



DISPOSIÇÃO DE REJEITO POR EMPILHAMENTO COMO ALTERNATIVA PARA BARRAGENS DE MONTANTE: UMA REVISÃO DE LITERATURA

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.XII-019>

Milena Cristina Rocha de Souza (*), Allan Kewen Câmara de Oliveira, Ana Letícia Ramos Bezerra, Gilson Gabriel Teixeira Varela, Lara Pereira Tavares Mendes

* Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, engmilenacristina@gmail.com

RESUMO

Em virtude dos acidentes recentes envolvendo barragens de rejeitos com construções a montantes, tecnologias como a filtragem e empilhamento a seco desses resíduos, vem sendo desenvolvidas com o objetivo de tornar a técnica de disposição desses materiais uma atividade mais segura. Em vista disso, este trabalho teve como objetivo trazer um panorama das pesquisas desenvolvidas a respeito dessa técnica de empilhamento, como uma forma de contribuir com o levantamento dos principais desafios e oportunidades relatados na literatura a partir de estudos dessa área. Para isso, foi realizada uma revisão de literatura utilizando critérios de inclusão e exclusão para seleção dos estudos. A partir da análise dos trabalhos selecionados constatou-se que fatores como a variação da composição mineralógica e os custos operacionais, contribuem para dificultar a implementação e padronização dessa tecnologia nas plantas de mineração.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito Filtrado, Resíduo de Mineração, Pilha Seca.

ABSTRACT

In view of the recent accidents involving tailings dams with upstream construction, technologies such as filtering and dry stacking of these wastes have been developed with the aim of making the disposal of these materials a safer activity. In view of this, this work aimed to bring an overview of the research developed about this stacking technique, as a way to contribute to the survey of the main challenges and opportunities reported in the literature from studies in this area. For this, a literature review was performed using inclusion and exclusion criteria for the selection of studies. From the analysis of the selected works it was verified that factors such as the variation of the mineralogical composition and the operational costs, contribute to hinder the implementation and standardization of this technology in the mining plants.

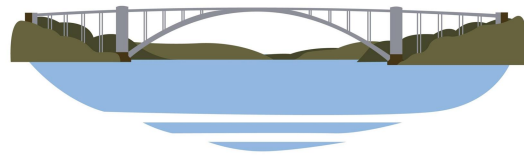
KEY WORDS: Filtered tailings, Mining Residue, Dry Stack.

INTRODUÇÃO

Os rejeitos de mineração são materiais resultantes da extração e processamento de minérios que normalmente são descartados. A sua deposição é um grande desafio para a indústria, uma vez que esses resíduos podem causar impactos ambientais significativos se não forem tratados adequadamente. Do ponto de vista de Consoli *et al.* (2023), por apresentarem normalmente uma forma de pasta aquosa devido à quantidade considerável de água utilizada para processamento do minério, a deposição dos rejeitos em grandes reservatórios denominados de barragens de rejeitos tem sido o método mais comum de disposição.

Nos últimos anos, inclusive no Brasil, vem ocorrendo acidentes associados ao armazenamento de rejeito em barragens construídas pelo método de montante. De acordo com Consoli *et al.* (2023), esses eventos levaram o governo brasileiro a impor restrições à construção de novas barragens, dado que os rejeitos depositados em barragens a montante por meio de espigões, mostraram ter baixas densidades e resistências *in situ*, além de serem propensos a falhas. Dessa forma se tornou mais urgente o desenvolvimento de métodos seguros, eficazes e sustentáveis como alternativa para barragens a montante.

Com o avanço nas tecnologias de desidratação, têm-se permitido o uso de métodos de disposição baseados na alocação de rejeitos filtrados, ao invés da deposição hidráulica em barragens de contenção. Hoje, segundo Consoli *et al.* (2022), o método de disposição e armazenamento de rejeito em pilhas secas “*Dry stack*” está sendo cada vez mais utilizado por mineradoras no Brasil e em outras indústrias que produzem grandes quantidades de resíduos como solução potencial para reduzir o risco de ruptura catastrófica de barragem e escoamento de rejeitos. Esse método envolve a secagem dos rejeitos para reduzir o teor de água, formando o que alguns autores denominam de torta. Essa técnica permite o aumento da estabilidade, reduzindo o risco de contaminação do solo, da água e contribuindo para a preservação dos ecossistemas.



OBJETIVO

Obter um panorama acerca dos estudos já desenvolvidos que utilizam a técnica de empilhamento como uma nova alternativa para disposição de rejeito de mineração.

MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO

As barragens de rejeitos são estruturas construídas com aterros compactados, que tem como função principal a contenção de resíduos sólidos e água oriundos do processo de beneficiamento dos minérios (SILVA, 2021). Sua classificação é feita em função do seu método de alteamento podendo ser: método de jusante, de linha de centro e montante conforme é ilustrado nas *figuras 1- a), b) e c)* respectivamente.

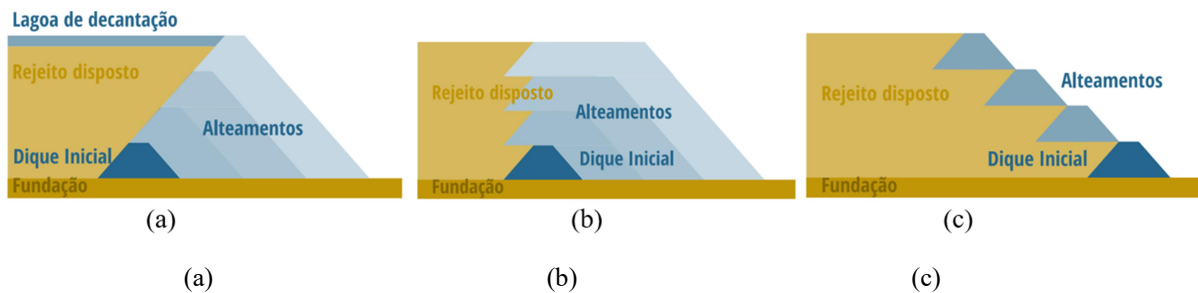


Figura 1 - Métodos de Alteamento de barragem. Fonte: ANA (2021).

No método de alteamento a jusante, os diques adicionados são construídos com o lançamento dos aterros sobre os taludes de jusantes (ANA, 2021). Dessa forma, o alteamento ocorre ampliando o dique de partida, deslocando o eixo da barragem para frente (SILVA, 2021). Segundo Vick (1983) as principais desvantagens desse método é a necessidade de grande volume de aterro mobilizado e o controle periódico das erosões hídricas e eólicas dos taludes expostos. Já no método de linha de centro, tem-se que os alteamentos mantém o eixo da barragem alinhado com o eixo do dique de partida. Ele é uma solução intermediária entre os métodos de montante e jusante, tendo como vantagens a facilidade construtiva, economia de espaços físicos e custos compatíveis (GALO, 2017).

Por fim, no método a montante, tem-se a construção do dique de partida inicial e os alteamentos são realizados na direção a montante, utilizando o rejeito como fundação. Em questões de economia é considerado o método mais barato de expansão de volume de barragens. Contudo, por se situar em rejeitos que costumam se encontrar nas condições saturadas, problemas de estabilidade relacionados a fenômenos de liquefação estática e/ou dinâmica podem comprometer a segurança dessas estruturas (CONSOLI *et al.*, 2022). Em virtude disso, sua construção passou a ser proibida no Brasil em 2019, sendo um incentivo para as empresas buscarem por alternativas mais seguras.

EMPILHAMENTO DE REJEITO FILTRADO

Em virtude da participação ativa da sociedade com relação a segurança de barragens e os avanços nas regulamentações e fiscalizações, empresas do setor industrial e de mineração passaram a intensificar suas buscas por técnicas mais seguras e sustentáveis de disposição de rejeito (ULRICH, 2019). Assim sendo, a técnica de empilhamento de rejeito filtrado vem sendo estudada em todo o mundo como uma alternativa sustentável e de substituição da disposição convencional.

Conforme Nery *et al.* (2014), o método de disposição empilhamento a seco ou “*dry stack*” consiste na disposição de resíduos em camadas com lançamentos que se alternam o que possibilita ciclos de lançamento e secagem. De acordo com o IBRAM (2016) essa é uma técnica de armazenamento de rejeitos de mineração que consiste na utilização de filtros, que permitem a drenagem da parte líquida dos rejeitos. Nesse método, a água é removida do rejeito antes da deposição, o que resulta em um depósito mais estável e menos sujeito a deslizamentos e colapsos. Além disso, essa metodologia dispensa o uso de barragens de contenção.

Crystal *et al.* (2018) comentam que o rejeito filtrado é uma alternativa viável para o gerenciamento de rejeitos. Contudo, segundo os mesmos autores, preocupações quanto à eficiência do filtro, custos operacionais e seus rendimentos são desmotivantes quanto a sua implantação, em comparação com um represamento mais convencional. Conforme Guimarães (2011) diversos fatores podem influenciar na taxa de filtragem como as características geotécnicas dos sólidos, do filtrado, os aspectos da torta e o tipo de equipamento utilizado. Williams *et al.* (2017) afirmam que a composição mineralógica e a granulometria do resíduo são os primeiros requisitos a serem analisados ao



se cogitar a opção de disposição de rejeito filtrado. Assim sendo, além dos custos associados ao emprego dessa nova tecnologia, é importante que seja compreendido que cada rejeito irá apresentar comportamento único durante o processo de filtragem, dificultando assim a elaboração de um modelo amplo.

METODOLOGIA

O presente estudo visa trazer uma discussão a respeito da nova técnica de disposição de rejeito filtrado em substituição à disposição de rejeitos em barragens. Para a realização dessa revisão foram consultados artigos e periódicos disponíveis nas seguintes bases de dados: *Scopus*, *Scielo* e o Banco de Teses e Dissertações (*BDTD*). As Palavras-chave utilizadas na busca foram: “*dry stack*”, “*mining residue*” e “rejeito filtrado”. Para o desenvolvimento da pesquisa foram seguidas as etapas expostas no fluxograma, presente na *figura 2*:

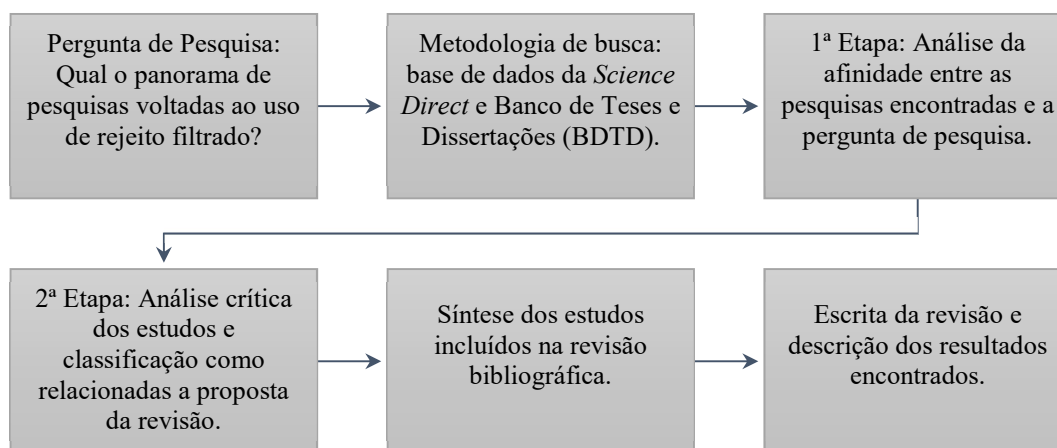


Figura 2 - Fluxograma referente ao procedimento abordado para construção da revisão sistemática. Fonte: Autores (2023).

Para a seleção das pesquisas que comporiam esta revisão foram considerados critérios de inclusão e exclusão referente ao filtro temporal, selecionando dessa forma os estudos publicados entre os anos 2018 e 2023. Em sequência, foram escolhidas as pesquisas que iriam integrar efetivamente a estrutura da pesquisa. Para isso foram lidos na íntegra todos os materiais selecionados pela triagem, sendo incluídos aqueles correlatos com a pergunta da pesquisa. No Banco de Teses e Dissertações foram encontrados 53 estudos dos quais apenas 4 foram incluídos na revisão. Na base de dados da *Science Direct* foram encontrados 99 trabalhos, desses, 1 foi analisado e classificado como correlato a pergunta de pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de contribuir com os estudos sobre a disposição de rejeitos filtrados, serão abordados neste item os resultados encontrados pelos autores a respeito do desenvolvimento dessa nova técnica de disposição. Na Tabela 1 são apresentados os estudos incluídos nessa pesquisa após análise minuciosa dos trabalhos encontrados nas bases de dados utilizadas.

Tabela 1 - Informações dos estudos incluídos na revisão. Fonte: Autores (2023).

| Referência | Título | Resultados Relevantes |
|--------------|--|--|
| Silva (2018) | Diretrizes de projeto de sistema de empilhamento de rejeito de minério de ferro filtrado e compactado - Caso estudo: Minerita Minérios Itaúna. | É possível construir a pilha de rejeito utilizando parâmetros de duas amostras com diferentes graus de compactação, com fatores de segurança aceitáveis, alto índice de confiabilidade e baixa probabilidade de falha. |



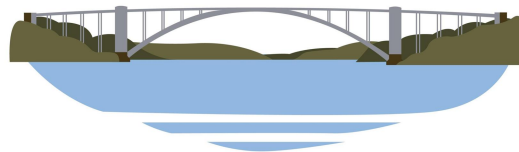
| | | |
|------------------------------------|--|---|
| Alves (2020) | Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. | O empilhamento de rejeito filtrado se mostrou ser mais caro do que o método de armazenamento em barragens. |
| Silva (2020) | Estudo da implementação de um sistema de disposição de rejeito desaguado de mineração de bauxita laterítica. | O depósito <i>dry stack</i> projetado ocupa uma área 9,3 vezes menor do que os reservatórios de secagem sem considerar as áreas de ocupação das barragens. |
| Braga (2021) | Utilização de tecnologias de filtração de rejeitos para empilhamento a seco. | Possível aplicação das tecnologias de filtração a vácuo para rejeito arenoso e ultrafino associados. |
| Whatnall, Barber e Robinson (2021) | <i>Tailings Filtration Using Viper Filtration Technology - a Case Study.</i> | A utilização da tecnologia patenteada <i>Viper Filtration</i> possibilitou uma maior redução do teor de umidade das duas amostras de rejeitos analisadas quando comparadas ao filtro de correia a vácuo convencional. |

A pesquisa de Silva (2018), realizou um estudo em duas etapas a fim de verificar a estabilidade da pilha de rejeito filtrado por filtro prensa. Na primeira etapa, foram efetuados ensaios geotécnicos em amostras de rejeito de minério de ferro filtrado com teor de umidade de 15% e três diferentes graus de compactação (85%, 90% e 95%). Na segunda etapa do estudo, um aterro experimental foi construído para realizar análises de estabilidade da pilha de rejeito. As análises de estabilidade determinísticas e probabilística para a seção crítica selecionada do modelo de pilha, com os parâmetros específicos para cada amostra referente as cinco fases do aterro experimental, apresentaram fatores de segurança acima do coeficiente de segurança admissível para cenários estáticos e pseudo estáticos com graus de compactação acima de 90%, e fatores de segurança baixo para graus de compactação inferiores a 90%.

Alves (2020) em seu estudo avalia o andamento da implementação do empilhamento de rejeito filtrado em cinco minas diferentes, sendo duas de minério de ferro e três de polimetálico. Em visitas a cada uma dessas plantas, o autor analisou a dinâmica de produção do rejeito filtrado e as dificuldades enfrentadas por cada uma delas. O autor constatou que a adoção dessa técnica de disposição pelas empresas, só é justificada em virtude das pressões sociais e das dificuldades para se obter as licenças de construção e alteamento. Se comparada ao método tradicional de disposição de rejeitos em barragens, o uso do empilhamento se mostrou em algumas empresas ter um custo operacional até seis vezes maior do que a técnica convencional. Dentre as dificuldades apontadas tem-se a durabilidade dos filtros e os problemas relacionados aos transportes do material até a área de compactação.

Silva (2020) desenvolve no seu trabalho um estudo de caso de uma mineradora de bauxita laterítica, onde elaborou uma seção conceitual do depósito *dry stack*, levando em consideração as condições construtivas no período seco e chuvoso. Após a conclusão do estudo, o autor, destaca que é possível calibrar o tempo de operação do filtro prensa para que forneça torta próxima da umidade ótima de compactação, reduzindo-se a necessidade de correção de umidade na construção do depósito *dry stack*. Em relação ao depósito, ele aponta que a partir das análises de estabilidade realizadas na seção conceitual de projeto, chegou-se a um fator de segurança para o depósito igual a 2,0, indicando segurança no equilíbrio estrutural. No que tange ao comparativo direto entre o depósito *dry stack* e os reservatórios de secagem, típicos do empreendimento, foi constatado que para uma capacidade de armazenamento de 25.460.590 toneladas de rejeito (base seca), equivalente a 11,8 anos de vida útil, o depósito *dry stack* ocupa uma área de 476.624 m² (47,7 ha), que é 9,3 vezes menor que a área ocupada por 8 reservatórios típicos do empreendimento, necessários para atender os mesmos 11,8 anos de vida útil.

Braga (2021) realizou verificações para os rejeitos provenientes do beneficiamento do minério de ferro a partir de processos de disposição de rejeitos que promovem uma máxima eficiência na separação sólido-líquido. Neste estudo, foram feitos testes utilizando três tipos de tecnologias de filtração, sendo estas: filtro de disco convencional, filtro cerâmico e filtro prensa. Para proceder com os testes, as amostras foram preparadas com diferentes composições entre material arenoso e material ultrafino, adensamento e coagulação da polpa. Foi realizada uma análise para obter uma comparação entres as diversas variáveis abrangidas pelo trabalho. Assim, as verificações foram feitas conforme cada



variável era capaz de influenciar no processo da filtração, tornando possível verificar a interferência da tecnologia, coagulação e da diluição da polpa. A umidade residual da torta filtrada e a produtividade dos filtros também foram analisadas.

Foi verificado ainda que a constituição da amostra influencia no funcionamento dos filtros de tecnologia a vácuo, já para o filtro prensa não houve diferença significativa. Observou-se ainda que a diluição da polpa influencia no desempenho da filtração. O autor ressalta que para instalar as técnicas de filtração de rejeitos em escala industrial é necessário antes obter um detalhamento dos ensaios para determinar especificações referentes ao processo e adequação a esse tipo de instalação.

Whatnall *et al.* (2021) realizaram um estudo de caso a respeito da utilização da tecnologia *Viper Filtration* a ser empregada em projeto de pilha de rejeitos de ouro em substituição ao filtro de correia a vácuo, em detrimento da incapacidade que esse tipo de filtro apresenta de retirar de maneira efetiva a umidade dos rejeitos para uma distribuição granulométrica de partículas mais finas. Dessa forma, os autores objetivaram testar, mensurar e apresentar as melhorias de desempenho dessa nova tecnologia - a qual consiste em uma adaptação do filtro de correia a vácuo, empregando uma série de conjuntos de rolos de vibração (fornecem consolidação, compactação e energia de vibração na torta sob pressão de vácuo constante).

Nesse programa de teste piloto foram considerados dois tipos de amostra, uma de rejeitos com $P_{80} \sim 40 \mu m$ (CIP) e uma outra com $P_{80} \sim 30 \mu m$ (TUF). Para realização do teste foi considerado uma obtenção de teor de umidade inferior a 20% em peso da torta de rejeito filtrado, e em ambos os tipos de rejeito, o objetivo foi alcançado com o uso de três conjuntos de rolos de vibração, registrando-se uma redução de 4,2% p/p e 5,7% p/p para as amostras CIP e TUF, respectivamente, quando comparadas à operação com filtro de correia a vácuo convencional. Com isso, os autores destacam que além de melhorar o teor de umidade, essa adaptação também promove melhorias na taxa de produção e no desempenho de descarga da torta.

Em suma, os estudos abordaram as barreiras de aplicação dessa tecnologia em detrimento do seu maior custo quando comparado ao método atualmente empregado de disposição úmida em barragens de contenção, trazendo que a viabilidade do uso do filtro está fortemente relacionada às questões ambientais e a segurança quanto aos rompimentos. Além disso, foi observado-se lacunas com relação aos custos e durabilidade da implementação de diferentes tipos de filtros. Ademais, pode-se destacar a necessidade de testes pilotos por parte das empresas em relação a pilha de rejeito por elas produzidas, a fim de compreender a influência que fatores como clima e o grau de compactação tem sobre a estabilidade dos seus aterros.

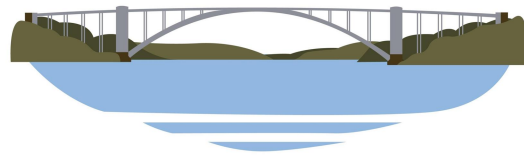
CONCLUSÕES

A partir das análises dos trabalhos selecionados, pode-se concluir que os estudos desenvolvidos acerca da questão de pesquisa abrangem principalmente os tipos de filtro que podem ser implementados, sendo estes dependentes, principalmente, da composição granulométrica do material. De modo geral, foi possível verificar que nos estudos analisados há uma complexidade de fatores que interferem na implementação do empilhamento de rejeito filtrado. Pode-se observar que as principais dificuldades encontradas estão relacionadas com a determinação da umidade da torta de rejeito e do tipo de filtração empregada. Esses fatores, por estarem, diretamente, relacionados com a composição do rejeito, impedem que seja estabelecido uma padronização de modelo de implementação dessa tecnologia.

Além disso, comparando os custos de operação entre o método de disposição em barragens e por empilhamento, tem-se que o alto valor investido para a manutenção dessa última tecnologia acaba dificultando a sua aplicação. Sendo assim, ressalta-se a necessidade de desenvolvimento de novos estudos que tenham como foco a elaboração de procedimentos capazes de promover a redução de custos, tornando assim, a tecnologia de empilhamento de rejeito mais viável financeiramente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens**. 2020. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
2. ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Entenda o Relatório de Segurança de Barragens**. Brasília: ANA, 2021.
3. BRAGA, F. Y. A. **Utilização de Tecnologias de Filtração de Rejeitos para Empilhamento a seco**. 2021. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.
4. CONSOLI, N. C.; VOGT, J. C.; SILVA, J. P. S.; CHAVES, H. M.; SCHEUERMANN FILHO, H. C.; MOREIRA, E. B.; LOTERO, A. Behaviour of Compacted Filtered Iron Ore Tailings–Portland Cement Blends: new brazilian



trend for tailings disposal by stacking. **Applied Sciences**, v. 12, n. 2, p. 836, Jan. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app12020836>.

5. CONSOLI, N. C., et al. Evaluation of Strength Parameters for Application in Cemented Iron Ore Tailings Stacks. **Indian Geotechnical Journal**, 08 de fev. 2023. <http://doi.org/10.1007/s40098-023-00712-9>.
6. CONSOLI, N. C., et al. Response of Artificially Cemented Iron Ore Tailings for Dry Stacking Disposal over a Wide Range of Stresses. **Indian Geotechnical Journal**, 10 Jan. 2023. <http://doi.org/10.1007/s40098-023-00711-w>.
7. CRYSTAL, C.; CHORE, C. & EZAMA, I. (2018) Filter-pressed dry stacking: design consideration based on practical experience. In: Proceedings Tailings and Mine Waste. Keystone, Colorado, EUA, 2018. **Anais**. Disponível em: Acesso em, 10 de março.
8. GALO, D. B. **Análise de riscos em barragens de rejeitos com o uso de técnicas semiprobabilísticas de estabilidade de taludes - Um estudo de caso**. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.
9. GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando sua disposição em pilhas**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2011.
10. IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília, 2016.
11. NERY, K.; ÁVILA, J.; SCARMÍNIO, M.; BITTAR, L.; MORENO, R.; SENO, R. Study of Alternative Technologies for Residue Disposal (Red Mud). **Light Metals 2014**, p. 161-163, 4 2014. John Wiley & Sons, Inc. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118888438.ch28>.
12. SILVA, F. M. **Avaliação Probabilística da Estabilidade de uma Barragem de Rejeitos**. 2021. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.
13. SILVA, L. J. C. **Diretrizes de Projeto de Sistema de Empilhamento de Rejeito de Minério de Ferro Filtrado e Compactado - Caso estudo: Minerita Minérios Itaúna**. 2018. 265 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
14. SILVA, M. C. **Estudo da Implementação de um Sistema de Disposição de Rejeito Desaguado de Mineração de Bauxita Laterítica**. 2020. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.
15. ULRICH, B. (2019). **Practical thoughts regarding filtered tailings**, in AJC Paterson, AB Fourie & D Reid (eds). Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings. Australian Centre for Geomechanics, pp. 71-79.
16. VICK, S.G. **Planning, design, and analysis of tailings dams**. New York: Wiley Interscience, 1983.
17. WHATNALL, O.; BARBER, K.; ROBINSON, P. Tailings Filtration Using Viper Filtration Technology—a Case Study. **Mining, Metallurgy & Exploration**, v. 38, n. 3, p. 1297-1303, 25 Jan. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42461-021-00378-y>.
18. WILLIAMS, R, ZINK, D; O'BRIEN, S. **Filtered tailings adds value in cost competitive industries**, in A Wu & R Jewell (eds), Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, University of Science and Technology Beijing, Beijing, pp. 363-370. 2017.