

## UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM EM REGRESSÃO LINEAR PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMA EM PRENSA DE ROLOS DE ALTA PRESSÃO NA PELOTIZAÇÃO \*

Clynton Roger Guastti de Oliveira<sup>1</sup>  
Flavio Helmer Ferro<sup>2</sup>  
Gilberto Costa Drumond Sousa<sup>3</sup>  
Igor Quaresma Vianna<sup>4</sup>  
Jussara Farias Fardin<sup>5</sup>

### Resumo

Ganho de superfície específica, eficiência energética e custo específico de prensagem são importantes indicadores de desempenho para Prensa de Rolos de Alta Pressão, High Pressure Grinding Rolls – HPGR. Instalada em uma usina de pelletização de minério de ferro, a HPGR apresentada nesse trabalho apresentava limitações operacionais desde a sua implantação. Para identificação das causas dessas limitações e quantificar as influências das variáveis de processo, foram realizados testes em 13 cenários operacionais no próprio equipamento por equipe multidisciplinar. A Modelagem por Regressão Linear é utilizada como solução no sistema de controle da HPGR, apresentando ganho de superfície específica para o material cominuído. Esse ganho representa melhor qualidade da pelota, maior produtividade e redução do consumo energético nos moinhos e melhor uniformidade das pelotas pela redução de carga circulante no pelletamento.

**Palavras-chave:** Pelotização; HPGR; Modelagem.

### USING THE LINEAR REGRESSION MODELING AS A SOLUTION FOR A HIGH PRESSURE GRINDING ROLLS PROBLEM ON THE PELLETIZING PROCESS

### Abstract

Specific surface gain, energy efficiency and specific grinding costs are key performance indicators of a high pressure grinding rolls– HPGR in the cominution process of an iron ore pelletizing plant. The machine addressed on this paper have been working with operational limitation since its startup. For identification of the causes of those limitations and to quantify the influences of the process variables, tests were accomplished in 13 operational sceneries in the own equipment for a multidisciplinary team. The linear regression modeling was used as a solution for the control system of the HPGR, increasing the process results.

**Keywords:** Pelletizing; HPGR; Modelling.

<sup>1</sup> Engenheiro, Diretoria de Pelotização, VALE S/A, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro, Diretoria de Pelotização, VALE S/A, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

<sup>3</sup> Ph.D., Professor da Universidade Vila Velha, Vila Velha, Espírito Santo, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro, Diretoria de Pelotização, VALE S/A, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

<sup>5</sup> D. Sc. Professora da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 MODELAGEM POR REGRESSÃO LINEAR

Análise de regressão linear é uma das ferramentas estatísticas mais utilizadas na modelagem de dados e consiste, em sua essência, na determinação de uma equação ou modelo que descreva de maneira eficiente o efeito de um grupo de variáveis independentes sobre uma ou mais variáveis dependentes.

A aplicação da técnica de Modelagem por Regressão Linear (MRL) a um grupo de dados resulta na determinação de coeficientes lineares que ponderam o efeito de variáveis independentes sobre variáveis dependentes. Modelos com uma única variável dependente são ditos uni variados. Modelos com múltiplas variáveis dependentes são ditos multivariados.

Dados multivariados ocorrem com frequência em investigações empíricas. Em estudos econômicos, por exemplo, pode-se avaliar o efeito de medidas de ajuste tributário sobre indicadores de desempenho econômico (ADELMAN et al., 1969). Em estudos de Engenharia, pode-se estudar o efeito de diferentes ajustes nos controles de um equipamento sobre as características de unidades por ele produzidas (FOGLIATTO et al., 1998). Em ambos os casos, deseja-se analisar o efeito de um grupo de variáveis independentes (medidas de ajuste tributário, ajustes nos controles de um equipamento) sobre um grupo de variáveis dependentes (indicadores de desempenho econômico, características do produto). Outros exemplos podem ser encontrados em JOHNSON & WICHERN (1992).

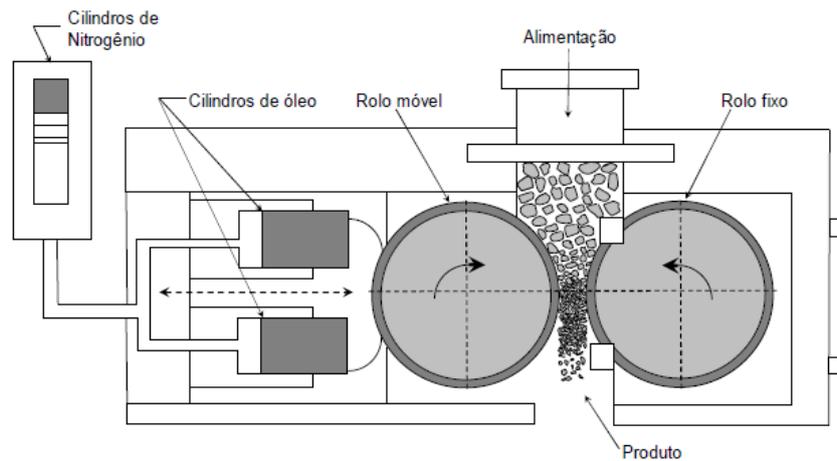
Modelos de regressão são, via de regra, utilizados para fins de predição, estimação e controle (MONTGOMERY & PECK, 1992). Em todos os casos, desejam-se modelos que possam ser utilizados como estimadores eficientes das variáveis dependentes modeladas.

Para esse trabalho, a MRL foi realizada através do software para plataformas de análises preditivas, IBM SPSS Modeler.

### 1.2 COMINUIÇÃO E HPGR

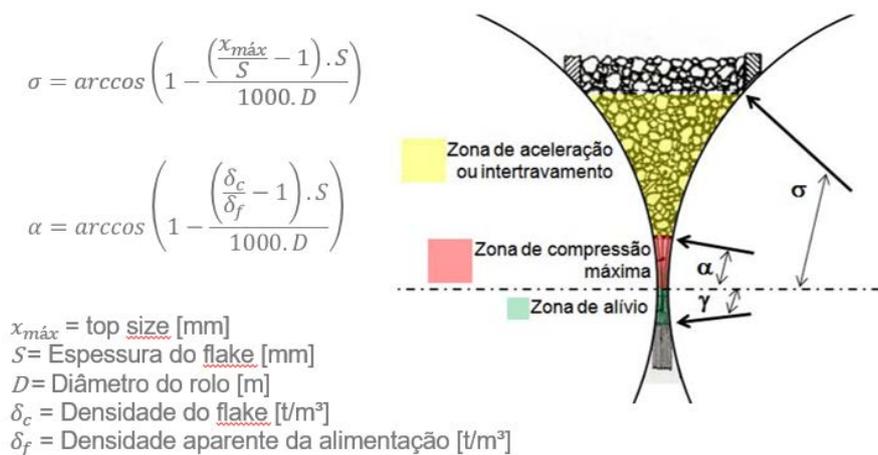
As HPGR são equipamentos de cominuição que consistem, basicamente, em um par de rolos girando em sentidos opostos, montados em um quadro rígido. Um rolo gira sobre o eixo fixo no quadro, enquanto o outro eixo se desloca sobre guias, sendo posicionado por cilindros hidráulicos. O material é alimentado por gravidade por um silo que é forçado entre os rolos pela pressão da coluna de particulados e pela rotação dos rolos, que puxam as partículas para a zona de compressão, proporcionalmente à força aplicada horizontalmente pelos rolos. A força de prensagem dos rolos é transferida para o minério através da pressão (N/mm<sup>2</sup>) do hidráulico multiplicada pela área dos 4 pistões. Esta força, dividida pela área projetada do rolo, tem-se a pressão ou força específica.

A quebra do material é alcançada pela compressão em um leito de partículas e não pelo atrito direto das partículas entre os dois rolos. Na figura 1 é apresentado uma HPGR:



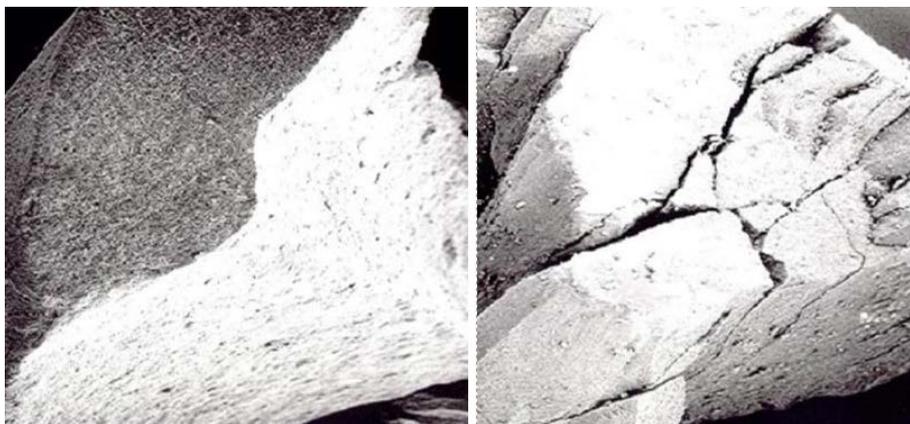
**Figura 1.** Secção transversal de uma HPGR, incluindo o sistema hidráulico e a compressão do leito de partículas (Valery and Jankovic, 2002).

No fluxo descendente, em direção à região de quebra, existem 3 zonas distintas: Aceleração ou Intertravamento (início da quebra); Compressão (pressão máxima) e Alívio (pressão nula) mostrado na figura 2:



**Figura 2.** Mecanismo de prensagem.

O resultado da prensagem é o surgimento de microfissuras apresentadas na figura 3:



**Figura 3.** Antes e após a prensagem – aparecimento de microfissuras.

A utilização de HPGR no processo de cominuição apresenta benefícios listados a seguir em usinas de pelotização:

- As HPGR possuem maior eficiência energética que os britadores e moinhos convencionais.
- Aumento da superfície específica do material resultando em melhor qualidade da pelota.
- Maior produtividade e redução do consumo energético, pois permite moagem mais grossa no moinho de bolas.
- Melhor uniformidade das pelotas pela redução de carga circulante no pelotamento.
- As HPGR possuem menor requisito de manutenção comparada aos britadores e moinhos convencionais.
- Menor espaço para instalação.

## 2 DESENVOLVIMENTO

A HPGR instalada em uma usina de pelotização em Vitória, Brasil, possui os dados apresentados na Tabela 1:

DADOS GERAIS HPGR	MOTOR : 2 UNIDADES	INVERSOR FREQ: 2 UNIDADES
FABRIC: Polysius	FABRIC: WEG	FABRIC: ABB
CAPAC: 1200 t/h	TIPO: CA/3F Assíncrono	TIPO: ACS 1000 – 12 PULSOS
DIAM ROLOS: 2250 mm	ISOLACAO: F	TRANSF: 2,5 MVA – 13,8/2X2.3kV
COMPRIM ROLOS: 1550 mm	TENS NOM: 4000 V	ENTRADA: 2x2.3kV/555A
PRESSÃO MAX: 180 bar	CORR NOM: 304,4 A	SAIDA: 0 - 4.16KV / 615A
ANO DE FABRICAÇÃO: 2001	POT NOM: 1800 KW	POT NOM: 3356 KW
START UP: Agosto 2008	RPM: 1192	REFRIGERAÇÃO: ÁGUA

Tabela 1. Dados nominais da HPGR.

Ganho de superfície específica, eficiência energética e custo específico de prensagem são monitorados como Indicadores de Desempenho de Processo. As variáveis de controle: pressão específica aplicada, torque, corrente dos motores, velocidade periférica e específica por pressão aplicada, taxa de alimentação, nível de coluna, desalinhamento e outras, são muito importantes para o desempenho satisfatório da HPGR.

A formação de coluna de minério sobre os rolos favorece a distribuição uniforme do material sobre os rolos, realizando a quebra das partículas de uma forma predominantemente autógena, importante para a qualidade do produto cominuído. A não formação de coluna contribui para a variabilidade do ganho da HPGR, variabilidade no pelotamento e perda de produtividade da moagem.

### 2.1 Limitações Operacionais da HPGR

A HPGR estudada nesse trabalho, desde a sua implantação em 2008, apresentava limitações operacionais causadas pela rotação dos seus rolos. A rotação nominal dos motores de 1192 (rpm) é muito superior ao necessário para esse processo, não permitindo a formação de coluna sobre os rolos, causando alta variabilidade de ganho, exemplificada na figura 4:

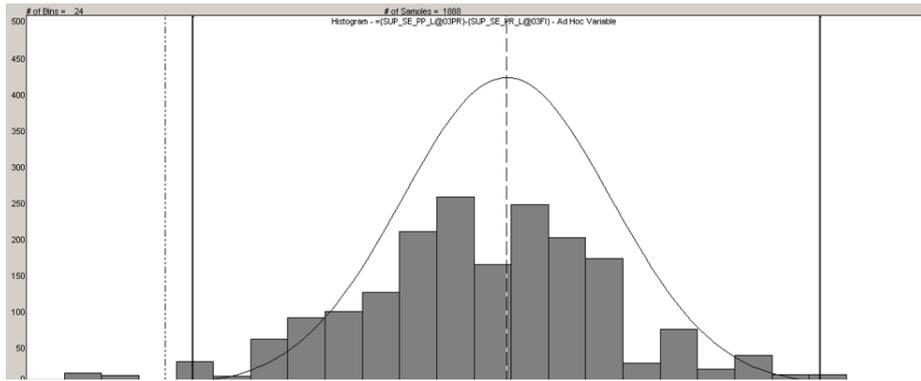


Figura 4. Variabilidade do ganho de superfície.

Os inversores de frequência, mostrado na figura 5, são de tensão imposta, controle vetorial e com configuração mestre escravo. Para rotações baixas, a tensão aplicada aos terminais dos motores também é reduzida.

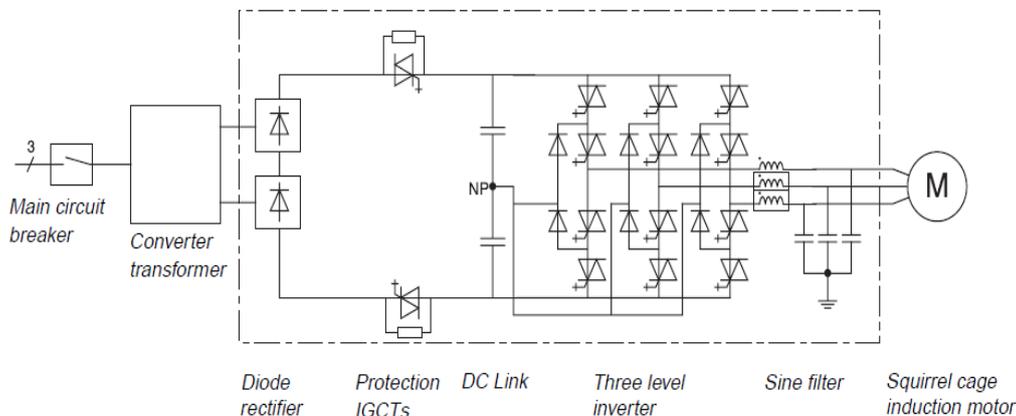


Figura 5. Diagrama do inversor de frequência.

A HPGR é caracterizada como uma carga de conjugado constante, em que o conjugado permanece constante durante a variação de velocidade. Para baixas rotações, os motores elétricos para atenderem a demanda da carga, fornecem uma elevada corrente para compensar a tensão reduzida em seus terminais. Essa corrente solicitada é superior a corrente nominal do motor. Exemplificando, é apresentado na figura 6o registro das variáveis rotação e corrente do motor mestre conforme plots 1 e 2 respectivamente, mostrando a HPGR operando com 42% da rotação nominal, mas já com 110% da corrente nominal dos motores elétricos.

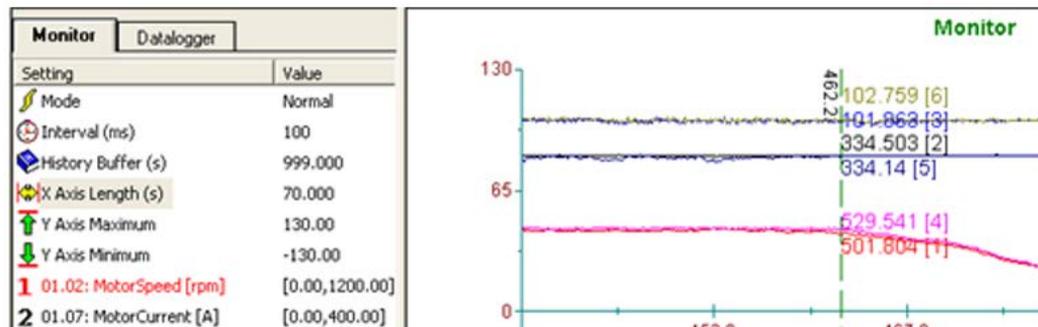
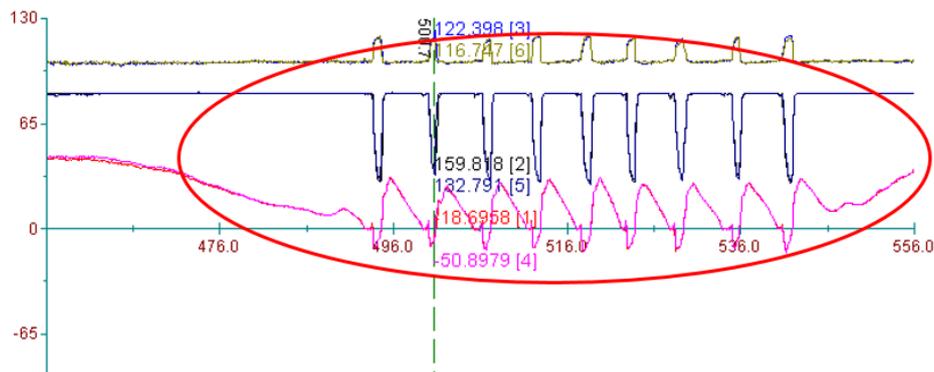


Figura 6. Exemplo de limitação operacional da HPGR

O inversor realiza a proteção do motor, limitando a corrente dentro de seu valor nominal, mas não atende os pedidos de rotação solicitados pelo processo, causando sucessivas paradas da HPGR exemplificadas na figura 7:



**Figura 7.** Limitação da corrente do motor não permite elevação da rotação da HPGR

Para permitir a operação da HPGR e não gerar desarmes pela proteção do inversor, foi limitada a sua rotação mínima em 596 (rpm), 50% da rotação nominal, após a fase de comissionamento do equipamento, permanecendo até os dias atuais.

Nessa rotação mínima não há formação de coluna de minério na entrada da HPGR.

## 2.2 Metodologia e testes

Para melhor conhecer as limitações da HPGR e quantificar as influências das variáveis de processo, foram realizados testes controlados no próprio equipamento por equipe multidisciplinar.

Foram montados 13 cenários operacionais, alterando os pedidos da taxa de alimentação e pressão aplicada nos rolos, e conseqüentemente a rotação. Para cada cenário foram registradas: torque, rotação e corrente para os 2 motores da HPGR; também a pressão hidráulica do rolo móvel, os gaps dos lados direito e esquerdo, medição do nível da coluna e a taxa de alimentação fornecida a HPGR.

Também foram coletadas amostras dos materiais antes e após a prensagem para cada cenário, definindo em testes de laboratório a umidade e superfície específica.

Durante os testes foram medidas as variáveis elétricas através de registrador de grandezas em tempo real para sistemas elétricos trifásicos, fabricante RMS, tipo MARH-21 e modelo 993.

Também foram registradas as grandezas informadas pelo inversor de frequência. Os valores informados por essas duas últimas foram compatíveis.

A seguir a tabela 2, apresentando o resumo do teste acrescentada dos resultados das análises dos materiais coletados:

Testes na HPGR									
Cenário	Variáveis do Teste			Resultado do Teste		Materiais Coletados			
	Pressão (bar)	Taxa Alim (t/h)	Rot (% nom)	Corrente Motor (% nom)	Formou coluna?	Antes da Prensagem		Pós-Prensagem	Resultados
						Umid (%)	Sup Espec (cm <sup>2</sup> /g)	Sup Espec (cm <sup>2</sup> /g)	
1	40	500	35	54	Não	8,2	1570	1750	180,0
2	50	500	30	76	Não	8,2	1570	1770	200,0
3	58	500	30	87	Não	8,2	1580	1800	220,0
4	63	500	30	101	Não	8,2	1580	1820	240,0
5	40	550	25	80	Sim	8,5	1570	1820	250,0
6	48	550	25	90	Sim	8,5	1570	1830	260,0
7	57	550	25	102	Sim	8,5	1570	1850	280,0
8	61	550	25	>110	Sim	8,5	1570	1860	290,0
9	40	600	25	80	Sim	8,5	1570	1820	250,0
10	46	600	25	86	Sim	8,5	1570	1830	260,0
11	60	600	25	104	Sim	8,6	1610	1880	270,0
12	58	600	25	>110	Sim	8,6	1610	1860	250,0
13	57	650	25	108	Sim	8,6	1610	1850	240,0

**Tabela 2.** Resultados dos testes operacionais.

O ganho de superfície é definido como a diferença entre a superfície específica do material antes e após a prensagem, medido em (cm<sup>2</sup>/g).

Os resultados apresentaram que há cenários, que dependendo da taxa de alimentação, pressão, e rotação dos rolos, é possível formação de coluna com correntes dos motores dentro dos valores nominais, apresentando melhores ganhos para a HPGR. Exemplos são os cenários 5, 6, 9 e 10.

Também foram registrados nos cenários 4, 7, 8, 11, 12 e 13 a operação com correntes superiores a nominal do motor.

### 2.3 Modelo de Regressão Linear para Definição de Rotação Mínima

Foi mencionado anteriormente que a HPGR opera com a sua rotação mínima limitada em 50% da nominal do motor, isto é, uma rotação fixada pelo sistema de controle em 596 (rpm). A operação dessa HPGR com rotações inferiores a esse limite, dependendo das outras variáveis do processo, ocasionavam parada da HPGR. Mas os resultados dos testes descritos no item anterior apresentaram também que, dependendo dos valores da taxa de alimentação, pressão, e rotação dos rolos, é possível operar a HPGR sem desarmes e com melhores ganhos.

A Modelagem por Regressão Linear – MRL, foi utilizada para definição da rotação mínima a ser aplicada para HPGR.

Foram coletados mais de 4000 pontos das variáveis relevantes para otimizar os ganhos da HPGR para definição do modelo. Testes na HPGR alterando as variáveis de processo foram refeitos para aprimoramento do modelo.

A MRL foi realizada através do software para plataformas de análises preditivas, IBM SPSS Modeler. A figura 8 mostra a modelagem para os rolos fixo e móvel da HPGR:

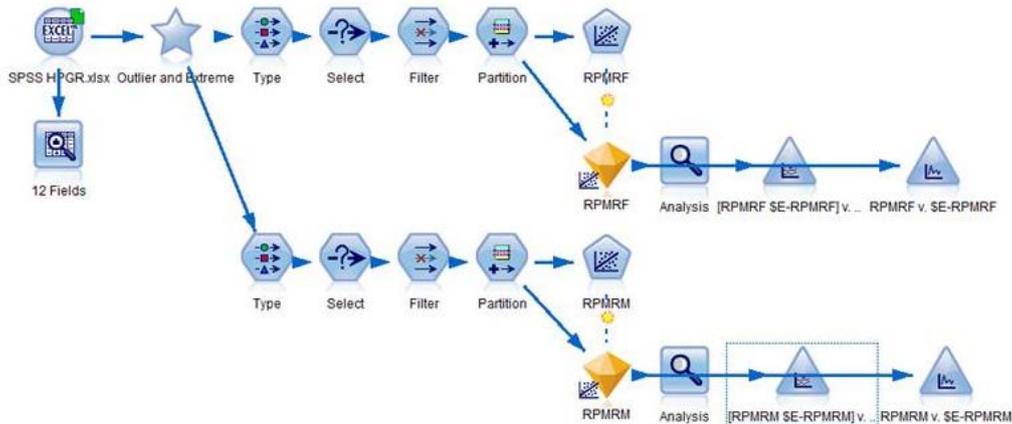


Figura 8. Blocos utilizados pelo software SPSS para MRL da HPGR

As equações lineares da rotação dos motores dos rolos móvel e fixo, tendo como entradas a taxa de alimentação, corrente do motor, pressão e gap dos rolos, apresentaram resultados, conforme esperado, bem próximos e são apresentadas na figura 9:

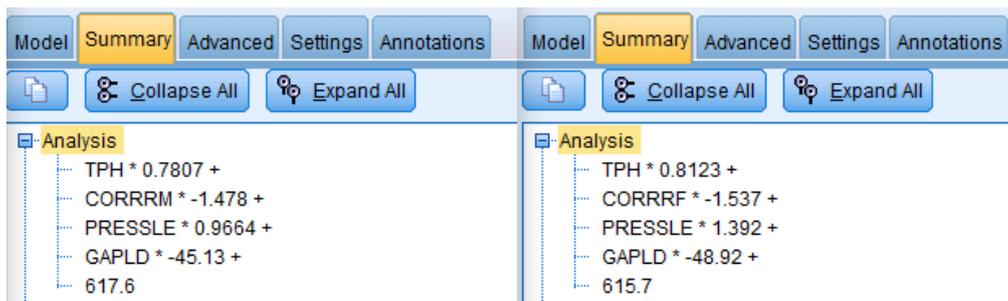


Figura 9. Equação linear para o rolo móvel a direita e rolo fixo a esquerda.

Os gráficos de Correlação, figura 10 e Série Temporal, figura 11 demonstram que o modelo está apto para realizar teste na HPGR.

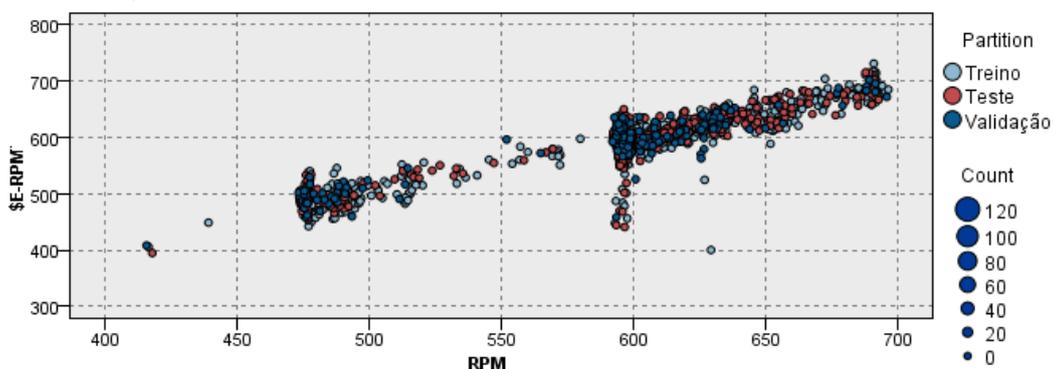


Figura 10. Correlação da rotação do rolo prevista (treino, teste e validação) x rotação real.

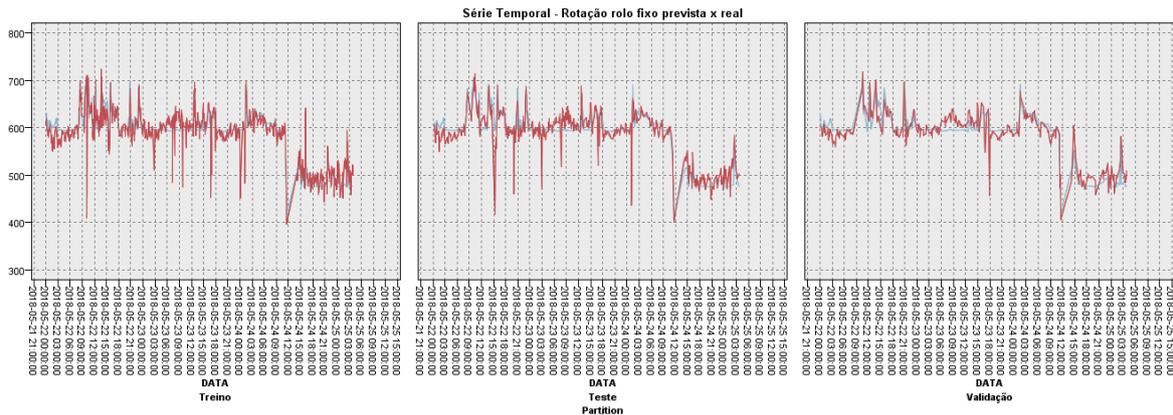


Figura 11. Série temporal da rotação do rolo prevista x rotação real.

## 2.4 Resultado preliminar da aplicação do modelo na HPGR

Uma das variáveis de entrada da equação linear definida pelo modelo é a corrente do motor. Aplicando nessa equação a máxima corrente permitida pelo motor, que é a corrente de placa do motor, a rotação de saída será a mínima possível dentro dos limites de corrente do motor.

Para o sistema de controle, quando ocorrer o acréscimo do nível do minério na coluna alimentadora, será solicitado ao motor que eleve a sua rotação para atender o pedido do nível da coluna. Para atender a essa condição, o valor de corrente inserido na formula foi 90% da corrente nominal do motor, permitindo ao motor da HPGR um degrau de torque quando receber o comando para acelerar o motor. Caso contrário, essa aceleração seria limitada pela corrente nominal do motor.

Utilizando dados reais coletados pelo sistema supervisorio da HPGR entre 01/01/2018 a 01/05/2018, foi realizada a simulação com o modelo. O resultado, apresentado na figura 12, apresenta um intervalo vertical entre a rotação mínima fixa de 596 (rpm) definida pelo sistema de controle e a rotação mínima definida pela modelagem. Esse intervalo, definido pelas diferenças entre essas rotações, representa o ganho obtido pela simulação:

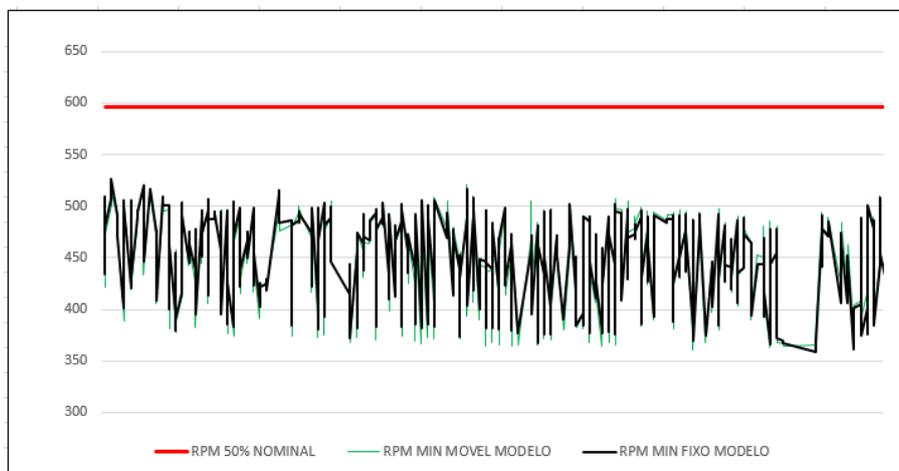


Figura 12. Rotação mínima fixa x modelagem.

Foram registradas diferenças superiores a 220 (rpm) entre a rotação mínima fixa de 596 (rpm) definida pelo sistema de controle e a rotação mínima definida pela modelagem. Esse cenário acontece principalmente com baixas taxas de alimentação e baixas correntes nos motores. Ganhos menores, mas significativos, foram obtidos em todas as demais faixas de taxa de alimentação da HPGR.

Baseado nesses resultados, o modelo foi inserido no sistema de controle da HPGR em testes controlados.

A taxa de alimentação é o elemento mais relevante na equação definida pelo modelo. Foram registrados erros para taxas inferiores a 400 (t/h). O sistema foi testado para taxas de alimentação superiores a 450 t/h, mas essa limitação não apresenta perdas para a HPGR, pois a sua operação ocorre em sua maioria com uma taxa superior a esse valor.

Durante o período de teste, com a redução da rotação foi registrado nível de coluna na alimentação da HPGR e trabalho dinâmico dos cilindros hidráulicos. Foram medidos ganhos de superfície do material superior a 430 (cm<sup>2</sup>/g) entre o material antes e após a prensagem.

### 3 CONCLUSÃO

A modelagem proposta apresentou ganho de superfície específica para o material cominuído. Esse ganho representa melhor qualidade da pelota, maior produtividade e redução do consumo energético nos moinhos e melhor uniformidade das pelotas pela redução de carga circulante no pelotamento.

A modelagem proposta não atende a solução completa para as limitações operacionais causadas pela rotação nominal dos motores ser muito superior ao necessário para esse processo. Mas apresenta ganhos significativos para uma operação otimizada, pois considera o valor atual das variáveis de controle: pressão específica aplicada, corrente dos motores, taxa de alimentação, nível de coluna e outras.

Para a solução definitiva das limitações podemos citar as seguintes soluções:

- Circuito de realimentação do minério visando o aumento da taxa de alimentação, permitindo aos motores operarem com uma rotação superior que permita formação de coluna;
- Substituição dos 2 motores por outros de maior número de polos e rotação inferior aos atualmente instalados;

Essas soluções requerem investimentos onerosos e disponibilidade do equipamento para instalação.

A solução apresentada pela modelagem não possui custo para instalação, é de fácil implementação e não requer parada de usina para implantação.

## REFERÊNCIAS

- 1 ADELMAN, I.; GREER, M. & MORRIS, C.T.: "Instruments and Goals in Economic Development". American Economic Review, 59(2), 409-426, 1969.
- 2 FOGLIATTO, F.S.; ALBIN, S.L. & TEPPER, B.J.: "A Hierarchical Approach to Optimizing Descriptive Analysis Multiresponse Experiments". Journal of Sensory Studies Vol.14(4), Oct-Dec 1999, forthcoming.
- 3 JOHNSON, R.A. & WICHERN, D.W.: Applied Multivariate Statistical Analysis. 3rd Ed., Prentice Hall, New Jersey, 1992.
- 4 MONTGOMERY, D.C. & PECK, E.A.: Introduction to Linear Regression Analysis. 2nd Ed., John Wiley, New York, 1992.
- 5 ALVES, VLADMIR KRONEMBERGER.: "Metodologia para simulação e escalonamento de prensas de rolos". Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2012.
- 6 KLYMOWSKY, RENE; PATZELT NORBERT; KNECHT, JOHANN AND BURCHARDT, EGBERT, "Selection and Sizing of High Pressure Grinding Rolls", Krupp Polysius AG, Beckum, Germany, 2004.
- 7 WEG, "DT-6 Motores Elétricos de Indução trifásicos de alta tensão", Brasil, 2011.
- 8 VALE, "Prensa de Rolos de Alta Pressão (HPGR) para Minério de Ferro", Treinamento Interno, Brasil, 2010.
- 9 WEIR MINERALS AND KHD HUMBOLDT WEDAG, "Primeira Escolha para Tecnologia e Serviços com Prensa de Rolos de Alta Pressão", 2010