

ESTUDO DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM DO RIO DOS BOIS EM LEOPOLDO DE BULHÕES-GO PELOS MÉTODOS DE FELLENIUS E BISHOP

Helena Cristina dos Reis Braga

*Bacharelanda do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA
(helenareis20@hotmail.com)*

Mauro Maurício Brandão Dias Silva

*Bacharelando do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA
(mauriciodias168@gmail.com)*

Vanessa Honorato Domingos

*Professora Mestra do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás - UniEVANGÉLICA
(vhdomingos@gmail.com)*

RESUMO

A barragem de terra é uma estrutura construída com a finalidade de elevação do curso d'água em regiões com ondulatorias, sendo que, essas construções são de extrema importância no desenvolvimento de diversas atividades a sociedade. A linha de pesquisa é apresentada através do estudo de caso da ruptura da barragem do Rio dos Bois em Leopoldo de Bulhões–GO e visa estudar o comportamento da barragem, verificando sua estabilidade à ruptura e analisando a previsão de percolação, considerando a influência das propriedades geomecânicas e hidráulicas. O mecanismo reúne informações relacionadas acerca de segurança de barragens, métodos de equilíbrio e ênfase em estados limites de ruptura. Para a análise da estabilidade foram realizadas três simulações chamadas de Caso A (sem sistema de drenagem), Caso B (dreno de pé) e Caso C (dreno chaminé), onde o fluxo de drenagem relativo à infiltração expressa comportamento específico em cada caso devido ao sistema de drenagem que foi aplicado. Com as simulações realizadas no software GeoStudio foi possível verificar as melhores condições de estabilidade, analisando a percolação da água. Os fatores de segurança são gradativos aos casos: Caso A, Caso B e Caso C, ou seja, quanto melhor a tecnologia de drenagem empregada mais seguro e estável a estrutura deverá ser. O motivo da ruptura da barragem do lago Roberto Caetano não foi devido ao tipo de sistema de drenagem no maciço e aparentemente não apresenta problemas futuros.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens de terra, Fator de Segurança, Estabilidade, Percolação.

1 INTRODUÇÃO

As barragens de terra são uma das mais antigas construções realizadas pelo homem e foram fundamentais para o desenvolvimento das civilizações antigas. Utilizadas há mais de 5.000 anos por diversos países como Egito, Pérsia, Índia e Babilônia, as barragens eram simplesmente barreiras de terra feitas ao longo de curso d'água construídas com materiais rudimentares e com isso as estruturas eram facilmente destruídas (JANSEN, 1983).

A primeira barragem registrada no Brasil que se tem notícia foi feita em 1833 e era utilizada para aproveitamento hidroelétrico, chamada Ribeirão do Inferno - MG (CBDB, 2011). Entretanto, foi na década de 70 que grandes obras de barragens foram realizadas, voltadas para hidroelétricas, abastecimento e irrigação. Essas obras eram carentes de recursos técnicos e financeiros e desde 1977 (Decreto Lei nº 10.752/77 SP) existiram tentativas de implementar uma lei para auditorias técnicas na construção de barragens.

Em 2010 foi aprovado e sancionado pelo Presidente da República a Lei nº 12.334/2010 que definiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) que aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água, disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. No decorrer desses anos graves acidentes envolvendo barragens aconteceram (SAMPAIO, 2014).

O desastre mais recente envolvendo barragens foi o rompimento da barragem da mina do córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho – MG (Figura 2), em janeiro de 2019. O rompimento matou centenas de pessoas além de destruir grande parte da vegetação local e causar a morte de diversos animais. Outra tragédia já havia acontecido no Brasil em 2015, o rompimento da barragem de Fundão (Figura 1), no distrito de Bento Rodrigues em Minas Gerais.

Figura 1-Rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG no ano de 2015



Fonte: SANTOS, 2019

Figura 2-Rompimento da barragem do Córrego do Feijão em Brumadinho-MG



Fonte: AMBIENTE BRASIL, 2019

Além desses grandes desastres causados pelos rompimentos de barragens de terra contendo rejeitos minerais, todos os anos acontecem rompimentos de barragens em todo o país. De acordo com a Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidade e Assuntos Metropolitanos do Estado de Goiás (SECIMA), entre 2009 e 2016 aconteceram 13 rompimentos de barragem de acumulação de água no Estado de Goiás.

A partir disso, visa-se entender o comportamento de uma barragem de terra pequena na cidade de Leopoldo de Bulhões - GO, que rompeu no 1º de abril do ano de 2000, verificando sua estabilidade de ruptura e analisando a previsão de recalque considerando as influências das propriedades geomecânicas e hidráulicas.

2 BARRAGENS DE TERRA

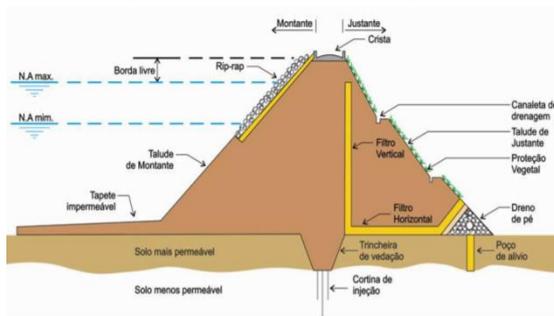
2.1 DEFINIÇÃO

Perini (2009) afirma que “as barragens são estruturas que se destinam a reter líquidos ou misturas de líquidos e sólidos de maneira controlável e segura, propiciando benefícios para toda a sociedade”.

As barragens de terra normalmente se adequam a qualquer tipo de fundação, desde rocha compactada até terrenos construídos com materiais inconsolidados (MARANGON, 2004).

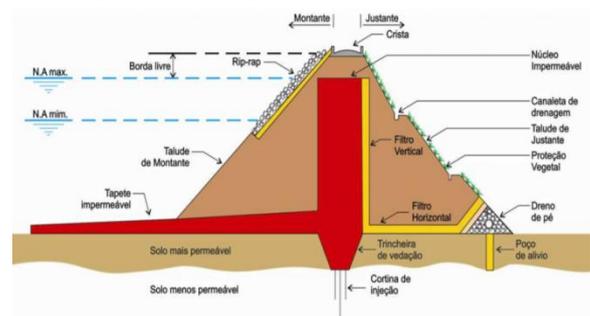
As barragens de terra podem ser construídas de maneira homogênea (Figura 3), que quando compactado deve apresentar baixo coeficiente de permeabilidade, ou zoneada (Figura 4), onde o núcleo é composto de material impermeável, geralmente núcleo argiloso, e os taludes feitos com material mais permeável (CARVALHO, 2011).

Figura 3-Barragem Homogênea



Fonte: CARVALHO, 2011

Figura 4-Barragem de Terra Zoneada

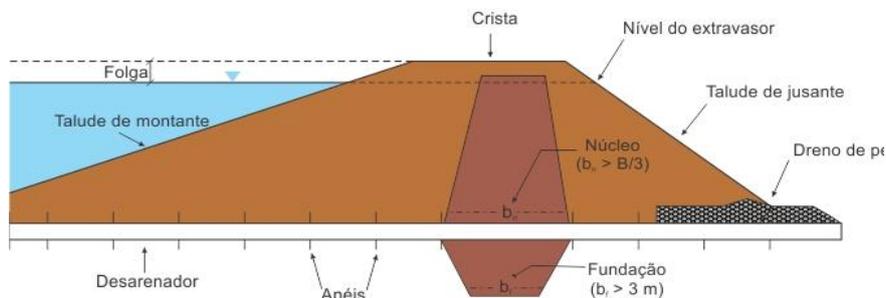


Fonte: CARVALHO, 2011

2.2 ELEMENTOS DE UMA BARRAGEM

A seguir são apresentados os elementos de uma barragem de terra conforme Carvalho (2008) na Figura 5.

Figura 5- Representação esquemática dos elementos hidráulicos



Fonte: Atlas Digital das Águas de Minas, 2009.

- Aterro: é o maciço, cuja função é reter a ou mistura de líquidos e sólidos;
- Altura: é a distância vertical entre a superfície do terreno até a crista;
- Borda livre ou folga: distância vertical entre o nível da água e a capacidade máxima da represa.

- Taludes: são as faces laterais e inclinadas, sendo o de montante que está em contato com a água, e o de jusante que está do lado seco da barragem;
- Crista: é a parte superior do aterro.
- Espelho d'água: superfície d'água acumulada no reservatório;
- Base ou saia do aterro: projeção dos taludes de montante e jusante;
- *Cut-off*: ou trincheira de vedação: sua principal função é aumentar o caminho de percolação da água na fundação e diminuir o gradiente de saída (MASSAD, 2003).
- Núcleo: Tem como objetivo de minimizar a percolação;
- Extravasador ou Vertedouro: estrutura com a finalidade de escoar o excesso de água da represa;
- Desarenador: Sua finalidade é o controle do nível da represa e garantir o escoamento à jusante;
- Dissipador de energia: tem a função de diminuir a energia cinética da água ao voltar para o seu leito natural.

Verificar e conhecer a geografia e estrutura da barragem é fundamental para evitar danos possíveis em sua vida útil de utilização (ABREU, 2015). Realizar a problematização dos elementos da barragem com o sistema de vazão máxima, vazão de projeto e extravasador e é peculiar para verificar os estados limites de forças resistentes e intervir contra o surgimento de possíveis fissuras e colapsos que poderá acontecer na estrutura (GOMES; TEIXEIRA, 2017).

2.3 DIRETRIZES PARA O DIMENSIONAMENTO DE BARRAGENS

“O projeto, deve basear-se em estudos e problemas que impactam diretamente na segurança de maneira previa, de acordo com o porte da barragem e com a classe de dano potencial que lhe for atribuída”, afirma o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (2016, p. 23).

De acordo com a Eletrobrás (2000), a barragem de terra é indicada para regiões onde apresentam leves ondulações e devem ser dimensionadas considerando aspectos estruturais, hidráulicos, operacionais e ambientais. O dimensionamento deve acontecer através da análise da barragem como um sistema interdependente de ações interligadas dos aspectos mensurados anteriormente segundo o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (2016).

Conforme orientação da Agência Nacional de Águas (2019), os projetos de barragens de terra devem atender a algumas especificações mínimas de segurança, como: levantamento planialtimétrico, estudos hidrológicos, dimensionamento hidráulico, Verificação das propriedades do terreno, Análise do corte e aterro do solo dimensionamento estrutural e o levantamento de medidas mitigadoras.

2.4 SEGURANÇA DE BARRAGENS

2.4.1 Generalidades

Segundo Sampaio (2014): “A segurança deve constituir o objetivo fundamental no projeto, construção e operação de barragens. Este deve ser referencial a ser buscado, uma vez que a ruptura de uma barragem pode ter consequências imensuráveis em termos de impactos socioeconômicos e ambientais”.

A segurança de uma barragem pode ser afetada por fenômenos naturais como enchentes, deslizamentos, terremotos e deteriorização do corpo da barragem e da fundação. Com o tempo a estrutura da barragem pode começar a se deteriorar devido aos anos da construção e, às vezes, pode ocorrer o aumento da pressão interna e vazamentos. Esses processos são lentos e não são percebidos de imediato por meio de exames rotineiros, por isso a importância do monitoramento contínuo da performance da barragem para a detecção de qualquer não conformidade no projeto ou em outro ponto da barragem que possa causar falha (ZUFFO, 2005).

2.4.2 Causas de rupturas em barragens de terra

As rupturas de barragens de terra são frequentes ao redor do mundo e estudos para desenvolver técnicas que tentam evitar ou minimizar os acidentes causados pelas rupturas foram feitos para avaliar quais as causas mais recorrentes. Veltrop (1991) apud Gago (2009) diz que as principais causas de rupturas de barragens são: galgamento, infiltrações e erosões.

2.4.2.1 Galgamento

Galgamento é um fenômeno caracterizado quando o vertedouro não possui capacidade adequada conforme projetada, conseqüentemente a água irá ultrapassar a altura da crista da barragem, iniciando o processo de erosão do talude de jusante que pode provoca a formação de brecha de ruptura gradativamente e global, como analisada na Barragem de Terra de São Francisco (Figura 6) (LAURIANO et al, 2017).



Fonte: ROCHA, 2015 apud LAURIANO, et al, 2017

A dimensão da brecha de ruptura depende do sentido e do tempo de duração do galgamento, essa duração pode ocorrer em diversos estágios sequenciados: vazão do vertedouro, início da erosão e a formação da ruptura global (LAURIANO et al, 2017).

2.4.2.2 Vazamento e piping no aterro e na fundação

Piping, ou também erosão regressiva, é quando a água de percolação escava um túnel ou tubo através do aterro podendo levar ao tombamento da barragem. É comum encontrar esse tipo de erosão em barragens construídas com solos de baixa qualidade e com grande permeabilidade (FAO, 2011).

Nas barragens é comum a passagem de água através do maciço ou da fundação, isso se chama infiltração (Figura 7). Contudo, a infiltração torna-se perigosa para a estrutura da barragem quando os materiais do maciço ou da fundação são carregados

pela água em direção a saídas não protegidas, formando vazios (erosão interna ou *piping*) ou quando a pressão de percolação é excessiva (MIRANDA, 2016).

Figura 7 - Esquema de infiltração em uma barragem



Fonte: MIRANDA, 2016

Para evitar o *piping* no corpo da barragem é necessário reduzir a velocidade de infiltração e facilitar a saída de água. No corpo da barragem, a correta instalação do sistema de drenagem interna orienta o percurso da água percolada e aumenta a segurança contra este problema (CAPUTO, 1973). Na fundação é necessário instalar um tapete drenante a montante e uma trincheira de vedação ou a construção de poços de alívio. Quando são utilizados os três métodos de prevenção em conjunto, drenagem no talude, tapete e trincheira de vedação, são mais eficazes contra a percolação (OLIVEIRA, 2008).

2.4.2.3 Falta de proteção de taludes

Os taludes das barragens de terra devem estar estabilizados para evitar a ruptura e assegurar a segurança da estrutura da barragem. A NBR 11682 (ABNT, 1991) dita as exigências no estudo e no controle de taludes, além de condições para a elaboração correta do projeto, execução, controle e conservação na construção de contenção de taludes (BARBOSA, 2014).

O talude de montante deve ser protegido contra a ação das ondas e correntes que podem dar início a uma erosão. Normalmente, esse tipo de proteção é feita com revestimento de rochas, conhecido como *rip-rap* ou enrocamento de proteção, mais comum em taludes a montante. Já os taludes de jusante podem ter a proteção revestida por vegetação ou *rip-rap*. Em barragens de terra é comum a utilização de gramíneas (Figura 18) no talude de jusante devido ao baixo custo (BARBOSA, 2014).

2.4.2.4 Adensamento e recalque

Recalque é um fenômeno que designa o rebaixamento vertical da estrutura devido ao adensamento do solo sob sua fundação, pode agravar a estabilidade da estrutura causando trincas e rachaduras (brechas), geradas por esforços não previstos em projeto. O recalque é o principal causador de trincas, ele pode existir por três parcelas: Recalque imediato, Recalque por adensamento primário e Recalque por compressão secundária (ALMEIDA, 2017).

O adensamento do solo refere-se à redução de vazios em função da expulsão da água presente em seu interior. Esse processo depende de variáveis como carregamento e tensões atuantes no solo no decorrer do tempo (PINTO, 2006).

A aplicação da carga permitirá o rebaixamento da estrutura em determinado tempo. Para barragem de terra é uma situação desfavorável na qual a barragem perde sua altura, essa perda acarretará no fenômeno caracterizado como galgamento da barragem (MEIRELLES, 2013). É possível solucionar o problema realizando a aplicação dos seguintes itens:

- Adicionamento de uma altura extra no dimensionamento;
- Acelerar o processo de adensamento com a drenagem por drenos verticais de areia com colchão de areia;
- Realizar a remoção dos solos moles presentes na fundação da barragem, com a adição de bermas de equilíbrio dimensionadas no projeto de inicial;

“Após verificar a existência de recalques e adensamento é de extrema importância realizar a intervenção necessária para não acarretar em problemas construtivos futuros” (MEIRELLES, 2013).

2.4.2.5 Problemas construtivos

Os problemas construtivos geralmente estão relacionados com falha de projeto, execução, compatibilização e escolhas inadequadas de materiais. Esses fatores podem deteriorar a estrutura da barragem mais rápido que o comum, afirma ANA (2013).

As falhas proporcionam diversas consequências para a barragem, mesmo quando não provocam perdas humanas e catástrofes ambientais, essas geram um alto dano econômico de reparo e/ou reconstrução da obra. Esse fenômeno é verificado devido à ausência adequada da investigação de propriedades geomecânicas e hidráulicas, ou a não previsão de possíveis situações na fase de projeto, comprometendo a execução e durabilidade do sistema construtivo devido à equivocados na fase de projeto (ROMANINI, 2016).

Na execução da obra é possível verificar algumas anomalias devido a problemas construtivos, principalmente nos períodos chuvosos em que podem ocasionar trechos sem a compactação desejada, provocando a divergência com a resistência projetada e detalhada no projeto. O excesso da movimentação de veículos pode acarretar na supercompactação do trecho além do que o previsto ANA (2013).

3 ESTABILIDADE DE TALUDES

3.1 DEFINIÇÃO

“Talude é um termo genérico, compreendendo qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou de ambos. Pode ser natural, caso das encostas ou vertentes, ou artificial, quando construído pelo homem, caso dos cortes e aterros.” (FIORI, 2015). A Figura 8 apresenta um talude de jusante de uma barragem.

Figura 8- Talude da barragem Casa de Pedra em Congonhas-MG

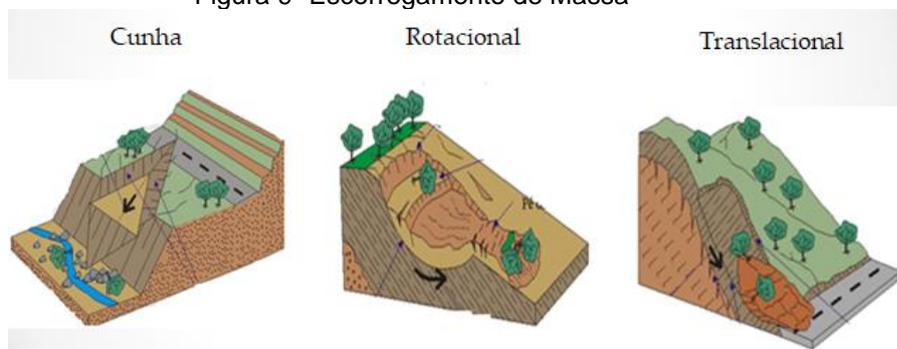


Fonte: MENDES, 2019

A estabilidade dos taludes é submetida a três ações: ao peso próprio dos materiais, ao escoamento da água e a resistência ao cisalhamento. A verificação do Fator de segurança é crucial devido à movimentação de terra que permeiam (escoamento, subsidência e escorregamento) no talude segundo Marangon (2004).

Os principais tipos de escorregamentos de massa são: cunha, circular e translacional(Figura 9):

Figura 9- Escorregamento de Massa



Fonte: INFANTI; FORNASARI, 1998

Ao analisar a estabilidade de um talude e o escorregamento de massa (cunha, circular e planar) é verificado que a superfície de ruptura depende da natureza e propriedades dos materiais constituintes, que podem ser perturbadores de agentes geológica e geotécnica do talude, menciona Fiori (2015).

3.2 MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

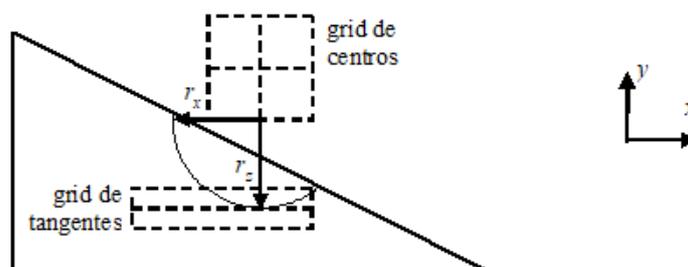
3.2.1 Fellenius

O método de equilíbrio foi desenvolvido pelo sueco Wolmar Knut Axel Fellenius (1936). O método “baseia-se na análise estática do volume de material situado acima de uma superfície de escorregamento de seção circular, e esse volume é dividido em fatias verticais, que considera o equilíbrio de forças verticais, horizontais e momentos” afirma Fiori (2015).

O Fator de segurança (FS) é determinado por diversas tentativas de centros e raios, para isso considerando-se um *grid* de centros e tangentes equidistantes, que permitem a determinação do raio que formará o traçado da superfície de ruptura. O FS é

dados pelo menor valor obtido nessas tentativas. Essa pesquisa do menor fator de segurança está ilustrada na Figura 10.

Figura 3- Geometria de superfícies de ruptura críticas



Fonte: DOMINGOS, 2016

O método de Fellenius é conservador e tende a fornecer valores baixos de FS. Em superfícies mais profundas e com índices consideráveis de poropressão é possível encontrar fatores de segurança mais confiáveis (GERSCOVICH, 2009). Considerando as fatias nas superfícies circulares onde possui centro de giro e momentos resistentes e atuantes, obtenha-se o fator de segurança da seguinte maneira:

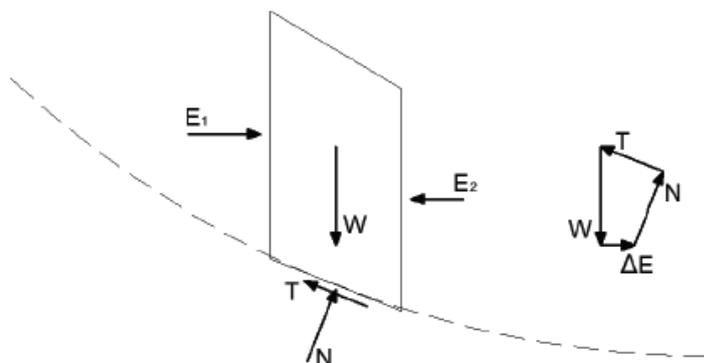
$$FS = \frac{\text{Resistência ao Cisalhamento Disponível}}{\text{Tensões de Cisalhamento Atuante}} \quad (\text{Eq. 1})$$

3.2.2 Bishop

O método foi proposto por Bishop em 1955 e analisa a estabilidade de um talude utilizando a divisão da cunha de escorregamento em diversas fatias. É uma modificação do método de Fellenius e considera as reações das fatias vizinhas (PEREIRA, 2013).

Inicialmente, o método de Bishop foi desenvolvido para análise de superfícies circulares, mas também pode ser utilizado para superfícies não circulares. O método não considera as forças de corte entre as fatias (Figura 11), mas sim o equilíbrio de momentos. Os bons resultados relacionados ao fator de segurança que o método fornece para certas análises fez com que fosse mais estudado. O fato das forças do corte entre as fatias não aparecerem na equação não diz que são iguais a zero. Isso acontece por assumir uma distribuição adequada das forças de cortes verticais entre as fatias que atenda ao mesmo tempo o equilíbrio de forças horizontais. A reação normal na base é resultado do equilíbrio de forças segundo a direção vertical (SILVA, 2011).

Figura 11 – Fatia genérica e polígono de forças no método de Bishop



Fonte: SILVA, 2011

4 BARRAGEM DE TERRA DO RIO DOS BOIS

A barragem construída sobre o lago Roberto Caetano é localizada no município de Leopoldo de Bulhões foi executado na gestão do ano de 1997 a 2000. Possui finalidade de contenção e lazer para o desenvolvimento do município. Todo o deságue do lago é proveniente da bacia hidrográfica Rio dos Bois.

Toda a orla do lago municipal é pavimentada com a livre circulação de automóveis nos dois sentidos da pista. É característica a presença de quiosques na direção direita (Figura 34) e locais para a prática de esportes como quadra de areia e campo sintético direção esquerda. Toda a extensão do lago corresponde a um perímetro de 0,00178 km e área correspondente a 0,13724 km² segundo simulação Google Earth (2019).

A barragem de terra se situa no sentido Sudoeste conforme demarcação da Figura 112, onde a poligonal de conteção é verificada no perímetro longitudinal e transversal da bacia. A localização da barragem no município é estabelecida na entrada principal da cidade na proximidade do perímetro 78,5 m.

Figura 12- Localização Geografica



Fonte: Google Earth.

O laudo de sondagem SPT (*STANDART PENETRATION TEST*) utilizado para determinação do perfil do solo nas proximidades da barragem foi realizado no mês de janeiro de 2018, de acordo com as NBR 8036 (1983) e NBR 6484 (2001). O presente relatório indicou a presença de solo com fração principal de argila em toda sua extensão. Na demarcação dos 6 m de profundidade inicial de SPT é verificado um solo com baixa resistência de descrição mole a muito mole, com coloração marrom.

4.1 VAZÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

Todo o volume de água da Barragem é derivado da Bacia Hidrográfica Rio dos Bois e sub-bacia do Rio do Peixe, com uma extensão de 46 municípios do Estado de Goiás, dentre eles 33 possuem áreas urbanas. Essa bacia tem uma área de drenagem de 34.552,04 km², o que corresponde a aproximadamente 10% do território do Estado de Goiás. A vazão do lago Roberto Caetano atende os mesmos critérios de vazão Q99 com um volume de aproximadamente 46,9 l/s que são escoados em manilhas de 1 metro de diâmetro segundo informações da RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

5 UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA GEOSTUDIO

Para a simulação e verificação da estabilidade do talude na barragem de terra da cidade de Leopoldo de Bulhões/GO foi utilizado o sistema computacional GeoStudio (Slope e Flux) que analisou a percolação de água pelo interior da barragem de pequeno porte em três situações: Caso A que não possui sistema de drenagem, Caso B com dreno de pé e Caso C com dreno chaminé.

A barragem de terra apresenta comprimento total de 25,70 metros de montante a jusante. A altura total de 8 metros, largura de crista de 7,80 metros e para a cota da crista foi considerada uma folga de 1,50 metros, denomina da borda livre. O talude de montante (lateral que fica em contato com a água) possui inclinação correspondente 49% e jusante 22%, com respectivamente 1:1,5 e 1:0,48 indicados por V:H ambos, constituídas de material de compactado conforme critérios de projeto.

5.1 ANÁLISE DOS DADOS POR MEIO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Com os recursos computacionais, dados geotécnicos e hidráulicos da barragem sobre circunstâncias distintas foram realizadas as simulações nos casos A, B e C. A verificação da simulação foi considerada com uma folga de 1,50 metros inferior a crista, sendo que a infiltração de água no maciço é representada pela linha pontilhada azul (linha freática) no interior da barragem. Essa é uma incógnita variável mediante as condições de simulação que lhe foram atribuídas (Figura 13).

Na incidência de um sistema sem drenagem (Caso A) a linha freática (cor azul), relativa ao fluxo de água é localizada a uma altura peculiarmente alta no talude de jusante, sendo que futuramente poderá ocasionar diversos problemas a barragem (infiltrações, anomalias e vazamentos), ocasionados por precipitações e ondas que oriundas de altas magnitudes podem causar o fenômeno chamado de galgamento muito prejudicial a estabilidade de barragens de terra, além de inferior que prejudicará completamente o sistema estrutural.

Ao inserir o sistema de drenagem, em particular o dreno de pé (Caso B), no talude de jusante é verificado que a implementação condiciona a diminuição da infiltração em relação ao percentual total de infiltração de água verificado no Caso A. O dreno realiza a captação de água que percolava do maciço e a direcionou ao fluxo de vazão. No Caso B é notório o fluxo de vazão sendo representado por setas, em que, quanto maior sua

magnitude maior é a força de percolação da água que infiltra no maciço. É importante inferir que no mecanismo de Caso B, a barragem está favorecendo o fator de segurança do talude, garantindo a estabilidade pelo controle de drenagem implementado evitando situações de vazamentos e *piping* no aterro.

Quando é adotado o filtro chaminé (Caso C) na simulação da barragem é possível verificar duas situações distintas de infiltração nos taludes de jusante e montante. No talude de montante a linha freática possui um caminho determinado de percolação sendo direcionada até a estrutura do filtro chaminé. No talude de jusante devido a incidência da captação de toda a infiltração de água no talude a montante o mesmo se torna seco, ou seja, sem a infiltração de água no talude jusante. No sistema de drenagem chamado de filtro chaminé o fluxo de água é captado na estrutura e direcionado o fluxo de água infiltrada pelas setas (Figura 14). Esse sistema comparado ao Caso B permite uma drenagem mais consistente e maior devido a dimensão do filtro ser maior que do dreno. Essa variável de infiltração permite obter uma segurança maior levando em consideração os Casos A e B analisando as principais porções e problemáticas de uma barragem de terra em vazamento, *piping* e galgamento. Apesar de ser um sistema com maior eficiência o projetista deve verificar as incógnitas de custos na implementação desse sistema, considerando o porte físico e estrutural que a barragem será submetida entre custo x benefício.

Figura 13 - Simulações iniciais

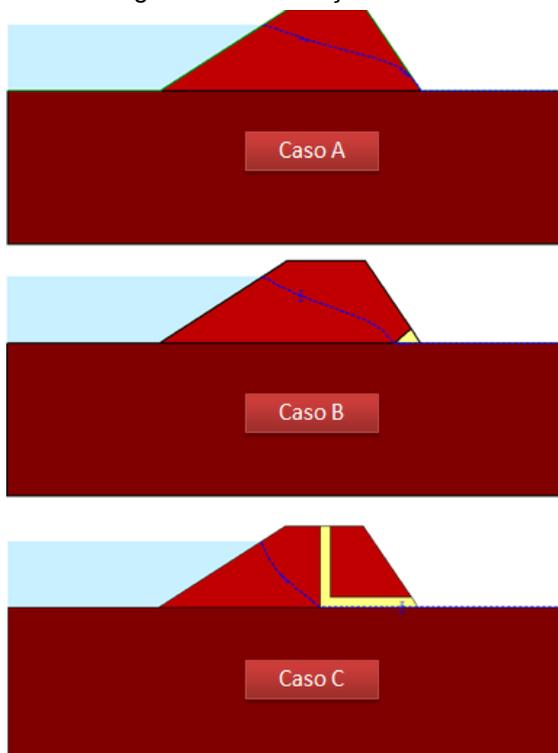
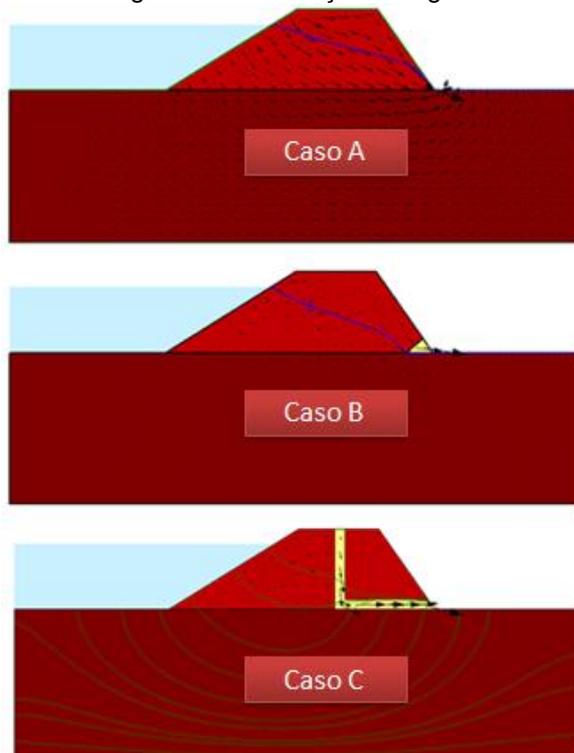


Figura 14 – Infiltração de água



Fonte: Autores, GeoStudio (2012)

Utilizando o método de equilíbrio Bishop foi encontrado o fator de segurança 1,483 e com o método Fellenius o resultado obtido foi de 1,420. Segundo Cruz (2004) o fator de segurança mínimo exigido para verificação em qualquer condição da estabilidade para resistência residual deve ser 1,2, portanto a falta de drenos não foi a causa de ruptura do talude.

Após as primeiras simulações foi colocado o dreno de pé para verificar se o comportamento da barragem seria mais eficiente e seguro. Com a presença de dreno de pé na simulação utilizando Bishop o fator de segurança ficou em 1,498 e com Fellenius

teve como resultado 1,428. As duas simulações obtiveram os fatores de segurança mínimos necessários, que é de 1,2, mas não tiveram grandes diferenças dos valores obtidos com a simulação realizada na barragem sem drenos.

Na última simulação foi colocado dreno chaminé para verificar o comportamento da barragem. O resultado do fator de segurança ficou em 1,530 para o método de equilíbrio Bishop e para Fellenius ficou em 1,333. Era esperado que com o dreno chaminé os fatores de segurança seriam os mais significativos, mas isso não aconteceu com o método de Fellenius que teve como resultado praticamente o valor mínimo adequado, segundo Cruz (2009). O método de Fellenius admite que as forças entre lamelas sejam paralelas a sua base e ignora forças resultantes de pressões neutras atuantes nas faces entre lamelas. Quando a pressão neutra é elevada o método de Fellenius não consegue levar em conta as forças resultantes da pressão nas faces verticais por esse motivo o fator de segurança ficou tão baixo (MASSAD, 2003).

Abaixo segue o resumo dos fatores de segurança encontrados nas simulações realizadas no software GeoSlope para os casos A, B e C utilizando os métodos de equilíbrio Bishop e Fellenius (Tabela 1).

Tabela 1 – Resumo de valores dos Fatores de Segurança do talude da barragem

Tipo de barragem	Método utilizado	Fator de segurança
Sem dreno	Bishop	1,483
	Fellenius	1,420
Dreno de pé	Bishop	1,498
	Fellenius	1,428
Dreno chaminé	Bishop	1,530
	Fellenius	1,333

Fonte: Autores.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estabilidade de uma barragem deve ser mantida linearmente sobre qualquer natureza, assegurando que seus riscos e potencialidades de eventuais fissuras, rupturas, adensamento, anomalias e problemas construtivos sejam nulos. E de tal modo à estrutura seja eficiente e capaz de garantir segurança ambiental, estrutural e principalmente à sociedade. A verificação da estabilidade da barragem Rio dos Bois foi realizada utilizando o software GeoStudio (Slope) e GeoStudio (Flux), através de condições de percolação e estabilidade a ruptura, averiguando o fator de segurança mediante a simulação de três sendo essas chamadas de Caso A (sem sistema de drenagem), Caso B (dreno de pé) e Caso C (filtro chaminé), todos com base nas propriedades geomecânicas e hidráulicas da barragem. Com os dados inseridos e analisados na Caso A em simulações, permitiu determinar que a linha freática de foi verificada em uma cota relativamente alta e esse fator impactou em um baixo fator de segurança de 1,42 e 1,48 respectivamente nos métodos de Fellenius e Bishop. No Caso B foi implementado um sistema de drenagem possibilitou captar as águas que percolaram na estrutura no pé do talude de jusante, esse fato implicou em análise do fator de segurança com os valores mais elevados para Fellenius e inferior a Bishop com respectivamente 1,50 e 1,43. Com o Caso C, que é um sistema de maior drenagem da infiltração e possível obter uma análise mais suscinta entre o método conservador de Fellenius e sua ampliação pelo método de Bishop, com valores bem distintos de 1,33 e 1,53 de fator de segurança a estabilidade da barragem. É possível verificar em razão da análise de simulações que a estabilidade e o fator de segurança, relativamente aos casos: Caso A, Caso B e Caso C, de que, quanto mais houver o empregode tecnologia de drenagem na barragem, melhores serão as

condições de estabilidade e segurança que a mesma será sujeita. O rompimento ocorrido em 1º de Abril 2000 da barragem Rio dos Bois, localizada no município de Leopoldo de Bulhões – GO, não foi ocasionada por problemas de percolação de água devido à infiltração de água no maciço. As três simulações demonstram a estrutura permanece estável nos três casos apontados e em virtude dos argumentos apresentados e aspectos analisados é imprescindível inferir que a barragem na atual situação não apresenta risco de rompimento por percolação de água no maciço. Para apontamentos da ruptura que ocorreu em 2000 é recomendada a realização de estudos, verificando fatores como clima do mês de agosto. Analisando a formação de ondas devido ao vento, além de inferir sobre o rebaixamento do nível de água em épocas de estiagens, pois prejudica a estabilidade e o fator de segurança da barragem, adensamento, além de mensurar problemas construtivos e anomalias entre possíveis divergências nas etapas de projeto e execução.

REFERÊNCIAS

ABREU, R. R. **Dimensionamento e acompanhamento executivo de uma barragem de terra para irrigação – um estudo de caso**. Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens**: Diretrizes para a Construção de Barragens. Volume VI. Brasília, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Mapa interativo das Barragens Cadastradas no Sistema**. Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/mapas-tematicos-e-relatorios/tema-1-1>>

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens**. Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/>>

AGUIAR, D. P. O. **Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens – ISB**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2014.

ALMEIDA, A. B. **Risco associado à segurança de barragens**. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571243001/texto-riscos.pdf>>.

ALMEIDA, J. G. R. **Deformações devido a carregamentos verticais**. Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia, 2017.

AMBIENTE BRASIL. **O que se sabe sobre o rompimento de barragem que matou ao menos 58 pessoas em MG**. Disponível em: <<https://noticias.ambientebrasil.com.br/clipping/2019/01/27/150026-o-que-se-sabe-sobre-o-rompimento-de-barragem-que-matou-ao-menos-58-pessoas-em-mg.html>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11.682 DE Setembro de 1991. **Estabilidade de taludes**.

ARAUJO, M. C. N. **Estudo de equivalência entre drenos franceses e tapetes drenantes em barragens de terra**. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS. **Roteiro básico para o dimensionamento de pequenas barragens de terra no estado de MG.** Disponível em: <http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/roteiro_dimensionamento_barragens.html#dois>

BARBOSA, R. A. **Diagnóstico e execução de ações corretivas visando à recuperação da Barragem Poleiros, em Barra de Santa Rosa, PB.** Campina Grande, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997.**

BRASIL. **Decreto Lei nº 10.752, de 21 de novembro de 1977.** Dispões sobre realização de Auditoria Técnica nas Autarquias e Companhias em cujo capital o Estado tenha participação majoritária para os fins que especifica.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e cria o Sistema Nacional de Informações sobre segurança de barragens.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 1.181-C de 2003.** Estabelece diretrizes para verificação da segurança de barragens de cursos de água para quaisquer fins e para aterros de contenção de resíduos líquidos industriais.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Volume 2 [3ª Ed. Rev. e ampl.]. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos; Brasília, INL, 1973.

CARDIA, R. R. KUPERMAN S. C. **Curso Segurança de barragens: inspeção e auscultação de barragens.** Módulo II, 2013.

CARVALHO, J. A. **Dimensionamento de pequenas barragens para irrigação.** Lavras: Ed. UFLA, 2008.

CARVALHO, D. **Barragens: uma introdução para graduandos.** Maio/2011. Disponível em: <http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem_terra_1.pdf>

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A história das barragens no Brasil: séculos XIX, XX e XXI.** Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras. Casos Históricos, Materiais de Construção e Projetos.** Oficina de Textos, 2ª edição. São Paulo, 2004.

DOMINGOS, V. H. **Estabilidade de taludes utilizando o método do equilíbrio limite.** Dissertação. Programa de pós-graduação em geotecnia, estruturas e construção civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2016.

ELETOBRAS, Centrais Elétricas do Brasil. **Diretrizes para projetos de PCHs,** 2000.

ES BRASIL. **Governo inaugura barragem em Marilândia e assina ordens de serviço em Sooretama**. Disponível em: <<https://esbrasil.com.br/governo-inaugura-barragem-em-marilandia-e-assina-ordens-de-servico-em-sooretama/>>.

FAO. **Manual sobre pequenas barragens de terra: guia para a localização, projeto e construção**. Roma: Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. 2011, 120p. (Publicação da FAO sobre Rega e Drenagem, nº 64).

FIORI, A. P.; CARMIGNAMI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Oficina de textos, 2015.

GAGO, R. **Gestão de crises no atendimento inicial a emergências com rupturas de barragens: Análise e proposta**. 2009. 204 f. (Monografia) – Centro de Aperfeiçoamento e Estudos Superiores. São Paulo, 2009.

GERSCOVICH, D. (2009). **Estabilidade de taludes**. Disponível em <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e5/Apostila_Taludes_UERJ.pdf>

GOIÁS. Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos Infraestrutura, Cidade e Assuntos Metropolitanos - SECIMA. **Manual de Licenciamento Ambiental**. Núcleo de Licenciamento. Goiânia-GO, 2017. Versão atualizada em fevereiro de 2017.

GOMES, M. O. TEXEIRA, R. L. **Análise e desenvolvimento de projeto construtivo de uma pequena barragem de terra no córrego da Cava – Morrinhos/GO, com foco na segurança**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG. Aparecida de Goiânia – 2017.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Cidades. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/leopoldo-de-bulhoes/panorama>>.

INFANTI Jr, N & KANJI, M. A, **Considerações preliminares sobre fatores que afetam a segurança de barragens de terra**. Revista Construção Pesada -Separatas, São Paulo, SP, 1974/1978.

JANSEN, R.B., **“Dams and Public Safety”**. US. BuRec, Denver, EUA, 1983, 332 p.

JÓNATAS, R. J. L. **Rotura de barragens de aterro por galgamento: ensaios experimentais com aterros homogêneos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.

LAURIANO, A. PIMENTA, J. CORTEZ, J. SILVA, A. **Discussões sobre os modos de falha e risco de galgamento de barragens de rejeitos**. II SGBR – Seminário gestão de riscos e segurança de barragens de rejeito, 2017.

MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. Barragens de Terra e Enrocamento. Cap. 5, 2004.

MARANGON, M. Parâmetros dos Solos para Cálculos de Fundações. Geotecnia das Fundações. Cap. 3, 2009.

MASSAD, F. **Obras de terra: Curso básico de geotecnia**. São Paulo, 2003. 216 p. Oficina de textos, 2ª edição.

MEIRELLES, F. S. C. **Unidade 9: Barragens de terra e enrocamento**. Módulo I – Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais, 2013. Disponível em: <https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/20/Unidade_9-modulo1.pdf>

MENESCAL, R. A.; CRUZ, P. T.; CARVALHO, R. V.; FONTENELE, A. S.; OLIVEIRA, S. K. F. **Uma metodologia para avaliação do potencial de risco em barragens do semi-árido**. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Fortaleza – CE. 2001.

MENDES, G. **Barragem gigante que tem cinco vezes mais chances de rompimento que Brumadinho**. Disponível em: <<https://www.falagm.com/artigo/congonhas-a-maior-barragem-de-minas-tem-cinco-vezes-mais-chances-de-rompimento-do-que-brumadinho>>.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. Unidade de Gerenciamento do Proágua/ Semi-árido. **Diretrizes ambientais para projeto e construção de barragens e operação de reservatórios**. Brasília, 2005.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de segurança e inspeção de barragens**. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. Unidade de Gerenciamento do Proágua/ Semi-árido. Brasília, 2002.

MIRANDA, A. N. **Inspeção de barragens de aterro**. Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil, 2016.

OLIVEIRA, J. R. C. **Contribuição para a verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2008.

PEREIRA, T. S. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

PERINI, D. S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

PIASENTIN, C. **Inspeção e auscultação de barragens**. Unidade 3: Inspeções visuais. 2013

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas/ 3ª Edição** – São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC – Rio. **Instrumentação e Segurança de Barragens**. Disponível em: <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0124945_03_cap_02.pdf>.

Prefeitura de Leopoldo de Bulhões. Disponível em: <<https://www.leopoldodebulhoes.go.gov.br/home>>.

RIO GRANDE DO SUL. **Decreto nº 6136, de 15 de julho de 1955**. Aprova a regulamentação da Lei nº 2434, de 23 de setembro de 1954, modificada pela Lei nº 2642, de 20 de junho de 1955. Assembléia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 15 de julho de 1955

RODRIGUES JR., A. R. **Estudo de diferentes métodos de análises de estabilidade de taludes terrosos**. Monografia. Universidade Federal do Pampa. Caçapava do Sul, 2015.

ROMANINI, A. **Barragens – Elementos de projeto**. Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus de Sinop. Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas. Sinop, 2016.

SAMPAIO, M. V. N. **Segurança de barragens de terra: um relato da experiência do Piauí**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

SANTOS, V. S. **Rompimento da barragem em Brumadinho**. Disponível em: <<https://www.biologianet.com/ecologia/rompimento-barragem-brumadinho.htm>>.

SAYÃO, A. **“Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento”**. Curso de Mestrado da PUC -RJ, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, João Paulo. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes**. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, 2011.

SMIDERLE. C. S. D. **Segurança de Barragens: análise da instrumentação da Barragem de Itaúba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

STRAUSS, M. **Análise de estabilidade do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SUGIMOTO, L. **Por barragens mais seguras**. Jornal da Unicamp. 2014. Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/sites/default/files/jornal/paginas/ju_605_pagina_cor_05_web.pdf>

TEIXEIRA, S. H. C. **Sistemas de vedação e de drenagem interna**. Curso de capacitação em estruturas de barragens: terra, enrocamento e rejeitos. Curitiba, 2017.

UNICAMP. **Barragens: uma introdução para graduandos**. Maio, 2011

USBR (*United States Bureau of Reclamation*). **Avaliação de pequenas barragens**. Brasília: Bureau of Reclamation, Manual de Irrigação, v.6., 2ª edição, 2002.

ZUFFO, M. S. R. **Metodologia para avaliação da segurança de barragens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.