



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



Luísa Lopes de Freitas Guilherme

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UM PISCINÃO PARA ABASTECIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador:
Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia

UBERLÂNDIA

2024

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UM PISCINÃO PARA ABASTECIMENTO

Luísa Lopes de Freitas Guilherme¹

Jean Rodrigo Garcia²

RESUMO

Os tanques escavados desempenham um papel fundamental como estruturas de contenção, especialmente para o armazenamento e fornecimento de água, sendo capazes de reter grandes volumes. No entanto, a possibilidade de colapso dessas estruturas apresenta sérios riscos ambientais e econômicos para as comunidades locais, destacando a necessidade urgente de aprimorar as análises de estabilidade estrutural. Essas análises são intrincadas, pois envolvem a consideração de diversos fatores durante o desenvolvimento de projetos. Os parâmetros geotécnicos, como intercepto coesivo e ângulo de atrito, juntamente com as geometrias, desempenham um papel crucial na determinação da estabilidade. Sob essa perspectiva, *softwares* de análises numéricas, como o Equilíbrio Limite, surgem como ferramentas essenciais para avaliar a estabilidade dessas estruturas de forma mais precisa, além de proporcionar uma compreensão mais profunda do comportamento do maciço. Tendo isso em vista, este trabalho visa analisar a estabilidade tridimensional e bidimensional de um piscinão. Para isso, os *softwares* da Rocscience, Slide3[®] e Slide2[®], foram empregados, utilizando os métodos consagrados como Bishop e Spencer, para obter os fatores de segurança mínimos para a estrutura em diferentes cenários, como sem e com enchimento e rebaixamento rápido. Como resultado, observou-se que, ao comparar com a norma vigente de estabilidade ABNT NBR 11682:2009, o reservatório apresentou fatores superiores ao mínimo exigido e mostrou-se estável para todos os cenários analisados.

Palavras-chave: Estabilidade; Tanque Escavado; Piscinão; Análise tridimensional.

ABSTRACT

Excavated tanks play a fundamental role as containment structures, especially for storing and supplying water, and are capable of retaining large volumes. However, the possibility of these structures collapsing poses serious environmental and economic risks for local communities, highlighting the urgent need to improve structural stability analyses. These analyses are intricate, as they involve the consideration of various factors during project development. Geotechnical parameters such as cohesive intercept and friction angle, along with geometries, play a crucial role in determining stability. From this perspective, numerical analysis software, such as Limit Equilibrium, has emerged as an essential tool for evaluating the stability of these structures more accurately, as well as providing a deeper understanding of the behavior of the massif. In light of this, the work aims to analyze the three-dimensional and two-dimensional stability of a water storage. To do this, the Rocscience software Slide3[®] and Slide2[®] were used, using established methods such as Bishop and Spencer, to obtain the minimum safety

¹ Graduanda em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: luisalguilherme@gmail.com

² Professor na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). E-mail: jean.garcia@ufu.br

factors for the structure in different scenarios, such as without and with filling and rapid lowering. As a result, it was observed that, when compared with the current stability standard ABNT NBR 11682:2009, the reservoir presented factors higher than the minimum required and proved to be stable for all the scenarios analyzed.

Key words: Stability; Excavated tank; Water Storage; Three-dimensional analysis.

1. INTRODUÇÃO

Os tanques escavados, também conhecidos como piscinões, são estruturas concebidas para a contenção de líquidos, principalmente para o armazenamento de água. Esses reservatórios são escavados no solo natural e empregados predominantemente para abastecimento e irrigação em áreas rurais. Sua capacidade de conter grandes volumes de água, combinada com o abastecimento por gravidade, garante um fornecimento estável mesmo durante as variações sazonais na oferta de água, como estações secas e chuvosas. Além disso, por serem integrados ao solo e delimitados, minimizam os impactos socioambientais em larga escala associados às barragens tradicionais. Ao evitar a formação de extensos lagos a montante, essas estruturas contribuem para a preservação do ecossistema aquático e reduzem a supressão vegetal.

Entretanto, a possibilidade de ruptura desses maciços pode causar grandes riscos principalmente para população a jusante devido à propagação e velocidade das ondas, além de danos econômicos e ambientais, como comprometimento de terras agrícolas, vegetação, danos materiais e assoreamento de rios (Menezes, 2016). O cenário se torna ainda mais agravante quando a possibilidade de rompimento dessas estruturas põe em risco rupturas em sequência de outras, denominado ruptura em cascata, tornando os impactos ainda mais destrutivos (Collischonn & Tucci, 1997; Medeiros, 2005).

Recentes reportagens veiculadas ao rompimento de tanques de água têm focado na crescente frequência desses incidentes no contexto brasileiro. Em junho de 2022, um tanque para irrigação, com capacidade 1 milhão de m³ de água, rompeu-se na zonal rural de Perdizes (MG) em uma fazenda particular sem causas inicialmente apontadas. O incidente, apesar de não resultar em ferimentos, provocou preocupações sobre uma possível ruptura em cascata de uma barragem locada a jusante. Havia receios de que essa estrutura não suportasse a sobrecarga adicional gerada pela ruptura. Outro caso de rompimento na região, ocorreu em Araguari (MG). Um tanque de água de capacidade total de 300 mil m³ rompeu-se em março de 2023, sem causas apontadas, mas acarretou prejuízos em plantações e danos materiais (G1 Notícias, 2023).

Os recentes rompimentos, como registrado em Perdizes (MG) e Araguari (MG), aliados a outros incidentes de vazamentos despertam alertas sobre a segurança dos tanques escavados de represamento de água, bem como sublinham a latência necessidade de abordagens mais eficazes na manutenção dessas estruturas. Além disso, reflete a vulnerabilidade dos piscinões existentes e ressaltam a urgência em aprimorar a avaliação desses a fim de garantir segurança estrutural e a preservação socioeconômica das comunidades envolvidas.

Diferentes podem ser as causas para a ruptura desses tanques, sendo, para Silva (2011), a deterioração das características mecânicas do solo por agentes externos e alterações na geometria fatores influentes no rompimento dos taludes. Caputo (1987) acrescenta que infiltrações, deslizamentos e falta de proteção nos taludes podem desempenhar um papel significativo no processo de falha. Por fim, ausência ou falhas nos elementos de drenagem, falhas de projeto, execução, manutenção e monitoramento também são fatores influentes em colapsos.

Por serem executadas de forma escavadas no solo natural, variações de tensões normais e cisalhantes no maciço são provocadas devido ao seu desconfinamento. Como consequência, essa variação acarreta deformações no solo por meio de deslocamentos verticais e horizontais (Coduto, 1998). A fim de entender e estimar as forças presentes no maciço devido ao desconfinamento das tensões, faz-se necessário estudos específicos analisando em concomitância as propriedades do solo local e geometria.

Sendo assim, simulações computacionais que se baseiam em métodos de análises numéricas, como Equilíbrio Limite, emergem com o intuito de proporcionar avaliações mais fidedignas e satisfatórias para as análises estruturais (Ribeiro Junior, 2011). Esses softwares são projetados para proporcionar análises bidimensionais (2D) ou análises tridimensionais (3D), visando uma compreensão mais aprofundada do comportamento do maciço e facilitando intervenções destinadas a garantir a segurança estrutural.

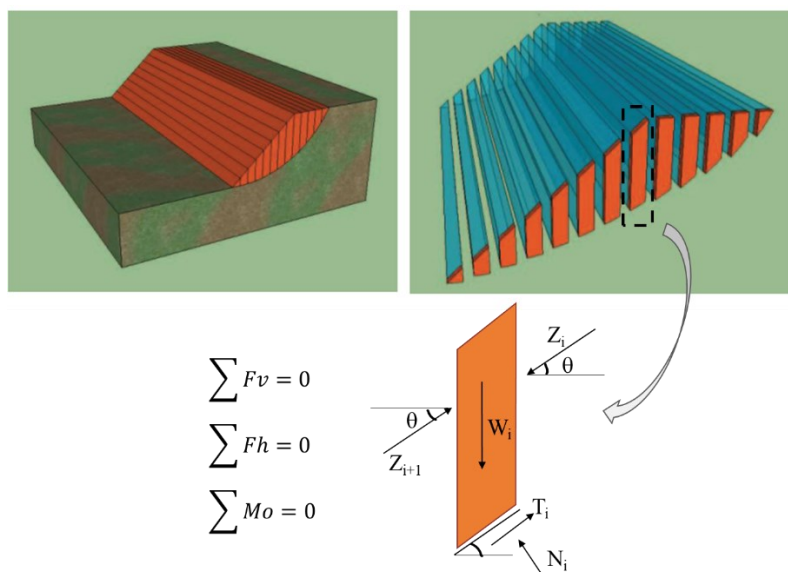
As análises com base na teoria do Equilíbrio Limite são utilizadas para determinar o equilíbrio de uma massa de solo, na qual a ruptura pode ocorrer por meio de uma superfície plana, circular, poligonal ou mista (Silva, 2011). Baseia-se em três principais hipóteses simplificadoras, incluindo: o solo se comporta como rígido-plástico, ou seja, rompe-se sem deformar; as equações de equilíbrio (forças horizontais e verticais, e momento) são válidas até a iminência da ruptura; e um fator de segurança constante ao longo de toda superfície de ruptura (Massad, 2003). Além disso, a estabilidade é avaliada por meio do fator de segurança (FS), que

é calculado como a relação entre a resistência do solo ou rocha disponível e a resistência mobilizada ao longo da superfície de deslizamento.

Foram desenvolvidas diversas variantes para analisar a estabilidade de taludes fundamentadas na teoria do equilíbrio limite, dentre elas destacam-se o método do círculo de atrito, o método das cunhas e o método das fatias. No método do círculo de atrito, ou método de Taylor, parte-se da premissa de que a ruptura ocorre ao longo de uma superfície circular. Para determinar as tensões atuantes nessa superfície, considera-se que as forças resultantes das tensões normais e do componente de fricção da resistência ao cisalhamento são tangentes ao círculo de fricção (Taylor, 1937). Nos métodos das cunhas, a massa de solo é dividida em cunhas, e as condições de equilíbrio são aplicadas separadamente à cada uma delas. Por fim, os métodos das fatias ou das lamelas, mais aplicável aos solos com atrito e coesão, a massa é subdividida em fatias, e as condições de equilíbrio são aplicadas a cada segmento individualmente (Figura 1).

Diversas metodologias surgiram tendo como base métodos das lamelas, destacando-se Janbu (1954), Bishop (1955), Morgenstern-Price (1965) e Spencer (1967). Diferenciam-se principalmente nas hipóteses de simplificação adotadas: Janbu e Bishop são considerados métodos simplificados, pois não consideram forças de corte entre as fatias, enquanto Morgenstern-Price e Spencer são considerados métodos rigorosos, pois levam em conta todas as condições de equilíbrio.

Figura 1 - Divisão de um talude pelo método das fatias.



Fonte: Adaptado de Silva (2011).

Sob essa perspectiva, a avaliação dos fatores de segurança aplicados a taludes e encostas no Brasil é embasada na norma ABNT NBR 11682:2009. Esta norma estabelece diretrizes para a análise de estabilidade nessas estruturas, fornecendo critérios e procedimentos para a determinação dos fatores de segurança com base nos potenciais danos materiais, ambientais e ameaças à vida humana. Os fatores de segurança indicados pela norma visam abranger as incertezas naturais nas fases de projeto e construção, variando entre 1,2 e 1,5 para rupturas por deslizamento. Portanto, a estabilidade de um talude é determinada pela avaliação do fator de segurança obtido nas simulações, nos quais valores inferiores a 1 ($FS < 1$) indicam instabilidade, igual a 1 ($FS = 1$) sugerem uma ruptura iminente e valores superiores a 1 ($FS > 1$) indicam estabilidade. No entanto, ao atender aos fatores de segurança exigidos pela norma, aumenta-se significativamente a proteção contra rupturas, visto que, mesmo diante da variabilidade das propriedades dos materiais naturais presentes nos taludes e encostas, a segurança é garantida.

Com base nesse contexto, esta pesquisa visa analisar a estabilidade de um tanque escavado (piscinão) de abastecimento de água, com capacidade aproximada de 1,3 milhão de m^3 . Para atingir o objetivo principal, simulações tridimensionais e bidimensionais serão realizadas por meio dos softwares Slide3® e Slide2® da Rocscience utilizando métodos de equilíbrio limite simplificados e rigorosos para encontrar o FS crítico da estrutura. Posteriormente, um estudo dos FS exigidos na ABNT NBR 11682:2009 será desenvolvido e comparado com os obtidos nos softwares a fim de constatar se atendem ou não a normativa e ainda determinar a estabilidade do piscinão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho visa analisar a estabilidade de um piscinão de abastecimento com capacidade de aproximadamente 1,3 milhão de m^3 . Para isso, simulações tridimensionais e bidimensionais foram executadas, respectivamente, nos *softwares* Slide3®, versão 3.024, e Slide2®, versão 9.028, a fim de obter os fatores de segurança críticos da estrutura.

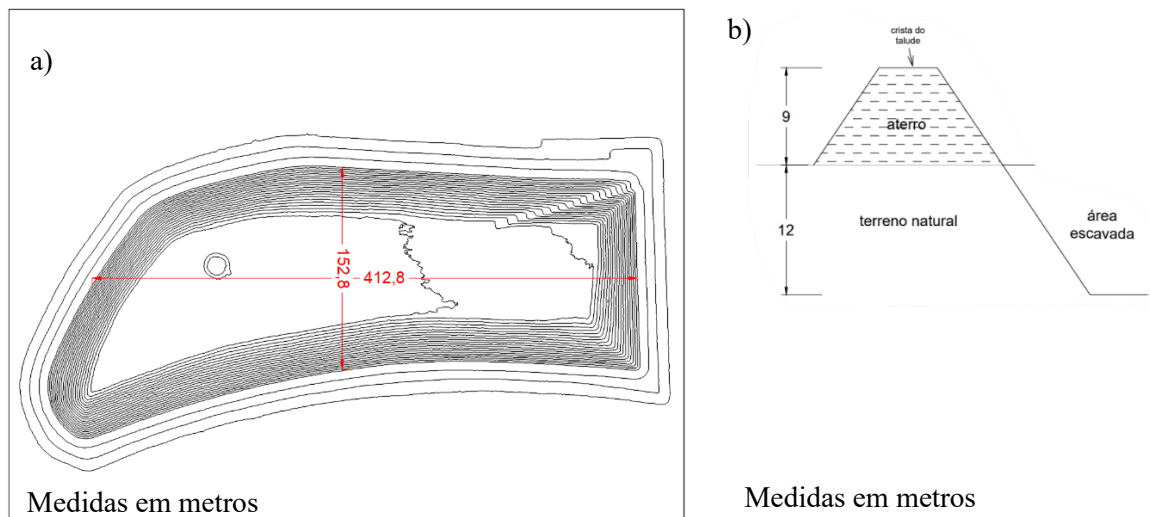
O tanque em estudo possui dimensões de 412,8 metros de comprimento e 152,8 metros de largura (Figura 2-a). Esse maciço é segmentado em um aterro compactado com 9 metros de altura e uma área escavada com 12 metros de profundidade, tendo na Figura 2 (b) um croqui esquemático correspondente.

Para atingir o objetivo principal, inicialmente, fez-se necessário a determinação dos parâmetros geotécnicos, como o intercepto coesivo (c'), ângulo de atrito (ϕ'), e peso específico

(γ) a partir de ensaios geotécnicos. Para isso, foram solicitados a execução dos seguintes ensaios: sondagens de simples reconhecimento com SPT, ensaios de caracterização (teor de umidade natural, massa específica dos grãos, limites de Atterberg e granulometria), ensaio triaxial de compressão simples, adensamento edométrico e cisalhamento direto. Entretanto, somente ensaios de SPT e de caracterização foram executados e fornecidos para este estudo.

Dessa forma, devido à ausência dos ensaios triaxiais, utilizou-se equações de correlação com N_{spt} para a determinação do ângulo de atrito (ϕ') e intercepto coesivo (c'), sendo adotado de Teixeira (1996) (Equação 1) e Kulhawy e Mayne (1990) (Equação 2), respectivamente.

Figura 2 – a) Vista em planta do tanque escavado e b) croqui esquemático do tanque.



Fonte: Autores (2024).

A escolha da fórmula do ângulo atrito desenvolvida por Teixeira (1996) decorreu principalmente de sua autoria brasileira, o que permitiu considerar as características específicas dos solos e das condições geotécnicas locais durante sua formulação. Quanto à coesão, optou-se pela fórmula proposta por Kulhawy e Mayne (1990) após testes comparativos com a abordagem de Hara *et al.* (1974). Esses testes demonstraram que a formulação de Kulhawy e Mayne (1990) proporcionou valores de intercepto coesivo mais coerentes com o tipo de solo identificado no tanque em estudo. O peso específico, por sua vez, foi determinado em função do número de golpes do SPT conforme Godoy (1972) e apresentado na Tabela 1.

$$\phi = 15^\circ + \sqrt{20 N_{SPT}} \quad \text{Equação 1}$$

$$\frac{c_u}{P_a} = 0,06 * N_{SPT(60)}$$

Equação 2

Em que,

$$C_u = S_u * 0,5 \text{ (Garcia e Albuquerque, 2015);}$$

$$N_{SPT(60)} = \frac{N_{SPT}}{1,2}$$

Tabela 1 – Peso específico de solos argilosos.

Consistência	N _{spt}	γ (kN/m ³)
Muito mole	<2	13
Mole	2-5	15
Média	6-10	17
Rija	11-19	19
Dura	>19	21

Fonte: Godoy (1972).

A partir de uma análise dos boletins de sondagens fornecidos, constatou-se que o material presente no tanque em estudo consiste majoritariamente em argila silto-arenosa. Essa composição é identificada tanto no aterro compactado, no qual apresenta uma média de 8 golpes, quanto no terreno natural, tendo uma média de 10 golpes. A Tabela 2 resume os parâmetros de peso específico, ângulo de atrito e intercepto coesivo adotados nas análises de estabilidade.

Tabela 2 – Parâmetros adotados nas simulações.

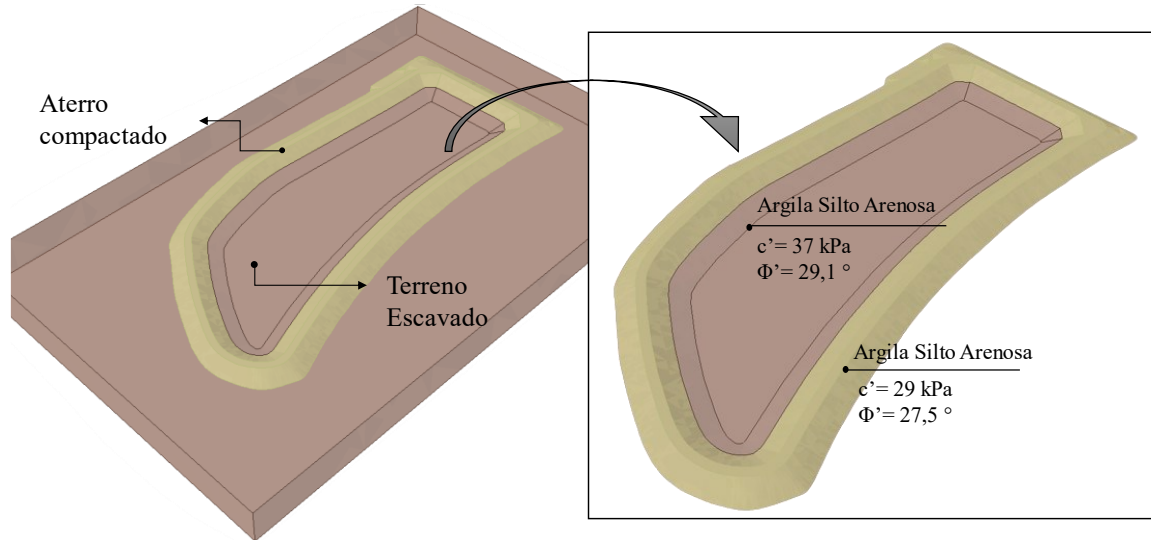
Material	Camada (m)	N _{spt,médio} (golpes)	γ _{nat} (kN/m ³)	γ _{sat} (kN/m ³)	φ' (°)	c' (kPa)	K (m/s)
Argila Silto arenosa – Aterro compactado	0-9	8	17	19	27,5	29	1,0 E- 6
Argila Silto arenosa – Terreno Natural	9-35	10	19	21	29,1	37	1,0 E- 6

Fonte: Autores (2024).

Após a determinação dos parâmetros essenciais, a geometria do tanque foi validada e importada no *software* Slide3. A partir de um levantamento topográfico detalhado, que forneceu

curvas de nível a cada metro, a superfície e o volume foram gerados dentro do software, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Modelo tridimensional do piscinão.



Fonte: Autores (2024).

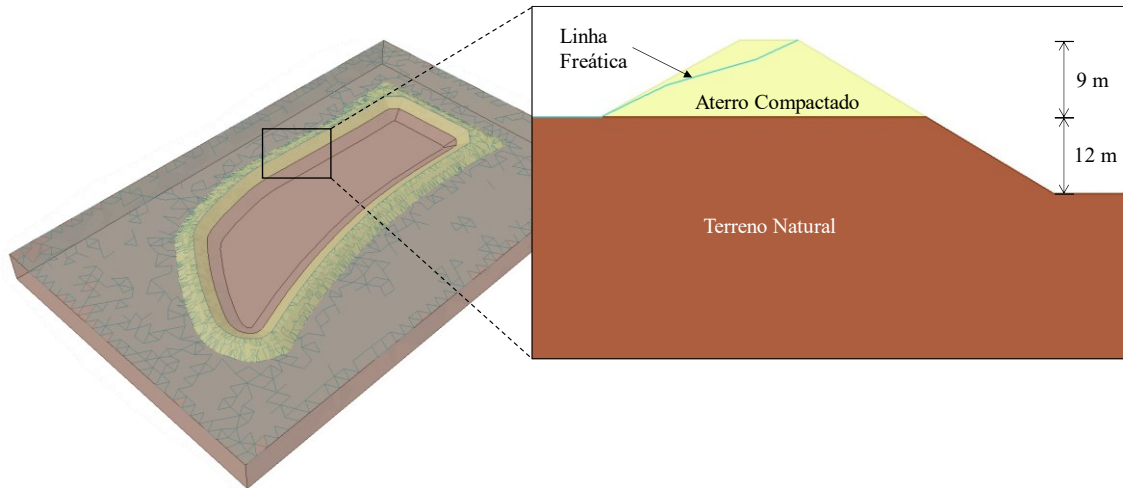
Para determinar a linha freática nos taludes da estrutura buscou-se o auxílio do *software* RS3, também desenvolvido pela Rocscience. O RS3 desempenhou um papel crucial como complemento, superando as restrições de percolação enfrentadas com o *software* Slide3. A integração desses *softwares* proporcionou uma análise mais precisa e fidedigna, permitindo segmentar a estrutura em materiais saturados e não saturados e obtendo fatores de segurança mais confiáveis. Sendo assim, a linha freática obtida no RS3 foi importada ao Slide3 para as devidas análises de estabilidade (Figura 4).

Finalizada a validação da geometria, deu-se início às análises tridimensionais. Nesse contexto, optou-se pelos métodos de Spencer (sofisticado) e Bishop (simplificado) para obtenção dos fatores de segurança críticos. Essa escolha se decorreu após a realização de simulações prévias na estrutura comparando os métodos Spencer, Bishop, Janbu e Morgenstern-Price em que se observou, em todos os cenários simulados, os fatores de segurança críticos em ambos os métodos.

Dessa forma, as análises foram conduzidas para os cenários finais da construção, tanto sem enchimento quanto com enchimento, visando obter os fatores de segurança críticos usando os métodos de Spencer e Bishop. Foram testadas diferentes combinações de métodos de pesquisa e formatos de ruptura disponíveis no *software* para encontrar o fator de segurança crítico. Os métodos de pesquisa incluíram *Cuckoo Search*, uma metaheurística de otimização,

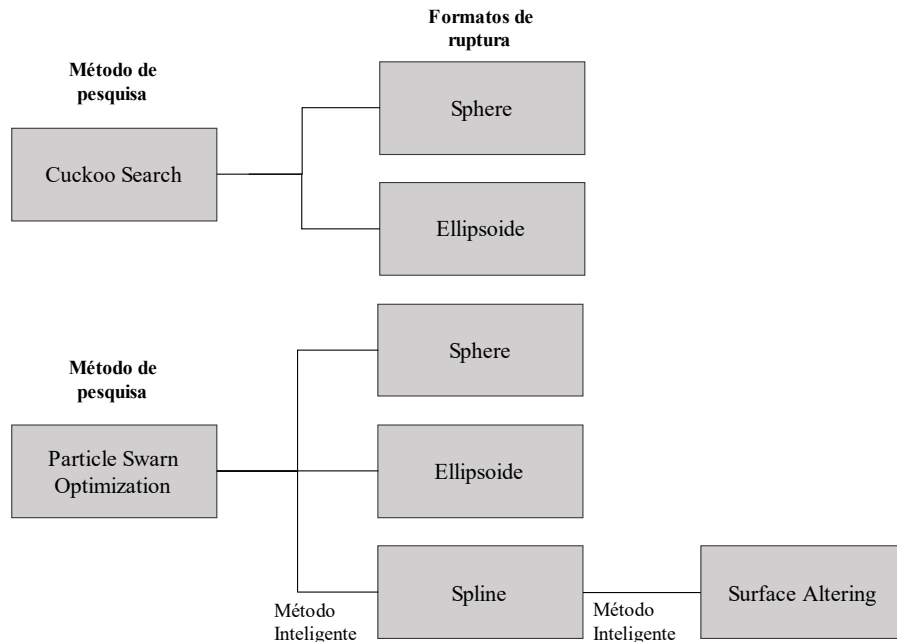
Particle Swarm Optimization, um novo método heurístico de enxame para encontrar soluções ideais em espaços de busca, e um método de pesquisa inteligente que combina superfície *spline*, otimização de partículas e alteração de superfície. Quanto aos formatos de ruptura, foram testadas esféricas e elipsoidais. A Figura 5 ilustra as diferentes combinações aplicadas.

Figura 4 - Linha freática percolada obtida por meio do *software* RS3.



Fonte: Autores (2024).

Figura 5 – Diferentes combinações de métodos de pesquisa e formatos de ruptura disponíveis no *software* Slide3 para o cenário sem e com enchimento.



Fonte: Autores (2024).

Mediante isso, os fatores de segurança críticos para a estrutura sem e com enchimento foram obtidos. Em seguida, tendo esses resultados, um cenário adicional foi avaliado sendo o

de rebaixamento rápido. Optou-se por realizar essa simulação utilizando o *software* Slide2, também desenvolvido pela *Rocscience*, que é bidimensional. Assim, foi feito corte na seção crítica da estrutura, ou seja, na região em que foi identificado o fator de segurança crítico no cenário com enchimento.

Por fim, ressalta-se que os fatores de segurança críticos obtidos em todos os cenários devem estar em coerência com a normativa de estabilidade de taludes vigente, ABNT NBR 11682:2009. Essa norma determina diretrizes para estabelecer os riscos de ruptura de um talude e indica os fatores de segurança com base nos potenciais danos materiais e ameaças à vida humana, variando de 1,2 a 1,5 conforme apresentado na Tabela 3 .

Tabela 3 - Fatores de segurança mínimos para estabilidade contra deslizamentos.

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

Fonte: NBR 11682 (2009).

Por ser uma estrutura de alto custo de construção, contendo uma barragem próxima e vastas áreas de plantação, o piscinão é categorizado como de alto risco em termos de potenciais danos materiais e ambientais. Da mesma forma, o nível de segurança contra possíveis danos à vida humana é considerado elevado, dado o envolvimento de vários trabalhadores nas operações e manutenções da fazenda. Sendo assim, o fator mínimo a ser atingindo pelas simulações, em todos os cenários considerados, é de 1,5.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de estabilidade utilizando o método de equilíbrio limite foi conduzida por meio do *software* Slide3, abrangendo ambas as metodologias de Spencer e Bishop. Diferentes cenários foram avaliados a fim de entender o comportamento e a segurança da estrutura nestes, a citar: estrutura em fase final de construção, sem e com enchimento e rebaixamento rápido.

Inicialmente, analisou-se a estrutura sem e com enchimento mediante diferentes combinações de métodos de pesquisa e superfície de ruptura a fim de encontrar o menor fator

de segurança por Bishop e Spencer. A Tabela 4 apresenta os fatores de segurança obtidos pelo software em cada combinação para o cenário sem enchimento.

Tabela 4 – Fatores de Segurança (FS) obtidos por meio de diferentes combinações de métodos de pesquisa e superfície de ruptura para o cenário sem enchimento.

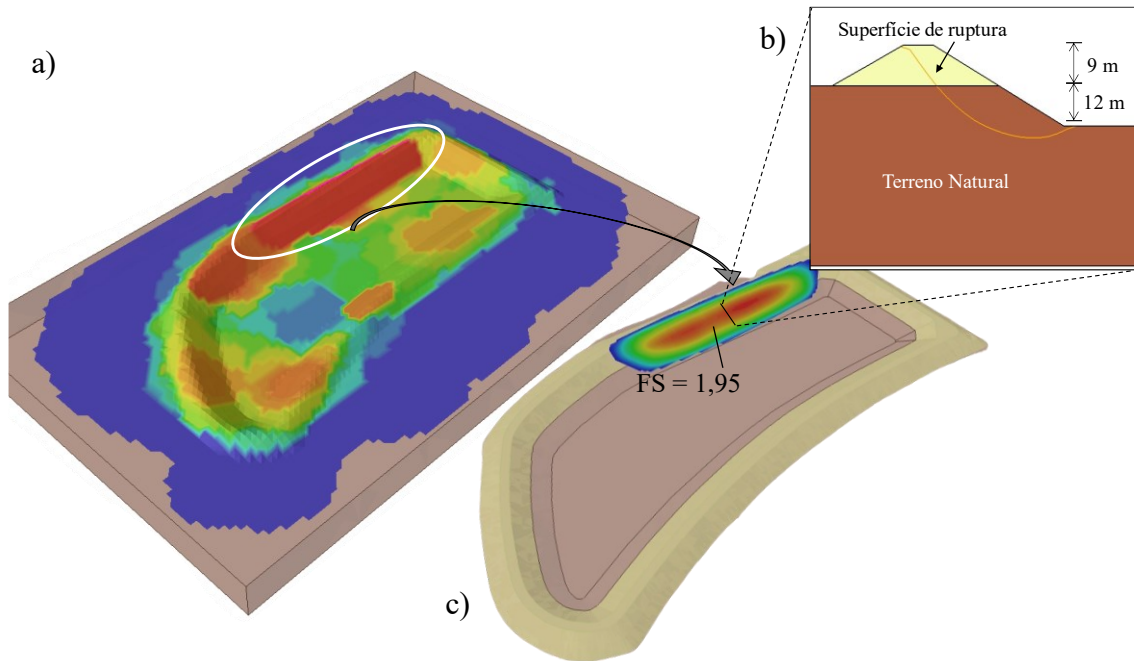
Método de pesquisa	Bishop		Spencer	
	Método Simplificado <i>Sphere</i>	<i>Elipsoide</i>	Método Rigoroso <i>Sphere</i>	<i>Elipsoide</i>
Cuckoo Search	1,945	1,968	2,177	2,103
Particle Swarn optimization	2,014	1,984	2,153	2,149
	Método Inteligente		Método Inteligente	
Particle Swarn optimization	1,951		2,095	
Spline	1,952		2,094	
Surface altering	1,964		2,103	
FS crítico	1,95			

Fonte: Autores (2024).

Nota-se que para o cenário sem água o fator de segurança crítico corresponde ao método de *Cuckoo Search* aliado a superfície de ruptura esférica pelo método de Bishop. A Figura 6 apresenta o fator de segurança crítico de 1,95 obtido por Bishop, sendo superior ao exigido pela normativa de estabilidade de talude ($FS > 1,5$) correspondente ao nível de segurança da estrutura.

Além disso, observa-se que a superfície de escorregamento crítica formada corresponde a uma linha circular, abrangendo desde a crista do aterro compactado até o terreno natural, onde a resistência é mais elevada. Ademais, as forças resistentes do maciço superam as forças mobilizadoras atuantes, visto que FS é superior a 1 assegurando a estabilidade da estrutura nesta condição.

Figura 6 – Fator de segurança obtido pelo método de Bishop no cenário sem enchimento, a) e c), e corte da superfície de ruptura b).



Fonte: Autores (2024).

Para o cenário com água, esse fator de segurança crítico corresponde a combinação *Cuckoo Search* e superfície de ruptura elipsoidal por Bishop conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores de Segurança (FS) obtidos por meio de diferentes combinações de métodos de pesquisa e superfície de ruptura para o cenário com enchimento.

Método de pesquisa	Bishop		Spencer	
	Método Simplificado <i>Sphere</i>	<i>Elipsoide</i>	Método Rigoroso <i>Sphere</i>	<i>Elipsoide</i>
Cuckoo Search	1,905	1,866	2,101	2,081
Particle Swarn optimization	1,963	1,952	2,071	2,071
Método Inteligente		Método Inteligente		
Particle Swarn optimization	1,887		2,105	
Spline	1,875		2,084	
Surface altering	1,875		2,078	
FS crítico	1,87			

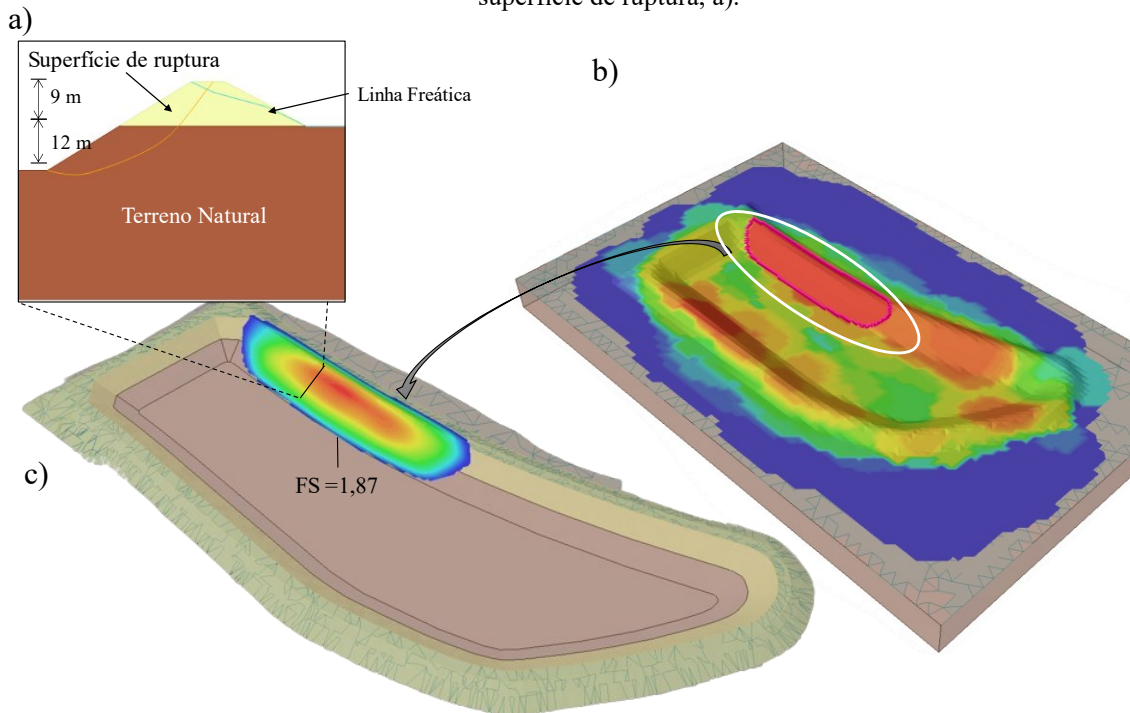
Fonte: Autores (2024).

A Figura 7 apresenta o fator de segurança crítico de 1,87 obtido por Bishop, sendo superior ao exigido pela normativa de estabilidade de talude ($FS > 1,5$) correspondente ao nível de segurança da estrutura. Além disso, observa-se que a superfície de escorregamento crítica

formada corresponde a um deslizamento em forma elipsoidal, abrangendo desde a crista do aterro compactado até o terreno natural, onde a resistência é mais elevada. Ademais, as forças resistentes do maciço neste caso também superam as forças mobilizadoras atuantes, visto que FS é superior a 1 assegurando a estabilidade da estrutura nesta condição.

Ao considerar a condição com enchimento devido à presença de água em comparação com a condição sem enchimento, é válido reconhecer que o fator de segurança obtido tende a ser menor. Isso se deve ao fato de que a água exerce uma pressão adicional, denominado empuxo, sobre as paredes do reservatório, aumentando a instabilidade. Além disso, a presença de água provoca a saturação do solo, resultando em parâmetros efetivos inferiores aos normais, diminuindo sua resistência.

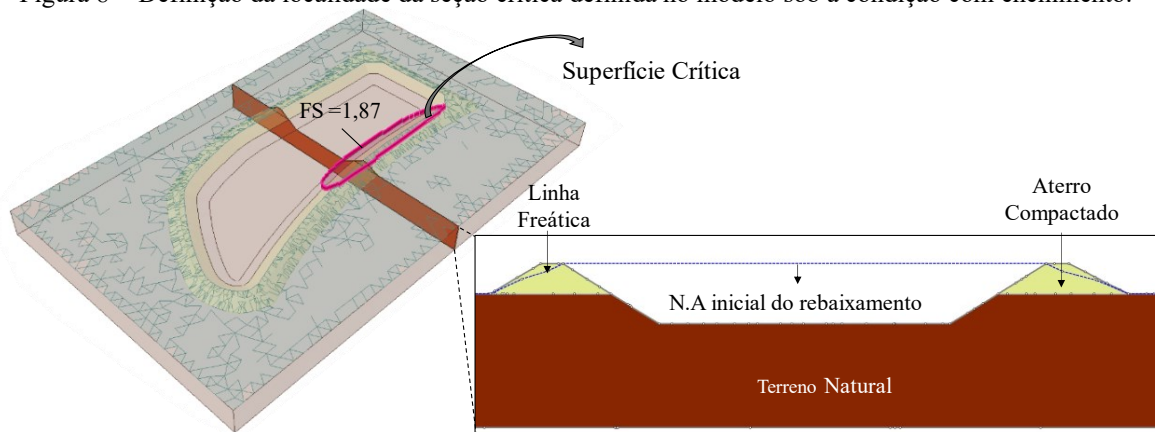
Figura 7 - Fator de segurança obtido pelo método de Bishop no cenário com enchimento, b) e c), e corte da superfície de ruptura, a).



Fonte: Autores (2024).

Tendo isso em vista, foi testado um cenário adicional com a presença d'água incluindo: rebaixamento rápido. Para essa avaliação, o *software* Slide2® foi empregado utilizando como seção crítica a região na qual resultou-se o fator crítico de segurança de 1,87 na condição com enchimento, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Definição da localidade da seção crítica definida no modelo sob a condição com enchimento.

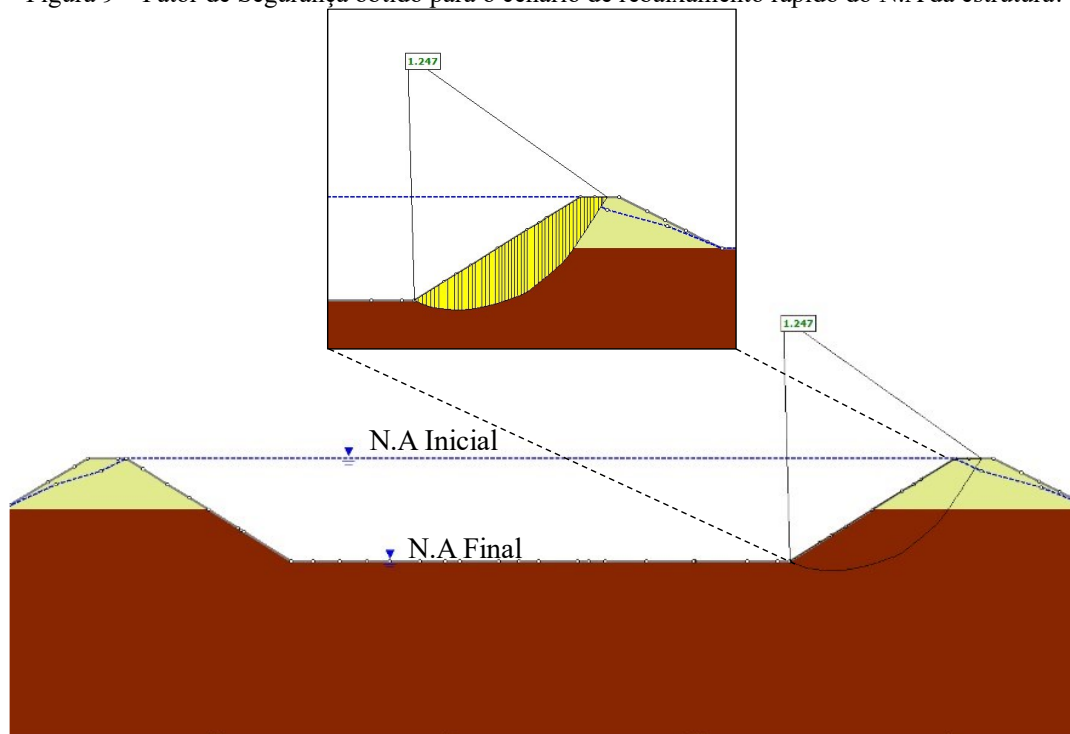


Fonte: Autores (2024).

Sendo assim, para o cenário de rebaixamento rápido (*Rapid Drawdown*) da estrutura, considerou-se o nível d'água inicial do reservatório na crista. Tendo isso em vista, optou-se pelo método de análise de *Rapid Drawdown* utilizando o *Stress Effective using B-Bar*. Dado que o material predominante na estrutura é argila, tendo um comportamento não drenado, essa abordagem demonstra mais adequada, visto que desenvolverá pressão excessiva nos poros com a mudança da tensão vertical, conforme previsto pelo método.

A norma vigente não contempla fatores de segurança no cenário de rebaixamento rápido. Sendo assim, para este caso, o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (2002) foi consultado e determina um coeficiente mínimo de segurança entre 1,2 e 1,3. Ao simular esse cenário, considerou-se o esvaziamento por completo do reservatório e, como resultado, obteve-se um fator de segurança de 1,25, conforme apresentado na Figura 9, sendo dentro do intervalo exigido pelo manual. Adicionalmente, as forças resistentes atuantes neste cenário superam as forças atuantes ($FS > 1$), assegurando a estabilidade.

Figura 9 – Fator de Segurança obtido para o cenário de rebaixamento rápido do N.A da estrutura.



Fonte: Autores (2024).

Sendo assim, tendo em vista os resultados supracitados, é válido afirmar que devido à complexidade e à irregularidade geométrica do objeto de estudo, a abordagem tridimensional da análise revelou-se promissora, podendo analisar os fatores de segurança com maior assertividade. Essa abordagem permitiu a identificação das áreas mais críticas do tanque em diversos cenários testados, considerando a interferência longitudinal da estrutura no fator de segurança. Com base nisso, foi viável simplificar a análise de outros cenários para um modelo bidimensional por meio de *software* como Slide2, visto que após a avaliação tridimensional, tem-se mais assertividade dos pontos de fragilidade da estrutura, podendo assim avaliar de forma bidimensional com maior precisão. Ademais, notou-se que as duas metodologias empregadas de análise de equilíbrio limite, embora diferencie-se no quesito da simplificação das condições de equilíbrio, não houve resultados com diferença expressiva em termos de fator de segurança.

4. CONCLUSÃO

Este estudo visou analisar a estabilidade de um piscinão para abastecimento de água com capacidade aproximada de 1,3 milhão de m³. Para isso, análises tridimensionais e bidimensionais foram empregadas por meio dos *softwares* Slide3® e Slide2®, respectivamente,

de forma a obter fatores de segurança críticos para os cenários finais de construção, sem e com enchimento, e rebaixamento rápido.

Os cenários avaliados durante este estudo foram aqueles em que tendem a apresentar como críticos em análises de estabilidade em taludes e encostas. Sendo assim, mediante os fatores apresentados pode-se concluir que em todas as situações a estabilidade foi garantida e atendem aos requisitos presentes na norma ABNT NBR 11682:2009.

Por fim, pode-se concluir que a estabilidade de taludes pode ser abordada por meio de várias metodologias, o que demanda uma compreensão profunda das aplicações e limitações de cada uma delas. Um aspecto fundamental nessas análises está intimamente ligado às características geotécnicas da estrutura em questão, as quais determinam a escolha da metodologia e do tipo de análise apropriado. Assim, ressalta-se que os resultados deste estudo foram obtidos com base nos parâmetros geotécnicos considerados nas análises realizadas. No entanto, é crucial reconhecer que tais parâmetros podem não refletir precisamente a complexidade do contexto específico, dada a variabilidade inerente a esses parâmetros na situação real, o que pode influenciar nas conclusões alcançadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo suporte fornecido na obtenção das licenças dos *softwares* utilizados neste estudo.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682:** Estabilidade de Encostas. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 33 p.

CAPUTO, Homero Pinto. 1987. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1987. v. 3.

CODUTO, Donald P.. **Geotechnical Engineering: principles and practices**. Pomona: Pearson, 1998. 800 p.

COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos E.M. **Análise do Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), v. 2, n.2, 206 p., jul./dez. 1997

G1 TRIÂNGULO. **VÍDEO: Barragem rompe, arrasta Hilux, patrola e causa estragos em fazenda no interior de MG**. G1 Notícias Triângulo e Alto Paranaíba. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2023/03/31/barragem-rompe-arrasta-hilux-patrola-e-causa-estragos-em-fazenda-no-interior-de-mg.ghtml>. Acesso em: 27 de novembro de 2023.

GARCIA, Jean Rodrigo; ALBUQUERQUE, Paulo José Rocha de. **Evaluation of DMT and CPT Parameters to be used in Numerical Modeling of Piles**. Engineering, Geology. 2015.

GODOY, Nelson Silveira de. **Fundações: Notas de aula**, Curso de graduação. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1972,

G1 TRIÂNGULO E ALTO PARANAÍBA. **Santa Juliana e Perdizes vão receber R\$ 3 milhões como compensação por rompimento de barragem de água**. G1 Notícias Triângulo e Alto Paranaíba. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/triangulo-mineiro/noticia/2022/06/26/santa-juliana-e-perdizes-vao-receber-r-3-milhoes-como-compensacao-por-rompimento-de-barragem-de-agua.ghtml>. Acesso em: 27 de novembro de 2023.

KULHAWY, Fred H; MAYNE, Paul W. **Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design**. New York: Electric Power Research Institute, 1990.

MASSAD, Façal. **Obras de terra, curso básico de Geotecnia**. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 216 p.

MEDEIROS, C. H. **Segurança de barragens: O que fazer para convergir teoria e prática?** In: XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2005, Goiânia. Anais... Goiânia: CBDB, 2005. 13 p.

MENEZES, Daisy Shaianne Araujo Borges de. **Classificação dos Danos Decorrentes da Ruptura de Barragens de Acumulação de Água. Estudo de Caso: Barragem De Santa Helena – BA**. 2016. 161 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de Segurança de Barragens**. 2002

RIBEIRO JUNIOR, Carlos Alberto. **Análise numérica de escorregamento em encostas**. 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

SILVA, João Paulo Moreira da. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes**. 2009. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2011.

TAYLOR, Donald W. **Fundamentals of Soil Mechanics**. 1st. ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1948. 700 p.

TEIXEIRA, A.H. **Análise, Projeto e Execução de Fundações**. 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia PROJETO. Anais...Rio de Janeiro: ABNT: ABMS, 1996.