

## ESTABILIDADE DE TALUDES: ESTUDO DE CASO

GEIGIBEL REINER<sup>1</sup>

MARCOS FERNANDES DE CARVALHO<sup>2</sup>

THIAGO MANTOVANI TONIAL<sup>3</sup>

**RESUMO:** As barragens são recursos cada vez mais utilizados no desenvolvimento socioeconômico da humanidade, com a função de armazenar ou represar a passagem de água para diversas finalidades. Entretanto, devido aos desastres ocorridos nos últimos anos, revelou-se a necessidade de estudos mais elaborados, assegurando a estabilidade de tais obras, visando evitar o rompimento. Sua estabilidade está diretamente ligada com os parâmetros do solo e sua resistência ao cisalhamento, como, coesão, ângulo de atrito e peso específico, através dos quais possibilita-se o cálculo do fator de segurança. O presente trabalho propõe determinar o fator de segurança utilizando-se método de cálculo, assim como, ensaios laboratoriais e de campo de prospecção para identificar os parâmetros do solo da região norte do Mato Grosso, mais especificamente no município de Sinop. Através do penetrômetro dinâmico leve buscou-se identificar a resistência à penetração e torque, para então obter o valor do ângulo de atrito interno e a respectiva coesão. A realização da análise granulométrica do solo permitiu sua classificação como areia, possibilitando estimar valores para o ângulo de atrito e para a coesão. Ao aplicar o método de cálculo de Fellenius para detectar o fator de segurança, constatou-se que os valores ficaram bem abaixo do esperado, permanecendo inferiores a 1, indicando que a barragem já teria rompido, entretanto, a estrutura foi executada aproximadamente 30 anos e continua intacta. A falta de aparelhos específicos para identificação do torque prejudicou a verificação precisa dos parâmetros necessários impossibilitando assim, a obtenção de resultados exatos referente as características do solo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ângulo de atrito; Coesão; Curva de ruptura; Fator de segurança; Peso específico.

### STABILITY OF SLOPES: CASE STUDY

**ABSTRACT:** Dams are resources increasingly used in the socioeconomic development of humanity, with the function of storing or damming the passage of water for various purposes. However, due to the disasters that occurred in recent years, the need for more elaborate studies has been revealed, ensuring the stability of such works, in order to avoid disruption. Its stability is directly linked with the soil parameters and its shear strength, such as cohesion, friction angle and specific weight, through which the safety factor can be calculated. The present work proposes to determine the safety factor using a calculation method, as well as laboratory and prospecting field tests to identify the soil parameters of the northern region of Mato

<sup>1</sup> Acadêmico de Graduação, Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Sinop – FASIPE, R. Carine, 11, Res. Florença, Sinop - MT. CEP: 78550-000. Endereço eletrônico: [geigibel@yahoo.com.br](mailto:geigibel@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Professor Pós Doutor em Engenharia dos Materiais e Metalúrgica, Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Sinop – FASIPE, R. Carine, 11, Res. Florença, Sinop - MT. CEP: 78550-000. Endereço eletrônico: [marcosf\\_c@yahoo.com.br](mailto:marcosf_c@yahoo.com.br)

<sup>3</sup> Professor Mestre em Matemática, Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Sinop – FASIPE, R. Carine, 11, Res. Florença, Sinop - MT. CEP: 78550-000. Endereço eletrônico: [thiago\\_tonial@hotmail.com](mailto:thiago_tonial@hotmail.com)

Grosso, more specifically in the municipality of Sinop. Through the light dynamic penetrometer, it was possible to identify the resistance to penetration and torque, to obtain the value of the internal friction angle and its cohesion. The granulometric analysis of the soil allowed its classification as sand, making it possible to estimate values for the angle of friction and for cohesion. When applying the Fellenius calculation method to detect the safety factor, it was verified that the values were well below expectations, remaining below 1, indicating that the dam would have already ruptured, however, the structure was executed approximately 30 years and remains intact. The lack of specific devices for the identification of the torque hampered the accurate verification of the necessary parameters, thus making it impossible to obtain accurate results regarding the characteristics of the soil.

**KEYWORDS:** Angle of friction; Cohesion; Rupture curve; Safety factor; Specific weight.

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, observou-se que, no Brasil, por inúmeras vezes, ocorreu a escassez de água para abastecer grandes cidades como São Paulo, Brasília, dentre outras. A ocorrência da escassez hídrica normalmente é resultante da combinação de vários fatores relacionados com a ação humana como, por exemplo, o consumo desenfreado e a degradação dos recursos naturais que prejudicam o equilíbrio natural, resultando em mudanças climáticas cujo dano é reforçado pela ausência de infraestrutura básica. Como consequência disso, constata-se o aumento das construções de barragens dos mais diferentes tamanhos, por todo o país, as quais vem suprir as necessidades de armazenamento e retenção de água para os mais diferentes fins. Define-se uma barragem como sendo uma estrutura artificial construída em cursos de água, permanentes ou temporários, criada com intuito de conter ou acumular água, assim como substâncias líquidas e misturas de líquidos e sólidos (GERSCOVICH, 2016).

As primeiras barragens brasileiras surgiram em meados de 1887 no Nordeste. A partir de então a evolução das técnicas construtivas de barragens se iniciou com o avanço das usinas para produção de energia elétrica, as quais se originaram nos estados sul e sudeste no final do século XIX. Entretanto, segundo a classificação da Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB) (do inglês *International Commission on Large Dams* – ICOLD) as maiores barragens se encontram na região nordeste do país (CBDB, 2011).

O rompimento de uma grande barragem traz problemas que são facilmente visíveis a todos, pois o fluxo de água liberado acaba levando tudo que está pela frente, ocasionando destruições com grandes perdas materiais e principalmente vidas humanas, como aquelas ocorridas recentemente em Minas Gerais, na Barragem de Fundão e em Brumadinho. Os acidentes que ocorrem em pequenas barragens não estão sendo considerados, contudo, essas barragens requerem cautela por parte da comunidade científica, estabelecendo-se a necessidade de estudos específicos com o intuito de minimizar a problemática causada com este tipo de acidente. Desta forma os pesquisadores buscam reduzir falhas, implementar medidas de controle e inspeções, promovendo maior segurança, evitando-se e minimizando-se tragédias com rompimentos.

De acordo com Lou (1981 *apud* FRANCA, 2002), os motivos que podem acarretar a ruptura de uma barragem são inúmeros como, por exemplo, falhas no projeto e execução, erosão nas encostas de montante e jusante, e até menos abalos sísmicos. Entretanto, para que o rompimento de um barramento aconteça pode haver a ação de um único fator ou

até mesmo a combinação de dois ou mais fatores, ou seja, quando a partir de um pequeno tremor de terra surge um assentamento de fundações ou deslizamentos ocasionando-se assim a ruptura. Os erros de projeto e execução, exploração incorreta de jazida e localização inadequada são fatores humanos que podem influenciar no rompimento de uma barragem. Contudo ainda existem os fatores não humanos como a erosão interna no corpo da barragem, o escorregamento de aterros, o assentamento de fundações e os abalos sísmicos, os quais também podem remeter a uma ruptura brusca na barragem.

Leme *et al.* (2016) consideram valiosos os esforços de investigação da geotécnica em compreender o comportamento dos solos não saturados, em busca de aprimorar e desenvolver projetos e construções, evitando-se e minimizando-se a oneração de custos quando considerados esses comportamentos, levando-se ao erro da desconsideração de uma grande parcela de resistência estimulada pela sucção mátrica dos solos.

Wieland (2012) destaca a relevância de estudos elaborados para desenvolvimento do projeto e a segurança das barragens, citando como exemplo o terremoto em 11 de março de 2011 que ocorreu em Tohoku no Japão. Tremores de 9,0 graus de magnitude na Escala Richter, provocaram a falha em uma barragem com 18,5 m de altura, causando uma grande onda de inundação e acarretando a perda de 8 vidas. Até a presente data não havia sido contabilizado mortes ou danos materiais e ambientais causados por grandes barragens em função de terremotos.

Atualmente, observaram-se desastres de grande proporção provocados pela ruptura de barragens no Brasil. Entre 2001 e 2015 ocorreram 10 acidentes, concentrando-se, principalmente, no estado de Minas Gerais. Portanto, faz-se necessário investir, cada vez mais, em estudos relacionados ao comportamento do solo específico da região em que as barragens se encontram. Considerando-se a importância de uma barragem para o desenvolvimento regional, é de grande relevância que a mesma apresente estabilidade, e, conseqüentemente, seja segura, com máxima eficiência de custo benefício em relação a sua vida útil.

Ao analisar a estabilidade do barramento de terra, o estudo do solo é um aspecto de grande relevância, ocorrendo através da investigação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, os quais envolvem coesão, ângulo de atrito interno e peso específico. Tais parâmetros só serão determinados a partir de análises laboratoriais, utilizando-se as condições mais desfavoráveis possíveis. Através dos critérios estabelecidos é exequível calcular os fatores de segurança a serem adotados para o solo em estudo (CARVALHO; PASCHOALIN, 2004).

A coesão produz uma ligação química entre as partículas do solo, proporcionando certa tensão de resistência. Entretanto, esta tensão é relativamente ínfima ao ser comparada com o atrito entre os grãos do solo. Desta maneira, a resistência ao cisalhamento está rigorosamente vinculada ao atrito entre as partículas do solo, ainda que na natureza se encontrem solos com componentes cimentícios provenientes de certas transformações geológicas, que proporcionam uma coesão mais significativa (PINTO, 2006).

Pinto (2002) define ângulo de atrito como sendo a maior abertura angular entre as forças aplicadas em um plano, tensão normal e a tensão de cisalhamento, que o solo resiste. Apontando-se, desta forma, a situação limite quanto à resistência ao cisalhamento, ou seja, expondo-se a inclinação extrema, considerando-se a diferença de atrito do solo para com outros sólidos, onde a quantidade de grãos no solo influencia decisivamente o deslizamento através do rolamento de uns sobre os outros. Deste modo os solos não são considerados

análogos, devido às misturas que proporcionam variadas granulometrias e, conseqüentemente diferentes níveis de atrito, como no caso da areia e argila.

O vínculo entre tensão normal ( $\sigma$ ) e tensão cisalhante ( $\tau$ ), determina que ao se aumentar a primeira, responsável pelos deslizamentos, estimula-se o acréscimo na segunda. O ângulo de atrito ( $\phi$ ) é delineado pela correlação entre as duas tensões, normal e cisalhante (GUIDICINI, 1983).

O peso específico natural de um solo é a relação entre seu peso total e seu volume total. Geralmente a variação entre os solos é de 19 a 20 kN/m<sup>3</sup>, podendo ser maior que 21 kN/m<sup>3</sup> ou pouco menor 17 kN/m<sup>3</sup>. As exceções em argilas orgânicas moles podem atingir o valor de 14 kN/m<sup>3</sup>. Quando o peso específico não é conhecido estima-se como sendo igual a 20 kN/m<sup>3</sup> (PINTO, 2002).

Outras características, segundo Fiori (2015), que afetam diretamente a resistência ao cisalhamento do solo são a poropressão, pressão neutra ou ainda pressão intersticial. Quando o solo está saturado seus espaços vazios, antes ocupados pelo ar, estão cheios de água a qual exerce uma pressão hidrostática com a mesma intensidade em todas as direções. A poropressão causa diminuição na tensão normal, sem afetar a tensão de cisalhamento.

Em alguns solos coesivos ocorrem grandes deformações para que seja possível alcançar resistência ao pico de cisalhamento. Como consequência, esses solos podem se deformar excessivamente quando carregados. Para evitar deformações excessivas, atenção especial deve ser dada à resposta de tensão-deformação dos aterros coesivos e fundação durante o projeto. Portanto os solos coesivos necessitam de um estudo mais elaborado em função de suas características consideradas frágeis para utilização em aterros de inclinações (USACE, 2003).

De acordo com Fiori (2015), considera-se talude toda superfície inclinada, podendo ser composta de terra, rocha ou pela combinação de ambos. As encostas e vertentes são consideradas taludes naturais, enquanto os artificiais são todos os aterros e cortes produzidos pelo homem. Sua estabilidade está diretamente ligada a constituição natural dos componentes do solo, assim como dos fatores relacionados às ações geológicas, antrópicas e geotécnicas.

Três forças distintas agem sobre os taludes, o peso próprio do solo, a ação do escoamento das águas e a resistência ao cisalhamento. Tendo em vista que sua estabilidade está diretamente ligada ao equilíbrio dessas forças, as duas primeiras se unem no sentido de movimentar o aglomerado de solo ladeira abaixo e a última tende a segurar esse deslocamento (FIORI, 2015).

O deslizamento é uma falha de cisalhamento que envolve uma parte de um aterro, em relação à massa adjacente. Essa falha é convencionalmente considerada ao longo de superfície discreta e é assim assumida em análises de estabilidade. As superfícies defeituosas são frequentemente de forma aproximadamente circular, exceto em casos onde os aterros são compostos por camadas finas sobre leitos rochosos, ocasionando assim falhas com arcos e planos interconectados (USACE, 2003).

Gerscovich (2016) cita que o escorregamento é outra forma de movimentação que ocorre na superfície de forma rápida, sendo desencadeado quando as tensões cisalhantes do solo atingem a resistência ao cisalhamento do material. O autor esclarece que a geomorfologia caracteriza as rupturas como sendo planares, circulares, em cunha ou ainda a combinação entre elas. A ruptura rotacional é a mais frequente em encostas, onde o escorregamento está ligado a vários fatores, dentre eles a infiltração da água, variação de poropressão e possíveis fraturas existentes. Portanto, para garantir a estabilidade do maciço seguem-se alguns critérios

que levam em consideração itens como definição da topografia, sobrecargas que serão aplicadas, condições críticas as quais, possivelmente, serão submetidos durante sua vida útil, investigações de campo para caracterizar tipos de solo e níveis freáticos.

A investigação da estabilidade de um talude e/ou barragem, segundo Gerscovich (2016), tem por finalidade mensurar a perspectiva de acontecer um escorregamento de massa. Essas análises são executadas a partir da relação da resistência ao cisalhamento do solo ( $\tau_f$ ) com as tensões cisalhantes mobilizadas ( $\tau_{mob}$ ) resultando dessa comparação o fator de segurança (FS). Como possíveis resultados dessa investigação, se  $FS < 1$ , a obra é considerada instável; se  $FS = 1$  pode ocorrer ruptura e, por fim, se  $FS > 1$ , a obra é considerada estável. Contudo, o valor de FS é apenas tomado como base para estabelecer o valor do fator de segurança admissível ( $FS_{adm}$ ), o qual corresponde ao valor mínimo a ser alcançado na pior situação de um talude. Dentre os critérios a serem avaliados para definição do  $FS_{adm}$  levam-se em consideração as consequências em caso de ruptura em termos de perdas humanas e econômicas.

Em concordância com a Norma Brasileira – NBR 11682 (ABNT, 2009), que trata da estabilidade de taludes, cada projeto deve ser classificado dentro de seu nível de segurança, que varia de acordo com os riscos de perdas humanas, materiais e ambientais, conceituando-se, ainda, a necessidade de avaliar as condições iniciais, assim como toda sua vida útil. Desta forma, evitam-se ações agressivas como, por exemplo, sobrecargas, infiltrações excessivas e cortes na base do talude.

As barragens de terra, na maior parte dos casos, são formadas por múltiplas camadas de solo compactadas uma a uma, geralmente material encontrado no local, ou ainda de uma jazida próxima. Para que seu núcleo apresente baixa porosidade de modo a restringir a percolação de água, deve-se utilizar um material semi-poroso no montante, como o solo argiloso ou argilo-arenoso e poroso na jusante, podendo ser argilo-arenoso e arenoso, assegurando-se maior estabilidade (FERREIRA, 2001 *apud* ALMEIDA, 2013).

De acordo com Carvalho e Paschoalin (2004), pequenas barragens de terra com altura entre 10 e 15 m não possuem critérios apurados de estudos para projeto de aterro e fundação, sendo utilizada como regra, quase que geral, uma inclinação de 2:1 e 3:1 para taludes de montante e jusante, respectivamente. Neste caso, deixa-se de levar em consideração alguns aspectos relevantes como, por exemplo, sua estabilidade, a qual por sua vez está diretamente ligada a resistência do solo, coesão e ângulo de atrito.

Dentro do estudo de análise de estabilidade de barragens existem situações em que o talude se torna mais propenso ao deslizamento. Uma das circunstâncias é durante a cheia da barragem quando o montante fica totalmente saturado, diminuindo-se a coesão entre os grãos do solo podendo ocorrer a erosão subterrânea. Outra situação se dá caso ocorra uma variação brusca do nível da água do reservatório, reduzindo-se, assim, o peso exercido pela água sobre o talude de montante e diminuindo-se a resistência ao cisalhamento deste solo devido ao fato dele ainda estar saturado. Na jusante do talude, os cuidados são voltados para as pressões de percolação e suas consequências devido ao solo encontrar-se submetido às forças da percolação, provocando-se o desequilíbrio do talude (FERNANDES, 1998).

A execução da fundação de forma criteriosa tende a diminuir a deformação do terreno contribuindo, assim, para a ampliação da capacidade de carga do solo, principalmente em solos com resistência baixa. Portanto, há casos em que surge a necessidade da retirada de parte do solo existente no local, o qual deve ser imediatamente substituído, proporcionando, também, o aumento da percolação da água através da barragem, evitando-se a ocorrência de fluxo sob ela (DINIZ *et al.*, 2011).

Branquinho (2014) realizou um estudo referente à estabilidade de barragens de rejeitos, no qual trabalhou com o levantamento das características do solo, como ângulo de atrito, coesão e peso específico. O autor vinculou essas características à geometria da barragem, altura e comprimento, bem como com a rede de fluxo ou percolação da água na barragem para mensurar a estabilidade das mesmas. Por meio deste estudo foi possível constatar que o FS aumenta, consideravelmente, de maneira exponencial em barragens com menores dimensões, principalmente, na altura.

Seguindo Branquinho (2014) o aumento ocorre, principalmente, devido ao FS ser a relação entre resistência ao cisalhamento do solo pela tensão cisalhante atuante, onde, a resistência é afetada pela coesão, ângulo de atrito e tensão normal. Enquanto a tensão cisalhante atuante é exclusivamente influenciada pela tensão normal e a altura do material multiplicado pelo seu peso específico. Sendo assim, com a diminuição das alturas os fatores com mais relevância para o cálculo são coesão e ângulo de atrito. Entretanto com alturas maiores o produto da altura do material e peso específico constituem valores mais significantes, fazendo com que o FS sofra redução. Ao estipular as alturas de 2, 15 e 30 m obtiveram-se FS de 4,928, 1,594 e 1,221, respectivamente.

Para Calle (2000), *apud* Branquinho (2014), existem atualmente, vários tipos de métodos para se determinar o FS referente à estabilidade de um talude, nos quais são imprescindíveis o conhecimento geológico e o perfil do solo. Dentre os métodos que o autor citou na sua pesquisa, alguns se destacam na semelhança das correlações utilizadas referentes as maneiras de calcular o FS, sendo eles, Fellenius (1936), Bishop (1955), Bishop simplificado, Janbu (1973), Morgenstern&Price (1965), Spencer (1967), Madej (1971) e Sarma (1973). Tais métodos utilizam o equilíbrio de momentos, equilíbrio de forças, fatias horizontais e circulares, fatores de correção empírico e função arbitrária.

Branquinho (2014) comparou o resultado do cálculo do FS de um programa computacional, GeoStudio 2007 versão estudante, com aqueles obtidos a partir dos métodos citados anteriormente. O autor obteve para todos os casos, um FS acima de 1, variando-se de 1,373 a 1,485. Desta maneira ele considerou que os taludes analisados eram estáveis, pois valores acima de 1 indicam que os esforços atuantes são menores que os esforços resistentes. Ainda na comparação dos cálculos do FS a variação dos resultados foi de  $\pm 0,1$  entre os resultados, a qual é considerada ínfima.

Desta maneira, Branquinho (2014) realizou várias simulações utilizando os parâmetros do solo de um caso em estudo, com alteração apenas nas dimensões da altura, onde oscilou a altura entre 18 e 30 m, resultando, desta forma, em uma diminuição do FS de 1,481 para 1,221, respectivamente. Para confirmar esta oscilação do FS em relação à altura da barragem, também foram calculados os FS para barragens de 18 e 2 m de altura. A variação do FS da barragem para esse caso foi discrepante, sendo que, de acordo com a diminuição da altura o FS aumenta, saindo de 1,481 para 4,928, respectivamente, para barragem de 18 e 2m. O autor ainda contempla a necessidade de avaliar o FS de uma barragem periodicamente, durante toda sua vida útil pois o mesmo varia com o passar do tempo, principalmente, devido aos fatores naturais como cheias, secas, assentamentos e sismos.

Fernandes (1998) reforça que a verificação da estabilidade de um talude pode ser realizada através de vários métodos, destacando-se como principais Fellenius, Bishop e Janbu. Deve-se enfatizar que as metodologias investigativas são basicamente semelhantes, pois utilizam o equilíbrio dos esforços na base da superfície de escorregamento, aplicando-se a relação  $\tau_{mob}$  e  $\tau_f$  (equação 1) determinando-se o FS que necessita ser superior a 1. A superfície de escorregamento muda sua forma de acordo com as particularidades da formação

da barragem. Quando a constituição é exclusivamente de terra essa superfície é circular e em caso de barragem mista de solo e rocha passa a ser não circular. O autor ainda demonstra que dentro de cada método deve ocorrer a variação do raio e da posição do centro da circunferência, com intuito de verificar a situação mais desvantajosa para a estabilidade do talude. Os resultados dos FS obtidos através dos métodos utilizados foram semelhantes, com pequenas variações, sendo Fellenius 1,51, Bishop 1,73 e Jambu 1,47.

Segundo Barros *et al.* (1999), os tremores/terremotos podem se originar devido a vários fatores como, por exemplo, explosões/detonações, injeção profunda de líquidos no subsolo, extração de líquidos, escavações de minas e enchimento de lagos artificiais usados como represas. No entanto os Terremotos Induzidos por Reservatório (TIR) são considerados de pequena grandeza, apesar de em alguns casos atingir magnitudes moderadas, entre 5 e 7 graus na Escala Richter.

A explicação mais plausível de como as barragens causam terremotos, de acordo com Jauhari (1999), está relacionado com a pressão extra de água criada nas fissuras e microfissuras no solo sob o reservatório e em suas proximidades. Quando a pressão da água nas rochas aumenta, ela se comporta como lubrificante nas falhas que já estão sob tensão tectônica, mas são impedidas de escorregar pela fricção das superfícies rochosas.

Segundo ICOLD (2012), a necessidade de estudos comprometidos com a segurança desde a concepção do projeto de uma barragem, pode amenizar inúmeros prejuízos com perdas ambientais, materiais e principalmente vidas humanas. Todos os aspectos de riscos sísmicos devem ser avaliados e considerados durante a elaboração do projeto de uma barragem, pois, os tremores de terra podem causar distorções, vibração estrutural, movimentação das fundações, falhas no leito do reservatório, queda de rochas, deslizamentos de terra, ondas de impulso no reservatório, rachaduras e até mesmo aberturas de juntas, ocasionando a liberação da água do reservatório. Os terremotos agem de forma horizontal nas estruturas em geral como, por exemplo, pontes, edifícios e barragens. Nas barragens, devido as suas grandes cargas serem no sentido horizontal suas estruturas robustas são dimensionadas com maior capacidade de resistência horizontal, minimizando-se de certa maneira os abalos.

ICOLD (2012) menciona a grande quantidade de Sismicidade Disparada por Reservatório (do inglês *reservoir-triggered seismicity* - RTS), que normalmente acontece devido a presença de uma falha ativa na região, ou, a existência de tensão tectônica nas proximidades do reservatório, como, é o caso da barragem Hsinfengkiang na China e Koyna na Índia, em que, em ambos os casos não havia registros de Sismicidade na região antes da construção das barragens. As barragens possuem resistência para suportar os RTS, porém, as edificações nas proximidades podem ser danificadas, apesar de que os RTS são geralmente de pequenas grandezas.

Os TIRs no mundo afora vem sendo observados e registrados desde a década de 1940, segundo Barros *et al.* (1999). Entretanto, no Brasil somente a partir da década de 70 que se iniciaram as análises, observações e registros de TIR, sendo confirmado, até 1999, 21 casos. De acordo com Simpson (1976) existem diversos fatores que contribuem para desencadear os terremotos induzidos por reservatório, sendo os principais o tamanho e peso do reservatório, condições geológicas, hidromecânicas, esforços tectônicos pré-existentes, variação do nível d'água do lago e cargas suplementares.

Em análise feita por Lopes (2016), em decorrência da ruptura da barragem de Mariana, vários laudos realizados pela Polícia Civil de Minas Gerais, Ministério Público Federal, Polícia Federal e Ministério Público de Minas Gerais, grande parte dos especialistas consideram que a principal causa da ruptura estava relacionada com a movimentação da areia

que desempenhava a função de filtro dos rejeitos da mineradora na parte frontal da barragem. O deslocamento da areia para o fim da barragem gerou o efeito contrário, ou seja, deixou de drenar e passou a reter a água que entrava com os rejeitos. Esse fator gerou um problema de percolação e alterações bruscas nas pressões internas do depósito, que, conseqüentemente, acarretou no aumento da carga suportada pelo talude, ultrapassando o limite estimado de resistência, causando o rompimento da barragem.

Outra hipótese mencionada por Lopes (2016), refere-se a onze pequenos tremores que ocorreram no dia do rompimento, detectados na região de Mariana e registrados pelo sismógrafo da Universidade de Brasília (UNB). Os abalos sísmicos oscilaram entre a magnitude de 1,7 a 2,7 graus na Escala Richter. Todavia, essa possibilidade ainda está em estudo, pois as barragens são concebidas para resistir magnitudes maiores que as registradas.

De acordo com Pereira (2005), a resistência ao cisalhamento do solo reduz o aumento da poropressão ( $r_u$ ). Sendo assim, para que uma pesquisa seja confiável, referente ao FS necessita-se de uma adequada estimativa das poropressões geradas no barramento. Para desenvolver uma pesquisa quantitativa referente a  $r_u$  utilizou um programa computacional para a investigação do comportamento da geração de excessos de  $r_u$ . Ele oferece vários métodos para simular o comportamento dos solos. Nesta pesquisa um caso hipotético foi utilizado, sendo o mesmo, homogêneo e simétrico com 150 m de altura a partir do solo de fundação, optou-se pelo modelo Mohr-Coulomb para a realização do estudo hipotético.

A princípio Pereira (2005) considerou a distribuição constante do parâmetro poropressão, para que, posteriormente, houvesse uma subdivisão por faixas em função das características de drenagem do barramento. Durante a série de análises de estabilidade, as propriedades dos materiais não tiveram variações, foram alterados unicamente os parâmetros de  $r_u$ , em 5, 10, 20, 30 e 40 %. Conseguiu-se através disto avaliar mais satisfatoriamente a influência do desenvolvimento de poropressões no talude. Constatou-se uma ampla alteração nos valores do FS, variando de 1,6 para 5% até 1,09 para 40%, aproximando-se do limite tolerado entre a estabilidade e ruptura do talude, ou seja, estabilizado para  $r_u > 1$  e sujeito a ruptura  $r_u = 1$ . Em todos os casos as possíveis rupturas serão superfícies circulares integradas no corpo da barragem, com a fundação tangenciando a superfície de ruptura caracterizando-se uma ruptura de pé de talude.

Em uma segunda análise permaneceram as características pré-determinadas do solo, sendo utilizados valores distintos de parâmetros de  $r_u$  na seção da barragem. Utilizou-se em uma faixa no núcleo do barramento o parâmetro de  $r_u$  de 40%, havendo uma redução para 20% da  $r_u$  na primeira parcela de solo no sentido do núcleo para o lado externo do barramento, e, posteriormente restringe para 5% o parâmetro na parte externa do talude. Em função desta nova concepção foi novamente calculado o FS resultando em 1,43. Neste outro fragmento da pesquisa observou-se que a superfície de ruptura continua sendo circular, entretanto, ocorreram mudanças notáveis ao ser confrontado com o anterior, ou seja, a cunha de ruptura desloca-se para o centro do barramento. A modificação ocorre essencialmente devido ao maior valor de parâmetro de poropressão estar concentrado no núcleo. Esta composição onde os parâmetros de  $r_u$  são variados dentro da seção do barramento assemelhando-se com o desempenho efetivo de uma barragem, devido ao fato destas disposições não serem constantes (PEREIRA, 2005).

Leme, Neto e Silva Filho (2016) buscaram compreender a influência que solos não saturados podem exercer na estabilidade de uma barragem de terra durante seu primeiro enchimento e operação, considerando-se a importância da variação da sucção mátrica relacionada as propriedades geotécnicas do solo. A obra usada para implementar o estudo foi

a Barragem Pesqueiro, no município de Capistrano, no estado do Ceará – Brasil. Foram utilizadas amostras deformadas e indeformadas do solo utilizadas na construção do maciço da barragem, para realização dos ensaios de granulometria, peso específico dos grãos, limite de liquidez e limite de plasticidade, peso específico seco máximo, a umidade ótima e permeabilidade.

Leme, Neto e Silva Filho (2016) utilizaram o software SEEP/W (GEO –SLOPE 2007) que adota o Método de Elementos Finitos para realizar análises de fluxo buscando-se averiguar as condições de percolação em consequência das propriedades do solo e dos carregamentos que o talude está sujeito no decorrer do período do enchimento e operação da barragem. Em relação a estabilidade dos taludes de montante e jusante, considerou-se a variação de poropressão no maciço, sendo que, no talude de jusante esta variação tornou-se muito nítida a influência da sucção no cálculo do FS, pois, quando não considerada a sucção o FS apresenta um valor aproximado de 1,81, para tanto, na metodologia em que a sucção é considerada no cálculo da estabilidade o FS tem uma diferença de 13,8%, chegando seu valor a 2,10. A oscilação dos valores do FS no talude de montante é maior que na jusante, ocorrendo o pico máximo de 29,6 % de diferença nos dois primeiros anos, período em que o talude de montante não está totalmente saturado, aumentando significativamente a resistência em função da sucção atuante. Ou seja, o FS calculado pelo método tradicional da mecânica dos solos é bem menos expressivo pois não considera o aumento da resistência provocada pela sucção.

A região norte do Mato Grosso possui uma quantidade considerável de córregos e rios, proporcionando, assim, a praticidade para utilização dessas águas em barragens de terra, com as mais variadas funções. Devido à ação dessas obras para o desenvolvimento das funções econômicas regionais, busca-se determinar as características do solo, como, coesão, ângulo de atrito e peso específico granulometria e saturação, bem como analisar e estabelecer o FS nas barragens existentes. Além do mais, torna-se crucial compreender as propriedades do solo utilizado como, por exemplo, compactação, percolação e drenabilidade, ponderando as particularidades geométricas de crista, montante e jusante. Sendo assim, qualquer alteração de uma das variáveis pode acarretar a oscilação do resultado referente ao FS.

A grande maioria das barragens construídas na região norte do Mato Grosso não possui estudo para realização de projetos de construção. São alteadas de acordo com as necessidades do proprietário, sem observar os critérios primordiais do solo, os quais foram mencionados previamente, ou ainda, a inexistência de processos apropriados de compactação do solo a fim de garantir mais estabilidade para o barramento. Sem controle construtivo estas barragens possuem condições favoráveis para a ocorrência de falhas e, conseqüentemente, possíveis rupturas. Outros aspectos ignorados referem-se a falta de monitoramento, inspeção e fiscalização durante a operacionalização.

O presente trabalho tem como propósito executar uma investigação qualitativa das prováveis causas que podem afetar a estabilidade de taludes de terra e, conseqüentemente, gerar sua ruptura. Busca-se, também reunir, quantitativamente, elementos para determinar, analisar e discutir a relação da estabilidade das estruturas com a cunha de ruptura, resultando no FS específico para solo da análise de caso em estudo. As análises foram desenvolvidas no município de Sinop-MT, especificamente em uma barragem utilizada para criação de peixes. Iniciou-se a investigação através de ensaios *in loco* com o penetrômetro dinâmico leve (DPL) para obtenção da resistência do solo, através da coleta de amostra para ensaios laboratoriais.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para USACE (2003), em abordagem habitual de análise de talude, a estabilidade parte da investigação do equilíbrio de massas do solo, sendo composta por parte abaixo da superfície em potencial deslizamento e acima pela superfície da encosta, onde se faz a comparação entre os momentos e forças que visam causar a instabilidade, com as forças que mantem a estabilidade. A maioria dos métodos utilizam seções transversais bidimensionais (2-D), com condições de deformação plana. Através de inúmeros arranjos sobre a superfície de deslizamento, busca-se a superfície crítica, ou seja, com menor valor do FS. Portanto, a estabilidade ou instabilidade é calculada através dos fatores que a induzem, tais como, peso próprio, sobrecargas, forças de cisalhamento e pressões ao longo a superfície em análise.

O FS tem por finalidade garantir a estabilidade e o desempenho adequado e se relaciona diretamente através com duas considerações importantes, as forças de cisalhamento em análise e as condições de incerteza naturais como, por exemplo, terremotos e o desempenho inaceitável em caso de falha da encosta. Para construções novas o valor mínimo exigido pelo USACE (2003) no fim da construção o FS deve atingir 1,3 para montante e jusante. A longo prazo o talude deve manter o FS de 1,5, principalmente na jusante. No caso de o reservatório atingir nível máximo, o FS deve se manter em 1,4 na jusante. Entretanto na situação de esvaziamento rápido, o FS do montante deve se manter entre 1,1 e 1,3.

A razão entre a resistência ao cisalhamento ( $s$ ) e as tensões mobilizadas para garantir o equilíbrio ( $\tau$ ) do talude, caracterizam o FS. Sendo que a resistência ao cisalhamento pode ser substituída pelos fatores que a induzem, como mostra a equação 1 (USACE, 2003).

$$FS = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \phi'}{\tau} \quad (1)$$

Onde:

$c'$  é a coesão de Mohr-Coulomb;

$\phi'$  é o ângulo de atrito;  $\sigma$  é a

tensão normal e  $u$  é a pressão

d'água nos poros.

O termo  $\sigma'$  representa a resistência ao cisalhamento através do envelope de falha de tensão efetiva para a tensão normal efetiva específica, sendo que  $\sigma'$  e  $\phi'$  em um envelope de falha curvada passam a representar o intercepto e declive de um envelope Mohr-Coulomb linear equivalente. Desta forma, pode-se alterar a fórmula de estresse efetivo para estresse total, usando  $\sigma$  e  $\phi$  em vez de  $\sigma'$  e  $\phi'$ , e a poropressão passa a ser zero (USACE, 2003).

O Método Ordinário de Fatias (do inglês *Ordinary Method of Slices* – OMS) foi desenvolvido por Fellenius em 1936, sendo também conhecido como Método de Fellenius. Para este método as forças laterais da fatia são ignoradas e a força normal da base da fatia é resultado da soma das forças em uma direção perpendicular ao fundo da fatia. Para calcular o FS são somados os momentos sobre o centro do círculo. A equação 2 é utilizada para calcular o FS de cada uma das fatias da superfície (USACE, 2003).

$$FS = \frac{\sum [c' \Delta \ell + (W \cos \alpha - u \Delta \ell \cos^2 \alpha) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha} \quad (2)$$

Onde:

$c'$  e  $\phi'$  = parâmetros de resistência ao cisalhamento para o centro da base da fatia

$W$  = peso da fatia

$\alpha$  = inclinação do fundo da fatia

$\Delta l$  = comprimento do fundo da fatia

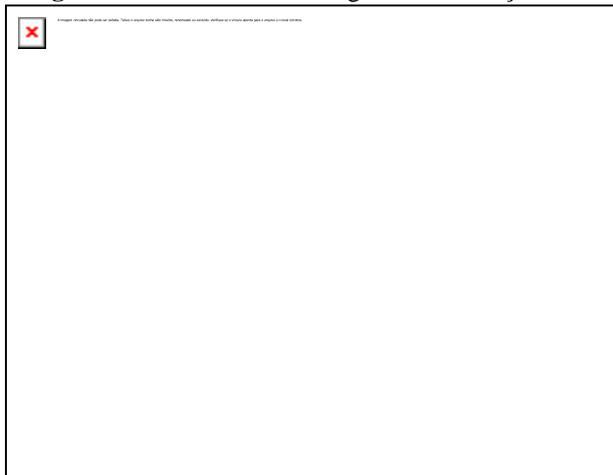
O Método Ordinário das Fatias tem algumas limitações, pois não leva em consideração as forças laterais da fatia em análise, assim como não satisfaz o equilíbrio das forças nas direções horizontal e vertical. O equilíbrio do momento é satisfatório para toda massa acima da superfície de deslizamento, mas, não para as fatias individuais. Portanto, os valores do FS podem divergir em até 20% quando comparados com métodos de cálculo mais rigorosos. O método é considerado conservador, sendo este determinado através do valor de  $\phi$ , variando de acordo com as poropressões, sendo que, quando  $\phi = 0$  encontra-se o mesmo FS de métodos rigorosos, o qual satisfaz totalmente o equilíbrio estático (USACE, 2003).

Este método baseia-se em suposições de superfície de deslizamento circular, e, só pode ser utilizado para cálculos de superfícies de deslizamento circular. Uma das razões pela qual o método ainda é muito utilizado trata-se da sua simplicidade de elaboração dos cálculos podendo ser feitos manualmente, simplesmente com uma calculadora. Assim torna-se útil para resolver problemas que podem se desenvolver próximo ao pé do talude, na saída da superfície de deslizamento (USACE, 2003).

A barragem em estudo localiza-se no município de Sinop-MT, a cerca de 3 km do perímetro urbano. Ela foi executada há aproximadamente 30 anos e sua utilização é principalmente para criação de peixes. Durante a estruturação do maciço não houve extração de solo de jazida externa, sendo usado apenas o solo presente no entorno. Deve-se ressaltar que não foram efetuadas análises do solo utilizado, buscando determinar os parâmetros para melhor compactação como, por exemplo, umidade ótima. Sabe-se que durante a execução foi houve certo controle na compactação, com utilização de camadas de no máximo 30 cm de solo entre as compactações, reduzindo, consideravelmente, os índices de vazios, tornando o solo mais homogêneo. O não conhecimento dos parâmetros do solo utilizado para construção do talude leva ao questionamento a respeito de sua estabilidade, visto que frente a esse fato, foram utilizadas ideias empíricas e experiência do profissional para a sua construção. O enchimento do lago aconteceu através das águas pluviais, no período da estação chuvosa, de novembro a abril. A maior cheia que ocorreu durante a vida útil da barragem de contenção chegou a um volume aproximado de 1000 m<sup>3</sup>, cerca de 30 cm abaixo do nível da crista.

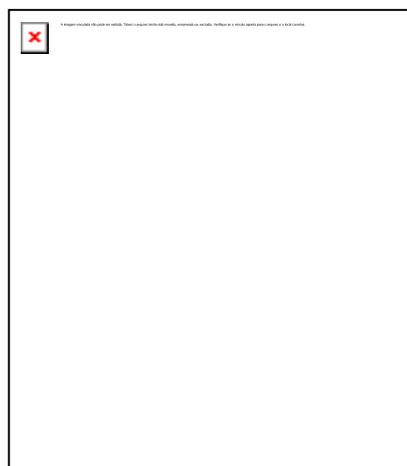
Após a escolha do local mais apropriado para a execução do ensaio de prospecção com o penetrômetro dinâmico leve (DPL), iniciaram-se as marcações e a preparação para a execução de cada furo. O ensaio tem por finalidade fornecer índices relacionados a resistência que o solo oferece à penetração, conjuntamente, obtendo atrito lateral através de um torquímetro. Foram realizados 5 furos no eixo central da crista do maciço com distâncias aleatórias, variando de 3,95 a 5,13 m (Fig. 1). Cada um dos furos teve uma profundidade alcançada de 5 m, tamanho máximo da soma das hastes do equipamento, ou seja, foram ultrapassados 2 m do nível do solo no entorno. Durante a realização dos furos a cada metro verificava-se o atrito lateral com auxílio do torquímetro. Ainda no local foi realizada a retirada de uma amostra de solo, aferindo imediatamente seu peso, para obtenção das suas características naturais, sendo então, posteriormente utilizada para fazer análises granulométricas em laboratório.

**Figura 1:** Geometria da barragem de contenção



**Fonte:** Elaboração própria.

**Figura 2:** Imagem de satélite



**Fonte:** Google Earth Pro.

Na Figura 1 constam as medidas da largura da crista, os desníveis, posição de localização dos furos do DPL, distâncias entre furos e delimitação da área de contenção máxima e na Figura 2 consta uma imagem de satélite do local. Além disso, já, na Figura 3 observam-se as características relacionadas as dimensões do maciço. Através do corte detalham-se as alturas, largura e inclinações do talude de montante e jusante, assim como, o nível de água no período de análise.

**Figura 3:** Perfil da barragem de contenção



**Fonte:** Elaboração própria.

No laboratório houve a preparação da amostra retirada do maciço, colocando-a em uma bandeja para então permanecer na estufa durante 24 horas. Após passar o período necessário para eliminar toda umidade presente, o solo foi pesado e destorroad. Posteriormente, a amostra foi colocada nas peneiras e levada ao agitador de peneira, seguindo os critérios exigidos pela NBR 6502 que regulamenta o ensaio de granulometria. Com o peneiramento completo as quantidades retidas em cada peneira foram pesadas e anotadas, para que posteriormente, fossem calculadas as porcentagens retidas em cada peneira iniciando-se a classificação do solo através da curva granulométrica quanto argila, silte ou areia de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995).

Através do perfil do maciço foram elencados alguns pontos com maior probabilidade de ocorrência de deslizamentos e/ou escorregamento. A partir dos pontos determinam-se os raios de atuação das curvas de ruptura. Com o posicionamento das curvas no talude dividindo-as em fatias de acordo com o método de Fellenius, possibilitando assim

extrair os dados numéricos como, altura e ângulos, necessários para iniciar os cálculos do valor do FS proposto pelo método usado na análise.

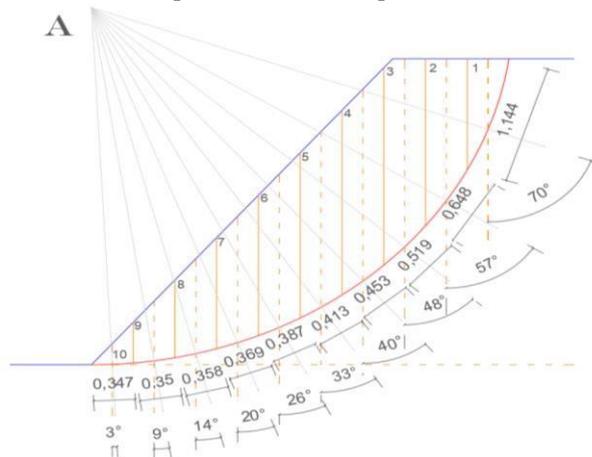
Com os resultados dos ensaios do DPL realizados no local do ensaio de granulometria executado no laboratório e as possíveis curvas de deslizamento do talude iniciaram-se os cálculos para determinar o valor do FS mais crítico para a barragem em estudo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A inexistência de torque verificada durante o ensaio com DPL influenciou diretamente sobre os resultados, impossibilitou a determinação através de cálculos do valor do ângulo de atrito interno e da coesão do solo em estudo. Optou-se então por utilizar a classificação do solo realizada através do ensaio de granulometria, na qual constatou-se ser areia, segundo NBR 6502 (1995), possibilitando assim, estimar valores para o ângulo de atrito e a coesão do solo tomando como base o estudo de correlações empíricas em função do *standard penetration test* (SPT) citado por Marangon (2018).

Nas Figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9 estão representados os pontos centrais com suas respectivas curvas de ruptura, os quais são considerados mais propícios para a ocorrência de escorregamento e/ou deslizamento. O ponto A (Fig. 4) forma círculo de pé de talude; os centros B, C e F (Fig. 5, 6 e 9) configuram círculos de ponto intermediário de ruptura na base e, os pontos D e E (Fig. 7 e 8) formam círculos com ruptura superficial de face. As curvas de rupturas D e E são as mais propícias ao deslizamento, pois estão mais próximas do topo do maciço. Enquanto as curvas A, B, C e F estão propícias ao escorregamento, onde a massa de terra que se encontra dentro da linha da curva de ruptura move-se rebaixando parte do maciço.

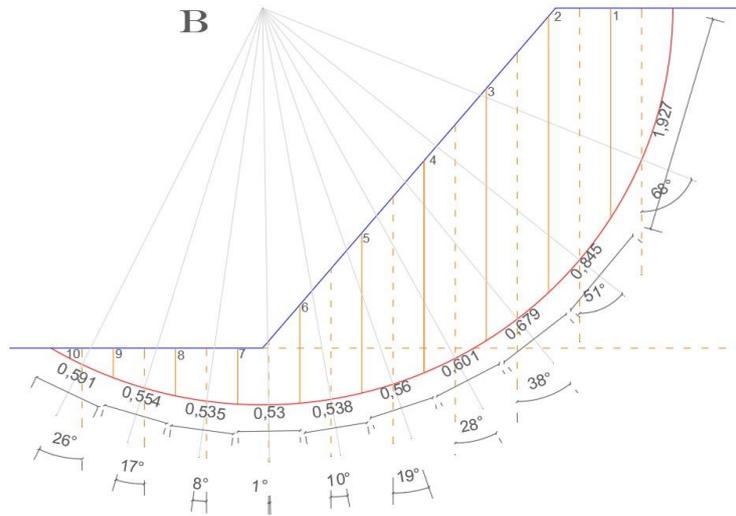
**Figura 4:** Ponto central A e respectiva curva de ruptura.



**Fonte:** Elaboração própria.

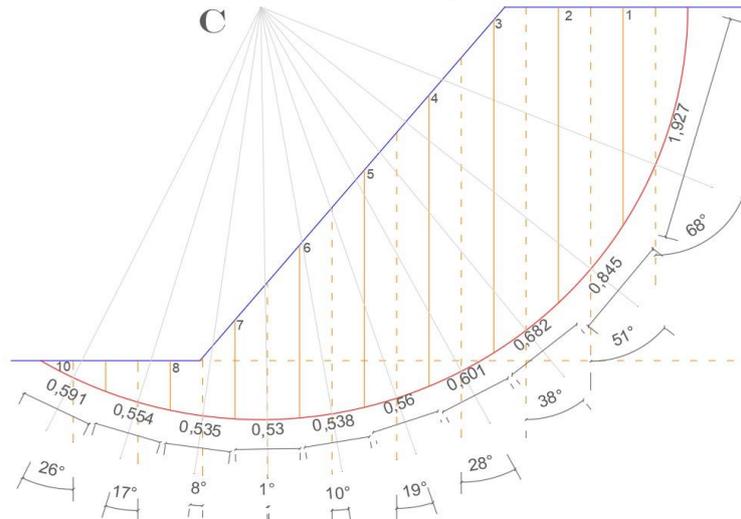
:

**Figura 5** Ponto central B e respectiva curva de ruptura.



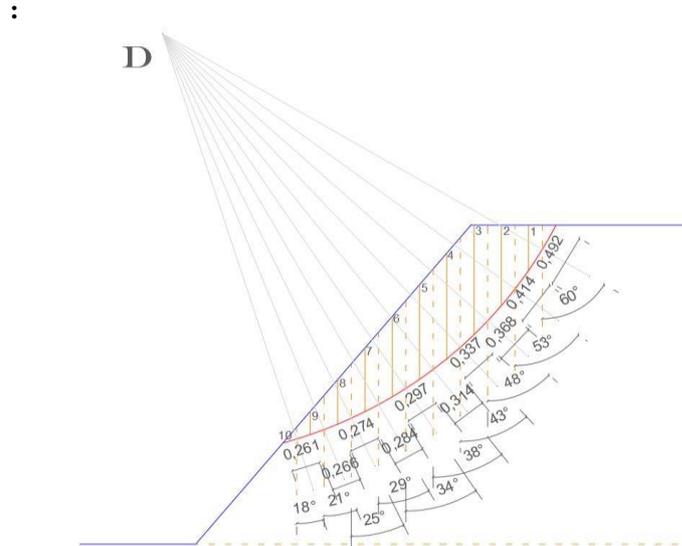
**Fonte:** Elaboração própria.

**Figura 6:** Ponto central C e respectiva curva de ruptura



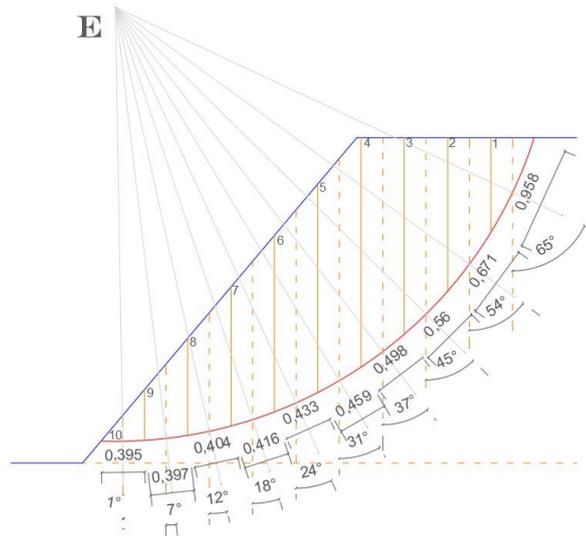
**Fonte:** Elaboração própria.

**Figura 7:** Ponto central D e respectiva curva de ruptura



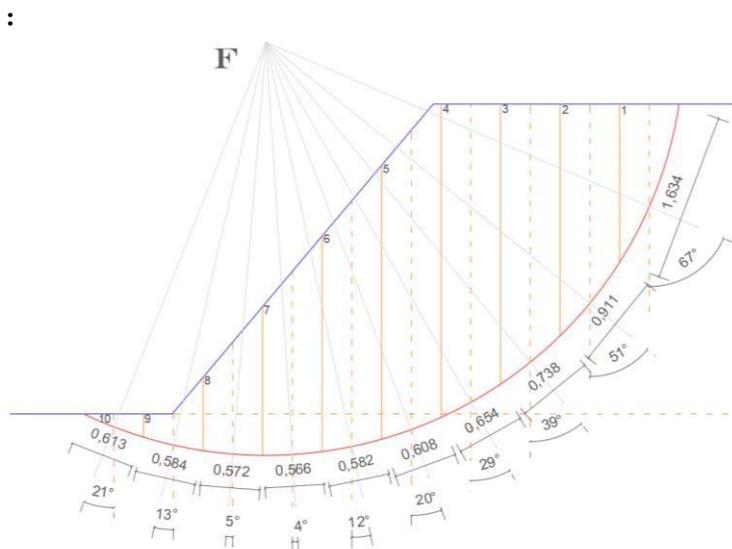
Fonte: Elaboração própria.

Figura 8 Ponto central E e respectiva curva de ruptura.



Fonte: Elaboração própria

Figura 9: Ponto central F e respectiva curva de ruptura.



**Fonte:** Elaboração própria.

Após a extração dos valores de peso específico, coesão, e ângulo de atrito do solo, conjuntamente com as curvas de rupturas, iniciou-se a composição de planilhas de acordo com o método das fatias de Fellenius para obtenção dos valores de FS. Para o solo foi utilizada uma coesão igual a 0, ângulo de atrito interno igual a  $40^{\circ}$  e peso específico de  $17,65 \text{ kN/m}^3$ , ambos equivalentes ao solo arenoso citado nas correlações SPT por Marangon (2018). A coesão permanece igual a 0 para qualquer nível de compactação da areia, de fofa a muito compacta. No entanto o ângulo de atrito varia de  $25^{\circ}$  para areia fofa a menor que  $45^{\circ}$  para areia muito compactada. Entretanto, optou-se por usar  $40^{\circ}$  que permanece no limite entre areia medianamente compacta e compacta, devido principalmente aos conhecimentos prévios relacionados a compactação do maciço.

Com a organização dos dados e fórmulas em planilhas eletrônicas, obtiveram-se os seguintes dados mencionados na Tabela 1 para os FS da barragem em estudo.

**Tabela 1** Valores do fator de segurança (FS) nas curvas de ruptura.

	<b>Curvas</b>					
	A	B	C	D	E	F
<b>FS</b>	1,16	1,00	1,13	0,99	1,22	1,41

**Fonte:** Elaboração própria.

Ao analisar os fatores de segurança percebe-se que permaneceram abaixo de 1,5, valor mínimo exigido pela NBR 11682 (2009). Entretanto, requer a utilização do valor de 1,5 nos casos onde o risco é alto à danos de vida humana, materiais e ambientais. Para o caso em estudo, devido ao fato de estar localizada em meio a pastagem, com inexistência de construções habitacionais próximas, contendo apenas vegetação rasteira nas proximidades e principalmente em função do talude ser considerado pequeno, baseando-se na NBR 11682 (2009) em função das características locais o risco para danos a vidas humanas, materiais e

ambientas é baixo, admitindo-se a utilização do valor do FS mínimo como sendo 1,2. Mantendo, assim, as curvas E e F como seguras, e as curvas A, B e C como estáveis com possibilidade de ruptura. Contudo, salienta-se que a curva D está abaixo de 1, caracterizando o talude como instável e com grande probabilidade de rompimento.

Nota-se com clareza que devido a utilização da coesão igual a 0 a curva de ruptura D tem o menor valor de segurança, constatando que a falta de coesão entre as partículas do solo provoca o deslizamento de parte do maciço. Em uma análise hipotética do solo com a coesão igual a 1, todos os pontos ultrapassam o valor do FS 1, sendo que o ponto D, o mais crítico atinge o valor de 1,13, ou seja, com uma mínima coesão o talude já pode ser considerado estável.

## CONCLUSÃO

Foi possível concluir por meio da aplicação do método de cálculo de Fellenius para identificar o FS, que os valores obtidos para o talude em estudo, ficaram abaixo do esperado, sendo observado um ponto crítico (D), no qual o FS permaneceu abaixo de 1, indicando que a barragem é instável e provavelmente já poderia ter se rompido. Entretanto, a estrutura foi executada há aproximadamente 30 anos e continua sem deformação aparente. A principal fundamentação referente ao baixo valor do FS, está relacionado à ausência de valores precisos para coesão e ângulo de atrito do solo, os quais, devido à falta de aparelhos específicos para identificação, inviabilizou um resultado preciso a respeito da segurança do talude em estudo.

Fica como sugestão para trabalhos futuros a necessidade de obtenção de aparelhos que possibilitem a caracterização do solo a respeito dos parâmetros de resistência, garantindo assim, resultados precisos a respeito do FS em taludes na região, assim como, possibilidade de fazer a caracterização de tais parâmetros para o solo da região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 11682: Estabilidade de encosta. Agosto, 2009.

ALMEIDA, P. F. **Análise de estabilidade de barragens de aterro em fase de esvaziamento**. 2013. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil (Perfil de Geotecnia) – Faculdade de Ciência de Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

BARROS, J. B. *et al.* **Aspectos da Sismicidade induzida por reservatórios no Brasil.** Artigo publicado no XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belo Horizonte, Minas Gerais, março de 1999.

BRANQUINHO, L. O. S. **Análise de estabilidade de barragem de rejeitos em planta industrial de Poços de Caldas – MG.** 2014. Trabalho conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Alfenas – Poços de Caldas Minas Gerais.

CALLE, J. A. C. **Análise de ruptura de talude em solo não saturado.** Dissertação de mestreado em geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2000.

CARVALHO, D. PASCHOALIN, J. A. F. **Estudo da estabilidade de barragens de terra compactadas em três teores de umidade.** Universidade Nove de Julho. São Paulo, 2004.

CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. **A História das Barragens no Brasil séculos XIX, XX e XXI,** Cinquenta Anos do Comitê Nacional de Barragens, Rio de Janeiro. 2011.

DINIS, G. R. PEREIRA, T. A. R. ROLIM, F. A. O. **Uma contribuição para a auditoria em pequenas barragens de terra: pontos críticos de análise.** Disponível em: <<http://www.ibraeng.org/pub/artigos>>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2018, as 13:01h.

FERNANDES, M. O. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Fellenius, Bishop e Jambu.** 1998. Artigo publicado na Revista Tecnologia, n<sup>o</sup> 19 p. 91 a 98, Fortaleza.

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

FRANCA, M. J. R. P. **Caracterização e modelação numérica e experimental da ruptura provocada por galgamento de barragens de enrocamento.** 2002. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos -Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes.** 2<sup>a</sup> edição. São Paulo. Oficina de Textos. 2016.

GUIDICINI, G. NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1983.

HORST, R. **Avaliação dos Métodos para Cálculo de Estabilidade de Taludes em Maciço Terroso.** Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Departamento de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Ijuí, Rio Grande do Sul, 2007.

ICOLD. **Damsafetyandearthquakes.** Documento de posição da Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD). Preparado pelo Comitê ICOLD sobre Aspectos Sísmicos do Projeto de Barragens. Presidido pelo Dr. Martin Wieland. Revisado em agosto 2012.

JAUHARI, V. P. **Operation, monitoring and decommissioning of large dams in India.** Environment, Forests, Science & Technology Department; Andhra Pradesh State; India. Contributing paper to the World Commission on Dams, 1999.

LEME, R. F. NETO, S. A. D. SILVA FILHO, F. C. **Influência da sucção mátrica nas condições de fluxo e estabilidade de talude de uma barragem de terra.** Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, julho, 2016.

LOPES, L. M. N. **O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais.** Faculdade de Direito da Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, junho, 2016.

PEREIRA, D. A. **Previsão de poropressão construtiva em barragens via simulação numérica.** Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Brasília, Distrito Federal, 2005.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 2a ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2002.

SIMPSON, D. W. **Seismicity changes associated with reservoir loading.** Lamont-Doherty Geological Observatory of Columbia University, Palisades, N. Y. 10964, USA, June, 1976.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), **Engineer Manual, Slope Stability.** ENGINEERING AND DESIGN, 1110-2-1902, 2003. Disponível em:  
<<http://www.usace.army.mil/inet/usacedocs/>>. Acesso em: 29 de outubro de 2018.