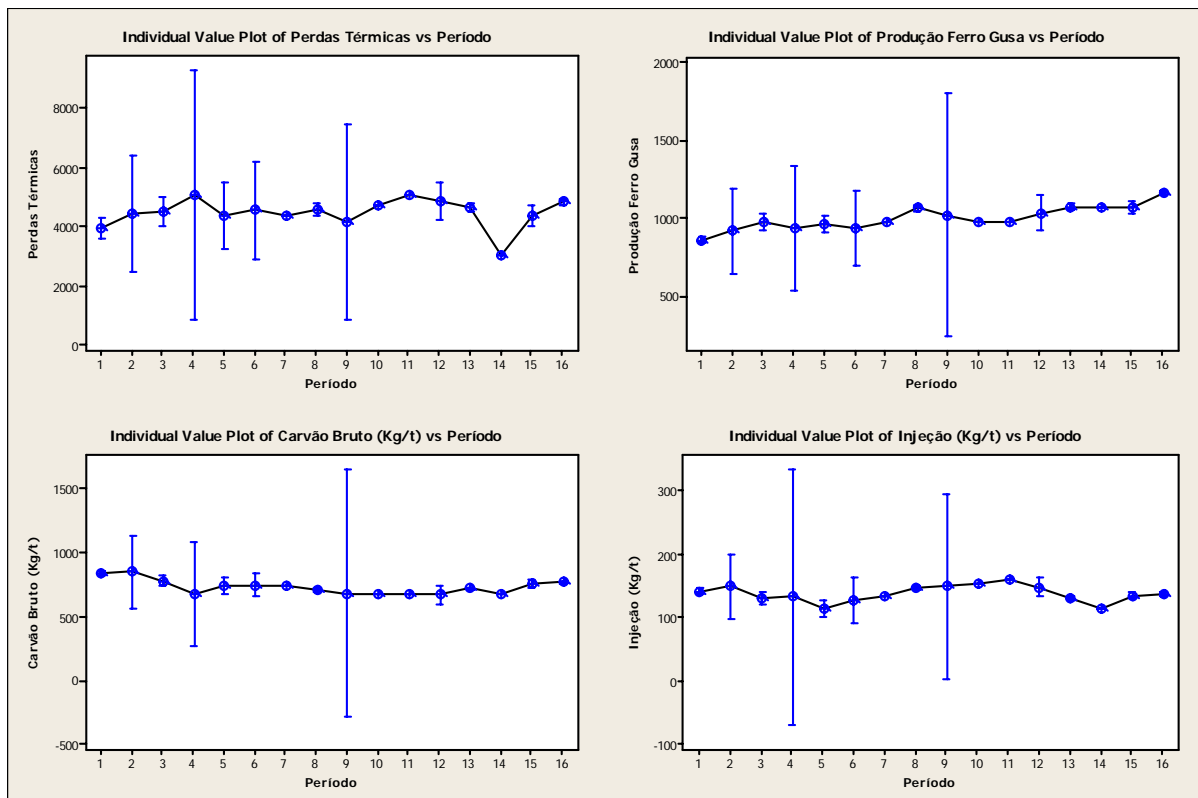


Figura 1 – Gráfico Média observada de cada período com intervalo de confiança de 95%

9 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.

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 diferente de 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).

PERDAS TÉRMICAS (valor-p=0,306)

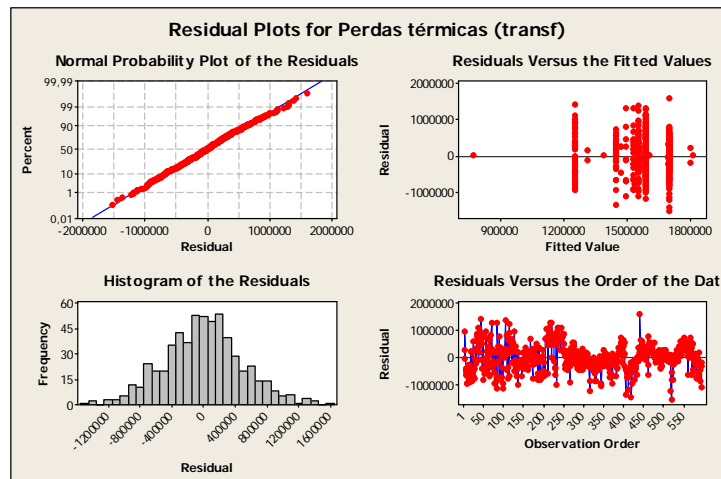


Figura 2 – Gráfico de Resíduos da ANOVA para a variável “Perdas Térmicas”

PRODUÇÃO DE FERRO GUSA (valor-p=0,123)

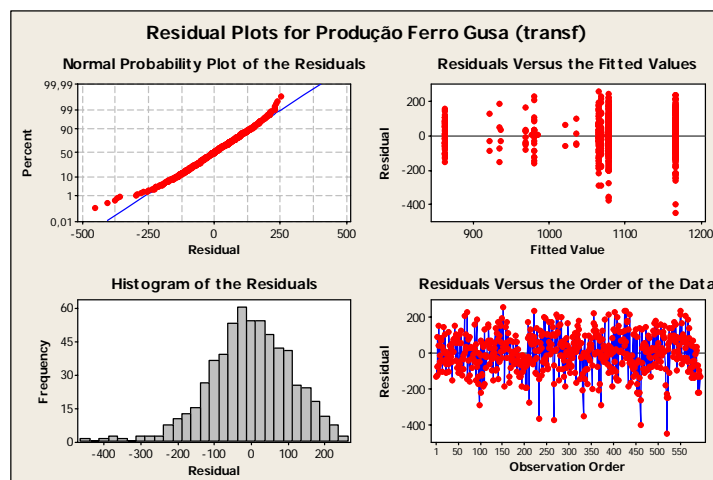


Figura 3 – Gráfico de Resíduos da ANOVA para a variável “Produção de Ferro Gusa”

CARVÃO VEGETAL BRUTO (valor-p=0,056)

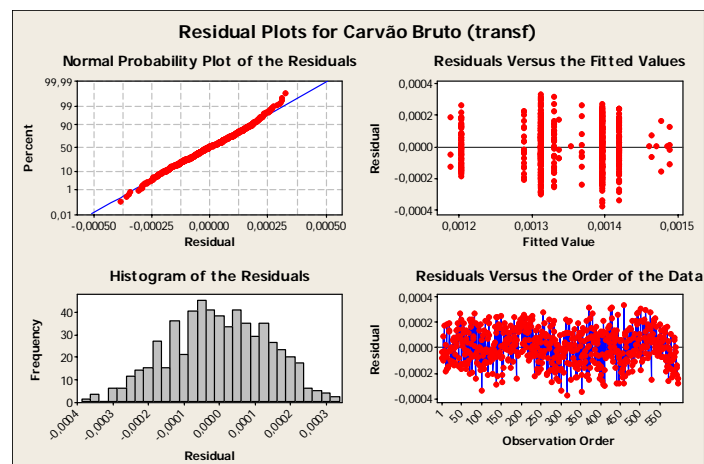


Figura 4 – Gráfico de Resíduos da ANOVA para a variável “Carvão Vegetal Bruto”

INJEÇÃO DE CARVÃO VEGETAL PULVERIZADO (valor-p=0,333)

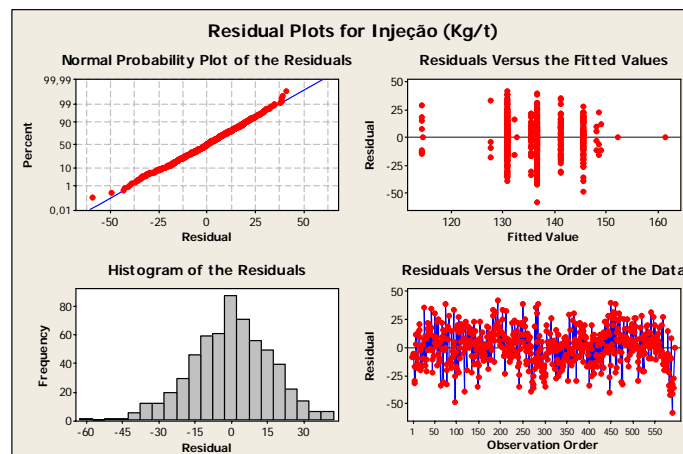


Figura 5 – Gráfico de Resíduos da ANOVA para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”

10 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 (maior produção).

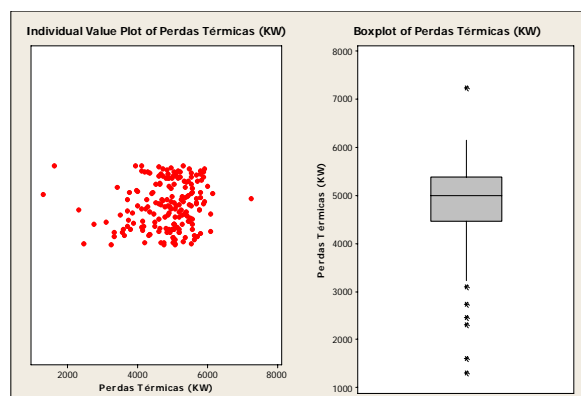


Figura 6 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Perda Térmica”

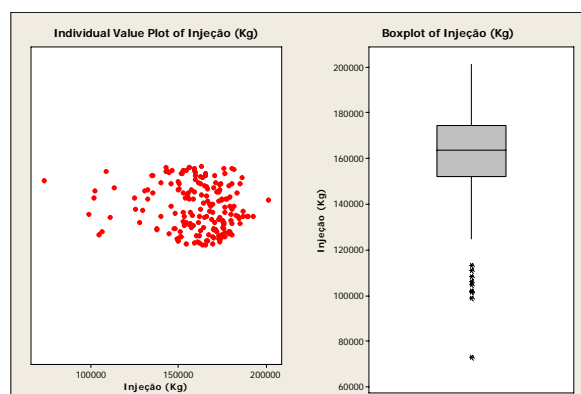


Figura 7 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Injeção de Carvão Vegetal”

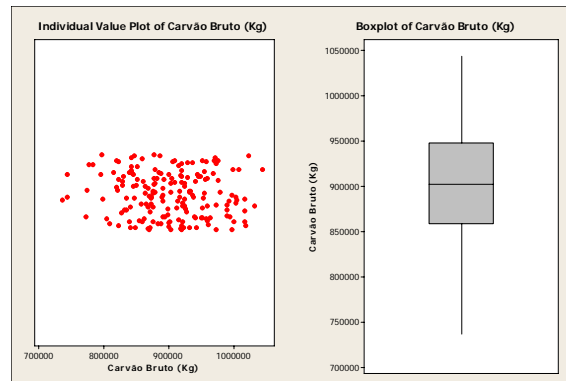


Figura 8 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Carvão Vegetal Bruto”

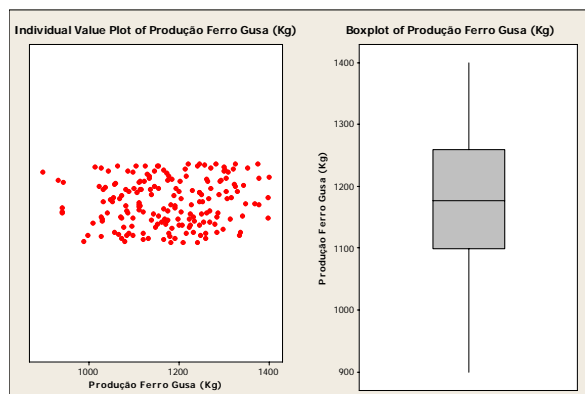


Figura 9 – Gráfico de Dispersão Boxplot para a variável “Produção de Ferro Gusa”

11 ANÁLISE DE REGRESSÃO

Visando identificar uma correlação entre as variáveis “Produção de Ferro Gusa”, “Carvão Vegetal Bruto”, “Injeção de Carvão Vegetal” e “Perdas Térmicas” foram feitas Análises de Regressão, obtendo-se os seguintes modelos matemáticos listados abaixo.

Regression Analysis: Produção Fer versus Carvão Bruto; Injeção
Produção Ferro Gusa (t/dia) = 0,737 Carvão Bruto (Kg/t) + 3,18 Injeção (Kg/t)

Regression Analysis: Perdas Térmicas versus Carvão Bruto; Injeção
Perdas Térmicas (KW/h) = 2,41 Carvão Bruto (Kg/t) + 17,1 Injeção (Kg/t)

Estes são modelos matemáticos confiáveis, já que estatisticamente explicam 99,2% e 98,2% da variação dos dados respectivamente, e atendem às suposições de normalidade, independência e variância constante dos resíduos.

Estas equações se aplicam para o caso específico do Alto-Forno 1 da VMB.

12 CONCLUSÕES

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

II – Utilizando o método de Análise de Regressão dos dados, podemos obter os seguintes modelos para representar a correlação dos dados:

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

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

BIBLIOGRAFIA

- 1 CAMPOS, V.F., et al. Tecnologia de Fabricação de Ferro Gusa em Alto-Forno, Março 1984.
- 2 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.
- 3 MUKHERJEE, T., et al. Burden Distribution in Blast Furnace with Movable Trota Armour – Model Studies at Tata Steel. Institute of Metals, April 1984.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 SANTIAGO, T.C.. Avaliação de Minérios de Ferro para Utilização em Altos-Fornos – IV Simpósio Mineralúrgico da UFMG, Belo Horizonte, Outubro 1993.
- 7 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.
- 8 SERRANO, A.T.L.. Distribuição de carga no topo do Alto-Forno 1 da Mannesmann – Modelamento Físico – Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, Fevereiro 1998.
- 9 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 Primas, Belo Horizonte, Dezembro 1991.
- 10 STAVE cooling for prolonged BF campaigns. Steel Times International, v.19, n.2, p.30, March 1995.
- 11 ULHÔA, M.B., et al. Carvão Aplicado à Fabricação de Coque de Alto-Forno – Curso Ministrado à Companhia Belgo Mineira, João Monlevade, Novembro 1995.