



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

ANDERSON NONATO PEREIRA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA BARRAGEM DO LAGO NORTE EM PALMAS –
TO**

PALMAS

2024

ANDERSON NONATO PEREIRA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA BARRAGEM DO LAGO NORTE EM PALMAS –
TO**

Projeto de trabalho de conclusão de curso (TCC II)
apresentado como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel no Curso Superior de Engenheiro Civil
do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Dr. Flávio da Silva Ornelas

**PALMAS
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

- P436a Pereira, Anderson Nonato
 Análise de Estabilidade da Barragem do Lago Norte em Palmas - TO /
 Anderson Nonato Pereira. – Palmas, TO, 2025.
 63 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
 Palmas, Palmas, TO, 2025.
- Orientador: Dr. Flavio da Silva Ornelas
 Coorientadora: Ma. Adriana Soraya Alexandria Monteiro
1. Barragem, Análise de estabilidade, Monitoramento. I. Ornelas, Flavio
 da Silva. II. Monteiro, Adriana Soraya Alexandria. III. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA BARRAGEM DO LAGO NORTE EM PALMAS – TO

Projeto de trabalho de conclusão de curso (TCC II) apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel no Curso Superior de Engenheiro Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Aprovado em: 23 / 06 / 2025

BANCA AVALIADORA

Documento assinado digitalmente
 **FLAVIO DA SILVA ORNELAS**
Data: 31/07/2025 08:29:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Flávio da Silva Ornelas
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **OCTAVIANO SIDNEI FURTADO**
Data: 31/07/2025 09:45:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. MSc. Octaviano Sidnei Furtado

Documento assinado digitalmente
 **GUILHERME ALVES MORAIS**
Data: 31/07/2025 17:27:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Civil Guilherme Alves Moraes

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por essa conquista tão sonhada e por me ajudar a prosseguir e por meus objetivos serem alcançados.

Certamente, estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já, peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

À minha querida família: esposa Flavianne, filhas Nathalia, Anna Clara e o genro Thiago, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho; Familiares, aos meus pais Erneci D'alves e José Moura, por todo o apoio e pela ajuda; aos meus sogros que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio; à minha tia Josinete, pelo apoio incondicional e fundamental durante essa jornada

Ao meu líder Espiritual, Pastor Presidente das Assembleias de Deus no Tocantins e Maranhão, Amarildo Martins, que me abençoou para esse grande desafio, pelo companheirismo, cumplicidade e pelo apoio em todos os momentos delicados da minha vida.

Ao meu orientador, professor Dr. Flávio Ornelas, por ter desempenhado tal função com dedicação, maestria e amizade, e aos Co orientadoras MSc. Adriana Soraya e Eng. Civil Guilherme Alves Moraes

A todos os meus colegas, em especial aos que ajudaram na pesquisa;

A Empresa Técnica Engenharia, na pessoa do Eng. Guilherme, que disponibilizou o laboratório para realização dos ensaios da pesquisa.

Não poderia deixar agradecer ao (IFTO) Instituto Federal do Tocantins e, assim, a todos os meus mestres, professores e coordenadores que foram primordiais na minha formação.

A todos que participaram, direta ou indiretamente, no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

RESUMO

Nos últimos tempos, a atenção tem se voltado para frequentes rompimentos de barragens construídas sem técnicas de engenharia no Brasil. As repercussões, nos últimos anos, de acidentes com barragens de terras, construídas sem projeto geotécnico e outros projetos multidisciplinares, têm levantado algumas questões sobre o assunto. Uma pequena barragem de terra denominada Lago Norte de Palmas, que estava com risco de rompimento, é o caso de uma pesquisa sobre a segurança de barragens. Palmas é a capital mais nova do Brasil e, há algum Tempo, seu crescimento exponencial apresenta alguns problemas relacionados aos sistemas de drenagem, onde talvez que acumulem água começam a promover grandes acúmulos de água pluvial e deságues em alagados e outros corpos hídricos. Um antigo barramento construído sem estudos geotécnicos e que não era próximo de área urbana, agora é cercado pela cidade e passou a acumular parte da drenagem. Como resultado, os moradores a jusante desta estrutura ficaram receosos com os riscos de uma ruptura, visto que havia iniciado um processo erosivo na jusante da barragem.

Esta pesquisa realizou a verificação dimensional, batimetria e classificou conforme diretrizes do Plano Nacional de Segurança de Barragens. Posteriormente, foram averiguados os sistemas de monitoramento e obtidos os parâmetros de resistência com ensaios laboratoriais e análises computacionais, para determinar a estabilidade do talude da barragem. As análises preliminares de campo demonstravam uma ruptura por erosão do talude de jusante, com o transbordamento ocorrido após fortes chuvas, e mesmo com a atuação do proprietário para mitigação dos riscos, ocorreu o que as pesquisas e previsões demonstraram.

Palavras-chave: Barragem, Análise de estabilidade, Monitoramento

ABSTRACT

Recently, attention has been focused on the frequent breaches of dams built without engineering techniques in Brazil. The repercussions in recent years of accidents involving earth dams, built without geotechnical and other multidisciplinary projects, have raised some questions on the subject. A small earth dam (the northern lake of Palmas) that was at risk of collapse is the subject of a study into dam safety. Palmas is Brazil's youngest capital city and its exponential growth for some time now has presented some problems related to drainage systems, where waterlogged banks are beginning to promote large accumulations of rainwater and runoff into floodplains and other water bodies. An old dam that was built without geotechnical studies and was not close to an urban area is now surrounded by the city and has started to accumulate part of the drainage. As a result, residents downstream of this structure became fearful of the risk of a rupture, since an erosion process had begun downstream of the dam. This research carried out dimensional verification, bathymetry and classification in accordance with the guidelines of the National Dam Safety Plan. Subsequently, the monitoring systems were investigated and resistance parameters were obtained using laboratory tests and computer analyses to determine the stability of the dam slope. Preliminary field analyses showed that the downstream slope would rupture due to erosion when it overflowed after heavy rains, and even though the owner took action to mitigate the risks, what the research and forecasts showed occurred.

Keywords: Dam, Stability analysis, Monitoring

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Vista aérea da barragem e a ocupação urbana ao redor	09
Figura 2.1 - Corte de um talude de barragem.....	14
Figura 2.2 - Métodos das fatias.....	19
Figura 2.3 - Forças atuantes e resistentes na lamela do talude.....	20
Figura 3.1 - Pontos de erosão	33
Figura 3.2 - Foto do lago Norte de Palmas.....	34
Figura 3.3 - Realização de batimetria.....	35
Figura 3.4 - Croqui do talude do Lago Norte de Palmas.....	36
Figura 3.5 - Coleta de corpo de prova indeformada para análise em laboratório.....	37
Figura 3.6 - Amostras de solo.....	38
Figura 3.7- Teor de umidade.....	39
Figura 3.8 - Ensaio limite de liquidez.....	40
Figura 3.9 - Amostra indeformada retirada em cilindro metálico.....	42
Figura 3.10 - Ensaio de cisalhamento laboratório Empresa Técnica Engenharia.....	43
Figura 4.1 - Tabela de limite de liquidez x índice plasticidade.....	46
Figura 4.2 - Tabela ensaio teor de umidade.....	47
Figura 4.3 - Tabela ensaio de granulometria.....	47
Figura 4.4 - Tabela ensaio de determinação da densidade das partículas solidas.....	48
Figura 4.5 - Tabela e gráfico ensaio curva granulométrica.....	49
Figura 4.6 - Moldagem de amostra indeformada.....	50
Figura 4.7 - Ensaio de cisalhamento direto	50
Figura 4.8 – Gráficos dos parâmetros tensão cisalhante (kgf/cm^2) x tensão normal (kgf/cm^2)	51
Figura 4.9 - Gráfico de tensão cisalhante (kgf/cm^2) x deslocamento (mm)	51
Figura 4.10 - Resultado das amostras.....	52
Figura 4.11 - Análise Determinística Estabilidade do Talude a Jusante	53
Figura 4.12 - Análise da percolação	54
Figura 4.13 - Análise Determinística Estabilidade do Talude a Jusante	54
Figura 4.14 - Falha da barragem no ponto de erosão 1	55
Figura 4.15 - Tabela matriz de classificação de danos potenciais.....	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	08
1.1	Problema de pesquisa	09
1.2	Justificativa.....	10
1.3	Objetivo.	11
1.3.1	Objetivo geral	11
1.3.2	Objetivo específico	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1	Análise, Estabilidade e Segurança de Taludes de Barragens	12
2.2	Mecanismos de Ruptura em Taludes.....	14
2.3	Fatores que Influenciam a Estabilidade de Taludes	15
2.4	Métodos de Análise de Estabilidade.....	16
2.5	Investigação Geotécnica.....	23
2.6	Monitoramento de Taludes.....	24
2.7	Medidas de Segurança	25
2.8	Influência das Condições Hidrológicas	26
2.9	Análise de Risco	27
2.10	Fatores de Segurança.....	27
2.11	Manutenção de Taludes	31
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	Levantamento de dimensões e informações	34
3.2	Coleta de amostras para ensaios e planejamento.....	36
3.3	Verificação do enquadramento no PNSB.....	41
3.4	Método de análise de estabilidade e determinação do FS com uso de software de modelagem numérica.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	Influência da ausência de mecanismo de proteção	44
4.2	Ensaio de granulometria e limite de consistência.....	45
4.3	Classificação no PNSB.....	55
5	CONCLUSÃO.....	57
	Recomendações para trabalhos futuros	68
	REFERÊNCIAS.....	60

1 - INTRODUÇÃO

Na engenharia, desde os primórdios, as obras de terras, denominadas atualmente como barragens, sempre tiveram um papel crucial no que tange aos benefícios para a sociedade. Paralelo a isso, a ruptura de barragens construídas sem critérios de engenharia vem sendo um problema recorrente atualmente, devido à ausência de projetos, responsabilidade técnica e monitoramento, que são os responsáveis por identificar e mitigar possíveis falhas estruturais.

Diante o exposto, é evidente a grande importância da análise de risco na mitigação de potenciais desastres causados por infraestruturas em perigo, como é o caso da barragem em questão na cidade de Palmas.

Em face disso, a capital mais nova do Brasil enfrenta desafios crescentes decorrentes de sua rápida expansão urbana, incluindo problemas relacionados aos sistemas de drenagem que se destinavam a talvegues e que se tornaram barramentos de grandes volumes de água.

Neste contexto, um antigo alagado, antes isolado em áreas rurais, agora se encontra cercado pela cidade em expansão, acumulando parte da drenagem urbana. Este cenário levou à preocupação dos moradores a jusante da barragem, que enfrentam o risco iminente de colapso, especialmente após o início de processos erosivos em suas proximidades devido à falta de monitoramento e excesso de chuvas.

As barragens são obras com finalidade de reter águas e/ou resíduos mediante barramentos, com o objetivo de armazenar águas oriundas dos rios, córregos, ribeirões e/ou outros. Tem como finalidade múltiplos propósitos: controle de drenagens das cidades através dos coletores, abastecimentos de água potável para consumo doméstico e industrial, irrigação agrícola, geração de energia, lazer, etc.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), quase um milhão de pessoas vivem perto de barragens potencialmente perigosas no Brasil. Esse número se refere à quantidade de pessoas que vive a até um quilômetro de distância de uma das 1.220 barragens do país classificadas como de alto risco e com alto potencial de dano. Diante deste panorama, o presente trabalho realizará uma análise abrangente da situação da barragem.

Nesta pesquisa, inicialmente foram verificados dados cruciais, como batimetria, dimensões da barragem, galeria pluvial e nível da água obtidos in loco, para determinar

se a estrutura já se enquadra nos padrões de segurança estabelecidos pelo Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e pela Lei 14.066/2020.

Em seguida, foi executado um estudo detalhado da estabilidade do talude da barragem, empregando ensaios laboratoriais, análises computacionais e modelagem da barragem, com intuito de identificar possíveis pontos de fragilidade para o desenvolvimento de estratégias de mitigação.

Este trabalho não apenas visa proteger vidas e propriedades, mas também destaca a importância de uma abordagem proativa e holística na gestão de riscos geotécnicos, o que pode trazer mais segurança para as comunidades que vivem a jusante da Barragem do Lago Norte de Palmas.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A Barragem do Lago Norte é um reservatório de controle de vazão de drenagem urbana, onde, em sua crista, há o trânsito de veículos e pedestres e, na jusante, a presença de residências. A barragem apresenta elementos que indicam sua potencial e eminente ruptura, porém não há nenhuma informação sobre a sua estabilidade, monitoramento e dos riscos que ela oferece.

O objetivo deste trabalho é analisar a segurança do talude em estudo, quanto à proteção que ele oferece à população que reside próximo à sua localidade, e também para às pessoas que utilizam a sua crista como via de acesso aos bairros e chácaras, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 13.028 (ABNT, 2017). A Figura 1.1 apresenta a vista aérea da barragem e a ocupação urbana ao redor.

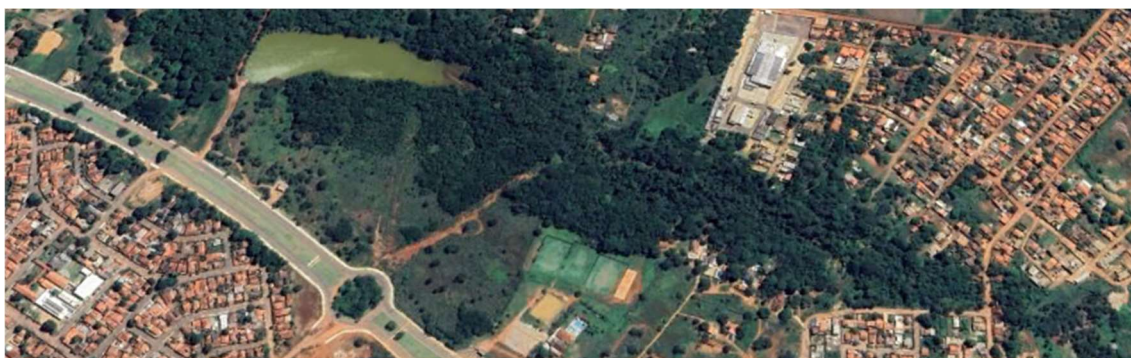


Figura 1.1 – Vista aérea da Barragem do Lago Norte e da ocupação urbana ao redor. (Google Earth, 2024)

1.2 JUSTIFICATIVA

A necessidade das barragens de acúmulos de água tem desempenhado um papel fundamental no potencial de geração de energia hidrelétrica, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o potencial hidrelétrico brasileiro é estimado em 172 GW, dos quais mais de 60% já foram aproveitados. Aproximadamente 70% do potencial ainda não aproveitado está localizado nas bacias hidrográficas Amazônica e Tocantins - Araguaia. Trata-se de uma tecnologia madura e confiável que, no contexto de maior preocupação com as emissões de gases de efeito estufa, apresenta a vantagem adicional de ser uma fonte renovável de geração.

Além do potencial hidrelétrico, há outras atividades essenciais, como o abastecimento humano, a agricultura, o acúmulo de rejeitos de minério, a melhoria da drenagem urbana, o favorecendo infiltração no solo, a recarga da água subterrânea e a mitigação de enchentes.

Vários acidentes têm se caracterizado pelo comprometimento da integridade estrutural das barragens, resultando no colapso total ou parcial das estruturas. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), Conforme o Relatório Segurança de Barragem (RSB, 2022), no último ano foram reportados 24 acidentes, o que representa um aumento de 85% em relação a 2021. Também houve 58 incidentes, uma elevação de 57% no período. Esses eventos ocorreram, sobretudo, em função das chuvas intensas no Brasil nos meses de janeiro, fevereiro, maio e dezembro do ano de 2020.

Apesar da elevação no número de acidentes e incidentes, não foram registrados óbitos relacionados a barragens. Foi relatado que aproximadamente 86% dos acidentes e incidentes ocorridos em 2017 aconteceram em barragens de terra, sejam elas do tipo homogênea, zoneado ou ainda mistas com enrocamento. (RSB, 2017)

Segundo dados históricos levantados no Brasil (ANA, 2017), ocorreram, em média, mais de três acidentes com barragens por ano. São números muito altos, porém, os rompimentos com maiores potências de danos foram os das barragens de rejeitos ocorridos em Minas Gerais: Barragem do Fundão (Mariana) e Barragem da Mina do Córrego do Feijão (brumadinho). Estas rupturas tomaram grande proporção e repercussão nos noticiários nacionais e internacionais, trazendo graves problemas às comunidades a jusantes, deixando dezenas de mortos e causando prejuízos ambientais incalculáveis.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é realizar uma avaliação sobre a estabilidade da barragem de terra do Lago Norte em Palmas – TO, em condições atuais, por meio do método determinístico.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar a verificação dimensional e batimetria para determinação do modelo geométrico da barragem;
- Classificar a barragem conforme as diretrizes do Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB);
- Analisar as ocorrências de transbordamento e os processos erosão no talude de jusante;
- Analisar a percolação da água no talude de jusante da barragem;
- Averiguar a existência de sistemas de monitoramento e obter os parâmetros de resistência do solo por meio de ensaios laboratoriais. (granulometria, limite de liquides, teor de umidade, ensaio de cisalhamento, entre outros);
- Determinar o fator de segurança do talude de jusante, por meio de modelagem numérica utilizando métodos de equilíbrio limite.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Análise, Estabilidade e Segurança de Taludes de Barragens

A construção de barragens exige uma análise criteriosa da estabilidade e segurança dos taludes, visando garantir a integridade da estrutura e prevenir desastres (ABNT, 2009). Diversos fatores influenciam a estabilidade, como a geometria do talude, as propriedades geotécnicas dos materiais, as condições hidrológicas e as solicitações externas (Fellenius, 1991).

A construção e manutenção de barragens deve seguir as normas técnicas e legislação vigente para que a estrutura tenha o tempo de vida útil para qual foi projetada. Com o objetivo de assegurar esse intento e evitar riscos de perdas humanas e danos ambientais surgiu Política **Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)**, definida pela **Lei nº 12.334/2010**. Essa lei estabelece parâmetros que devem ser implementados para que a barragem seja segura e desempenhe as suas funções.

Esses parâmetros são verificados por meio do RSB (Relatório de Segurança de Barragem) que é um documento para verificar o estado de segurança de uma barragem. O Relatório de Segurança de Barragem (RSB) deve conter informações relativas às condições de segurança da estrutura, abrangendo aspectos de projeto, operação, manutenção e monitoramento. Esse documento realiza uma avaliação contínua da estabilidade da barragem, prevenindo acidentes e promovendo ações de correção sempre que necessário.

A incumbência pela elaboração e atualização periódica do RSB é do empreendedor e este deve fornecer ao órgão responsável pela fiscalização e esse documento deve apresentar no mínimo os seguintes itens: histórico da barragem, características técnicas, inspeções realizadas, anomalias identificadas, medidas corretivas aplicadas, plano de ação emergencial (quando aplicável), entre outros. A periodicidade do relatório depende da **categoria de risco (CRI)** e do **dano potencial associado (DPA)** atribuídos à barragem. Segundo a **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)**, o RSB também deve conter uma **declaração de condição de estabilidade**, assinada por profissional legalmente habilitado, que ateste se a barragem se encontra operando de forma segura. A ausência dessa declaração ou a indicação de instabilidade obriga o empreendedor a tomar providências imediatas para minimizar riscos.

Para evitar qualquer transtorno acarretado por instabilidades que possam comprometer é necessário um projeto bem feito seguindo as normas e legislações

vigentes. Em relação a isso o dimensionamento de uma obra geotécnica é realizado considerando um cenário em todos os espaços vazios do solo, que serve como material de construção, estão preenchidos com água; em outras palavras, o solo se encontra na condição saturada. Esse é o cenário em que o solo apresenta a menor resistência, devido a maior poropressão e, conseqüentemente, à menor tensão efetiva. Um solo saturado com água tem menos resistência ao cisalhamento, porque essa substância afasta as partículas do solo uma das outras, deixando o maciço mais sujeito a movimentações e deslizamentos que, em última instância, podem ocasionar a ruptura de um talude.

O controle da poropressão é um parâmetro indispensável para estabilidade e, por conseguinte, para o prolongamento da vida útil da estrutura. O barramento do Lago Norte era uma barragem de terra homogênea, cuja construção foi feita de forma improvisada, sem se sequer um sistema de filtro para drenar o excesso de água que se infiltrava no corpo do talude. De acordo com a Agência Nacional de águas – ANA (2014), em uma barragem de terra é fundamental a construção de um sistema de drenagem interna, que normalmente é constituído seguindo as recomendações abaixo:

“O filtro subvertical, cuja função é intercepta a percolação que atravessa a barragem, conduzindo a água captada até jusante por meio de um tapete drenante. Assim, desde que ambos os dispositivos sejam adequadamente dimensionados, respeitando condições de filtro entre materiais e tenham capacidade de escoamento suficiente, o espaldar a jusante do filtro subvertical permanecerá não saturado e a erosão interna do seu material fica controlada.

O filtro subvertical é de construção fácil, mas como normalmente é mais rígido do que os materiais adjacentes, pode verificar-se transferência de tensões entre materiais de diferente deformabilidade, o que aconselha frequentemente a adoção de filtros inclinados. Essa adoção de filtros subverticais em vez de verticais constitui a tendência internacional dos últimos anos.

Quando necessário controlar os gradientes hidráulicos de saída a jusante, bem como reduzir subpressões, podem ser empregados dispositivos adicionais, como trincheiras drenantes ou poços de alívio, espaçados regularmente.

Quando colocados diretamente sobre a fundação, o tapete drenante intercepta também a água que circula através dela, controlando, deste modo, as poropressões na zona superficial da fundação e evitando a instalação de pressões no aterro. A camada inferior do tapete deve funcionar como filtro do material de fundação, controlando também a erosão interna da zona superficial da fundação. A adoção desta camada filtrante é particularmente importante para barragens com espaldares de jusante construídos com solos permeáveis (por exemplo, solos arenosos ou com pedregulhos), fundações em rochas alteradas ou fissuradas de elevada permeabilidade com potencial de erosão elevado ou fundações em rochas brandas (arenitos e siltitos).

Os drenos de pé de jusante asseguram a continuidade ao tapete drenante e constituem uma segurança adicional, face à eventual colmatação do filtro ou do tapete drenante, ou mesmo, a grandes e inesperados fluxos provenientes da fundação.

Em casos muito favoráveis do ponto de vista das ações e de menor responsabilidade, com exceção dos diques de selas, mesmo que de pequena altura, podem ser dispensados os filtros subverticais e/ou sub-horizontal

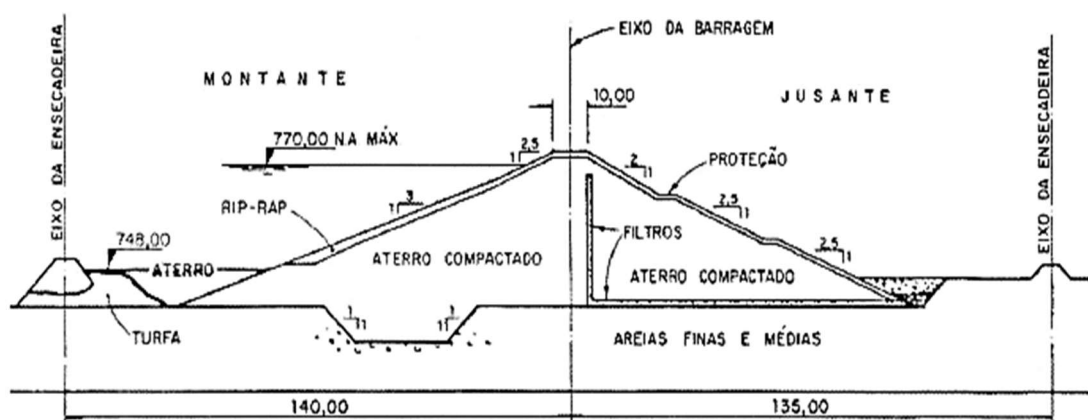
contínuos, substituído(s) por um sistema de drenos de pé e de fundação, desde que não haja suspeita de erosão interna.

A necessidade de introdução de juntas de construção nos aterros deve ser determinada, em função do planejamento da obra, devendo adotar-se o menor número de juntas que permita distribuir os volumes lançados de modo a se obter um histograma mais homogêneo de produção, o que permitirá a mobilização de um menor número de equipamentos.

A largura da crista é definida em função de diversos aspectos, tais como, a altura e importância da obra, o risco sísmico do local, a natureza dos materiais a empregar, a configuração da linha de saturação com o reservatório cheio, o processo construtivo e, se a crista for utilizada como acesso, a largura mínima necessária para o tráfego de veículos (nos dois sentidos).

A inclinação dos taludes é definida de acordo com as principais ações e com as características tecnológicas dos materiais, quer dos aterros, quer das fundações.”

Toda barragem tem então um conjunto de seções que compõe todo o barramento. A Figura 2.1 apresenta uma seção de corte transversal de um de talude de barragem.



A figura 2.1 Seção típica de uma barragem de terra homogênea. Fonte: ANA (2014).

2.2 Mecanismos de Ruptura em Taludes

A ruptura de um talude de barragem pode ocorrer por diferentes mecanismos, sendo crucial a sua identificação para a correta análise de estabilidade e o projeto de medidas de segurança eficazes (Duncan, 1996). Braja M. Das (2011), os mecanismos mais comuns incluem os deslizamentos rotacionais e translacionais.

Os deslizamentos rotacionais são caracterizados pela formação de uma superfície de ruptura curva, geralmente observada em solos homogêneos e coesivos, nos quais a resistência ao cisalhamento apresenta distribuição relativamente uniforme (Terzaghi & Peck, 1967). Nesse tipo de mecanismo, a massa de solo desloca-se ao longo de uma superfície côncava, girando em torno de um eixo situado acima do centro de gravidade da massa deslizante (Skempton & Delory, 1957).

Já os deslizamentos translacionais, que se desenvolvem ao longo de uma superfície plana ou ligeiramente ondulada, são mais frequentes em solos com camadas

menos resistentes, como solos estratificados com intercalações de argilas e areias, ou em taludes rochosos com descontinuidades, como falhas, fraturas e planos de acamamento (Hoek & Bray, 1981). Nesses casos, a massa de solo desliza sobre uma camada mais fraca ou ao longo de uma superfície de descontinuidade (Goodman, 1989). A ocorrência de cada tipo de ruptura depende não só das características do material, mas também da geometria do talude, da inclinação, da altura e das condições de carregamento (Chowdhury, 1978).

Além dos deslizamentos rotacionais e translacionais, outros mecanismos de ruptura podem ocorrer em taludes de barragens, como o rastejo (creep), a queda de blocos e o colapso por liquefação (Varnes, 1978). O rastejo é um movimento lento e gradual do solo, que pode ocorrer em taludes com baixa inclinação e solos com características viscosas (Terzaghi, Peck & Mesri, 1996). A queda de blocos é comum em taludes rochosos com descontinuidades, onde blocos individuais podem se desprender e rolar pela face do talude (Wyllie & Mah, 2004). A liquefação, por sua vez, é um fenômeno que ocorre em solos saturados, principalmente areias fofas, quando submetidos a vibrações, como as causadas por sismos, levando à perda de resistência e ao colapso do talude (Seed & Idriss, 1971).

2.3 Fatores que Influenciam a Estabilidade de Taludes

A estabilidade de um talude de barragem é uma função complexa de diversos fatores interdependentes, que devem ser cuidadosamente considerados na análise e no projeto (USACE, 1999). Fellenius (1991) destaca a importância das propriedades geotécnicas dos materiais, como a resistência ao cisalhamento, a permeabilidade e a compressibilidade. A resistência ao cisalhamento, que representa a capacidade do solo de resistir a esforços tangenciais, é um parâmetro fundamental na análise de estabilidade, pois define a força que se opõe ao deslizamento (Lambe & Whitman, 1969). A permeabilidade, por sua vez, influencia o fluxo de água no talude, afetando as pressões neutras e a resistência do solo (Taylor, 1948). A compressibilidade, que se refere à capacidade do solo de se deformar sob carregamento, também é relevante, pois pode levar a recalques e alterações na geometria do talude (Terzaghi, 1943).

A geometria do talude, incluindo a altura, a inclinação e a forma, também exerce um papel crucial na sua estabilidade (Bishop, 1955). Taludes mais altos e íngremes tendem a ser menos estáveis, pois apresentam maiores forças gravitacionais atuantes e menores forças resistentes (Janbu, 1954). A forma do talude também influencia a

distribuição de tensões e a concentração de esforços, sendo que taludes côncavos são geralmente mais estáveis que taludes convexos (Morgenstern & Price, 1965).

As condições hidrológicas, como o nível do reservatório e a infiltração de água, podem afetar significativamente a estabilidade do talude (Lopes, 1988). A elevação do nível do reservatório aumenta as pressões neutras no interior do talude, reduzindo a tensão efetiva e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento (Casagrande, 1961). A infiltração de água, proveniente de chuvas ou vazamentos, também pode saturar o solo, aumentando o peso específico e diminuindo a resistência (Sherard et al., 1963). Em solos argilosos, a variação de umidade pode causar expansão e contração, levando a fissuras e perda de coesão (Mitchell, 1976).

Outros fatores que podem influenciar a estabilidade do talude incluem as solicitações externas, como sismos e vibrações, que podem induzir esforços adicionais e desencadear rupturas (Newmark, 1965). A presença de vegetação, embora possa ter um efeito benéfico ao controlar a erosão e aumentar a coesão do solo, também pode contribuir para a instabilidade, aumentando o peso do talude e a infiltração de água (Greenway, 1987). Adicionalmente, a história geológica e a presença de estruturas geológicas, como falhas e dobras, podem influenciar a resistência e a deformabilidade do maciço, devendo ser consideradas na análise de estabilidade (Kramer & Twiss, 1988).

2.4 Métodos de Análise de Estabilidade

A análise de estabilidade de taludes de barragens é fundamental para avaliar a segurança da estrutura e prever o seu comportamento sob diferentes condições de carregamento (Duncan, 1996). Os métodos de equilíbrio limite, como o método de Fellenius e o método de Bishop simplificado, são amplamente utilizados para análises preliminares e projetos de engenharia (Bishop, 1955). Esses métodos, baseados na teoria da plasticidade, consideram o equilíbrio de forças e momentos atuantes em um corpo rígido, definido pela superfície de ruptura potencial (Fellenius, 1936). O método de Fellenius, um dos mais simples e tradicionais, assume que as forças entre as fatias de solo são horizontais, enquanto o método de Bishop simplificado considera a inclinação das forças interfatias, proporcionando resultados mais precisos (Bishop, 1955).

Para análises mais detalhadas e complexas, podem ser utilizados métodos numéricos, como o método dos elementos finitos (MEF) (Zienkiewicz et al., 1977). O MEF permite modelar o comportamento do solo de forma mais realista, considerando as deformações e as tensões no maciço de forma contínua. Essa técnica divide o talude em um número

finito de elementos interconectados, permitindo a análise de diferentes cenários, como a variação do nível do reservatório, a aplicação de cargas externas e a influência de diferentes parâmetros geotécnicos (Desai & Christian, 1977). O MEF é particularmente útil para analisar taludes com geometrias complexas, materiais heterogêneos e condições de contorno variáveis.

Outros métodos de análise de estabilidade incluem métodos probabilísticos, que consideram a variabilidade dos parâmetros geotécnicos e as incertezas inerentes ao processo de análise (Harr, 1987), e métodos de análise de deformações, que avaliam a magnitude e a distribuição dos deslocamentos no talude (Peck, 1969). A escolha do método de análise mais adequado depende da complexidade do problema, da disponibilidade de dados, dos recursos computacionais e do nível de precisão requerido. A análise da estabilidade dum talude por meio dos "métodos de equilíbrio-limite parte do pressuposto da existência dum equilíbrio na massa de solo que compõe o talude, aonde esse solo é concebido como como corpo rígido-plástico, na iminência de entrar em um processo de escorregamento. De acordo com Massad (2002, p.64) “com base no conhecimento das forças atuantes, determinam-se as tensões de cisalhamento induzidas, por meio das equações de equilíbrio. A análise termina cora a comparação dessas tensões com a resistência ao cisalhamento do solo em questão”.

É importante salientar que esse método possui limitações devidos as hipóteses simplificadoras adotadas para facilitar o cálculo do coeficiente de segurança. Em relação as condicionantes que torna esse modelo menos fidedigno Silva (2011) faz as seguintes observações: o método do equilíbrio limite considera que a massa de solo possui um comportamento rígido plástico aonde o solo rompe bruscamente sem que antes da ruptura haja sinais de deformação, ou seja simplificação desconsidera a existência de qualquer informação em relação à magnitude das tensões no interior do talude nem da sua variação ao longo da superfície de deslizamento; outra limitação apontada por esse autor é a razoabilidade da ocorrência duma ruptura progressiva, ou seja, esse fenômeno não acontecem da mesma maneira em todos os pontos da superfície de deslizamento ao mesmo tempo e na realidade esse processo pode ser desencadeado de forma progressiva por meio de deformações à medida que as deformações aumentam, outros irão plastificar, atingindo também esses a ruptura.

Sobre a possibilidade de ruptura gradativa e não abrupta Silva ainda faz o seguinte questionamento que reforça a limitação dessa abordagem: a resistência ao deslizamento

não é uniforme no decorrer de toda superfície e isso acarreta o surgimento de pontos com resistência inferior ao coeficiente de segurança calculado.

Dessa forma não há garantia que a máxima força possa ser mobilizada simultaneamente em todos os pontos da superfície de deslizamento. Diante disso surgem o seguinte questionamento que merece ser estudado com maior profundidade: qual a influência que esses pontos com resistências abaixo do coeficiente obtido no cálculo possui na degradação progressiva do talude, ou seja, o raciocínio é o seguinte; primeiro esses pontos se rompem no interior do talude criando espaços vazios que facilita a entrada de água e até de substâncias que degrada o talude e com essas fissuras vão aumentando e consequentemente diminuindo a resistência global do talude.

A teoria do equilíbrio limite afirma que em um talude as linhas de ruptura possuem o formato aproximadamente dum arco de círculo e o escorregamento acontece de tal modo que a massa de solo instabilizada se fragmentava em fatias ou lamelas, com faces verticais. O conceito de círculo de atrito" e a divisão da massa de solo em fatias se consolidou como a base para a maioria dos modelos matemáticos que tentam explicar a ruptura dum talude.

De acordo com Netto (2019, p.32) o uso do método das fatias é amplamente empregado na análise da estabilidade de taludes devido as hipóteses simplificadoras que torna o modelo matemático menos complexo. Essa metodologia arbitra uma superfície potencial de ruptura aonde o maciço de solo irá deslizar sobre ela e o cálculo do equilíbrio é efetuado por intermédio da divisão da camada de solo acima da superfície de ruptura em fatias de faces verticais. As imagens abaixo mostram a superfície de ruptura dividida em fatias. A Figura 2.2 apresenta o método das fatias e suas condições de contorno.

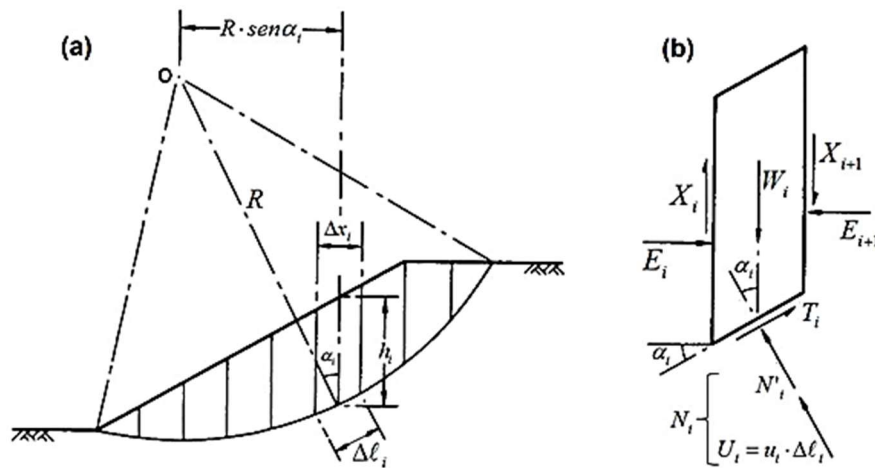


Figura 2.2 – Método das fatias, esforço nas fatias “i” Fonte: Netto (2019)

Onde:

W_i = peso da fatia

N'_i = resultante das tensões efetivas normais à base da fatia

U_i = resultante das poropressões na base da fatia

T_i = a resultante das tensões tangenciais mobilizadas na base da fatia

E_i = componente normal da força de interação entre as fatias na face esquerda

X_i = componente tangencial da força de interação entre as fatias na face esquerda.

E_{i+1} = componente normal da força de interação entre as fatias na face direita

X_{i+1} = componente tangencial da força de interação entre as fatias na face direita

Existem várias maneiras de calcular o fator de segurança pelo método do equilíbrio limite e a diferença entre cada abordagem está na forma como é efetuado o somatório dos esforços que agem numa fatia de solo que está acima da superfície potencial de ruptura.

O método de Fellenius é o modelo mais simples que existem para obter o coeficiente de segurança e sendo assim sua análise é incompleta porque a determinação do fator de segurança é efetuado levando em consideração apenas o equilíbrio de forças na direção normal à superfície de deslizamento e o equilíbrio de momentos. O grande equívoco desse método é o desprezo das forças entre as faces da fatia, ou seja, para remover a hiperstaticidade do problema esse modelo chega ao absurdo que a força resultante entre as lamelas é horizontal e por isso acaba se cancelando. Abaixo está fórmula para calcular o coeficiente de segurança de acordo com essa abordagem.

$$FS = \frac{\Sigma(c'l + (W\cos\alpha - ul)tg\phi')}{\Sigma W\sin\alpha}$$

Onde:

FS é o fator de segurança (adimensional);

c' é a coesão do solo [kPa]; ϕ' é o ângulo de atrito;

l é o comprimento da base da fatia [m];

α é inclinação da base da fatia;

Wi é o peso da n -ésima fatia [kN];

u é a força de percolação [kN].

Para Massad (2002) o método Fellenius pode fornecer resultados imprecisos devido ao tratamento concedido as pressões neutras. A rigor, as forças resultantes das da poropressão atuam também nas faces entre lamelas. Como são forças horizontais, elas têm componentes na direção da normal a base das lamelas, que é a direção de equilíbrio das forças.

Devido as limitações inerentes a esse método esse estudo não o utilizou e para calcular o fator de segurança foi empregado o método de Morgenstern e Price devido a sua maior precisão e confiabilidade. A Figura 2.3 apresenta os esforços na fatia de Morgenstern-Price detalhada por Gerscovich (2019).

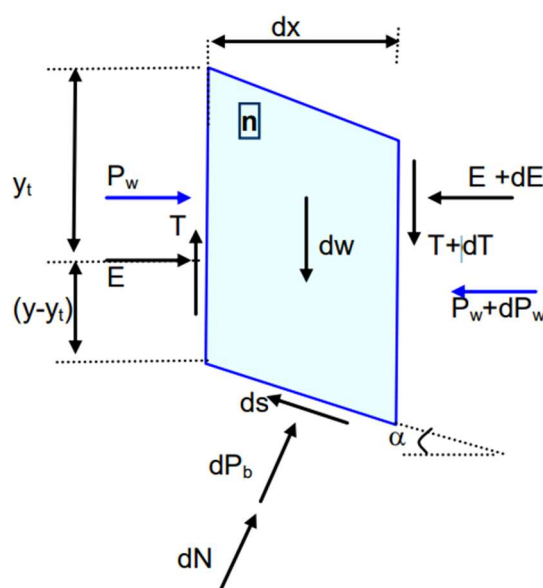


Figura 2.3 – Forças atuantes e resistentes na lamela do talude, esforços na Fatia de Morgenstern-Price. Fonte: GERSCOVICH (2019)

Onde:

dW = peso da fatia

P_w = poropressão no contorno da fatia

dPb = resultante poropressão na base da fatia

E e T = esforços entre fatias atuando em (y-yt)

ds = resistência na base

Ao contrário de abordagens mais simplificado o procedimento de cálculo desenvolvido por Morgenstern e Price não ignora as forças existentes nas faces da fatia e propõe a escolha de uma função para exprimir a relação entre E e T para que o problema tenha uma solução analítica.

$$T = \lambda f(x)E$$

$$\tan\theta = \frac{T}{E} = \lambda f(x)$$

Onde λ um parâmetro que deve ser determinado a partir da solução de $f(x)$ uma função arbitrária. o cálculo de esforços nesse método pressupõe que as dimensões das fatias são infinitesimais, ou seja, quando o limite tende a zero. Ao contrário de outros métodos que faz uma aproximação grosseira este utiliza os princípios do cálculo diferencial e integral. Numa fatia infinitesimal, o equilíbrio de momentos com relação a base, para dx é dado por:

$$-T = \frac{d\{E(y - yt)\}}{dx} - E \frac{dy}{dx} + \frac{d\{Pw(y - h)\}}{dx} - Pw \frac{dy}{dx}$$

Em que se definem as seguintes funções:

$y(x)$ representa a superfície de ruptura;

$z(x)$ representa a superfície do talude,

$h(x)$ representa a linha de ação da poropressão

$yt(x)$ representa a linha de ação da tensão efetiva normal

Já o equilíbrio de forças normal e tangencial em relação a base da fatia é efetuado com a seguinte modelagem matemática:

$$\begin{aligned} & \frac{dE}{dx} \left\{ 1 - \frac{\tan\phi'}{FS} \frac{dy}{dx} \right\} + \frac{dT}{dx} \left\{ \frac{\tan\phi'}{FS} + \frac{dy}{dx} \right\} = \\ & \frac{c'}{FS} \left\{ 1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right\} + \frac{dPw}{dx} \left\{ \frac{\tan\phi'}{FS} \frac{dy}{dx} - 1 \right\} + \frac{dW}{dx} \left\{ \frac{\tan\phi'}{FS} + \frac{dy}{dx} \right\} \\ & - Pu \left\{ 1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right\} \frac{\tan\phi'}{FS} \end{aligned}$$

$$\frac{dE}{dx} \left\{ 1 + \frac{\tan\phi'}{FS} \frac{dy}{dx} \right\} + \lambda f \left\{ \frac{\tan\phi'}{FS} + \frac{dy}{dx} \right\} + \lambda \frac{df}{dx} \left\{ \frac{\tan\phi'}{FS} + \frac{dy}{dx} \right\} E =$$

$$\frac{c'}{FS} \left\{ 1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right\} + \frac{dP_w}{dx} \left\{ \frac{\tan \phi'}{FS} \frac{dy}{dx} - 1 \right\} + \frac{dW}{dx} \left\{ \frac{\tan \phi'}{FS} + \frac{dy}{dx} \right\} - Pu \left\{ 1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right\} \frac{\tan \phi'}{FS}$$

Onde:

$$Pu = \cos \alpha \frac{dP_b}{dx}$$

Em conformidade com Gercovich (2009) “considerando a subdivisão em n fatias, com coordenadas limítrofes $x_0, x_1 \dots x_n$. assume-se no interior das fatias as seguintes funções: (x é contado do início de cada fatia)”.

$$y = Ax + B$$

$$\frac{dW}{dx} = px + q$$

$$f = kx + m$$

$$Pu = rx + s$$

$$P_w = u_w + v_w x = W_w x^2$$

$$HP_w = u_n + v_n x + w_n x^2 + z_n x^3$$

A equação pode ser simplificada para a seguinte expressão abaixo:

$$(Kx - L) \frac{dE}{dx} + KE = Nx + P$$

Onde:

$$K = \lambda k \left\{ \frac{\tan \phi'}{FS} + A \right\}$$

$$L = 1 - \frac{A \tan \phi'}{FS} + \lambda m \left\{ \frac{\tan \phi'}{FS} + A \right\}$$

$$L = \frac{\tan \phi'}{FS} [2AW_w + p - r(1 + A^2)] + [-2W_w + pA]$$

$$p = \frac{1}{FS} \{ (c - \sigma \tan \phi') (1 + A^2) + Vm A \tan \phi' + q \tan \phi' \} + \{ qA - Vw \}$$

Integrando a equação obtemos

$$E(x) = \frac{1}{L + Kx} \left[EiL + \frac{Nx^2}{2} + Px \right]$$

Assim sendo

$$E(x) = \frac{1}{L + Kb} \left[EiL + \frac{Nb^2}{2} + Px \right]$$

Onde b é a largura da fatia = $x_i - x_{i+1}$ Usando a relação entre E e T e a equação de equilíbrio de momentos e integrando na faixa x_0 a x_n , chega-se a

$$M(x) = E(yt - y) = Mew(x) + \int_{x_0}^x \left(\lambda f - \frac{dy}{dx} \right) E dx$$

$$Mew(x) = \int_{x_0}^x \left(-Pw \frac{dy}{dx} \right) dx + [Pw(y - h)]$$

De acordo com Gercovich para obter o coeficiente de segurança por esse método é necessário proceder da seguinte maneira:

O método é solucionado iterativamente assumindo-se valores para FS e λ e calculando-se E e M(x) para cada fatia. Nos contornos ($x=0$ e $x=n$) os valores de E e M deverão ser nulos; isto é:

$$x = x_0 \text{ — } M(x_0) = E(x_0)$$

$$X = x_n \text{ — } M(x_n) = E(x_n)$$

Assim sendo o processo iterativo é repetido até que as condições no contorno sejam satisfeitas. Faz-se necessário o uso de computadores para utilização do método. Como o resultado depende da hipótese adotada para λ , é importante ter conhecimento prévio da função adotada. (Gercovich, pag. 136)

2.5 Investigação Geotécnica

A investigação geotécnica desempenha um papel crucial na análise de estabilidade de taludes de barragens, fornecendo informações essenciais sobre as características do subsolo e os parâmetros geotécnicos dos materiais (Schnaid, 2000). As sondagens, como as sondagens a percussão (SPT) e as sondagens rotativas, permitem a coleta de amostras de solo e rocha, a identificação dos diferentes horizontes e a determinação do nível do lençol freático (Clayton et al., 1995). Os ensaios de laboratório, realizados em amostras representativas, fornecem dados sobre a granulometria, o índice de plasticidade, a resistência ao cisalhamento, a permeabilidade e a compressibilidade dos materiais (Head, 1994).

Os ensaios de campo, como o ensaio de penetração de cone (CPT) e o ensaio de palheta (Vane Test), complementam os ensaios de laboratório, permitindo a determinação in situ de parâmetros geotécnicos e a avaliação da resistência do solo em condições reais (Lunne et al., 1997). A investigação geotécnica deve ser planejada e executada de acordo com as normas técnicas e as boas práticas de engenharia, garantindo a qualidade e a

representatividade dos dados coletados. A interpretação dos resultados da investigação geotécnica deve ser realizada por profissionais experientes, considerando as características do local, a geologia regional e os objetivos da análise de estabilidade.

A investigação geotécnica também pode incluir métodos geofísicos, como a sísmica de refração e a eletrorresistividade, que permitem obter informações sobre a estrutura do subsolo de forma não invasiva (McCann & Forster, 1990). Esses métodos são particularmente úteis para identificar zonas de fraqueza, descontinuidades e variações na profundidade do substrato rochoso. A utilização de técnicas de sensoriamento remoto, como imagens aéreas e de satélite, também pode auxiliar na caracterização do terreno e na identificação de feições geológicas relevantes.

2.6 Monitoramento de Taludes

O monitoramento de taludes de barragens é uma ferramenta essencial para garantir a segurança da estrutura ao longo de sua vida útil (Dunnicliff, 1988). A instrumentação geotécnica consiste na instalação de instrumentos no interior do talude para medir diferentes parâmetros, como deslocamentos, pressões neutras e deformações (Ooi et al., 2009). Piezômetros são utilizados para monitorar o nível d'água e as pressões neutras no talude, fornecendo informações sobre o regime de fluxo e a saturação do solo (Dunnicliff, 1993). Inclínômetros medem a inclinação do talude ao longo de sua profundidade, permitindo a detecção de movimentos e deformações (Stark & Eid, 1994). Extensômetros, por sua vez, medem as deformações lineares no talude, indicando a magnitude e a taxa de deslocamento (Franklin & Dusseault, 1989).

O levantamento topográfico, realizado periodicamente, permite detectar movimentos e deformações na superfície do talude (Chrzanowski et al., 1986). Através de medidas precisas de coordenadas, é possível identificar deslocamentos horizontais e verticais, bem como alterações na geometria do talude. O monitoramento topográfico pode ser complementado por técnicas de sensoriamento remoto, como o LiDAR (Light Detection and Ranging) e a fotogrametria, que permitem a obtenção de modelos tridimensionais da superfície do talude e a detecção de movimentos com alta precisão.

A análise dos dados de monitoramento, combinada com a análise de estabilidade e as inspeções visuais, permite avaliar a segurança do talude e tomar medidas preventivas ou corretivas, se necessário. O monitoramento deve ser realizado de forma contínua, especialmente durante períodos críticos, como o enchimento do reservatório, chuvas intensas e eventos sísmicos. Um sistema de alerta, baseado nos dados de monitoramento,

pode ser implementado para avisar os responsáveis em caso de deslocamentos ou deformações anormais, permitindo a tomada de medidas emergenciais para garantir a segurança da barragem.

2.7 Medidas de Segurança

A implementação de medidas de segurança adequadas é crucial para garantir a estabilidade e a segurança de taludes de barragens, minimizando os riscos de ruptura e protegendo vidas e propriedades (Kramer & Twiss, 1988). A drenagem, um dos métodos mais eficazes para aumentar a estabilidade de taludes, visa reduzir as pressões neutras e aumentar a resistência do solo (Terzaghi, 1943). Drenos horizontais, instalados no interior do talude, captam a água subterrânea e a conduzem para fora do maciço, diminuindo o nível d'água e as pressões neutras. Drenos verticais, por sua vez, aceleram a dissipação de poropressão gerada durante o enchimento do reservatório ou em eventos de chuva.

O revestimento vegetal, além de ter um apelo estético, contribui para a estabilização de taludes ao controlar a erosão superficial e aumentar a coesão do solo (Greenway, 1987). As raízes das plantas atuam como elementos de reforço, aumentando a resistência ao cisalhamento e prevenindo o desprendimento de partículas. A escolha das espécies vegetais deve considerar as condições climáticas, o tipo de solo e a inclinação do talude. Em alguns casos, pode ser necessário o uso de biomantas ou geotêxteis para auxiliar no estabelecimento da vegetação e proteger o solo da erosão. Em relação a esse sistema protetivo a ANA faz a seguinte observação:

“No caso de taludes em solo, a necessidade de proteção superficial deve ser definida em função das características de erodibilidade dos materiais do terreno. O projeto pode ser elaborado com base na experiência com materiais e obras similares, tendo-se em conta, além do material, a inclinação do talude e as possibilidades de manutenção. Deve ser dada preferência aos revestimentos com cobertura vegetal, desde que os taludes de face tenham inclinação mais suave ou igual a 1, 5H:1V. Para taludes mais íngremes, deverá ter cuidados especiais na fixação da proteção vegetal. As espécies selecionadas devem ser aquelas com comprovado sucesso na região. O estudo deve levar em conta a fertilidade do solo natural e a necessidade de implantação de camada de solo orgânico. Sempre que possível os métodos escolhidos devem ter em vista a minimização dos serviços de manutenção, durante a operação do aproveitamento. (ANA, 2014)

A construção de estruturas de contenção, como muros de arrimo, gabiões e cortinas atirantadas, fornece suporte adicional ao talude, aumentando a sua resistência e prevenindo movimentos de massa (Bowles, 1996). Muros de arrimo, construídos em concreto armado ou alvenaria, são utilizados para conter taludes de pequena a média

altura, enquanto gabiões, constituídos por gaiolas metálicas preenchidas com pedras, são mais flexíveis e adaptáveis a diferentes condições de terreno. Cortinas atirantadas, compostas por tirantes ancorados no terreno e uma face de concreto projetado, são utilizadas em taludes de grande altura e com solos de baixa resistência.

A escolha das medidas de segurança mais adequadas deve ser baseada na análise de estabilidade, nas condições do local, nos riscos envolvidos e nos custos de implementação. Em alguns casos, pode ser necessário combinar diferentes técnicas para obter o nível de segurança desejado.

2.8 Influência das Condições Hidrológicas

As condições hidrológicas exercem uma influência significativa na estabilidade de taludes de barragens, sendo fundamental o seu controle para garantir a segurança da estrutura (Lopes, 1988). A elevação do nível do reservatório, inerente à operação da barragem, aumenta as pressões neutras no interior do talude, reduzindo a tensão efetiva e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento do solo (Casagrande, 1961). Esse efeito é particularmente crítico em solos argilosos, que apresentam baixa permeabilidade e demoram a dissipar a poropressão gerada pelo aumento do nível d'água.

A infiltração de água no maciço, proveniente de chuvas, vazamentos ou percolação através da fundação, também pode comprometer a estabilidade do talude (Sherard et al., 1963). A água infiltrada satura o solo, aumentando o seu peso específico e diminuindo a sua resistência ao cisalhamento. Em solos argilosos, a variação de umidade pode causar expansão e contração, levando à formação de fissuras e à perda de coesão (Mitchell, 1976). Em solos arenosos, a infiltração de água pode gerar erosão interna, transportando partículas finas e criando vazios no interior do maciço, o que pode levar ao colapso do talude.

Lopes (1988) destaca a importância do controle do fluxo de água para garantir a segurança do talude, por meio de sistemas de drenagem eficientes e medidas de impermeabilização. Sistemas de drenagem, como drenos horizontais, drenos verticais e filtros, interceptam e conduzem a água infiltrada para fora do talude, reduzindo as pressões neutras e a saturação do solo. Medidas de impermeabilização, como a construção de núcleos impermeáveis, tapetes argilosos e membranas geotécnicas, impedem a percolação de água através do talude, protegendo o maciço da saturação e da erosão interna.

O monitoramento das condições hidrológicas, incluindo o nível do reservatório, a precipitação e a vazão dos drenos, é fundamental para avaliar a influência da água na estabilidade do talude e tomar medidas preventivas ou corretivas, se necessário. A modelagem numérica do fluxo de água no talude, utilizando softwares específicos, pode auxiliar na previsão do comportamento hidrológico e na otimização do sistema de drenagem.

2.9 Análise de Risco

A análise de risco é uma ferramenta essencial para a gestão da segurança de barragens, permitindo a avaliação sistemática dos perigos e a tomada de decisões informadas sobre as medidas de mitigação (USACE, 1999). No caso de taludes de barragens, os modos de falha podem incluir deslizamentos, quedas de blocos, erosão e liquefação (ICOLD, 2001). A probabilidade de ocorrência de cada modo de falha depende de fatores como a estabilidade do talude, as condições hidrológicas, as solicitações externas e a ocorrência de eventos extremos, como sismos e chuvas intensas.

A avaliação das consequências de uma eventual ruptura do talude considera os danos potenciais a jusante da barragem, incluindo perdas de vidas humanas, danos materiais e impactos ambientais (Foster et al., 2000). A análise de risco permite quantificar o risco associado à instabilidade do talude, expressando-o em termos de probabilidade de ocorrência e magnitude das consequências. Essa quantificação do risco auxilia na priorização de medidas de mitigação, na alocação de recursos e na tomada de decisões sobre a operação e a manutenção da barragem.

A análise de risco deve ser realizada de forma interativa, considerando as incertezas inerentes aos dados e aos modelos utilizados (Morgan & Henrion, 1990). A atualização da análise de risco, com base em novas informações e no monitoramento do talude, permite acompanhar a evolução do risco ao longo do tempo e ajustar as medidas de segurança conforme necessário. A comunicação dos resultados da análise de risco aos stakeholders, incluindo a população a jusante, os órgãos reguladores e os gestores da barragem, é fundamental para garantir a transparência e a participação no processo de tomada de decisão.

2.10 Fatores de Segurança

O fator de segurança é um índice amplamente utilizado na engenharia geotécnica para expressar a relação entre as forças resistentes e as forças solicitantes em um talude

(Silva, 2006). Um fator de segurança maior que 1 indica que as forças resistentes superam as forças solicitantes, garantindo a estabilidade do talude. Por outro lado, um fator de segurança menor que 1 indica que as forças solicitantes excedem as forças resistentes, o que implica em risco de ruptura (Terzaghi & Peck, 1967). A determinação do fator de segurança adequado depende do nível de risco aceitável, das consequências de uma eventual ruptura e das incertezas envolvidas na análise (Bishop, 1955). Em geral, fatores de segurança mais elevados são exigidos para barragens de grande porte, com alto risco de perdas humanas e impactos ambientais significativos.

A determinação do fator de segurança é realizada por meio de métodos de análise de estabilidade, como os métodos de equilíbrio limite e o método dos elementos finitos (Duncan, 1996). Esses métodos calculam o fator de segurança para diferentes superfícies de ruptura potenciais, sendo o fator de segurança mínimo o valor crítico que define a estabilidade do talude. É importante considerar que o fator de segurança não é um valor absoluto, mas sim um indicador que deve ser interpretado com cautela, considerando as limitações dos métodos de análise e as incertezas inerentes aos parâmetros geotécnicos (Harr, 1987).

De acordo com a NBR 11682 (2009, p.17) normalmente análises de segurança desconsidera as deformações que ocorrem naturalmente no talude ou na encosta e que o valor de fator da segurança (FS) é diretamente relacionado com a resistência ao cisalhamento do material do talude. Ou seja, fatores de segurança maiores é bom indicativo da segurança de um talude.

De acordo com a NBR 11682 (2009, p.17) o valor de FS “pode variar em função da situação potencial de ruptura do talude, no que diz respeito ao perigo de perda de vidas humanas e à possibilidade de danos materiais e de danos ao meio ambiente.” É importante salientar que o cálculo pode ser efetuado levando em consideração as situações atuais e futuras, previstas ao longo da vida útil da estrutura projetada.

O intuito do fator de segurança é cobrir as incertezas decorrentes das etapas de projeto e execução, ou seja, devidos as simplificações no modelo matemático utilizado para dimensionar a estrutura e também por causa de falhas e omissões na fase de execução é necessário adotar um fator de segurança para prevenir a obra de uma futura ruptura ou inutilização devido a uma deformação excessiva.

A NBR 11682 com o objetivo de orientar o engenheiro responsável pelo projeto a escolher um fator de segurança conforme o nível de risco do empreendimento possui as

seguintes tabelas para a consulta. A Tabela 1 se refere a possibilidade de perdas humanas e a tabela 2 diz respeito aos danos ambientais e materiais.

Tabela 1 – Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas (ABNT NBR 11.682/2009, P. 18)

Nível de segurança	Crítérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas. Ferrovias e rodovias com tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

Tabela 2 – Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais (ABNT NBR 11.682/2009, P. 18)

Nível de segurança	Crítérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragem de rejeito e fabricas de produtos tóxicos.
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzido.

“O enquadramento nos casos previstos nas Tabelas 1 e 2 deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico, sempre em comum acordo com o contratante do projeto e atendendo às exigências dos órgãos públicos competentes. O fator de segurança mínimo a ser adotado no projeto, levando-se em conta os níveis de segurança preconizados nas Tabelas 1 e 2, deve ser estipulado de acordo com a Tabela 3.

Os fatores de segurança indicados na Tabela 3 referem-se às análises de estabilidade interna e externa do maciço, sendo independentes de outros fatores de segurança recomendados por normas de dimensionamento dos elementos estruturais de obras de contenção, como,

por exemplo, do concreto armado e de tirantes injetados no terreno.

Entende-se por estabilidade interna aquela que envolve superfícies potenciais de escorregamento localizadas, a serem estabilizadas pela estrutura de contenção, como no caso de uma cunha de empuxo ativo. Por outro lado, a estabilidade externa é aquela que envolve superfícies de escorregamento globais. No caso de estruturas de arrimo reforçadas por tirantes, tiras, grampos ou geossintéticos, por exemplo, as superfícies localizadas interceptam os elementos de reforço (estabilidade interna), enquanto que as superfícies globais não interceptam estes elementos (estabilidade externa). (ABNT NBR 11682, p.18)”

Tabela 3 — Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais \ Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Alto	Médio	Baixo
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

NOTA 1 No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10 %. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico indicado no Anexo D.

NOTA 2 No caso de estabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , ϕ , c , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3 Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

Fonte: ABNT NBR -11.682, P. 18

A escolha do fator de segurança adequado deve levar em conta as normas técnicas, as recomendações de órgãos reguladores e a experiência profissional. A NBR 11682 (ABNT, 2009), que trata da estabilidade de taludes, recomenda um fator de segurança mínimo de 1,5 para a maioria dos casos, podendo ser maior para situações de alto risco. É importante ressaltar que o fator de segurança não deve ser utilizado como único critério para avaliar a segurança de um talude, devendo ser complementado por outras análises, como a análise de risco e o monitoramento do talude.

O fator de segurança pode ser influenciado por diversos fatores, como a geometria do talude, as propriedades geotécnicas dos materiais, as condições hidrológicas e as solicitações externas (Fredlund & Rahardjo, 1993). Aumentar a resistência ao cisalhamento do solo, reduzir as pressões neutras e diminuir a inclinação do talude são algumas das medidas que podem contribuir para aumentar o fator de segurança e garantir a estabilidade da estrutura.

2.11 Manutenção de Taludes

A manutenção de taludes de barragens é uma atividade fundamental para garantir a segurança da estrutura ao longo de sua vida útil, prevenindo a deterioração dos materiais, a ocorrência de erosão e o desenvolvimento de instabilidades (Abrahão, 2002). A inspeção periódica dos taludes, realizada por profissionais qualificados, permite identificar problemas como erosão superficial, surgimento de trincas, deformações, vazamentos e obstrução de drenos (ICOLD, 1988). A frequência das inspeções deve ser definida em função do tipo de barragem, das condições do talude e do histórico de ocorrências.

Falar sobre instrumentos que devem ser monitorados

A manutenção preventiva, realizada de forma regular, visa evitar a ocorrência de problemas e garantir o bom funcionamento dos sistemas de segurança. As atividades de manutenção preventiva incluem a limpeza de drenos, a reparação de revestimentos, o controle da vegetação e a verificação da instrumentação geotécnica (ICOLD, 2012). A limpeza de drenos garante o livre escoamento da água, evitando o acúmulo de pressões neutras e a saturação do solo. A reparação de revestimentos, como a concretagem de taludes e a aplicação de manta geotêxtil, previne a erosão superficial e protege o solo da ação do intemperismo.

O controle da vegetação, por meio de roçada, poda e remoção de árvores, evita o desenvolvimento de raízes que possam comprometer a integridade do talude e aumentar a infiltração de água. A verificação da instrumentação geotécnica, como piezômetros, inclinômetros e extensômetros, permite acompanhar o comportamento do talude e identificar possíveis anomalias. A manutenção corretiva, por sua vez, é realizada em casos de problemas mais graves, como deslizamentos, deformações excessivas ou vazamentos significativos. As medidas de manutenção corretiva visam restaurar a estabilidade do talude e prevenir futuras falhas, podendo incluir a remoção de material instável, a execução de drenagem, a construção de estruturas de contenção e a impermeabilização do talude.

A elaboração de um bom plano de manutenção, que defina as atividades a serem realizadas, a frequência das inspeções e os responsáveis pela execução, é fundamental para garantir a eficácia da manutenção e a segurança da barragem. O plano de manutenção deve ser atualizado periodicamente, com base nos resultados das inspeções, nos dados de monitoramento e nas análises de risco.

3 METODOLOGIA

Com a informação prévia sobre processos erosivos no talude da barragem, foram realizadas visitas in loco para verificação e confirmação dos danos existentes. Durante essas inspeções, foi observado que além, das erosões pontuais, ocorreram rupturas mais severas, ocasionadas, principalmente, pela queda de uma árvore de grande porte e de outra localizada nas proximidades do extravasor. Essas ocorrências resultaram danos significativos e causaram rupturas preocupantes no corpo do talude de jusante, deixando praticamente sem inclinação em determinados pontos, além de sinais de percolação, evidenciados por manchas excessivas de umidade, presença de óxidos de ferro nos taludes da jusante, muitas árvores de grandes portes no talude, foi constatada a existência de manchas de inundação que indicavam o galgamento (transbordamento da lamina de água sobre a crista da barragem).

Foi averiguada a inexistência de sistemas de monitoramento como piezômetros (para monitoramento das pressões neutras), sistema de drenagem, filtros, marcos topográficos entre outros.

Foram aferidas e determinados as dimensões do barramento e do reservatório com a batimetria e o maior nível do reservatório. Também foi identificado sinais de recentes transbordamentos por meio de marcações e confirmado por entrevista aos moradores próximos que relataram reincidências. De forma paliativa, buscando evitar possível ruptura e suas consequências, o responsável pela a área realizou o lançamento de blocos de rochas nos pontos críticos de erosão, frente ao extravasor.

A Figura 3.1 ilustra os principais pontos de erosão observados, apresentando:

1 e 2 (a), o registro da árvore antes da erosão (b) no ponto 1 frente ao extravasor (c), lançamento de blocos de rocha para conter a erosão (d) e retirada de amostras para análise no ponto 1 (e).



Figura 3.1 pontos de erosão 1 e 2 (a), o registro da árvore antes da erosão (b) no ponto 1 frente ao extravasor (c), lançamento de blocos de rocha para conter a erosão (d) e retirada de amostras para análise no ponto 1 (e). Fonte: Pereira et al. (2024)

3.1 Levantamento de dimensões e informações

Foram medições das dimensões gerais do barramento, inclinação dos taludes, levantamento batimétrico do reservatório, bem como a topografia da região a jusante. A partir desses dados, foi possível a elaboração do modelo geométrico representativo da barragem. Esse modelo serviu de base de informação foi utilizado para a realização da modelagem computacional em software e determinação do fator de segurança do talude na seção mais comprometida e na condição mais crítica.

Para a obtenção dos parâmetros geotécnicos dos materiais que compõe a estrutura do barramento, foram coletadas amostras indeformadas de solo para ensaio de caracterização física e mecânica. Nos locais próximos aos pontos erodidos, mas distantes o suficiente para não comprometer ainda mais a fragilidade do talude, com o cuidado para não abrir grandes espaços. A Figura 3.2 apresenta a vista aérea de parte do Lago Norte evidenciando o talude e as encostas cobertas por árvores de grande porte. A Figura 3.3 ilustra a execução da batimetria do lago.



Figura 3.2 – Apresenta vista aérea de parte do lago norte e do talude com as encostas cobertas por árvores de grande porte. Fonte: Pereira et al. (2024)



Figura 3.3 Execução da batimetria do Lago Norte.
Fonte: Pereira (2024)

Foram levantados in loco as dimensões do talude do Lago Norte de Palmas; nesse levantamento foram feitas coletas de dimensões tais como: largura, altura a montante em relação a lâmina d'água do reservatório e a jusante em relação a topografia do terreno. Também foram medidos a cada 20 metros o comprimento longitudinal que vai do ponto A até o ponto G e sessões transversal do talude.

O talude possui sessões transversais variáveis e devido ao bom senso e as boas praticas de engenharia a análise de estabilidade será efetuada nas sessões transversais de menor largura. Esse critério foi adotado partindo da premissa de que a resistência possui uma relação direta com a largura do elemento estrutural que nesse caso é o talude. É importante salientar que nem sempre o elemento mais esbelto irá se romper primeiro, mas neste talude com certeza é um ponto frágil que merece se analisado de forma minuciosa. Durante a fase de coleta de dados constatou que entre os pontos F e G a largura da sessão transversal é menor e foi justamente nesse local que foi encontrado a maioria das

patologias que contribuíram para a ruptura do talude. A figura 3.4 a apresenta o mapa do talude em formato de croqui.

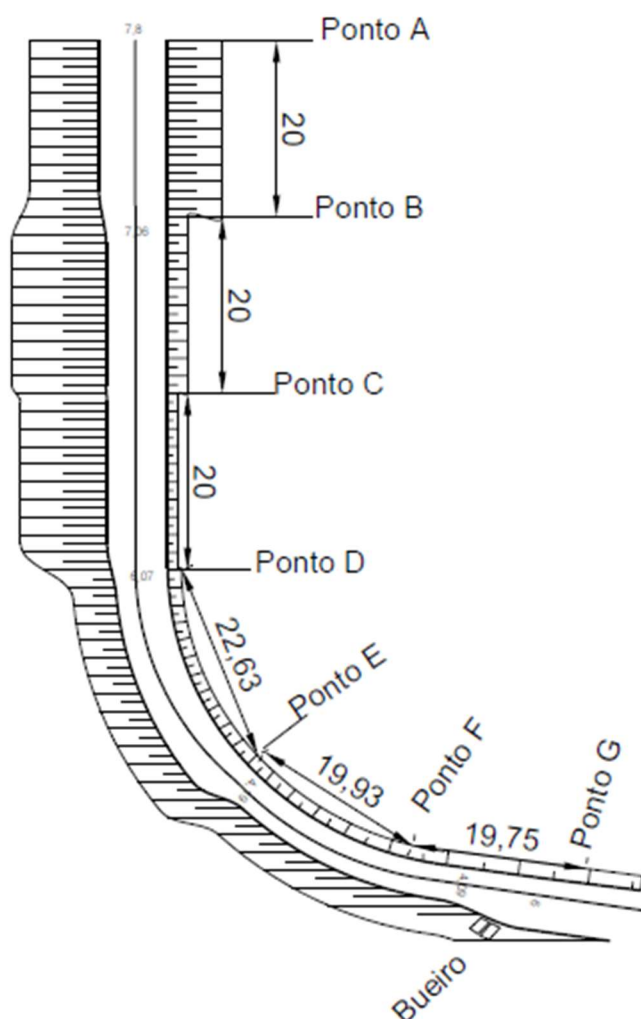


Figura 3.4 Croqui do talude do Lago Norte de Palmas

Fonte: Pereira (2024)

3.2 Coleta de amostras para ensaios e planejamento

Para a determinação da estabilidade dos taludes da barragem, foram realizadas coletas de amostras de solos, conforme ilustrados nas Figura 3.4 e 3.5. foram então levadas para ensaios laboratoriais, onde foram realizados processos de análise e determinação conclusiva para a realização da modelagem numérica do barramento.



Figura 3.5 – Mostra como foi feito a coleta do corpo de prova para análise em laboratório escavando o talude com cuidado para retirada de amostra indeformada para estudo em laboratório. Fonte: Pereira et al. (2024)



Figura 3.6 – Realização de ensaio, caracterização do solo no laboratório IFTO.
Fonte: Pereira et al. (2024)

Foram realizadas escavações manuais criteriosas, e também cravação de cilindro metálico, afim de garantir que as amostras indeformadas não sofressem amolgamento, foram retiradas cuidadosamente as amostras para não causar avaria no talude da barragem. O material coletado foi encaminhado ao laboratório de Mecânica de Solos do Instituto Federal do Tocantins – Campus Palmas, onde foram realizados os ensaios para a caracterização do solo. Tais como: o teor de umidade, análise granulometria, limites de consistência e peso específico das partículas sólidas. As Figuras 3.6 e 3.7. ilustram as amostras de solo durante a preparação no laboratório do IFTO Campus Palmas, para os

ensaios teor de umidade e Casa Grande que permite determinação do limite de liquidez, que indica o menor teor e umidade com que uma amostra de solos pode fluir.



Figura 3.7 – Teor de umidade – realizando ensaio de teor umidade no laboratório do IFTO.
Fonte: Pereira et al. (2024)



Figura 3.8 – Ensaio de limite de Liquidez com aparelho Casagrande, permite determinação do menor teor e umidade com que uma amostra de solos pode fluir.
Fonte: Pereira et al. (2024)

3.3 Verificação do Enquadramento no PNSB

A barragem foi avaliada com o objetivo de verificar seu enquadramento nos critérios da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei n.º 12.334, de 20 de setembro de 2010, em seu art. 9º estabelece que as inspeções de segurança regulares e especiais que terão sua periodicidade, qualificação da equipe responsável, conteúdo mínimo e nível de detalhamento definidos pelo órgão fiscalizador, em função da categoria do risco e do dano potencial associado a barragem.

3.4 Método de Análise de Estabilidade e Determinação do Fator de Segurança (FS) com Uso de Software de Modelagem Numérica

Com as amostras indeformadas, coletadas cuidadosamente em campo, foram submetidas a ensaios de cisalhamento direto, realizado em parceria com o laboratório em da empresa Técnica Engenharia, que prestou suporte técnico em seu laboratório para realização dos ensaios. Onde foram preparados os corpos de prova a serem ensaiados de uma amostra indeformada cravada e esculpida no molde da caixa de cisalhamento, após pesagem, foi transposta para a caixa bipartida dotada de placas dentadas e perfuradas, pedras porosas de topo e base e quepe para transmissão de carga. Durante o preparo observou-se que algumas amostras cisalharam antes do ensaio devido ao estado crítico do talude em campo, associado a condição de coleta, que tentará preservar ao máximo o talude em colapso e possivelmente já estar em processos de desconfinamento e cisalhamento. Por último, foi realizada a modelagem numérica da barragem para determinar a estabilidade do talude da barragem, com parâmetros de resistência obtidos com os ensaios laboratoriais. A Figura 3.8 e 3.9 – ilustra o processo de coletadas amostras indeformadas do solo em cilindro de metal e encaminhada ao laboratório para a realização dos ensaios de cisalhamento.



Figura 3.9 – Mostra à amostra indeformada retirada em cilindro metálico para moldagem do corpo de prova em molde de caixa cisalhante para ensaio de cisalhamento.
Fonte: Pereira et al. (2024)



Figura 3.10 – Mostra a imagem de equipamento para cisalhamento direto do laboratório da Empresa Técnica Engenharia. Fonte: Pereira et al. (2024)

4 RESULTADOS E DISCURSÕES

4.1 Influência da Ausência de Mecanismos de Proteção

O Barramento Lago Norte foi implementado sem qualquer critério técnico, ou seja, não houve estudo geotécnico projetos e muito menos laudos técnicos que subsidiassem a definição de soluções adequada de engenharia e técnicas construtivas apropriadas as especificidades inerentes as características do solo e ao uso da barragem. A finalidade desse reservatório restringe-se ao armazenamento de água para uso diversos, exceto para consumo humano.

A ausência de um sistema de drenagem interna foi relevante e determinante para a ruptura. Devido a saturação do talude ocasionada pela inexistência de filtros e qualquer mecanismo de controle da infiltração.

A saturação do talude aumentou de forma considerável a poropressão e, consequentemente diminuiu a capacidade resistente da estrutura. Esta, condição foi confirmada na obtenção de coeficientes de segurança inferiores a 1 durante a modelagem numérica efetuada no software Geostudio. Esses coeficientes, abaixo do recomendado nas normas técnicas, são o desdobramento mais notável do aumento do poropressão e da diminuição do atrito entre as partículas que compõe o solo. Em outras palavras, essa redução do atrito, acarretada pela ocupação dos poros exclusivamente pela água, desagregou o maciço e possibilitou a ocorrência do deslizamento e, consequentemente, da ruptura.

Em relação à porosidade e a permeabilidade, é possível que durante a construção do barramento não tenha sido realizado nenhum serviço de compactação e de adensamento da fundação e de parte do corpo da barragem, restando a compactação da estrada de terra sendo a única executada, que deva ter promovido a redução dos vazios e, consequentemente, ampliação da resistência do talude. Em outras palavras, a obra consistiu apenas na colocação de material de aterro sobre o solo natural para formar o talude, sem nenhum tratamento para melhorar as propriedades físicas e mecânicas, exceto na estrada vicinal sobre esta.

Além da falta de compactação e outros serviços básicos de engenharia, o talude estava exposto ao intemperismo sem nenhuma proteção. Na construção de barragens que sequer às normas técnicas e as boas práticas de engenharia, é bastante corriqueiro a implantação de gramíneas nos taludes para evitar a erosão.

O solo que constitui o talude foi classificado como arenoso-siltoso após a realização do ensaio de caracterização, ou seja, é bastante suscetível a erosão devido à baixa coesão que os solos arenosos possuem. Uma barragem que é feita com esse material requer um sistema eficiente de proteção contra a erosão para evitar o carreamento do material do talude. Na barragem do Lago Norte, não existia nenhuma vegetação para diminuir impacto desse processo de degradação do solo, ou seja, a água que caía durante as precipitações não contava com gramíneas e outras vegetações de pequeno porte para amortecer sua queda e, conseqüentemente, reduzir a percolação superficial.

A combinação de solo arenoso com ausência de camada de vegetação de pequeno porte foi decisiva para intensificação do processo erosivo, e isso constatado durante a visita à barragem do Lago Norte para efetuar a coleta das amostras de solo para a realização dos ensaios. No dia da visita, foi possível observar a existência de inúmeras ranhuras (pequenos canais formados pela erosão hídrica) na estrutura da barragem. O carreamento do material por intermédio da erosão é lesivo porque diminuem o peso próprio da estrutura (talude) e, conseqüentemente, o talude terá menos capacidade de suportar os esforços provenientes do acúmulo da água.

Em barragens de terra, a infiltração é inevitável, “e a percolação só se tornará um problema se isto puser o aterro em perigo, quer provocando erosão na área de jusante, quer causando o alagamento da barragem e assim afetar a sua estabilidade”.

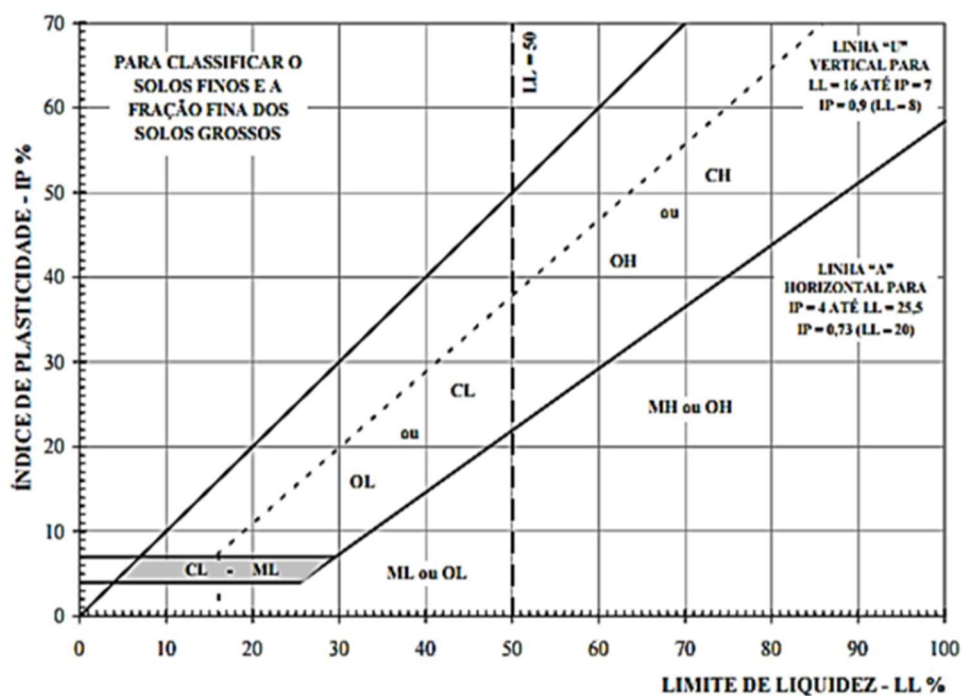
No processo erosivo de uma barragem, é necessário se precaver do escoamento de água suja, porque esta pode ser nociva ao talude a jusante, pois, conforme vem ocorrendo a erosão dos materiais finos e, por conseguinte, o seu carreamento para fora do talude, podem acarretar piping (erosão interna) ou abatimento da estrutura.

As boas práticas construtivas de taludes proíbem a existência de árvore de grande porte sobre os taludes, pois esta aumenta o peso próprio da estrutura, sobrecarregando-as e, por sua vez, as raízes penetram em grandes profundidades, abrindo poros e fissuras que diminui a permeabilidade da estrutura e deixa-as mais vulneráveis a infiltração da água em seus vazios. Quando morrem e as raízes se decompõem, os espaços ocupados anteriormente por elas ficam abertos, facilitando a erosão interna da estrutura.

4.2 Ensaio de Granulometria e Limite de Consistência

Os ensaios de granulometria e limites de consistência determinaram que o material do barramento é um solo areno-siltoso, classificado com a carta de plasticidade, onde o

limite de liquidez foi igual a 35% e o índice de plasticidade igual a zero. Também foi determinado o teor de umidade natural igual a 33%, o peso específico dos sólidos de 2,67 g/cm³, obtido pelos ensaios com o picnômetro, e o peso aparente natural de 1,9 g/cm³. Conforme segui figuras, tabelas e gráficos:



Figurra 4.1 – Apresenta tabela de limite de liquidez encarta de plasticidade do solo. Fonte: (Braja, das 2011)

 INSTITUTO FEDERAL Tocantins			Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas SOLO 1			 INSTITUTO FEDERAL Tocantins			Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas SOLO 2		
Cápsula		Nº	C1			Cápsula		Nº	C4		
PESOS	cápsula+solo+água		72.9			PESOS	cápsula+solo+água		73.6		
	cápsula+solo		59.1				cápsula+solo		60.9		
	Cápsula		17.2				Cápsula		20.2		
	Água		13.8				Água		12.7		
	solo seco		41.9				solo seco		40.7		
Umidade		%	75%			Umidade		%	76%		
Umidade média		%				Umidade média		%			
Cápsula		Nº	C2			Cápsula		Nº	C5		
PESOS	cápsula+solo+água		71.4			PESOS	cápsula+solo+água		70.8		
	cápsula+solo		59.2				cápsula+solo		58.9		
	Cápsula		22.1				Cápsula		20.2		
	Água		12.2				Água		11.9		
	solo seco		37.1				solo seco		38.7		
Umidade		%	75%			Umidade		%	76%		
Umidade média		%				Umidade média		%			
Cápsula		Nº	C3			Cápsula		Nº	C6		
PESOS	cápsula+solo+água		67.5			PESOS	cápsula+solo+água		72.4		
	cápsula+solo		56.1				cápsula+solo		60.2		
	Cápsula		20.9				Cápsula		21.4		
	Água		11.4				Água		12.2		
	solo seco		35.2				solo seco		38.8		
Umidade		%	76%			Umidade		%	76%		
Umidade média		%				Umidade média		%			
INTERESSADO: ARTIGO BARRAGEM						INTERESSADO: ARTIGO BARRAGEM					
SOLICITAÇÃO:						SOLICITAÇÃO:					
DADOS DA OBRA:						DADOS DA OBRA:					

Figura 4.2 – Tabela ensaio Teor de Umidade. Fonte: Pereira et al. (2024)

ENSAIO DE GRANULOMETRIA - SOLO 2 (AMOSTRA 500g)					
ASTM USS	Abertura da Peneira (mm)	Massa do solo retido em cada peneira (g)	Percentual do solo retido	Porcetagem acumulada	Porcetagem do solo que passa na peneira
"3/4"		15.3	3%	3%	97%
"3/8"		29.3	6%	9%	91%
4		26.6	5%	14%	86%
10		50.2	10%	24%	76%
40		173.2	35%	59%	41%
80		149.4	30%	89%	11%
200		44.1	9%	98%	2%
FUNDO		11.9	2%	100%	0%
		500	100%		
	Massa total da amostra:	500			

Figura 4.3 – Tabela ensaio de Granulometria de solos 2. Fonte: Pereira et al. (2024)

Determinação da densidade das partículas sólidas - picnômetro - Amostra 1					
n° ensaio	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	p2 - p1
	Peso pic	Peso pic + solo seco	Peso pic cheio + solo	Peso pic cheio	(p4-p1) - (p3-p2)
1	130.1	200.1	665.5	620.5	2.800
2	97.9	167.9	627.8	585.1	2.564
3	128.6	198.6	667	623.3	2.662
				média geral	2.68
* a diferença entre duas não pode diferir mais que 0,009g					
				média dois ensaios com diferença menor que 0,009g	
Determinação da densidade das partículas sólidas - picnômetro Amostra 2					
n° ensaio	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	p2 - p1
	Peso pic	Peso pic + solo seco	Peso pic cheio + solo	Peso pic cheio	(p4-p1) - (p3-p2)
1	130.1	200.1	662.8	619	2.672
2	97.8	167.8	627	584.4	2.555
3	128.6	198.6	667.1	623.9	2.612
				média geral	2.61
* a diferença entre duas não pode diferir mais que 0,009g					
				média dois ensaios com diferença menor que 0,009g	
Determinação da densidade das partículas sólidas - picnômetro					
n° ensaio	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	p2 - p1
	Peso pic	Peso pic + solo seco	Peso pic cheio + solo	Peso pic cheio	(p4-p1) - (p3-p2)
1	124.06	199.02	656.47	606.7	2.976
2	124.11	198.78	656.2	606.23	3.023
3	103.11	178.05	641.97	593.54	2.827
4	102.92	177.89	645.57	594.38	3.153
5	29.13	40.19	93.204	85.801	3.024
				média geral	3.00
* a diferença entre duas não pode diferir mais que 0,009g					
				média dois ensaios com diferença menor que 0,009g	3.024

Figura 4.4 – Tabela ensaio de Determinação da densidade das partículas sólidas das amostras 1 e 2 e a média dos resultados. Fonte: Pereira et al. (2024)

DNER	NBR 7181	dif. Dim	Peneira n°	Φ peneira (m)	massa retirada (g)	% retida em cada peneira	% retida acumulada	% que passa em cada peneira
50	50		2"	50	0	0.00	0.00	100.00
38	38		1 1/2"	38	0	0.00	0.00	100.00
25	25		1"	25	0	0.00	0.00	100.00
19	19		3/4"	19	0	0.00	0.00	100.00
9.5	9.5		3/8"	9.5	0	0.00	0.00	100.00
4.8	4.8	4.75	4	4.8	0	0.00	0.00	100.00
2	2		10	2	35.9	5.88	5.88	94.12
1.2	1.2	1.18	16 ?	1.2	40	6.55	12.42	87.58
0.6	0.6		30	0.6	20	3.27	15.70	84.30
0.42	0.42	0.425	40	0.425	150	24.55	40.25	59.75
0.3	0.25		60	0.25	200	32.73	72.98	27.02
0.15	0.15	0.18	80 #100=0,15	0.15	82.4	13.49	86.46	13.54
0.075	0.075		200	0.075	82.4	13.49	99.95	0.05
			fundo	< 0.075	0.3	0.05	86.51	13.49
				Σ	611	100.00		

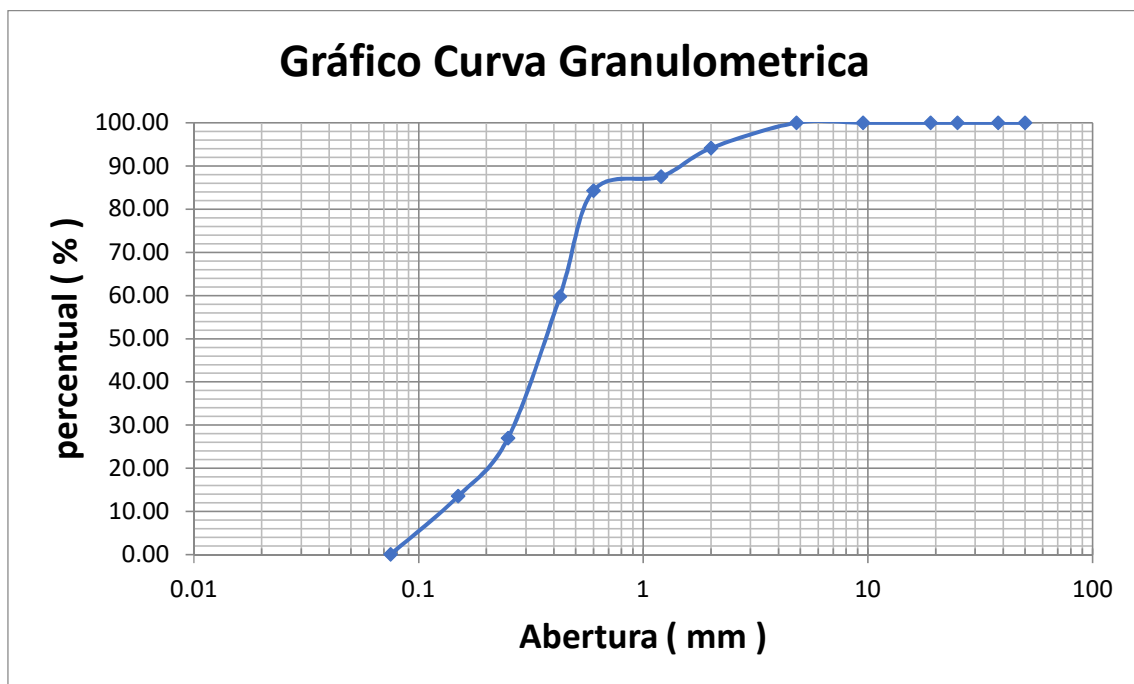


Figura 4.5 – Tabela e gráfico do ensaio Curva de Granulométrica dos solos. Fonte: Pereira et al. (2024)

Com as amostras indeformadas, foram realizados os ensaios de cisalhamento direto em laboratório, em parceria com a empresa Técnica Engenharia, que deu todo o suporte em seu laboratório, onde preparamos os corpos de provas a ser ensaiados, a partir de uma amostra indeformada cravada e esculpida no molde da caixa de cisalhamento. Após pesagem, transposta para caixa bipartida, dotada de placas dentadas e perfuradas, pedras porosas de topo e base, e quepe para transmissão de carga.

Algumas amostras cisalharam antes do ensaio, em função da forma de coleta, que tentou preservar ao máximo o talude em colapso e, possivelmente, já estavam em processos de desconfinamento e cisalhamento. Os resultados obtidos indicaram um ângulo de atrito de 24,36° e uma coesão de 0,12 kPa. As Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5,

respectivamente, apresentam a moldagem da amostra indeformada do solo, o ensaio de cisalhamento direto, o gráfico gerado como os parâmetros de resistência e o relatório completo do ensaio de cisalhamento direto.



Figura 4.6 – Moldagem de corpos de provas e pesagem do molde com solo úmido provenientes de amostra indeformada para execução do ensaio de cisalhamento direto. Fonte: Pereira et al. (2024)



Figura 4.7 – Realização do ensaio de cisalhamento direto com parceria da Empresa Técnica Engenharia. Fonte: Pereira et al. (2024)



RELATÓRIO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Dados Cadastrais da Amostra

Nome da Amostra:
 Número Programa:
 Número da Amostra:
 Data do Ensaio: 15, fevereiro de 2024
 Tipo Ensaio: Ensaio rápido
 Condição Moldagem: Cravação

Informações dos Corpo de Prova

Corpo Prova	Altura (cm)	Lado (cm)	Tensão Normal (kgf/cm ²)	Tensão Cisalhante (kgf/cm ²)
1	2,00	5,00	0,50	0,35
4	2,00	5,00	1,50	0,80

Figura 4.8 – Apresenta o resultado da amostra cabeçalho do relatório dos ensaios de cisalhamento direto com informação dos dados dos CPs e parâmetros de tensão normal e cisalhante (kgf/cm²) provenientes do ensaio de cisalhamento direto. Fonte: Pereira et al. (2024)

Gráficos dos Resultados

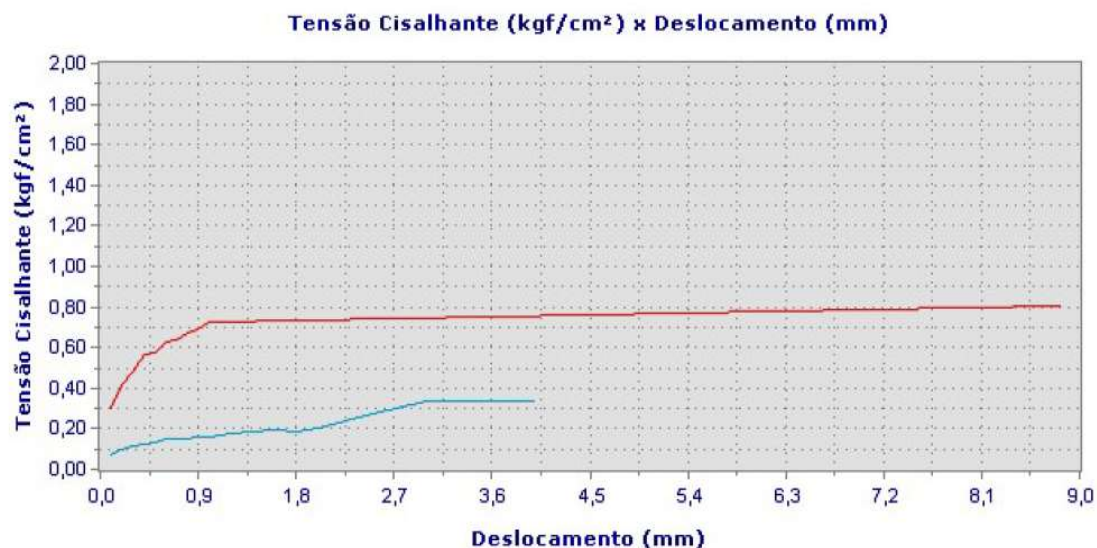


Figura 4.9 – Apresenta o gráfico de tensão cisalhante (kgf/cm²) x deslocamento (mm)
 Fonte: Pereira et al. (2024)

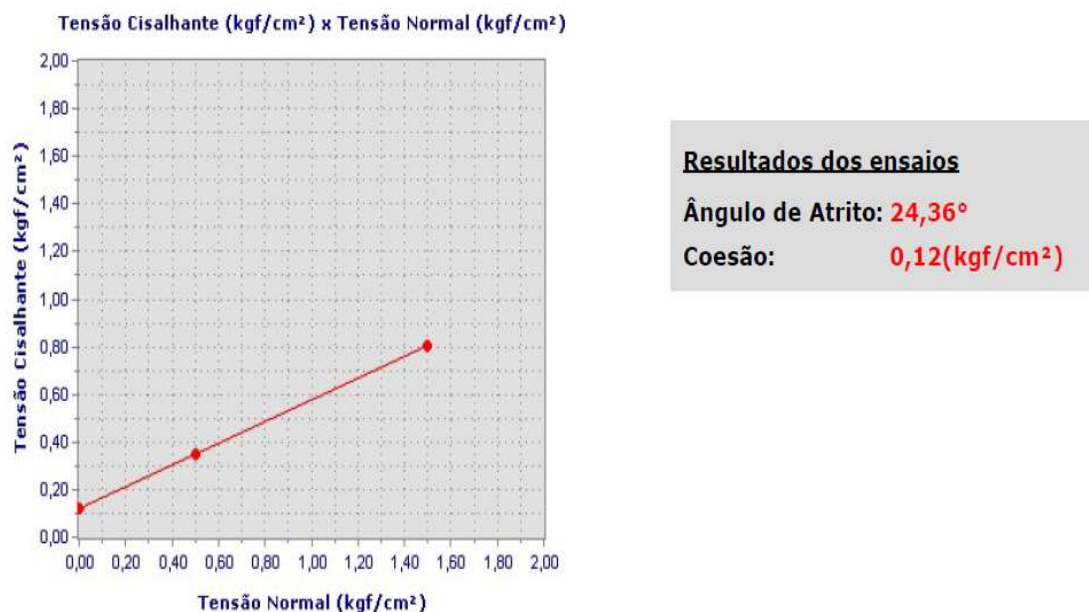


Figura 4.10 - Apresenta o gráfico da tensão cisalhante x tensão normal (kgf/cm²) para obtenção do ângulo de Atrito e coesão do solo. Fonte: Pereira et al. (2024)

Por último, foi realizada a modelagem numérica da barragem para determinar a estabilidade dos taludes, utilizando os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios laboratoriais.

Com a obtenção dos parâmetros do solo e de resistências, foi realizada a modelagem numérica através do software Slide2 (Rocscience), analisando-se o fator de segurança (FS) do talude a jusante, levando em consideração regime permanente normal da barragem.

Primeiramente, foram estabelecidos o modelo geométrico, por intermédio dos dados retirados in loco, e as condições de contorno possíveis. Em seguida, foram realizados os estudos de percolação, para então avaliar a estabilidade do talude por meio do Método de Equilíbrio Limite em Fatias.

Os resultados demonstraram que o FS estava abaixo do mínimo necessário para a estabilidade, conforme apresentado na Figura 4.6.

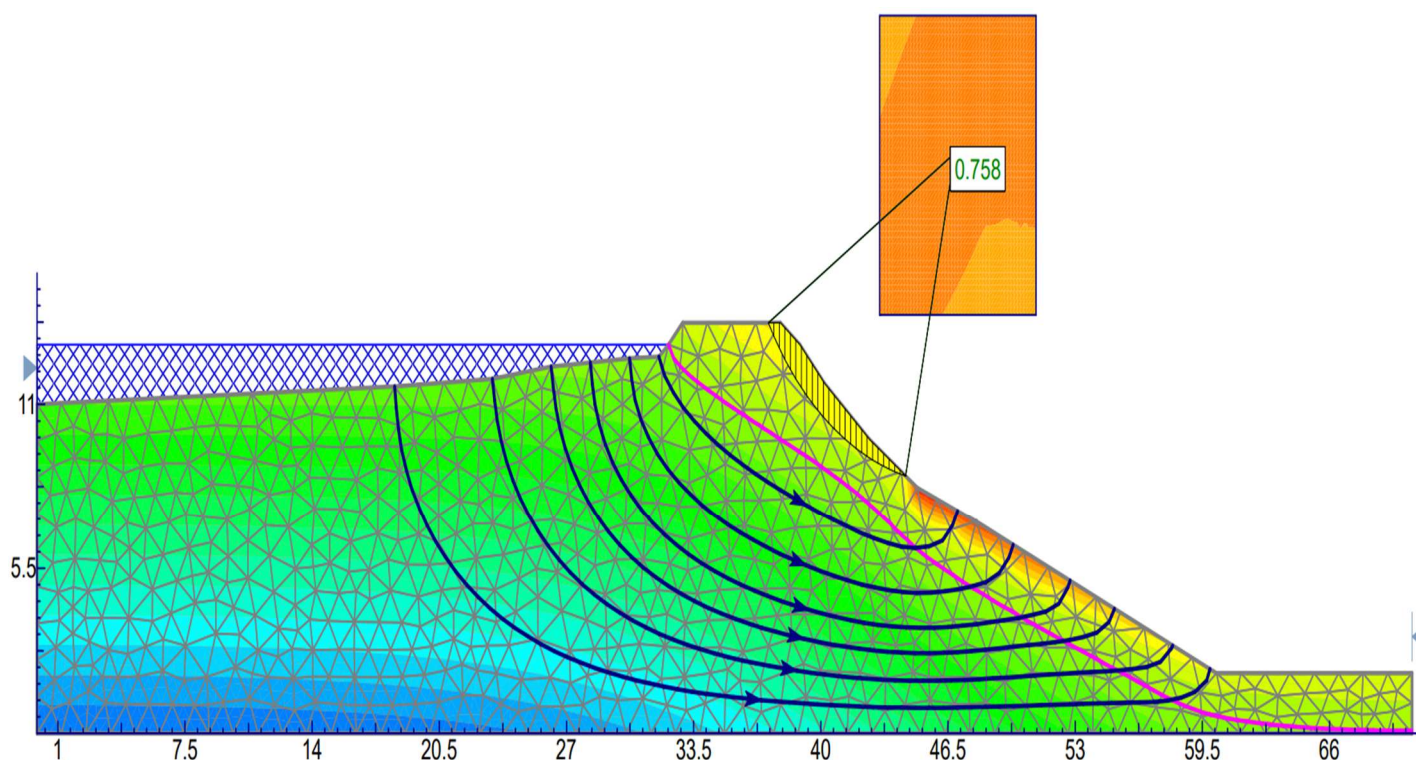


Figura 4.11 – Apresenta a análise Determinística Estabilidade do Talude a Jusante no software SLOPE do Geostúdio. Fonte: Pereira et al. (2024)

A análise foi realizada por meio do método de Morgenstern-Price, uma vez que, pertence ao grupo dos métodos rigorosos, os quais satisfazem todas as condições de equilíbrio, conforme citado por Ferreira (2012). Ademais, com a seção crítica analisada é composta por um único tipo de solo, foi utilizada a superfície circular como parâmetro na modelagem numérica. Por fim, para determinar o ponto crítico de ruptura, foi utilizado a opção de grades e raios.

Não conformados com o valor abaixo do mínimo para a estabilidade, foi realizada uma nova modelagem numérica com os softwares do GeoStudio, utilizando SEEP/W para obtenção do fluxo de percolação e o SLOPE/W para a análise da estabilidade do talude na fase de operação do barramento, foi analisado o fator de segurança do talude a jusante levando em consideração o regime permanente normal da barragem, os resultados foram aproximadamente os mesmos. Paralelamente a isso, no talude que, após a erosão, estava muito íngreme, era perceptível e provável que as raízes e o enrocamento lançado emergencialmente tinha contribuíram para uma estabilidade momentânea. Na Figura 4.7 é apresentada a simulação no SEEP/W do Geostúdio, com o fluxo estabelecido, e na Figura 4.8, o Fator de Segurança determinado também pelo método Morgenstern-Price no SLOPE/W.

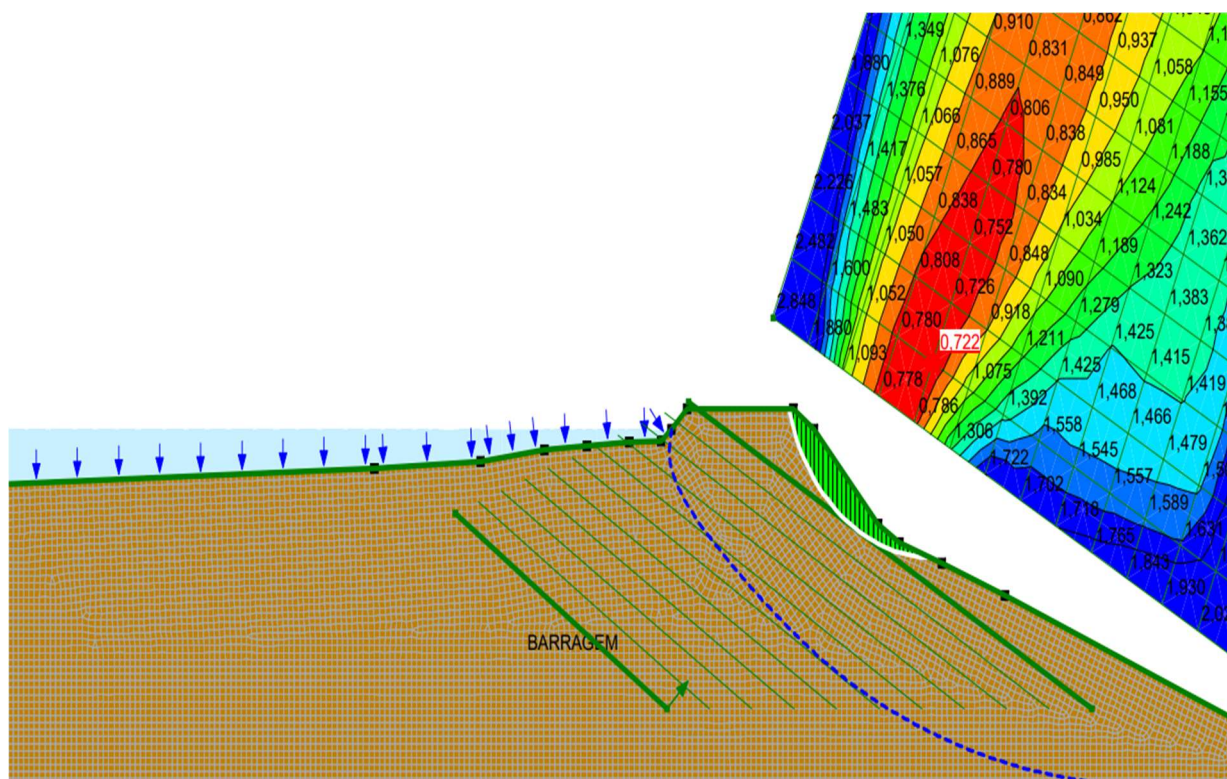


Figura 4.12 – Apresenta a análise Determinística Estabilidade do Talude a Jusante no software Slide.
Fonte: Pereira et al. (2024)

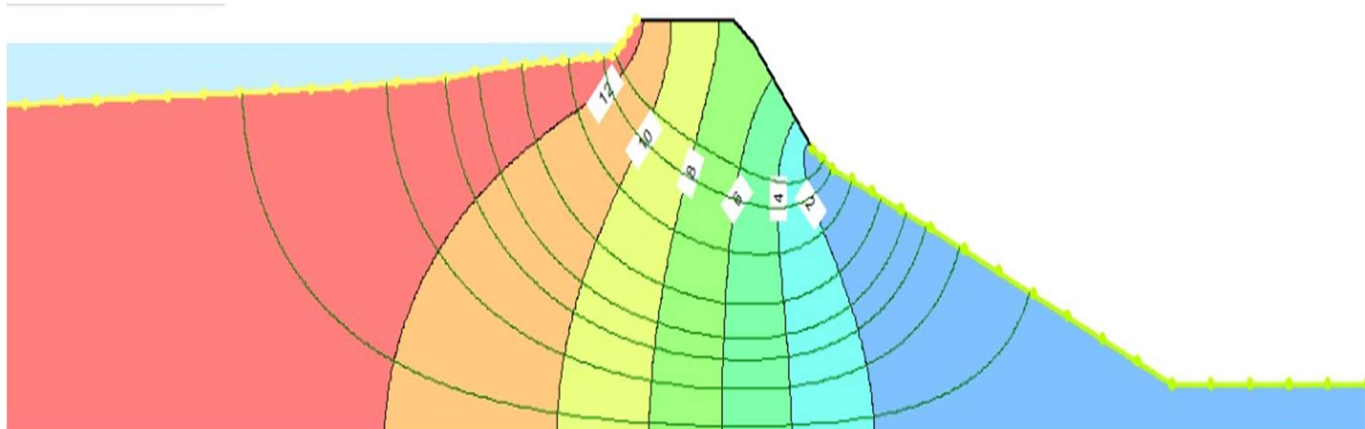


Figura 4.13 – Análise da percolação no software SEEP do Geostúdio. Fonte: Pereira et al. (2024)

A barragem já estava apresentando vários processos de deterioração com o excesso de chuvas, agravados ainda mais pela passagem de veículos. Conforme previsto nas primeiras análises, a barragem rompeu no dia 21 de fevereiro de 2024, após uma forte chuva, abrindo uma vala por meio da erosão e levando parte do enrocamento lançado. A via que existia sobre o barramento foi interditada, e os moradores passaram a utilizar vias informais e mais distantes como desvio. A Figura 4.9 – mostra a falha no ponto de erosão 1 (local do extravasor). Os blocos de rocha lançados serviram para minimizar as ondas. Assim, o escoamento foi controlado sem causar maiores danos as residências próximas.



Figura 4.14 – Mostra o rompimento do talude e a falha da barragem no ponto de erosão 1.
Fonte: Pereira et al. (2024)

4.3 Classificação no PNSB

Ao analisarmos esta barragem, verificamos que a mesma se enquadra no (PNSB). A Lei n.º 12.334, de 20 de setembro de 2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), em seu Art. 9º, estabelece que as inspeções de segurança regulares e especiais terão sua periodicidade, qualificação da equipe responsável, conteúdo mínimo e nível de detalhamento definidos pelo órgão fiscalizador, em função da categoria do risco e do dano potencial associado a barragem.

Como o talude serve como via de acesso frequente, embora não existam pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, há uma estrada vicinal de uso local. Portanto, a barragem se enquadra nos descritores e classificação relativa ao Dano

Potencial Associado (DPA) como possível Potencial de perdas de vidas humanas, além de potencial impactos econômicos, sociais e ambientais.

Como não há monitoramento no barramento e sistema de drenagem, este deverá ter, obrigatoriamente, a execução de, pelo menos, piezômetros, afim de atender às exigências da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

Não foi necessária a realização dos mapas de inundação, visto que, com a ruptura, as residências à jusante não foram afetadas, conforme o modelo de ruptura ocorrido. No em tento caso o barramento seja reconstruído, e haja alterações nas condições de contorno, deverá ser elaborado e implementado o Plano de Ações Emergenciais (PAE), conforme determina a legislação.

II.2 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)			
Volume Total do Reservatório para barragens de uso múltiplo ou aproveitamento energético (m³) (s)	Potencial de perdas de vidas humanas (t)	Impacto ambiental (u)	Impacto sócio-econômico (v)
Pequeno <= 5 milhões m³ (1)	INEXISTENTE (Não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área a jusante da barragem) (0)	POUCO SIGNIFICATIVO (quando a área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (1)	INEXISTENTE (Quando não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0)
Médio 5 a 75 milhões m³ (2)	POUCO FREQUENTE (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local. (4)	SIGNIFICATIVO (quando a área afetada incluir áreas de proteção de uso sustentável - APA, fLona, rEsEX, etc. - ou quando for área de interesse ambiental e encontrar-se pouco descaracterizada de suas condições naturais) (2)	BAIXO (quando existem de 1 a 5 instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou infraestrutura na área afetada da barragem) (1)
Grande 75 a 200 milhões m³ (3)	FREQUENTE (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas. (8)	MUITO SIGNIFICATIVO (quando a área afetada incluir áreas de proteção integral - ESEC, PARNA, REBIO, etc. inclusive Terras Indígenas - ou quando for de grande interesse ambiental em seu estado natural) (5)	MÉDIO (quando existem mais de 5 até 30 instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem) (3)
Muito Grande > 200 milhões m³ (5)	EXISTENTE (Existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas. (12)	-	ALTO (quando existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)
78.660,00 m³ (*estimativa através de delimitação do perímetro do reservatório x altura da barragem).	Na mancha simplificada estimada 2 km (desde a crista até a jusante), foram quantificadas 7 residências rurais dentro da área possivelmente afetada pela propagação de onda em caso de rompimento da barragem, conforme memorial fotográfico do RISB 1-2024.	Área consolidada.	Após análise espacial da região através da ferramenta Google Earth, com data de passagem de 22 de abril de 2023, de infraestruturas, foram verificadas 7 residências urbanas a jusante da barragem REPRESA LAGO NORTE, conforme memorial fotográfico do RISB 1-2024.
1	12	1	3
DPA = Σ (s até v):	17		

Figura 4.15 – Tabela Matriz de classificação quanto ao dano potencial associado. Fonte: (site: snisb.gov.br/barragem/30903 - 2024)

5 CONCLUSÃO

A barragem Lago Norte está localizada em uma área de expansão urbana da cidade de Palmas, e esse processo alterou as condições iniciais de escoamento superficial do solo, aumentando o volume de água armazenada no reservatório. Por essa razão, esse barramento foi escolhido para um estudo com o objetivo de verificar sua estabilidade. A obtenção dos parâmetros necessários para avaliar a estabilidade foi realizada ao longo de seis meses, no primeiro semestre de 2024. Durante esse período, foram realizadas várias coletas in loco de amostras dos materiais que compõe o talude dessa estrutura.

Após a coleta das amostras, foram realizados ensaios em laboratório para determinar as características mecânicas do material do talude. Além dos ensaios de granulometria, limite de plasticidade e liquidez, batimetria e teor de umidade, foi realizado um ensaio de cisalhamento direto para determinar o ângulo de atrito e a coesão.

Com a obtenção desses parâmetros, foi realizada uma modelagem numérica no software GeoStudio, a fim de determinar o fator de segurança (FS) do barramento. Essa análise foi conduzida pelo método do equilíbrio limite, utilizando a metodologia de cálculo de Morgenstern e Price, que fornece resultados confiáveis, por ser um modelo mais próximo da realidade do comportamento do talude.

Além da coleta amostras, as visitas também serviram como objetivo avaliar se a manutenção estava sendo realizada de acordo com as boas práticas da engenharia e com a legislação vigente. Sobre esse aspecto, é importante destacar que a barragem raramente era vistoriada e não possuía sequer dispositivos básicos de medição de vazão ou equipamento para monitoramento de deformações estruturais.

A ruptura da barragem do Lago Norte foi desencadeada por um conjunto de fatores, principalmente relacionados a falta de conhecimento técnico e a ausência de aplicação de boas práticas na execução da obra. As manifestações patológicas observadas decorrentes da completa ausência de manutenção e da forma inadequada de construção, indicam um total desacordo com boas práticas construtivas e com as normativas aplicáveis. Ou seja, a ruptura dessa estrutura era um evento iminente e totalmente previsível para os especialistas e autoridades competentes na área.

Em relação a essa barragem é importante salientar que a construção foi realizada de maneira improvisada, sem qualquer estudo prévio das características do solo e, tampouco, sem um projeto técnico com soluções de engenharia capaz superar as limitações imposta pelo o solo e do material utilizado no barramento.

A barragem inicialmente tinha a finalidade de armazenar água até o limite de seu extravasor. No entanto, com a expansão urbana, passou a funcionar como descarregador de águas pluviais de diversas áreas impermeabilizadas. Sem um estudo hidrológico adequado, o transbordamento ocorre com frequência o que resulta a erosão do talude, perda de estabilidade e, conseqüentemente, ruptura.

A barragem foi construída com um solo Silto arenoso que, durante essa etapa de execução, esse material não recebeu nenhum tratamento para melhorar suas características físicas e mecânicas. Em outras palavras não houve compactação e nem a consolidação adequada do material. Outro grave problema construtivo é a inexistência de um sistema de drenagem interna, para eliminar o excesso de água do talude da barragem. A ausência desse mecanismo de proteção propiciou a perda de resistência do maciço, devido à redução da tensão efetiva, uma vez que água desagrega e separa as partículas do solo, enfraquecendo as ligações entre elas, o que acarreta os deslizamentos ou cisalhamentos. Outro grave problema que merece ser mencionado é a falta de vegetação em formato de gramíneas, sobre os taludes, para reduzir a erosão do solo. Outro equívoco presente no Lago Norte foi a presença de árvores de grande porte sobre os taludes. Esse tipo de vegetação aumenta significativamente o peso da estrutura e, a ramificação de suas raízes cria fissuras que intensifica o escoamento da água, favorecendo a desagregação das partículas.

Diante do relatado, não foi nenhuma surpresa que o coeficiente de segurança da barragem foi inferior ao mínimo recomendado, o que é extremamente preocupante pois não é fato isolado. Possivelmente pode existir muitas barragens mal construídas e sem manutenção periódica no Brasil em estado crítico.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros.

* Nem toda pesquisa consegue determinar as respostas para todos os problemas relacionados. Nesta pesquisa, foi verificado que barragens antigas não possuem elementos construtivos fundamentais, nem sistemas de monitoramento. A reabilitação de barragens é uma opção para novas pesquisas e estudos.

* A expansão das cidades acaba levando ao acúmulo de águas. Sugere-se verificar outras barragens em ambientes urbanos, utilizadas como descarregamento de sistemas de drenagem de águas pluviais e se atendem à demanda de reserva, por meio uma análise hidrológica da recorrência prevista.

* Recomenda-se um estudo de inserção de monitoramento de barragens construídas sem critérios técnicos de engenharia, como no mínimo um piezômetros e coleta de condições de contorno, visando a um monitoramento efetivo de barragens antigas ou construídas sem critério, mas que, pela sua importância, devam permanecer estabilizadas.

6 REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, M. **Mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- ABNT. NBR 11682: **Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro, 2009.
- BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. **Géotechnique**, v. 5, n. 1, p. 7-17, 1955.
- BOWLES, J. E. **Foundation analysis and design**. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1996.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA 2014) p. 36
- CASAGRANDE, A. Control of seepage through foundations and abutments of dams. **Géotechnique**, v. 11, n. 3, p. 161-182, 1961.
- CHOWDHURY, R. N. **Slope analysis**. Amsterdam: Elsevier, 1978.
- CHYZANOWSKI, A. et al. Monitoring deformations of structures and the environment. In: **Proceedings of the FIG XVIII International Congress**, Toronto, 1986.
- CLAYTON, C. R. I. et al. **Site investigation**. 2nd ed. Oxford: Blackwell Science, 1995.
- DAS Braja M. **Principles of geotechnical engineering**. 7th ed. Stamford, CT: Cengage Learning, 2011.
- DESAI, C. S.; CHRISTIAN, J. T. **Numerical methods in geotechnical engineering**. New York: McGraw-Hill, 1977.
- DUNCAN, J. M. **State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes**. Journal of Geotechnical Engineering, v. 122, n. 7, p. 577-596, 1996.
- DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. New York: Wiley, 1988.
- DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- FELLENIOUS, W. **Calculation of the stability of earth dams**. Transactions of the 2nd Congress on Large Dams, Washington, D.C., v. 4, p. 445-462, 1991.
- FELLENIOUS, W. **Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen**. Berlin: W. Ernst & Sohn, 1936.
- FOSTER, M. et al. **Risk assessment for dam safety**. London: Thomas Telford, 2000.
- FRANKLIN, J. A.; DUSSEAUULT, M. B. **Rock engineering**. New York: McGraw-Hill, 1989.

FREDUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

GERCOVICH, Denise M. S. **Apostila estabilidade de taludes**. Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

GOODMAN, R. E. **Introduction to rock mechanics**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1989.

GREENWAY, D. R. Vegetation and slope stability. In: ANDERSON, M. G.; RICHARDS, K. S. (eds.). **Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology**. New York: John Wiley & Sons, 1987. p. 187-230.

HARR, M. E. **Reliability-based design in civil engineering**. New York: McGraw-Hill, 1987.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing**. London: Pentech Press, 1994.

HOEK, E.; BRAY, J. W. **Rock slope engineering**. 3rd ed. London: The Institution of Mining and Metallurgy, 1981.

ICOLD. **Bulletin 52: Dam safety guidelines**. Paris: International Commission on Large Dams, 1988.

ICOLD. **Bulletin 106: Risk assessment in dam safety management**. Paris: International Commission on Large Dams, 2001.

ICOLD. **Bulletin 148: Dam maintenance manual**. Paris: International Commission on Large Dams, 2012.

JANBU, N. Application of composite slip surfaces for stability analysis. In: **Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes**, Stockholm, 1954.

KRAMER, S. L.; TWISS, R. J. **Geology for engineers**. New York: McGraw-Hill, 1988.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969.

LOPES, F. R. **Manual de barragens**. São Paulo: IPT, 1988.

LUNNE, T. et al. **Cone penetration testing in geotechnical practice**. London: Blackie Academic & Professional, 1997.

MCCANN, D. M.; FORSTER, A. Reconnaissance geophysical methods in landslide investigations. **Engineering Geology**, v. 29, n. 1-4, p. 59-78, 1990.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. New York: John Wiley & Sons, 1976.

MORGAN, M. G.; HENRION, M. **Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. **Géotechnique**, v. 15, n. 1, p. 79-93, 1965.

NETTO, ARTHUR SAUSSEN. **Análise de estabilidade de taludes: abordagens determinística e probabilística**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019.

NEWMARK, N. M. Effects of earthquakes on dams and embankments. **Géotechnique**, v. 15, n. 2, p. 139-160, 1965.

OOI, P. S. K. et al. **Instrumentation and monitoring in geotechnical engineering**. London: Taylor & Francis, 2009.

PECK, R. B. **Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics**. **Géotechnique**, v. 19, n. 2, p. 171-187, 1969.

PEREIRA, Anderson Nonato et al. **Análise de Estabilidade da Barragem do Lago Norte em Palmas – TO**. Editora OmnisScientia, v. 10, n. 1, p. 34-56, 2024. Disponível em: <<https://editoraomnisScientia.com.br/post-artigo/?artigo=3707>>. Acesso em: 19 jan. 2025. DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/10.

SEED, H. B.; IDRIS, I. M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 97, n. 9, p. 1249-1273, 1971.

SHERARD, J. L. et al. **Earth and earth-rock dams: engineering problems of design and construction**. New York: John Wiley & Sons, 1963.

SILVA, F. C. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

SILVA, JOÃO PAULO MOREIRA DA. **Os métodos do equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes**. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.

SKEMPTON, A. W.; DELORY, F. A. Stability of natural slopes in London Clay. In: **Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, London, 1957.

STARK, T. D.; EID, H. T. **Drained residual strength of cohesive soils**. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, n. 5, p. 856-871, 1994.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1948.

TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1943.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1967.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

USACE. **Engineering and design: risk-based analysis for flood damage reduction studies**. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 1999.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (eds.). **Landslides: analysis and control**. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 1978. p. 11-33.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. **Rock slope engineering: civil and mining**. 4th ed. New York: Spon Press, 2004.

ZIENKIEWICZ, O. C. et al. **The finite element method**. 3rd ed. London: McGraw-Hill, 1977.

Massad, Façal. Obras de terra: curso básico de geotecnia