

ASPECTOS DA DRENAGEM DE BARRAGENS DE REJEITO COM ALTEAMENTO A MONTANTE: CASO DA BARRAGEM I, DA MINA DE CÓRREGO DO FEIJÃO, EM BRUMADINHO - MG

ASPECTS OF THE DRAINAGE OF TAILINGS DAMS WITH UPSTREAM LIGHTING: THE CASE OF DAM I, OF THE CÓRREGO DA MINA DO FEIJÃO, IN BRUMADINHO - MG

Carlos José de Petribú Guimarães¹
Manoel Isidro de Miranda Neto²

RESUMO: No Brasil, acidentes graves envolvendo barragens de rejeito têm sido frequentes. Este trabalho procura mostrar aspectos dessas barragens relacionados com o sistema de drenagem que podem comprometer a segurança, em especial nas barragens de rejeito construídas com alteamento a montante. O método adotado consiste na pesquisa bibliográfica e apresentação de algumas técnicas e dispositivos de drenagens e sua relação com a percolação, carregamentos e desenvolvimento de poropressões que possam afetar a segurança do barramento. São também apresentadas técnicas construtivas e por fim é apresentado um estudo de caso envolvendo o acidente, ocorrido em janeiro de 2019, na barragem da mina do Córrego do Feijão no município de Brumadinho no Estado de Minas Gerais. Em que pese o acidente não ter ainda uma definição formal técnica e jurídica sobre quais fatores possam ter contribuído para o colapso, sem dúvida pode-se supor que uma causa importante pode estar relacionada com o desenvolvimento de poropressões no maciço. A questão relacionada com causas externas não está sendo tratada neste trabalho, embora sobrecargas e vibrações possam também contribuir para uma perda de estabilidade do barramento. Por fim, são apresentadas algumas considerações indicadas em relatórios técnicos que apontam algumas hipóteses sobre a dinâmica do acidente e uma possível vinculação com a presença de água no maciço composto por resíduos da mineração de ferro, contidos por barragem alteada a montante e encerrada em 2016 após o décimo alteamento.

213

Palavras-chave: Alteamento a Montante. Drenagem Horizontal Profunda.

¹ Mestrando em Defesa e Segurança Civil pela UFF, Graduado em Engenharia Civil, pela Universidade Santa Úrsula (USU) - RJ, Pós-Graduado (especialização) em Engenharia de Fundações, pela COPPE / UFRJ. e-mail: carlos_jpg@yahoo.com.br

² Professor Orientador. Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense (UFF). Professor do curso de pós-graduação em Defesa e Segurança e Civil da UFF. Pós-Graduado (Mestre) em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Geotecnia, atuando principalmente nos seguintes temas: engenharia geotécnica, investigação geoambiental, remediação de áreas contaminadas. e-mail: Manoel.isidro@gmail.com.

ABSTRACT: In Brazil, serious accidents involving tailings dams have been frequent. This work seeks to show aspects of these dams related to the drainage system that can compromise safety, especially in tailings dams built with upstream raising lifts. The method adopted consists of bibliographical research and presentation of some drainage techniques and devices and their relationship with percolation, loading and development of pore pressures that may affect the safety of the dam. Construction techniques are also presented and, finally, a case study involving the accident, which occurred in January 2019, at the Córrego do Feijão mine dam in the municipality of Brumadinho in the State of Minas Gerais is presented. Despite the fact that the accident does not yet have a formal technical and legal definition of which factors may have contributed to the collapse, it is undoubtedly possible to assume that an important cause may be related to the development of pore pressures in the massif. The issue related to external causes is not being addressed in this work, although overloads and vibrations can also contribute to a loss of bus stability. Finally, some considerations indicated in technical reports are presented that point out some hypotheses about the dynamics of the accident and a possible link with the presence of water in the massif composed of iron mining residues, contained by an upstream elevated dam and closed in 2016 after the tenth upgrade.

Keywords: Upstream Raising Lifts. Deep Horizontal Drainage.

INTRODUÇÃO

Acidentes envolvendo ruptura de barragem de rejeito têm sido frequentes no Brasil, em especial no estado de Minas Gerais. Pode-se afirmar que alguns desses eventos envolvem a forma como o material é depositado, que contribui para que a presença de água no reservatório seja um importante fator a se considerar.

Em relação a barragens de acumulação de água, a ANA (2021) relata a ocorrência de alguns acidentes, sobretudo nas regiões sudeste e centro-oeste do país, indicando que a maioria desses eventos ocorre devido às chuvas intensas nos meses de janeiro a março.

Para os rejeitos de mineração, em que pese a legislação sobre segurança de barragens (BRASIL, 2010) ter sido alterada (BRASIL, 2020), no sentido de proibir a construção pelo método a montante, o presente trabalho considera que existem muitas barragens de rejeito ainda em operação, ou até encerradas, que justificam a preocupação com esse tipo de empreendimento. Ressalta-se que a lei (BRASIL, 2010) estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

Após o acidente ocorrido com a barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho MG, a Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio do Comitê Técnico de Seguran-

ça de Barragens de Rejeitos de Mineração (CTBMin), informou que foram vistoriadas 249 barragens de mineração, restando vistoriar 186 (ANM, 2021). Isso mostra o tamanho do problema relacionado com a disposição de rejeitos no Brasil.

OBJETIVO GERAL

O presente estudo abordará os aspectos da drenagem de barragens de rejeitos com alteamento a montante e apresentará o caso da Barragem de I da Mina de Córrego do Feijão em Brumadinho MG.

MATERIAIS E MÉTODOS

PROPRIEDADES DOS REJEITOS

Todo material descartado durante o processo de beneficiamento de minérios, é denominado rejeito (ABNT, 2017).

O rejeito deve, necessariamente, ser disposto na forma mais adequada no meio ambiente. Esses rejeitos são, normalmente, dispostos em barragens. O aumento das atividades de mineração pode levar a um aumento significativo na geração de volume de rejeitos.

Segundo Nieble (1986), rejeitos são definidos como a fração do minério destituída de mineral útil ou valor econômico originada no processo de beneficiamento mineral. Os rejeitos podem ser caracterizados por três fases distintas: sólida, líquida e gasosa, que na prática estão dispersas na massa, mas podem, para efeitos teóricos, serem separadas. Em geral, pode-se dizer que os rejeitos se classificam em rejeitos totais, underflow e lamas. Os rejeitos totais constituem o produto dos processos de britagem e moagem, enquanto, os termos *under-flow* e lamas são utilizados para os rejeitos grossos e finos obtidos por concentrações posteriores.

Segundo Vick (1983), grande parte do comportamento dos rejeitos é explicável a partir de sua origem geológica e de seu processamento. Porém, dentro de limites amplos, algumas generalizações podem mostrar um resumo útil das características físicas do rejeito. Deste modo, os rejeitos podem ser agrupados em quatro categorias gerais segundo a granulometria e plasticidade.

Em razão da grande diversidade dos rejeitos de mineração, as características dos materiais depositados podem apresentar variações significativas, quer em termos de diluição (o overflow dos hidrociclones chega ao máximo de 5% em peso, enquanto, que o *under-flow* dos espessadores frequentemente atinge 60%, ambos em peso), quer em termos de comportamento reológico, onde os rejeitos depositados podem ser muito plásticos (argilas/lamas) ou não plásticos (areias/grosseiros) (SOARES, 2010).

ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITO

Tipicamente, para Barragens de Rejeito, se identificam três métodos construtivos básicos. Estes métodos fazem referência à técnica e direção de alteamento empregado, seguindo em direção montante, jusante ou acompanhando uma linha de centro. Tais barramentos podem ser executados com material proveniente de áreas de empréstimo, estéril ou com o próprio rejeito do beneficiamento (opção mais comum), desde que tratado e que atenda especificações geotécnicas de projeto. Para tanto, este rejeito é passível de processos adicionais como a ciclonagem, para deslamarem, passando a ser chamado de aterro hidráulico (MAFRA, 2016).

MÉTODO CONSTRUTIVO DE ALTEAMENTO A MONTANTE

Segundo Araújo (2006), o alteamento a montante, ilustrado na Figura 1, é a técnica mais antiga, simples e o método mais econômico de construção de barragens. A etapa inicial na execução deste tipo de barragem consiste na construção de um dique de partida, normalmente de material argiloso ou enrocamento compactado. Construído o dique de partida, o rejeito é lançado por canhões em direção a montante da linha de simetria do dique, formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente fornecerá material de construção para o primeiro alteamento. O processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida.

Para que o material lançado sirva de base para um alteamento, exige-se que os rejeitos contenham de 40 a 60% de areia e baixa densidade de polpa, favorecendo a segregação granu-lométrica (SOARES, 2010).

Ressalte-se também, que nesse método construtivo existe uma dificuldade na

implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível d'água dentro da barragem, constituindo um problema adicional com reflexos na estabilidade da estrutura (FARIAS; PARANHOS, 2019).



Figura 1 - Método construtivo de alteamento à montante.

Fonte: Albuquerque Filho (2004).

As empresas mineradoras adotam, preferencialmente, o método de montante, que apresenta como principais vantagens o baixo custo de sua construção, a necessidade de menor volume de materiais, a rapidez e a simplicidade na execução dos alteamentos, normalmente realizados pela equipe técnica da própria mineradora (VICK, 1983).

MÉTODO CONSTRUTIVO DE ALTEAMENTO A JUSANTE

A construção de barragens de rejeitos pelo método de jusante, tem como premissa que a construção dos alteamentos sucessivos, não fossem executados sobre o rejeito previamente depositado e pouco consolidado, como ilustra a Figura 2.

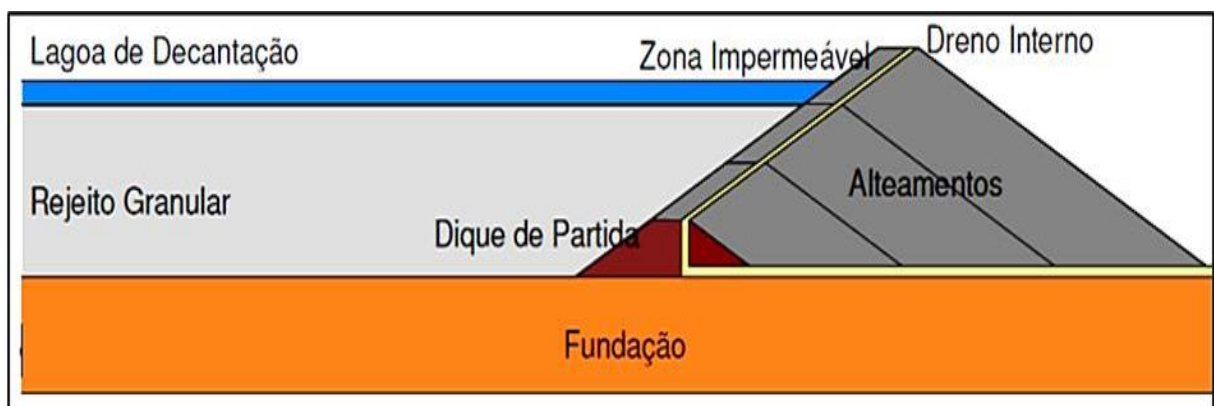


Figura 2 - Método construtivo de alteamento à jusante.

Fonte: Albuquerque Filho (2004).

Este método necessita maiores volumes de material, gerando custos maiores, associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material. Além disto, com este método, a área ocupada pelo barramento é muito maior, devido ao progresso da estrutura para jusanteem função do acréscimo.

Klohn (1981) relaciona uma série de vantagens envolvidas no processo de construção de barragens de rejeitos com alteamentos sucessivos à jusante. Dentre elas, destacam-se:

- ✓ Nenhuma parte da barragem é construída sobre o rejeito depositado e conseqüentemente pouco consolidado;
- ✓ O processo de lançamento e compactação da barragem pode ser controlado pelas técnicas construtivas convencionais;
- ✓ O sistema de drenagem interna pode ser executado durante a construção dos alteamentos da barragem, permitindo o controle da linha de saturação e aumentando a estabilidade da barragem;
- ✓ A barragem construída pelo método jusante resiste satisfatoriamente a efeitos dinâmicos, como forças sísmicas;
- ✓ As atividades de construção da barragem não provocam interferência na operação de rejeitos;
- ✓ A construção escalonada sem comprometimento da segurança da estrutura;
- ✓ Não existe limitação técnica quanto a altura da estrutura.

Ferraz (1993) destaca ainda como vantagem do método de jusante a possibilidade de redução significativa das dimensões do extravasor de cheias. A inexistência de restrições ao contato da lâmina d'água junto à crista da barragem, devido à presença de uma zona impermeável no talude de montante, justifica esta afirmação. Assim, o nesse sentido, a adoção de estruturas construídas pela técnica de alteamento para jusante possibilitou a execução de barragens de rejeitos de maior porte e com fatores de segurança mais satisfatórios.

A principal desvantagem na construção de barragens de rejeitos pelo método de jusante destaca-se a necessidade de grandes volumes de material e conseqüentemente o alto custo.

MÉTODO DE ALTEAMENTO POR LINHA DE CENTRO

O método de alteamento de linha de centro, Figura 3, apresenta uma solução de construção com variação do método de alteamento a jusante, neste caso, o alteamento da crista é realizado no sentido vertical. O primeiro alteamento é feito com o aterro, sobre o limite mon- tante da praia e o talude de jusante do maciço do dique de partida, com os alteamentos posteriores sendo coincidentes a este eixo durante toda a vida útil da barragem (ALBUQUERQUE,2004).

Segundo Albuquerque Filho (2004), o método da linha de centro pode ser considerado uma solução geometricamente intermediária entre os dois métodos anteriormente descritos, agregando assim vantagens e desvantagens de ambos. Entretanto, o comportamento estrutural destas estruturas encontra-se mais próximo das barragens construídas pelo método de jusante.

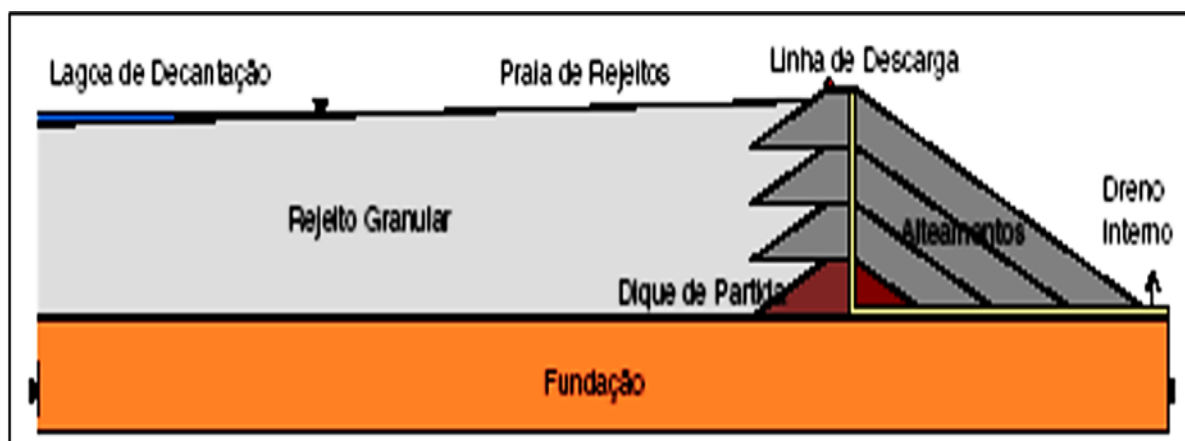


Figura 3 - Método construtivo de alteamento por linha de centro.

Fonte: Albuquerque Filho (2004).

Segundo Assis e Espósito (1995), seu comportamento geotécnico se assemelha mais a barragens por alteamento a jusante, tendo seu eixo vertical de alteamento coincidente com o eixo do dique inicial. Neste método, torna-se possível a utilização de zonas de drenagem in- ternas em todas as fases de alteamento, o que possibilita o controle da linha de saturação e promove uma dissipação de poropressões, tornando o método apropriado para utilização inclusive em áreas de alta sismicidade.

Lozano (2006) apresenta desvantagens no uso deste método: (i) a necessidade de sistema de drenagem eficiente; e (ii) a necessidade de sistema de contenção à jusante,

porque a saturação do rejeito compromete a estabilidade do maciço, além da complexidade de operação, os investimentos globais podem ser altos.

Segundo Troncoso (1997), como grande vantagem deste método em relação ao de jusante, pode-se destacar a necessidade de um menor volume de material compactado para construção do corpo da barragem, mas esse tipo de estrutura pode apresentar ângulos muito inclinados na face de montante. Se a parte superior do talude perde eventualmente o confinamento, podem aparecer fissuras, causando problemas de erosão, e aumentos de poropressão.

DRENOS HORIZONTAIS PROFUNDOS – DHP

As técnicas de traçado das redes de fluxo permitem a consideração da anisotropia e heterogeneidades. O traçado das redes requer experiência, sendo úteis às recomendações propostas por Casagrande (1964), Taylor (1948) e Cedergren (1968).

O dreno horizontal profundo (DHP), ilustrado na Figura 4 e Figura 5, tem por finalidade drenar a água de percolação interna do maciço de solo ou rejeito, rebaixando o nível do lençol freático, a fim de minimizar a carga exercida sobre o talude ou o muro de contenção, gerando também alívio de poropressões ou pressões neutras.

Diversos autores (CARVALHO, 1991; DOBEREINER; VAZ, 1998; ANDRADE, 2003; TECPER, 2021a; MÜLLER, 2004) propõem a utilização de DHP para rebaixar o nível da água subterrânea de modo eficaz.



Figura 4 - Perfuratriz realizando um DHP, com limpeza de furo.

Fonte: TECPER (2021b).

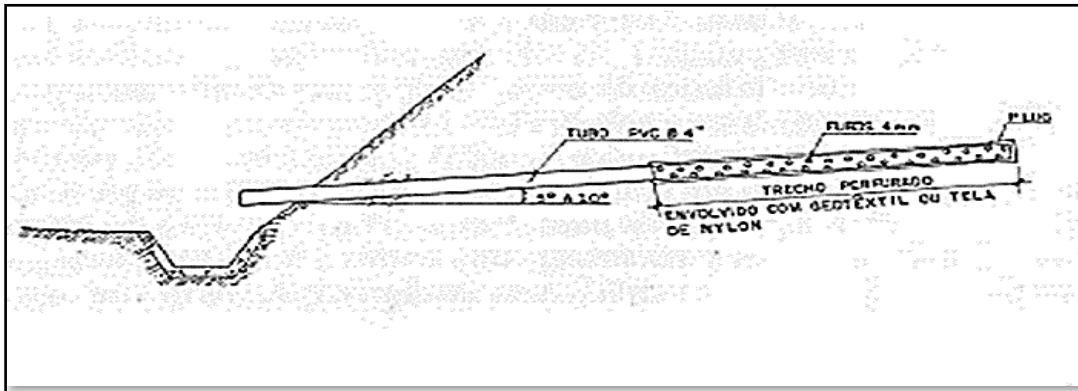


Figura 5 - Desenho esquemático de um DHP.
Fonte: Carvalho (1991).

As aplicações deste método demonstram que drenos mais longos e espaçados são mais eficientes do que os drenos curtos com espaçamento menor, pois o rebaixamento ocorre ao longo do dreno e quanto mais longo mais distante da face do talude estará a superfície freática. Assim, quanto mais suave o talude, maior deverá ser o comprimento do dreno (ANDRA- DE, 2003).

O revestimento dos drenos deve ocorrer imediatamente após a conclusão dos trabalhos de perfuração e retirada das hastes, para evitar que ocorram desmoronamentos no furo, impedindo o revestimento do dreno.

Pode também ser utilizada tubulação de PVC tradicional rígido, com diâmetro de 38 a 50 milímetros, sendo a maior parte constituída por um tubo filtrante (furos ou ranhuras) envolvido em geotêxtil quando instalado em solo ou envolvido em duas voltas de tela plástica quando instalado em rocha (Figura 6).

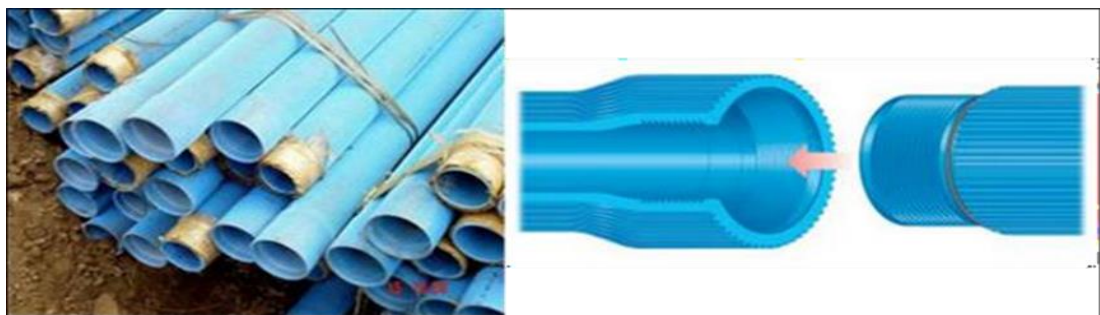


Figura 6 - Tubo de PVC Geomecânico.

Fonte: TECPER (2021b)

Segundo Andrade (2003), após um período de operação dos DHP é possível avaliar o rebaixamento de nível d'água por INAS (indicadores de nível de água subterrânea), adotando DHP mais profundos ou novos DHP caso persistam surgências de água no talude.

A Figura 7 (CARVALHO, 1991) ilustra o efeito da instalação de DHP em taludes com superfície freática alta e com surgências no pé do talude, sendo que, após um tempo de operação dos DHP as águas subterrâneas foram afastadas da superfície potencial de ruptura, devido ao rebaixamento do nível de água.

Outros autores também apresentam resultados semelhantes aos da Figura 7, quanto ao rebaixamento do nível de água após a utilização dos DHP, pode-se citar Alonso (2007, p.139) e Bastos (2006, p. 27).

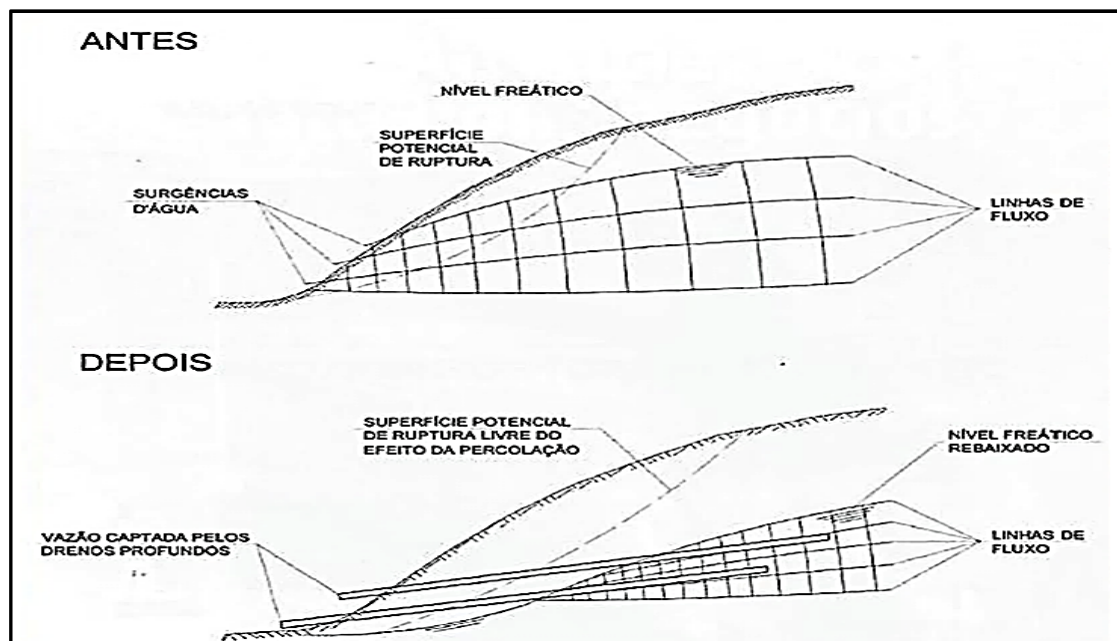


Figura 7 - Nível de água antes e depois da instalação dos DHP.

Fonte: Carvalho (1991, p. 241)

Pohll e outros (2013) simularam o efeito do dreno no rebaixamento do nível d'água em taludes. Os resultados mostram a eficiência dos drenos, considerando principalmente o seu comprimento, elevação, espaçamento e características do aquífero. São expostos os resultados das simulações em forma de seções transversais, apresentando o comportamento do nível de água em um terreno inclinado em cada mudança nos parâmetros do dreno, sob o estado de recarga constante e com mesma condutividade hidráulica do material geológico.

A Figura 8 ilustra uma seção transversal idealizada sem drenagem e com drenos de diversos comprimentos, instalados na base do declive. Essa simulação mostra o efeito do comprimento do dreno no rebaixamento do nível d'água (NA).

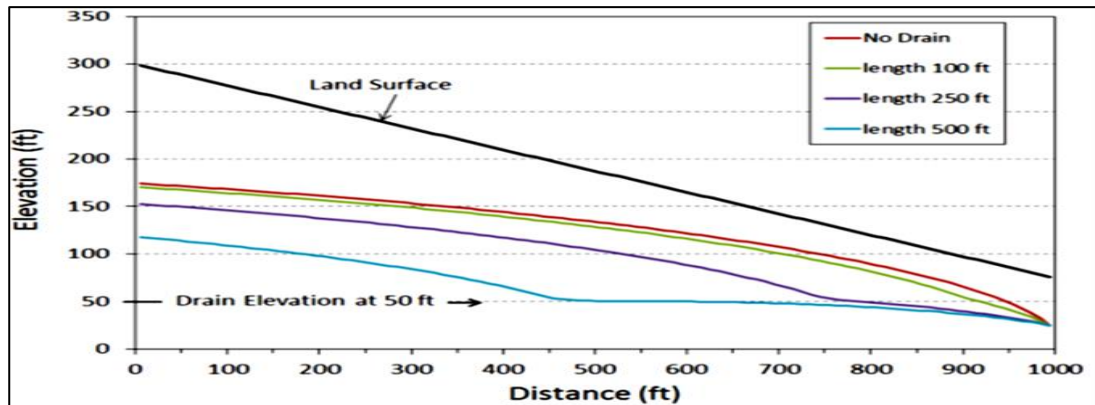


Figura 8 - Variação do NA em função dos comprimentos dos DHP.

Fonte: Pohll et al. (2013).

A Figura 9 ilustra uma seção transversal sem drenagem e com drenos horizontais profundos (DHP), instalados na base do declive, e com diversas elevações (inclinações). Essa simulação mostra o efeito da inclinação do dreno no rebaixamento do nível d'água (NA). Nota-se que os drenos com menor inclinação propiciam uma maior queda do nível de água (POHLL et al., 2013).

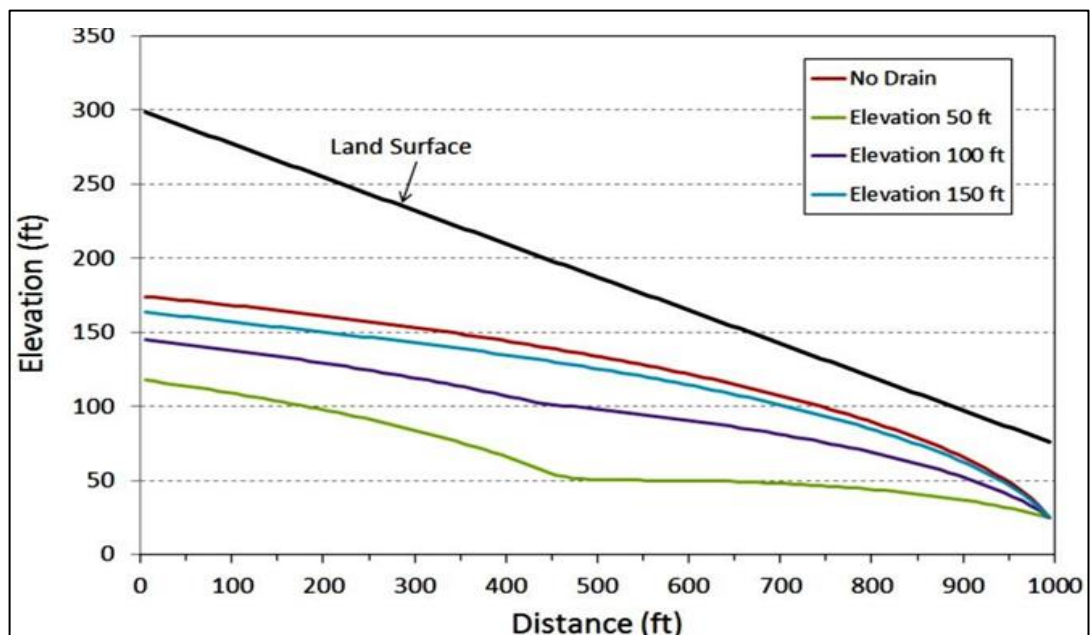


Figura 9 - Variação do NA para drenos de 500 pés com diferentes elevações.

Fonte: Pohll et al. (2013).

A Figura 10 ilustra o resultado da simulação para drenos com diferentes espaçamentos, mantidas mesmas inclinações e comprimento. Para essa simulação os drenos foram posicionados com uma elevação de 50 pés, que foi a que melhor apresentou resultado na simulação anterior. Nessa simulação, dada igual recarga e características hidráulicas do terreno, diminuir o espaçamento dos DHP acarreta maior redução do NA (POHLL et al., 2013).

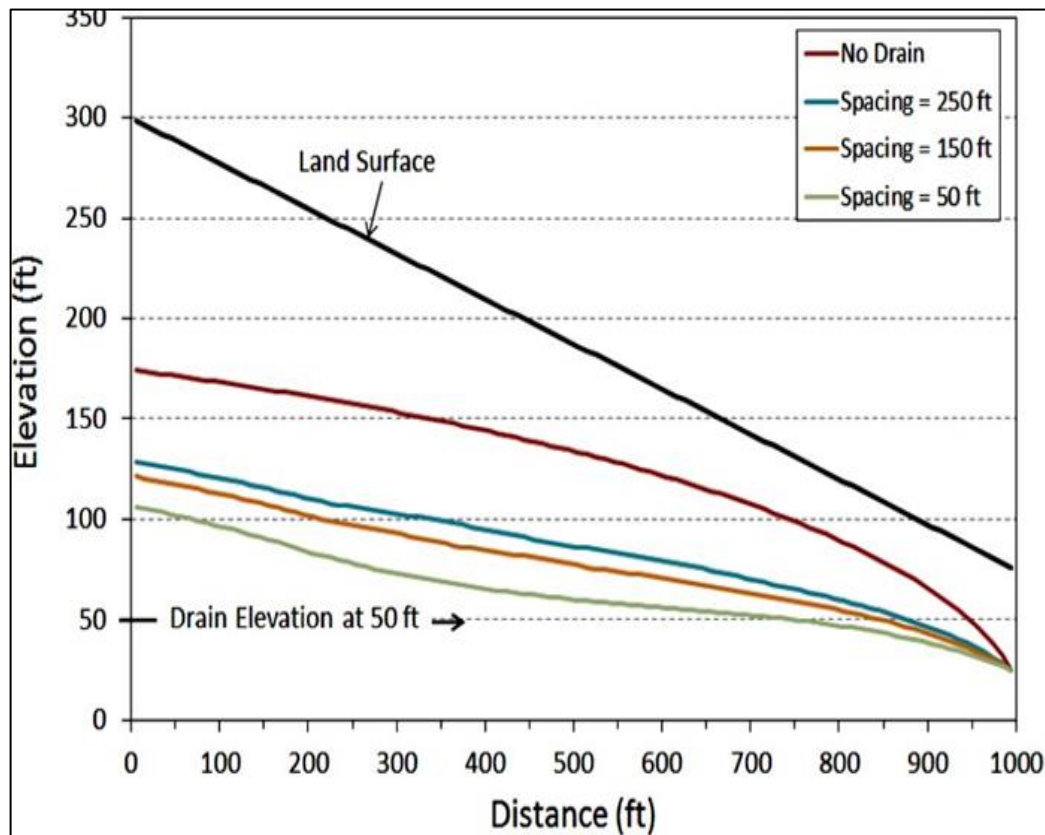


Figura 10 - Variação do NA em função do espaçamento dos DHP.

Fonte: Pohll et al. (2013).

Pohll e outros (2013) verificaram a resposta do nível da água em função das características do local. As características examinadas foram a condutividade hidráulica (K) e taxa de recarga (R), ambas na unidade de pés por dia. O comprimento do dreno é de 250 pés e na Figura 20 o dreno está representado por uma linha preta na elevação de 50 pés.

Os resultados da modelagem, apresentados na Figura 20, indicam que, para diferentes características (taxa de recarga e condutividade hidráulica), há diferentes respostas para

a posição do nível d'água. Na Figura 11, pode-se verificar que o nível de água aumenta com o aumento da taxa de recarga e/ou com a redução da condutividade hidráulica.

No caso, a condutividade hidráulica e as taxas de recarga são importantes para o projeto de drenagem e precisam ser consideradas.

O estudo de Pohll e outros (2013) mostrou que, além das condições hidrológicas e propriedades hidráulicas do meio, o projeto de drenagem precisará considerar também espaçamento comprimento e inclinação dos DHP.

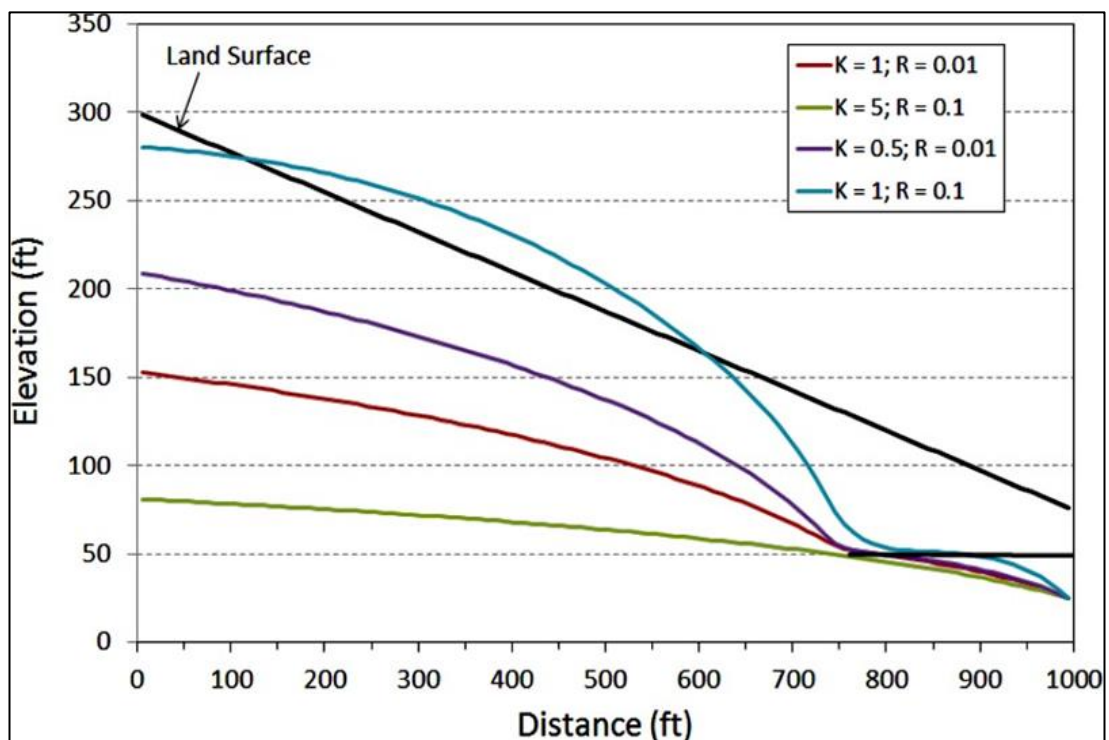


Figura 11 - Variação do NA em função da condutividade hidráulica (K) e da taxa de recarga (R).
Fonte: Pohll et al. (2013).

ESTUDO DE CASO

CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO

A bacia do Rio Paraopeba abrange área de drenagem da ordem de 13.640 km², e está localizada na região central do estado de Minas Gerais, próxima a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), como ilustrado na Figura 12. Possui importantes mananciais de abastecimento da RMBH, que atende aproximadamente 5,15 milhões de habitantes. Três

de seus afluentes tem em suas bacias, reservatórios usados para este abastecimento: Rio Manso; Ribeirão Juatuba; e Rio Betim (ANA, 2019).

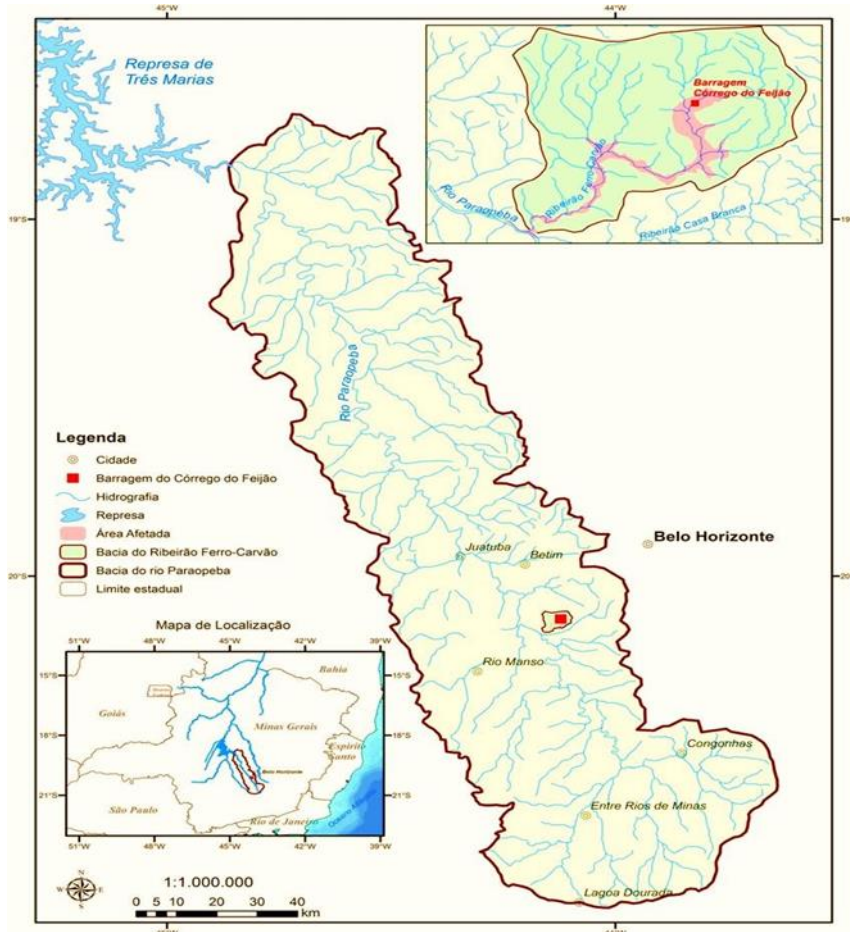


Figura 12 - Localização da bacia do Rio Paraopeba.

Fonte: CPRM (2019).

O Rio Paraopeba é afluente da margem direita do Rio São Francisco e é um dos formadores do reservatório da usina de Três Marias, da Companhia Energética do Estado de Minas Gerais (CEMIG). No Rio Paraopeba existem as usinas hidrelétricas de Salto do Paraopeba Retiro Baixo, e a barragem de nível da usina termelétrica de Igarapé.

Os principais usos da água da bacia do rio Paraopeba são: geração de energia elétrica; abastecimento público; abastecimento industrial, com destaque para mineração e irrigação.

O Ribeirão Ferro Carvão, afluente pela margem direita do rio Paraopeba, forma uma sub-bacia com área de 32,8 km², e a vazão média em sua foz é da ordem de 600 L/s, obtida através de regionalização de vazão (ANA, 2019).

No alto da Figura 12 destaca-se essa sub-bacia, onde está contida a Mina Córrego do Feijão, local do acidente com a barragem objeto desse estudo de caso.

A Figura 13 ilustra o eixo do Rio Paraopeba e os principais pontos de outorga.



Figura 13 - Principais usos da água na bacia do Rio Paraopeba.

Fonte: ANA (2019).

CARACTERIZAÇÃO DA BARREGEM I

A Figura 14 ilustra a paisagem local onde pode ser vislumbrada a Barragem I, em primeiro plano.

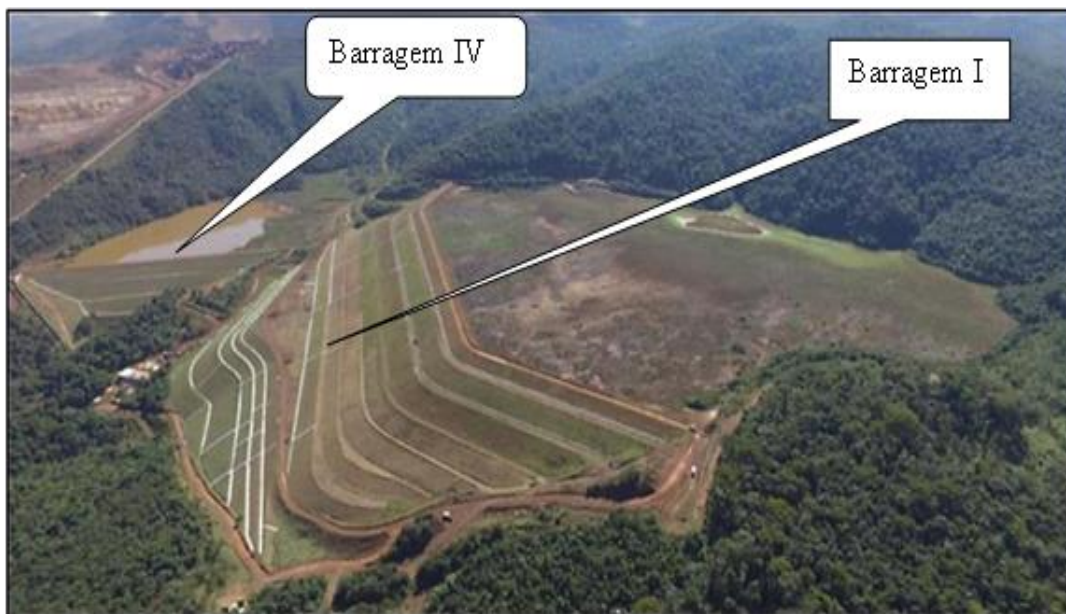


Figura 14 - Vista aérea do local antes do acidente com a Barragem I.

Fonte: VALE (2018).

Conforme SEGUR (2019), a Barragem I da Mina de Córrego do Feijão possuía, entre barramento e rejeitos armazenados, aproximadamente 11.600.000 m³, em 2016, quando foi encerrada a disposição de rejeito (descomissionamento da barragem).

O efluente coletado da Barragem I era direcionado para armazenamento na Barragem IV e posterior reutilização no processo de beneficiamento do minério de ferro.

A SETEC (2019, p.17), descreve que a Barragem I foi construída pelo método de alateamento montante, de acordo com o projeto, elaborado em 1975, pela empresa Christoph Erb. Foi implantada no vale do Ribeirão Ferro Carvão, em 1976, tendo como proprietária a Ferteco Mineração S/A. Em 2001, a Ferteco foi adquirida pela Vale, que manteve a atividade de disposição de rejeitos em operação até 2016, quando houve o descomissionamento.

ESPECIFICAÇÃO DA BARRAGEM I

De acordo com SEGUR (2019, p. 35 e 36), a premissa do projeto da empresa Christoph Erb, era de que o afloramento da linha freática no talude de jusante ocorreria em altura aproximada de 15 cm em relação ao pé da barragem, considerando que o material utilizado (minério ultrafino) na construção do dique inicial, ilustrado na Figura 15, era mil vezes mais permeável que a camada de laterita lançada no talude de montante. Os estudos reali-

zados na época indicaram que mesmo que o minério ultrafino fosse apenas cem vezes mais permeável que a laterita, o afloramento de água aconteceria no máximo a 1,25 m de altura, o que não comprometeria a estabilidade do talude de jusante.

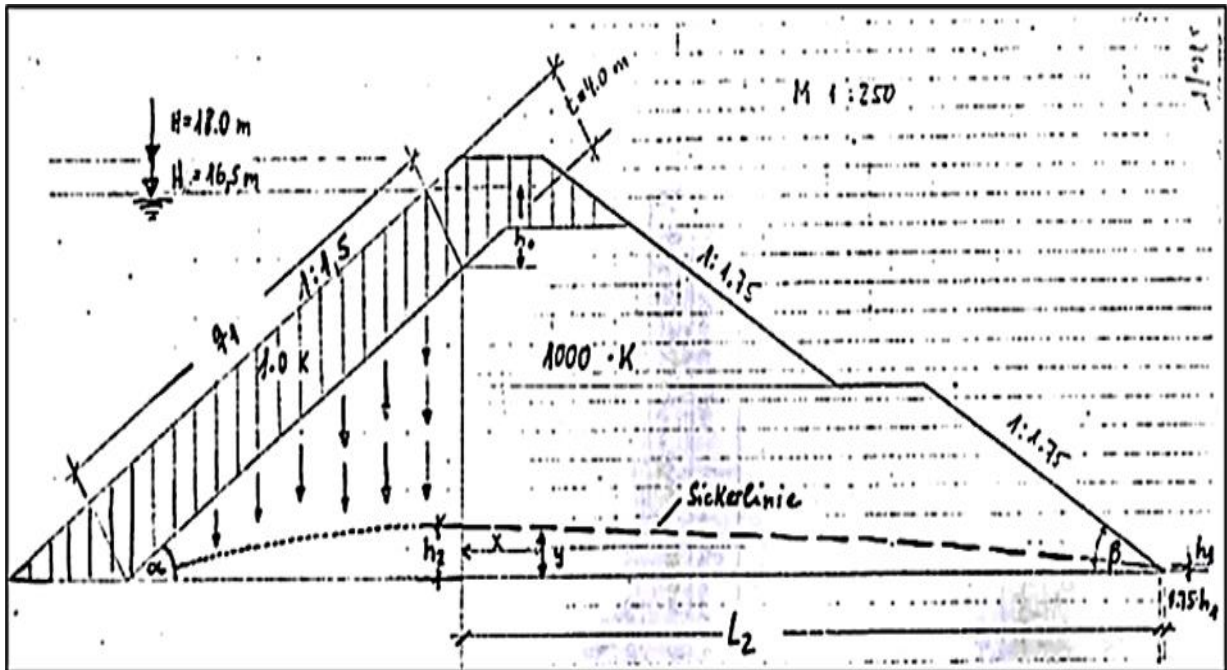


Figura 15 - Dique inicial e linha freática projetada por Cristoph Erb em 1975.

Fonte: SEGUR (2019).

Ainda de acordo com SEGUR (2019), no projeto do dique de partida, assumiu-se que o minério fino seria pelo menos mil vezes mais permeável que a terra vermelha (laterita) incorporada na impermeabilização do lado de montante e que não ocorreria acúmulo de água na zona de contato com a canga (rocha de minério de ferro). O projeto do dique de partida admitiu que a posição de afloramento da água no talude de jusante (h_1 na Figura 15) seria 0,15 m e a linha freática estaria tão profunda na área do núcleo da barragem que o fluxo de infiltração ou seus efeitos não afetariam a estabilidade da face de jusante da barragem.

O maciço do dique de partida foi executado com material de minério de ferro (material drenante), revestido com camada de laterita de 4,0 m de espessura no talude de montante e de 1,0 m de espessura no talude de jusante, seguindo o projeto. Essa etapa inicial teve o coroa- mento da crista na cota 874,00 m, com barramento de 18,0 m de altura.

Segundo SEGUR (2019), o dique de partida possuía inclinações a montante de $1V:1,5H$ e a jusante $1V:1,75H$. No talude a jusante existia uma berma de 5,0 m de largura na cota 864 m. Os relatórios de acompanhamento desta obra, não fazem referências à drenagem interna.

A Barragem I foi idealizada para possuir alteamentos para montante, conforme os rejeitos fossem sendo dispostos na estrutura. A Figura 16 ilustra o perfil da barragem após seu encerramento. Tomando o dique de partida como o primeiro alteamento, na cota 874 m, o segundo alteamento foi composto por uma série de cinco alteamentos. O primeiro com 3 m e o segundo com 2,0 m, ambos a montante, e o terceiro com 5,0 m em linha de centro. O quarto com 5 m e o quinto com 2,5 m, ambos a montante, formando todo o conjunto do então tido como o segundo alteamento até a cota 891,5 m.

O terceiro alteamento consistiu também em pequenos alteamentos a montante, correndo a crista na cota 899 m. O quarto alteamento foi até a cota 905 m e teve um recuo acentuado para tornar sua crista retilínea. Para isso esse quarto alteamento foi construído avançando sobre a praia de rejeito. Pela Figura 16 pode-se verificar que até o terceiro alteamento a declividade média do barramento era de aproximadamente 23° . Dessa forma, o recuo também proporcionou o abatimento da declividade do talude de jusante do barramento, que passou para aproximadamente 18° .

Os alteamentos subsequentes avançaram a montante a partir da crista do alteamento anterior, tendo, a crista do décimo alteamento, alcançado a cota de 942 m. Ao final a barragem possuía 86 m de altura e com 720 m de comprimento. No projeto, o volume previsto do reservatório (armazenamento) seria de $8.797.136 \text{ m}^3$ de rejeito. Em 2016, com interrupção da operação, o volume de rejeitos armazenados só atingiu $7.529.033 \text{ m}^3$ (SETEC, 2019).

O Quadro 1 resume os alteamentos havidos na Barragem I.

Como indicaram Robertson e outros (2019), o dique de partida não possuía drenos e a drenagem interna até o quarto alteamento consistia em uma camada de drenagem horizontal na base da berma. Para o quinto e subsequentes alteamentos, os projetos especificaram sistemas de drenagem interna consistindo de drenos verticais e horizontais construídas em forma de “L”. Esses especialistas concluíram que a barragem de rejeito teve muita

pouca drenagem e que a drenagem interna inadequada instalada na barragem durante a construção inicial contribuiu para altos níveis de água na barragem e na bacia (ROBERTSON et al., 2019).

Etapa	Ano	Alteamento	El. (m)	Altura máx. (m)	Tipo de alteamento	Projetista	Construtora
1	1976	Bar. Inicial	874	18	-	Christoph Erb	Emtel
2	1982	2.º	877	21	montante	Tecnosan	Tercam
3	1983		879	23	montante		?
4	1984		884	28	Linha centro		Construtora Sul Minas
5	1986		889	33	montante		?
6	1990		891,5	35,5	montante		Unienge Com. e Constr. Ltda.
7	1991	3º	895	39	montante	Riad Chammas	Construtora Sul Minas
8	1993		899	43	montante		.
9	1995	4º	905	49	montante	Tecnosolo	CMS Constr.S.A
10	1998	5º	910	54	montante		U&M
11	2000	6º	916,5	60,5	montante		Constr. Dragagem Paraopeba
12	2003	7º	922,5	66,5	montante		Construtora Impar Ltda.
13	2004	8º	929,5	73,5	montante		Integral
14	2008	9º	937,0	81,0	montante	Geoconsultoria	Integral
15	2013	10º	942,0	86,0	montante	Geoconsultoria	Salum Enga.

Quadro 1 - Características de projeto e construção dos alteamentos da Barragem I.

Fonte: SEGUR (2019).



Figura 16 - Ilustração da geometria da Barragem I na seção de máxima altura.

Fonte: VALE (2018).

Segundo a SETEC (2019) o 2º alteamento, que correspondia ao envelopamento de alteamentos menores realizados, decorreu, supostamente, devido à existência de surgências nas etapas intermediárias.

O material constituinte na maior parte dos alteamentos foi o próprio rejeito de minério compactado, sendo que alguns alteamentos, como o 8º e 9º alteamentos, foram construídos com solo compactado, retirado de áreas de empréstimo. Na Figura 28 é possível observar a distinção entre alteamentos executados com diferentes materiais.

Ainda segundo a SETEC (2019), nos sistemas de drenagem interna utilizados, foram empregadas diferentes soluções ao longo da execução dos alteamentos. Destacando-se que são relatadas várias incertezas quanto ao sistema de drenagem interna em diversos alteamento, devido à carência de informações históricas, não se tendo a certeza de que a solução projetada foi efetivamente implantada na sua totalidade. De forma simplificada, com base nos dados disponíveis, os primeiros alteamentos supostamente foram executados sem sistema de drenagem, sendo que os alteamentos subsequentes foram utilizados sistemas baseados no emprego de tapetes drenantes constituídos de “sinterfeed” (material que passou pelo processo de sinterização para homogeneização e granulação), conjugados com filtros verticais, até o 7º alteamento. Os alteamentos seguintes (8º, 9º e 10º) adotaram sistemas baseados no uso de tapetes drenantes executados em areia, conjugados ou não com filtros verticais.

Em 2018 foram realizadas tentativas de otimizar a drenagem interna, tais como a instalação de DHP (Drenos Horizontais Profundos). Foram executadas 15 unidades desse tipo de dreno, sendo que o 15º DHP foi posteriormente selado, devido a problemas ocorridos durante sua execução (SETEC, 2019).

Conforme citou a SETEC (2019), a drenagem superficial no talude de jusante era composta basicamente por canaletas e descidas de água em concreto. O sistema extravasor era formado por torres interligadas a uma galeria de fundo conectada a um canal, descarregando na Barragem VI.

O monitoramento geotécnico da Barragem I era realizado, no seu estágio final, por 194 instrumentos ativos, sendo 93 piezômetros, 37 indicadores de nível d'água, 7 marcos

superficiais, 53 pontos de medição de vazão em saída de drenos, um medidor de vazão residual, dois inclinômetros, um pluviômetro e um sismógrafo. Em dezembro de 2018 foram implementadas melhorias no monitoramento, tais como a implantação de radar interferométrico e o início da automatização de pelo menos 40 piezômetros (SETEC, 2019).

POSICIONAMENTO DA LINHA FREÁTICA

De acordo com SEGUR (2019), a linha freática que passava pela Seção 4-4 da Barragem I chegou a aproximadamente 1/4 da altura do dique de partida, conforme ilustra a Figura 17. Verifica-se, contudo, que o previsto no projeto do dique inicial em relação à linha freática não foi confirmado em estudos de campo posteriores.

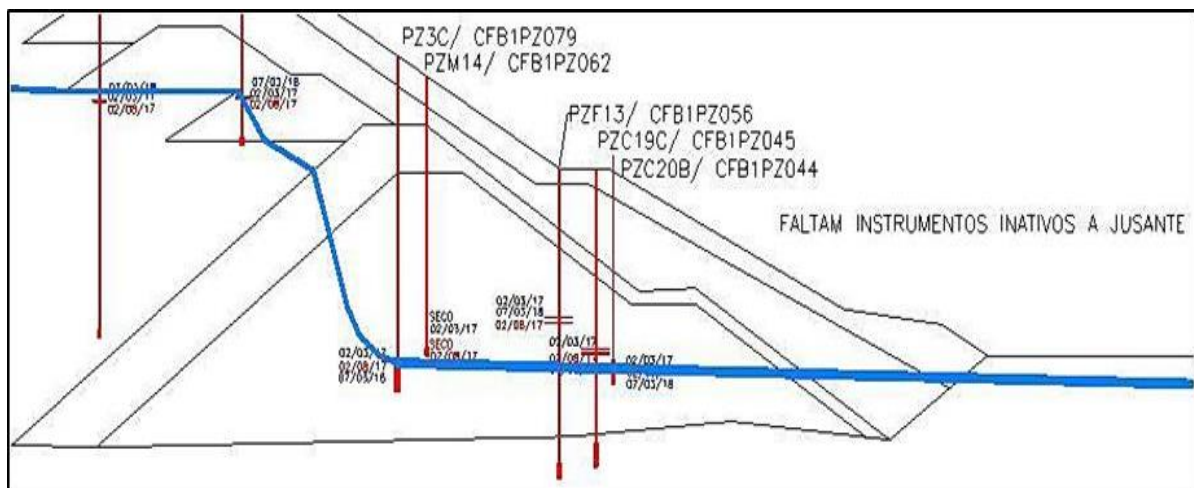


Figura 17 - Linha freática passando pela Seção 4-4 da B I (cor azul)
Fonte: SEGUR (2019).

Robertson e outros (2019) consideram que a falta de drenagem interna significativa, que resultou em um nível d'água persistentemente alto na barragem, principalmente na região do pé da barragem, constituiu um dos fatos que geraram as condições de instabilidade da barragem.

Esses pesquisadores efetuaram simulação para analisar a percolação numa seção da barragem e concluíram que uma porção significativa da barragem estava saturada com um alto nível d'água, especialmente na região do pé (ROBERTSON et al., p.62).

Em estudo recente sobre o acidente na Barragem I, Miranda Neto e Santos (2020) apresentaram o perfil geotécnico ilustrado na Figura 18, onde pode ser vislumbrada a linha freática alta a jusante.

A linha freática adotada naquela pesquisa foi baseada nos estudos conduzidos por Robertson e outros (2019), que concluíram por uma posição elevada para a linha freática.

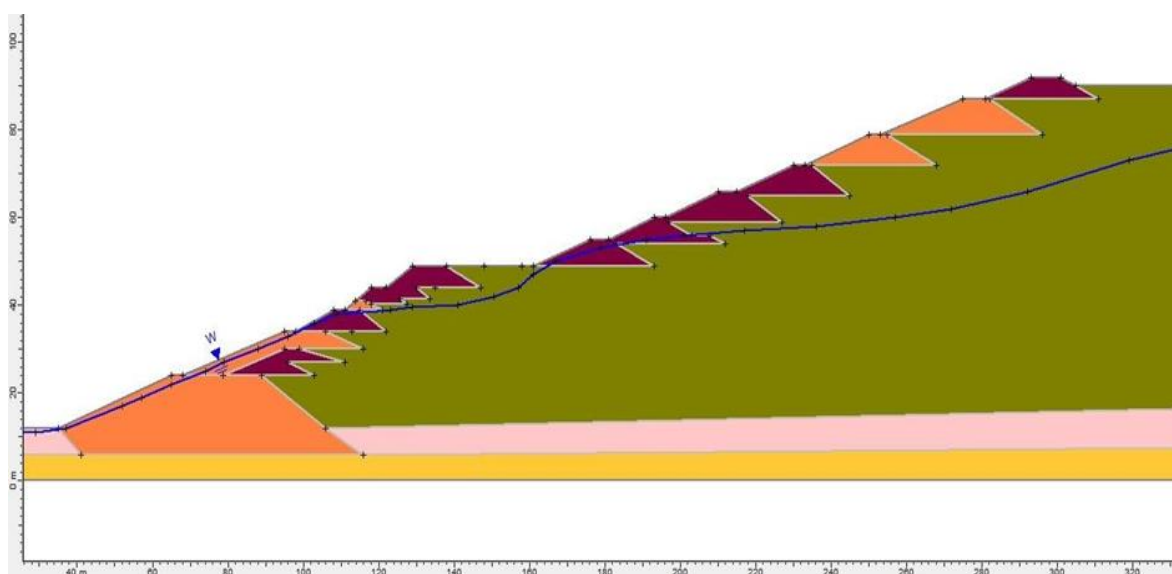


Figura 18 - Perfil geotécnico da seção crítica da Barragem I.

Fonte: Miranda Neto e Santos (2020).

A retroanálise conduzida por Miranda Neto e Santos (2020) mostrou que poderia ter havido tanto uma ruptura não drenada como uma ruptura drenada, sendo esta última a mais provável de ter ocorrido. A Figura 19 ilustra a superfície de ruptura para o caso da ruptura não drenada e a Figura 20 ilustra a superfície de ruptura para o caso drenado.

Para o caso não drenado a razão de resistência (S_u / σ'_v) seria de 0,294 e para o caso drenado o ângulo de atrito seria de 19° , admitindo uma coesão de 5 kPa.

Miranda Neto e Santos (2020) admitem que outros fatores como carregamentos externos do tipo vibração (perfurações, explosões, tráfego ou sismos) poderiam ter contribuído para que o barramento tivesse um comportamento não drenado. No entanto, a realidade dos fatos que levaram a ruína da barragem ainda está sendo discutida.

O que se evidencia é que a linha freática elevada certamente contribuiu para uma redução na resistência da barragem e que a elevação da linha freática elevada pode ter sido ocasionada por deficiências no sistema de drenagem.

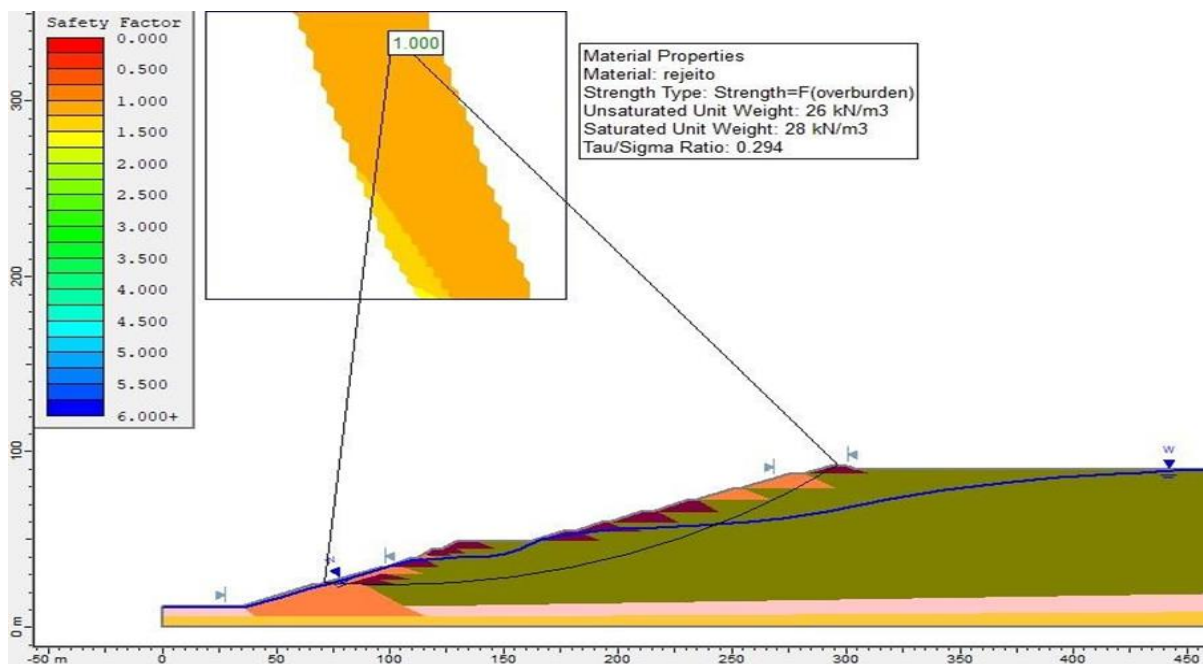


Figura 19 - Superfície de ruptura para o caso não drenado.
Fonte: Miranda Neto e Santos (2020).

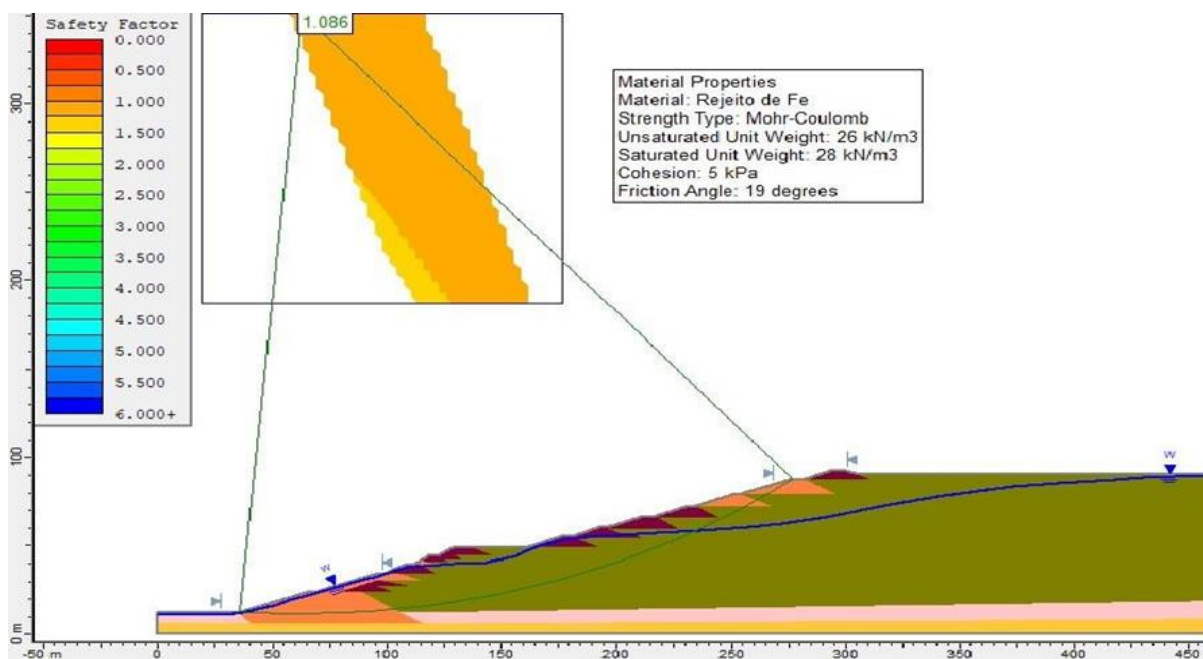


Figura 20 - Superfície de ruptura para o caso drenado.
Fonte: Miranda Neto e Santos (2020)

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Desse estudo pode-se concluir que os aspectos da drenagem em barragens de contenção de rejeitos construídas pelo método da linha de montante têm grande importância no comportamento do nível d'água da bacia de rejeitos, e o controle do nível d'água pode contribuir para reduzir o número de acidentes e danos ao meio ambiente.

A elaboração do projeto executivo do sistema de drenagem eficiente, empregando tapetes drenantes, drenos verticais drenos horizontais profundos e sistemas de coleta adequados e também um programa de monitoramento e instrumentação, no controle do nível da água, no reservatório, no corpo da barragem e na vazão jusante, podem significar um aumento da segurança da barragem. Portanto, sua execução e operação são imprescindíveis ao método construtivo da alteamento a montante.

Conforme a metodologia, quando o projeto segue os trâmites normativos no dimensionamento, execução e monitoramento, permite a adoção de medidas de controle ao ser detectada alguma variação anômala da percolação e na poropressão, no corpo da barragem e em seu reservatório.

Esta publicação visa contribuir com a ciência relatando aspectos específicos relativos aos sistemas de drenagem, que podem favorecer a segurança estrutural e ambiental de barragens de contenção de rejeitos de mineração, focando sobre a importância da eficiência dos projetos de drenagem.

Como sugestão para futuros trabalhos são indicados estudos de sistemas de drenagem alternativos compatíveis com barragens de rejeitos pelo método de alteamento a montante que já estejam em operação e apresentem alguma deficiência nos seus atuais sistemas de drenagens.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13028 Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Rio de Janeiro, 2017. 3^a ed. 16p.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone. Ouro Preto, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

ALONSO, U. R. Rebaixamento temporário de aquíferos. Oficina de textos. São Paulo, 2007. 152p.

ANDRADE, H. A. C. Implementação de Procedimentos Numéricos para a Análise de Elementos Drenantes em Solos. Rio de Janeiro, 2003. 125p. Dissertação (mestrado) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4301/4301_3.PDF>. Acessado em 20/06/2021.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Relatório de segurança de barragens 2020. Brasília, 2021. 130 p.

ANM - Agência Nacional de Mineração. Relatório Comitê Técnico de Segurança de Barragens de Mineração Ano 2020. Ministério de Minas e Energia. Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral. Brasília, 2021. 62 p.

ARAÚJO, C. B. Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro. Rio de Janeiro, 2006. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, RJ.

ASSIS A.; ESPÓSITO, T. Construção de Barragens de Rejeito Sob uma Visão Geotécnica. In: III Simpósio Sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos – REGEO, 1995 pp. 259-273.

BASTOS, I. G. Estabilização de encostas através de drenagem profunda: estudo de um caso de estabilização com túnel de drenagem. São Paulo 2006, 219p. Dissertação (mestrado) USP- São Paulo. 2006.

BRASIL. Lei Federal nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acessado em 06/10/2021.

_____. Lei Federal nº 14.066 de 30 de setembro de 2020. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-tm#art3>. Acessado em 06/10/2021.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. Mecânica dos solos. Gráfica EESC/USP, vols. 1 e 2. São Carlos, 1985.

CARVALHO, P. A. S. Manual de Geotecnia: Taludes de Rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. São Paulo, 1991. 388p. Instituto de Pesquisa Tecnológicas. Disponível em <<http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Documentos/Geotecnia.aspx>>. Acesso em 05/07/2021.

CASAGRANDE, A. Percolação de Água através de Barragens de Terra. Manual Globo, 1964, v. 5, 2º tomo, p. 155-192.

CASTRO, L. V. P. Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem c de contenção de rejeito alteada a montante. São Paulo, 2008. ed. rev. 103 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

CEDERGREN, H. R. Seepage, Drainage and Flownets. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1968. 489p.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012. Diário Oficial da União nº 172 de 4 de setembro de 2012, seção I. Brasília, 2012 pp 149-152.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Monitoramento Especial da Bacia do Rio Paraopeba - Relatório 04: Monitoramento Hidrológico e Sedimentométrico. Belo Horizonte/MG. Julho 2019.

CRUZ, P. T. 100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos Materiais de Construção Projeto. 2ª ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2004. 680 p.

DOBEREINER, L.; VAZ, L. F. Tratamento de Maciços Naturais. In: OLIVEIRA, A. M. D. S.; BRITO, S. N. A. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia ABGE. São Paulo, 1998, 380p.

EPA – Australia Environment Protection Agency. Tailing Containment. Best Practice Environment Management in Mining. Australian Federal Environment Department. Australia, Junho 1995.

EPA – U. S. Environment Protection Agency. Design and evaluation of tailing dams. Office of Solid Waste. Washington: August 1994 (Technical Report EPA 530-R-94-038).

FARIAS, R.; PARANHOS, H. (2019). Notas de Aula de Engenharia de Barragens. UnB. Brasília, 2019.175p. Disponível em <<https://docero.com.br/doc/8e8n5sx>>. Acessado em 23/6/2021.

FERRAZ, F. Disposição de Rejeitos de Mineração. Ouro Preto, 1993. 62p. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

KLOHN, E.J. The development of current tailings dam design and construction methods. Design and Construction of Tailings Dams. Colorado School of Mines, USA. Colorado, 1981. 75p.

LOZANO, F. A. E. Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. São Paulo, 2006. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, USP, São Paulo, SP.

MAFRA, J. M. Q. Barragem construída com rejeito ciclonado: uma possível solução para disposição de rejeitos no Brasil. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABMS. 2016.

MASSAD, F. Obras de Terra: curso básico de geotecnia. 2ª ed. Oficina dos Textos Ltda. São Paulo, 2010. 216p.

MIRANDA, A. N. Notas de aula: Inspeção de barragens de aterro. Curso: Inspeção e Segurança de Barragens. Fundação Parque Tecnológico do Itaipu, Agência Nacional de Águas. 2016.

MIRANDA NETO, M. I.; SANTOS, T. B. N. Retroanálise de estabilidade sobre o acidente na barragem de rejeito do Córrego do Feijão em Brumadinho – MG. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Campinas, 2020. No prelo.

MÜLLER, M. C. N. Rebaixamento Lençol Freático: Indicações, métodos e impactos decorrentes. São Paulo, 2004. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil), Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, SP.

NIEBLE, C.M. Deposição de rejeitos. Apostila para o curso de geotecnia aplicada a minas a céu aberto. Paulo Abib Engenharia S.A. Itabira, 1986. 28p.

PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3ª ed. Oficina dos Textos. São Paulo, 2006.

POHLL, G.M.; CARROLL, R. W.; REEVES, D.M.; PARASHAR, R.; MUHUNTHAN, B.; THYIYAGARJAH, S.; BADGER, T.; LOWELL, S.; WILLOUGHBY, K. Design Guidelines

for Horizontal Drains used for Slope Stabilization. Olympia. Washington State Department of Transportation. Washington, 2013. 390p.

PORTES, A. M. C. Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta. Belo Horizonte, 2013, 170p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transporte). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais.

RIBEIRO, V. Q. F. Proposta de metodologia para avaliação do efeito de rupturas de estruturas de contenção de rejeitos. Belo Horizonte, 2015, 267p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais.

ROBERTSON, P. K.; MELO, L.; WILLIAMS, D. J.; WILSON, G. W. Relatório do painel de especialistas sobre as causas técnicas do rompimento da barragem I do Córrego do Feijão. 2019. Disponível em <<http://www.bitechnicalinvestigation.com/pt/report.html>>. Acessado em 27/02/2020.

SANDRONI, S. S – Notas de aula: Geotecnia das Barragens. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 2012.

SEGUR - Seção de Segurança e Saúde do Trabalhador. Relatório de Análise de Acidente de Trabalho - Rompimento da barragem B I da Vale S.A. em Brumadinho/MG, em 25/01/2019. Superintendência Regional do Trabalho em Minas Gerais. Ministério da Economia. Belo Horizonte, 2019, 238p. Disponível em: <https://sinait.org.br/docs/305346580-relatorio_bi <https://sinait.org.br/docs/305346580-relatorio_bi_a_corpo_assinado.pdf. > Acessado em 05/07/2021.

SETEC. Setor Técnico-Científico. Laudo de Perícia Criminal Federal nº 1070/2019. Superintendência Regional da Polícia Federal em Minas Gerais. MJSP. Belo Horizonte, 2019. 207p. Disponível em <https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/wp-content/uploads/sites/pf_mg_assinado-2.pdf.> Acessado em 14/05/2021.

SILVA, D. S. Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens. Ouro Preto, 2016. 181 p. Dissertação de Mestrado - UFOP, setembro/2016.

SOARES, L. Barragens de Rejeitos: Metodologia de implantação, operação e manutenção. São Paulo, 1998. 74p. Apostila para a disciplina de pós-graduação do Departamento de Minas e de Petróleo, PMI-5883.

SOARES, L. Barragem de Rejeitos. Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia. Comunicação Técnica elaborada para compor o capítulo 19 do livro Tratamento de Minérios, editores Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França. Rio de Janeiro, 2010. 5ª ed. pp. 831-896.

240

SOUZA, M. M. Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC. Rio de Janeiro, 2013. 129p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Curso de Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro.

TAYLOR, D. Fundamentals of Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1948. 711p.

TECPER. TECPER Fundações e Geotécnica Ltda. São Paulo, 2021a. Disponível em <<https://tecper.com.br/servicos/dreno-sub-horizontais-dhp> >. Acessado em 17/06/2021.

TECPER. TECPER Fundações e Geotécnica Ltda. São Paulo, 2021b. Disponível em <<https://tecper.com.br/atuacao/mineracao-dhp> >. Acessado em 17/06/2021.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1996. 529p.

TRONCOSO, J. H. Geotechnics of Tailings dams and sediments. International Congress of Environmental Geotechnics – ICEG. 1997. pp. 1405-1423

VALE. Vale S/A e TÜV SÜD Bureau de Projetos. Revisão Periódica de Segurança, Barragem Mina Córrego do Feijão, Relatório Técnico. Belo Horizonte, 2018. 265p. Disponível em https://worldminetailingsfailures.org/wp-content/uploads/2019/03/TUV_SUD_2017_Periodic_Safety_Review-1.pdf. Acessado em 10/05/2021.

VICK, S.G. Planning, design and analysis of tailings dams. 2nd ed. Bitech Publishers Ltd. Canada, 1990.

ZATELLI, K. S.- Segurança das Barragens de Mineração ao Redor do Mundo: Arcabouço legal. 2019. Disponível em <https://www.matanativa.com.br/seguranca-barragens-mineracao-mundo/>. Acessado em 01/06/2021.