

AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE COMPARATIVA ENTRE UM SISTEMA DE FLOTAÇÃO COM SISTEMA DE AERAÇÃO POR RECIRCULAÇÃO DE POLPA VERSUS O SISTEMA CONVENCIONAL APLICANDO TESTES ESTATÍSTICOS

Santiago Henrique Cruz, CEFET-MG Campus Araxá, santiagoengminas@gmail.com

Priscilla Borges Fernandes da Silva, CEFET-MG Campus Araxá, priscilla-bf@hotmail.com

Resumo: *O presente trabalho visa apresentar os resultados comparativos de performance de um circuito de flotação de apatita utilizando o sistema convencional de aeração e o sistema de recirculação de polpa. Este comparativo foi realizado em escala industrial, inicialmente com o sistema de aeração por recirculação de polpa em operação durante 24 horas e posteriormente com o sistema de aeração convencional em operação. As informações de produção de concentrado, teores e recuperação metalúrgica foram coletadas visando a realização de um comparativo de performance utilizando testes estatísticos para a definição do melhor sistema de aeração de polpa. Os testes estatísticos demonstraram que a performance obtida foi a mesma e que as diferenças de performances devem se apenas a fatores aleatórios, não se justificando assim a realização de investimento para a mudança de tecnologia empregada na aeração das colunas de flotação.*

Palavras-chave: *sistema de aeração convencional, sistema de aeração por recirculação de polpa, testes estatísticos*

1. INTRODUÇÃO

A flotação é a principal técnica de concentração de minérios utilizada no mundo sendo considerada de baixo custo, tendo em vista a capacidade de processamento de matéria prima e o custo dos reagentes empregados neste processo.

Segundo Nunes *et al* (2009), o processo de flotação vem sendo utilizado desde o início do século XX na separação seletiva de minerais, e mais recentemente, no tratamento de efluentes em escala industrial. Esse processo consiste na adesão de bolhas de ar introduzidas no sistema à fase dispersa (partículas), sendo o conjunto formado bolha-partícula carreado para a superfície da célula de flotação onde ocorre a recuperação das partículas. A Figura 1 apresenta um equipamento de flotação utilizado no beneficiamento na concentração de fosfato em Araxá-MG.



Figura 1: Flotação de apatita (Fonte: Schnellrath *et al* 2001).

O processo de flotação possui como principais variáveis: o pH da polpa de minério, dosagem de reagentes, água de lavagem de espuma e vazão de ar, sendo esta realizada na base do equipamento, conforme pode ser observado na Figura 2, e há diversos métodos para a realização desta injeção de ar, que irá coletar as partículas minerais hidrofóbicas. O sistema convencional consiste de uma lança de comprimento que pode variar de 0,3 a 1 metro com injeção de uma mistura de ar e água na ponta desta, por outro o sistema no qual foi testado industrialmente há recirculação de rejeito do equipamento em conta corrente com o ar, este cisalhamento permite geração de bolhas de diversos tamanhos e uma nova chance para o rejeito poder ser flotado.

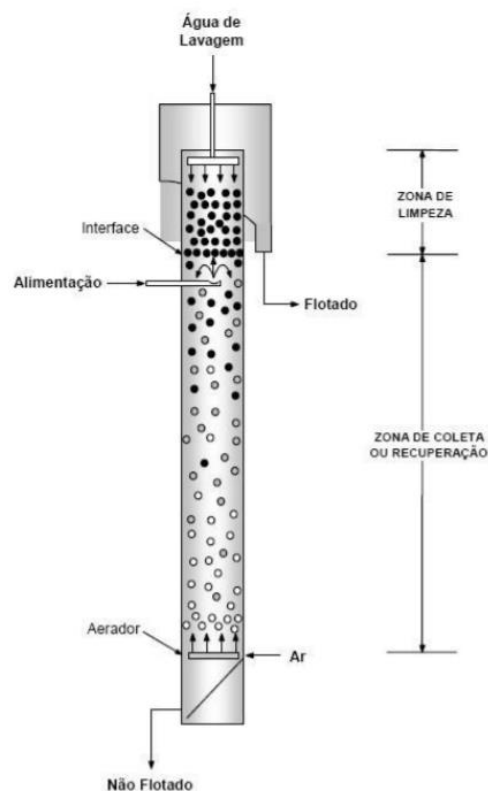


Figura 2: Representação esquemática de uma coluna de flotação (Fonte: Caldara et al 2017).

Segundo Luz et al. (2010) a flotação convencional aplicada no tratamento de minérios é realizada em um estágio inicial de desbaste, denominada de estágio rougher, sendo que o concentrado desta etapa segue para estágios de enriquecimentos denominados de cleaner e recleaner. O rejeito da etapa rougher é encaminhado para o processo denominado de *scavenger*.

No processo estudado, a polpa de minério alimenta quatro colunas roughers, A,B,C e D, sendo que os rejeitos desta etapa são enviados para a barragem de rejeitos e os concentrados das colunas A e C seguem por gravidade para a etapa coluna A da etapa cleaner e o concentrado desta segue por gravidade para a etapa a coluna A da recleaner. De forma similar os concentrados das colunas B e D alimentam por gravidade a coluna B da etapa cleaner, posteriormente o concentrado da etapa cleaner alimenta por gravidade a coluna B da etapa recleaner. Os rejeitos das colunas cleaner e recleaner retornam a etapa rougher, formando uma carga circulante que permite a estabilização do sistema de flotação. A Figura 3 apresenta o fluxograma deste processo.

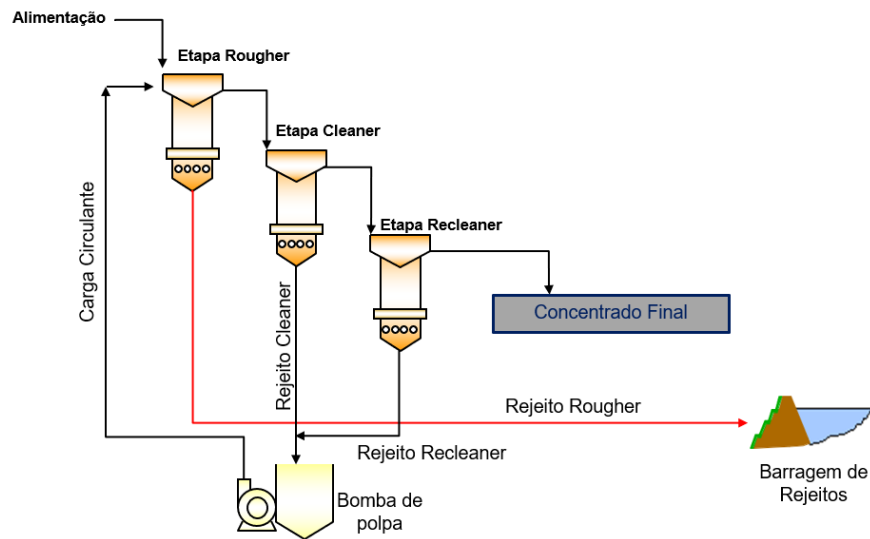


Figura 3: Fluxograma do Processo de flotação em Colunas (Fonte: Dados da Pesquisa).

Para a realização do teste industrial o sistema de aerção por recirculação de polpa foi instalado somente em duas das quatro colunas do primeiro estágio de flotação, visando realizar o comparativo nos mesmos equipamentos, tendo em vista que a coluna de flotação pode portar o sistema convencional e o de aerção por recirculação de polpa mas não pode opera-los ao mesmo tempo. Por isso a necessidade do comparativo ligado e desligado do sistema de aerção por recirculação de polpa proposto neste trabalho.

Os testes estatísticos demonstraram que o sistema de aerção por recirculação de polpa possui a mesma performance do sistema de convencional não se justificando assim a necessidade de investimento no sentido de alteração da metodologia de injeção de ar nos equipamentos de flotação.

2. METODOLOGIA

A metodologia de avaliação está dividida em duas partes, a primeira na qual analisou-se a performance global com o sistema de aerção por recirculação de polpa ligado e com este sistema desligado, com este sistema desligado, entende-se que o sistema convencional está em operação. A segunda parte da metodologia consiste na avaliação das performances das colunas roughers, especialmente as colunas A e C nas quais possuem os dois sistemas de aerção instalados.

2.1. Avaliação Global dos indicadores de performance da flotação

Garantindo que o processo permanecesse estável, sem oscilações na taxa de alimentação ou parada de algum equipamento da planta de beneficiamento, o sistema de aerção por recirculação de rejeito foi colocado em operação nas colunas roughers A e C, sendo assim o sistema convencional de aerção foi desligado. Este sistema de aerção por recirculação de polpa ficou em operação por 24 horas.

Posteriormente foi desligado entrando em operação o sistema de aerção convencional por 17 horas. As informações de total de produção de concentrado, recuperação de elemento útil e teor de P_2O_5 (representa a qualidade) foram extraídas do sistema oficial da empresa, checado se os dados segue a distribuição normal em cada uma das condições e realizado o teste estatístico utilizando o

software Minitab 19 visando verificar se as diferenças encontradas neste comparativo on/off possuem significância estatística.

2.2. Avaliação de performance On/Off por colunas de flotação

Garantindo que o processo permanecesse estável, sem oscilações na taxa de alimentação ou parada de equipamentos da planta de beneficiamento, foi realizado três companhias de amostragem manual com o sistema de aeração por recirculação de polpa ligado, com coletas a cada 15 minutos, sendo que em cada coluna de flotação compoendo uma amostra global a cada duas horas. No dia seguinte o sistema foi desligado e após 4 horas, tempo estabelecido para normalização da carga circulante da flotação, realizou novamente três

As amostras coletadas foram enviadas ao laboratório químico para determinação dos teores através da técnica de fluorescência de raios x e análise granulométrica por peneiramento laboratorial de 65 mesh (212 μm ou ABNT/ASTM = 70) a 400 mesh (38 μm ou ABNT/ASTM = 400). Estes resultados serão aplicados no comparativo de performance de cada uma das colunas em termos dos teores do elemento útil obtido (teor de P_2O_5) e entender o sistema de aeração por recirculação de polpa privilegia a concentração das partículas mais finas ou mais grossas.

Posteriormente utilizando o software Minitab 19 foi verificado se as informações obtidas possuíam comportamento de uma distribuição normal para as condições do sistema ligado e desligado, realizado o teste de igualdade de variância e a análise do teste ANOVA one way através do teste de Tukey.

3. RESULTADOS

3.1. Avaliação Global dos indicadores de performance da flotação

Na Carta de controle apresentada na Figura 4, entende-se como Teste On sendo o sistema de aeração por recirculação de polpa ligado e o teste off é o sistema convencional em operação.

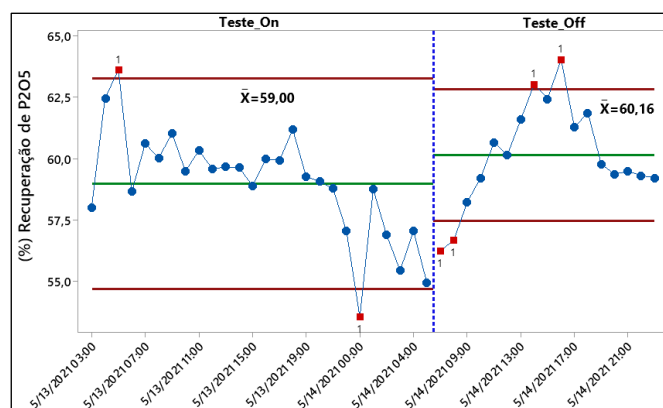


Figura 4: Carta de Controle da Recuperação de P_2O_5 obtida no teste On/Off (Fonte: Dados da Pesquisa).

A média de recuperação do sistema de recirculação de polpa ligado (teste on) foi de 59,00% e com este sistema desligado, a recuperação foi de 60,16%. Através da análise de variância empregando o critério de Tukey, conclui-se que estas diferenças numéricas não são significativas do

ponto de vista estatístico. Conforme apresentado no gráfico da Figura 5, estas diferenças não são significativas.

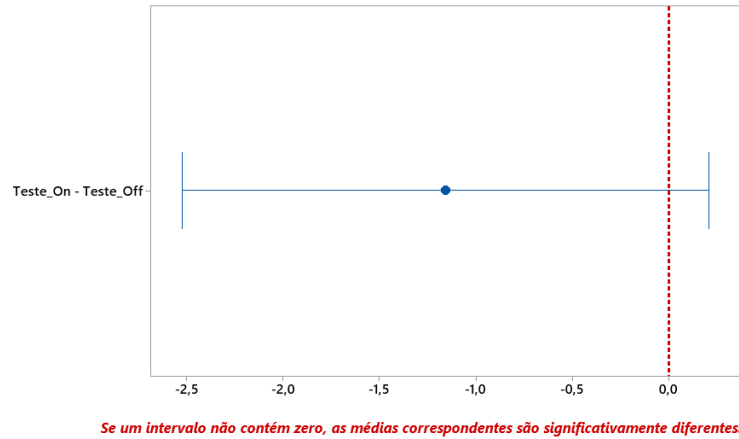


Figura 5: Gráfico de avaliação estatística da Recuperação de P_2O_5 obtida no teste On/Off (Fonte: Dados da Pesquisa).

Portanto a recuperação de P_2O_5 obtida com o sistema de aeração por recirculação de polpa é numericamente e estatisticamente igual a obtida ao se utilizar o sistema de aeração convencional.

Em termos de Produção de concentrado final (abreviação: CF) observa-se que a média de produção de concentrado com o sistema de recirculação ligado foi de 60,83 toneladas base seca por hora (tbs/h) e com o sistema desligado a média de produção foi de 60,78 tbs/h. Conforme apresentado na carta de controle da Figura 6.

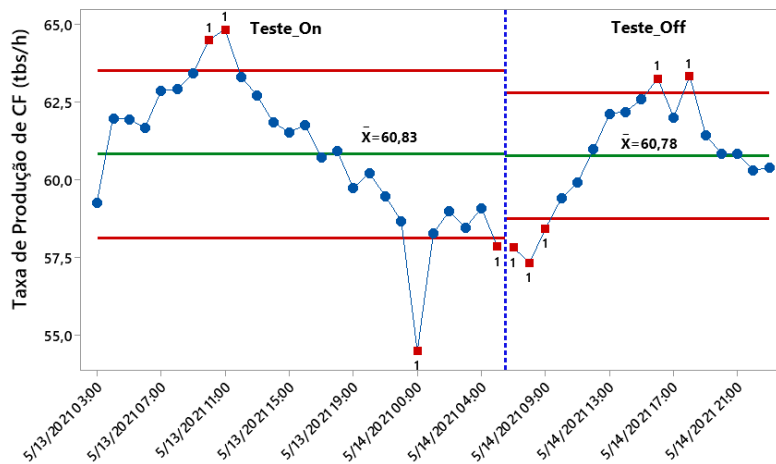
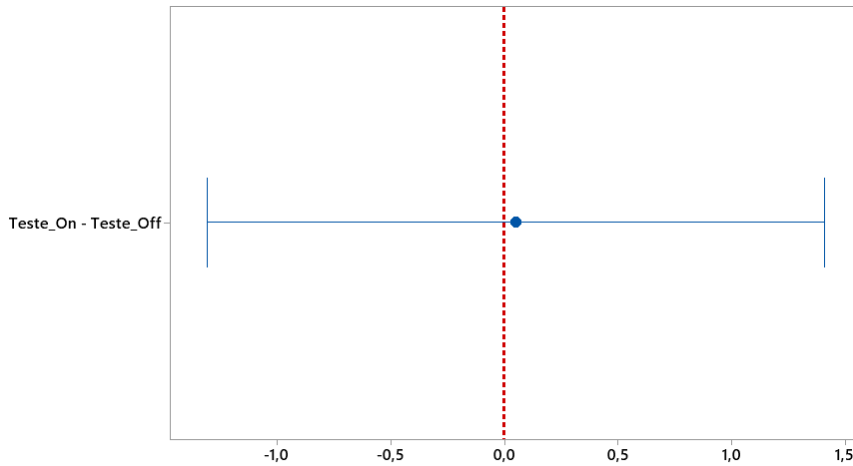


Figura 6: Carta de Controle da taxa de produção (tbs/h) obtida no teste On/Off (Fonte: Dados da Pesquisa).

Após as verificações da distribuição normal dos dados e o teste de igual variância, procedeu-se a análise de variância aplicando o teste de Tukey, conforme apresentado na Figura 7, não há diferença estatística significativa entre estas médias de produção nas duas condições de processos.



Se um intervalo não contém zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes.

Figura 7: Gráfico de avaliação estatística da Produção em tbs/h obtida no teste On/Off (Fonte: Dados da Pesquisa).

Portanto a produção de concentrado final obtida com o sistema de aeração por recirculação de polpa é numericamente e estatisticamente igual a obtida ao se utilizar o sistema de aeração convencional

Em termos de teor do concentrado final, observa-se que a média de produção de concentrado com o sistema de aeração por recirculação de polpa ligado foi de 32,10% e com este sistema desligado a média de teor foi de 32,62%. Conforme apresentado na carta de controle da Figura 8. Numericamente são valores diferentes, mas apenas testes estatísticos podem afirmar que estas diferenças são significativas do ponto de vista estatístico.

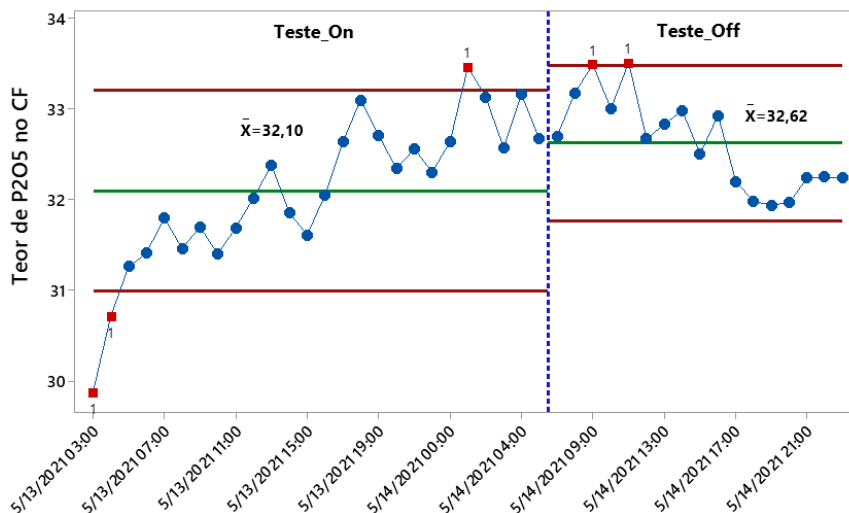
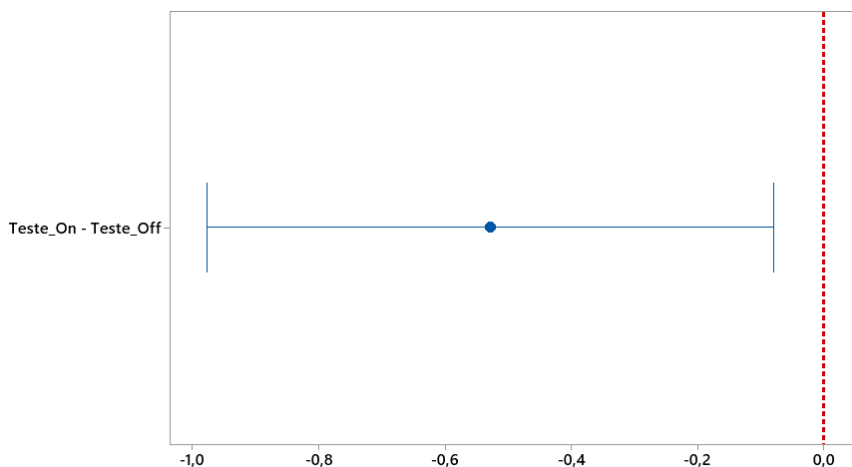


Figura 8: Carta de Controle dos teores de P_2O_5 obtidos no teste On/Off (Fonte: Dados da Pesquisa).

Após as verificações da distribuição normal dos dados e o teste de igual variância, procedeu-se a análise de variância aplicando o teste de Tukey, conforme apresentado na Figura 9, concluindo que há diferença estatística significativa entre estas médias dos teores nas duas condições de processos.



Se um intervalo não contém zero, as médias correspondentes são significativamente diferentes.

Figura 9: Gráfico de avaliação estatística dos teores de P_2O_5 obtida no teste On/Off (Fonte: Dados da Pesquisa).

Portanto o teor obtido com o sistema de aeração por recirculação de polpa é numericamente e estatisticamente menor que o obtido ao utilizar o sistema de aeração convencional.

3.2. Avaliação de performance On/Off por colunas de flotação

O Diagrama apresentado na Figura 10 apresenta os resultados amostrados por coluna de flotação, o sistema de aeração por recirculação de polpa foi instalado nas colunas roughers A e C mas a amostragem foi realizada nas quatro colunas, aproveitando a oportunidade para verificar se há algum viés no comportamento dos equipamentos deste estágio de flotação.

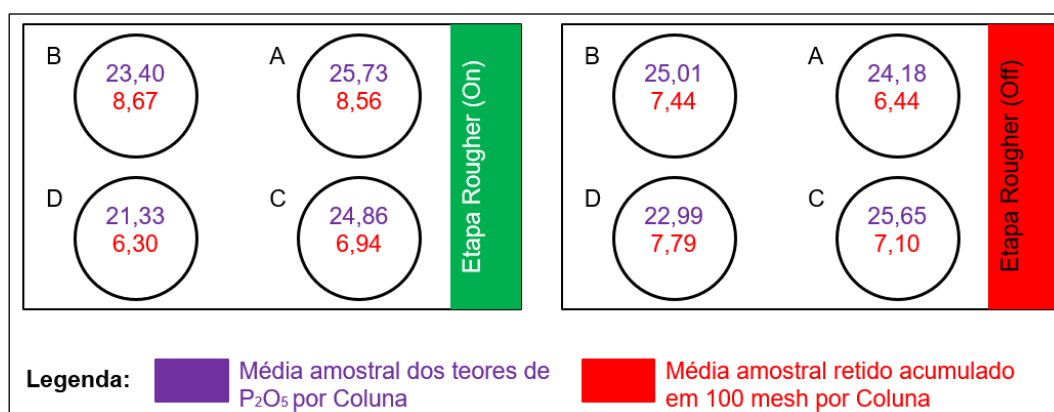


Figura 10: Resultados das médias amostrais obtidas no concentrado da etapa de flotação rougher com o sistema de recirculação de polpa ligado (on) e desligado (off) (Fonte: Dados da pesquisa)

Na coluna Rougher A, comparando o On/Off do sistema de aeração por recirculação de polpa, foi obtido através de teste de hipótese um p value de 20,6%, ou seja se rejeitarmos a hipótese nula, na qual os teores na situação on é igual a situação off a probabilidade desta afirmação estar errada é

de 20,6%, portanto a hipótese nula não pode ser rejeitada a um nível de significância de 5%. A Figura 11 ilustra graficamente este comparativo.

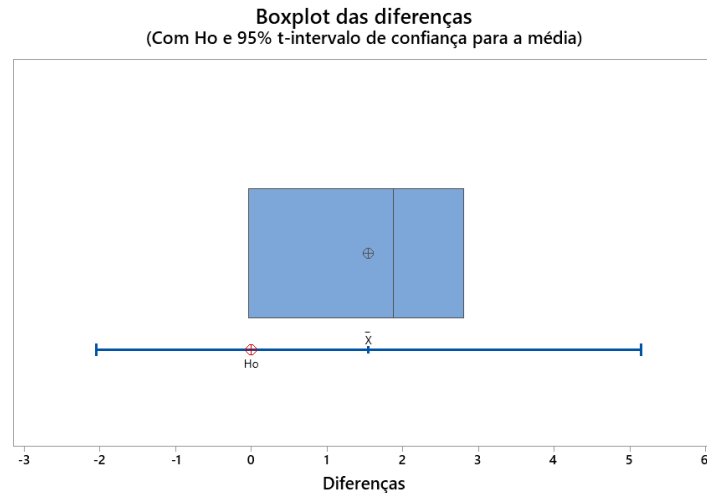


Figura 11: Resultados do teste de hipótese para os teores da Rougher C (Fonte: Dados da pesquisa).

Portanto não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula, sendo assim a performance de qualidade (teor de P_2O_5 no concentrado) da coluna rougher A é a mesma com e sem o sistema de aeração por recirculação de polpa.

Na coluna Rougher C, o p value encontrado foi de 68,3%, ou seja se rejeitarmos a hipótese nula, na qual os teores na situação on é igual a situação off a probabilidade de estar errado ao fazer essa consideração é de 68,3%, portanto não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula a um nível de significância de 5%. A Figura 12 ilustra graficamente este comparativo.

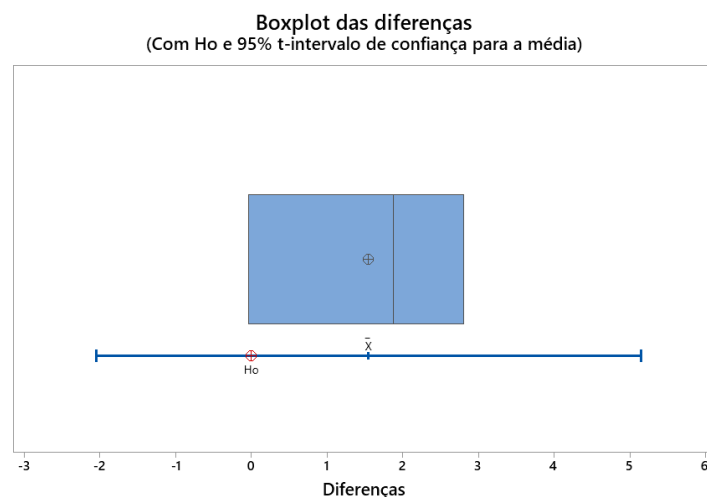


Figura 12: Resultados do teste de hipótese para os teores da Rougher C (Fonte: Dados da pesquisa).

Devido ao fato da amostragem ter sido realizada nas 4 colunas roughers, foi verificada a normalidade dos dados amostrados em cada uma das colunas e se estes resultados possuíam a mesma variância, em seguida utilizando o Minitab realizou-se o teste de Anova com intuito de identificar

alguma possibilidade de performance diferente entre as colunas de flotação rougher. A Figura 13 gerada pelo software Minitab 19, demonstra o resultado deste teste de comparação múltipla, o teste de Tukey.

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence			
Coluna	N	Mean	Grouping
Rougher A_On	3	25,73	A
Rougher C_Off	3	25,650	A
Rougher B_Off	3	25,010	A B
Rougher C_On	3	24,86	A B
Rougher A_Off	3	24,180	A B
Rougher B_On	3	23,403	A B
Rougher D_Off	3	22,993	A B
Rougher D_On	3	21,330	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Figura 13: Resultado de Anova para os teores de P₂O₅ no concentrado obtido para as colunas de flotação roughers com o sistema de recirculação de polpa ligado (on) e desligado (off) (Fonte: Dados da pesquisa).

A partir da tabela apresentada na Figura 13, conclui-se que as rougher A e C obtêm a mesma qualidade de concentrado com o sistema de aeração por recirculação de polpa ligado ou com o sistema convencional. A única diferença de performance obtida deve-se ao Rougher D, apesar de possuir apenas o sistema de aeração convencional, esta coluna obtém um concentrado estatisticamente menor que as colunas roughers A e C.

A mesma análise de Anova foi realizada para a granulometria do concentrado retido em 100 mesh (150 µm ou ABNT/ASTM = 100) segundo o teste de Tukey, representado na Figura 14 não há diferença estatística significativa, ou seja em termos de granulometria o sistema está concentrando de forma igual nas 4 colunas roughers, portanto não há um equipamento que consegue arrastar partículas mais grossas ou mais finas.

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence			
Coluna	N	Mean	Grouping
Rougher B_On	3	8,670	A
Rougher A_On	3	8,557	A
Rougher D_Off	3	7,79	A
Rougher B_Off	3	7,400	A
Rougher C_Off	3	7,073	A
Rougher C_On	3	6,943	A
Rougher A_Off	3	6,443	A
Rougher D_On	3	6,300	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Figura 14: Resultado de Anova para a granulometria obtida para as colunas de flotação roughers com o sistema de recirculação de polpa ligado (on) e desligado (off) (Fonte: Dados da pesquisa)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fosfato é fundamental para a produção de alimentos no Brasil e no mundo, tendo em vista ser a principal fonte de fósforo para a produção de fertilizantes NPK.

Portanto busca-se continuamente à melhoria dos processos, incrementando a produção de concentrado, elevando a qualidade do concentrado visando reduzir custos operacionais, são objetivos fundamentais para uma empresa deste ramo.

No entanto todas as melhorias têm de ser avaliadas com critérios estatísticos para evitar um investimento alto em uma alteração de tecnologia que no fim pode não refletir em nenhum ganho operacional ao negócio.

Os testes estatísticos são fundamentais neste sentido, para aceitar ou refutar uma proposta de melhoria, neste caso não se recomenda a substituição do sistema atual de aeração (convencional) pelo sistema de aeração por recirculação de polpa, tendo em vista que não se identificou através do uso de testes estatísticos diferenças significativas em termos de produção, recuperação de elemento útil ou qualidade do concentrado da etapa rougher.

5. REFERÊNCIAS

- ARAUJO, A.C. Introdução. In: Introdução ao Tratamento de Minérios. 1ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007, cap.01.
- BERALDO, L.J. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1987, cap. 7, pp. 137
- BÔAS, R.C.V. Indicadores de desenvolvimento sustentável para a indústria extrativa mineral: Guia Prático. Rio de Janeiro, CETEM/MCT/CNPq/CYTED, 2009.
- CALDARA, J.A; CORREIA, J.C.G. Abordagem sobre a aplicação da flotação em coluna em beneficiamento mineral. Artigo, 2017.
- CHAVES, A.P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 3ª ed. Volume 1, São Paulo: Editora Signus, 2007.
- CORREIA, J.C.G. Classificação e Peneiramento. In: Tratamento de Minérios. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, cap. 6, pp. 257 -296.
- GUPTA, A.; YAN, D.S. Mineral Processing Design and Operations – An Introduction. 1ª ed. Western Australia: Editora Elsevier, 2006.
- LUZ, A. B; SAMPAIO, J. A; FRANÇA, S. C. Tratamento de minérios. 5a edição. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2010.
- NUNES, D.G; COUTO, H.J.B; FRANÇA, S.C.A. Aplicação da flotação em Coluna na concentração de ferro de baixo teor. Artigo, 2009.
- SCHNELLRATH, J; CORREIA, J.C; GUIMARÃES, R.C; TEIXEIRA, S.H.A. Fosfato Serrana Mina de Araxá In: Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001, cap. 23, pp. 347 – 363.
- WILLS, B.A.; MUNN, T.J.N. Wills’ mineral processing technology – an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7ª ed. Queensland: Elsevier, 2011.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.