

## MODELAMENTO DO ÍNDICE DE TAMBORAMENTO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO PARA REDUÇÃO DIRETA\*

Luis Alberto Sfalsin Passos<sup>1</sup>  
Antônio Eduardo Clark Peres<sup>2</sup>  
João Luis Moreira<sup>3</sup>

### Resumo

Com o passar dos anos observa-se uma mudança nas características mineralógicas dos minérios de ferro lavrados nas novas minas da Samarco Mineração SA. De acordo com levantamentos podem ser constatadas mudanças nos percentuais da hematita porosa, hematita especular e da goethita na constituição do concentrado de minério de ferro. Pode-se verificar uma tendência de aumento do percentual de goethita bem como do PPC (perda por calcinação) característica intrínseca ao minério. Estes fatos implicam em uma maior dificuldade da concentração em garantir a qualidade da polpa de minério bombeada para as usinas de pelotização, visto que fatores como a granulometria do minério (partículas menores que 325#) e a superfície específica são afetadas pela mineralogia. Por consequência, há uma maior dificuldade no processo de filtragem para obtenção do *pellet feed* com a faixa de umidade necessária para o processo de pelotamento e queima. De outra forma, o aumento do PPC dificulta o processo de secagem das pelotas no forno de pelotização, exigindo um maior aporte térmico para retirada da água residual contida nos cristais que não evaporam a 100°C. Todos estes fatores contribuem para a qualidade da pelota queimada, interferindo na sua resistência física como compressão a frio e tamboramento. Esta pesquisa tem como objetivo apontar as variáveis que influenciam significativamente o tamboramento, para propor ações que melhorem o controle do processo produtivo de forma a buscar o ponto de equilíbrio entre qualidade e produção.

**Palavras-chave:** Pelotização; Tamboramento; Modelagem; Produtividade; Qualidade.

### TUMBLER INDEX MODELLING OF IRON ORE PELLETS FOR DIRECT REDUCTION

#### Abstract

Over the years, a change is observed in the mineralogical characteristics of iron ore mined in new mines of Samarco SA. According to surveys, changes can be observed in the percentage of porous hematite, specular hematite and goethite in the constitution of iron ore concentrate. We observed a trend of increased percentage of goethite and LOI (loss on ignition) intrinsic characteristics of the iron ore. Therefore, these facts imply greater difficulty to concentrating and ensuring the quality of the iron ore slurry pumped to the pellet plants, since factors such as particle size (particles smaller than 325 #) and the specific surface of ore are affected by mineralogy. Consequently, there is a greater difficulty in the filtering process to obtain the pellet feed with a moisture range required for the process of pelletizing and firing. On the other hands, when increasing the LOI it can be difficult the drying process of pellets in the pelletizing furnace, requiring a greater thermal input to remove the residual water contained in the crystals that do not evaporate at 100°C. All these factors contribute to the quality of burned pellets, and characteristics as cold compression and tumbler. This research aims to point out the variables that significantly influence the tumbler index to propose actions to improve control of the production process in order to seek the balance between quality and production.

**Keywords:** Pelletizing; Tumbler; Modeling; Productivity; Quality.

<sup>1</sup> Engenharia de Produção, Mestrando, Engenheiro de Processo, Engenharia de Processo, Samarco Mineração SA, Anchieta, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Doutorado em Mineral Engineering, PhD, Professor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenharia Metalúrgica, Laboratorista, Engenharia de Processo, Samarco Mineração SA, Anchieta, ES, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Para garantia da qualidade física, as pelotas de minério de ferro devem resistir ao manuseio durante o processo de transporte até o cliente final, evitando assim que sofram degradação. Logo, é importante que certas características físicas, desejadas para as pelotas queimadas, sejam continuamente monitoradas durante o processo produtivo. Uma destas características é o tamboramento.

O tamboramento é uma das principais características que diz respeito à qualidade física das pelotas queimadas. Ele mede a porcentagem de finos gerados de uma dada amostra de pelotas queimadas, simulando o manuseio durante os processos de transporte e estocagem. É sabido que qualidade está na contramão da produtividade. Logo, em prol de se manter os índices de tamboramento, faz-se a opção pela redução da produção, afetando diretamente a margem de lucro da empresa.

Logo, o tamboramento é um problema para produtividade e faz-se necessário o melhor entendimento das variáveis que o afetam. O objetivo da pesquisa é apontar as variáveis que influenciam significativamente o tamboramento, em termos de média e variabilidade, para propor ações que melhorem o controle do processo produtivo de forma a buscar o ponto de equilíbrio entre qualidade e produção, garantindo assim os níveis desejados de produtividade, margem de lucro e satisfação dos clientes.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Índice de Tamboramento

Segundo Meyer [3], os ensaios de abrasão e tamboramento foram padronizados internacionalmente pela norma ISO 3271, porém em paralelo a ISO ainda existe a ASTM (American Society for Testing and Materials). O teste de tamboramento, de acordo com a norma ISO 3271, consiste em alimentar uma amostra de 15kg de pelotas queimadas de minério de ferro em um tambor, de dimensões iguais a 1m de diâmetro por 0,5m de profundidade. O tambor é girado a uma velocidade de 25 rpm por oito minutos totalizando 200 revoluções.



Figura 1 – Tambor de Abrasão

Após a passagem pelo tambor, as pelotas são peneiradas e as frações (+6,3mm) e (-0,5mm) são verificadas. A porcentagem de cada fração em relação ao total de pelotas alimentadas no tambor são respectivamente os resultados do tamboramento (+6,3mm) e abrasão (-0,5mm). Todos os valores devem ser checados por repetição do teste diz Meyer [3].

TAMBOR TESTE	PENEIRAS	FORMATO	( g )	( % )
Tamboramento	+6,3		14140	94,3
Ships	-6,3+0,5		100	0,7
Abrásão	-0,5		700	5,0
TOTAL			14940	100

Figura 2 – Memorial de cálculo do Tamboramento.

O teste tem como objetivo simular a degradação da pelota causada pelo manuseio e transporte até o cliente final. O Teste é realizado no Laboratório de Controle de Produção com um lote de pelotas composto por amostras coletadas a cada 30 minutos no processo de produção. A amostra é homogeneizada e submetida ao ensaio de tamboramento. O resultado é registro no sistema PIMS (*Process Information Management System*) em intervalos de 2 horas.

## 2.2. Monitoramento do Tamboramento

No exemplo da figura 3, que relaciona alimentação da grelha versus produção, observa-se que a alimentação é mais baixa nos extremos da curva. Isso sugere que em resposta a um resultado de tamboramento ruim, a produção é reduzida em busca de uma melhora da qualidade. A ação é cíclica: se o tamboramento cai, reduz-se a produção, melhora a qualidade, e então, a produção é novamente incrementada. O resultado de tamboramento é um dos principais parâmetros de qualidade da pelota queimada.

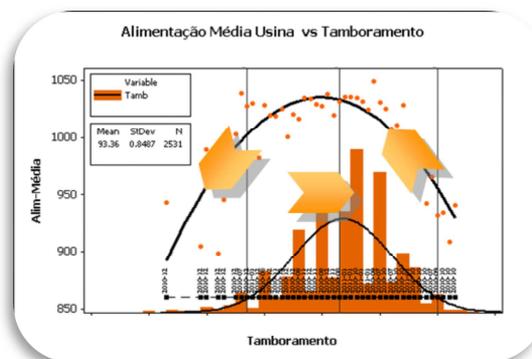


Figura 3 – Interação Produção com Tamboramento

As ações para o controle do tamboramento dependem dos resultados dos testes de tamboramento feitos em laboratório a cada 2h.

## 2.3. Modelagem do Índice de Tamboramento

A hipótese é que a previsão online do tamboramento possa contribuir para determinar os valores alvos desejados para as variáveis explicativas do modelo. O controle inteligente das variáveis explicativas proporcionará um equilíbrio entre a

qualidade do produto e a produtividade, maximizando a margem de lucro da empresa.

### 2.3.1. Variáveis candidatas a modelagem

As variáveis relacionadas ao tamboramento, utilizadas nesta modelagem, foram mapeadas segundo revisão bibliográfica [1-3,5], conforme a figura 4.



Figura 4 – Mapeamento das variáveis explicativas

### 2.3.2. Coleta e limpeza do bando de dados

O banco de dados das variáveis candidatas a participarem da modelagem foi a montado a partir do PIMS (*Process Information Management System*). O PIMS é um banco de dados temporal, ligado diretamente as redes de automação, que armazena as informações dos instrumentos de chão de fábrica, por longos períodos de tempo. Posteriormente estes dados podem ser resgatados para análise.

As variáveis candidatas ao modelo podem ser classificadas em variáveis medidas de forma online, variáveis que são os resultados de testes de laboratório de controle de processo, a cada 2h, e variáveis não medidas que eventualmente poderão ser calculadas a partir de conhecimento prévio.

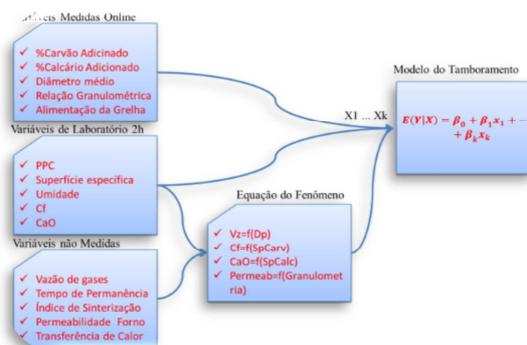


Figura 5 – Fluxo para Modelamento

Para limpeza do o banco de dados foram removidos os pontos dispersos “outliers”, utilizando-se a técnica do Box Plot.

$$\text{Valor Mínimo} = Q1 - (1,5 * Q3 - Q1) \tag{2.3.1}$$

$$\text{Valor Máximo} = Q3 + (1,5 * Q3 - Q1) \tag{2.3.2}$$

A retirada dos pontos dispersos gerou a quebra da sequência temporal entre as linhas do banco de dados. Estas quebras foram identificadas e quantificadas, sendo selecionadas as sequências maiores do que 48 linhas ou 12 horas de operação



Observando o gráfico da figura 8, pode-se afirmar que todos os fatores estudados são importantes para resistência física da pelota queimada no que tange o tamboramento.

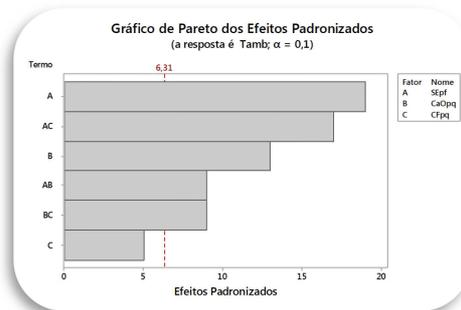


Figura 8 – Gráfico dos Efeitos Padronizados -  $R^2(\text{pred}) = 93,64\%$

$$\text{Tamb} = 13,57 + 0,01324 * \text{SEpf} + 10,7 * \text{CaOpq} + 115,38 * \text{CFpq} + 0,03138 * \text{SEpf} * \text{CaOpq} - 0,03233 * \text{SEpf} * \text{CFpq} - 68,18 * \text{CaOpq} * \text{CFpq} \quad (2.3.3)$$

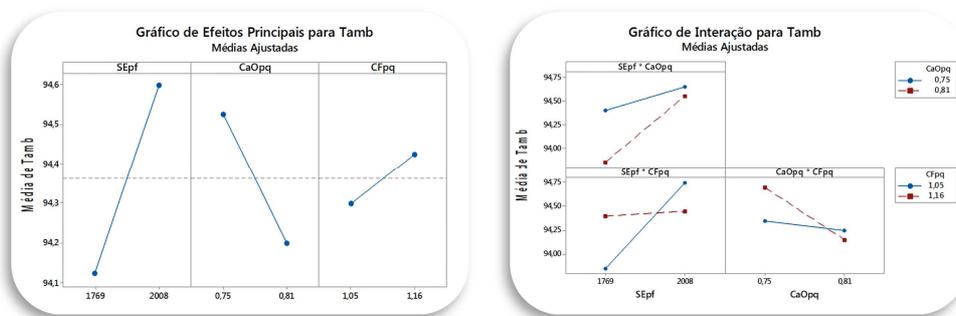


Figura 9 – Gráficos dos e Efeitos principais e Interações

Os gráficos dos efeitos principais mostram o comportamento de cada fator, a direção e a força de influência no tamboramento. Pode-se observar que a superfície específica do *pellet feed* é o efeito de maior influência. Além disto, as interações; SEpf com CaOpq; SEpf com CFpq; e CaOpq com CFpc são relevantes a medida que a adição adequada de insumos pode compensar diferentes valores de superfície específica. Assim fica provada a influência das variáveis primárias no tamboramento, mesmo que estas relações não sejam observadas claramente nos dados industriais.

### 2.3.4. Modelagem com Dados de Industriais

Para Werkema e Aguiar [6], o modelo de regressão linear múltiplo escrito em termos das observações amostrais é:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (2.3.4)$$

- $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ , São os parâmetros
- $x_{i1}, \dots, x_{ik}$  São as constantes conhecidas do conjunto de dados
- $\varepsilon_i$  São os erros aleatórios independentes  $N(0; \sigma^2)$
- $i = 1, \dots, n$  É o número de observações
- $j = 1, \dots, k$  É o número de variáveis

Os estimadores podem ser encontrados minimizando a função de erro:

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij})^2 \quad (2.3.5)$$

É mais simples resolver o modelo de regressão linear múltipla (2.3.4), em termos de matrizes Neter et al. [4]:

$$Y_{i \times 1} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \end{pmatrix} \quad (2.3.6)$$

$$X_{i \times (k+1)} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ik} \end{pmatrix} \quad (2.3.7)$$

$$\beta_{(k+1) \times 1} = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{pmatrix} \quad (2.3.8)$$

$$\epsilon_{i \times 1} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_i \end{pmatrix} \quad (2.3.9)$$

Em notação Matricial, diz Neter et al. [4]:

$$Y = X\beta + \epsilon \quad (2.3.10)$$

Os estimadores de mínimos quadrados devem satisfazer a igualdade, segundo Werkema e Aguiar [6]:

$$X^T X \hat{\beta} = X^T y \quad (2.3.11)$$

Para resolver encontrar os estimadores de mínimos quadrados, basta multiplicar ambos os lados da equação pela matriz inversa da matriz  $X^T X$ :

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.3.12)$$

E o modelo de regressão ajustado aos dados é dado por:

$$\hat{y} = X \hat{\beta} \quad (2.3.13)$$

Utilizando as técnicas de modelagem e o banco de dados previamente preparado, foi possível gerar um modelo de regressão múltiplo. As variáveis explicativas que proporcionaram melhor ajuste ao modelo podem ser observadas na tabela 2.

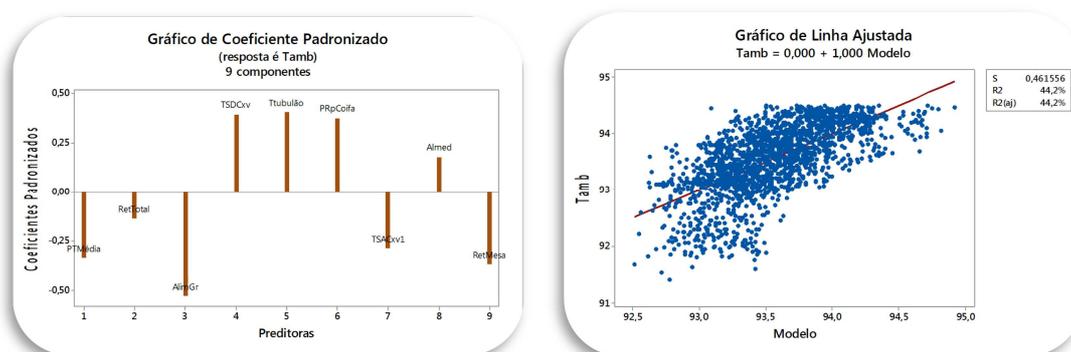


Figura 10 – Gráficos de Coeficientes Padronizado e Resíduos do Modelo de PotGrate

Tabela 2 – Variáveis do Modelo sem Interações

Variável	Descrição
PTMédia	Pressão média de vácuo da Filtragem
RetTotal	Retorno Total do Pelotamento
AlimGr	Alimentação da Grelha
TSDCv	Temp. Secagem Descendente
Ttubulão	Temp. Duto de Recuperação
PRpCoifa	Pressão de Resfriamento Coifa
TSACxv1	Temperatura da Secagem Ascendente
Almed	Alimentação média dos Discos
RetMesa	Retorno da Mesa Principal do Pelotamento

Porém este modelo não contém as variáveis primárias na equação, pois foram excluídas com base no p-valor. No entanto, já foi comprovada em Pot Grate a influência das variáveis primárias no tamboramento. Assim sendo, estas variáveis

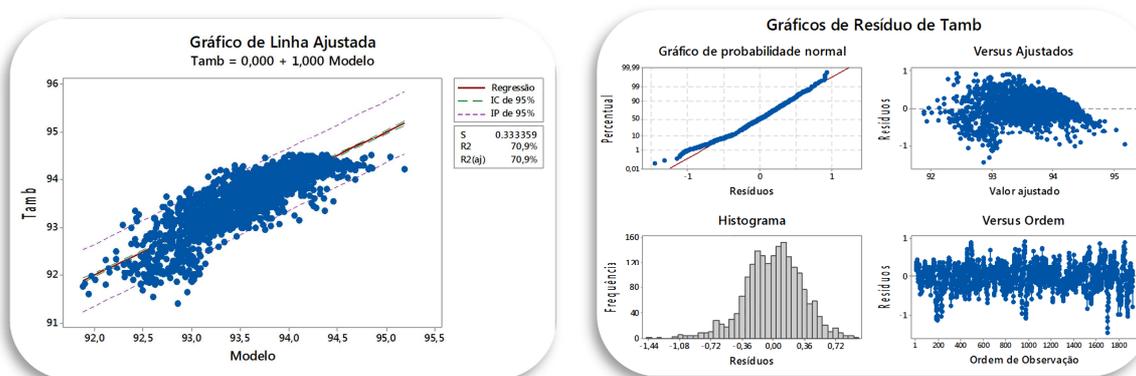
foram reincluídas no modelo na forma de interações. O modelo é hierárquico, portando, se uma interação é importante, as variáveis que a compõem não poderão ser excluídas na sua forma individual. O modelo ficou então:

**Tabela 3 – Variáveis do Modelo e Interações**

Termo	Descrição	Interações	
<b>AlimGr</b>	Alimentação da Grelha	AlimGr*Resiliencia	RetMesa*B2pq
<b>Ttubulão</b>	Temp. Tubulão de Recuperação	AlimGr*pHmis	RetTotal*PPC
<b>TSACxv1</b>	Temperatura da Secagem Ascendente	AlimGr*Diam	RetTotal*CFpc
<b>Almed</b>	Alimentação média dos Discos	Ttubulão*Resiliencia	RetTotal*F8a16
<b>PRpCoifa</b>	Pressão de Resfriamento Coifa	Ttubulão*SEsp	Resiliencia*PPC
<b>PTMédia</b>	Pressão média de vácuo da Filtragem	Ttubulão*Relação	Resiliencia*SEsp
<b>RetMesa</b>	Retorno da Mesa Principal do Pelotamento	TSACxv1*Resiliencia	Resiliencia*CFpc
<b>RetTotal</b>	Retorno Total do Pelotamento	TSACxv1*Relação	PPC*CFpc
<b>Resiliencia</b>	Drop Test	Almed*<325sp	PPC*Relação
<b>PPC</b>	Perda Por Calcinação	Almed*CFpq	SEsp*pHmis
<b>SEsp</b>	Superfície específica do pellet feed	Almed*Relação	SEsp*Diam
<b>&lt;325sp</b>	Granulometria do pellet feed < 325#	PRpCoifa*<325sp	pHmis*CFpc
<b>pHmis</b>	Ph da mistura	PRpCoifa*pHmis	CFpc*Diam
<b>CFpc</b>	Percentual de carbono da pelota Crua	PRpCoifa*CFpq	CFpc*Relação
<b>B2pq</b>	Basicidade Binária (SiO2pq/CaOpq)	PRpCoifa*F8a16	F8a16*Relação
<b>F8a16</b>	Granulometria da Pelota Crua	PRpCoifa*Relação	Diam*Relação
<b>Diam</b>	Diâmetro Médio da Pelota Crua	PTMédia*Relação	

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo apresentou um bom ajuste aos dados de tamboramento, com R<sup>2</sup> de 70%. A análise de resíduo mostra que ainda há espaço para melhoria, pois os resíduos se aproximam da normalidade, porém não são normais, como se pode observar na figura 11.



**Figura 11 – Gráfico de Linha Ajustada e Resíduos do Modelo com Dados Industriais**

Na figura 12 é possível identificar a influencia das variáveis primárias, intermediárias e secundárias, da cadeia produtiva, no tamboramento.

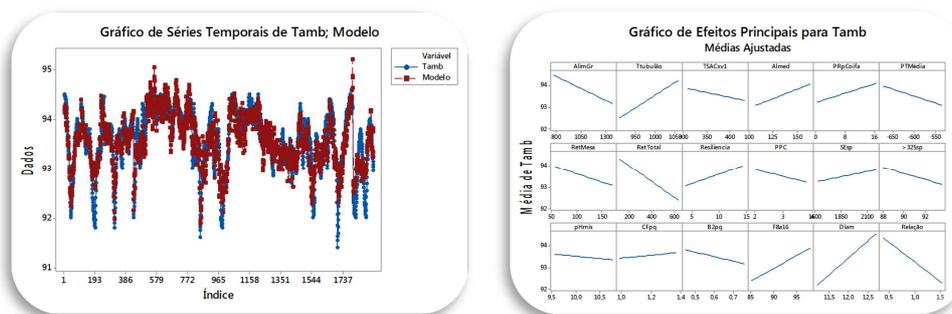


Figura 12 – Gráfico Séries Temporais e Efeitos Principais do Modelo com Dados Industriais

## 4 CONCLUSÃO

O modelo permite a visualização das variáveis que impactam significativamente o tamboramento. Porém, apesar do bom ajuste ao banco de dados, ainda deve ser melhorado como se pode observar na análise de resíduos. O modelo deverá passar por mais testes e ser avaliado no dia a dia das operações. Além disso, deve ser implantado no sistema de controle avançado de processo para fins de validação e futuro controle da planta de pelotização da Usina III.

## Agradecimentos

- Antônio Eduardo Clark Peres, pela orientação, compreensão e incentivo.
- Thiago Marchezi Doellinger, pelo apoio, incentivo, conselhos e correções.
- João Luis Moreira, ajuda na elaboração do trabalho e pela amizade.
- Gleidson Martins dos Santos, pela paciência e coordenação dos testes de Potgrate.
- Alexandre Anacleto, Arthur Trindade, Breno e todos os demais colegas de trabalho pelas colaborações específicas.
- Meus agradecimentos ao CNPq, CAPES-PROEX e FAPEMIG.

## REFERÊNCIAS

- 1 Fonseca, Influência da distribuição granulométrica do pellet feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta, Ouro Preto: REDEMAT-UFOP, 2004, 126p (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).
- 2 Fonseca, Envelhecimento de Pelotas de Minério de Ferro com Diferentes Basicidades e Teores de MgO, Ouro Preto: REDEMAT-UFOP, 2003, 120p (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).
- 3 Meyer, K., Pelletizing of Iron Ores, Düsseldorf: Springer-Verlag mbH, 1980, p.1-46.
- 4 Neter, J. et al. Applied Linear Regression.Models. Homewood, Illinois: Richard D. Irwin, Inc., 1983. p.23-319.
- 5 Nunes, S. F., Influência da Carga Circulante do Pelotamento na Qualidade Física das Pelotas Cruas e Queimadas da Samarco Mineração, Ouro Preto: REDEMAT-UFOP, 2007, 118p (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).
- 6 Werkema, M. C. C. E Aguiar, S. Análise de Regressão; Como entender o relacionamento entre as variáveis de um processo. Belo Horizonte, MG: Werkema Editora Ltda., 2006. p.15-206.