


Avaliação da perda por calcinação (PPC) na blendagem de minério de ferro e as implicações no modelo geometalúrgico da Samarco

Thiago Lucas da Silva ^{1,2*} Leonardo Esteves Bonfioli ² Lucas da Silva Campos ² Pedro Henrique Alves Campos ¹ Douglas Batista Mazzinghy ¹ 

Resumo

A integração da geometalurgia ao planejamento de produção tem ganhado destaque na mineração, sendo a aditividade das variáveis do modelo de blocos um aspecto relevante. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aditividade da variável Perda Por Calcinação no concentrado (PPCc) de minério de ferro, como teor de corte no modelo geometalúrgico. A metodologia considerou o modelo geológico-tipológico para selecionar as principais tipologias de itabiritos previstas no plano de lavra, com a coleta de 52 amostras, caracterizadas quimicamente e utilizadas na composição de 28 blendagens. Os teores de PPCc foram calculados e comparados com valores obtidos em testes de flotação, cujos resultados indicaram desvios de até 21,6%, reforçando a hipótese de comportamento não aditivo. As análises mostraram que esses desvios não estão significativamente relacionados às tipologias, à etapa de deslamagem ou ao enriquecimento do PPC do ROM (*Run of Mine*) após o processo de beneficiamento, mas apresentaram correlação moderada com o desempenho da etapa de flotação. Simulações indicaram que os efeitos da não aditividade no sequenciamento de mina resultaram em variações na massa de minério de até 3,2% (Grupo 1, PPCc variando $\pm 1,5\%$), 3,8% (Grupo 2, PPCc variando $\pm 2,1\%$) e 12% (Grupo 3, PPCc variando $\pm 8,0\%$).

Palavras-chave: Geometalurgia; Aditividade; Planejamento de mina; Perda por calcinação.

Evaluation of loss on ignition (LOI) in iron ore blending and its implications for Samarco's geometallurgical model

Abstract

The integration of geomettallurgy into production planning has gained prominence in mining, with the additivity of block model variables being a relevant aspect. This study aimed to evaluate the additivity of the variable Loss on Ignition in the iron ore concentrate (LOIc), used as a cutoff grade in the geomettallurgical model. The methodology considered the geological-typological model to select the main itabirite types planned to be mined, with the collection of 52 samples, chemically characterized and used to compose 28 blends. The LOIc were calculated and compared with values obtained from flotation tests, whose results indicated deviations of up to 21.6%, reinforcing the hypothesis of non-additive behavior. The analyses showed that these deviations are not significantly related to the typologies, the desliming stage, or the enrichment of Run of Mine (ROM) LOI after the beneficiation process but presented a moderate correlation with the performance of the flotation stage. Simulations indicated that the effects of non-additivity on mine sequencing led to variations in ore tonnage of up to 3.2% (Group 1, LOIc variation of $\pm 1.5\%$), 3.8% (Group 2, LOIc variation of $\pm 2.1\%$), and 12% (Group 3, LOIc variation of $\pm 8.0\%$).

Keywords: Geometallurgy; Additivity; Mine planning; Loss on ignition.

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

²Samarco Mineração S.A., Belo Horizonte, MG, Brasil.

*Autor correspondente: thiago.silva@samarco.com

E-mails: bonfioli@samarco.com; lucas.campos@samarco.com; pedrocamos@demin.ufmg.br; dmazzinghy@demin.ufmg.br



1 Introdução

O setor de mineração de minério de ferro enfrenta o desafio crescente de lidar com minérios mais pobres em ferro e com maiores teores de contaminantes, o que torna a extração e o beneficiamento mais complexos e caros [1]. Esse desafio se intensifica em depósitos com grande variabilidade mineralógica [2]. Como resposta, empresas mineradoras têm investido em soluções tecnológicas e na gestão de riscos, com destaque para o aprimoramento da blendagem de minérios [3,4]. Essa prática busca equilibrar diferentes tipos de minério, considerando teores do mineral de interesse e contaminantes [5], prolongando a vida útil da mina e viabilizando o aproveitamento de materiais com qualidade inferior [6].

A compreensão das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas dos minérios é essencial, pois impacta diretamente o desempenho dos processos e a qualidade dos produtos [7]. A análise integrada dessas propriedades, desde o planejamento da blendagem, permite otimizar as operações de forma mais precisa [8]. Um exemplo é o teor de Perda por Calcinação (PPC), definido no planejamento de mina e que influencia diretamente a etapa de pelletização, afetando a produtividade dos fornos e a qualidade das pelotas [9].

Nesse cenário, a geometalurgia se destaca como abordagem estratégica para o aproveitamento eficiente dos minérios [10]. A construção de modelos matemáticos baseados em dados geológicos e variáveis geometalúrgicas [11] permite identificar melhorias nas etapas de concentração, aglomeração ou até novas rotas de processo. Entre suas aplicações, destaca-se o suporte à estratégia de blendagem [12] e à projeção da produção ao longo do *life of mine* (LoM), contribuindo para decisões estratégicas de longo prazo [13].

Para uma previsão mais precisa do comportamento do minério, é fundamental considerar a aditividade de variáveis como a Perda Por Calcinação em concentrados (PPCc) de

minério de ferro destinados à pelletização [14]. Esse conceito permite prever comportamento de mistura de minérios com diferentes características [15], viabilizando modelos mais robustos e critérios de decisão para o planejamento de mina e processo.

As minas da Samarco apresentam itabiritos com diversas associações mineralógicas [9], sendo a goethita - FeO(OH) - o principal portador do PPC. A distribuição do PPC no modelo de blocos é estimada por krigagem ordinária com base em dados de sondagem, e o PPCc é calculado por regressões lineares simples específicas por tipologia e faixa de teor de ferro.

A avaliação de aplicação do PPCc como teor de corte deve considerar sua aditividade, sendo essencial para o controle da blendagem visando atender aos limites de processo. No entanto, testes realizados em 2020 com diferentes tipos de itabiritos e teores variados de PPC indicaram diferenças relevantes entre os valores calculados e medidos, sugerindo comportamento não aditivo [16]. As amostras coletadas foram usadas em blendagens com diferentes proporções, e os resultados reforçam a necessidade de investigação mais aprofundada sobre a aditividade do PPCc, objetivo central deste trabalho.

2 Materiais e métodos

2.1 Seleção dos locais de amostragem

Para a seleção das amostras deste estudo, adotou-se o modelo geológico-tipológico da Samarco, com o objetivo de identificar as tipologias de itabiritos predominantes nos planos de lavra de 2024 e 2025. Cada tipologia apresenta variações específicas quanto aos teores, granulometria, mineralogia e, conseqüentemente, desempenho no processo. A Figura 1 descreve os principais tipos de itabiritos previstos para os planos de lavra desses dois anos.

Legenda	Descrição das Tipologias
IAG	Itabirito Anfibolítico-Goethítico
IAM	Itabirito Anfibolítico-Martítico
IE	Itabirito Especularítico
IEM	Itabirito Especularítico-Martítico
IMEG	Itabirito Martítico-Especularítico-Goethítico
IMG	Itabirito Martítico-Goethítico
IMGE	Itabirito Martítico-Goethítico-Especularítico
IEG	Itabirito Especularítico-Goethítico
IEMG	Itabirito Especularítico-Martítico-Goethítico
IG	Itabirito Goethítico
IM	Itabirito Martítico
IME	Itabirito Martítico-Especularítico
Estoque	Estoque

Figura 1. Descrição dos tipos de itabiritos com base nas mineralogias predominantes no plano de lavra de 2024 e 2025.

A Figura 2 ilustra as áreas da mina programadas para lavra ao longo do ano de 2024 e 2025. Os pontos de amostragem foram escolhidos com base nessas tipologias.

A Figura 3 apresenta alguns registros fotográficos de algumas das frentes de lavra onde as amostras foram coletadas com as respectivas classificações tipológicas.

2.2 Determinação do número de amostras

O número de amostras foi definido com base nas proporções das tipologias previstas nos planos de lavra de 2024 e 2025, de forma a contemplar as principais ocorrências ao longo do período. Figura 4 apresenta os pontos de coleta

identificados na mina, conforme a ocorrência superficial das diferentes tipologias em relação ao modelo geológico.

Cada ponto de amostragem forneceu, em média, 150 kg de uma tipologia específica, posteriormente enviada a um laboratório externo para caracterização química. As amostras individuais caracterizadas foram utilizadas na formulação de diferentes proporções de blendagens, que também passaram por caracterização química. Essa abordagem permitiu comparar os resultados calculados das misturas com os valores obtidos em laboratório. A Figura 5 apresenta a proporção em massa das principais tipologias de itabiritos previstas para lavra nas minas de Alegria Norte

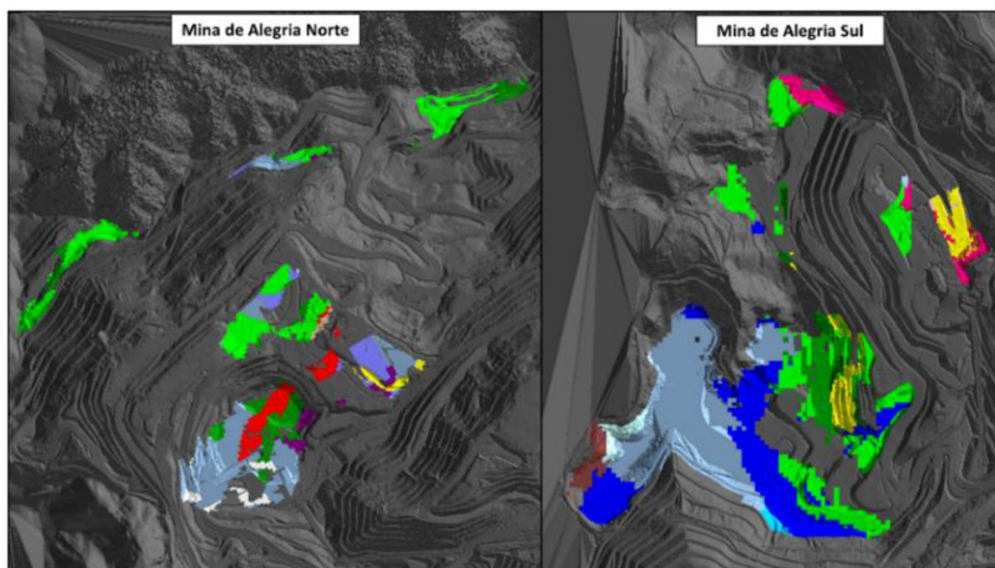


Figura 2. Definição dos locais de amostragem das tipologias.

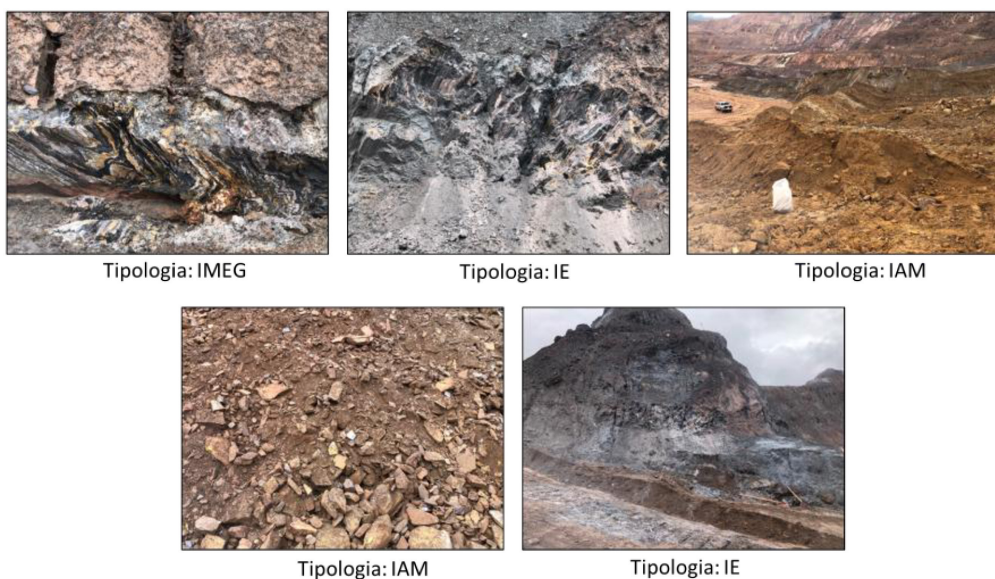


Figura 3. Registros fotográficos de algumas das frentes de lavra e as suas respectivas tipologias.

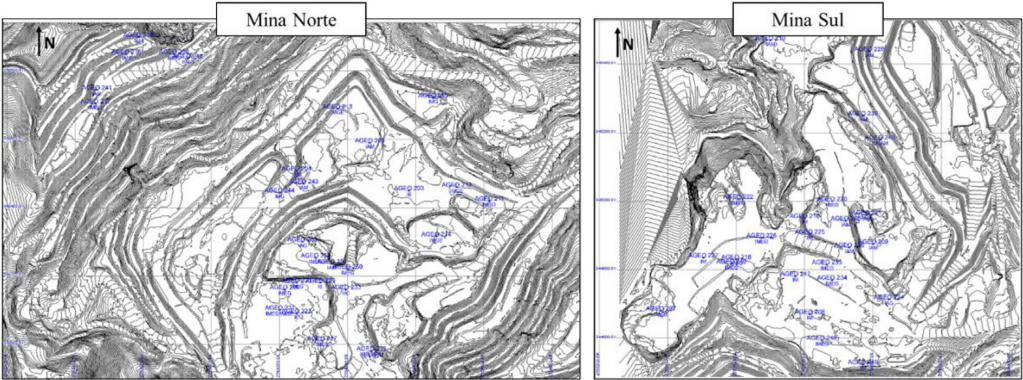


Figura 4. Localização dos pontos de coleta das amostras nas minas de Alegria Norte e Sul.

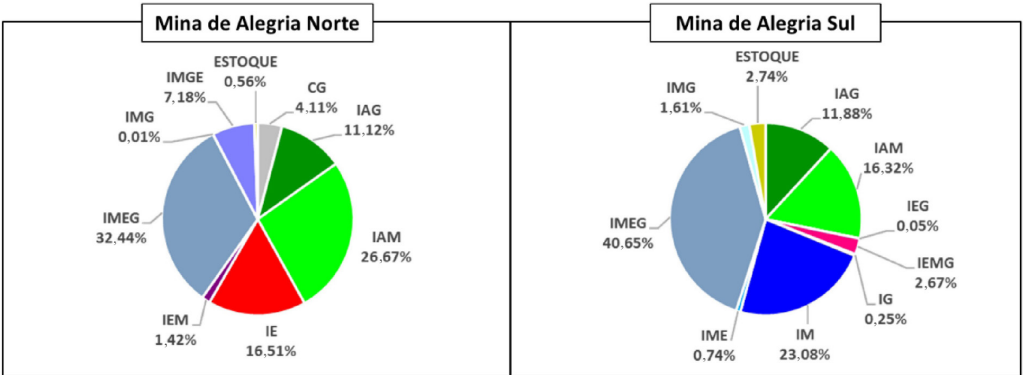


Figura 5. Proporção das principais tipologias por mina.

e Sul em 2024 e 2025. Observa-se que algumas tipologias ocorrem com maior frequência, como os itabiritos IMEG e IAM, que juntos representam mais de 50% da massa total planejada. Em contrapartida, as tipologias IG, IEG e IMG somadas correspondem a menos de 1%.

A quantidade de amostras coletadas, conforme apresentada na Tabela 1, foi determinada com base na proporção em massa prevista nos planos de lavra de 2024 e 2025, bem como na distribuição espacial das tipologias na mina.

2.3 Fluxograma de testes e determinação do PPCc

A determinação do PPCc das amostras individuais e das blendagens segue as etapas descritas no fluxograma da Figura 6, que representa as principais fases do processo de beneficiamento da Samarco: moagem, deslamagem e flotação. A linha vermelha tracejada indica o ponto de realização da análise química do concentrado, responsável pela obtenção do valor de PPCc.

2.4 Composição das blendagens

No planejamento de mina, a média desejada para o PPCc pode ser atingida por diferentes combinações de tipologias durante a blendagem, envolvendo materiais com teores elevados, baixos ou próximos do alvo estabelecido.

Tabela 1. Determinação do número de amostras das tipologias previstas nos planos de lavra de 2024 e 2025

Principais tipologias a serem amostradas	Número de amostras por mina	
	Alegria Norte	Alegria Sul
Itabirito	4	-
Especularítico (IE)		
Itabirito Martítico	15	9
Especularítico		
Goetítico (IMEG)		
Itabirito Martítico	5	6
Anfibolítico (IAM)		
Itabirito Anfibolítico	2	3
Goetítico (IAG)		
Itabirito Martítico	2	-
Goetítico		
Especularítico (IMGE)		
Itabirito Martítico (IM)	-	5
Itabirito Martítico	-	1
Goetítico (IMG)		
Total	28	24

Neste contexto, este trabalho ampliou a investigação da aditividade por meio da composição de blendagens com três grupos de amostras: o primeiro, com previsão de teores de PPCc próximos à média do processo; o segundo, com teores

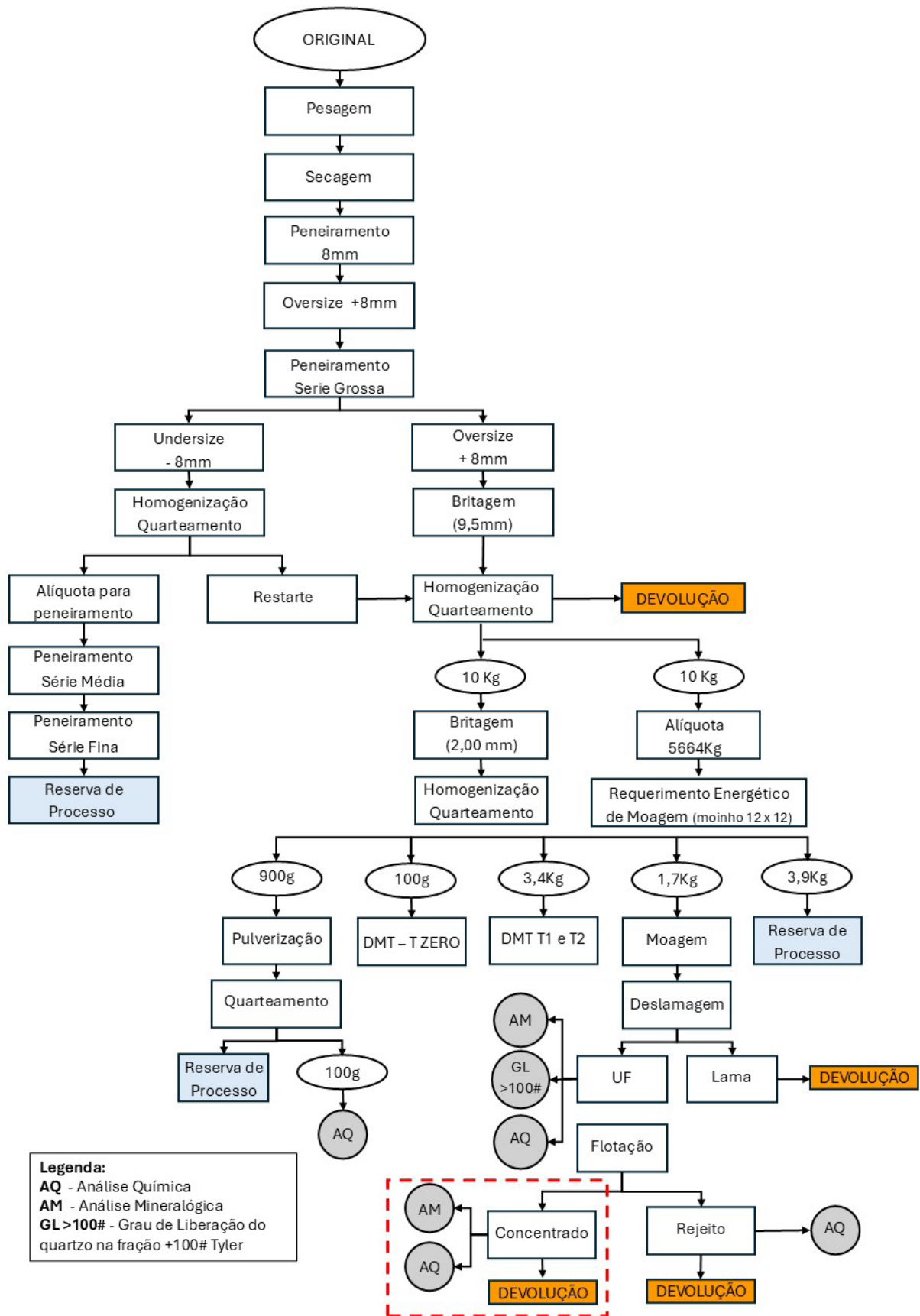


Figura 6. Fluxograma de testes das amostras no laboratório.

acima da média; e o terceiro, com tipologias abaixo da média da blendagem. A estruturação dessas composições, com base nas amostras coletadas, seguiu o esquema apresentado na Figura 7.

A partir da caracterização das amostras coletadas, foi determinado o teor de PPCc de cada uma. Com base nesses resultados, foram definidas as composições de 28 blendagens, cujos teores de PPCc foram calculados por média ponderada, considerando os pesos atribuídos às amostras. Os valores calculados foram utilizados como referência para comparação com os resultados dos testes de flotação, nos quais as blendagens foram submetidas a ensaios para determinação do PPCc.

3 Resultados e discussão

3.1 Repetibilidade dos testes de flotação

A repetibilidade dos testes de flotação foi avaliada por meio da análise de duplicatas dos teores de PPCc. Conforme ilustrado na Figura 8, o desvio relativo médio entre os valores medidos e suas respectivas duplicatas foi de 2,3%, com variações entre 0,3% e 4,5% — todas abaixo do limite prático de 5% estabelecido para esse tipo de análise.

A única exceção foi a blendagem 12, que apresentou um desvio de 6,7%, sendo considerada um caso isolado.

3.2 Diferenças entre resultados calculados e medidos

As diferenças entre os valores calculados (média ponderada) e os medidos em laboratório foram significativas [14,16]. Conforme ilustrado na Figura 9, que apresenta os resultados do PPC do ROM, o grupo 1 de blendagens apresentou variações positivas e negativas, com oscilações entre -17,3% (blendagem 21) e 17,6% (blendagem 7). Nos grupos 2 e 3, todas as variações foram negativas, indicando que os teores medidos ficaram abaixo dos estimados. As diferenças variaram de -3,5% (blendagem 19) a -20,8% (blendagem 12).

No caso do PPCc, foram observadas variações significativas em todos os grupos de blendagem, com oscilações positivas e negativas entre -16,9% (blendagem 20) e 21,6% (blendagem 3), conforme ilustrado na Figura 10. Esses resultados reforçam a hipótese de não aditividade [14,16].

Adicionalmente, foi realizada uma análise de dispersão das variações entre os valores calculados e medidos do PPC do ROM e do PPCc, com o objetivo de avaliar a existência de correlação entre esses dados. Conforme ilustrado na Figura 11, o coeficiente de determinação obtido ($R^2 = 7,8\%$)

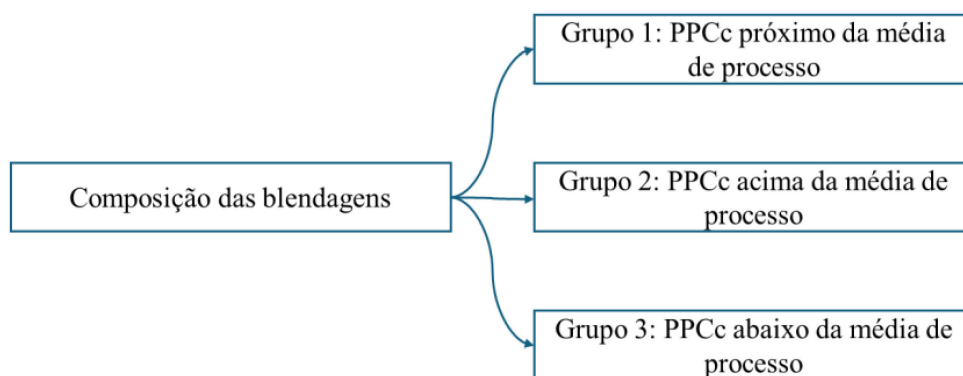


Figura 7. Esquema delineado para compor as blendagens.

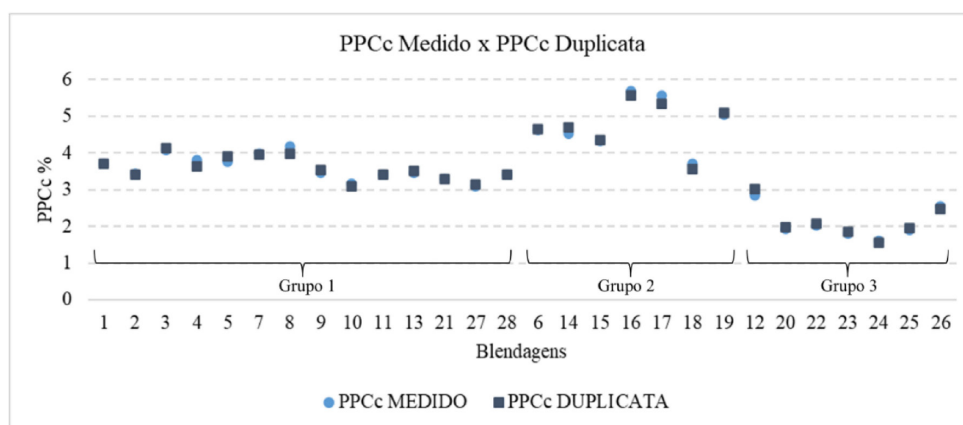


Figura 8. Avaliação da repetibilidade do teste flotação através da análise dos desvios entre PPCc Medido e PPCc Duplicata.

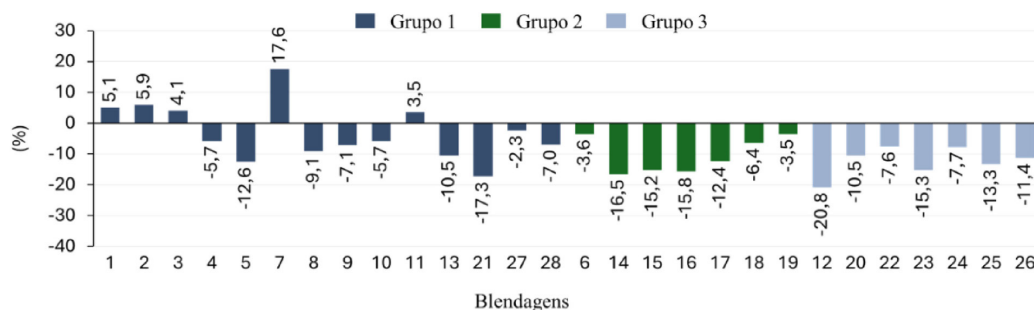


Figura 9. Variação dos resultados calculados e medidos do PPC do ROM por grupos de blendagem.

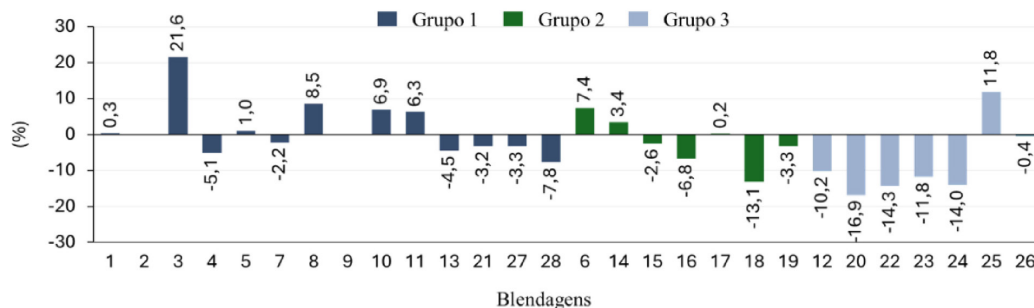


Figura 10. Variação dos resultados calculados e medidos do concentrado por grupos de blendagens.

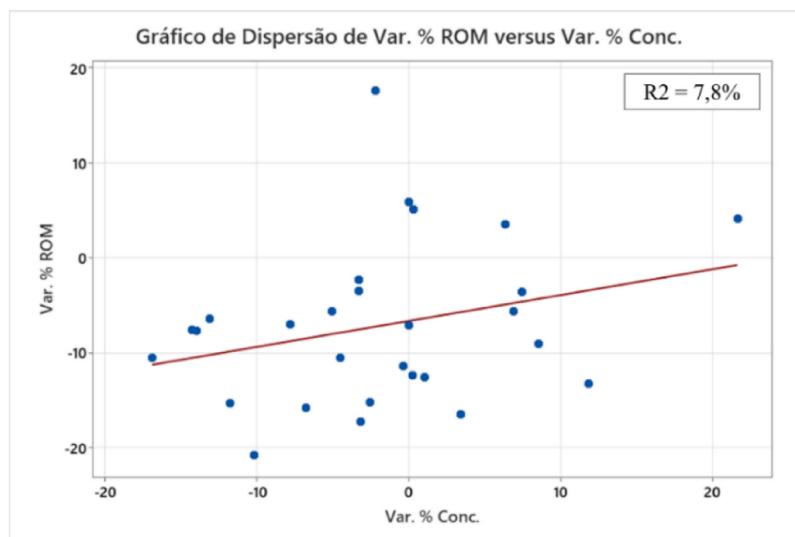


Figura 11. Gráfico de dispersão das variações entre os valores calculados e medidos de PPC para o ROM e o PPCc.

indica que as variações observadas no PPCc não são explicadas pelas variações do PPC do ROM.

3.3 Heterogeneidade dos teores de PPCc

Conforme apresentado na Tabela 2, a análise da dispersão dos teores de PPCc nas blendagens indicou que o grupo 3 apresentou a maior variabilidade (desvio padrão de 10,2), seguido pelos grupos 1 (8,2) e 2 (6,7).

Partindo da hipótese de que blendagens com teores de PPC muito distintos poderiam evidenciar o comportamento não aditivo, foi analisada a correlação entre o desvio padrão

do PPC em cada blendagem e as diferenças entre os valores calculados e medidos. Como ilustrado na Figura 12, a correlação foi fraca ($r = 0,345$), indicando que, embora a heterogeneidade do PPCc possa influenciar pontualmente os desvios, não há relação estatisticamente significativa com a precisão do modelo. Assim, a variabilidade interna das blendagens não explica, por si só, as diferenças observadas.

3.4 Enriquecimento do PPC

Assim como o teor de ferro, o PPC também é enriquecido ao longo do processo de beneficiamento, devido

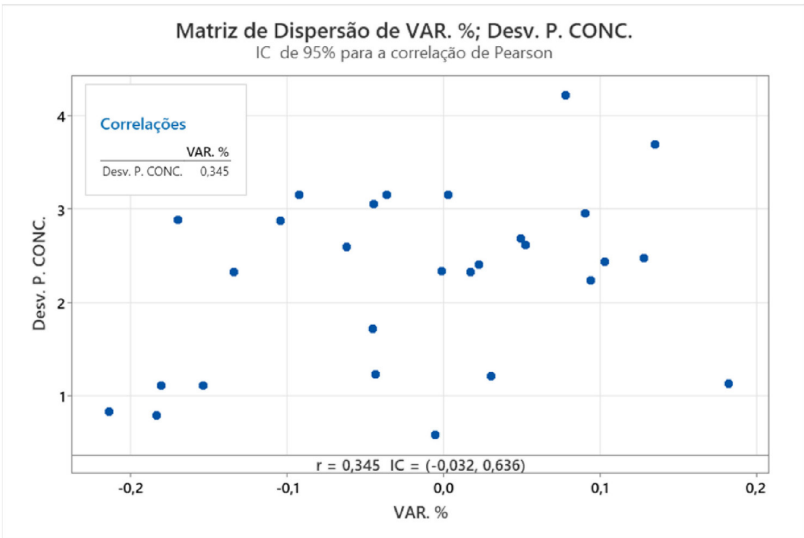


Figura 12. Correlação entre os desvios dos resultados calculados e medidos e o desvio padrão do PPCc das blendagens.

Tabela 2. Análise da média e do desvio padrão dos desvios entre os resultados calculados e medidos

Grupos de Blendagens	Média	Desvio Padrão
Grupo 1	1,5%	8,2
Grupo 2	-2,1%	6,7
Grupo 3	-8,0	10,2
Geral	-2,0%	8,8

à presença significativa de goethita (óxido-hidróxido de ferro) no minério da Samarco. A Figura 13 apresenta os valores de enriquecimento observados nas 28 blendagens, que variaram de 13,5% (blendagem 20) a 61,8% (blendagem 7), evidenciando diferenças expressivas entre as composições.

A diferença entre os enriquecimentos calculados e medidos também apresentou variações significativas, conforme ilustrado na Figura 14. Os desvios oscilaram entre 0,5% (blendagem 19) e 42,4% (blendagem 25).

Com o objetivo de compreender como o comportamento de cada blendagem durante o beneficiamento — refletido na variação do enriquecimento — influencia as diferenças entre os valores calculados e medidos do PPCc, foi realizada uma análise de correlação entre essas variáveis. Conforme apresentado na Figura 15, os resultados indicaram uma correlação moderada ($r = 0,504$) entre os desvios de PPCc e as diferenças observadas, sugerindo que o comportamento do PPC ao longo do beneficiamento contribui parcialmente para os desvios, mas não os explica de forma integral.

3.5 Influência das tipologias

A análise anterior demonstrou que as variações no comportamento das blendagens durante o processo de flotação — representadas pelos respectivos enriquecimentos — apresentam correlação moderada com as diferenças

observadas entre os valores calculados e medidos de PPCc. Para aprofundar essa investigação, foram realizadas análises específicas visando avaliar a influência das principais tipologias nas discrepâncias observadas, conforme ilustrado na Figura 16.

As tipologias IMEG e IAM apresentaram correlações de moderadas a fracas com os desvios de PPCc, com coeficientes de $r = -0,429$ e $r = -0,425$, respectivamente. As demais tipologias (IAG, IM e IE) não mostraram correlação estatisticamente significativa.

3.6 Influência da etapa de deslamagem

Também foi avaliado se a performance da etapa de deslamagem exerce influência nas variações observadas entre os valores calculados e medidos de PPCc. Conforme ilustrado na Figura 17, os grupos 1 e 3 apresentaram recuperações médias semelhantes (89%), enquanto o grupo 2 apresentou recuperação inferior (84,5%).

A correlação entre a recuperação na etapa de deslamagem e os desvios de PPCc foi praticamente nula ($r = 0,021$), conforme ilustrado na Figura 18.

3.7 Influência da etapa de flotação

Assim como na etapa de deslamagem, a influência da flotação também foi analisada. Conforme apresentado na Figura 19, o grupo 3 obteve a maior recuperação média em massa (51,9%), enquanto o grupo 2 apresentou a menor (44,4%).

Observou-se uma correlação negativa e moderada entre a recuperação em massa e os desvios de PPCc ($r = -0,445$), conforme ilustrado na Figura 20. Esse resultado indica que a não aditividade tende a se intensificar após a etapa de flotação [7], sugerindo que a eficiência do processo pode influenciar diretamente os desvios observados.

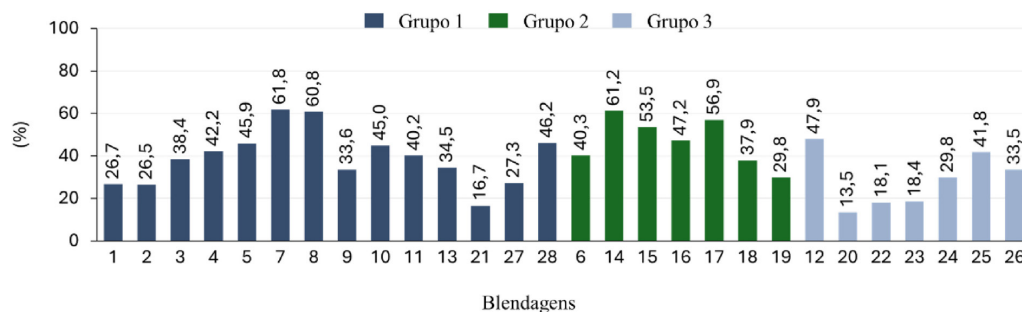


Figura 13. Enriquecimento medido do teor de PPCc para as blendagens.

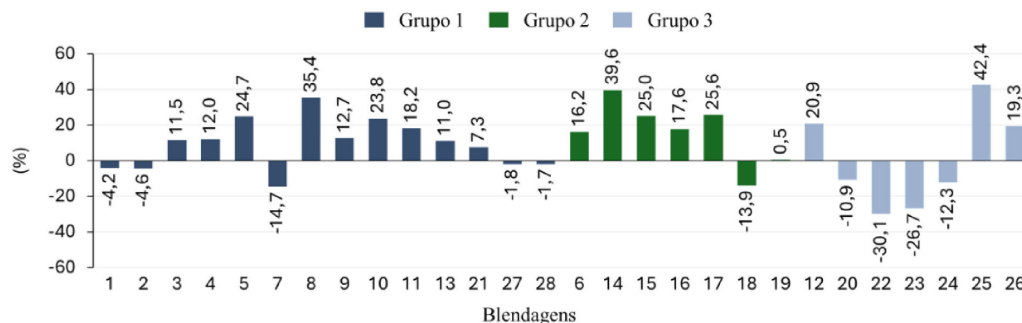


Figura 14. Diferença de enriquecimento entre os resultados calculados e medidos.

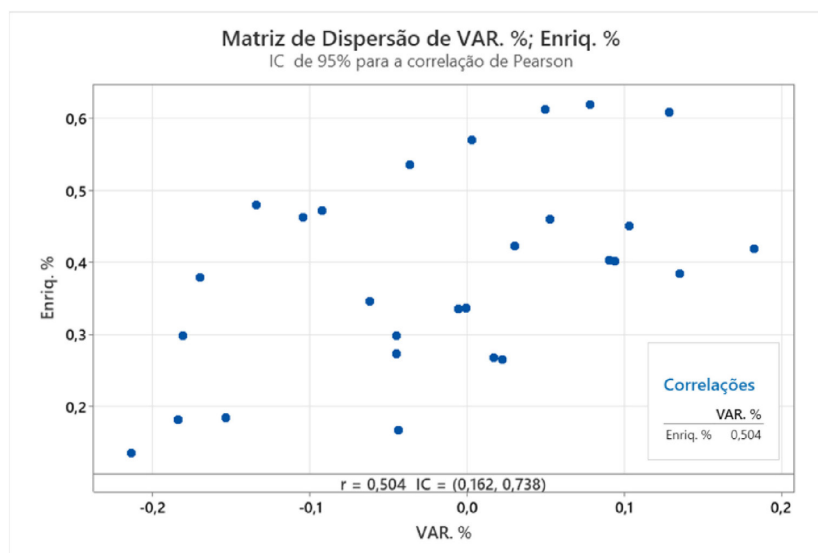


Figura 15. Correlação entre as diferenças de enriquecimento e as diferenças entre os resultados calculados e medidos para o teor de PPC.

3.8 Implicações no sequenciamento de mina

Foram realizadas simulações para avaliar os impactos potenciais da não aditividade no sequenciamento de lavra [15], utilizando como referência a cava de Alegria Sul no período de 2025 a 2030, cuja massa total prevista para lavra é de 103 Mt. Considerando variações no PPCc de $\pm 1,5\%$ (Grupo 1), $\pm 2,1\%$ (Grupo 2) e $\pm 8,0\%$ (Grupo 3), os impactos estimados

na massa lavrável variaram de +3,3 Mt a -3,0 Mt no Grupo 1, +3,9 Mt a -3,4 Mt no Grupo 2, e +12,4 Mt a -9,1 Mt no Grupo 3. A Tabela 3 resume esses resultados com base nas variações observadas para cada grupo.

Isso indica que, para as blendagens típicas realizadas nas operações da Samarco — representadas pelo grupo 1 —, os impactos no sequenciamento de lavra tendem a ser modestos.

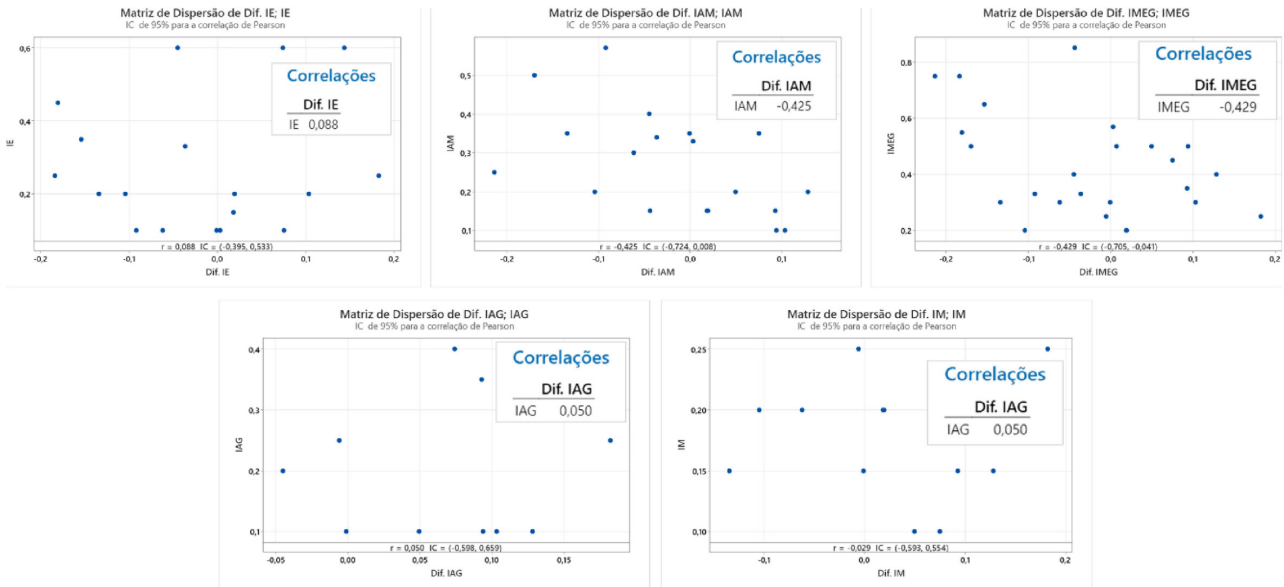


Figura 16. Análise de correlação das principais tipologias com as diferenças dos teores de PPCc calculados e medidos.

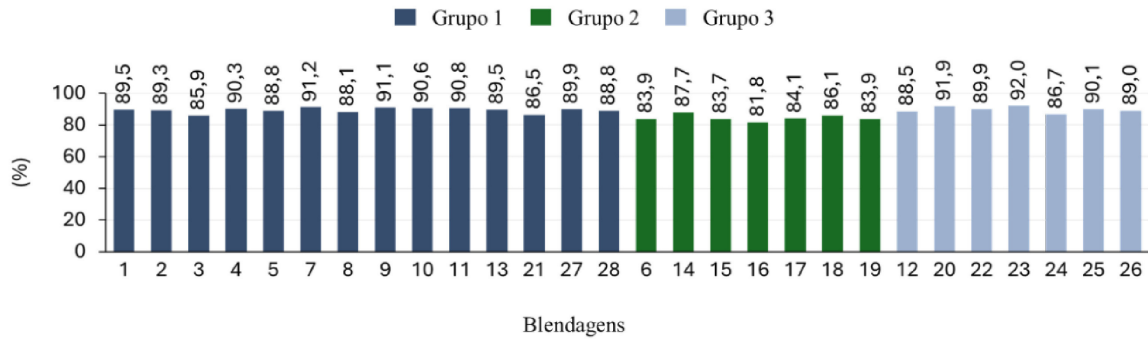


Figura 17. Recuperações em massa medidas na etapa de deslamagem.

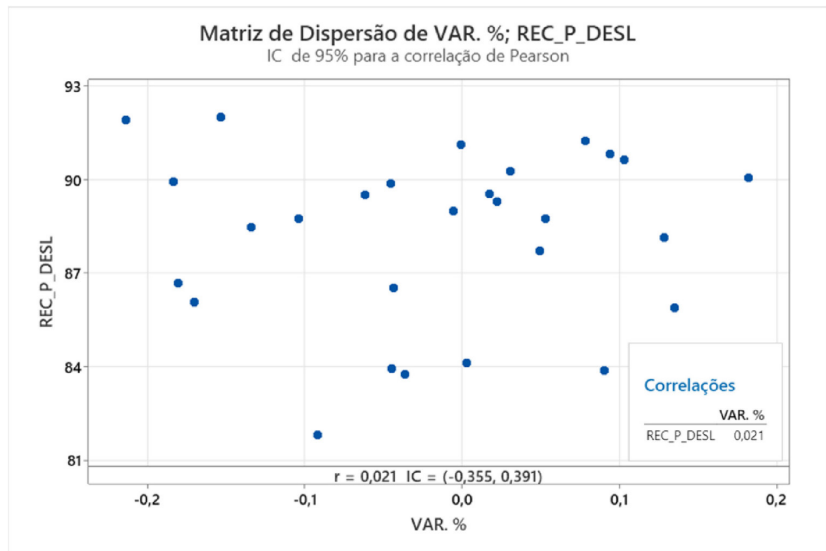


Figura 18. Análise de correlação do percentual de recuperação em massa na etapa de deslamagem com a variação entre os resultados calculados e medidos do PPCc.

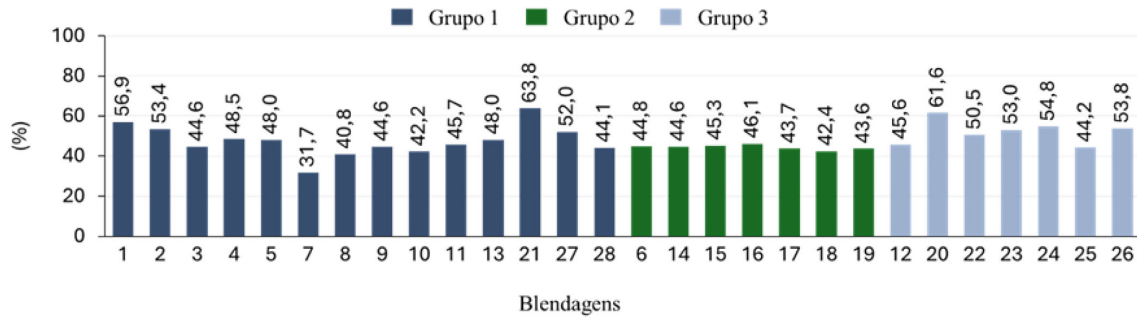


Figura 19. Recuperações em massa globais e medidas na etapa de flotação.

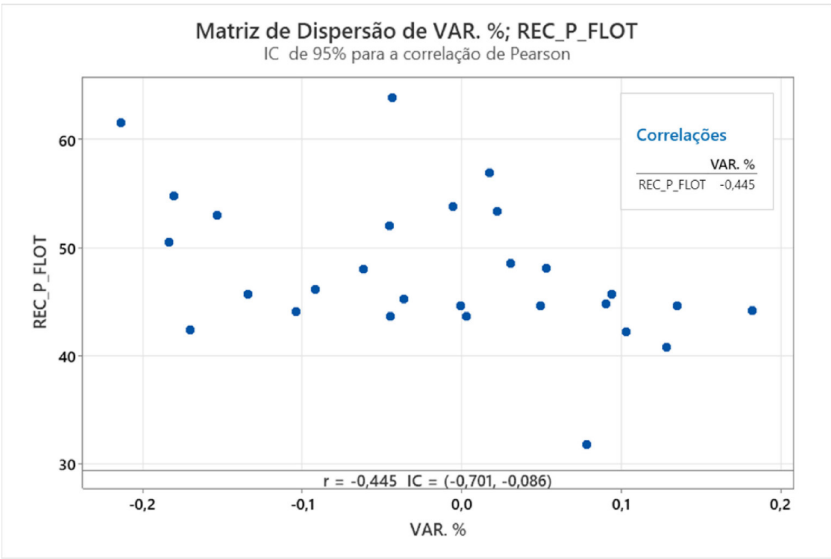


Figura 20. Análise de correlação do percentual de recuperação em massa global na etapa de flotação com a variação entre os resultados calculados e medidos do PPCc.

Tabela 3. Análise dos potenciais impactos da não aditividade no sequenciamento de mina para as variações observadas nos grupos 1, 2 e 3

Grupo	Variação no PPCc	Impacto estimado na massa de minério
1	-1,5%	+3,3 Mt
1	+1,5%	-3,0 Mt
2	-2,1%	+3,9 Mt
2	+2,1%	-3,4 Mt
3	-8,0%	+12,4 Mt
3	+8,0%	-9,1 Mt

4 Conclusões

Os resultados deste estudo reforçam a hipótese de que a variável Perda por Calcinação no concentrado (PPCc) apresenta comportamento não aditivo, evidenciado por diferenças relevantes entre os valores calculados (média

ponderada) e os medidos. Essas variações não puderam ser explicadas pelos teores do ROM nem pela composição tipológica das blendagens. No entanto, observou-se que o enriquecimento do PPC e a etapa de flotação exercem influência moderada sobre os desvios, enquanto a etapa de deslamagem não apresentou impacto significativo.

Apesar disso, os impactos da não aditividade no sequenciamento de lavra foram considerados modestos em cenários operacionais típicos — especialmente no Grupo 1, que representa a prática adotada pela Samarco. Nesse grupo, variações de $\pm 1,5\%$ no PPCc resultaram em alterações na massa de minério de até 3,2 Mt. Conclui-se, portanto, que a metodologia proposta — baseada no PPCc como teor de corte metalúrgico — mostrou-se válida e tecnicamente adequada às condições operacionais da empresa. Ainda assim, recomenda-se o aprofundamento dos estudos por meio da avaliação da mineralogia quantitativa, com especial atenção ao comportamento da goethita ao longo do processo de beneficiamento.

Referências

- 1 Bonfioli LE, Mapa PS, Pinto LA, Rodrigues RS. Desenvolvimento de um modelo matemático para determinação do requerimento de energia de moagem da reserva de minério de ferro da Samarco Mineração S.A. In: Anais do 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 15º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro; 2014; Belo Horizonte, Brasil. São Paulo: ABM; 2014. p. 5093-5105. <https://doi.org/10.5151/2594-357X-25408>.
- 2 Mourão JM. Evolution and growth of iron ore pelletizing. In: 4th EMECR - International Conference on Energy and Material Efficiency and CO₂ Reduction in the Steel Industry; 2022; São Paulo, Brasil. São Paulo: ABM; 2022. p. 274-287. <https://doi.org/10.5151/5463-5463-35035>.
- 3 Parian M, Lamberg P, Rosenkranz J. Process simulations in mineralogy-based geometallurgy of iron ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2021;130(1):25-30. <https://doi.org/10.1080/25726641.2018.1507072>.
- 4 Yao J, Liu C, Hauang G, Xu K, Yuan Q. Multi-source and multi-target iron ore blending method in open pit mine. *Archives of Mining Sciences*. 2022;67(4):631-644. <https://doi.org/10.24425/ams.2022.143678>.
- 5 Liu B, Zhang D, Gao X. A method of ore blending based on the quality of beneficiation and its application in a concentrator. *Applied Sciences*. 2021;11(11):5092. <https://doi.org/10.3390/app11115092>.
- 6 Mkurazhizha H. The effects of ore blending on comminution behaviour and product quality in a grinding circuit – Svappavaara (LKAB) case study. 2018. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18262.80964>.
- 7 Moura FS, Santos GA Jr, Fonseca T, Mazzinghy DB. Aditividade de diferentes litologias nos ensaios geometalúrgicos de flotação de minério de cobre-ouro. In: Anais do XXIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2022; Rio de Janeiro, Brazil. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ; 2022 [acesso em 15 ago. 2025]. Disponível em: <https://proceedings.science/p/154370?lang=pt-br>
- 8 Rajabinasab B, Asghari O. Geometallurgical domaining by cluster analysis: iron ore deposit case study. *Natural Resources Research*. 2019;28(3):665-684. <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9411-6>.
- 9 Resende AJC. Influência da perda por calcinação na sedimentação de concentrados de minério de ferro da Samarco Mineração S.A. [dissertação]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2009.
- 10 Vieira CB, Araújo FGS, Rosière CA, Seshadri V, Coelho LH. Geometallurgical approach for quality control of iron ores for agglomeration and reduction processes. In: 17th Steelmaking Conference - 7th Ironmaking Conference - 1st Cleaner Production Seminar (IAS-JICA); 2009; Rosário, Santa Fé, Argentina. Buenos Aires: Instituto Argentino de Siderurgia; 2009.
- 11 Lishchuk V. Bringing predictability into a geometallurgical program: an iron ore case study [thesis]. Luleå: Luleå University of Technology; 2018.
- 12 Coward S, Vann J, Dunham S, Stewart M. The primary-response framework for geometallurgical variables. In: Proceedings of the 7th International Mining Geology Conference; 2009; Perth, WA. Carlton: AusIMM; 2009 [acesso em 15 ago. 2025]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237532317>.
- 13 Dominy SC, O'Connor L, Parbhakar-Fox A, Glass HJ, Purevgerel S. Geometallurgy: a route to more resilient mine operations. *Minerals*. 2018;8(12):560. <https://doi.org/10.3390/min8120560>.
- 14 Silva TL, Silva MC, Coelho PCFN, Correa AS, Campos PHA, Mazzinghy DB. Aditividade da variável perda por calcinação (PPC) para o modelo geometalúrgico da Samarco. In: Anais do I Simpósio de Geometalurgia; 2024; Belo Horizonte, Brazil. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, UFMG; 2024.
- 15 Campos PHA, Coimbra Leite Costa JF, Koppe VC, Arcari Bassani MA. Geometallurgy-oriented mine scheduling considering volume support and non-additivity. *Mining Technology*. 2022;131(1):1-11. <https://doi.org/10.1080/25726668.2021.1963607>.
- 16 Rodrigues RS, Rodrigues KF, Brito-Parada P, Mazzinghy DB, Bonfioli LE, Brandão PRG. 2024. Investigating the additivity of geometallurgical variables in a low-grade iron ore. In: Anais do I Simpósio de Geometalurgia; 2024; Belo Horizonte, Brazil. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, UFMG; 2024.

Recebido em: 15 Ago. 2025

Aceito em: 23 Nov. 2025

Editor responsável:

André Carlos Silva 