



UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
EDINEI DOS SANTOS SILVA

ANÁLISE DOS ESFORÇOS FÍSICOS EM BARRAGEM DE TERRA:
Abordagem Matemática para Segurança e Sustentabilidade Ambiental (Paramirim/BA)

Alagoinhas/BA
2025

EDINEI DOS SANTOS SILVA

ANÁLISE DOS ESFORÇOS FÍSICOS EM BARRAGEM DE TERRA:

Abordagem Matemática para Segurança e Sustentabilidade Ambiental (Paramirim/BA)

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade do Estado da Bahia – UNEB com requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Dr. Prof.: Genilson Cunha de Oliveira Filho.

Alagoinhas/BA

2025

RESUMO

Ao longo dos anos, a segurança de barragens tem ocupado espaço no meio técnico, primordialmente com as causas dos últimos acontecimentos. As barragens de terra são documentadas como sendo um dos artificios mais arcaicos e construtivos, sendo usadas como reservatórios artificiais de água para diversos usos. O reflexo da problemática da segurança destes projetos no Brasil é mediante as variações dos materiais construtivos, como as rochas, os tipos de solos, problemas de fundação, deficiências de projetos, erros durante a construção e instabilidades de taludes, sendo evidenciados os grandiosos índices de incidentes e acidentes em meados de 2017, conforme o Relatório Anual de Segurança de Barragens (RASB). Entretanto, o objetivo deste trabalho é analisar os esforços físicos atuantes da barragem de terra Zabumbão da CODEVASF em Paramirim/BA, verificando a segurança, equilíbrio, qualidade e preservação ambiental, mediante as exigências do Manual de Segurança e Inspeção de Barragens e a Lei 12.334/2010. A metodologia é sustentada pela modelagem computacional, *software* FINE/GEO5 2024, com aplicação do método Bishop Simplificado (1955), no qual foram feitas a análise de percolação da água, ancoragem, tipos de solos, tipos de aterros, drenos, filtros e esforços físicos existentes e possibilidades de ruptura. Os resultados analisados evidenciaram que os cálculos do fator de segurança (FS) encontrado foi positivo e está em conformidade com o Manual de Segurança, a Lei e a norma EN 1997. Por fim, o uso deste método possibilita trazer avanços essenciais e confiáveis para a remediação de segurança de barragens de terra.

Palavras-chave: Barragem. Análise. Segurança. Meio Ambiente.

ABSTRACT

Over the years, dam safety has occupied space in the technical field, primarily with the causes of recent events. Earth dams are documented as being one of the most archaic and constructive artifices, being used as artificial water reservoirs for various purposes. The safety issues related to these projects in Brazil are reflected in the variations in construction materials, such as rocks, soil types, foundation problems, design deficiencies, errors during construction and slope instability, with the high rates of incidents and accidents in mid-2017 being evident, according to the Annual Dam Safety Report (RASB). However, the objective of this work is to analyze the physical efforts acting on the Zabumbão earth dam of CODEVASF in Paramirim/BA, verifying the safety, balance, quality and environmental preservation, according to the requirements of the Dam Safety and Inspection Manual and law (12.334/210). The methodology is supported by computational modeling using the FINE/GEO5 2024 software, by Bishop Simplified (1955), in which the analysis of water percolation, anchoring, soil types, types of embankments, drains, filters and existing physical efforts and possibilities of rupture were performed. The results analyzed showed that the calculations of the safety factor (FS) found are in accordance with the safety manual, the law and the EN 1997 standard. Finally, the use of this method makes it possible to bring essential and reliable advances to the safety remediation of earth dams.

Keywords: Dam. Analysis. Safety. Environment.

1. INTRODUÇÃO

Barragens de terra, são construções realizadas à margem de rios, de forma transversal, para reter cursos hídricos, visando obter reservatórios artificiais, acumular água ou elevar seu nível, podendo atender a demanda humana, que enfrenta grandes problemas voltados a distribuição de água de qualidade para promoção da saúde à sociedade (OLIVEIRA et al., 2008, p. 2). Conforme Netto (2019, p. 11 e Jansen, 1983), a engenharia de barragens possibilita atender algumas demandas humana, como o abastecimento, a piscicultura, a irrigação, a geração de energia hidrelétrica, lazer e outros.

De acordo o último senso da Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB/ICOLD, 2019), atualmente, são 65% do total de barragens de terra cadastradas no Registro Mundial de Barragens. Tendo influência no ranking mundial referente à altura de barragens, com análise dos artificios de construção, a barragem de terra (Rogun, no Tajiquistão), projetada como a mais alta do mundo (335 m), com 60,96 m foi destruída parcialmente pela enchente, em 1993, devido à falta de investimentos, paralisou a obra, continuando depois (NETTO, 2019, p. 11; ICOLD, 2019).

Conforme a Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (2021), no Brasil existem 22.654 barragens cadastradas por 33 órgãos fiscalizadores, submetidos ao Política Nacional de Segurança de Barragens, deste montante, 50% têm dados do empreendedor, 87% tem dados da capacidade, 54% tem dados da altura e 51% não há dados referente a autorização, outorga ou licenças e seus materiais de construção são 5% de terra-enrocamento e 56% de terra.

Para Netto (2019), o olhar perante a segurança de barragem de terra, ao longo do tempo vem ganhando espaço na engenharia da construção e sobretudo perante a evidência da repercussão de alguns acidentes socioambientais e socioeconômicos, devido à falta de atenção voltadas as ações dos esforços físicos naturais e verificações de segurança da estrutura. Barragem de terra são consideradas megas edificações artificiais da engenharia da construção civil.

Este estudo contribuirá com a gestão ambiental que possibilita assegurar os futuros e possíveis impactos do empreendimento mediante as intervenções humanas e orienta os procedimentos benéficos a serem seguidos, de modo a regular, controlar, preservar a natureza e promoção da saúde humana. Além de contribuir com o seguimento do artigo 225 da sustentabilidade e dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS 6 – Água Potável e Saneamento e ODS 15 – Vida Terrestre).

Para Netto (2019 e Geoslope, 2012), meados do século XX, analisar o equilíbrio das barragens de terra era uma forma mais arcaica de verificação numérica em engenharia geotécnica que objetivava dividir uma massa deslizante potencial em fatias. Ao longo dos anos, vários autores trouxeram suas ideias, mas o método Bishop Simplificado, desenvolvido em 1955, permitiu a análise de estabilidade de taludes da massa de solo no estado de ruptura iminente, considerando a ruptura da superfície, determinando o fator de segurança (F_S) global, maior ou igual a 1,5, fator adimensional que prevê a estabilidade ou instabilidade da barragem.

Ainda conforme o autor, o método de Bishop Simplificado (1955), considera as forças resultantes mediante as fatias horizontais por análises circulares otimizadas, visando a estabilidade das forças, em seguida, permite calcular o fator de segurança (F_S), sendo repetido até conseguir igualar o valor arbitrado (F_{S1}) do valor de fator de segurança (F_S), através do processo iterativo. Fornecendo resultados finais bem semelhantes aos métodos mais rigorosos (Spencer e Jambu), ambos estudam o equilíbrio da barragem para garantir a segurança, mediante as análises subdividas do solo (NETTO, 2019). No Brasil, em 2004, a barragem de Benguê, localizada no Ceará, aplicou o método Bishop Simplificado (1955) para conferir sua estabilidade e segurança, obteve $F_S = 2,40$, valor seguro que garantiu o equilíbrio da estrutura, sustentado positivamente a aplicabilidade e a eficácia do método.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Barragens de Terra

Consoante com Stephens (2011) conceitua barragem de terra (Figura 1), como sendo estruturas compactadas, natural e geralmente construídas em direção transversal perante o material de construção disponível ao curso hídrico que têm dependência de sua massa podendo resistir ao deslizamento e tombamento, além da grande quantidade de sua existência, é a mais edificada. Objetivando formar reservatórios artificiais e desviar cursos hídricos. Em conformidade com o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2024), possibilitam reter rejeitos, água, elevar o nível, formar reservatórios artificiais ou detritos para acumulação e manipulação, isso vai depender muito do que se pretende trabalhar.

Apresentam vantagens, como: disponibilidade e o aproveitamento do material local (rocha, areia e argila), menor custo, processo construtivo mais rápido, adaptação ao local de construção, aumento na segurança dos taludes montante e jusante, melhor comportamento ao

solo e relevo, resistente ao assentamento e movimento. Por outro lado, as desvantagens, são: suscetibilidade de rompimento, impactos ambientais e no ciclo hidrológico natural, todas barragens precisam de fundação correta, pode ter custos de manutenção elevado, pode casar impactos sociais, problemas na construção dos descarregadores/vertedores, a má compactação causará infiltração e desequilíbrio, surgência de anomalias e problemas nos descartes de rejeitos (STEPHENS, 2011).

Figura 1. Representação da barragem de terra



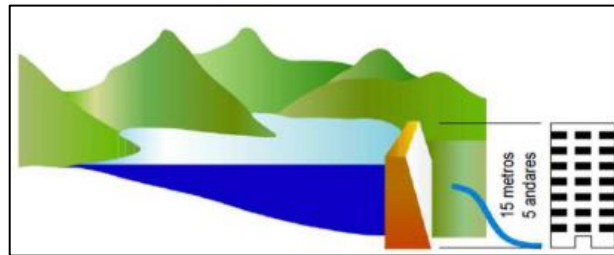
Fonte: Adaptado da ANA (2019).

Em conformidade com a Lei nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, aplica-se a barragens destinadas a acumulação de água para quaisquer usos, à disposição temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, que apresentem pelo menos uma das seguintes características a seguir:

2.1.1. Do Ponto de Vista das Dimensões: Altura do Maciço

Para que o projeto de barragem seja considerado de grande porte, conforme a Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB/ICOLD, 2019), dá-se através da análise da altura do maciço (h), concebida pela divergência do ponto superior da crista até o ponto inferior da fundação, obedeça aos critérios: ter variação de 10 a 15 metros (independe da quantidade de água armazenada no tanque) (Figura 2), com essa altura ou maior, considera-se de maior risco e classificadas em categoria mais elevadas.

Figura 2. Relação de dimensionamento da barragem - Altura do maciço

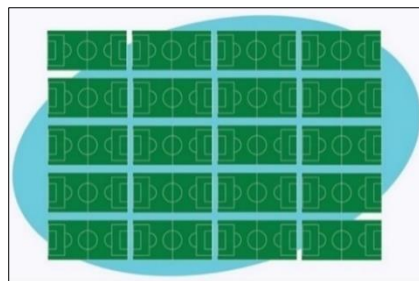


Fonte: LOBO. A. V. L. (2018).

2.1.2. Do Ponto de Vista das Dimensões: Capacidade Total do Reservatório

Ainda conforme a Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB/ICOLD, 2019) a barragem de grande porte apresenta uma capacidade total do reservatório maior ou igual a três milhões de metros cúbicos ($3.000.000 \text{ m}^3$) no tanque (correspondente a 20 campos de futebol (Figura 3) com profundidade média de 15 m), no plano tridimensional, considera-se de maior risco e classificadas em categoria mais elevadas. Sendo assim, é preciso analisar também os danos do potencial associado e os resíduos perigosos.

Figura 3. Relação de dimensão da barragem – Capacidade



Fonte: ANA (2011).

2.1.3. Do Ponto de Vista: Dano Potencial Associado (DPA) e Categoria de Risco (CRI)

Consoante Lei nº 12.334/2010, estabelece que o DPA e o CRI (Figura 4) de uma barragem de terra está relacionado com a presença de algumas anomalias, como: ruptura, fissuras, rachaduras, vazamentos, infiltrações no solo, abalos sísmicos locais ou até mesmo o péssimo funcionamento, podendo causar futuros e possíveis impactos ambientais, sociais, econômicos, históricos e culturais. A classificação do DPA e CRI, pode ser de pequeno, médio e alto, dependendo da altura e do Estado de Conservação (EC). A solução pode ser bom

planejamento, ação e elaboração de planos de segurança, atendimento ao Plano de Segurança de Barragens (PSB), fiscalização e gestão de emergências.

Figura 4. Relação do dano potencial associado na barragem



Fonte: LOBO. A. V. L. (2018).

A tabela 1, apresenta o Dano Potencial Associado e Categoria de Risco (Tabela 1), ressaltando que, o Estado de Conservação ($EC \leq 8$), considera-se uma categoria de risco muito alta, sendo necessário adotar medidas drásticas pelos empreendedores da barragem.

Quadro 1. Relação do PDA e CRI referente a altura da barragem

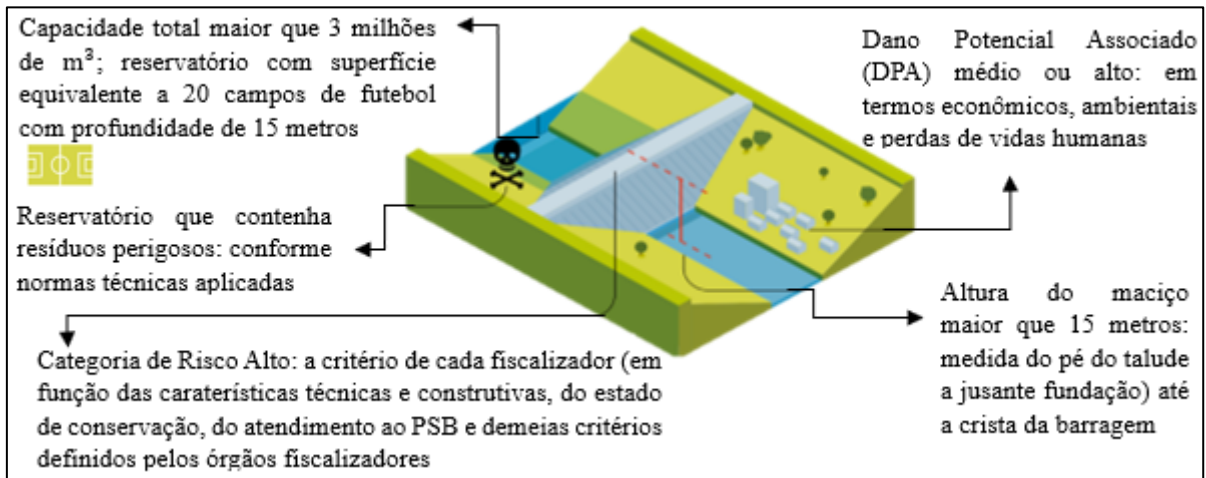
DPA e CRI	Descrições
Alto	≥ 15 m
Médio	$10\text{m} < \text{DPA e CRI} < 16\text{m}$
Baixo	$\leq 10\text{m}$

Fonte: ANA (2014).

2.1.4. Reservatório que Contenha Resíduos Perigosos Conforme Normas Técnicas Aplicáveis

De acordo com a Lei nº 12.334/2010, estabelece que a Categoria de Risco (CRI) de uma barragem relaciona-se perante os parâmetros da própria barragem que podem ter influência na possibilidade de um acidente: parâmetros do empreendimento, estabilidade da estrutura, estado de conservação, funcionamento, manutenção e atendimento ao Plano de Segurança. A Figura 5 mostra a forma amplificada dos parâmetros citados acima conforme esta lei.

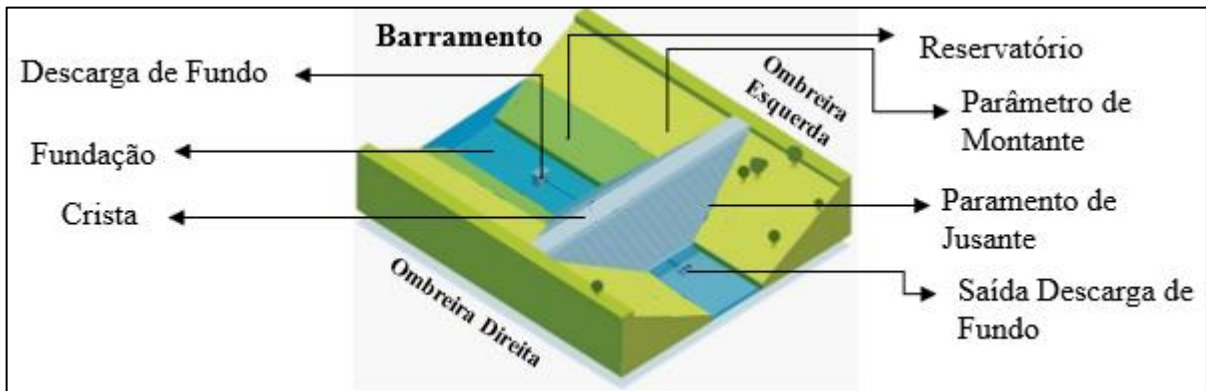
Figura 5. Visualização ampla das características da barragem de terra



Fonte: Adaptado da ANA (2021).

Perante o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2024) as barragens de terra, podem sofrer oscilações estruturais a depender do seu uso e do porte dos maciços de terra, como mostrado na Figura 6, apresentação de determinadas partes básicas que formam uma barragem de terra.

Figura 6. Elementos básicos de uma barragem de terra



Fonte: Adaptado da ANA (2019).

As análises das forças físicas e outras dimensões destas estruturas eram realizadas através de monitoramentos, que possibilitavam a coleta dos dados avistados e eram estudados, ou seja, uma ação do mundo real. Consoante Stephens, (2011) os primeiros aterros a serem construídos tinham como princípio uma parede de terra sólida, impermeável ou não, transversal a um rio, sabendo que estas construções precisavam da massa para ter resistências de estabilidade (tombamento e deslizamento). Divergente das barragens de concreto armado em

gravidade, as barragens de terra, uma vez bem projetada e calculada, proporciona eficiência em seu custo. Porém, deve-se levar em conta a contribuição da topografia local, quanto mais suave, mais indicado é sua edificação.

André Machado (2019), cita que existem quatro tipos de barragens: barragens de concreto armado (em gravidade), barragens de terra, barragens de enrocamento e barragens mistas. Sendo assim, Stephens, (2011) descreve sobre as classificações das barragens de terra a seguir.

2.1.5. Classificação das Barragens de Terra

Segundo Stephens (2011), existem dois tipos, homogênea e zoneado. A barragem estudada tem estrutura de terra homogênea. Conforme a CODEVASF (2021), foi construída por materiais único impermeável de silte arenoso, com consistência firme que impossibilita a infiltração da água no solo, o talude a montante (a cada 2,5 metro na horizontal, sobe 1 metro na vertical, com *hip-hap*) e talude a jusante (a cada 2,0 metro na horizontal, sobe 1 metro na vertical, com cobertura vegetal), possui filtros vertical e horizontal e dreno de pé em rocha visando sua proteção, e o tipo de solo local foi classificado como coeso e impermeável (argiloso, arenoso e siltoso) possibilitando sua resistência e firmeza. A área de permeabilidade pode ser constituída com argila, areia siltosa, cascalhos, rochas prensadas/alteradas e outras granulometrias (MACHADO, 2019).

Em harmonia com Souza (2021, apud ANA, 2015) as rochas para enrocamento (montante e jusante), precisa ser robusta e duradoura (sem modificação da meteorologia, de percolação, fatores da atmosfera e aditivos químicos). Considerada como a melhor opção para barragens maiores devido a facilidade de operação de maquinários (STEPHENS 2011). De acordo com Machado (2019 e Costa, 1012) sua construção depende das condições do local, qualidade do material e flexibilidade de jazidas no entorno do projeto, além de aproveitar o material escavado.

2.1.6. Classificação do Solo

O Manual de Mecânica dos Solos da EEEP (2020), o termo “*Solum*” de origem latim, é conceituado como sendo uma camada superficial da crosta da Terra, constituída por materiais orgânicos, minerais, água, ar, microrganismos e matéria viva, formados mediante o processo de degradação de rochas pelo intemperismo, onde os fatores de progressão dependem do clima,

relevo, tipo de rocha, vegetação, tempo de atuação dos parâmetros. Para a engenharia da construção civil, o solo é a união de micropartículas oriundos da degradação de rochas, servindo como camada de base para construções de fundações de diversas estruturas, sustentando cargas/pesos e forças envolvidas, além de fornecer suporte e estabilidade ao projeto (MACHADO, 2019, p. 58 apud ORTIGÃO, 2007, p. 22). Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), os solos predominantes no Brasil, são: latossolos, argissolos, neossolos, luvisolos, planossolos, nitossolos, chernossolos e cambissolos.

Na visão de André Machado (2019), a conclusão para o tipo de barragem a ser usada, precisa-se da observância de estudos geotécnicos prévios: análises topográficas, relevo, materiais de construção, fatores da geologia, de geotecnia aplicada no local e etc. Posteriormente a escavação do material, dependendo de seus atributo e jazidas presentes ao empreendimento é possível que cause uma redução nos custos, podendo tornar uma seção zoneada ou homogênea.

O solo da barragem Zabumbão é luvisolo, latossolo e neossolo, com características argilosas, areno-siltosos/argilosos, ideais para a construção de barragens de terra, por serem mais rígidos e mais compactados, impossibilita a infiltração e ajuda a encontrar o vertedouro entre umas das áreas usadas no solo escolhido para o empreendimento (STEPHENS, 2011).

2.1.7. Relação dos Impactos Socioambientais, Culturais, Econômicos e Soluções

Para Oliveira e Gomes (2008), sabe-se que construções de barragens podem causar desordem no sistema natural, social, econômico e cultural e nem sempre as empreendedoras tem um planejamento regular para o uso de artifícios de mitigações destes impactos.

Construções de barragens causam grandes impactos, como: socioambientais: desmatamento do local, poluição atmosférica, alteração dos solos, possíveis tremores sísmicos, demolição dos habitats naturais, modificação da fauna e flora, desaparecimento de espécies local, deslocamento da fauna, alteração dos recursos hídricos intervenções nas relações sociais e remanejamento de pessoas, culturais e históricos: intervenções nas religiões, crenças, patrimônios, culturas, tradições e festejos locais, caso haja na região do empreendimento ou entorno e socioeconômicos: geração de emprego e renda (OLIVEIRA *et al*, 2008).

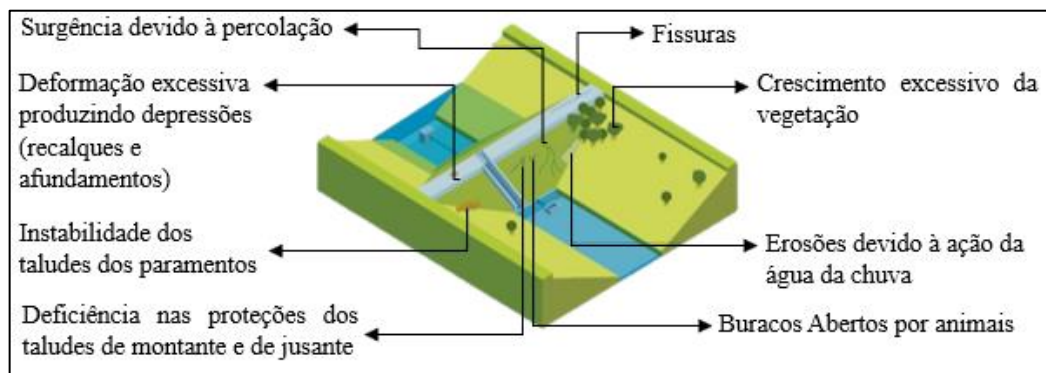
Ainda perante a visão de Oliveira e Gomes (2008), certas medidas de soluções podem ser: desenvolvimento e execução de projetos do desmatamento, construção de plano para contenção de inundação e higiene do local, instalação de estações climatológica e sismográfica,

plano de uso e ocupação do solo, captura e deslocamento de animais perigosos à instituições pesquisadoras, ação que salvem os animais, plano de controle de bacias hidrográficas e locais de indenização e artifícios de reabilitação e deslocamento de pessoas e elaboração de projetos de empreendimento familiar.

2.1.8. Irregularidades Apresentadas em Barragens de Terra

Ainda, conforme o art. 9º, da Lei nº 12.334, 20 de setembro, 2010 (gerou a Política Nacional de Segurança de Barragens/PNSB), compreende irregularidades de barragens com sendo quaisquer deformações ou anomalias que coloca em perigo a estabilidade da barragem, ocasionando seu deslizamento, a curto prazo ou a longo prazo. Podendo interferir na função dos taludes e das demais edificações, causando sua ruptura e causando impactos ambientais, sociais e econômicos (CARDOSO *et al.*, 2021). A ANA (2016), afirma que, 70% da ruptura ocorre nos primeiros 10 anos de vida da barragem, a Figura 7, mostra algumas irregularidades em barragens de terra, a seguir:

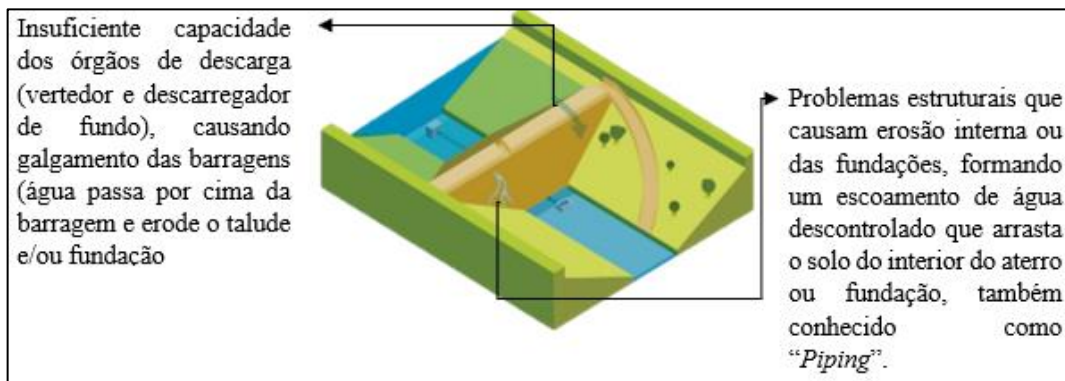
Figura 7. Principais anomalias em barragens de terra



Fonte: Adaptado da ANA (2018).

Sendo assim, a Figura 8, trata das principais causas de acidentes de barragens de terra, onde os mesmos ocorrem devido a surgência de irregularidades, anomalias associadas e ausência de seguimento de segurança. Algumas causas são: problemas de fundação, falhas estruturais, galgamento, percolação da água no interior da barragem e no solo, instabilidades de taludes (montante e jusante), problemas no sistema de drenagem. Causando consequências como: danos materiais, perdas de vidas humanas, perdas de espécies de animais aquáticas e terrestres, impactos ambientais, sociais, econômicos, históricos e culturais.

Figura 8. Principais causas de acidentes de barragem de terra



Fonte: Adaptado de ANA (2019).

Ainda, consoante este artigo 9º desta Lei nº 12.334/2010, é de responsabilidade da empresa ter a equipe multidisciplinar de segurança para realizar a inspeção do projeto, controle e geração de relatórios comprobatórios. O órgão fiscalizador é incumbido por ditar o prazo de elaboração e apresentação destes documentos e medidas de controle e ações de segurança da barragem, ao final, será apresentado ao órgão fiscalizador e a comunidade civil.

2.1.9. Remediação e Supervisão em Barragem de Terra

Mediante Cardoso *et al.*, (2021, apud Barbosa, 2020), a ruptura de barragens são frequentes em todo planeta, mediante as irregularidades mais frequentes que podem ocasionar o rompimento da mesma, ao longo dos anos, surgem novos artificios de mitigações que permitem a segurança e estabilidade, principalmente no que diz respeito ao galgamento (extravasamento), infiltração e deslizamento (CARDOSO *et al.*, p. 47 apud CAPUTO, 1987, p. 35).

O diagnóstico é o foco na fiscalização visando o aumento da segurança da estrutura, inspeção de segurança enfatizando o monitoramento e o comportamento geral da estrutura, segurança de taludes afim de evitar gargalos com a segurança da barragem. Em concordância com a NBR 11.682 (ABNT, 2009), sendo gerada para conceituar as formas de estudos e manuseamento de taludes, estabelece que um talude seguro é aquele isento de quaisquer tipos de instabilidade, como: erosão, trincas e rachaduras em obras locais.

Outra forma é a manutenção dos equipamentos da barragem, podendo ser subdividida de duas formas: a manutenção preventiva (quando permite, previamente, através das análises de segurança a detecção dos sinais de deterioração da estrutura, podendo solucionar o

problema antecipado e evitando grandes desastres socioambientais) e a manutenção corretiva (quando o dano já aconteceu e precisa ser reparado, envolvendo mão de obra humana e/ou hidráulica e materiais). A divergência entre as duas é que a manutenção preventiva é a mais aconselhada e a manutenção corretiva é a menos aconselhada (ANA, 2006).

Ainda em concordância com a ANA (2006), toda e qualquer ação ou estudo a ser realizado na barragem, devem tomar como base a investigação do comportamento atual da estrutura e as ressalvas e as interposições a ser efetuadas. E todos os trabalhos de remediação, vislumbrando a eliminação das causas e das irregularidades, ou até mesmo controlar a sua progressão, devem constar detalhadamente em projetos, que incluem a descrição e a justificativa tática e/ou estratégica da mitigação a ser adotada.

2.1.10. Segurança da Barragem Zabumbão

Segundo a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 2019), segurança é quanto as estruturas suportam, tanques, e área a jusante da barragem, atendendo os parâmetros de desempenho perante a expectativa de vida útil da edificação, levando em conta os fatores socioambientais e econômicos, estruturais, hidráulicos e operacionais. Risco em barragem pode ser considerado como sendo a viabilidade de ocorrência específica ou uma circunstância de perigo aconteça em um determinado intervalo de tempo (CNISB/ANA, 2024).

A segurança da barragem de Zabumbão é coordenada e acompanhada pelo Plano de Segurança de Barragens (PSB) de 2021, permitindo monitoramentos frequentes, mediante emissões de relatórios depois das fiscalizações. O plano contém informações técnicas, como: localização, materiais de construção, dimensionamentos, acesso ao local, plano de alerta, operações, monitoramentos, legislações aplicadas, que visam regularizar seu funcionamento (CODEVASF, 2021).

Conforme Machado (2019), com a aprovação da Lei federal de nº 12,334, no Brasil, acontecido em 20 de setembro de 2010, seguida pela CODEVASF, estabelecendo sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), objetivando a regularização das atividades (discrepantes usos e reservação hídrica), fatores de segurança que asseguram o seguimento da mesma, prevendo os futuros e possíveis acidentes, uma vez que a população afetada é a que mora nas proximidades do empreendimento (CARDOSO *et al.*, p. 47; BRASIL, 2010, p. 32).

2.1.11. Equações dos Esforços Atuantes na Barragem Zabumbão

Esforços atuantes na barragem decorre das forças diversas exercidas no entorno de toda sua estrutura, como: forças de deslizamento, tensão efetiva, cisalhamento, ativas, passivas, resistência e etc. As equações citadas foram trabalhadas pelo método Bishop Simplificado (1955), é um método preciso, usados em superfícies de deslizamento circulares e obtido através da interação entre as forças e as fatias horizontalmente que se anulam até calcular iterativamente o fator de segurança desejado. O equilíbrio dos esforços é realizado verticalmente satisfazendo a estabilidade da estrutura, além da estabilidade dos momentos em relação ao centro do ponto médio da base da fatia (MONTEIRO et al, 2016).

Para a verificação das forças dos parâmetros de solo da barragem, para o estado de tensão efetiva, foi dado automaticamente pelo programa os parâmetros base: $\varphi_{ef} (\text{°}) = 30,00$: ângulo de atrito interno e $C_{ef} (\text{KPa}) 5,00$: coesão do solo, obtidos através da sondagem geotécnica (introdução das características dos solos), feitas manualmente, pois, estes dados não estão inseridos automaticamente no programa (SOFTWARE FINE/GEO5, 2024). Como não pode ser medida, a solução baseia-se na discrepância entre a tensão total e a pressão neutra (nos poros). Nesta análise (com camada drenada) e sob as condições assumidas de longa distância, dada por:

$$\sigma_z = (\sigma_f + u) \quad (1)$$

Na equação (1), σ é a tensão total (global), σ_f é a tensão efetiva (ativa) e u é a pressão neutra (pressão da água nos poros).

Para a análise dos esforços a resistência do cisalhamento τ [kPa], foi seguida pela lei de *Mohr-Coloumb*, obtido através da combinação da tensão cisalhante e normal que causa a fratura da estrutura, dada por:

$$\tau = \left(c + \frac{N}{l} \tan\varphi \right) \quad (2)$$

Na equação (2), N é a força normal na superfície atuante de deslizamento, l é o comprimento da superfície de deslizamento, c é a coesão da rocha na superfície de deslizamento e φ é o ângulo de atrito interno na superfície de deslizamento. Conforme o Fine GEO5 (2024), o critério de resistência ao corte *Mohr-Coloumb*, para o método de análise de estabilidade de taludes, foi verificada pelas condições drenadas: neste caso do estado de tensão total, a obtenção dos cálculos exercidas na superfície de deslizamento (circular), dada por:

$$N \times t_g \varphi_{ef} + C_{ef} \times l \quad (3)$$

Na equação (3), N é a força normal na superfície atuante de deslizamento, l é o comprimento da superfície de deslizamento, $t_g \varphi_{ef}$ é a tangente do ângulo de atrito interno, C_{ef} (KP_a) é a coesão do solo.

Na verificação da Teoria de Estado Limite, a análise verifica se as forças passivas (F_P) atuantes na superfície de deslizamento são superiores as forças ativas (F_A). Conforme Schneider (2011), as forças passivas são obtidas mediante o somatório dos empuxos exercidos verticalmente (peso próprio da estrutura – W , nos taludes a montante e jusante além da subpressão, podendo causar resistências e estabilidade da estrutura

Por outro lado, para que haja o deslizamento da estrutura a (F_P) precisa ser menor que (F_A). As forças passivas são dadas por:

$$F_P = [F_h \times \cos(u + \alpha) + F_{ed}] \quad (4)$$

Na equação (4), F_P é a força passiva, F_h é a capacidade de suporte, u é a inclinação da superfície de deslizamento, α é a inclinação dos grampos a partir da horizontal e F_{ed} é a força da edificação.

As forças ativas são obtidas mediante os somatórios das forças horizontais (pressão da água e empuxos horizontais), causando o deslizamento e instabilidade), dada por:

$$F_A = [F_A \times (G + S_{a,vert}) \times \sin u + S_{a,hor} - \cos u] \quad (5)$$

Na equação (5), F_A é a força ativa, G é a força da gravidade, $S_{a,vert}$ é a componente vertical da pressão ativa, u é a inclinação da superfície de deslizamento e $S_{a,hor}$ é a componente horizontal da pressão ativa.

O cálculo do peso próprio esta estrutura (W) para cada lamela/fatia é obtida mediante a relação entre o peso específico (γ) e a área da lamela/fatia, dada na expressão (6):

$$W = (\gamma \times \text{Área da lamela/fatia}) \quad (6)$$

Já que $F_P = \sum F_{h,n}$, obtém-se a interação entre as forças passivas e ativas, dadas por:

$$F_{ed} = \left(\sum \frac{d_i}{d} \times (G \times \cos u + F_h \times \sin(u + \alpha)) \times \tan \varphi_i + \sum d_i c_i \right) \quad (7)$$

Na equação (7), F_{ed} é a força da edificação, d_i é o comprimento da $i^{\text{ésima}}$ seção da superfície de deslizamento, d é o comprimento da superfície de deslizamento, g é a força da

gravidade, u é a inclinação da superfície de deslizamento, F_h é a capacidade de suporte, α é a inclinação dos grampos a partir da horizontal, φ_i é o ângulo de atrito interno da $i^{\text{ésima}}$ camada e c_i é a coesão da $i^{\text{ésima}}$ camada do solo.

Conforme o Fine GEO5 2024, para a verificação do fator de segurança, o método Bishop Simplificado (1955), considera que não há esforços entre os blocos (X_j), sua análise baseia-se na verificação das expressões entre o equilíbrio de momentos de resistência e dos esforços ativos (horizontais) em cada lamela/fatia. Seu fator mínimo de segurança é 1,5, sua equação é dada por:

$$F_S = \left(\frac{1}{\sum_i W_i \sin \alpha_i} \sum_i \frac{c_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \alpha_i}{F_S}} \right) \quad (8)$$

Na equação (8), F_S é o fator de segurança, u_i é o empuxo atuante no bloco, $c_i \varphi_i$ são os valores efetivos dos parâmetros do solo, W_i é o peso do bloco, α_i é a inclinação do segmento da superfície de deslizamento e b_i é a largura do bloco.

Na análise dos cálculos do momento de resistência (M_A), sua obtenção é dada através do valor calculado do fator de segurança diferente do valor arbitrado que possibilita o processamento e seu resultado deve ser superior ao momento de deslizamento ($M_A > M_D$) (FINE GEO5, 2024). Dada por:

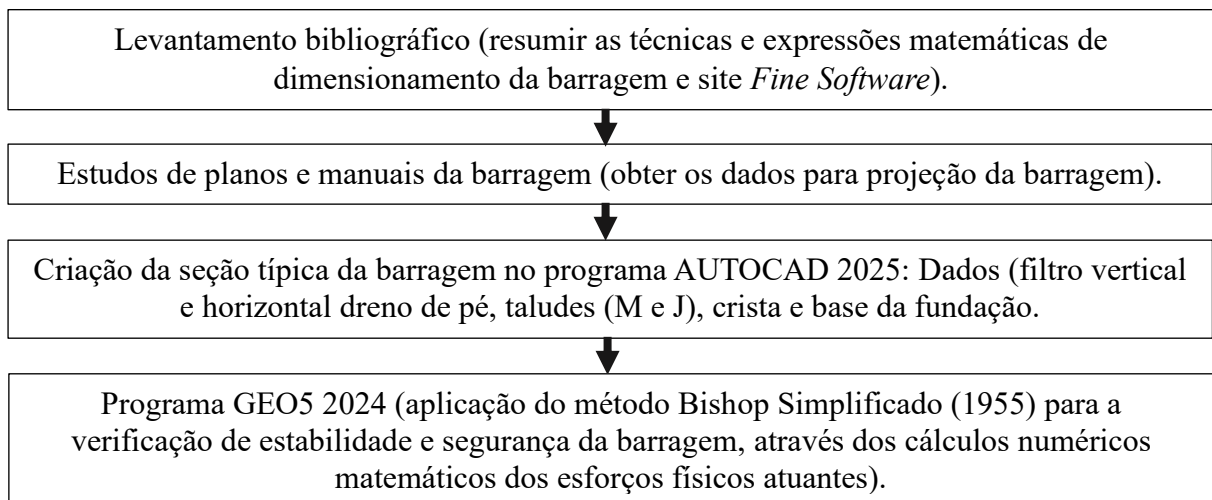
$$M_A = \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \times \tan \varphi}{F_S} \right) \quad (9)$$

Na equação (9), M_A é o momento de resistência, F_S é o fator de segurança, α é a inclinação dos grampos a partir da horizontal entre seno e cosseno e $\tan \varphi$ é a tangente do ângulo de atrito.

3. METODOLOGIA

Trata-se de uma pesquisa quantitativa, consistida na modelagem computacional aplicada pelo programa GEO5 2024 focado na análise de estabilidade de taludes conforme a obtenção do fator de segurança sob o deslizamento circular otimizado. Pesquisa feita no site do SNISB e Plano de Execução e Manual de Segurança da Barragem de Zabumbão da CODEVASF. A Figura 9 mostra o fluxograma metodológico de construção.

Figura 9. Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: Arquivo Próprio (2024).

Esta metodologia aplicada permitiu estudar os diferentes tipos de barragens de terra, compreender suas características construtivas e de operação, analisar os fatores que influenciam na estabilidade de segurança, incluindo características do solo, topografia e condições hidrológicas, compreender e analisar os impactos ambientais, segurança hídrica conservando os ecossistemas locais.

A seção típica da barragem foi criada mediante os dados técnicos reais (Tabela 2), ressaltando que, para o dimensionamento do dreno de pé de rocha, conforme a análise do manual de segurança da barragem da CODEVASF e outras instâncias, não há dados disponíveis.

Sendo assim, sua dimensão baseou-se na revisão literária, recomendando que, o mesmo deva possuir altura com o dobro da espessura do dreno horizontal, no mínimo, e a largura da crista com no mínimo 4,0 metros (CRUZ, 1983 e PUC, 2011).

Quadro 2. Dados técnicos da seção típica da barragem (Zabumbão) de Paramirim da CODEVASF

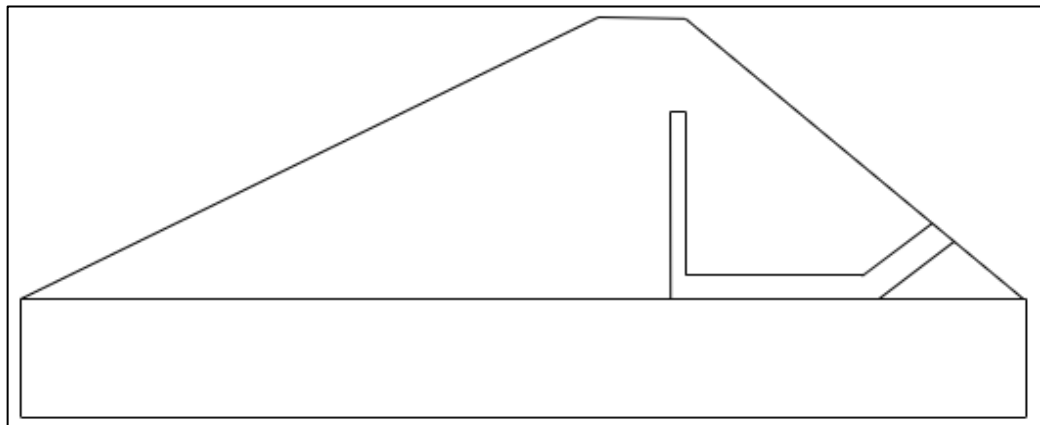
Informações Técnicas da Barragem	Dimensões
Parâmetro de montante/inclinação; tipo de proteção	2,5 H:1V; <i>hip-hap</i>
Parâmetro de jusante/inclinação; tipo de proteção	2,0 H:1V; cobertura vegetal
Comprimento da crista/seção transversal	340 m
Largura da crista/coroamento	10 m
Cota da crista/coroamento	640,75 m
Altura máxima acima da fundação	45 m
Dispositivos de drenagem: filtro vertical	Altura: 1,5 m; Largura: 0,4m

Dispositivos de drenagem: filtro horizontal	Comprimento: 60 m; Largura: 0,9m
Dreno de pé de rocha	Literatura: 2 x o filtro horizontal

Fonte: CODEVASF (2021).

Após a obtenção e identificação destes dados técnicos, foi criada a seção típica da barragem Zabumbão pelo programa AUTOCAD 2025 (Figura 10).

Figura 10. Seção típica da barragem Zabumbão pelo programa AUTOCAD 2025



Fonte: Arquivo Próprio (2025).

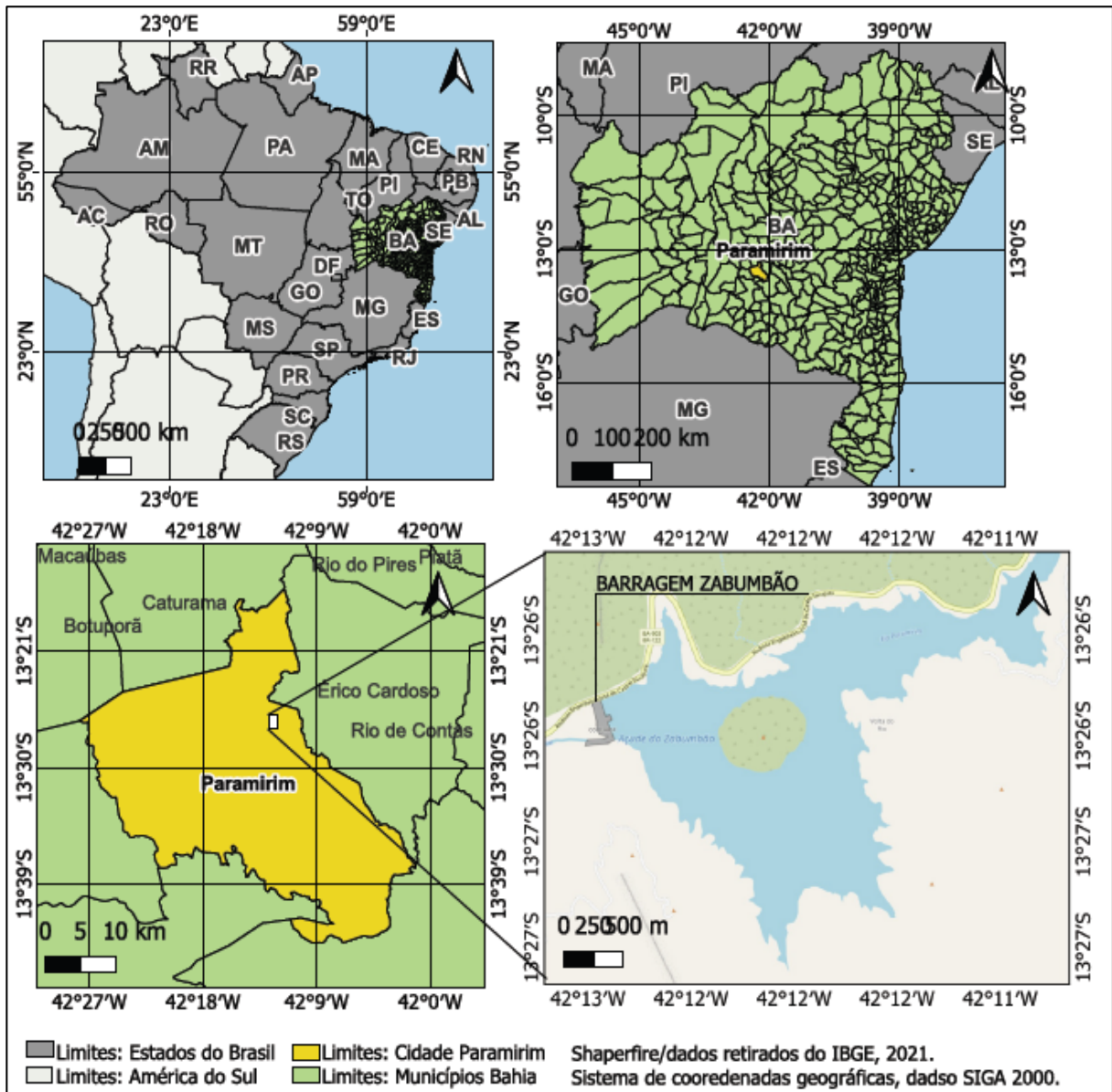
3.1. Caracterização da Barragem Zabumbão

A conclusão da construção/operação foi em 1998, com finalidade primária: para sistema integrado de abastecimento de água dos municípios de Paramirim, Botuporã, Caraíbas, Caturama e Tanque Novo, atendendo entorno de 600.000 habitantes de outros municípios do sertão da Bahia (CODEVASF, 2024), finalidade secundária: para irrigação, finalidade terciária: para piscicultura e balneário.

Atualmente, a barragem é operada pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF) e Prefeitura Municipal de Paramirim (CATÁLOGO DE BARRAGENS DA BAHIA, 2024), é fiscalizada pelo INEMA (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos), tem domínio estadual com macro bacia do Rio São Francisco – Médio.

Conforme o Conselho de Bacias Hidrográficas do Rio São Francisco – CBHSF (2024), a barragem Zabumbão serve como represamento do rio Paramirim, no município Paramirim, no sudeste da Bahia, Brasil (Figura 11). O Manual de Segurança da Barragem de Zabumbão, mostra a latitude: 13^o26'20" (Sul) e longitude é 42^o12'53" (Oeste).

Figura 11. Localização da área da barragem Zabumbão em Paramirim/BA



Fonte: Arquivo Próprio (2025).

Ainda conforme o CBHSF (2024), Zabumbão é considerada uma barragem jovem por ter pouco mais de 20 anos de operação, sendo de terra homogênea com núcleo silte arenoso de consistência firme que possibilita a impermeabilidade do solo e proteção dos taludes, possuindo as seguintes informações (Tabela 3).

Quadro 3. Informações complementares da barragem

Parâmetros	Dimensões
Borda livre mínima	1,40m (decamilenar)
Materiais do aterro	Solo compactado de silte arenoso

Materiais dos filtros	Areia bem graduada
Materiais dos drenos	Enrocamento, brita e pedrisco
Vertedouro	Soleira livre na obreira a esquerda
Nível Máximo Maximorum (NMM) El	639,24 m
Nível Máximo Normal (NMN) El	635,75 m
Nível Mínimo Operacional (NMO) El	614,75 m
Vazão de água	10 m ³ /s
Volume de acumulação	60.853.000 m ³
Área da bacia hidrográfica	100 km ²
Vazão regularizadora	27648 m ³ /h
Largura do vertedor	35 m
Extensão do vertedor	405 m
Bacia hidráulica	2,65 km ²
Vazão de cheia máxima	826 m ³ /s
Área do reservatório	485,30 habitantes
Capacidade de captação	8,5 l/s

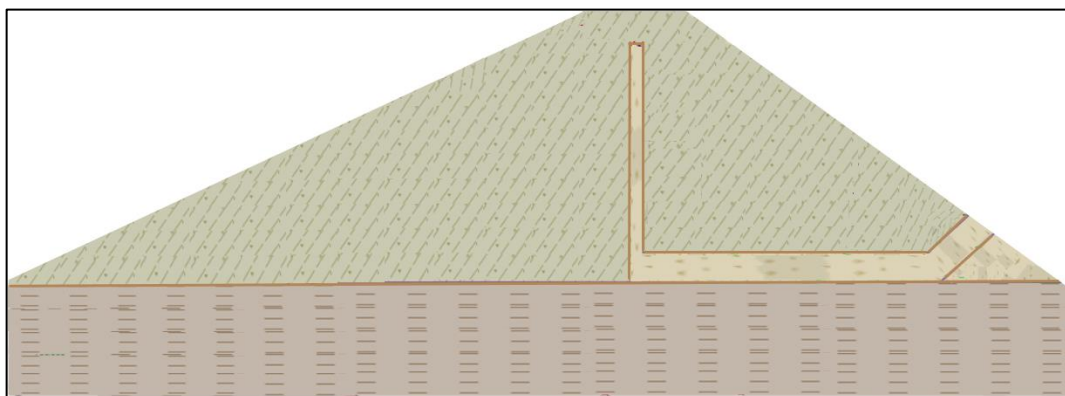
Fonte: CODEVASF (2021).

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Análise dos Materiais da Barragem Zabumbão

A análise dos esforços físicos para a estabilidade da barragem de terra em Paramirim (Zabumbão) da CODEVASF, inicialmente, pode ser visualizada na Figura 12, apresentando os parâmetros geotécnicos para cada material que constitui os taludes (montante – M e jusante – J), solo e drenos.

Figura 12. Representação dos materiais que constituem a barragem



Fonte: Arquivo Próprio (2025).

Observa-se na Figura 12, que o material de cor marrom é o solo argiloso com baixa plasticidade e consistência firme que possibilita sustentar a estrutura, o material de cor verde claro é a camada interna dos taludes montante e jusante, de silte arenoso, com consistência firme que possibilita a impermeabilidade do solo, o material de cor amarelo claro é o filtro vertical e horizontal, de areia bem graduada com média densidade que possibilita a formação do sistema de drenagem interna, direcionando o fluxo de água para o dreno de pé, o material de cor amarelo claro é o dreno de pé, com enrocamento, brita e pedrisco que possibilita captar as águas drenadas pelos filtros, conduzindo-as ao rio à jusante da barragem, assegurando a estrutura e evitando a percolação da água.

Os parâmetros de análise do solo (Figura 12) foram descritos pelos critérios de resistência de cisalhamento pela lei de *Mohr-Coulomb*, com o parâmetro de estado de tensão: efetiva, representadas pelo peso específico (Y), ângulo de atrito interno (φ_{ef} (°)), coesão do solo (C_{ef} (KPa)) e peso específico saturado (Y_{sat}).

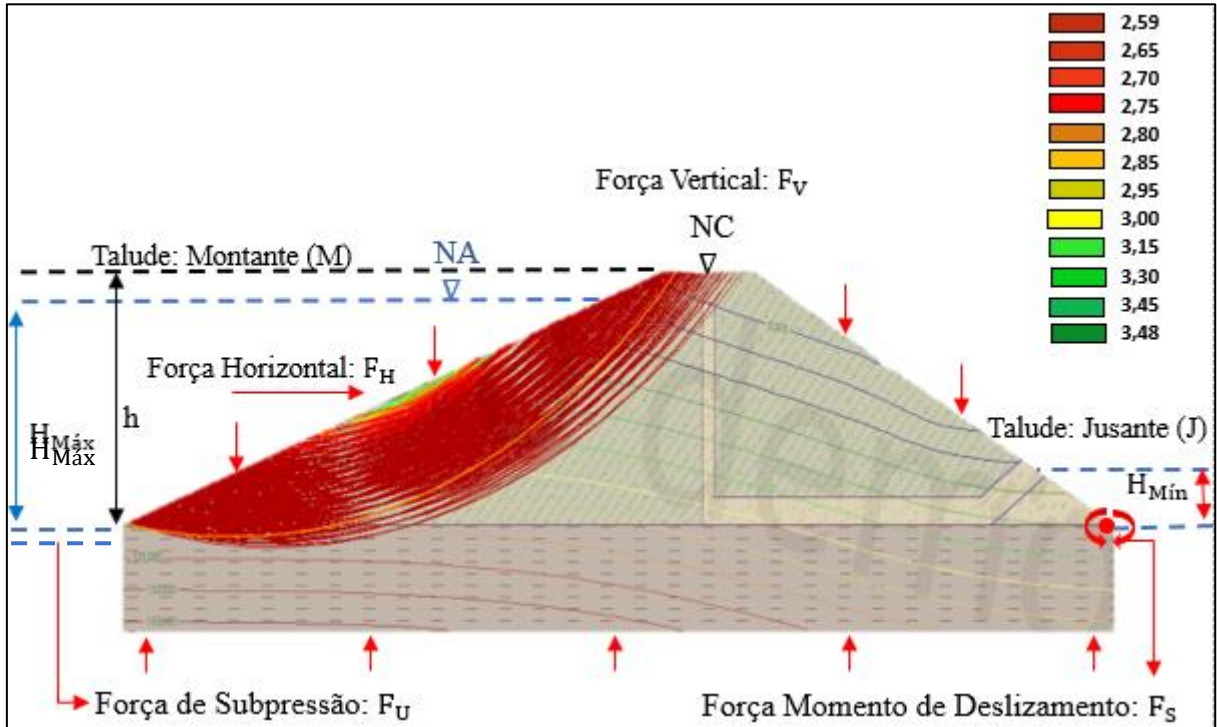
O talude a montante em contato com a água no reservatório, encontra-se abaixo do nível de água e a lâmina pode ser superior à cota da base do talude ou pode estar inundado total ou parcialmente. Como sua declividade está relacionada com a linha de saturação (linha que separa a água do maciço de terra), os taludes foram projetados conforme os dados reais da barragem de Zabumbão, sendo a inclinação à montante: 2,5 e inclinação à jusante: 2,0, garantindo a segurança e estabilidade.

Após a análise dos materiais de construção, foi feito os cálculos de estabilidade de taludes desta barragem no programa GEO5 2024 mediante a aplicação do método Bishop Simplificado (1955), focado na verificação de superfícies de deslizamento circular, com duas formas de estudos:

- I. A análise clássica de acordo com o fator mínimo de segurança (FS: 1,5);
- II. A análise de acordo com os estados limite (indica quando a barragem deixa de ser usável, ou quando não atende as condições previstas para seu uso), como mostra a Figura 13, ressaltando que, a metodologia de verificação de segurança obedeceu a norma geotécnica EN 1997 – DA₃, em concordância com a NBR 11.682 (ABNT, 2009).

4.2. Análise dos Esforços Físicos da Barragem Zabumbão

Figura 13. Análise de estabilidade da barragem de terra Zabumbão de Paramirim/BA



Fonte: Arquivo Próprio (2024).

Observa-se na Figura 13, as isolinhas de poropressão (percolação do fluxo de água): com vetores azul, verde, amarelo e vermelho, a análise rápida e otimizada de estabilidade: superfície crítica e método consagrado: linha de cor laranja, a superfície de ruptura: o monte de cor vermelho e verde claro e os esforços físicos exercidos. Nota-se que, a estrutura se encontra sob uma superfície de solo argiloso que contém baixa ou média plasticidade de consistência firme, sendo um solo ideal para sustentar este tipo de estrutura. Pois, uma das vertentes que promovem a estabilidade da barragem de terra é o estudo das características do solo, visando suportar a carga do peso da construção para o solo, garantindo a estabilidade e segurança e suas análises das forças físicas.

Mediante o método aplicado, nota-se que, as duas análises de verificação de estabilidade da barragem estiveram valores iguais e seguros sob a superfície de deslizamento circular após a otimização conforme Tabela 4.

Quadro 4. Resultado de relação das forças

O peso total do solo da superfície de deslizamento: 2.593,71 KN/m	
Verificação da estabilidade de talude (Bishop)	
Soma de forças ativas:	$F_a = 379,83 \text{ KN/m}$
Soma de forças passivas:	$F_p = 983,74 \text{ KN/m}$
Momento de deslizamento	$M_A = 15.580,79 \text{ KN/m}$
Momento resistente:	$M_P = 40.353,15 \text{ KN/m}$
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fator de Segurança: $F_S = 2,59 > 1,50$ ➤ A estabilidade da barragem foi verificada como segura e atende as normas regulamentadora. 	

Fonte: Arquivo Próprio (2025).

Observa-se na Tabela 4, que o somatório das forças ativas (forças atuantes que tendem a empurrar a barragem, exemplo: pressão da água no talude a montante), mostrou-se ser menor do que o somatório das forças passivas (forças que exercem contra as forças ativas, exemplo: peso próprio da barragem que age para baixo), sob uma diferença de $F_a \neq F_p = 603,91 \text{ KN/m}$ e o somatório das forças de deslizamento (força que tenta mover/derrubar a barragem), mostrou-se ser menor do que o somatório das forças de resistência (forças que impedem esse movimento), sob uma diferença de $M_A \neq M_P = 21.772,36 \text{ KN/m}$. Com um fator de segurança de $F_S = 2,59$, maior do que o valor estabelecido: $F_S = 1,5$. Essa condição permite a estabilidade e segurança dos taludes a montante e a jusante da barragem, proporcionando o não acontecimento da ruptura da superfície, implicando ter mais de 50% de desequilíbrio.

Por outra visão, para que houvesse o deslizamento da barragem, o somatório das forças ativas precisaria ser maior do que o somatório das forças passivas, assim como o somatório das forças de momento de deslizamento precisaria ser maior do que os somatório das forças de momento de resistência. Considerando que, o valor do fator de segurança encontrado precisaria ser menor do que o valor mínimo estabelecido pela NBR 13028:2018: Fator de Segurança Mínima Para Barragens em harmonia com a SAMARCO (empresa de mineração) é de $F_S = 1,5$, causando o rompimento da superfície de ruptura do talude, isso implica ter mais de 50% em desequilíbrio.

O método também verificou o cálculo de tensão efetiva do solo, já que no programa GEO5 2024, o mesmo tenha sido determinado pela divergência entre a tensão total e a pressão

neutra (nos poros). Nota-se que, seus resultados tornaram-se válidas, pois houve conformidade com a tensão normal σ e porque a tensão de cisalhamento τ não foi transferida pela água (*SOFTWARE FINE/GEO5 2024, 2024*).

Na Figura 15, observa-se também que o talude a montante (M) é mais inclinado que o talude a jusante (J), permitindo mais estabilidade. Em união com as forças do peso próprio na vertical (de cima para baixo) da estrutura, notou-se ser maior que a força horizontal para evitar o deslizamento, além de ser equilibrada com as forças de pressão e subpressão para neutralizá-las. Em contrapartida, caso houvesse o aumento das forças horizontais (da esquerda para direita, força da pressão hidrostática que é exercida pela força da água no talude a montante), tenderia a empurrar o maciço no sentido longitudinal em direção ao solo.

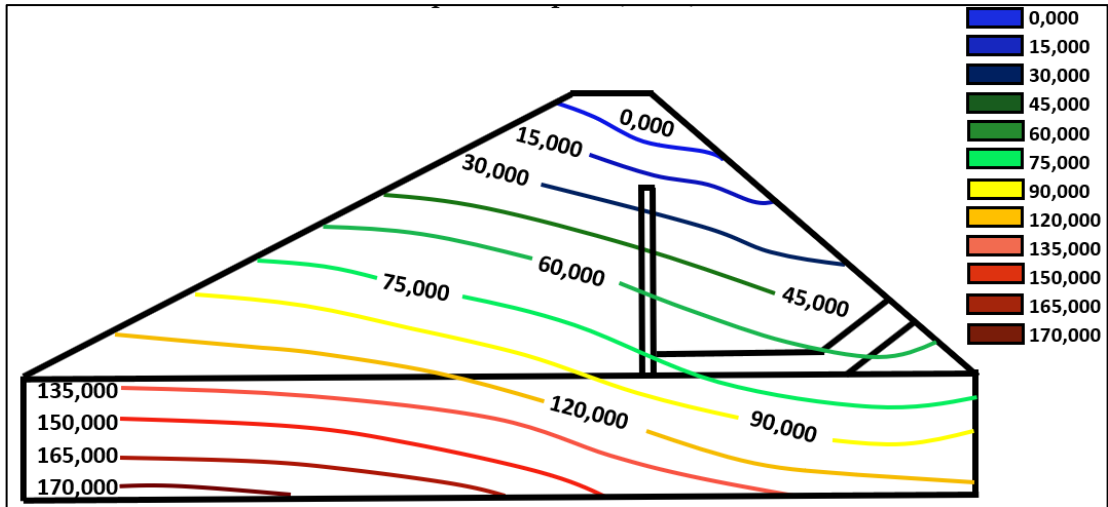
Isto implica que, observando a Figura 13, a barragem de terra estudada se encontra em condições de estabilidade e segurança e percolação, devido à elevação dos coeficientes de barragens, onde o valor do fator de segurança encontrado foi superior ao valor mínimo estabelecido. Logo, $2,59 > 1,50$, mediante a estabilidade de talude ser verificada positivamente, onde a mesma atende o estabelecimento da legislação, os parâmetros geotécnicos, os tipos de filtros aplicados e forças estáveis exercidas por volta de toda a estrutura. Além disso, para que haja esta efetivação da estabilidade, analisou-se também a percolação do fluxo de água (Figura 14).

4.3. Nível Freático da Barragem Zabumbão

Sabendo que, isolinhas são linhas que unem pontos com direção e valor comum mediante a altitude, pressão atmosférica, temperaturas, etc. (CODEVASF, 2024), na Figura 14, notou-se que, as isolinhas de poropressão representa o fluxo de água, está em movimento vetorial uniforme, sendo direcionada corretamente ao local desejado (filtros e pé de rocha a jusante).

Para Machado (2019), como a barragem está fixa sob um solo natural e constituída por material de qualidade compactado, a estabilidade é garantida quando a vazão da água que percola pelo maciço é menor do que a vazão que percola pela fundação. Caso contrário, possivelmente ocorrerá um deslizamento devido à instabilidade.

Figura 14. Análise de isolinhas de poropressão na barragem



Fonte: Arquivo Próprio (2024).

Em harmonia com Filhos *et al* (2021) o elevado nível de água provoca a progressão estática na área submersível no talude a montante devido os empuxos horizontais atuantes, causando redução da resistência ao cisalhamento do solo. Por isso, são calculados os esforços, focados na altura (h), zonas submersíveis dos taludes e possíveis surgimento e efeitos de estratificação do tanque. Por isso é importante o estudo das linhas poropressão, o mesmo permite visualizar o fluxo de água e suas variações, identifica as anomalias internas e fornece dados essenciais e seguros.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme André Machado (2019) reforçando, em barragens de terra de pequeno porte, não tem valores específicos como forma de referências, neste sentido determinadas barragens poderão sofrer graves danos, a exemplo do solo escorregadio. Por outra perspectiva, a barragem de terra Zabumbão é considerada uma estrutura de grande porte, possuindo seu próprio Manual de Segurança, além de se enquadrar nas normas vigentes para cada fator a ser estudado.

O presente trabalho possibilitou a verificação de estabilidade da barragem de terra (Zabumbão) da CODEVASF, situada na cidade de Paramirim/BA, com foco nas análises dos esforços físicos atuantes na estrutura, através da utilização da modelagem numérica computacional no programa GEO5 2024 (análise de estrutura/taludes).

Além disto, o programa GEO5 2024 possibilitou as análises do solo, percolação do fluxo de água e os tipos de materiais usados na estrutura da barragens. Pois, estas verificações de segurança do barragem de terra, além de auxiliar na minimização dos futuros e possíveis impactos socioeconômicos, permitem a preservação da qualidade ambiental (fauna, flora, biodiversidade, ecossistema e ecologia local), a mesma também contribui com a sustentabilidade ambiental visando as futuras gerações, conforme os dados usados.

No GEO5 2024, a demonstração dos resultados encontrados para a estabilidade da barragem, foram plausíveis, com determinação de valores que tiveram resultados superiores quando equiparados aos valores mínimos de segurança ($F_S = 1,50$), estabelecido pela Norma Regulamentadora NBR 13028:2018. Concluindo e certificando que a análise de estabilidade da barragem através dos esforços físicos foram verificados de forma positiva o valor de segurança encontrado ($F_S = 2,59$).

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11.682. **Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. v. 1, p. 3. Acesso em: 21 maio 2024.

ABNT – NBR 13028:2017. **Mineração: elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — requisitos**. v. 1, p. 11 – 12, ed. 3. 14 nov. 2017.

ALMAY, F. J.E.; MAGRO, G. R.; SANTOS, F. L. A. Programa computacional para cálculo de forças decorrentes da pressão da água sobre taludes submersos de barragens. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 1, n. 2, p. 2 – 12. 2021. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/rbengcivil/article/view/65103/33570>. Acesso em: 15 jun. 2024.

ANA – Agência Nacional de Água. **Política nacional de segurança de barragens**. Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010. Fórum Nacional e Órgãos e Gestores – FONAG, Belo Horizonte em 18 de agosto de 2011. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/1630047/>. Acesso em: 05 jul. 2024.

ANA – Agência Nacional de Água. **Relatório de barragens 2021**. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2021/rsb-2021.pdf>. Brasília, DF, 2022. Acesso em: 25 maio 2024.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Relatório de segurança de barragens 2019**. Brasília, DF: ANA, 2020. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2019/rsb19-v0.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2024.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Relatório de segurança de barragens 2018**. Brasília, DF: ANA, 2019. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2018/rsb2018_0312.pdf. Acesso em: 20 jun. 2024.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens: diretrizes para a elaboração do plano de operação, manutenção e instrumentação de barragens**. Brasília, 2016. v. 7, p. 120. Disponível em: 23 maio 2024.

CARDOSO, F.I. *et al.* **Análise de anomalias em barragens da bacia do Rio Itaúnas**. v. 6, n. 2, p. 32 – 37. 2021. Disponível em: <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2022/02/revista-esfera-tecnologia-v06-n02-artigo02.pdf>. Acesso em: 22 maio 2024.

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens. **Apresentação das barragens**. Disponível em: <http://cbdb.org.br/apresentacao-das-barragens#:~:text=As%20barragens%2C%20definidas%20como%20obst%C3%A1culos,conc reto%20ou%20de%20aterro%2C%20geralmente>. Acesso em: 20 abr. 2024.

CBHSF – Comitê da Bacia do Rio São Francisco. **Barragem do zabumbão: o coração do vale fértil que supera a seca**. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/noticias/campanha-eu-viro-carranca-para-defender-o-velho-chico/barragem-do-zabumbao-o-coracao-do-vale-fertil-que-supera-a-seca/>. Acesso em: 10 jul. 2024.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Classificação dos solos**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em: 10 maio 2024.

FINE. GEO5 2024. **Estabilidade de taludes**: método simplificado Bishop (1955). Disponível em: <https://www.finesoftware.com.br/ajuda-online/geo5/pt/estabilidade-de-taludes-02/>. Acesso em: 27 set. 2024.

LOBO, A. V. L. **Gestão de segurança de barragens de usos múltiplos para abastecimento**. In: II ENCONTRO DE SEGURANÇAS DE BARRAGENS REGIÃO SUL. SANEPAR. Paraná, agosto de 2018. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/snisp/Entenda_Mais/capacitacao/Arquivos_Eventos/ii-encontro-sobre-seguranca-de-barragens-regiao-sul-2018/apresentacoes/sanepar_gestao-de-seguranca-de-barragens-de-usos-multiplos-para-abastecimento.pdf. Acesso em: 03 jul. 2024.

MACHADO, A. L. **Análise da estabilidade de barragens de terra**. 2019. Universidade Federal da Bahia – UFBA. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Segurança de Barragens). Salvador, BA, 2019. Acesso em: 27 maio 2024.

MONTEIRO, F. F. *et al.* **Análise de métodos de estabilidade de taludes para determinação e fatores de segurança através de estudos analíticos e computacionais**. In: XVI ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA. Universidade de Fortaleza, 17 a 20 de outubro de 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/323265247>. Acesso em: 25 set. 2024.

NETTO, A. S. **Análise de estabilidade de uma barragem de terra**: abordagens determinística e probabilística. 2019. Trabalho de Conclusão do Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/11738>. Acesso em: 15 abr. 2024.

OLIVEIRA, C. M. *et al.* **Estudos dos impactos ambientais no orçamento de barragens**. p. 2. 2008. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=110&SUMARIO=1651>. Acesso em: 17 maio 2024.

PLANALTO. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 21 set. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em: 25 abr. 2024.

PUC GOIÁS – Pontifícia Universidade Católica de Goiás. **Principais Elementos**. Goiás, GO, 2011. p. 3. Disponível em: https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem_terra_1.pdf. Acesso em: 03 jun. 2024.

RIA. **Comissão Mundial de Barragens – WCD - World Commission on Dams**. Disponível em: <https://www.rina.org/br/wcd-world-commission-on-dams#:~:text=A%20Comiss%C3%A3o%20mundial%20de%20barragens,barragens%20em%20todo%20o%20mundo>. Acesso em: 03 maio 2024.

SAMARCO – Empresa de Mineração. **Estabilidade de barragens**. Disponível em: <https://www.samarco.com/estabilidade-das-barragens/>. Acesso em: 07 jun. 2024.

SCHNEIDER, S. A. **Dimensionamento e análise de estabilidade de barragem de gravidade em concreto**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unisc.br/jspui/bitstream/11624/1128/1/Samuel%20Augusto%20Schneider.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2024.

SOUZA, V. L. **Barragem de terra**: estudo de caso realizado no reservatório boi no município de Brejo Santo. 2021. Universidade Regional do Cariri – URCA. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Juazeiro do Norte, CE, 2021, p. 62. Acesso em: 29 maio 2024.

STDF – Supremo Tribunal Federal. **Artigo 225 da sustentabilidade**. Disponível em: <https://portal.stf.jus.br/constituicao-supremo/artigo.asp?abrirBase=CF&abrirArtigo=225>. Acesso em: 15 maio 2024.

STHEPENS, T. **Manual sobre pequenas barragens de terra**: Guia para a localização, projeto e construção. v. 1, n. 1, p. 13 – 17, ed. 1. Roma, Itália, 2011: FAO. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/administracao/construcoes/livros/MANUAL%20SOBRE%20PEQUENAS%20BARRAGENS%20DE%20TERRA%20PEIXES.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2024.

TORRES, F. R. J. A.; ANDRADE, V. C. **Comparação entre análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade de taludes em barragens**: estudo de caso. 2015. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Curitiba, PA, 2015. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8024>. Acesso: 12 abr. 2024.

USP – Universidade de São Paulo. **Mecânica dos solos**. Escola Estadual de Educação Profissional (EEEP) – Ensino Médio Integrado à Educação Profissional: curso técnico em edificações. 2020. p. 5 – 6. Ceará, CE. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5580744/mod_resource/content/1/EEEP%20-%20Edifica%C3%A7%C3%B5es%20-%20Mecanica%20dos%20solos.pdf. Acesso em: 05 jun. 2024.