



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CAIO ROGERIO SOUSA SIQUEIRA

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE LOCALIZADO EM
FORTALEZA -CE

RUSSAS - CE

2023

CAIO ROGERIO SOUSA SIQUEIRA

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE LOCALIZADO EM
FORTALEZA -CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará Campus de Russas, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Ms. Andriele Nascimento de
Souza

RUSSAS – CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S629a Siqueira, Caio Rogerio Sousa.
Análise da estabilidade de um talude localizado em fortaleza -ce / Caio Rogerio Sousa Siqueira. – 2023.
56 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2023.
Orientação: Prof. Me. Andriele Nascimento de Souza.

1. estabilidade de talude. 2. fator de segurança. 3. taludes urbanos. 4. slop/w. I. Título.

CDD 620

CAIO ROGERIO SOUSA SIQUEIRA

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE LOCALIZADO EM
FORTALEZA -CE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal
do Ceará - Campus Russas, como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Ms. Andriele Nascimento de Souza (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dr. Daniela Lima Machado da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ms. Paulo Leite de Souza Júnior
Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN)

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus por ser a luz que me guia, me protege, me traz conforto e que ama a todos nós acima de tudo, sua presença é uma benção que me fortalece e inspira diariamente, agradeço também por ter colocado no meu caminho minha família e todos os irmãos que irei falar mais adiante.

Gostaria de expressar meu imenso agradecimento ao meu pai, Carlos Alberto, pelo exemplo de homem de bem e empresário de sucesso, além de ser meu maior espelho e por nunca deixar faltar amor e carinho, me mostrou que é por meio de muita dedicação e perseverança que alcançamos nossas conquistas. Também quero agradecer à minha mãe, Jaqueline Maria, por ser minha melhor amiga, parceira e motivadora no decorrer de todos esses anos, e que me ensinou a não fazer para outros o que você não gostaria que fizesse para você. Enfim, agradeço a vocês dois por sempre acreditar e me inspirar.

Expresso meus sinceros agradecimentos à minha orientadora, Prof^ª. Andriele Nascimento de Souza, pela confiança, zelo, empenho e acompanhamento. Seu suporte técnico foi fundamental, especialmente no período final da graduação.

Quero estender meus agradecimentos aos professores, técnicos e estagiários do Laboratório de Transportes da UFC, cuja colaboração e conhecimento contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os trabalhadores e estudantes que integram e acreditam na UFC. A passagem por esta instituição não foi apenas uma jornada acadêmica; foi uma experiência que enriqueceu meu crescimento profissional e pessoal. Saio desta universidade como um profissional mais capacitado e como um indivíduo mais virtuoso. Manifesto minha solidariedade a todos os colegas de jornada, compartilhando os desafios e as conquistas ao longo do caminho.

RESUMO

No contexto da construção civil, a segurança é uma consideração de extrema relevância, dada a complexidade e as múltiplas variáveis envolvidas. Essa importância é ainda mais acentuada na geotecnia, que requer uma atenção especial em projetos, como no caso da análise de estabilidade de taludes. Essa problemática adquire uma significativa relevância devido ao crescimento urbano e, por consequência, à ocupação de áreas até então desconhecidas. Entretanto, é notável a análise da estabilidade de taludes não seja algo comum no contexto das operações de vias. Isso acontece, devido ao crescimento desordenado, sendo qualquer ruptura em taludes exige uma recuperação dispendiosa e, muitas vezes, acarreta consequências significativas, tanto em termos ambientais quanto em perdas de vidas humanas.

É crucial ressaltar, em muitos cenários, essas falhas poderiam ser evitadas ou reduzidas caso houvesse um conhecimento já existente. Nesse sentido, o propósito deste estudo é caracterizar a amostra deformada de solo presente no talude do Morro Santa Terezinha, localizado no bairro Mucuripe, em Fortaleza - CE, que passou por um intenso processo de urbanização e ocupação desordenada a partir da década de 80, e no ano de 2015, em um deslizamento de parte da encosta após uma temporada de chuvas intensas, seguido pelo seu processo de revitalização, requalificação e reurbanização promovido pelo Governo do Ceará, em conjunto com a Prefeitura de Fortaleza, e concluído em 2018. Após a realização dessa caracterização, procedeu-se à análise da estabilidade do talude por meio da utilização do software SLOPE/W. O objetivo dessa análise era determinar o fator de segurança, o qual foi obtido por meio da realização de cinco simulações, cada uma empregando os métodos de Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer e Morgenstern-Price. Essas simulações visaram a verificar os resultados encontrados a partir de diferentes abordagens.

Os resultados revelaram que o tipo de solo é uma areia mal graduada, também, em todos os métodos de análise utilizados, o fator de segurança (FS) se situou abaixo do valor crítico de 1,5, indicando uma instabilidade do talude e a chance de uma ruptura iminente. Essa situação reforça a urgente necessidade de atenção e medidas corretivas para garantir a segurança e a integridade das obras rodoviárias, bem como para mitigar potenciais impactos ambientais e riscos à vida humana.

Palavras-chave: estabilidade de talude; fator de segurança; taludes urbanos; slop/w.

ABSTRACT

In the context of civil construction, safety is an extremely important consideration, given the complexity and multiple variables involved. This importance is even more accentuated in geotechnics, which requires special attention in projects, as in the case of slope stability analysis. This problem acquires significant relevance due to urban growth and, consequently, the occupation of hitherto unknown areas. However, it is notable that the analysis of slope stability is not common in the context of road operations. This happens due to disorderly growth, and any failure in slopes requires expensive recovery and often leads to significant consequences, both in environmental terms and in loss of human life.

It is crucial to highlight that in many scenarios, these failures could be avoided or reduced if there was already existing knowledge. In this sense, the purpose of this study is to characterize the deformed soil sample present on the slope of Morro Santa Terezinha, located in the Mucuripe neighborhood, in Fortaleza - CE, which went through an intense process of urbanization and disorderly occupation from the 1980s onwards, and in 2015, in a landslide on part of the slope after a season of intense rain, followed by its revitalization, requalification and reurbanization process promoted by the Government of Ceará, together with the City of Fortaleza, and concluded in 2018. After to carry out this characterization, the slope stability was analyzed using the SLOPE/W software. The objective of this analysis was to determine the safety factor, which was obtained by carrying out five simulations, each using the methods of Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer and Morgenstern-Price. These simulations aimed to verify the results found from different approaches.

The results revealed that the type of soil is poorly graded sand, also, in all analysis methods used, the safety factor (FS) was below the critical value of 1.5, indicating slope instability and the chance of an imminent rupture. This situation reinforces the urgent need for attention and corrective measures to ensure the safety and integrity of road works, as well as to mitigate potential environmental impacts and risks to human life.

Keywords: slope stability; safety factor; urban slopes; slop/w.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de escorregamento.....	17
Figura 2 - Esquema de um espalhamento.....	18
Figura 3 - Esquema de um escoamento.....	19
Figura 4- Esquema de erosão.....	19
Figura 5 - Localização da coleta das amostras.....	23
Figura 6 - Escavação e coleta das amostras.....	23
Figura 7 - Amostra utilizada.....	24
Figura 8 - Amostra na estufa.....	25
Figura 9 - Peneiramento e pesagem.....	25
Figura 10 - Hexametáfosfato e aparelho de dispersão.....	26
Figura 11 - Transferência da mistura contida no copo dispersor para a proveta.....	27
Figura 12 - Transferência da mistura.....	28
Figura 13 - Compactação com soquete.....	29
Figura 14 - Extrator de corpo de prova.....	29
Figura 15 - Processo de pesagem e retirada do aquecimento.....	30
Figura 16 - Adição de água destilada e pesagem do picnômetro.....	31
Figura 17 - Montagem do permeâmetro.....	32
Figura 18 - Preparação do corpo de prova.....	33
Figura 19 - Pesagem e retirada do corpo de prova.....	33
Figura 20 - Geometria do talude no SLOP/W.....	34
Figura 21 - Curva granulométrica.....	37
Figura 22 - Curva de compactação.....	38
Figura 23 - Dados iniciais do ensaio de permeabilidade.....	39
Figura 24 - Gráfico da tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal.....	40
Figura 25 - Gráfico da variação volumétrica versus deslocamento horizontal.....	41
Figura 26 - Gráfico da tensão cisalhante versus tensão normal.....	41
Figura 27 - Método de Janbu.....	43
Figura 28 - Método de Spencer.....	44
Figura 29 - Método de Bishop.....	44
Figura 30 - Método de Fellenius.....	45
Figura 31 - Método de Morgenstern-Price.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos solos - SUCS.....	15
Quadro 2 - Fatores de segurança mínimos.	16
Quadro 3 - Peneiramento grosso.....	36
Quadro 4 - Resumo em % da sedimentação.	37
Quadro 5 - Ensaio densidade real.	39
Quadro 6 - Coeficiente de permeabilidade.	40
Quadro 7 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira CE Rodovia Estadual do Ceará
DNIT	Departamento nacional de Infraestrutura de Transportes
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation
LL	Limite de Liquidez
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
FS	Fator de Segurança
LP	Limite de Plasticidade
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
ASTM	American Society for Testing and Materials

LISTA DE SÍMBOLOS

c'	Coesão
Ø	Ângulo de atrito
P	Peso próprio da fatia
b	Largura da fatia
l	Comprimento do arco na base da fatia
α	Ângulo de inclinação
u	Poropressão atuante na base da fatia
M	Momento existente na fatia
K	Coefficiente de permeabilidade
σ	Tensão normal
τ	Tensão de cisalhamento
w	Umidade ótima de compactação
L	Espessura do corpo de prova
A	Área da seção transversal do corpo de prova
a	Área da seção transversal da bureta
M	Massa úmida do corpo de prova
G	Grau de compactação
ΔV	Variação volumétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	13
1.2. JUSTIFICATIVA	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO.....	14
2.1.1. Sistema Unificado de Classificação do Solo – SUCS	14
2.2. ESTABILIDADE DE TALUDES	15
2.3. AGENTES INSTABILIZANTES - MOVIMENTOS DE MASSA.....	16
2.4. MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES.....	19
2.4.1. Método de Fellenius.....	20
2.4.2. Método de Bishop Simplificado.....	21
2.4.3. Método de Spencer	21
2.4.4. Método de Morgenstern-Price.....	21
2.4.5. Método de Janbu Simplificado.....	22
2.4.6. Estabilidade de Taludes no software	22
3. METODOLOGIA.....	22
3.1. ÁREA DE ESTUDO	22
3.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	24
3.3. GRANULOMETRIA	24
3.4. COMPACTAÇÃO.....	28
3.5. DENSIDADE REAL	30
3.6. PERMEABILIDADE	31
3.7. CISALHAMENTO DIRETO	32
3.8. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES – SLOPE W.....	34
4. RESULTADOS	36
4.1. GRANULOMETRIA	36

4.2. COMPACTAÇÃO.....	38
4.3. DENSIDADE REAL	39
4.4. PERMEABILIDADE	39
4.5. CISALHAMENTO DIRETO.....	40
4.6. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO QUE COMPÕE O TALUDE	42
4.7. ESTABILIDADE DE TALUDE NO SLOPE/W	43
5. CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

A superfície inclinada composta de solo ou rocha é conhecida como talude, representa um elemento fundamental na construção civil e se divide em duas categorias distintas: taludes naturais e artificiais. Os taludes naturais, frequentemente referidos como morros ou encostas, ocorrem de maneira espontânea na natureza. Por outro lado, os taludes artificiais são concebidos e construídos por ação humana, geralmente como parte de projetos que envolvem a modificação da vegetação, topografia e paisagem de uma região. Isso ocorre em diversos empreendimentos, como construções de rodovias, aterros, barragens e empreendimento afins.

A condição que torna os taludes particularmente suscetíveis a instabilidades é o desnível existente no terreno. Devido a essa inclinação, essas estruturas estão sujeitas às forças da gravidade, que atuam incessantemente, e, em alguns casos, a forças de percolação, que podem deslocar o solo para baixo. Esse potencial de movimentação do solo representa um desafio significativo que requer uma análise detalhada e um planejamento cuidadoso, com a finalidade de garantir a estabilidade e a segurança das estruturas e áreas circundantes. Nesse contexto, as construções civis exigem uma vigilância constante, particularmente no que concerne à segurança. Isso se deve à profundidade das variáveis envolvidas, que operam tanto no domínio temporal quanto no espacial, abarcando os diversos materiais utilizados na construção. Como destacado por Souza (2014), a preocupação com a segurança é uma questão que perdura há muitos anos no âmbito da construção civil, com uma atenção especial voltada para questões abrangendo taludes de solo, movimentos de massa e fraturas.

O Morro Santa Terezinha, situado no Bairro Mucuripe, na cidade de Fortaleza, estado do Ceará, enfrentou desafios significativos durante a estação chuvosa de 2015. Esses desafios resultaram na necessidade de elaboração e implementação de um projeto abrangente de revitalização e reurbanização da encosta, conduzido pelo Governo do Estado. A importância dessa intervenção transcende a esfera local, pois a área em questão não apenas se encontra dentro de um ambiente urbano densamente habitado, mas também possui um considerável potencial turístico.

Antes da implementação do projeto de revitalização, o Morro Santa Terezinha enfrentava um processo erosivo constante, um fenômeno comumente observado na região. Esse processo representava uma preocupação legítima, especialmente em regiões urbanas, devido à sua associação recorrente com impactos sociais, econômicos e ambientais, conforme discutido por (CARNEIRO, 2013).

A revitalização dessa encosta, portanto, se configura como uma iniciativa de grande relevância, não apenas para a comunidade local, mas também como um estudo de caso exemplar para compreender e abordar os desafios intrínsecos à gestão de áreas vulneráveis a processos erosivos em ambientes urbanos.

Portanto, Castro, Rodrigues e Bezerra (2015, p. 5) afirmam que

na Geotecnia, a estabilização de taludes pode ser considerada como um dos principais problemas a serem solucionados e controlados. Um talude compreende qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou de terra e rocha. Pode ser natural, como no caso de encosta, ou artificial, como talude de corte e aterro. Os condicionantes naturais, tais como de ordem geológica, hidrológica ou geotécnica, tornam a estabilidade de um maciço de solo e rocha de grande complexidade. A importância de estudos de estabilidade de taludes deriva do crescente número de obras realizadas, dentre as quais a grande maioria necessita da regularização e contenção de terreno sobre o qual a obra será realizada. Construção de rodovias, ferrovias, barragens de água, aterros sanitários, subsolos, entre outros, necessitam constantemente de investigação geotécnica para garantir que o maciço não se rompa.

1.1. OBJETIVOS

O presente estudo visa realizar uma investigação abrangente da caracterização e estabilidade do talude do Morro Santa Terezinha, localizado no bairro do Mucuripe, em Fortaleza, Ceará.

Os objetivos específicos incluem:

- a) Compreender as características geológicas do solo e outras informações pertinentes ao morro;
- b) Identificar a condição do talude;
- c) Analisar e avaliar soluções.

1.2. JUSTIFICATIVA

O talude do Morro Santa Terezinha apresenta evidências de deslizamentos, como ocorreu em 2015, quando chegou a estação chuvosa que causou o deslizamento de terra, interrompendo a avenida e bloqueando a linha férrea.

Compreender os atributos geotécnicos do solo é de extrema importância, pois essa compreensão permite a antecipação do comportamento do solo, visando à identificação de soluções adequadas para potenciais desafios futuros. Portanto, o propósito deste trabalho é

conduzir uma análise detalhada das características do solo que constitui o talude, bem como avaliar a sua estabilidade.

É fundamental enfatizar que os danos decorrentes de um futuro colapso nesse talude pode ser de grande magnitude, não apenas em termos financeiros, mas também em termos de impactos ambientais e de segurança pública. A investigação dessas questões geotécnicas não apenas proporcionará um maior entendimento sobre o terreno em questão, mas também oferecerá discernimentos valiosos capazes de ser aplicados para mitigar os riscos associados a segurança de taludes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

O solo desempenha um papel crucial na construção civil, a classificação adequada é, portanto, essencial para orientar o desenvolvimento de projetos de engenharia, considerando as características específicas de cada tipo de solo. Com o objetivo de alcançar essa classificação geotécnica, diversos sistemas foram desenvolvidos, cada um com suas próprias especificações e adaptações. Neste trabalho, adotamos o sistema de classificação amplamente reconhecido e utilizado, o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), que fornece uma estrutura abrangente para a classificação de solos com base em suas propriedades.

2.1.1. Sistema Unificado de Classificação do Solo – SUCS

De acordo com o DNIT (2006), o SUCS se baseia nas qualidades de textura e plasticidade dos solos, organizando-os de acordo com seu comportamento geotécnico. Neste sistema, os solos são representados por uma combinação de duas letras. O SUCS leva em consideração uma variedade de características, incluindo as porcentagens de pedregulhos, areias e fração fina, a curva granulométrica, a plasticidade e a compressibilidade dos solos, a partir das quais é estabelecida a divisão entre solos de graduação grossa e solos de graduação fina, conforme especificado na Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos solos - SUCS.

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped.areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped.areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA: 50% ou mais passando pela peneira nº 200 <small>Fonte: DNIT (2006)</small>	SILTES e ARGILAS com LL ≤ 50	ML	Siltos inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.	
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.	
		OL	Siltos orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.	
	SILTES e ARGILAS com LL > 50	MH	Siltos - Areias finas ou siltos micáceos - Siltos elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.	
	Solos Altamente Orgânicos		PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.

Fonte: DNIT (2006).

2.2. ESTABILIDADE DE TALUDES

Os taludes são formados por planos inclinados que definem a fronteira de um volume de solo ou rocha. Essas superfícies podem ser classificadas como naturais, quando resultam da ação intrínseca da natureza, processos geológicos ou intempéries ambientais; ou artificiais, quando concebidos e construídos por intervenção humana.

Conforme abordado por Ayala (2018), a estabilidade de taludes representa uma temática amplamente debatida no âmbito da engenharia civil, particularmente no contexto geotécnico. Nesse contexto, a incessante busca por medidas preventivas e/ou corretivas em áreas urbanas ganha destaque, considerando que eventos de movimentações de terra podem resultar em prejuízos econômicos, ambientais e humanos.

A instabilidade de taludes, que desencadeia rupturas e escorregamentos, geralmente é originada pelos esforços de cisalhamento. Nesse sentido, a resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura. Alternativamente, pode ser compreendida como a tensão cisalhante do solo no plano em que ocorre a ruptura, manifestando-se quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualam à resistência ao cisalhamento (ROCHA, 2019).

A ocorrência de rupturas em maciços, especialmente em empreendimentos urbanos ou de grande tráfego, como rodovias, implica em custos substanciais para a recuperação dessas

áreas. Estes custos poderiam ser evitados ou, ao menos, minimizados, por meio da realização de um estudo apropriado que abranja todos os parâmetros pertinentes à estabilização do maciço (CASTRO et al., 2015).

Segundo Jesus (2015), a avaliação da segurança de taludes é uma tarefa complexa, dada a multiplicidade de variáveis envolvidas, tornando o problema ainda mais intrincado. Contudo, apesar das dificuldades inerentes, a análise da estabilidade de taludes resulta no fator de segurança, representando a relação entre as forças resistentes e solicitantes, bem como na delimitação da superfície de ruptura.

As rupturas ocorrem quando o valor do fator de segurança atinge a unidade, caracterizando a condição de equilíbrio limite, no qual as forças solicitantes se igualam às forças resistentes.

Os valores mínimos aceitáveis para o fator de segurança (FS) em uma obra específica são estabelecidos considerando as implicações para vidas humanas, prejuízos econômicos e ambientais (JESUS, 2015), e podem ser referenciados no Quadro 2.

Quadro 2 - Fatores de segurança mínimos.

Fator de Segurança – FS	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	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: Adaptado da NBR 11682 (2009).

2.3. AGENTES INSTABILIZANTES - MOVIMENTOS DE MASSA

O Brasil é identificado como particularmente propenso a movimentações de massa devido às suas condições climáticas. De acordo com Alves e Mateus (2018), os movimentos de massa abrangem qualquer deslocamento de volume, seja de solo ou rocha, e estão intrinsecamente associados à instabilidade de taludes. Essas movimentações, predominantemente, resultam de uma variedade de fatores, sendo potencialmente influenciadas por forças internas e/ou externas.

Esses fenômenos naturais desencadeiam consequências imediatas tanto para o meio ambiente quanto para a população. É perceptível que a ocorrência de deslizamentos frequentemente coincide com o período chuvoso, uma vez que o solo absorve parte da água,

enquanto outra parte se transforma em escoamento superficial. Quando o solo atinge a saturação, a água não consegue mais infiltrar e se desloca para outras áreas. Nesse cenário, o solo, incapaz de suportar o aumento da pressão-neutra, rompe-se, resultando em deslizamentos de terra nas encostas. Essa compreensão é crucial para a avaliação e mitigação de riscos associados a movimentos de massa em encostas.

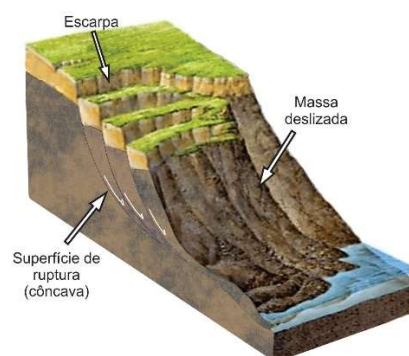
Assim, conforme destacado por Rocha (2019), a investigação desses movimentos de massa assume uma relevância substancial para a compreensão de suas causas e a identificação de estratégias eficazes de prevenção e/ou monitoramento. Contudo, é importante ressaltar que há diversas abordagens de classificação relacionadas a esses movimentos, e este trabalho apresentará alguns desses métodos.

- Escorregamento;

Configura-se como um deslocamento de massa claramente definido, caracterizado por uma execução ágil que se manifesta em um breve intervalo de tempo. Sua principal influência reside nas condições pluviométricas, induzindo a saturação dos taludes e o incremento do teor de água no interior do solo.

Em adição a esse fenômeno, Costa e Levindo (2013) postulam que os escorregamentos são passíveis de previsão, uma vez que a grande maioria desses movimentos de massa ocorre em regiões previamente afetadas. Um indicador potencial para a detecção iminente de um escorregamento inclui a observação de fissuras emergentes no topo ou na base do talude. O esquematizado desse movimento de massa pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema de escorregamento.

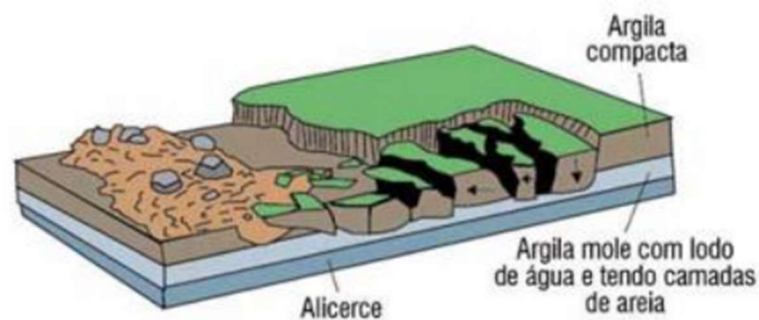


Fonte: Facebook Geologia básica (2019).

- Espalhamento;

Corresponde a uma expansão de uma massa coesiva, constituída por solo ou rocha, associada a um afundamento generalizado da superfície da massa fraturada de material coesivo para uma camada inferior de material menos rígido (COSTA E LEVINDO, 2013), como ilustrado na Figura 2. Conforme Varnes (1978), os escoamentos que ocorrem em formações rochosas são caracterizados por movimentos carentes de superfícies de ruptura claramente definidas, ao passo que, em solos, se desenvolvem por meio da liquefação dos materiais presentes em camadas mais profundas.

Figura 2 - Esquema de um espalhamento.



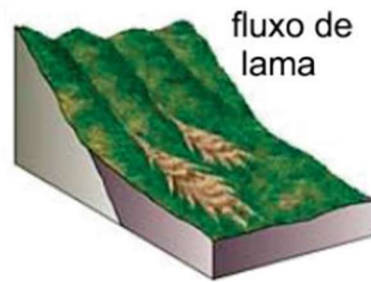
Fonte: Costa e Levindo (2013).

- Escoamento;

Conforme destacado por Alves e Mateus (2018), o fenômeno de escoamento caracteriza-se por induzir deformações ou movimentos contínuos que, ao longo do tempo, podem manifestar-se de maneira visível ou imperceptível na estrutura. Nesse contexto, segundo Guidicini (1983), observam-se dois tipos preponderantes de escoamento: rastejo e corrida de detritos.

Este processo transcorre de maneira gradual, estendendo-se por extensões significativas e apresentando uma forma estreita, resultando na acumulação de detritos na base dos taludes, como ilustrado na Figura 3 (Costa e Levindo, 2013).

Figura 3 - Esquema de um escoamento.

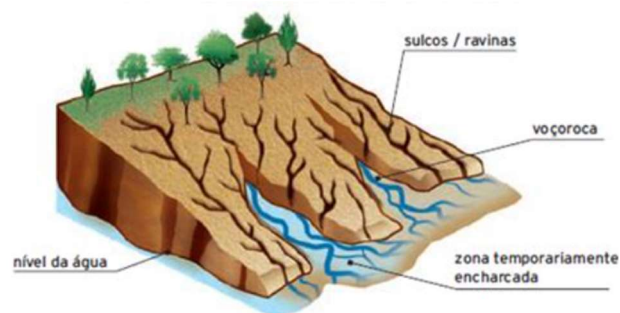


Fonte: Facebook Geologia básica (2018).

- Erosão.

A erosão é notoriamente caracterizada pela deterioração da estrutura do solo e sua subsequente remoção, sendo depositado nas áreas mais baixas do relevo. Esse fenômeno pode manifestar-se por meio de escoamento laminar ou concentrado, sendo suscetível a diversas causas, incluindo o escoamento de água superficial, a ausência de dissipadores de energia, a falta de cobertura vegetal e deficiências nos sistemas de drenagem (Costa e Levindo 2013), conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4- Esquema de erosão.



Fonte: Teixeira, W. et. al (Org.).

2.4. MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES

Conforme ressaltado por Dyminski (2010), a estabilidade de taludes está intrinsecamente vinculada às propriedades do solo, às condições locais de fluxo, à inclinação e à altura adequada do projeto. Taludes naturais, em particular, requerem uma vigilância e controle mais rigorosos.

A análise de estabilidade de taludes é sustentada por métodos matemáticos e numéricos, visando avaliar a possibilidade de ocorrência de movimentos de massa, como destacado por Ayala (2018). Nesse contexto, a NBR 11682/2009 estabelece que o fator de segurança (FS),

resultado da análise, está diretamente relacionado à resistência ao cisalhamento do material presente no talude, notadamente, o solo.

Devido à complexidade e variabilidade dos solos, a segurança do talude pode ser consideravelmente reduzida, aumentando, assim, a probabilidade de ocorrer rupturas. Conforme enfatizado por Ayala (2018), caso $FS > 1$, o talude é considerado estável; no entanto, se $FS = 1$, o talude está iminente à ruptura.

É relevante observar que os métodos de análise empregados na avaliação da estabilidade de taludes são categorizados conforme a quantidade de equações de equilíbrio, ou seja, levando em consideração as forças horizontais, verticais e momentos, sendo distinguidos como métodos rigorosos e não rigorosos, conforme abordado por Souza (2019). Essa classificação é determinada pelas premissas e simplificações adotadas por cada método, bem como pela configuração da superfície de ruptura subjacente. Conforme exposto por Souza (2014), alguns dos métodos notáveis compreendem o Método de Fellenius, Método de Bishop, Método de Janbu, Método de Spencer e Método de Morgenstern-Price. A distinção entre esses métodos reside nas diferentes hipóteses consideradas em seus modelos, bem como nas simplificações específicas adotadas para facilitar a análise da estabilidade do talude. O embasamento teórico proporcionado por esses métodos é crucial para a compreensão e seleção criteriosa da abordagem mais apropriada em uma dada situação geotécnica.

2.4.1. Método de Fellenius

Este método propõe a determinação do Fator de Segurança (FS) por meio de uma equação linear, eliminando a necessidade de empregar um processo iterativo. Além disso, destaca-se que a superfície de ruptura considerada nesse método é de natureza circular.

Embora o método simplifique as forças entre as fatias, presumindo que tais forças sejam paralelas à base da fatia e, assim, as negligencie, observa-se, conforme argumentado por Fredlund (1977), que tal afirmação carece de precisão. Isso se deve ao fato de que, ao transitar de uma fatia para outra, ocorre uma mudança significativa na inclinação das forças. Conforme apontado por Fiori (2015), é destacado que este método tende a superestimar o Fator de Segurança (FS), conduzindo a valores inferiores.

2.4.2. Método de Bishop Simplificado

Este método teve início no ano de 1955 e, desde então, tem como objetivo principal realizar análises em superfícies circulares, embora sua aplicação possa ser estendida a superfícies não circulares (Ferreira, 2012).

Conforme destacado por Alves e Mateus (2018), o cálculo do fator de segurança no método de Bishop é conduzido por meio de um processo iterativo e utilizando uma equação que considera a força atuante no centro da base da fatia. Este método negligencia as forças existentes entre os cortes entre as fatias, abordando de maneira satisfatória apenas o equilíbrio de momentos.

2.4.3. Método de Spencer

Conforme apresentado por Ferreira (2012), o Método de Spencer foi inicialmente proposto em 1967 e atende tanto ao equilíbrio de forças quanto ao equilíbrio de momentos, sendo classificado como um método rigoroso. De acordo com Silva (2011), a relação entre as forças interlamelares tangenciais e normais mantém uma inclinação constante ao longo de todo o talude.

2.4.4. Método de Morgenstern-Price

Este método, originado em 1965, destaca-se como um dos métodos rigorosos de análise, uma vez que atende às condições de equilíbrio tanto de forças quanto de momentos, conforme destacado por Ferreira (2012). Souza (2019) o avalia como um método mais abrangente, capaz de considerar superfícies de ruptura de qualquer natureza.

Conforme observado por Souza (2019), "as forças de interação entre as fatias de largura infinitesimal são aproximadas por uma função, $f(x)$, multiplicada por um fator adimensional, λ , previamente especificado". A escolha dessa função ocorrerá após a realização de uma avaliação prévia pelo engenheiro responsável, levando em consideração a variação da inclinação da resultante das forças entre as fatias ao longo de todo o maciço do talude (Gerscovich, 2013).

2.4.5. Método de Janbu Simplificado

Conforme Ferreira (2012), este método "atende às três equações de equilíbrio apenas em sua forma generalizada", uma característica também destacada por Souza (2014). Este último autor considera qualquer superfície de ruptura e a presença de uma linha de empuxo assumida, que desempenha o papel crucial na determinação da resultante das forças entre as fatias.

Devido à sua natureza iterativa e à demanda computacional significativa, optou-se por realizar algumas simplificações, como desconsiderar as forças entre as fatias, conforme sugerido por Silva (2011). Portanto, Gerscovich (2013) recomenda a aplicação do Método de Janbu Simplificado apenas em taludes homogêneos.

2.4.6. Estabilidade de Taludes no software

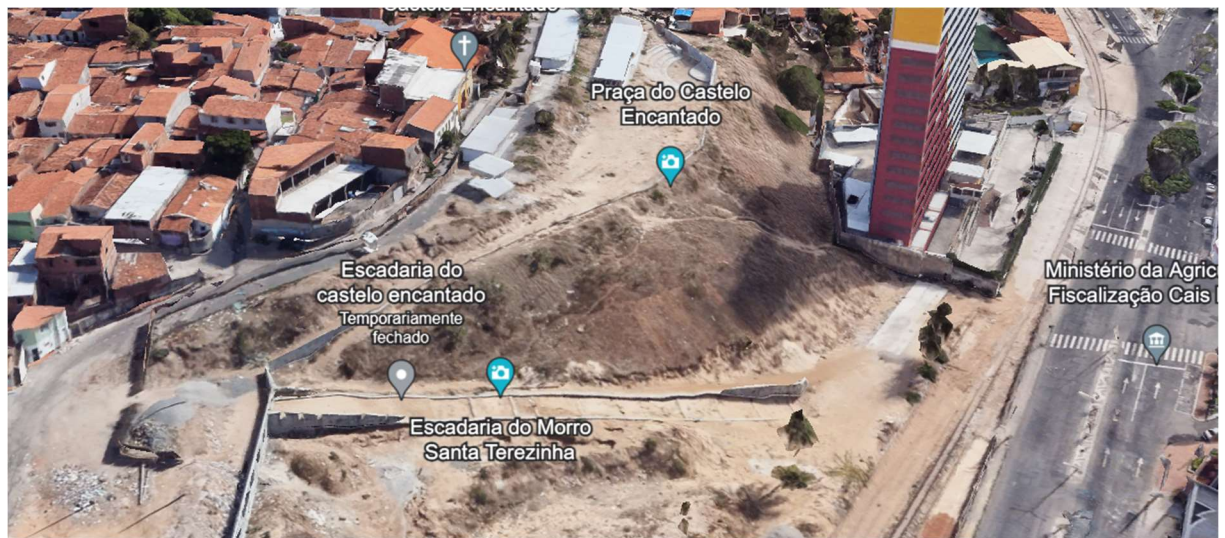
A avaliação da estabilidade de taludes é frequentemente conduzida por meio de programas computacionais especializados. Estes programas desempenham um papel crucial ao facilitar os cálculos e proporcionar uma maior precisão nos resultados obtidos. No contexto deste trabalho, optou-se pelo uso do software SLOPE/W 2019. Adicionalmente, serão realizadas comparações entre os resultados obtidos por cada método empregado na análise da estabilidade do talude em questão.

3. METODOLOGIA

3.1. ÁREA DE ESTUDO

A região de interesse abrange um talude natural no Morro Santa Terezinha, situado no Bairro do Mucuripe, na cidade de Fortaleza, estado do Ceará, conforme ilustrado na Figura 5. Este talude demonstra evidências de movimentações de massa, indicando potenciais deslizamentos e, por conseguinte, acarretando impactos significativos na estabilidade do local.

Figura 5 - Localização da coleta das amostras.



Fonte: Google Earth (2019).

No dia 7 de setembro de 2023, procedeu-se à coleta de quatro amostras deformadas de solo. Cada uma dessas amostras foram devidamente acondicionada em sacos plásticos transparentes e, em seguida, alocada em recipientes individuais, aproximadamente com capacidade para 2,5 kg, totalizando 10 kg de amostra deformada, conforme representado na Figura 6. Durante a escavação, foram adotadas medidas cautelosas para evitar a presença de raízes, vegetação ou quaisquer outras interferências que pudessem comprometer a qualidade e representatividade das amostras.

Figura 6 - Escavação e coleta das amostras.



Fonte: Autoria Própria (2023).

3.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Conforme estabelecido pela NBR 6457/86, os ensaios de compactação e caracterização do solo, abrangendo análise granulométrica e determinação dos limites de liquidez e plasticidade, requerem métodos específicos para a preparação das amostras. No início dos ensaios, foi selecionada uma das amostras, conforme evidenciado na Figura 7, a qual, em conformidade com as diretrizes normativas, passou por um processo prévio de secagem.

Figura 7 - Amostra utilizada.



Fonte: Autoria Própria (2023).

3.3. GRANULOMETRIA

Para a preparação das amostras destinadas aos ensaios de caracterização, em conformidade com as diretrizes da NBR 6457/86, foram empregados dois procedimentos distintos: um com secagem prévia e outro sem. Contudo, para o ensaio de granulometria, é imperativo que a amostra seja submetida a um processo de secagem prévia.

Após a etapa de secagem, a amostra foi submetida à peneira de 2,0mm, seguindo as prescrições da NBR 7181/2016. Durante esse procedimento, foram adotadas precauções meticulosas para garantir a retenção, na peneira, apenas dos grãos com dimensões superiores à abertura da malha. Posteriormente, a porção retida na peneira de 2,0mm foi submetida a lavagem e colocada na estufa a 105°C ou 110°C. O material resultante desse processo foi empregado no peneiramento grosso. As etapas mencionadas estão representadas nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

Figura 8 - Amostra na estufa.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 9 - Peneiramento e pesagem.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Em virtude da fina textura do solo em análise, é imperativo conduzir o ensaio de granulometria conjunta, que compreende as etapas de peneiramento e sedimentação. A partir do material retido pela peneira de 2,0 mm, conforme preconizado pela NBR 7181/2016, uma parcela de 70 g da amostra, representativa da fração fina do solo, é selecionada para dar início à fase de sedimentação. Posteriormente, procede-se à adição de 125 ml de solução de hexametáfosfato de sódio em um béquer, desempenhando o papel de defloculante. Essa medida

é essencial para separar as partículas do solo, possibilitando que os grãos sedimentem de maneira individualizada, evitando a formação de torrões que poderiam comprometer a precisão dos resultados obtidos no ensaio.

Conforme preconizado pela norma específica para a realização desse ensaio, é determinado que todo o material seja imerso no defloculante e mantido em repouso por, no mínimo, 12 horas. No âmbito deste estudo, esse período de imersão foi estendido para aproximadamente 24 horas. Após a etapa de repouso, a mistura resultante deve ser transferida para um copo de dispersão, eliminando qualquer resíduo que tenha aderido ao béquer mediante o uso de água destilada. Em seguida, a amostra é submetida à ação do aparelho dispersor pelo período de 15 minutos, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Hexametáfosfato e aparelho de dispersão



Fonte: Autoria Própria (2023).

Após a conclusão do processo de dispersão, a mistura resultante foi transferida para uma proveta e lavada com água destilada até atingir o volume total de 1000 ml. Em seguida, procedeu-se à agitação da proveta, cobrindo-a com uma das mãos e, com auxílio da outra, realizaram-se movimentos suaves de rotação por um período de 1 minuto. Posteriormente, a proveta foi colocada sobre uma superfície plana, permanecendo em repouso e utilizando um cronômetro, foram realizadas leituras no densímetro nos intervalos de sedimentação conforme a Figura 11.

Figura 11 - Transferência da mistura contida no copo dispersor para a proveta.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Após iniciar o cronômetro, o densímetro foi introduzido cuidadosamente na dispersão, realizando as três primeiras leituras. Subsequentemente, o densímetro foi retirado da dispersão de maneira lenta e cuidadosa, evitando qualquer agitação na mistura. A cada leitura subsequente, o densímetro era imerso na dispersão aproximadamente 20 segundos antes do momento da leitura. Durante todo o ensaio, a temperatura da dispersão foi monitorada.

Após a última leitura do densímetro, o conteúdo da proveta foi transferido para a peneira de 0,075 mm, utilizando água para remover qualquer resíduo aderido às paredes da proveta. O material retido foi então colocado em uma estufa a uma temperatura de 105°C ou 110°C para secagem. Em seguida, realizou-se o peneiramento fino, passando o material pelas peneiras de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, respectivamente, marcando o término do ensaio de granulometria.

Figura 12 - Transferência da mistura.



Fonte: Autoria Própria (2023).

3.4. COMPACTAÇÃO

O procedimento adotado para a determinação do teor de umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima, conforme normatizado pela NBR 7182/2016, tem como finalidade estabelecer a correlação entre esses parâmetros. O ensaio emprega um cilindro metálico, sendo possível optar por um cilindro pequeno de aproximadamente 1000 cm^3 ou um cilindro grande de cerca de 2085 cm^3 . Para este estudo, o cilindro escolhido foi o pequeno, com volume de 997 cm^3 .

A fixação do cilindro à sua base, o acoplamento do cilindro complementar e a conexão do conjunto a uma base rígida foram realizados conforme padrões estabelecidos. A quantidade de solo, conforme preconizado pela NBR 6457/86 para o cilindro pequeno e reuso de material, foi estabelecida em 3 kg da amostra. Este montante foi disposto em uma bandeja metálica, e, de forma gradual, adicionou-se água destilada até obter uma mistura uniforme e homogênea. Com a completa homogeneização do material, deu-se início ao processo de compactação em energia normal, empregando-se três camadas de solo e aplicando-se 26 golpes por camada, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Compactação com soquete.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Após a conclusão da compactação da última camada, conforme a Figura 14, procedeu-se à remoção do cilindro complementar, sendo necessário escarificar o material em contato com a parede do cilindro com o auxílio de uma espátula. Após a retirada do molde cilíndrico, foi observado um excesso de solo compactado que exigiu remoção e nivelamento com o uso de uma régua. Uma vez concluídas essas etapas, o cilindro metálico, juntamente com o solo compactado, foi pesado. Em seguida, por meio de um extrator, o corpo de prova foi removido do molde.

Após a extração do solo, uma pequena porção da amostra foi retirada e transferida para uma cápsula, a qual foi pesada e encaminhada para estufa com o objetivo de determinar a umidade. O ensaio de compactação foi repetido cinco vezes neste estudo, visando a obtenção de dois pontos no ramo seco, um próximo à umidade ótima, e dois no ramo úmido da curva de compactação.

Figura 14 - Extrator de corpo de prova.



Fonte: Autoria Própria (2023).

3.5. DENSIDADE REAL

As construções de engenharia, de diversas maneiras, têm sua fundação sobre o solo, sendo que muitas delas utilizam o próprio solo como componente primordial, como exemplificado nos taludes naturais. Diante disso, evidencia-se a relevância do ensaio de densidade real, uma vez que essa propriedade é definida pela relação entre o peso específico dos grãos e o peso específico da água. Este ensaio é padronizado pela DNER-ME 093/94, uma norma rodoviária do DNIT. A recomendação mínima da norma é a realização de duas determinações, porém, visando resultados mais precisos e confiáveis, optou-se por utilizar três picnômetros, resultando em três determinações.

Inicialmente, procedeu-se à seleção de aproximadamente 10 g de solo seco como amostra. O picnômetro, um dos instrumentos empregados no ensaio de densidade real, foi pesado vazio, seco e limpo, sendo atribuído esse peso à variável P1. Posteriormente, a amostra foi depositada no picnômetro e o conjunto (amostra + picnômetro) foi pesado, designado como P2.

Em seguida, adicionou-se água destilada ao picnômetro até imergir completamente a amostra. O picnômetro foi aquecido, agitando-o por um período entre 20 e 30 minutos para evitar superaquecimento. Após retirar do fogo, permitiu-se o resfriamento do picnômetro à temperatura ambiente. Uma vez resfriado, o picnômetro foi completamente preenchido com água destilada, inseriu-se a rolha perfurada e deixou-se em um banho de água à temperatura ambiente. A temperatura do banho foi registrada e, em seguida, o picnômetro foi retirado, enxugado com um pano limpo e seco conforme Figura 15.

Figura 15 - Processo de pesagem e retirada do aquecimento.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Concluída a etapa anterior, procedeu-se à pesagem do conjunto (amostra + água + picnômetro), identificado como P3. Após a pesagem, todo o conteúdo interno do picnômetro foi removido e, em sequência, submetido a uma lavagem. Para a conclusão do ensaio, o picnômetro foi preenchido integralmente com água destilada e vedado com a rolha perfurada. Como último passo, o picnômetro foi meticulosamente secado com um pano limpo e seco e, posteriormente, pesado, sendo atribuído esse peso à variável P4, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Adição de água destilada e pesagem do picnômetro.



Fonte: Autoria Própria (2023).

3.6. PERMEABILIDADE

A avaliação da permeabilidade do solo, que mensura a facilidade de percolação da água através de seus poros, é representada pelo coeficiente de permeabilidade, denominado K. Este parâmetro pode ser determinado por meio de ensaios laboratoriais, conforme preconizado pela norma NBR 14545/2021.

A montagem do permeâmetro teve início com a preparação da base, seguida pela adição de uma camada de solo com altura de 2,5 cm, sendo esta compactada para evitar a formação de trilhas no solo ou entre o solo e as superfícies internas do permeâmetro. Posteriormente, uma camada de pedras foi aplicada para atenuar o impacto da água sobre o solo durante a realização do ensaio, como mostra a Figura 17.

Figura 17 - Montagem do permeâmetro.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Uma mangueira saturada, proveniente da base da bureta graduada, foi acoplada ao cabeçote, dando início à introdução controlada de água na câmara do permeâmetro. Este processo de saturação foi mantido por um período mínimo de 24 horas. Subsequentemente, deu-se início ao ensaio, registrando-se a variação da carga hidráulica e cronometrando o tempo. No âmbito deste estudo, foram efetuadas três leituras na bureta para análise dos resultados obtidos.

3.7. CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto, um dos métodos mais tradicionais, consiste na avaliação da resistência ao corte de uma amostra de solo, fundamentado no critério de Coulomb. Este procedimento tem como finalidade a determinação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito do solo e está sujeito às diretrizes estabelecidas pela norma americana ASTM D3080-98, na condição não drenada.

Antes de dar início ao ensaio, a amostra de solo foi devidamente preparada e transferida para um corpo de prova com seção transversal quadrada, medindo 5 cm de lado e 2 cm de altura, para posterior pesagem. Após registrar esse peso, o corpo de prova foi acomodado em uma caixa bipartida, na qual o solo foi compactado em energia normal e distribuído uniformemente até preencher completamente o espaço. A porção remanescente da amostra foi utilizada para a determinação do teor de umidade.

Posteriormente, o corpo de prova foi inserido na prensa de cisalhamento direto, como mostra a Figura 18, e água destilada foi adicionada para saturar o solo. Nesse ensaio, três tensões

normais foram aplicadas: 50, 100 e 200 kPa sobre cada corpo de prova, utilizando um corpo de prova para cada tensão normal.

Figura 18 - Preparação do corpo de prova.



Fonte: Autoria Própria (2023).

As medições de deformação, capturadas por meio de extensômetros, foram conduzidas ao longo de 7 minutos, com intervalos de 0,25 segundos, para cada tensão aplicada. O critério para encerrar as medições, ou seja, atingir a ruptura do corpo de prova, foi o valor máximo da tensão cisalhante, uma vez que essa tensão aumentava até um ponto específico para, posteriormente, começar a decrescer.

Figura 19 - Pesagem e retirada do corpo de prova.



Fonte: Autoria Própria (2023).

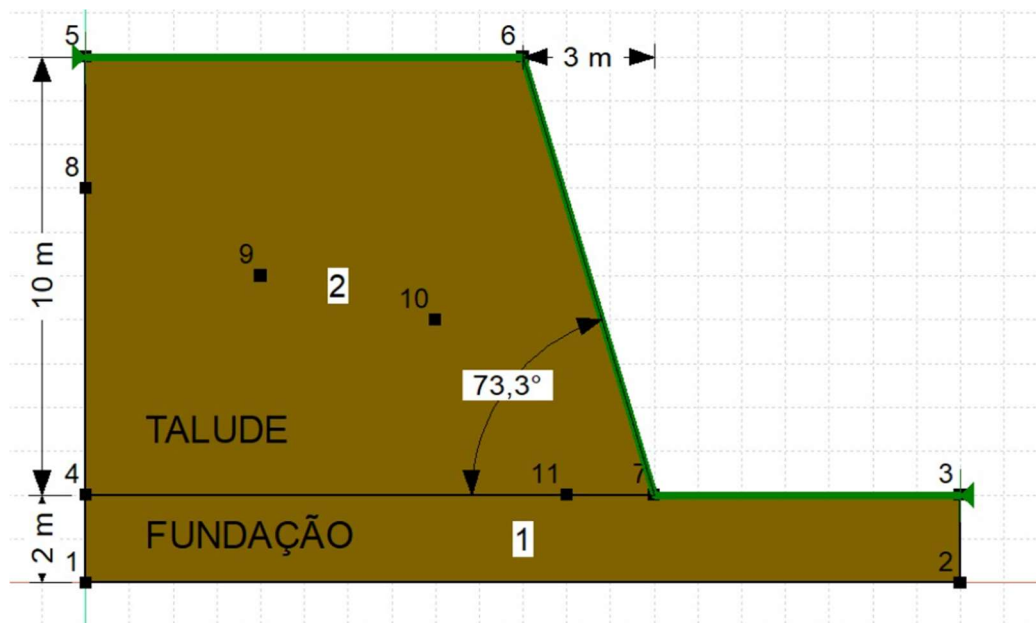
3.8. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES – SLOPE W

Os softwares desempenham um papel crescente na resolução de desafios na Engenharia Civil, especialmente na área Geotécnica. O GeoStudio representa um conjunto de programas desenvolvidos com o propósito de facilitar e agilizar a resolução de diversos problemas. Neste estudo, optou-se pelo uso de um desses softwares, o SLOPE/W 2019, um programa moderno destinado à análise de estabilidade de taludes. Esse software fundamenta-se no método de equilíbrio-limite, adotando, conseqüentemente, o método das fatias.

O SLOPE/W realiza uma análise eficiente de problemas tanto simples quanto complexos, considerando uma variedade de formas de superfície potencial de ruptura, condições de poropressão, propriedades do solo e condições de carregamento.

No processo de modelagem do talude em questão, algumas considerações foram imprescindíveis. Inicialmente, foi estimada uma fundação com uma profundidade de 2 metros. Posteriormente, a altura do talude foi determinada com base em observações realizadas durante a coleta das amostras de solo. Além disso, a distância horizontal em relação ao pé do talude foi analisada, sendo estipuladas as estimativas de 10 metros e 3 metros para esses dois parâmetros, respectivamente. Portanto, a caracterização do talude em análise é apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Geometria do talude no SLOPE/W.



Fonte: Autoria Própria (2023).

No momento de inicialização do software, a primeira aba, relacionada aos dados de projeto, é aberta, permitindo a escolha do método de análise. Nesta aba, destacam-se quatro tópicos essenciais: configurações, superfície de pesquisa, distribuição e avançado. Para este estudo, os dados de projeto foram configurados conforme as seguintes especificações:

- Configurações: Optou-se por escolher a condição de poropressão como a linha piezométrica, para a qual foram aplicados quatro pontos no interior do talude, estimados aleatoriamente.
- Superfície de pesquisa: Neste tópico, determinou-se a direção do movimento da superfície de ruptura, da esquerda para a direita, devido à natureza do talude de jusante. Quanto à opção da forma pela qual a superfície de ruptura seria lançada, foram disponibilizadas duas opções: entrada e saída e grade e raios. A escolha recaiu sobre entrada e saída, considerando os resultados mais precisos e confiáveis, dada a menor influência do projetista durante a modelagem.
- Distribuição: Optou-se por escolher a forma de distribuição constante para o cálculo do fator de segurança.
- Avançado: Este tópico permaneceu inalterado, mantendo as configurações do próprio software.

Após a inserção desses dados, procedeu-se com a distribuição dos pontos para, em seguida, aplicar as regiões 1 (fundação) e 2 (talude). Posteriormente, foram fornecidos os dados dos materiais, sendo considerado o mesmo solo para fundação e talude. Foram adicionados o peso específico, coesão, e ângulo de atrito, obtidos nos ensaios de compactação e cisalhamento direto. O critério escolhido para representar o comportamento do solo foi o de Mohr-Coulomb.

Em seguida, traçou-se a linha piezométrica, estimada no interior do talude, percorrendo os pontos 8, 9, 10, 11, 7 e 3, conforme disposto na Figura 20. Finalmente, estabeleceu-se a superfície de entrada e saída no contorno do talude. Na superfície de entrada, desenhou-se uma linha desde o ponto inicial esquerdo da crista até a metade do talude, enquanto na superfície de saída, partindo da metade do talude para baixo, indo além do pé do talude, seguindo até pouco mais da metade da fundação.

4. RESULTADOS

Neste capítulo, serão exibidos os resultados provenientes dos ensaios delineados na seção precedente, proporcionando uma análise aprofundada do solo empregado neste estudo. Ademais, procederemos com a classificação do referido solo, almejando uma compreensão abrangente de suas propriedades e comportamento geotécnico. Essa avaliação sistemática permitirá uma interpretação crítica dos dados coletados, contribuindo significativamente para a caracterização do material geotécnico investigado.

4.1. GRANULOMETRIA

Concluída a etapa de peneiramento grosso, utilizando a fração da amostra retida na peneira de 2 mm, conforme detalhado na seção 3.3, obtemos os seguintes resultados: 2,56 g de solo retido na peneira de 9,52 mm, 3,77 g na peneira de 4,76 mm e 5,71 na peneira de 2 mm, conforme apresentado na Quadro 3. Esses valores representam a distribuição granulométrica do solo, sendo essenciais para a subsequente análise e interpretação dos dados obtidos nos ensaios de caracterização do material.

Quadro 3 - Peneiramento grosso.

PENEIRAMENTO DO SOLO GRAUDO				
PENEIRA		PESO(g)	PESO(g)	% PASSA
POLEG.	mm	RETIDO	PASSA	AM. TOTAL
2"	50.80	0,00	1999,98	100
1 1/2"	38.10	0,00	1999,98	100
1"	25.40	0,00	1999,98	100
3/4"	19.10	0,00	1999,98	100
1/2"	12.27	0,00	1999,98	100
3/8"	9.52	2,56	1997,42	100
No. 4	4.76	3,77	1993,65	100
No. 10	2.00	5,71	1987,94	99

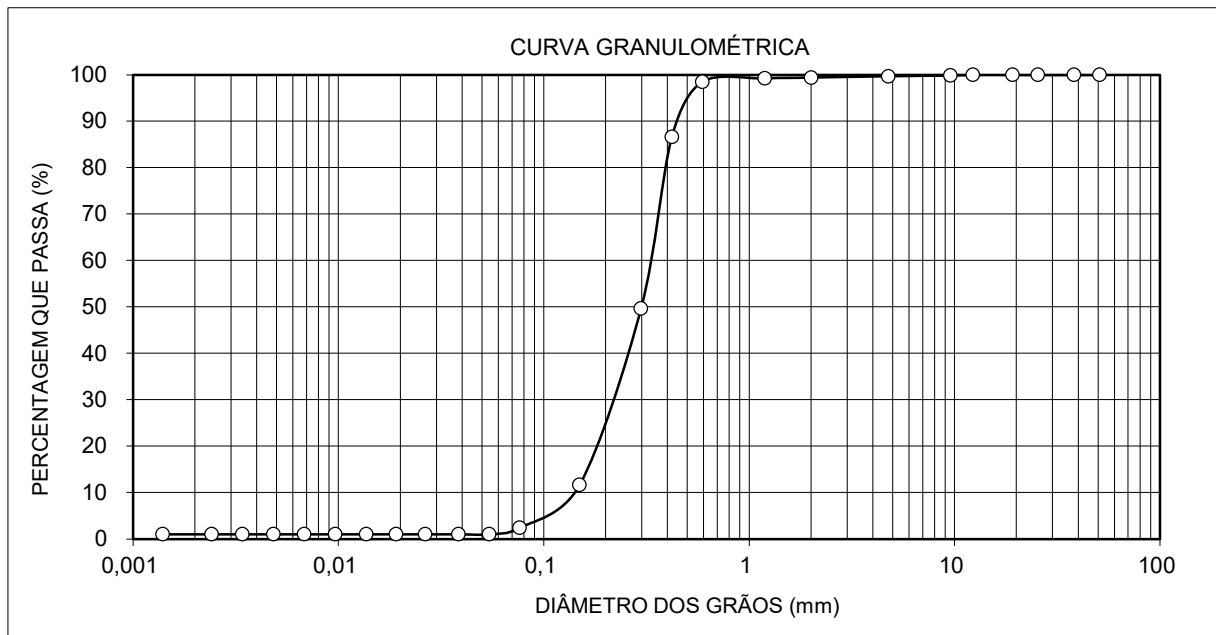
Fonte: Autoria própria (2023).

Da porção que passou pela peneira de 2 mm, conforme mencionado na seção 3.3, foram selecionados 70 g para o procedimento de sedimentação. Após um período de 24 horas, durante o qual foram efetuadas leituras utilizando o densímetro e registrado o acompanhamento da temperatura. Cabe ressaltar que a variável de correção do meio dispersor está diretamente associada à temperatura vigente durante o processo de sedimentação.

Concluída a etapa de sedimentação, procedeu-se ao peneiramento fino, e os pesos retidos em cada peneira foram registrados. Esses dados são cruciais para a análise subsequente, fornecendo informações essenciais sobre a distribuição granulométrica do solo em estudo.

Após a execução do ensaio de granulometria, que abrange tanto o peneiramento quanto a sedimentação, torna-se possível elaborar a curva granulométrica do solo, conforme ilustrado na Figura 21. A partir da curva, é viável realizar a análise da distribuição das dimensões dos grãos presentes no solo, como apresentado de maneira detalhada no Quadro 4.

Figura 21 - Curva granulométrica.



Fonte: Autoria própria (2023).

Quadro 4 - Resumo em % da sedimentação.

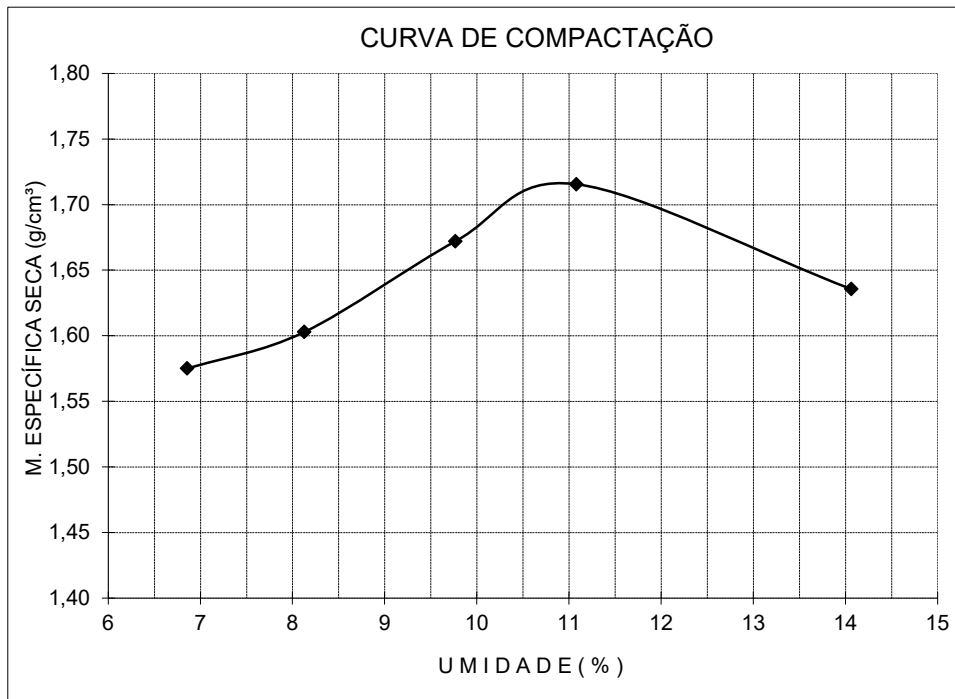
RESUMO DA SEDIMENTAÇÃO			(%)
PEDREGULHO	ACIMA DE 4,8	mm	0,32
AREIA GROSSA	2,00 - 0,60	mm	0,90
AREIA MÉDIA	0,60 - 0,20	mm	48,81
AREIA FINA	0,20 - 0,06	mm	47,29
SILTE	0,06 - 0,002	mm	1,37
ARGILA	ABAIXO DE 0,002	mm	1,04

Fonte: Autoria própria (2023).

4.2. COMPACTAÇÃO

Após a conclusão do ensaio de compactação, realizado em cinco repetições conforme detalhado na seção 3.4, foi possível gerar a curva de compactação do solo. Essa curva desempenha um papel crucial na obtenção da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima do solo. Neste estudo, os resultados obtidos para a massa específica e a umidade ótima foram de $1,716 \text{ g/cm}^3$ e $10,5\%$, respectivamente, como representado na Figura 22. Esses dados são fundamentais para a compreensão das propriedades geotécnicas do solo em análise.

Figura 22 - Curva de compactação.



Fonte: Autoria própria (2023).

A análise da Figura 22 evidencia uma relação proporcional entre a umidade e a massa específica aparente seca, destacando que à medida que a umidade aumenta, a massa específica aparente seca também se eleva. No entanto, esse comportamento é observado somente até o solo atingir a umidade ótima. A partir desse ponto, à medida que a umidade continua a aumentar, a massa específica aparente seca começa a diminuir. Esse fenômeno ressalta a influência crítica da umidade ótima nas propriedades geotécnicas do solo.

4.3. DENSIDADE REAL

Conforme detalhado na seção 3.5, foram conduzidas três determinações de densidade e, em seguida, foi verificado se essas medidas apresentavam uma diferença de, no máximo, 0,009 entre si. No caso em que a discrepância entre duas densidades consecutivas fosse inferior a 0,009, o resultado do ensaio seria considerado como a média dessas duas determinações.

Portanto, dentre as três determinações realizadas, foram selecionadas as densidades dos picnômetros 1 e 3, uma vez que a diferença entre elas é de apenas 0,003. Dessa forma, a densidade real do solo objeto deste estudo foi estabelecida em 2,52, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Ensaio densidade real.

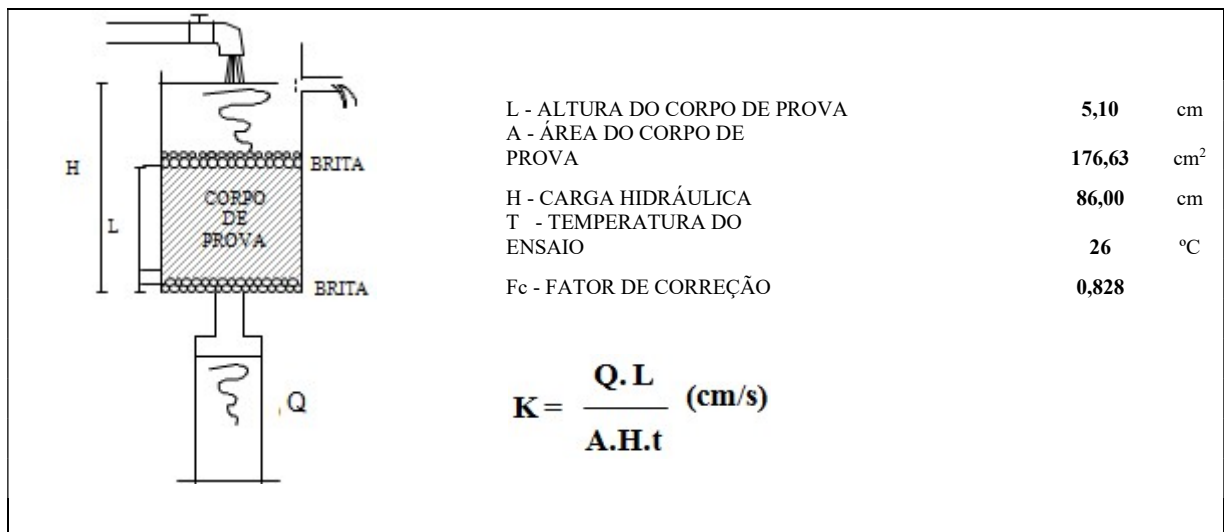
AMOSTRA	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	δ	$\Delta\delta$	δ	T°	K ₂₀	$\delta -20^\circ$
1	37,15	47,82	95,62	89,17	2,528	0,003	2,53	29	0,9983	2,52
2	40,10	50,09	95,58	89,51	2,548					
3	44,56	54,61	101,40	95,33	2,525					

Fonte: Autoria própria (2023).

4.4. PERMEABILIDADE

Concluída a execução do ensaio de permeabilidade, a Figura 23 foi confeccionada, contendo dados essenciais que serão empregados nos cálculos destinados à determinação do coeficiente de permeabilidade (K).

Figura 23 - Dados iniciais do ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autoria própria (2023).

Completada essa etapa, em cada aferição durante o experimento, foi minuciosamente registrada a altura em centímetros, juntamente com o tempo decorrido para cada medição (t), expresso em segundos, todas essas informações foram meticulosamente organizadas no Quadro 6, que também apresenta os coeficientes de permeabilidade correspondentes a cada leitura. A média desses coeficientes foi calculada, resultando em um coeficiente de permeabilidade de $2,1 \times 10^{-3}$ m/s para o solo investigado.

Quadro 6 - Coeficiente de permeabilidade.

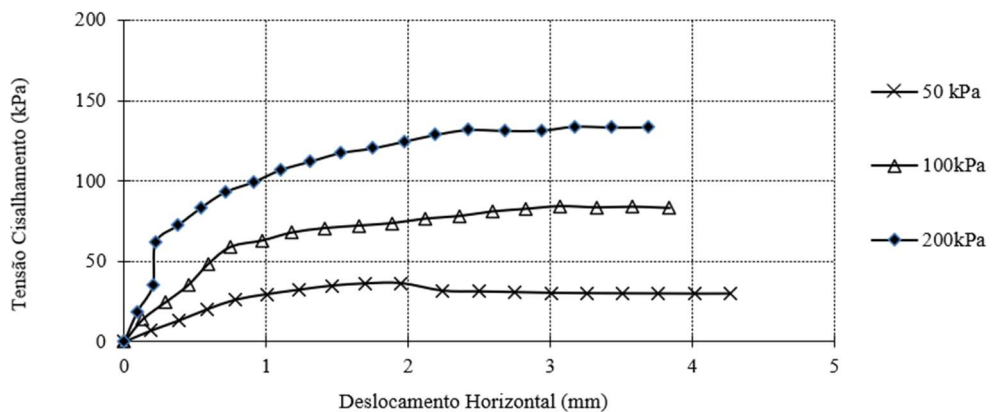
LEITURAS Nº	ALTURA L (cm)	Q (cm ³)	t (s)	K (cm/s)
1	5,1	900	120	2,1E-03
2	5,1	890	120	2,1E-03
3	5,1	900	120	2,1E-03

Fonte: Autoria própria (2023).

4.5. CISALHAMENTO DIRETO

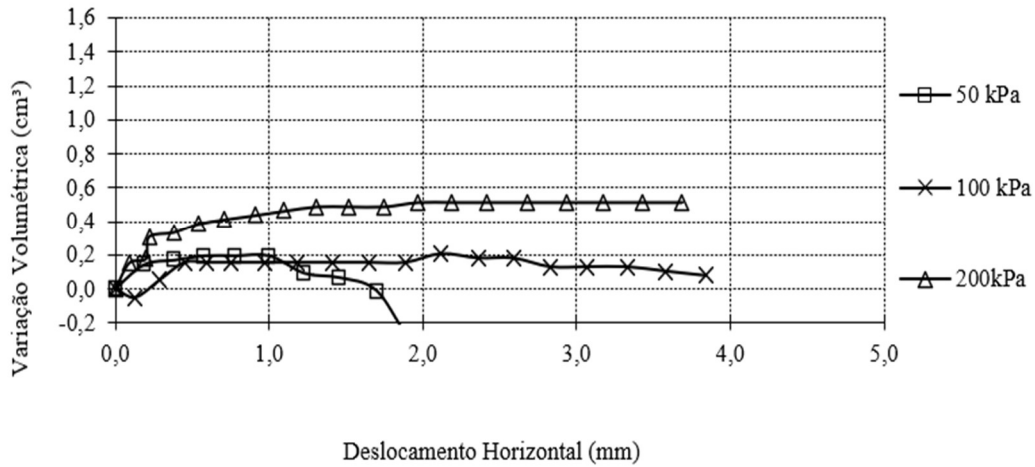
Através da execução do ensaio de cisalhamento direto, foram elaborados os gráficos que correlacionam a tensão cisalhante com o deslocamento horizontal, conforme apresentado na Figura 24. Além disso, foi gerado o gráfico que relaciona a variação volumétrica com o deslocamento horizontal, ilustrado na Figura 25, bem como as envoltórias de ruptura, demonstrando a relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal, conforme evidenciado na Figura 26. Essas representações gráficas proporcionam informações cruciais para a determinação do ângulo de atrito e da coesão da amostra em análise.

Figura 24 - Gráfico da tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal.



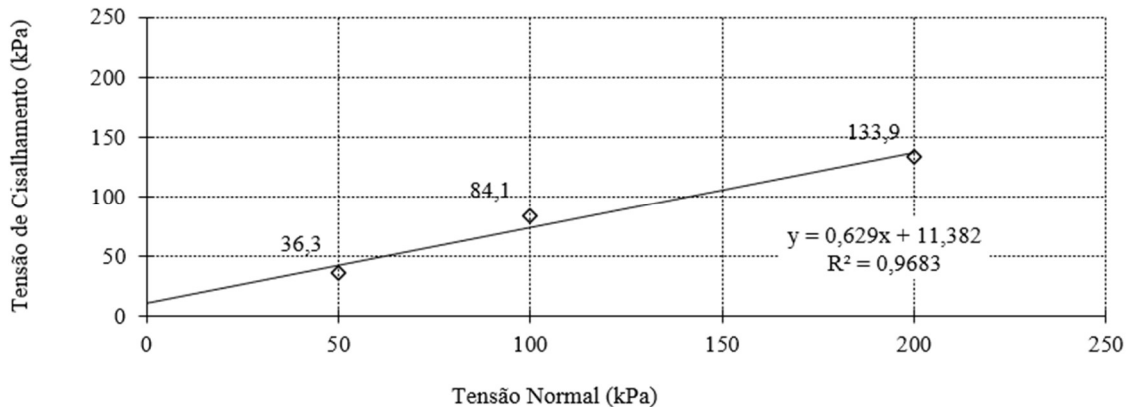
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 25 - Gráfico da variação volumétrica versus deslocamento horizontal.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 26 - Gráfico da tensão cisalhante versus tensão normal.



Fonte: Autoria própria (2023).

Analisando o gráfico de tensão versus deformação é possível observar a ausência de picos distintos para as tensões de 50, 100 e 200 kPa. Esse comportamento evidencia características típicas de solos com rupturas plásticas ou elastoplásticas, nos quais o solo sofre deformações elasticamente até alcançar um determinado valor de tensão. Posteriormente, qualquer deformação subsequente torna-se não elástica. Dessa maneira, as tensões de cisalhamento aumentam proporcionalmente aos deslocamentos, porém, tendem a atingir um valor máximo que se mantém praticamente constante após determinados deslocamentos.

Na Figura 26, é notável, inicialmente, uma expansão rápida dos corpos de prova. No caso das tensões de 200 e 100 kPa, após essa fase inicial de aumento de volume, observa-se que a variação volumétrica se estabiliza, tornando-se praticamente constante. Este comportamento contrasta com a curva associada à tensão normal de 50 kPa.

Os resultados das propriedades mecânicas do solo, incluindo coesão (c'), ângulo de atrito (ϕ), massa específica aparente seca, umidade e tensão de cisalhamento máxima para as diferentes tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, estão apresentados de maneira sistemática no Quadro 7.

Quadro 7 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto.

CORPO DE PROVA	MASSA ESP. APAR. SECA (g/cm ³)	UMIDADE %	TENSÃO NORMAL (kPa)	TENSÃO CIS. MÁX. (kPa)	COESÃO (kPa)	ATRITO (Graus)
1	1,388	5,2	50	36,3	5,0	43,3
2	1,418	5,2	100	84,1		
3	1,404	5,2	200	133,9		

Fonte: Autoria própria (2023).

4.6. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO QUE COMPÕE O TALUDE

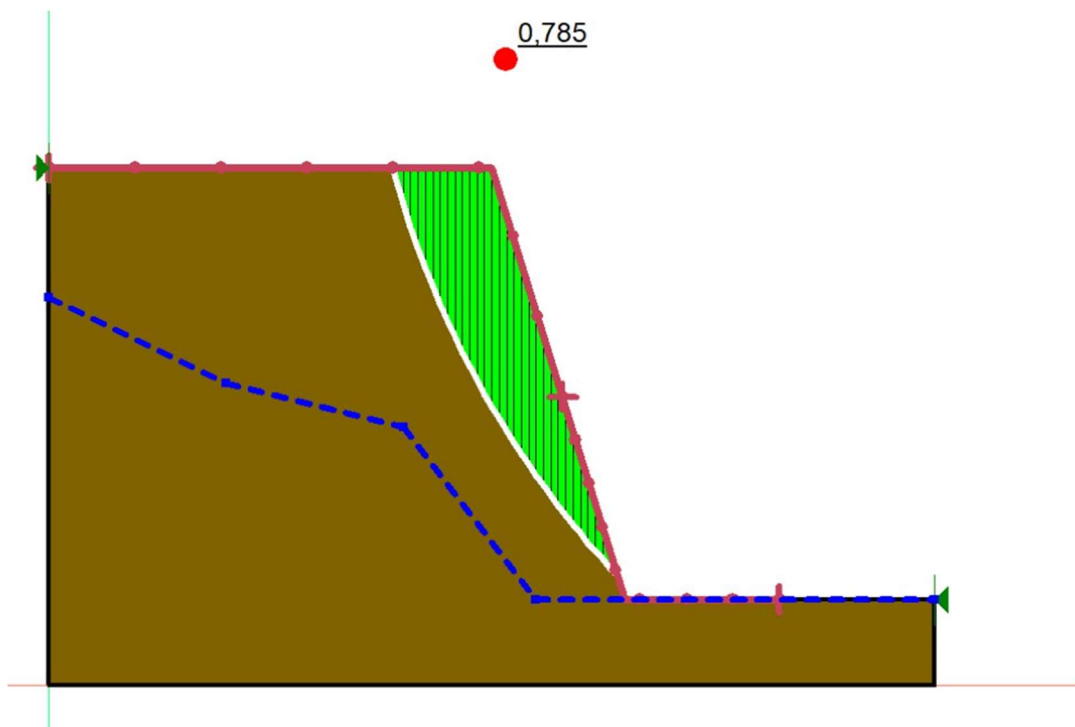
Com a conclusão dos ensaios e a obtenção dos resultados, foi viabilizada a classificação do solo por meio do método fundamental abordado nesta pesquisa: o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS)

Analisando os dados do peneiramento fino, torna-se evidente que mais da metade da amostra de solo é retida pela peneira de 0,075 mm. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), conforme indicado na Quadro 1, isso caracteriza um solo de graduação grossa. O peneiramento grosso, por sua vez, revela que mais de 50% do solo passa pela peneira de 4,76 mm e apresenta finos. Consequentemente, a classificação fica entre SP e SW. Dado o solo ser mau graduado, conforme evidenciado na análise granulométrica deduz-se que o solo seja categorizado como areia mau graduada ou areia pedregulhosa, com pouco ou nenhum fino, SP.

4.7. ESTABILIDADE DE TALUDE NO SLOPE/W

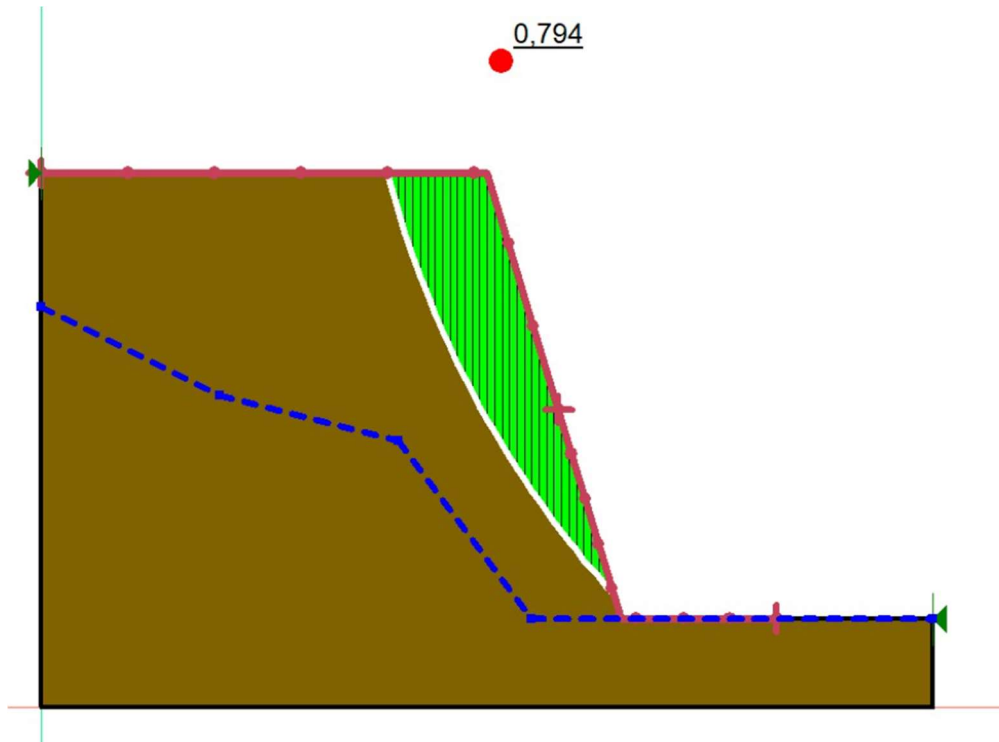
Este estudo envolveu a realização da modelagem em cinco instâncias, cada uma correspondente a um dos métodos de análise e estabilidade. Ao final, será possível realizar uma comparação entre os resultados de cada método, os quais estão apresentados nas Figuras 27 a 31.

Figura 27 - Método de Janbu.



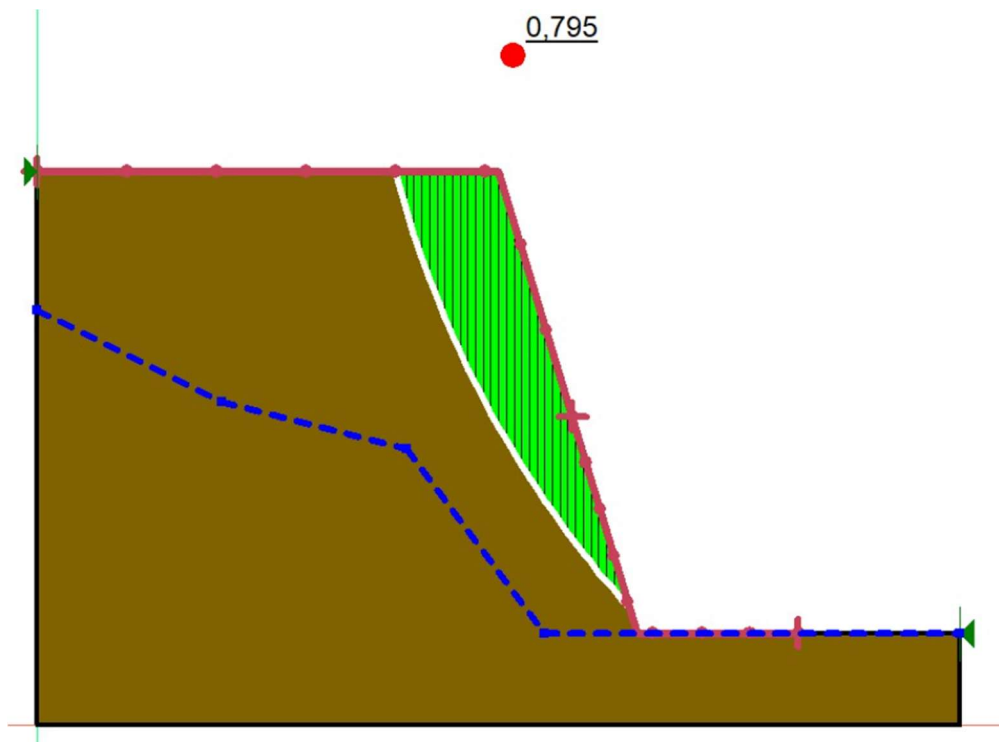
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 28 - Método de Spencer.



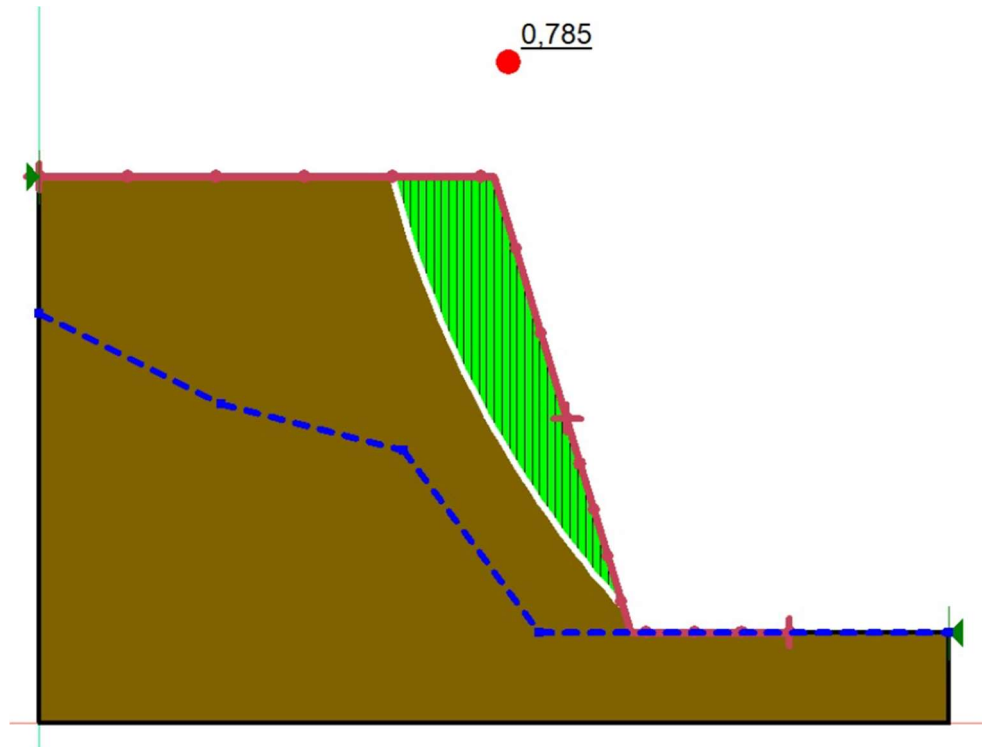
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 29 - Método de Bishop.



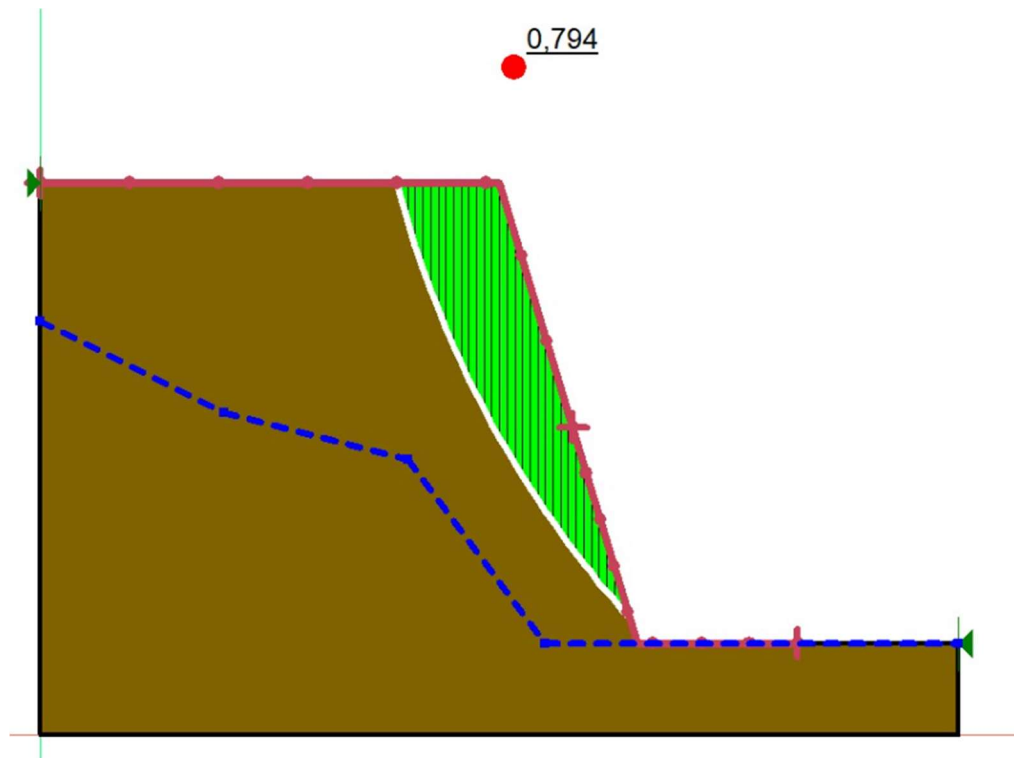
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 30 - Método de Fellenius.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 31 - Método de Morgenstern-Price.



Fonte: Autoria própria (2023).

Desse modo, constatou-se que os resultados obtidos não apresentaram divergências significativas entre si. O menor valor de Fator de Segurança (FS) identificado foi de 0,785 ao empregar o Método de Janbu, também foi encontrado o mesmo valor no Método de Fellenius. O Método de Spencer e o Método de Morgenstern-Price encontraram o FS de 0,794. Enquanto o valor mais elevado, alcançando 0,795, foi registrado pelo Método de Bishop, tendo um FS médio de 0,790.

Contudo, é relevante destacar que todos os métodos convergem para a conclusão de que o talude se encontra em iminência de ruptura ou já experimentou tal condição. Essa inferência é respaldada pelo fato de que os fatores de segurança obtidos são inferiores a um $FS < 1$, caracterizando, assim, uma condição de instabilidade.

5. CONCLUSÃO

Este estudo teve como propósito a investigação detalhada de uma amostra de solo por meio da realização de ensaios de caracterização, compactação e cisalhamento direto. A finalidade principal foi empregar os resultados obtidos para a análise da estabilidade do talude localizado no Morro Santa Terezinha, situado no Bairro do Mucuripe, na cidade de Fortaleza, estado do Ceará.

A amostra obtida revelou uma composição predominantemente composta por areia média (48,81%) e areia fina (47,29%). A massa específica foi determinada como $1,716 \text{ g/cm}^3$, com uma umidade ótima de 10,5%. Os ensaios adicionais proporcionaram informações significativas, incluindo uma densidade real dos grãos de 2,52, permeabilidade de $2,1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ e o ensaio de cisalhamento direto revelou tensões de cisalhamento máximas de 36,3, 84,1 e 133,9 kPa, associadas às tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, respectivamente. Esses resultados indicam uma elevada permeabilidade na amostra, quando em contato com a água, o solo tende a deformar, o que pode influenciar na suscetibilidade a deslizamentos no talude.

No tocante à classificação do Solo pelo Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), constata-se que o solo analisado é categorizado como de graduação grossa, considerando a má graduação do solo, conforme evidenciado na análise granulométrica deduz-se que o solo seja categorizado como areia mau graduada ou areia pedregulhosa, com pouco ou nenhum fino.

Os parâmetros fundamentais de coesão (5 kPa) e ângulo de atrito ($43,3^\circ$), extraídos do ensaio de cisalhamento, desempenham um papel crucial na compreensão das características do solo em análise. A coesão, situada como um valor intermediário entre as areias e argilas, indica

uma interação significativa entre as partículas do solo, embora em menor intensidade comparada às argilas. Essa condição propicia uma fragmentação relativamente fácil do solo estudado.

Em prosseguimento, a análise de estabilidade do talude foi conduzida por meio do software SLOPE/W 2019, incorporando os resultados de massa específica, coesão e ângulo de atrito na seção de propriedades dos materiais. A modelagem envolveu os métodos de Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer e Morgenstern-Price, possibilitando uma comparação criteriosa dos fatores de segurança obtidos.

Os resultados revelaram coerência entre os valores, com diferenças insignificantes. Contudo, nenhum dos métodos apresentou um fator de segurança superior a 1,5, um limiar crítico, onde os riscos de perdas econômicas e humanas são acentuados. Essa constatação reflete a instabilidade do talude, que já experimentou deslizamentos recentes. Também, é importante ressaltar, que o fator de segurança abaixo de um pode ser atribuído à geometria feita no SLOPE/W, devido o ângulo de inclinação acentuado, gerando instabilidade.

É relevante salientar que as medidas utilizadas na modelagem foram médias estimadas, considerando a variação na configuração do talude. Dessa forma, os resultados obtidos indicam uma situação de instabilidade, mas não corroboram integralmente a ideia de ruptura iminente do talude.

Diante da relevância do talude, sugere-se uma análise mais abrangente, incorporando sondagens e ensaios de caracterização para distintos tipos de solos presentes no maciço. Além disso, é recomendável uma análise minuciosa da linha piezométrica real. Propõe-se intervenções diretas, como o retaludamento ou a implementação de uma estrutura de contenção, ambas visando conferir maior estabilidade ao talude, reduzindo sua suscetibilidade a movimentos de massa. Essas medidas emergem como estratégias concretas para mitigar os riscos associados à instabilidade do talude.

REFERÊNCIAS

- AYALA, Grover Romer Llanque. **Verificação da estabilidade da estabilidade do talude de montante em barragem de terra submetida a rebaixamento rápido realizada com ensaios em solos não saturados e modelagem numérica**. 2018. 136 f. Dissertação – Mestrado (Pós - Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- BARRETO, Alisson Cabral. **Análise do índice de suporte califórnia do solo da ufersa – campus angicos**. 2015. 51f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2015.
- CASTRO, A. P. A. de; RODRIGUES, R. A; BEZERRA, B. S. Proposição de um checklist para gestão de taludes em projetos rodoviários. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, São Paulo. vol. 03, n. 14, p. 01-13, 2015.
- COSTA, Eduardo José da Silva; LEVINDO, Walter de Andrade. **Retaludamento e cobertura vegetal na estabilidade de taludes rodoviários**. 2013. 53f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade Doctum de Minas Gerais, Minas Gerais, 2013.
- ALVES, Camila Adriana Oliveira; MATEUS, Thiago Vaz. **Estabilidade de taludes: estudo das condições de estabilização em taludes naturais**. 2018. 76f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Doctum de João Monlevade, João Monlevade, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3080 - 98**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. In: Annual Book of ASTM Standards, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGENS - MÉTODO DE ENSAIO. **DNER-ME 093**: Solos - determinação da densidade real. DNER-ME, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT - IPR 719. **Manual de Pavimentação**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.

FERREIRA, João Luís Ferrás. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer**. 2012. 144 f. Dissertação – Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia) - Universidade do Porto, Porto, 2012.

JESUS, Luiz Gustavo de Souza. **Análise probabilística de estabilidade de taludes de barragem de terra**. 2015. 67f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

MAFFRA, C. R. B. et al. Métodos de avaliação da influência e contribuição das plantas sobre a estabilidade de taludes. **Scientia Agraria**, Curitiba, vol. 18, n. 4, p. 129-143, out/dez, 2017.

MARINHO, Filipe. Classificação dos solos. Guia da engenharia, 19 de mai. de 2020. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/classificacao-solos/>. Acesso em: 04 set. 2023.

OLEH, Angga. O Esquema Representa Um Processo De Erosão Em Encosta. CLICKANDGO, 11 de abril de 2021. Disponível em: <https://competition.clickandgo.com/o-esquema-representa-um-processo-de-erosao-em-encosta/>. Acesso em: 10 nov. 2023.

UCHÔA, Carlos. Geologia Básica, Facebook, 19 de março de 2018. Disponível em: <https://www.facebook.com/uchoamaster>. Acesso em: 10 nov. 2023.

VIEGAS, Maria Luísa Carrusca. **Estabilidade de taludes naturais**. 2017. 82 f. Dissertação – Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2017.

SOUZA, Guilherme de Oliveira. **Análise comparativa entre métodos de análise de estabilidade de taludes**. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SOUZA, Anna Paula Leopoldo de. **Estudos geotécnicos e de estabilidade de taludes da encosta do alto do padre cícero no município de camaragibe-pe**. 2014. 177 f. Dissertação - Mestrado – (Pós Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SILVA, Vanessa Coutinho. **Métodos analíticos para avaliar a contribuição de estacas para o fator de segurança de taludes**. 2013. 84f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

ROCHA, Stéfano Lucca. **Análise das intervenções feitas para reabilitação de taludes no morro santa terezinha – fortaleza/ce**. 2019. 58f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3^a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

OSTERNE, Alyne Karla Nogueira. **Resistência ao cisalhamento de uma amostra de solo da ufersa campus angicos/rn**. 2015. 83f. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2015.

MENDES, Ana Jéssica Freitas. **Solo arenoso artificialmente cimentado: mecanismos de resistência e aplicações**. 2018. 70f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2018.

MARQUES, G. S. et al. **Análise da influência de um período intenso de chuva na estabilidade de um talude de rodovia**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016. Anais [...] Belo Horizonte: COBRAMSEG, 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Ensaio de granulometria - Leitura do densímetro.

TEMPO DECORRIDO s	LEITURA (L)	TEMPERAT. (o C)	CORREC. MEIO DISPERSOR	LEITURA CORRIGIDA	ALT. DE QUEDA (cm)	LEIT. COR. FINAL	"d" DOS GRAOS (mm)	% <d AM. TOTAL(Q)
30	2,00	29,00	1,44	0,56	17,65	1,76	0,0762	2
60	1,00	29,00	1,44	-0,44	17,85	0,76	0,0542	1
120	1,00	29,00	1,44	-0,44	17,85	0,76	0,0383	1
240	1,00	29,00	1,44	-0,44	16,91	0,76	0,0264	1
460	1,00	29,00	1,44	-0,44	16,91	0,76	0,0191	1
900	1,00	29,00	1,44	-0,44	16,91	0,76	0,0136	1
1800	1,00	29,00	1,44	-0,44	16,91	0,76	0,0096	1
3600	1,00	29,00	1,44	-0,44	16,91	0,76	0,0068	1
7200	1,00	29,00	1,44	-0,44	16,91	0,76	0,0048	1
14400	1,00	29,00	1,44	-0,44	16,91	0,76	0,0034	1
28800	1,00	29,00	1,44	-0,44	16,91	0,76	0,0024	1
86400	1,00	29,00	1,44	-0,44	16,91	0,76	0,0014	1

Fonte: Autoria própria (2023).

APÊNDICE 2 - Ensaio de granulometria - Peneiramento fino.

PENEIRAMENTO DO SOLO MIUDO				
PENEIRA		PESO(g)	PESO(g)	% PASSA
POLEGADA	mm	RETIDO	PASSA	AM. TOTAL
No. 16	1.19	0,17	119,83	99
No. 30	0.590	0,92	118,91	98
No. 40	0.420	14,32	104,59	87
No. 50	0.297	44,61	59,98	50
No. 100	0.149	45,89	14,09	12
No. 200	0.075	6,20	7,89	7

APÊNDICE 3 - Ensaio de compactação - Dados do ensaio.

CILINDRO No. 1 N° DE GOLPES 26	VOLUME 997 cm ³ P. DA AMOSTRA 3000 g		PESO 2480 g		
P. DA AMOSTRA + CILINDRO (g)	4158	4208	4310	4380	4340
PESO DA AMOSTRA (g)	1678	1728	1830	1900	1860
MASSA ESPECÍFICA ÚMIDA (g/cm ³)	1,683	1,733	1,836	1,906	1,866
CÁPSULA No.	29	1	71	9	503
P. BRUTO ÚMIDO (g)	90,08	102,48	99,33	87,85	112,41
P. BRUTO SECO (g)	85,12	95,84	91,70	80,48	100,27
P. DA CÁPSULA (g)	12,78	14,13	13,59	13,96	13,95
ÁGUA (g)	4,96	6,64	7,63	7,37	12,14
SOLO (g)	72,34	81,71	78,11	66,52	86,32
UMIDADE (%)	6,86	8,13	9,77	11,08	14,06
MASSA ESP. SECA (g/cm ³)	1,575	1,603	1,672	1,716	1,636

APÊNDICE 5 - Ensaio de resistência ao cisalhamento direto ($\sigma = 100$ kPa)

Anel nº	1		Área: 25,806 cm ²		Tara: 84,83 g		Dens. Real	2,52	
DETERMINAÇÕES	Antes do Ensaio		Depois do Ensaio		Peso do C.P.+água+Tara (g)			161,81	
Cápsula Nº	100				Peso do C.P.+água (g)			76,98	
Solo+Tara+água (g)	117,12				Altura do C.P. (cm)			2	
Solo+Tara (g)	112,09				Volume (cm ³)			51,61	
Tara (g)	14,82				Dens. Úmida (g/cm ³)			1,49	
Água (g)	5,03				Dens. Seca (g/cm ³)			1,418	
Solo (g)	97,27				Grau de saturação (%)			16,77	
Umidade (%)	5,17				Constante do anel (kgf/mm)			30	
ΔT Minuto	Extensômetro (mm)		Desl. do Dinam. (mm)	Carga Horiz. (kgf)	Área corrig. do C.P. (cm ²)	Desl. Horiz. do C.P. (mm)	τ kPa	Deform. Vert. do C.P. (mm)	ΔV cm ³
	Vertical	Horizontal							
-	6,560	0,000	0,000	0,00	25,806	0,000	0,00	0,000	0,00
-	6,580	0,250	0,120	3,60	25,740	0,130	13,99	-0,020	-0,05
-	6,540	0,500	0,210	6,30	25,659	0,290	24,55	0,020	0,05
-	6,500	0,750	0,300	9,00	25,577	0,450	35,19	0,060	0,15
-	6,500	1,000	0,410	12,30	25,506	0,590	48,22	0,060	0,15
-	6,500	1,250	0,500	15,00	25,425	0,750	59,00	0,060	0,15
-	6,500	1,500	0,530	15,90	25,313	0,970	62,81	0,060	0,15
-	6,500	1,750	0,570	17,10	25,207	1,180	67,84	0,060	0,15
-	6,500	2,000	0,590	17,70	25,090	1,410	70,55	0,060	0,15
-	6,500	2,250	0,600	18,00	24,968	1,650	72,09	0,060	0,15
-	6,500	2,500	0,610	18,30	24,846	1,890	73,65	0,060	0,15
-	6,480	2,750	0,630	18,90	24,729	2,120	76,43	0,080	0,21
-	6,490	3,000	0,640	19,20	24,607	2,360	78,03	0,070	0,18
-	6,490	3,250	0,660	19,80	24,490	2,590	80,85	0,070	0,18
-	6,510	3,500	0,670	20,10	24,368	2,830	82,48	0,050	0,13
-	6,510	3,750	0,680	20,40	24,246	3,070	84,14	0,050	0,13
-	6,510	4,000	0,670	20,10	24,114	3,330	83,35	0,050	0,13
-	6,520	4,250	0,670	20,10	23,987	3,580	83,79	0,040	0,10
-	6,530	4,500	0,660	19,80	23,855	3,840	83,00	0,030	0,08
	6,540		0,660	19,80				0,020	0,05
	6,550		0,640	19,20				0,010	0,03
	6,570		0,630	18,90				-0,010	-0,03
	6,570		0,590	17,70				-0,010	-0,03
	6,570		0,580	17,40				-0,010	-0,03
								6,560	16,93
								6,560	16,93
								6,560	16,929

APÊNDICE 6 - Ensaio de resistência ao cisalhamento direto ($\sigma = 200$ kPa)

Anel nº	1		Área: 25,806 cm ²		Tara: 84,83 g		Dens. Real	2,52	
DETERMINAÇÕES	Antes do Ensaio		Depois do Ensaio		Peso do C.P.+água+Tara (g)			161,03	
Cápsula Nº	100				Peso do C.P.+água (g)			76,2	
Solo+Tara+água (g)	117,12				Altura do C.P. (cm)			2	
Solo+Tara (g)	112,09				Volume (cm ³)			51,61	
Tara (g)	14,82				Dens. Úmida (g/cm ³)			1,48	
Água (g)	5,03				Dens. Seca (g/cm ³)			1,404	
Solo (g)	97,27				Grau de saturação (%)			16,39	
Umidade (%)	5,17				Constante do anel (kgf/mm)			30	
ΔT Minuto	Extensômetro (mm)		Desl. do Dinam. (mm)	Carga Horiz. (kgf)	Área corrig. do C.P. (cm ²)	Desl. Horiz. do C.P. (mm)	τ kPa	Deform. Vert. do C.P. (mm)	ΔV cm ³
	Vertical	Horizontal							
-	6,570	0,000	0,000	0,00	25,806	0,000	0,000	0,000	0,00
-	6,510	0,250	0,160	4,80	25,760	0,090	18,633	0,060	0,15
-	6,500	0,500	0,300	9,00	25,704	0,200	35,013	0,070	0,18
-	6,450	0,750	0,530	15,90	25,694	0,220	61,882	0,120	0,31
-	6,440	1,000	0,620	18,60	25,613	0,380	72,619	0,130	0,34
-	6,420	1,250	0,710	21,30	25,532	0,540	83,426	0,150	0,39
-	6,410	1,500	0,790	23,70	25,445	0,710	93,141	0,160	0,41
-	6,400	1,750	0,840	25,20	25,344	0,910	99,433	0,170	0,44
-	6,390	2,000	0,900	27,00	25,247	1,100	106,943	0,180	0,46
-	6,380	2,250	0,940	28,20	25,141	1,310	112,169	0,190	0,49
-	6,380	2,500	0,980	29,40	25,034	1,520	117,441	0,190	0,49
-	6,380	2,750	1,000	30,00	24,917	1,750	120,400	0,190	0,49
-	6,370	3,000	1,030	30,90	24,805	1,970	124,570	0,200	0,52
-	6,370	3,250	1,060	31,80	24,693	2,190	128,779	0,200	0,52
-	6,370	3,500	1,080	32,40	24,577	2,420	131,832	0,200	0,52
-	6,370	3,750	1,070	32,10	24,445	2,680	131,318	0,200	0,52
-	6,370	4,000	1,065	31,95	24,315	2,935	131,400	0,200	0,52
-	6,370	4,250	1,080	32,40	24,196	3,170	133,908	0,200	0,52
-	6,370	4,500	1,070	32,10	24,064	3,430	133,397	0,200	0,52
-	6,370	4,750	1,065	31,95	23,934	3,685	133,492	0,200	0,52
	6,370		1,080	32,40				0,200	0,52
	6,370		1,080					0,200	0,52
	6,370		1,130					0,200	0,52
	6,370		1,135					0,200	0,52
	6,380		1,125					0,190	0,49
	6,390		1,105					0,180	0,46
	6,390		1,105					0,180	0,46
	6,390		1,105					0,180	0,46
	6,380		1,100					0,190	0,49
	6,380		1,080					0,190	0,49
	6,370		1,060						
	6,350		1,015						
	6,350		1,010						
	6,330		0,970						
	6,320		0,940						