

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/26

Árvores de Decisões e Execução de Dreno Invertido em Talude de Barragem

Elmer Andrade Shikama

Engenheiro, Faculdade Arnaldo, Belo Horizonte, Brasil, sshikama@hotmail.com

Márcio F. Leão

Geólogo-Geotécnico, Tractebel/UFV, Belo Horizonte, Brasil, marciotriton@hotmail.com

RESUMO: Vários fatores podem impactar o processo construtivo de um barramento, resultando em desvios na compactação, deixando uma porção de massa mais permeável, com alta percolação de água e com risco de comprometimento de toda a estrutura. Desta forma, este artigo teve como objetivo descrever um processo executivo de dreno invertido em um talude de jusante de um barramento para redução de risco ao *piping*, reduzindo o risco de ruptura dos taludes dos barramentos a partir de uma árvore de decisão e execução. Para tal, foi escolhido um barramento paralisado por vários anos, sem a rotina de inspeções regulares ou qualquer manutenção em suas estruturas. Durante o processo de reabilitação, foram identificados pontos de umidade mais elevados no talude de jusante da barragem, que suportado por resultados de geofísica, indicaram como alternativa a execução de um dreno invertido para minimizar riscos de rupturas. As técnicas de árvores de verificação e decisão foram adotadas para ilustrar a evolução das etapas construtivas do dreno invertido, adotando-se a premissa de melhor tempo e eficiência dos processos, por se tratar de obra emergencial. Desta forma a metodologia de árvore de decisão, associada com as técnicas construtivas de barramentos proveram uma solução eficaz ao problema inicialmente observado.

PALAVRAS-CHAVE: Árvore de decisão, Barragem, Dreno invertido.

ABSTRACT: Several factors can impact the construction process of a dam, resulting in deviations in compaction, leaving a portion of the mass more permeable, with high water percolation and risk of compromising the entire structure. Thus, this article aimed to describe an executive process of inverted drain in a downstream slope of a dam to reduce the risk of *piping*, reducing the risk of rupture of the dam slopes based on a decision and execution tree. For this purpose, a dam that had been paralyzed for several years was chosen, without regular routine inspections or any maintenance on its structures. During the rehabilitation process, higher humidity points were identified on the slope downstream of the dam, which, supported by geophysics results, indicated the execution of an inverted drain as an alternative to minimize the risk of ruptures. Verification and decision tree techniques were adopted to illustrate the evolution of the construction stages of the inverted drain, adopting the premise of better process time and efficiency, as it is an emergency work. In this way, the decision tree methodology, associated with dam construction techniques, provided an effective solution to the problem initially observed.

KEYWORDS: Decision Tree, Dam, Inverted Drain.

1 INTRODUÇÃO

Ao se construir um barramento para água ou rejeitos, os parâmetros de formação da estrutura indicados pelos cálculos de engenharia realizados devem ser estipulados, sendo suportados por teorias e ensaios de campo. Caso, por alguma adversidade, algum dos parâmetros não tenha sido corretamente seguido na execução do projeto de construção do barramento, pode-se gerar uma região mais permeável do que o projetado, quando a estrutura entrar em operação. O fluxo de água por esta região pode começar a carrear parte dos sólidos que compõe o talude formado e comprometendo a integridade de toda a estrutura e obra executada. Esse evento é popularmente conhecido na geotecnia como *piping*.

Pipings causam erosões progressivas, de maneira tubular, favorecendo o carreamento de partículas, a jusante do fluxo de água, para montante do maciço construído. A medida que o fluido percolante atravessa o

maciço, ele tende a expandir o diâmetro do tubo formado inicialmente, favorecendo colapso da estrutura (LADEIRA, 2007).

O *piping* é o maior problema enfrentado pelas barragens de terra. Para evitar este carreamento de sólidos por água percolada, pode-se optar pela execução de um dreno invertido. Um dreno invertido é uma obra de engenharia desenvolvida para filtragem de água percolada ou transmitida em um talude que compõe um barramento, que pode estar contendo água ou rejeitos de barragem.

A obra de engenharia pode ser considerada como de baixa complexidade executiva, mas demanda elevado conhecimento técnico e muita precisão na execução. A formação do dreno invertido consiste em um processo de preparação do terreno onde o mesmo será implantado, na definição e acamamento de elementos filtrantes, observando o controle do fator de segurança do barramento no qual está sendo construído. Uma das soluções que podem ser adotadas para o controle do escoamento, de acordo com Silva (2016), é a utilização de drenos. Esses filtros de drenagem devem ser projetados nas estruturas tendo como principais funções a de retenção e permeabilidade.

Desta forma o presente artigo buscou elencar as etapas de execução de um dreno invertido em taludes de barramentos para redução de risco de *piping*, atestando a aplicabilidade dessa técnica como solução geotécnica. Destaca-se que devido a ausência de projetos anteriores, adotou-se a metodologia de árvore de verificação e decisão para subsídio ao projeto. As informações aqui prestadas não consideraram a localização da estrutura uma vez que não se obteve autorização do empreendedor para divulgar tal informação.

2 METODOLOGIA

O trabalho descrito neste artigo foi realizado em um barramento reabilitado (Figura 1), para fins de acumulação de sedimento, que ficou paralisado por vários anos, sem a rotina de inspeções regulares ou qualquer manutenção em suas estruturas. Durante o processo de reabilitação foram identificados pontos de saturação no talude de jusante da barragem, que suportado por um estudo de geofísica, indicaram ser aconselhável a execução de um dreno invertido para minimizar riscos de rupturas. Apesar da ausência de leituras de medidores de nível d'água e piezômetros Casagrande, pretéritas, esses instrumentos estão instalados em dois pares, na crista e base da barragem, sendo importantes para avaliação da eficiência imediata da intervenção. Destaca-se ainda a total ausência de projetos anteriores, havendo desconhecimento inclusive sobre a estrutura e seus elementos drenantes. Estimou-se uma altura de barramento de 20 m, dividido em duas bermas, ou seja: berma 1 (inferior, correspondendo a porção junto a base da estrutura) e berma 2 (superior, correspondendo a porção junto a crista da barragem).

A sequência das etapas para a tomada de decisão da construção de um dreno invertido é derivada: da experiência executiva dos autores, estudos técnicos que possibilitaram a formação do projeto e especificidade da implantação do projeto. Para tal, foi adotada a metodologia de árvores de verificação e de decisão para o projeto do dreno invertido, por meio de um período de inspeções.



Figura 1. Em (a), aspecto do barramento após vários anos sem manutenção e monitoramento. Em (b), barramento após primeira etapa de manutenção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Árvore de Verificação e Decisão

As técnicas de árvore de verificação (Figura 2) e de árvore de decisão (Figura 3) foram adotadas para exemplificar e ilustrar a evolução das etapas que levaram a construção do dreno invertido, auxiliando também na celeridade do desenvolvimento do projeto. Após a inspeção de campo, foi observada uma faixa longitudinal úmida no segundo talude do barramento. No momento da coleta de dados dos instrumentos, notou-se nível alto nos INA's, indicando possível risco ao barramento. Esta observação motivou a sequência indicada na árvore de decisão para a execução do projeto.

Foram elencadas as principais questões para o desenvolvimento do pensamento crítico e subsídio à intervenção de engenharia com a construção do dreno invertido. Em função das informações de projeto do barramento, a escolha das árvores de verificação e decisão, buscaram a redução máxima de tempo de conclusão da atividade por ser tratar de obra de caráter, quase sempre, urgente ou emergencial.

Durante a avaliação da árvore de verificação, toda vez que é identificada a palavra risco se faz a rodada de processo via árvore de decisão, onde se valida a necessidade de aplicação de uma obra de engenharia ou não.

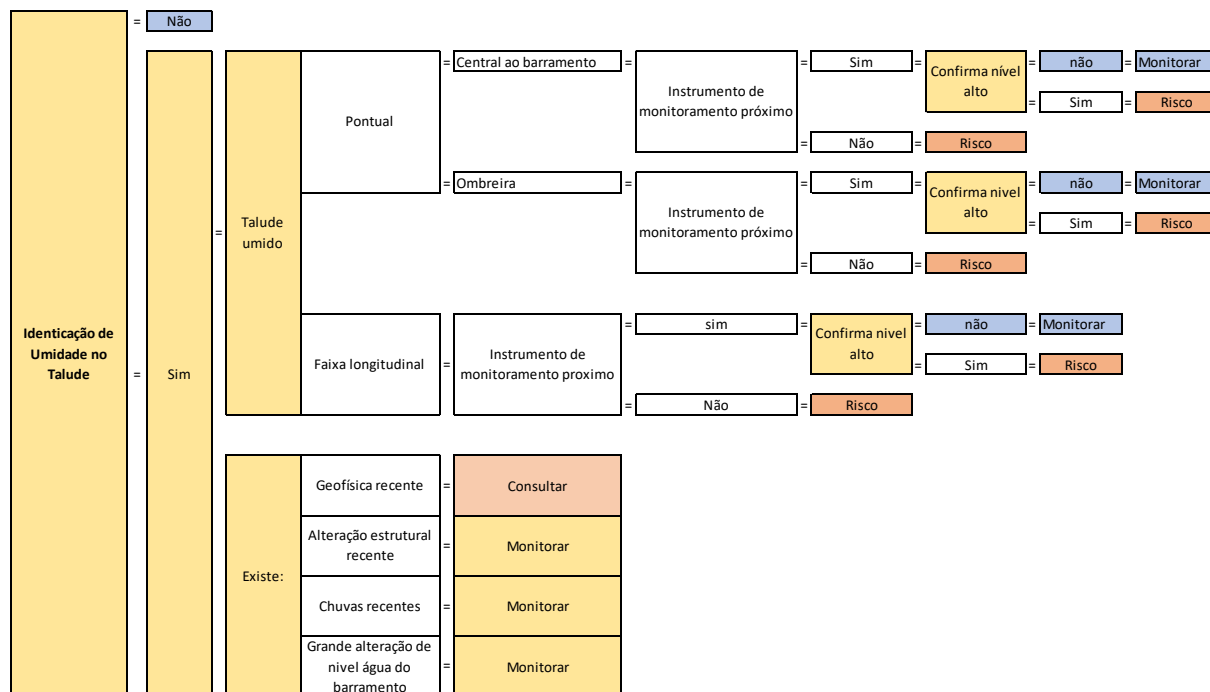


Figura 2. Árvore de Verificação.

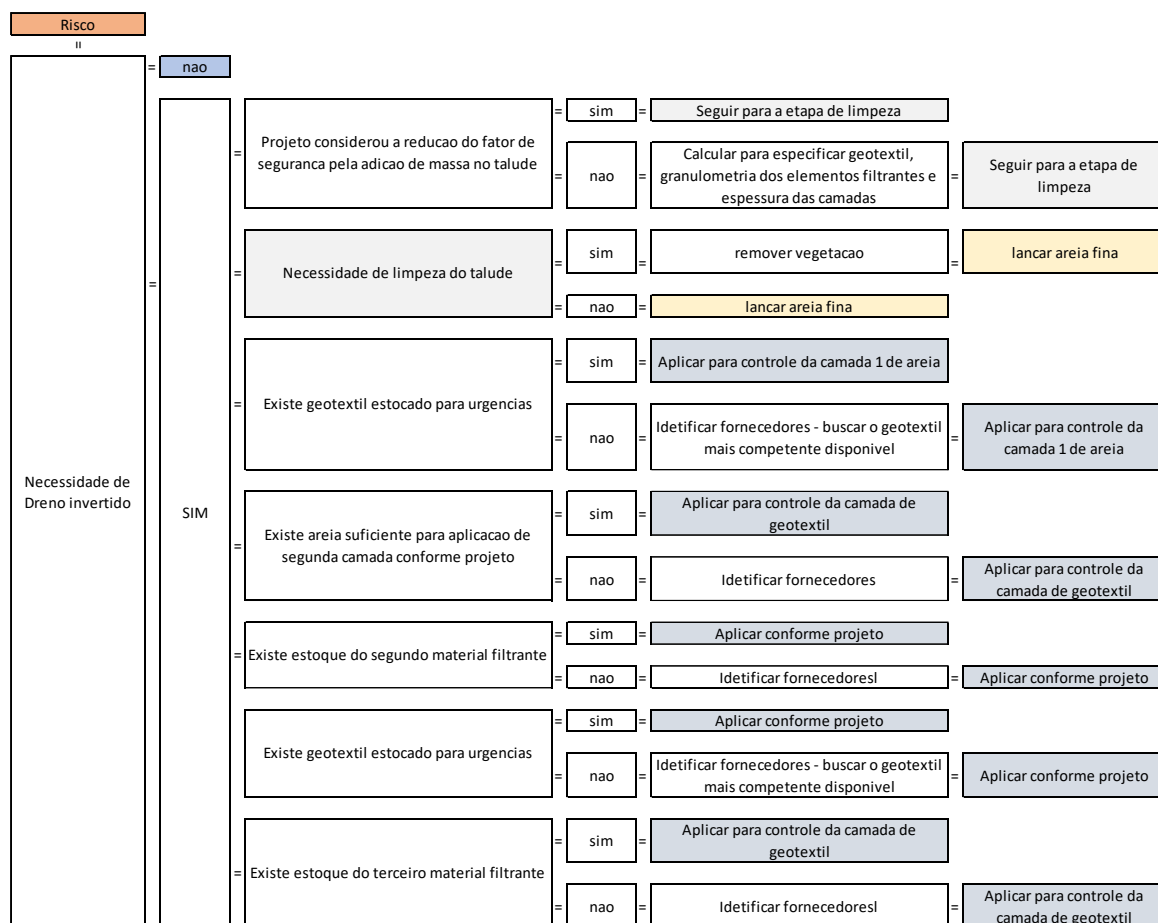


Figura 3. Árvore de Execução.

3.2 Coleta de Dados

O barramento ficou desprovido de manutenção e monitoramento por mais de 5 anos. Após a limpeza e início do processo de reabilitação operacional, foi possível realizar a inspeção de campo, associada a árvore de decisão elaborada. Baseado na observação de campo ficou claro a existência de um problema estrutural no barramento pela percolação de água. Iniciou-se imediatamente o processo de contratação de avaliação geofísica e o desenvolvimento do projeto do dreno invertido. A avaliação geofísica confirmou uma elevação do nível de água no barramento. Devido ao filtro central ainda drenar, não foi confirmada uma colmatção completa do filtro do barramento.

Análises de estabilidade foram executadas para avaliação da condição do barramento, sendo obtido um fator de segurança, drenado, superior a 1,5, calculado próximo a 1,8. Apesar da adoção de parâmetros geotécnicos de ensaios realizados em outras estruturas (barramento e fundação) semelhantes na área, o fator de segurança elevado permitiu a consideração da instalação do dreno invertido. Entretanto, a fim de não sobrecarregar a estrutura e reduzir o custo com material aplicado, foram feitas várias considerações sobre o projeto do dreno invertido antes da sua execução.

3.3 Considerações para Execução do Projeto

Partindo do princípio de que a estrutura suportaria o acréscimo de carga para construção de um dreno invertido na berma, foram utilizadas as técnicas para o dimensionamento de filtros em barramentos, conforme as Equações 1, 2 e 3 (SILVA, 2016).

$$D_{15} (T1) \leq 5 D_{85} (A) \text{ (critério de não ocorrência de } \textit{piping}) \tag{1}$$

$$D_{15} (T1) \geq 5 D_{15} (A) \text{ (critério de permeabilidade)} \quad (2)$$

$$2 \leq D_{60} (T1) / D_{10} (T1) \leq 20 \text{ (coeficiente de não uniformidade)} \quad (3)$$

Por fim optou-se pela adição de camadas de geotêxtil, para controle de superfinos, juntamente com a utilização de cinturões formados por caixas de gabiões amarradas de forma a reduzir a utilização de pedras de mão na cobertura final da obra. O geotêxtil conferiu maior controle do fluxo de superfinos, assim como ajudou a garantir a formação das outras camadas do filtro. Além disso, a adição das caixas de gabião possibilitou reduzir em mais de 40% da demanda de pedra de mão sobre a estrutura, favorecendo o fator de segurança e reduzindo o custo do projeto, conforme Figura 4.

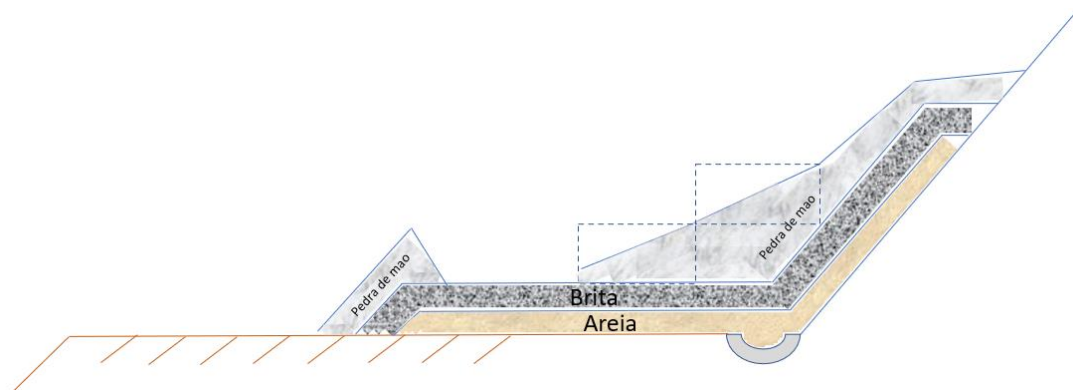
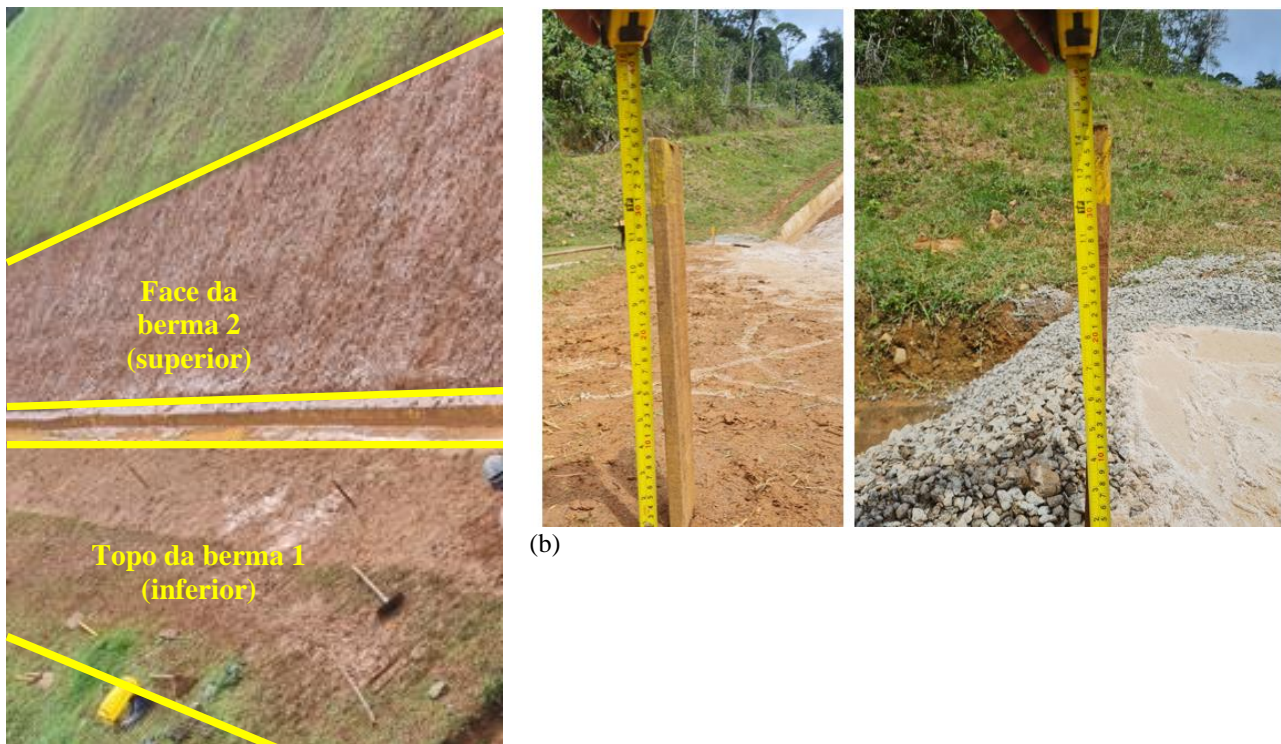


Figura 4. Finalização da concepção do projeto com adição de geotêxtil e caixas de gabião para redução da carga de pedras de mão.

Após a finalização do projeto conceitual, seguiu-se as etapas de construção, conforme sequência apresentada nas Figura 5 a 8.



(a)

(b)

Figura 5. Em (a), remoção da vegetação existente no local de implantação do dreno invertido, contemplando a face da berma 2 e o topo da berma 1 (delimitação pelas linhas em amarelo). Em (b), marcação de campo de alinhamento e altura de camadas de material a serem lançadas para formação do dreno.



(d)

(c)

Figura 6. Em (c), lançamento inicial do material de formação do dreno, conforme marcação de campo. Em (d), lançamento da primeira camada de geotêxtil de controle de finos.



(e)



(f)

Figura 7. Em (e), finalização do colchão drenante de base e preparação para subida do filtro do dreno invertido em direção ao talude onde foi evidenciada a linha úmida longitudinal. Em (f), instalação dos gabaritos para garantia da espessura das camadas de areia e brita, sobre o geotêxtil.



(g)



(h)



(i)

Figura 8. Em (g), proteção da camada de brita com geotêxtil para posterior cobertura com as pedras de mão e gabiões. Em (h), continuação da execução do Dreno invertido. Em (i), finalização da formação do dreno invertido – vista de topo e longitudinal.

A atividade foi realizada no período do ano com certa pluviosidade, aumentando a dificuldade construtiva de algumas etapas, considerando a execução manual e sem prejuízo da atividade. Em cada etapa da execução do dreno invertido foi possível garantir o bom lançamento e construtibilidade das camadas, pois a constância das chuvas uniformizava a porosidade da areia facilitando o nivelamento.

Após a cobertura da areia com a brita, as chuvas possibilitaram visualizar a efetividade da drenagem do colchão de areia e brita, sem carreamento de finos.

Ao elevar a espessura do colchão de areia sobre o talude de jusante (coberto com a brita e envelopado com o geotêxtil) foi possível observar o fluxo de água percorrendo o interior da estrutura, sem que houvesse carreamento de finos ou areia sobre o colchão de brita. Destaca-se que o colchão se encontrava exposto (sem cobertura de pedras de mão), validando a tomada de decisão de não necessidade adição de pedras de mão sobre toda a camada de brita, em função do comportamento supracitado.

Os cinturões de gabião não apresentaram deslocamento após a finalização do lançamento das últimas camadas de pedra de mão. Assim, atribuiu-se sucesso construtivo pela uniformidade do colchão de areia. Além disso, os dias de estiagem e o fato de todas as caixas terem sido amarradas em pelo menos 4 pontos lateralmente e em no mínimo 2 pontos por caixa entre cinturões, contribuíram para a efetividade do projeto.

Ao fim da cobertura final com pedras de mão, a estrutura foi observada diariamente por pelo menos 4 meses, onde qualquer acomodação ou deslocamento de massa foi imperceptível. Também foi realizado o

monitoramento dos quatro instrumentos existentes na estrutura e mesmo diante do período de chuvas, foi identificada redução dos valores de leituras, comparando-se com o período anterior à construção do dreno invertido.

Desta forma a metodologia de sequência de fluxo para tomada de decisão e passos de execução, associada as técnicas de engenharia civil e geotecnia de barramentos proveram uma solução eficaz ao problema inicialmente observado, especialmente considerando as informações disponíveis para o desenvolvimento do projeto.

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o dreno invertido foi uma obra de sucesso, devido a ocorrência de dessaturação da bermagem de jusante, pela redução da coloração escura nas bermas, identificadas antes da intervenção. Complementarmente, o monitoramento associado ao período executivo e pós-construtivo permitiram a validação das árvores de decisão para esse tipo de projeto, corroborada ainda pela redução dos níveis d'água e piezométrico da estrutura.

Apesar da ausência de projeto, o julgamento por meio de procedimentos de árvores de verificação e decisão, facilitaram a justificativa dos critérios assumidos, em tempo hábil ao não agravamento das situações observadas. A utilização dos conceitos e cálculos geotécnicos corretos de estabilidade, monitoramento por instrumentos e técnicas de filtragem foram imprescindíveis ao sucesso da obra de engenharia pelo estabelecimento de níveis de controle.

O entendimento do projeto pelos executores de campo foi baseado em orientações precisa e assertiva, comprovada pelos registros fotográficos apresentados, conferindo alto grau de confiabilidade no trabalho executado frente aos dados disponíveis, bem como os critérios adotados por base na metodologia das árvores de verificação e decisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ladeira, J. E. R. (2007) Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos. O Caso UHE São Simão. 2007. 230 f. dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

Silva, D. S. (2016) Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens. 2016. 161 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG.