

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA PARA ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PELOTAS DE ALTO-FORNO¹

Nemer Saib Neto²
Leonídio Stegmiller³
Reinaldo Walmir de Jesus⁴
Rodrigo Elisei Tomáz⁵

Resumo

As pelotas de alto-forno produzidas com cal hidratada apresentam uma forte tendência de fragilização mecânica, associada principalmente ao parâmetro de resistência à compressão (CCS). O aumento do desempenho mecânico das mesmas está vinculado a uma interação de um conjunto diversificado de variáveis. Ao longo do ano de 2010 foi identificada uma queda significativa da qualidade física das pelotas de alto-forno de alta basicidade, especificamente da resistência à compressão. Para identificar as causas fundamentais desse comportamento fora do padrão foram utilizadas ferramentas estatísticas, tais como análise de variância (Anova) e o método de regressão linear múltipla (*Best Subsets* e *Stepwise Regression*). O emprego dessas metodologias de análise evidenciou os parâmetros críticos do processo de produção dessas pelotas, onde foram destacadas as relevantes contribuições da granulometria do minério de ferro cominuído, da basicidade binária e do percentual de carbono fixo para o aumento da qualidade do produto final. O modelo de regressão linear múltipla criado apresentou um R² ajustado de 67%, o qual permitiu a realização de simulações para prever o comportamento da resistência à compressão das pelotas. Os resultados das análises embasaram as ações de mitigação dos problemas, que proporcionou um ganho de qualidade associado à resistência à compressão das pelotas de aproximadamente 20 daN/p.

Palavras-chave: Pelota de minério de ferro; Regressão linear múltipla; Resistência à compressão (CCS).

MULTIPLE LINEAR REGRESSION METHOD UTILIZATION TO THE BLAST FURNACE PELLETS COLD COMPRESSION STRENGTH ANALYSIS

Abstract

The blast furnace pellets produced with hydrated cal present a high mechanical embrittlement trend mainly connected to the cold compression strength parameter (CCS). The mechanical performance enhancement of them is associated to a distinct group of parameters interaction. During 2010's year a relevant drop was found in the high basicity blast furnace pellets physic quality, particularly in the cold compression strength parameter. The search for the main causes of this anomaly was developed using statistic tools as the analysis of variance (Anova) and the multiple linear regression method (*Best Subsets* e *Stepwise Regression*). These methodology of analysis employment bare the pellets production critical process parameters where were regarded the quite relevant contribution of the grinded iron ore size, the binary basicity and the carbon content to the final product quality improvement. The created multiple linear regression model presented an adjusted R² of 67%, that made possible the simulations to forecast the cold compression strength behavior. The analysis results provided information to the problem lessening, which achieved an average quality gain of 20 daN/p related to the cold compression strength of the pellets.

Key words: Iron ore pellet; Multiple linear regression; Cold compression strength.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Engenheiro Metalurgista, M. Sc., Vale, da Gerência de Engenharia de Processos da DIPE.

³ Engenheiro Especialista de Processo, Vale, da Gerência de Engenharia de Processos da DIPE.

⁴ Técnico Especialista de Processo, Vale, da Gerência de Engenharia de Processos da DIPE.

⁵ Gerente da Engenharia de Processos, Vale, da Gerência de Engenharia de Processos da DIPE.

1 INTRODUÇÃO

O desempenho da resistência à compressão das pelotas é influenciado, impreterivelmente, pela interação de diversos parâmetros de processo. Esses parâmetros estão associados às propriedades físicas, químicas e metalúrgicas dos minérios, dos insumos e aos ajustes de processo.⁽¹⁻⁴⁾ A interação e o impacto de cada variável no processo de produção de pelotas de minério de ferro já foram avaliados por diversos autores.⁽¹⁻⁸⁾

A tipologia e a natureza dos minérios ou concentrados, os aditivos utilizados e o tratamento térmico promovido para a produção de pelotas exercem um efeito significativo sobre a qualidade. A interação entre os constituintes do concentrado e os parâmetros adicionais citados (óxidos de ferro, ganga, fundentes e carbono) resulta na formação de várias fases mineralógicas, as quais afetam o grau e a natureza das ligações na pelota, a estrutura e distribuição dos poros, que conseqüentemente determina os padrões de qualidade física e metalúrgica das pelotas.^(3,8)

A granulometria do minério e dos aditivos também exerce um papel fundamental no processo de produção de pelotas.⁽⁵⁻⁹⁾ Entretanto, o efeito da interação de um conjunto de parâmetros torna-se preponderante para o entendimento da qualidade final do produto da pelotização. Essa interação pode ser avaliada por métodos estatísticos amplamente consolidados que garantem a estruturação de um cenário atual de comportamento e a projeção de novos com boa previsibilidade.^(7,10,11)

O modelo de regressão linear múltipla é uma aplicação simples que permite a criação de uma ferramenta matemática de previsibilidade do processo de produção de pelotas. Existem métodos mais robustos associados a esta alternativa de processo, que utiliza redes neurais para a estruturação de modelos de previsibilidade da resistência à compressão das pelotas.⁽⁷⁾ Dessa forma, o efeito das variáveis de processo sobre a qualidade do produto final pode ser mensurado com alta assertividade e o ajuste dos parâmetros de processo para a correção de rota pode ser realizado com maior eficácia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O histórico da resistência à compressão (CCS) das pelotas de alto forno de alta basicidade foi levantado para a observação do comportamento dos dados ao longo do tempo. Os dados foram coletados no período de janeiro à outubro de 2010, na base diária, para avaliar a mudança do padrão de qualidade. Para completar o banco de informações foram levantados os dados de 24 parâmetros de processo, que foram selecionados a partir do conhecimento empírico da equipe de engenharia e de referências acadêmicas. A Tabela 1 apresenta o conjunto de variáveis de processo utilizado no estudo de regressão linear múltipla.

Tabela 1. Variáveis de processo utilizadas no estudo de regressão linear múltipla

Produção de PC (t/h)	Produção de PQ (t/h)	SiO ₂ da PQ (%)	CaO PQ (%)
Basicidade binária (CaO/SiO ₂)	Consumo de bentonita (kg/t)	Consumo de cal (kg/t)	C fixo (%)
-0,045mm PR (%)	-0,045mm PP (%)	-0,045mm Carvão (%)	Área superficial específica PR (cm ² /g)
Umidade PR (%)	Velocidade da grelha (%)	Área superficial específica PP (cm ² /g)	Altura da camada de forramento (cm)
P PQ (%)	MgO PQ (%)	Al ₂ O ₃ PQ (%)	Materiais voláteis do carvão (%)
Nº de quedas PC	Resistência mecânica PC (daN/p)	Retorno do pelotamento (%)	Trincas (%)

Legenda: PC – pelotas cruas; PQ – pelotas queimadas; PR – polpa retida; PP – polpa prensada.

As informações foram analisadas via teste de normalidade para avaliar o perfil de distribuição dos dados. Posteriormente, os dados foram ponderados através das ferramentas Análise de Variância (ANOVA) e Carta de Controle, para identificar mudanças de comportamento das variáveis ao longo do tempo. Após a determinação do comportamento das variáveis de forma isolada, a construção dos modelos matemáticos foi iniciada utilizando as metodologias *Best Subsets* e *Stepwise Regression*.^(10,11)

Os modelos foram construídos e a aderência foi verificada aplicando o método de *back-test*. Após a validação do modelo, os cenários de otimização de qualidade foram projetados definindo quais as faixas ideais e factíveis de operação para o ajuste do processo. Os ajustes foram realizados conforme a simulação e o resultado das modificações foram analisados via Carta de Controle.

Para a verificação dos resultados, o banco de informações foi complementado com os dados referente ao período de novembro/2010 à janeiro/2011. O período de análise foi subdividido por: estágio 0, estágio 1 e estágio 2. O estágio 0 apresentou o período referência que foi adotado como base comparativa. O período representado pelo estágio 1 retratou a mudança de comportamento da resistência à compressão, que deu origem à necessidade de estudo. O estágio 2 explicitou os ganhos de qualidade alcançados após a análise e o ajuste do processo. Foi aplicado um filtro de produção para tratamento de todo banco de dados, considerando os valores dos parâmetros em estudo válidos quando a produção de pelotas queimadas estava acima de 480 t/h. Todas as avaliações foram realizadas no software *Minitab*.

3 RESULTADOS

Os testes de normalidade evidenciaram o comportamento normal dos dados referentes aos 24 parâmetros de processo e à variável adotada como resposta, denominada resistência à compressão.

O histórico de queda da resistência à compressão das pelotas foi representado pela Figura 1. O período considerado para esse levantamento foi compreendido entre os meses de janeiro e outubro de 2010. Os modelos de regressão linear múltipla criados à partir dessa base de dados apresentaram um R² ajustado de 50% e 67%. A variação dos parâmetros de processo de maior relevância inseridos no modelo de ajuste de 67%, construído pelo método *Stepwise Regression*, foram representados nas Figuras 2 e 3, por Cartas de Controle e gráficos *boxplot*. Dentre os 24

parâmetros analisados, apenas sete foram selecionados para o modelo final sendo eles: basicidade binária, altura da camada de forramento, carbono fixo, umidade da polpa retida, consumo de bentonita, -0,045 mm da polpa prensada e materiais voláteis do carvão.

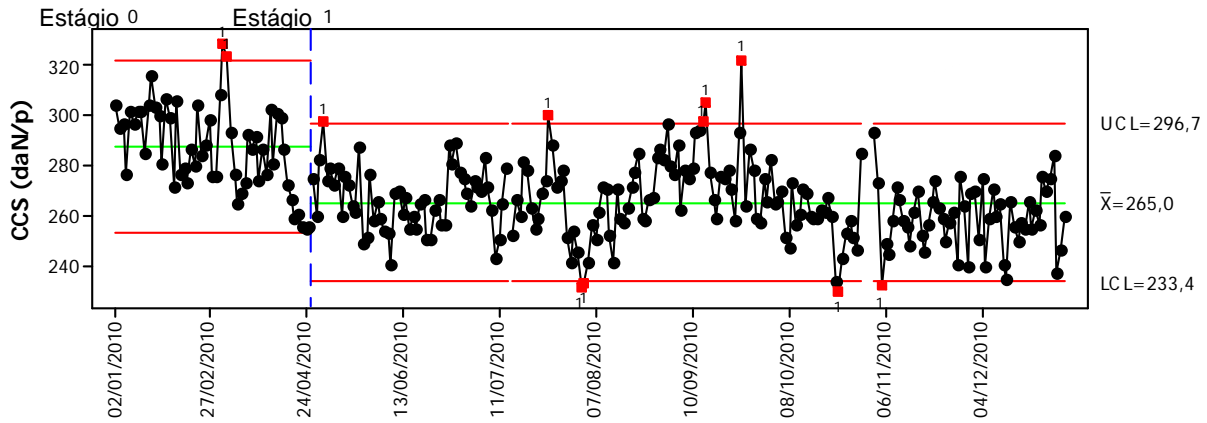


Figura 1. Carta de controle da resistência à compressão das pelotas queimadas.

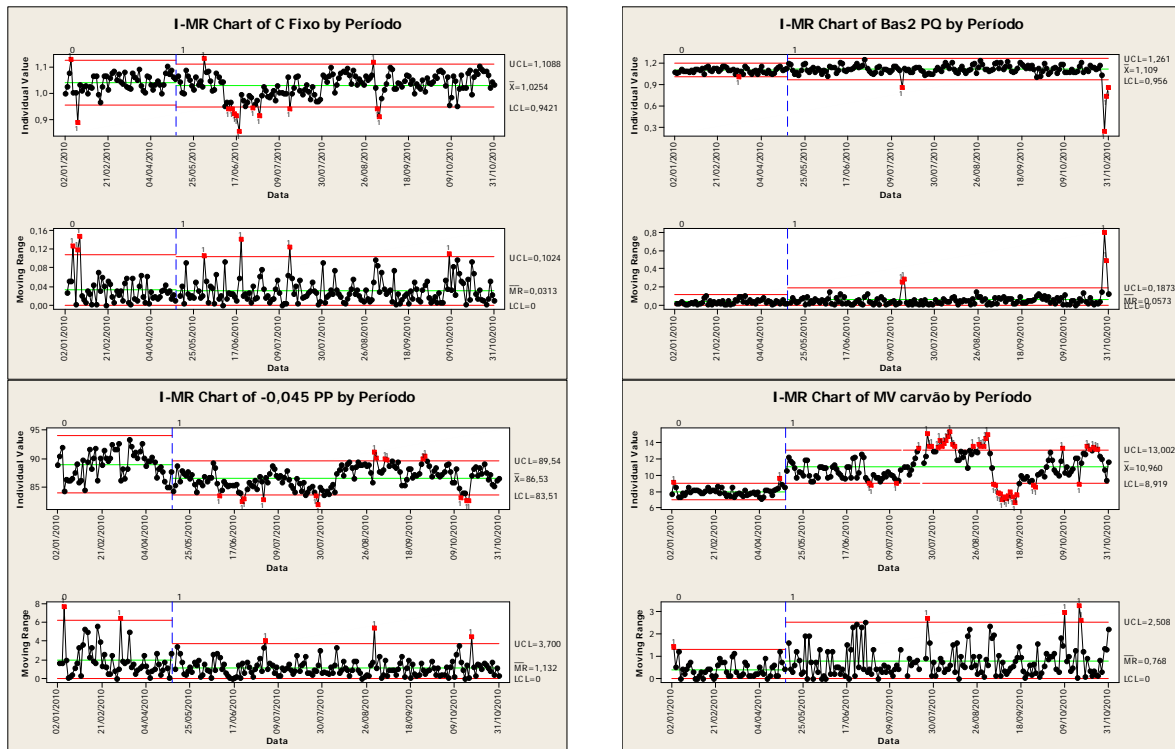


Figura 2. Carta de controle dos parâmetros de processo inseridos no modelo matemático.

As análises de variância mostraram diferenças estatísticas entre os períodos analisados para determinados parâmetros. Entretanto, foi possível notar que a presença de parâmetros no modelo de regressão não foi condicionada pelas diferenças de comportamento nos períodos avaliados. Foram identificados parâmetros no modelo que possuíam ou não igualdade estatística (p-valor maior que 0,05) entre os períodos de análise e igualmente foram rejeitados pelo modelo variáveis que mudaram de patamar de processo. A Figura 4 apresenta alguns exemplos identificados durante o estudo.

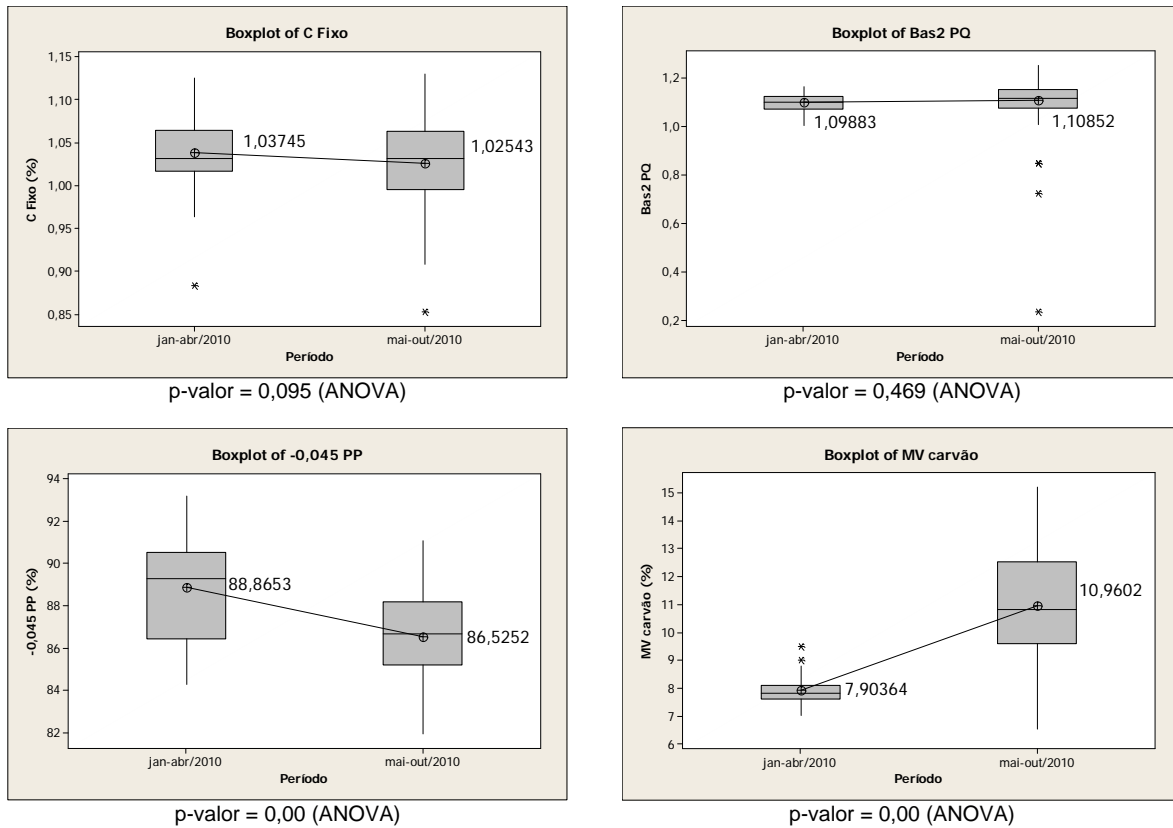


Figura 3. Boxplot dos parâmetros de processo inseridos no modelo matemático.

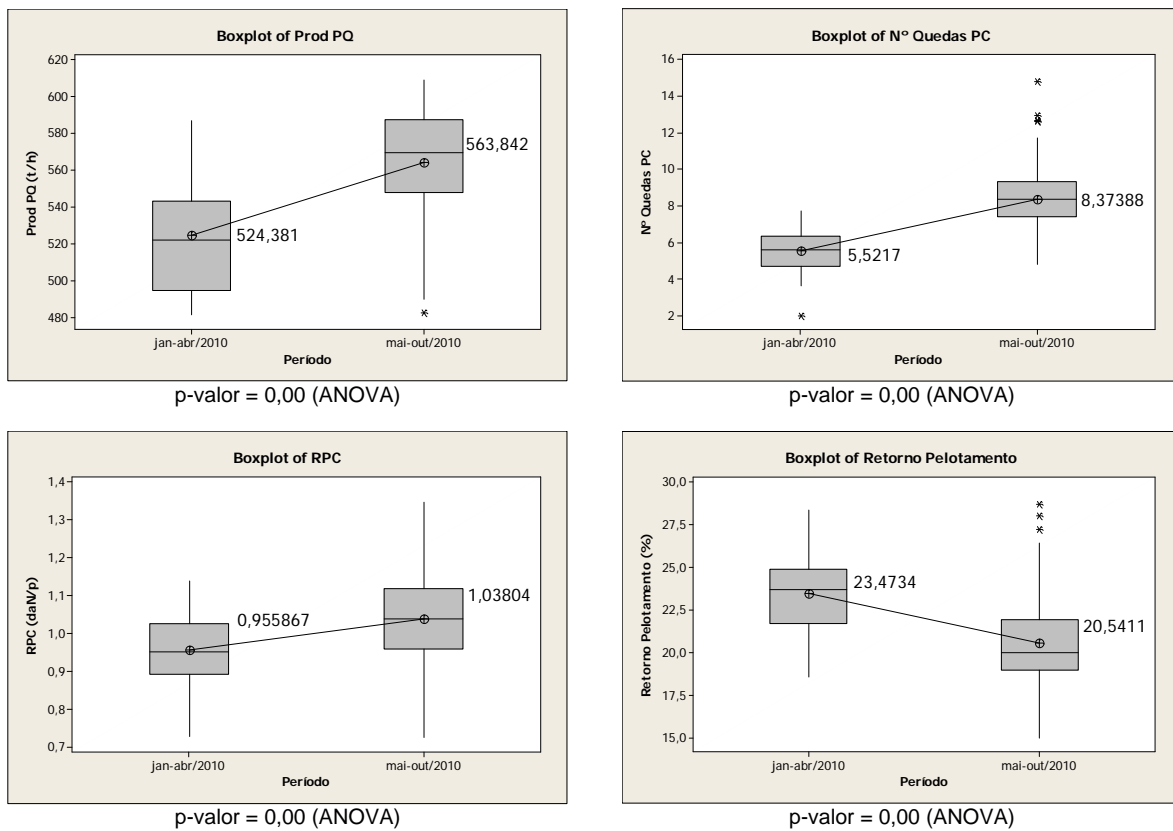


Figura 4. Boxplot dos parâmetros rejeitados pelo modelo.

O *back-test* realizado para a validação do modelo foi resumido na Tabela 2. Foi possível identificar a diferença de 2% entre os dados calculados pelo modelo e os experimentais. A Figura 5 mostra o perfil das curvas construídas à partir dos dados experimentais e calculados pelo modelo. Os dados utilizados para a representação refere-se ao período de janeiro de 2010 à janeiro de 2011. A validação do modelo foi realizada no mês de outubro de 2011, onde os ajustes de processo foram realizados para recuperar os padrões de qualidade da resistência à compressão das pelotas. As principais ações implementadas foram associadas aos ajustes nos parâmetros de operação da moagem, ao controle da basicidade binária e à dosagem de carvão. Complementarmente, antes da validação do modelo fora identificado um aumento abrupto do teor de materiais voláteis do carvão. Dessa forma, esse parâmetro foi corrigido antecipadamente contribuindo significativamente para a recuperação da qualidade do produto final. A Figura 6 representa os três estágios de qualidade das pelotas de alto-forno, ressaltando a o ganho de qualidade obtido no segundo estágio.

Tabela 2. Comparativo dos resultados de resistência à compressão – calculado e experimental

Período de análise	Média 2010	Média 2011
CCS (daN/p) - Cálculo do modelo	280	287
CCS (daN/p) - Dados experimentais	276	292
Diferença (daN/p)	4	5
Diferença (%)	2%	2%

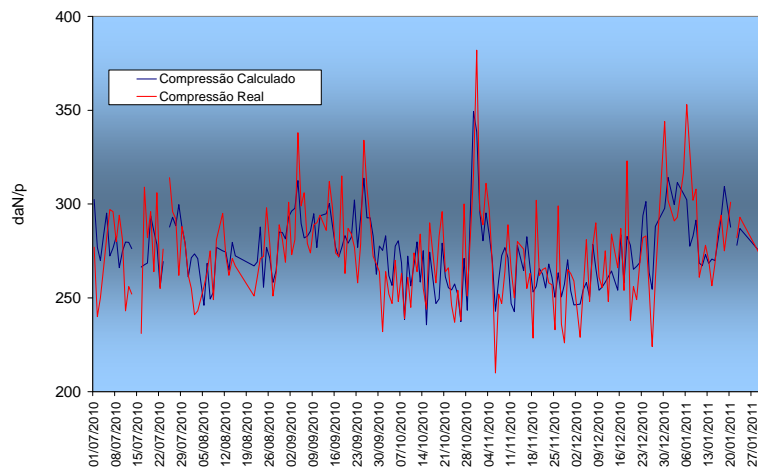


Figura 5. Verificação gráfica do ajuste do modelo de previsibilidade.

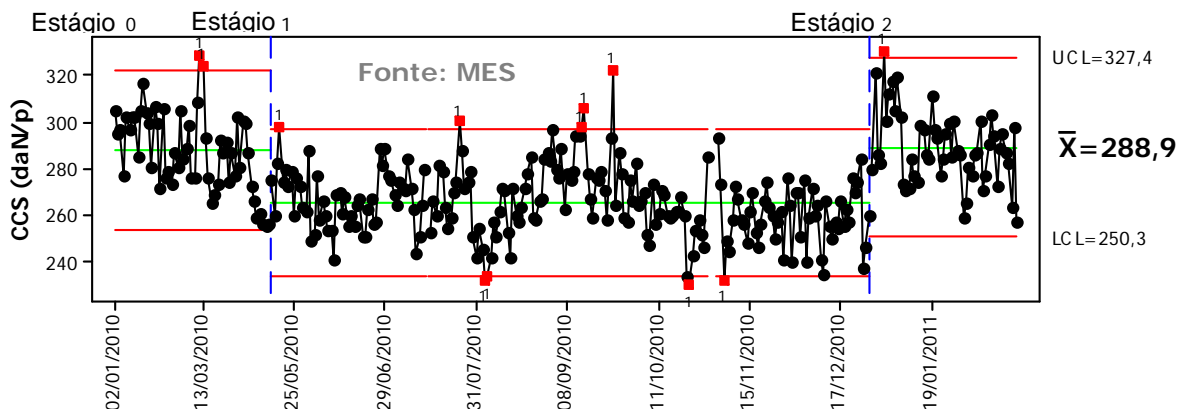


Figura 6. Carta de controle da resistência à compressão das pelotas pós-implantação de melhorias.

A Figura 7 revela os ganhos de qualidade alcançados após as modificações, realçando o ganho de aproximadamente 20 daN/p.

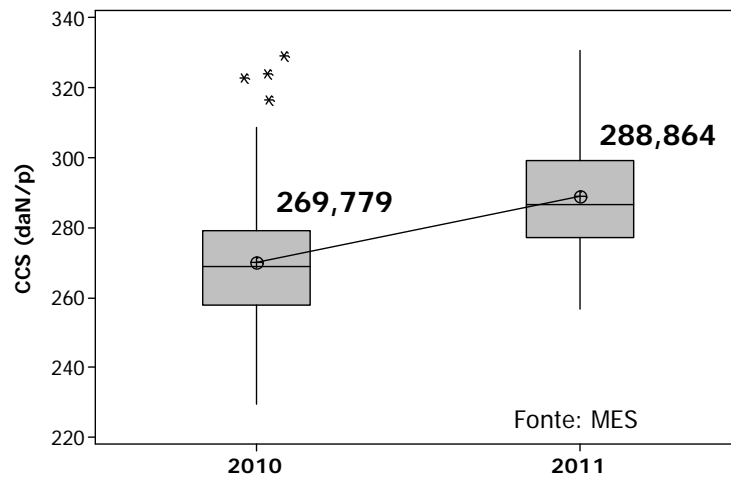


Figura 7. Comparativo da resistência à compressão das pelotas.

4 DISCUSSÃO

A normalidade dos dados foi confirmada. Os dados se referiam a uma média diária dos parâmetros de processo, o que minimiza o efeito dos ruídos e da dispersão de informação.⁽¹⁰⁾

No estágio 0, ilustrado na Figura 1, foi possível perceber o padrão de qualidade da propriedade física da pelota, relacionada à resistência à compressão, da ordem de 280 daN/p. À partir de maio foi identificado um desempenho de qualidade abaixo do padrão, margeando valores na faixa de 265 daN/p. Este comportamento do processo foi acompanhado *in loco* para identificar as possíveis causas do distúrbio em questão. Até o mês de agosto foram analisados parâmetros isolados que contribuíam diretamente para a geração dos problemas. Dentre eles destacaram-se o aumento do teor de materiais voláteis do carvão e a redução do % passante de minério de ferro (*pellet feed*) na malha de abertura de 0,045 mm (325 mesh). De agosto até o mês de outubro foram promovidas ações de mitigação dos pontos fora de controle ressaltados acima, mas o padrão de qualidade não foi recuperado, como foi possível verificar na Figura 1, durante o estágio 1. Assim foi proposto o trabalho de interação de parâmetros para a interpretação conjunta dos dados de processo.

Na Figura 2 foi possível observar o padrão de comportamento das variáveis de processo que possuem influência sobre a resistência à compressão das pelotas, verificadas após a definição do modelo. As Cartas de Controle referem-se aos parâmetros: dosagem de carbono fixo, granulometria do *pellet feed*, basicidade binária e materiais voláteis do carvão. Foram observadas mudanças do comportamento associadas tanto à modificação de valores médios quanto a desvios-padrão dos resultados.

A expectativa inicial concebia a mudança dos padrões de comportamento dos parâmetros como principal fonte de queda da qualidade da resistência à compressão das pelotas. Entretanto essa hipótese foi desmistificada após a realização dos testes de análise de variância dos parâmetros, retratada parcialmente pelas Figuras 3 e 4. Foram identificados parâmetros significativos para o modelo que não tiveram o seu comportamento estatístico diferenciado entre os períodos de análise, como pode ser

notado na Figura 3. O grupo de quatro variáveis mostra o perfil de comportamento dos parâmetros de processo descrito por: granulometria da polpa retida, basicidade binária, carbono fixo e materiais voláteis do carvão. A análise do p-valor dos dados mostrou que os resultados de granulometria e materiais voláteis do carvão foram estatisticamente diferentes entre os períodos, o que poderia sugerir, imediatamente, um padrão de influência sobre a qualidade associado à mudança de comportamento das variáveis. Todavia, os resultados referentes à basicidade binária e ao carbono fixo das pelotas retrataram um efeito diferenciado dos parâmetros, uma vez que tiveram resultados estatisticamente iguais no período e mesmo assim foram significativos para o modelo. A Figura 4 reforçou esse argumento mostrando um exemplo de quatro parâmetros de processo avaliados no estudo que apresentaram diferença estatística entre os períodos e não foram selecionados pelo modelo de regressão linear múltipla. Esses resultados confirmaram a importância da interação das variáveis para a interpretação do comportamento da qualidade das pelotas queimadas, já evidenciado por outros autores, e a falta de eficácia do estudo de parâmetros de forma isolada, que pode levar à conclusões extremamente inadequadas.^(1,4,7,9,10)

4.1 Validação do modelo

O modelo foi validado após a realização do *back-test* utilizando os dados de 2010, inicialmente, e 2011 após a verificação do ganho de qualidade promovido pelas modificações do processo. A Tabela 2 mostrou o resumo da verificação dos resultados, também ilustrados graficamente pela Figura 5. O modelo foi calibrado com os dados de processo referente aos parâmetros incluídos no mesmo pela regressão. A diferença dos dados calculados para os experimentais apresentou um valor médio de 2%, em ambos os períodos de análise, com um valor médio absoluto de variação da resistência à compressão de 5 daN/p (média da diferença encontrada entre os dados experimentais e calculados). A eficácia do uso desse tipo de metodologia para avaliação do comportamento do processo foi demonstrada por Dwarapudi, Gupta e Rao⁽⁷⁾ e Costa.⁽⁹⁾

4.2 Interpretação dos parâmetros selecionados

O modelo validado tornou-se uma ferramenta poderosa de interpretação de resultados e de previsibilidade de comportamento. Desta forma, alguns cenários foram analisados para explorar e identificar o padrão ideal de ajuste dos sete parâmetros selecionados para o modelo. O ganho promovido pelas mudanças foi reportado nas Figuras 6 e 7.

Os ajustes mais significativos foram realizados nos parâmetros: granulometria da polpa retida, carbono fixo, basicidade binária e materiais voláteis do carvão. O último fora modificado antes da validação do modelo, visto que o seu aumento foi relevante no período de análise e o efeito desse comportamento já fora demonstrado deletério durante o processo de queima da pelota.⁽¹⁾

A redução do percentual passante de minério na malha de abertura de 0,045 mm tem uma influência significativa para o processo de pelotização.^(1,5) O ajuste na moagem de minério de ferro foi promovido para garantir o aumento da fração passante na malha de 0,045 mm de abertura e, conseqüentemente, contribuir para a elevação da resistência à compressão das pelotas.

O mesmo padrão de ajuste foi promovido para os parâmetros basicidade binária e carbono fixo. As referências adotadas para a modificação foram baseadas no conhecimento empírico da equipe e nas bibliografias consultadas.^(1,2,4,7,9)

Fonseca *et al.* mostrou o efeito do aumento da dosagem de carvão na resistência à compressão das pelotas, onde foi possível perceber a existência de um ponto ótimo do teor de carbono fixo. O aumento da dosagem de carvão favorece o crescimento dos grãos de minério, aumentando as tensões internas e promovendo a formação de trincas na estrutura da pelota queimada que, subseqüentemente, acarreta na redução da resistência mecânica da mesma.⁽²⁾ Assim buscou-se através do modelo matemático um ajuste adequado desse parâmetro considerando o efeito do mesmo associado à interação do conjunto de variáveis em estudo.

Umadevi *et al.* reportou o efeito da basicidade binária associado ao comportamento da resistência à compressão das pelotas. Foi possível observar a maturidade da escória para os diversos níveis da relação CaO/SiO_2 trabalhados nos experimentos. Os valores mais próximos de 1,0 apresentaram uma formação física estrutural mais estável que garantiu tanto a manutenção da resistência à compressão em níveis aceitáveis quanto a boa redutibilidade da pelota. Os níveis acima de 1,0 garantem um ótimo desempenho na redução, devido a presença predominante de uma escória vítrea calcítica, que se transforma facilmente na fase wollastonita (CaSiO_3), à temperaturas de 800°C à 900°C, que viabiliza o fluxo de gases pela formação de pequenas trincas e, conseqüentemente, reduz a resistência mecânica da pelota. Esse comportamento ocorre de forma contrária nos níveis abaixo de 1,0. A escória formada nesse patamar apresenta uma estrutura vítrea de silicatos, mais resistente, entretanto de menor capacidade de redução.⁽⁴⁾

Assim como a dosagem de carbono fixo o equilíbrio dos efeitos benéficos e deletérios da basicidade binária foi analisado para identificar o ponto ótimo de trabalho do parâmetro.

5 CONCLUSÃO

O modelo de regressão linear múltipla criado apresentou um R^2 ajustado de 67% e mostrou um bom desempenho como ferramenta de análise e previsão do comportamento do processo.

A interpretação de parâmetros de forma isolada pode promover a identificação de causas fundamentais que não representam consistentemente o problema.

A compreensão da interação de parâmetros de processo foi fundamental para a identificação das causas da queda da qualidade da resistência à compressão das pelotas queimadas.

Os parâmetros selecionados pelo modelo mostraram uma representatividade técnica visto que os mesmos foram evidenciados como relevantes para o processo, por outros métodos e estudos.

O uso do modelo para o ajuste do processo proporcionou um ganho de qualidade associado à resistência à compressão das pelotas de aproximadamente 20 daN/p.

Agradecimentos

Agradecemos a Vale S/A pela oportunidade de desenvolvimento técnico do processo industrial de pelotização.

REFERÊNCIAS

- 1 MEYER, K., “Pelletizing of Iron Ores”, Germany: Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York, 1980 – 302 p.
- 2 FONSECA, M. C.; FERREIRA, H. O.; OTAVIANO, M. M.; PERIN, V.; “Influência da dosagem de carvão na qualidade das pelotas queimadas”. 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas /10º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro –ABM, Ouro Preto – MG, novembro/2009.
- 3 SÁ, G. K.; COSTA, G. M.; VIEIRA, C. B.; “Efeito da composição mineralógica na resistência à compressão de pelotas de minério de ferro”. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo – SP, v.1, n.2, p. 18-22, out.-dez./2004.
- 4 UMADEVI, T.; KUMAR, P.; LOBO, N. F.; PRABHU, M.; MAHAPATRA, P. C.; RANJAN, M.; “Influence of pellet basicity (CaO/SiO₂) on Iron Ore Pellet Properties and Microstructure”. ISIJ International, Vol. 51, No. 1, pp. 14–20, 2011.
- 5 UMADEVI, T.; SAMPATH KUMAR, M. G.; SURESH KUMAR; PRASAD, C. S. G.; RANJAN, M.; “Influence of raw material particle size on quality of pellets”. Ironmaking and Steelmaking, Vol. 35, No. 5, pp. 327-337, 2008.
- 6 GUDENAU, H. W.; WALDEN, H.; KORTMANN, H.; PAPACEK, H. G.; “Influence of the diameter of iron ore pellets on their production and quality properties”. Aufbereitungs-Technik, No. 1, 1984.
- 7 DWARAPUDI, S.; GUPTA, P. K.; RAO, S. M.; “Prediction of iron ore pellet strength using artificial neural network model”. ISIJ International, Vol. 47, No. 1, pp. 67-72, 2007.
- 8 RIGAUD, M.; PANIGRAPHY, S. C.; JENA, B.; “Characterization of fluxed pellets produced from low silica specular hematite”. CIM Bulletin, Montreal, Vol. 85, No. 964, pp. 102-109, 1992.
- 9 COSTA, R. V. P.; “Otimização da resistência à compressão das pelotas de minério de ferro para redução direta pela aplicação de projeto robusto”. Dissertação de Mestrado, REDEMAT, 2008.
- 10 WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S., “Planejamento e análise de experimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo”. Volume 8 da Série Ferramentas da Qualidade. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 294 p., 1996
- 11 WHEELER, D. J., “Entendendo a Variação. A Chave para Administrar o Caos”. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2008