



O USO DA TÉCNICA DE ANÁLISES DE COMPONENTES PRINCIPAIS COMO FERRAMENTA PARA AVALIAR A INFLUÊNCIA DE FINOS DE ALUMINA E MANGANÊS NA FLOTAÇÃO INDUSTRIAL

LEITE, A. M. C.¹, COSTA, A. B.², SILVA, P. G. C.³, REIS, E.L.⁴, PEREIRA, T.M.⁵

¹Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), EM/DEMIN/PPGEM. e-mail: alinedmcl@gmail.com

²Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), EM/DEMIN/PPGEM.

³Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), EM/DEMIN/PPGEM.

⁴Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), EM/DEMIN/PPGEM.

⁵Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), ICEB/DEEST.

RESUMO

A mistura de minérios hematíticos e itabiríticos durante o processo de lavra proporciona variações na granulometria e na química das pilhas de alimentação da usina, afetando de forma mais significativa o desempenho da flotação. Este trabalho utiliza um método de análise estatística multivariada denominado análise de componentes principais (ACP), usado para redução da dimensão dos dados, juntamente com o *software R* para avaliar as correlações entre porcentagem de finos na pilha, em especial a alumina e o manganês, e a presença desses finos (ACP Finos) na alimentação da flotação. Foi analisado também a influência desses finos no processo de flotação (ACP Flotação). Na ACP Finos utilizou-se três componentes, sendo a primeira relacionada aos finos de alumina, a segunda aos finos de manganês e a terceira descrevendo o impacto dos finos na flotação. Utilizando duas componentes principais na ACP Flotação, foi possível ver com mais detalhe a influência da alumina e do manganês no processo de flotação. A ACP permitiu uma nova visão da interferência de contaminantes e partículas finas e ultrafinas contidas num circuito de concentração.

PALAVRAS-CHAVE: Flotação, Análise de Componentes Principais, Finos, Composição Química.

ABSTRACT

The mixing of hematite and itabirite during the mining process provides variations in both the grain size and chemical composition of the plant's feed pile, affecting the flotation performance more significantly. This work uses a multivariate statistical analysis method called Principal Component Analysis (PCA), used to reduce the size of the data, together with software R to evaluate the correlations between the percentage of fines in the pile, especially alumina and manganese, and the presence of these fines in the flotation feed (PCA Fine). The influence of these fines on the flotation process (PCA Flotation) was also analyzed. In the PCA Fines, three components were used, the first one related to alumina fines, the second to manganese fines and the third describing the impact of the fines on the flotation. Using two main components in PCA Flotation, it was possible to see in more detail the influence of alumina and manganese in the flotation process. The ACP allowed a new view of the interference of contaminants and fine and ultrafine particles contained in pulp in a concentration circuit.

KEYWORDS: Flotation, Principal Component Analysis, Fines, Chemical Composition.

1. INTRODUÇÃO

No caso específico de minério de ferro, o maior desafio tem sido a proximidade da exaustão dessas reservas de altos teores e a prática cada vez mais operacional da mistura de minérios hematíticos e itabiríticos durante o processo de lavra para ampliar a vida útil da mina e manter uma alimentação de qualidade nas formações das pilhas que abastecem as usinas de processamento mineral.

A entrada de diferentes tipologias na planta de beneficiamento provoca alterações nas porcentagens da participação de produtos, na granulometria (porcentagem de finos) e químicas (teores de Fe, SiO₂, Al₂O₃, P, Mn, etc.) na alimentação da usina. Essas alterações quando estão intimamente ligadas à fração fina da pilha afeta diretamente o desempenho da flotação, comprometendo a especificação do produto final e aumentando ainda mais as perdas de partículas úteis para o rejeito (CASTRO *et al.*, 2004).

Para buscar uma forma de correlacionar os impactos negativos oriundos da variabilidade do ROM (material das minas para a usina), pode-se trabalhar com técnicas sofisticadas de análise estatística multivariada como a análise de componentes principais (ACP).

Segundo Hongyu e outros (2015), a análise multivariada é uma ferramenta que permite estatisticamente avaliar simultaneamente múltiplas informações de um objeto ou indivíduo sob investigação gerando uma gama de cruzamentos entre suas variáveis dependentes ou independentes.

A análise de componentes principais é uma das abordagens de multivariada que tem como objetivo a redução da dimensionalidade dos dados por meio de um agrupamento de indivíduos segundo a variação de suas características. Ou seja, é uma técnica que a partir de um banco com grande quantidade de dados e variáveis correlacionadas, é gerado um conjunto de combinações lineares de novas variáveis não correlacionadas e que fornecem o máximo de informação possível do banco original (PAVAN, 2013). Essas combinações lineares são chamadas de componentes principais e são colocadas em ordem decrescente por suas variâncias (VICINI *et al.*, 2005).

Na prática, a definição das componentes principais se faz pelo cálculo da matriz de variância-covariância (Σ), ou a matriz de correlação (R), de forma a encontrar os autovalores e os autovetores (PAVAN *apud* REGAZZI, 2000).

A matriz de correlação (R) é usada quando se trata de variáveis de diferentes escalas de unidades de medidas. Nesse caso, todas as variáveis do campo amostral são padronizadas, passam a ter uma variância única e as componentes principais são autovetores normalizados de autovalores da matriz de correlação (R) (PEREIRA, 2017).

A técnica de ACP pode ser transcrita em um algoritmo no *software* estatístico R através de uma linguagem de programação que permite a execução dos cálculos necessários para a obtenção das componentes principais. Há também pacotes de algoritmos que podem ser incorporados ao software para fornecer uma análise estatística descritiva dos dados, com o intuito de facilitar o entendimento das relações existentes entre variáveis e possibilitando, assim, a correção de dados que podem estar causando erros e desvios na pesquisa por causa de possível presença de *outliers*.

A aplicação de técnicas como análise de componentes principais pode ganhar cada vez mais espaço no campo da mineração por trazerem precisão e agilidade. Diante do exposto, o presente estudo investiga a tendência dos finos da pilha de alimentação do processamento mineral irem para a flotação e da influência dos contaminantes (Al_2O_3 e Mn) nessa fração no desempenho da flotação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios deste trabalho foram feitos com o banco de dados provenientes dos resultados industriais médios de pilhas processadas em uma unidade beneficiamento de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero (MG).

A planta industrial conta, de forma geral, com processos de cominuição, classificação granulométrica e concentração pela flotação. A flotação é realizada em pH 10,5 e usa coletor catiônico sintético representado pela amina e depressor orgânico representado pelo gritz de milho.

Os litotipos do minério de ferro tratados ao longo do período das pilhas contemplaram um *mix* composto de hematitas brandas e compactas, itabiritos silicosos brandos e compactos e em menor proporção itabiritos carbonáticos (predominantemente compactos). Essas pilhas estão associadas ao período estimado entre 8 a 10 meses e totalizaram 65 indivíduos.

Para a análise proposta neste trabalho foram montados dois bancos de dados denominados ACP Finos e ACP Flotação, ambos compostos pelos 65 indivíduos amostrados. Os bancos são distintos em relação às variáveis consideradas em cada um.

Para a ACP Finos foram considerados a porcentagem de finos na pilha (Finos), teores de alumina e manganês na porcentagem de finos da pilha ($F_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ e F_{Mn}), teores de alumina e manganês na alimentação ($A_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ e A_{Mn}) e no concentrado da flotação ($C_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ e C_{Mn}), teor de sílica no concentrado da flotação (C_{SiO_2}) e teor de ferro no rejeito na flotação (R_{Fe}).

Para a ACP Flotação foram retiradas as variáveis Finos, $F_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ e F_{Mn} e adicionadas as variáveis teor de ferro na alimentação (A_{Fe}), teor de ferro no concentrado (C_{Fe}) e teores de alumina e manganês no rejeito ($R_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ e R_{Mn}). Todas as variáveis estão em unidade de porcentagem.

Os bancos foram importados para a plataforma do *software* R e prosseguiu-se com a análise estatística descritiva dos dados para conhecer o perfil das variáveis analisadas e, em seguida, a análise multivariada foi aplicada para entender o inter-relacionamento destes dados e obter as componentes principais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o banco de dados ACP Finos fez-se o teste de Bartlett para verificar se existe correlação suficiente entre as variáveis. O resultado foi um p-valor igual a $4,3 \times 10^{-65}$ assegurando a aplicação da técnica multivariada.

Avaliando-se a proporção de variação acumulada, os resultados do critério de Kaiser ($k=3$) e o gráfico *scree-plot*, foram retidas as três primeiras componentes principais, pois juntas

permitem uma explicação de aproximadamente 77% da informação contida no banco de dados, como pode ser observado na Tab.1 e Fig.1.

Tabela 1. Proporção da variância das componentes.

Componente Principal	Proporção da Variância (%)	Variância Acumulada (%)
CP 1	33.80	33.80
CP 2	30.62	64.42
CP 3	12.76	77.18
CP 4	7.49	84.67
CP 5	6.94	91.61
CP 6	4.83	96.44
CP 7	2.30	98.73
CP 8	0.82	99.55
CP 9	0.45	100.00

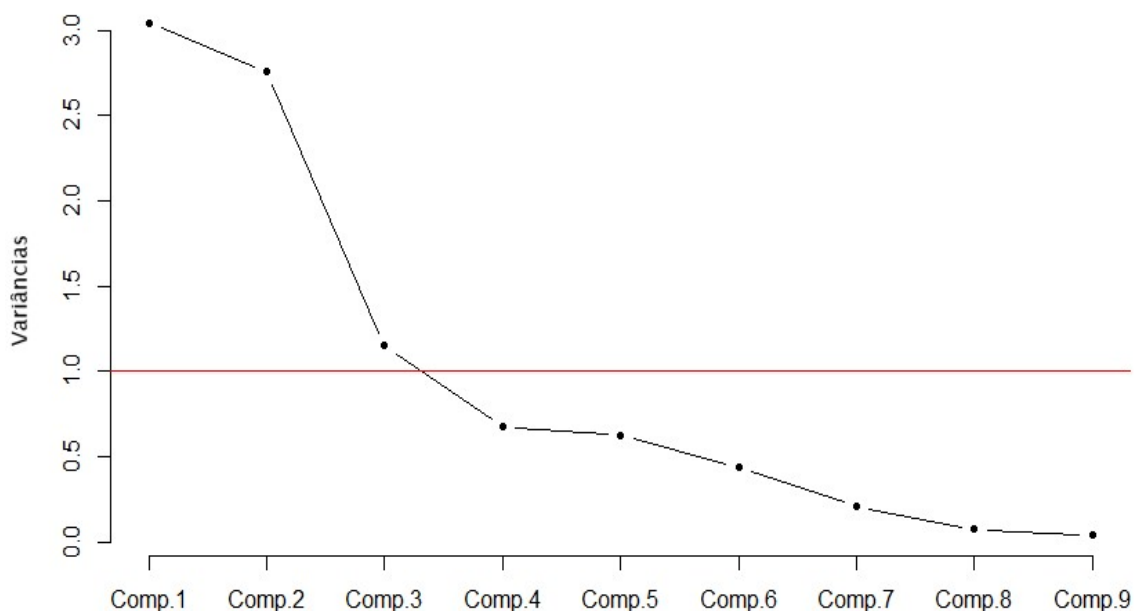


Figura 1. Gráfico de scree-plot fornecido pelo software R.

As cargas (*loadings*) de cada componente são apresentadas na Tab.2.

Tabela 2. Cargas (*loadings*) das três primeiras componentes principais.

Variável	CP 1	CP 2	CP 3
Finos	0.185	0.055	0.75
F_Al ₂ O ₃	-0.356	-0.288	-0.22
F_Mn	0.247	-0.466	-0.205
A_Al ₂ O ₃	-0.534	-0.118	0.088
A_Mn	0.272	-0.506	0.039
C_SiO ₂	-0.158	-0.299	0.446
C_Al ₂ O ₃	-0.496	-0.16	-0.119
C_Mn	0.195	-0.533	-0.005
R_Fe	-0.332	-0.165	0.353

De posse dos valores de *loadings* das componentes, é possível descrever as equações matemáticas que as representam.

$$(1) \quad CP1 - \hat{Y}_1 = 0.185Finos - 0.356F_Al2O3 + 0.247F_Mn - 0.534A_Al2O3 + 0.272A_Mn - 0.158C_SiO2 - 0.496C_Al2O3 + 0.195C_Mn - 0.332R_Fe$$

$$(2) \quad CP2 - \hat{Y}_2 = 0.055Finos - 0.288F_Al2O3 - 0.466F_Mn - 0.118A_Al2O3 - 0.506A_Mn - 0.299C_SiO2 - 0.16C_Al2O3 - 0.533C_Mn - 0.165R_Fe$$

$$(3) \quad CP3 - \hat{Y}_3 = 0.75Finos - 0.22F_Al2O3 - 0.205F_Mn + 0.088A_Al2O3 + 0.039A_Mn + 0.446C_SiO2 - 0.119C_Al2O3 - 0.005C_Mn + 0.353R_Fe$$

Essas equações (Eq.1, Eq.2 e Eq.3) nos fornecem os *scores* de cada indivíduo para cada componente, sendo possível assim uma análise do comportamento de cada indivíduo amostrado de forma quantitativa, porém esse não é o objetivo do trabalho em questão.

É necessário, então, analisar a informação que cada componente nos fornece utilizando uma matriz entre as componentes principais e as variáveis originais. Variáveis com valores altos possuem mais influência na componente logo um critério de aceitação mínima de 0,30, em módulo, foi empregado. Variáveis com mesmo sinal possuem relação direta entre si enquanto variáveis com sinais contrários possuem relação contrária.

Todas as componentes foram analisadas baseadas em suas variáveis de maior peso e foram levantadas também hipóteses com base na literatura para as tendências analisadas de cada componente.

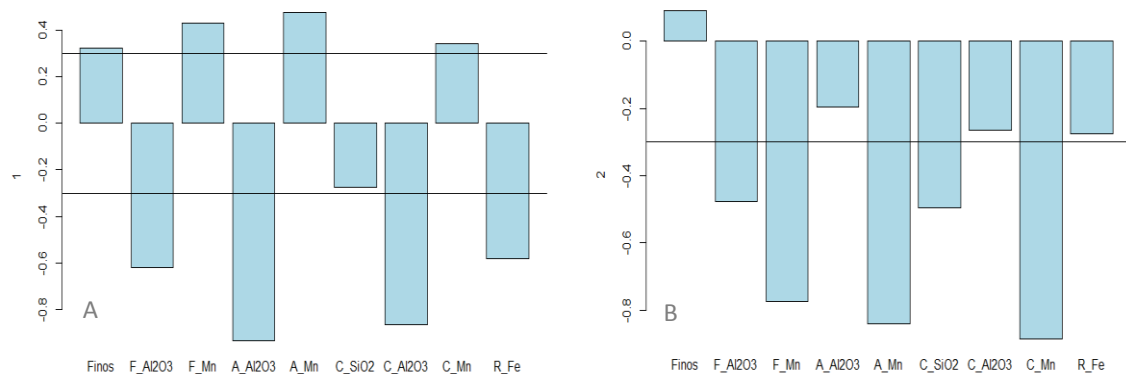


Figura 2. Relação entre variáveis originais e componentes principais 1 (A) e 2 (B).

Observando as componentes principais 1 e 2, a partir da Fig.2, é possível perceber uma relação entre a presença de finos de alumina e manganês na pilha com a presença dos teores dos mesmos na alimentação e concentrado da flotação. Deduz-se então que a deslamagem, operação responsável por impedir a ida de finos para o processo de flotação, está sendo ineficiente. Duas possíveis hipóteses para essa ineficiência seria a utilização de um corte errado nos hidrociclones ou a falta do uso de dispersantes na etapa de deslamagem. O uso dispersantes possibilita a desagregação das partículas, provocando o aumento da repulsão elétrica entre as partículas ou uma estabilização estérica, permitindo uma deslamagem mais eficiente.

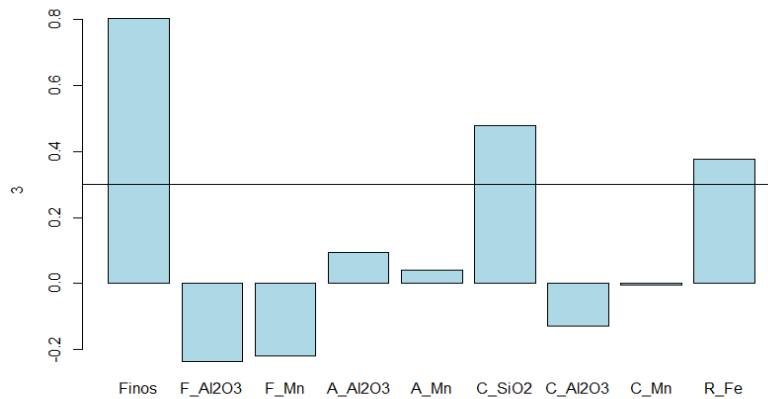


Figura 3. Relação entre variáveis originais e componentes principal 3.

A componente principal 3 comprova uma relação entre a presença de finos da pilha com a presença de sílica no concentrado e ferro no rejeito, variáveis fundamentais no processo de flotação, como mostra a Fig.3. Portanto, executou-se todos os passos mostrados acima para o banco de dados ACP Flotação, com o objetivo de obter melhor análise deste impacto negativo dos finos de alumina e manganês.

Ao processar o banco de dados ACP Flotação, utilizou-se as duas primeiras componentes principais, pois juntas permitem uma explicação de aproximadamente 66% da informação contida no banco de dados e demonstram, como mostra a Fig.4, informações sobre a influência da alumina e do manganês na flotação.

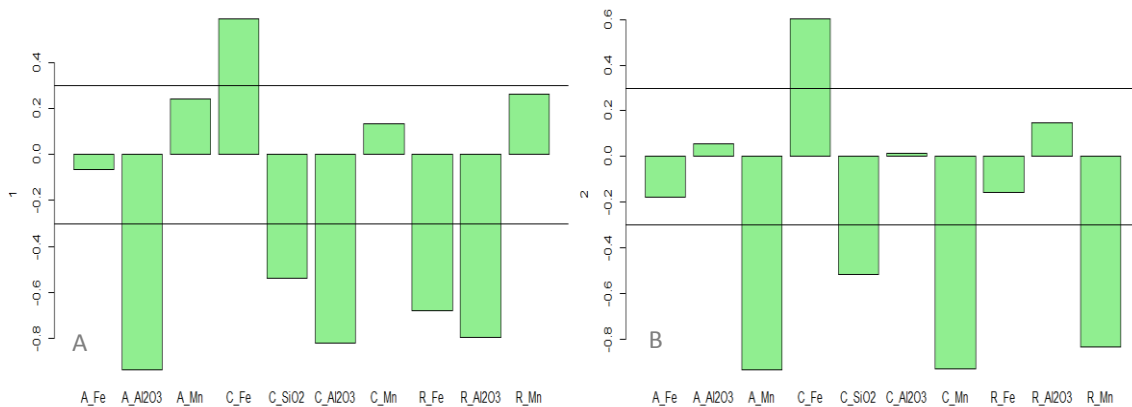


Figura 4. Relação entre variáveis originais e componentes principal 1 (A) e 2 (B) da ACP Flotação.

Na primeira componente principal é possível observar como a presença de alumina na alimentação da flotação está relacionada com a presença de sílica no concentrado e ferro no rejeito. Na segunda componente principal o manganês na alimentação está relacionado com a presença de sílica no concentrado. Em ambas as componentes principais é possível perceber que a concentração de ferro possui valores em ordem de relação contrária (sinal contrário) com os teores de alumina e ferro.

O efeito nocivo desses finos contaminantes na flotação pode estar relacionado com o recobrimento de superfície minerais mais grossas por argilominerais ou óxidos hidratados de ferro, impedindo a ação dos insumos químicos. Este recobrimento pode ser feito pela precipitação ou heterocoagulação de espécies presentes na polpa ou pela atração

eletrostática devido às cargas superficiais das partículas. A tradução desta primeira condição é conhecida como “*slime coating*” (YU *et al.*, 2017; TOTOU, 2010).

Logo, uma possível hipótese seria que a alumina está sendo atraída eletrostaticamente pelo ferro e pela sílica (ARAUJO, 1982), revestindo suas superfícies e o recobrimento dessas pelo manganês seria possível devido a precipitação de $MnOH_{2(s)}$ em pH 10,5 (CRUZ, 2015).

Ambos os recobrimentos acarretariam uma deficiência ou redução na eficiência do processo, prejudicando as interações partícula-bolha (hidrofobicidade), as adsorções de reagentes e o efeito de coleta, favorecendo perdas de seletividade e diminuição da recuperação mássica (SOUSA; ARAÚJO, 1999).

Os resultados encontrados na ACP Flotação reforçam a necessidade de uma deslamagem eficiente para que não haja a interferência dos finos na flotação como observado em ambas as ACP's realizadas nesse trabalho.

4. CONCLUSÕES

Na ACP Finos onde as três componentes principais analisadas explicam 77% da variabilidade dos dados do banco amostral, pode-se perceber a tendência do aumento de finos de alumina e manganês na alimentação da flotação quando há a aumento desses mesmos finos na pilha, e uma influência negativa dos finos nos parâmetros de flotação. Esses resultados podem estar relacionados a uma deslamagem ineficiente.

Na ACP Flotação foi possível observar com maior clareza o impacto negativo da alumina e manganês na flotação, resultado que pode estar relacionado com o fenômeno de *slime-coating* da alumina e precipitação de $MnOH_{2(s)}$ na superfície do ferro e do quartzo.

Através dos resultados obtidos pelas componentes principais, sugere-se uma reavaliação do fluxo e operações realizadas com o minério oriundo da mina até à obtenção do produto, de modo a ajustar os parâmetros e controlar as variáveis de processo para se obter um sistema eficiente de processamento de minerais.

Ressalta-se, como contribuição para o setor acadêmico, a possibilidade do uso da ferramenta ACP em bancos de dados de mineração, atestando a versatilidade deste método o qual é comumente utilizado em outras áreas. Como contribuição para a indústria mineral, o estudo evidencia a análise de componentes principais como mais uma ferramenta para o auxílio na tomada de decisão acerca do processo de flotação e de todo circuito de processamento mineral, através da identificação de possíveis problemas e proposição de soluções, uma vez que cada operação unitária influencia diretamente a etapa subsequente.

Por fim, conclui-se que o estudo obteve êxito na avaliação das correlações entre a porcentagem de finos presente na pilha de minério de ferro e a presença desses finos na flotação, corroborado pela análise das componentes principais resultantes da aplicação da técnica estatística multivariada.

5. REFERÊNCIAS

ARAUJO, A.C. Influência de Íons de Alumínio e Caolinita na Flotação Catiônica de Quartzo e Hematita. Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia, UFMG, 1982.

CASTRO, E. B. et al. Índices de influência entre os parâmetros de controle, faixas granulométricas finas e fases químicas presentes nos minérios do complexo PICO-MBR. In: XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Florianópolis, 2004, 7p.

CRUZ, D. G. Influência dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Mn^{2+} na flotação catiônica de minério de ferro: estudos de bancada. 2015. 74p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Ouro Preto, 2015.

HONGYU, K., et al. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. Engineering and Science. Volume 1, Edição 5, 2015.

PAVAN, M.V. SestaNet: Módulo de análise de componentes principais. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. 105p.

PEREIRA, T. M. Estatística multivariada I – Uma abordagem aplicada utilizando o software R, Notas de aula, Departamento de Estatística, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.Rproject.org/>.

REGAZZI, A.J. Análise multivariada, notas de aula INF 766, Departamento de Informática da Universidade Federal de Viçosa, v.2, 2000.

SOUZA, C.C.; ARAUJO, A.C. A Influência do Tamanho da Partícula de lama na Flotação de Minérios de Ferro. In: II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro: Caracterização, Beneficiamento e Aglomeração, 17 a 20 de outubro de 1999, Ouro Preto, MG, ABM, p. 73 – 88.

TOTOU, A. R. Efeito da dispersão na Deslamagem e Flotação de Polpas de Minérios Hematíticos Itabiríticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

VICINI, L. Caderno Didático: Análise Multivariada da teoria à prática. Monografia (Especialização Estatística) – Universidade Federal de Santa Maria, 2005, 215p.

YU, Y. et al. Slimes coatings in froth flotation: A review. Minerals Engineering, edição 114, 2017. 11p.