



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA ZONA SUL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ANDRÉ LOPES XAVIER

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE: ESTUDO DE CASO NO RODOANEL
DE TERESINA - PI

TERESINA
2024

ANDRÉ LOPES XAVIER

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE: ESTUDO DE CASO NO RODOANEL
DE TERESINA - PI

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul.

Orientador: Prof. Bruno Camargo de Holanda
Cavalcanti.

Coorientador: Prof. Ronildo Brandao da Silva.

TERESINA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Xavier , André Lopes

X3a Análise de estabilidade de talude: estudo de caso no rodoanel de
Teresina - PI / André Lopes Xavier. - 2024.
83 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) -
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Zona Sul, 2024.

Orientador : Prof. Esp. Bruno Camargo de Holanda
Cavalcanti Coorientador: Prof. Esp. Ronildo Brandão da
Silva

1. Engenharia civil. 2. Talude. 3. Fator de segurança.
4. Estabilidade.
5. Rodoanel. I. Título.

CDD - 624

Elaborado por Isabel dos Santos Lima CRB 3/1060

ANDRÉ LOPES XAVIER

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE: ESTUDO DE CASO NO RODOANEL
DE TERESINA - PI

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Bruno Camargo de Holanda Cavalcanti (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Ailton Soares Freire
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Matias Francisco Gomes de Sales
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por permitir que eu consiga chegar até aqui, sem ele eu não conseguiria chegar onde estou. Ao meu pai e minha mãe, José e Claudia, que sempre foram os maiores exemplos que tive, sempre me motivaram e estiveram ao meu lado em todas as situações incondicionalmente, sem eles eu também não teria chegado onde estou, e nem em mil anos eu conseguiria agradecê-los por tudo que fizeram por mim.

Também preciso agradecer aos meus irmãos, Vinicius e Mariane, que me acompanharam durante toda minha jornada, e a todos os meus familiares e amigos que por muitas vezes precisei abdicar da convivência para me dedicar ao curso. Gostaria também de agradecer meus avós José, Maria de Jesus, Maria das Graças e Francisco, que sabem que são parte importante da minha vida, e sei que realizo uma parte do sonho de cada um sendo o primeiro neto formado.

Durante esses cinco anos de IFPI, em que ocorreram muitas alegrias e dificuldades, gostaria também de agradecer aos meus amigos mais próximos, Igor, Girleiane e Marcos Vinicius, com quem compartilhei os melhores momentos e aqueles não tão bons. Também agradecer a todos os outros alunos da turma de 2019.2 de engenharia civil do IFPI, por esses anos de convivência quase diária.

Gostaria também de agradecer especialmente aos que me acompanharam e colaboraram para o desenvolvimento desse trabalho, desde a Andreza que me ajudou em todo o desenvolvimento dele, ao meu orientador Bruno Camargo que me ajudou a escolher o tema e desenvolvê-lo, passando pelo técnico do instituto Ronaldo que me auxiliou na parte experimental, ao professor Ronildo Brandão que tornou o levantamento topográfico possível junto ao curso de estradas do IFPI e a todos os professores e servidores do IFPI-Campus Teresina zona sul.

“É impossível vencer quem nunca desiste.”

Babe Ruth

RESUMO

O crescimento urbano das cidades ocasiona diversos desafios, entre eles superar obstáculos naturais. Muitas vezes a opção de maior viabilidade técnica e financeira é a execução de cortes ou aterros, que dão origem a taludes, estas estruturas que chegam a medir grandes alturas e comprimentos, necessitam de constante fiscalização e manutenção, para prevenir os efeitos temporais e manifestações patologias que comprometem sua estabilidade. Este estudo planeja verificar a condição e estabilidade dos taludes do rodoanel de Teresina-PI.

Como instrumento para essa análise foi feita a catalogação dos taludes existentes no rodoanel, e das manifestações patológicas que eles apresentam, visando encontrar o talude em estado mais crítico. Após delimitar o objeto de estudo, o trabalho prosseguiu com o levantamento topográfico do talude e a caracterização das matérias do mesmo. Tendo finalizado com a modelagem, através do software Geoslope, de três perfis do talude para encontrar seu fator de segurança mais crítico. Essa busca deu origem a fatores de segurança críticos entre 1,27 e 1,34 que estão abaixo do valor recomendado na NBR 11682, que discorre sobre estabilidade de encostas, e recomenda como seguro para infraestruturas fatores de segurança acima de 1,5. O resultado revela a necessidade de intervenções por parte dos órgãos responsáveis, visando aumentar a estabilidade do talude e seu fator de segurança, essa solução é possível mediante obras de estabilização do solo, e visa garantir a proteção dos usuários da estrada e de moradores das adjacências.

Palavras-chave: talude; fator de segurança; estabilidade; rodoanel.

ABSTRACT

The urban growth of cities presents various challenges, including overcoming natural obstacles. Often, the most technically and financially viable option is to execute cuts or embankments, which result in slopes. These structures, which can reach significant heights and lengths, require constant monitoring and maintenance to prevent temporal effects and pathological manifestations that could compromise their stability. This study aims to assess the condition and stability of the slopes along the Teresina–PI ring road. As part of this analysis, the existing slopes along the ring road were cataloged, along with the pathological manifestations they exhibit, to identify the most critical slope. After defining the object of study, the work proceeded with a topographic survey of the slope and characterization of its materials. The study concluded with the modeling, using Geoslope software, of three slope profiles to determine their most critical factor of safety. This search revealed critical safety factors ranging from 1.27 to 1.34, which are below the recommended value in NBR 11682, which addresses slope stability and recommends safety factors above 1.5 as safe for infrastructure. The result indicates the need for interventions by the responsible authorities to enhance the slope's stability and its safety factor. This solution is achievable through soil stabilization works and aims to ensure the protection of road users and nearby residents.

Keywords: slopes; safety factor; stability; ring road.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Registro de um talude rodoviário.....	20
Figura 2 - Escorregamento do morro dos cabritos, Rio de Janeiro 1998.	22
Figura 3 – Divisão entre taludes de corte e de aterro.....	23
Figura 4 – Erosão de solo.	24
Figura 5 – Tombamento de bloco.	24
Figura 6 – Escorregamento de solo.	25
Figura 7 – Resistência ao cisalhamento de pico e residual.....	27
Figura 8 – Ensaio de cisalhamento direto.	28
Figura 9 – Método das fatias.	31
Figura 10 - Fluxograma de serviço para estabilização de taludes.....	32
Figura 11 – Contenção de taludes.....	32
Figura 12 – Fluxograma de trabalho.	33
Figura 13 – Traçado do Rodoanel de Teresina.....	34
Figura 14 – Levantamento dos taludes do rodoanel de Teresina.	35
Figura 15 – Ficha de cadastramento de taludes.	36
Figura 16– Mapa dos taludes do Rodoanel por nível de risco.	38
Figura 17– Cronologia do Talude estudado.....	39
Figura 18– Talude estudado.....	40
Figura 19 – Levantamento topográfico.....	40
Figura 20 – Pontos do levantamento topográfico.	41
Figura 21 – Seções a serem trabalhadas.....	42
Figura 22 – Camadas de material do talude.....	42
Figura 23 – Material coletado do talude.	43
Figura 24 – Fluxo de ensaios realizados.....	44
Figura 25 – Pesagem da amostra após secagem.....	45
Figura 26 – Sequências de peneiras.....	46
Figura 27 – Limites dos solos.....	47
Figura 28 – Antes e depois do ensaio de liquidez.	47
Figura 29 – Procedimentos do ensaio de liquidez do solo.	48
Figura 30 – Procedimentos do ensaio de plasticidade do solo.	49
Figura 31 – Modelagem do corpo de prova de cisalhamento direto.....	52
Figura 32 – Máquina manual de cisalhamento direto.....	53

Figura 33 – Modelagem do corpo de prova na máquina de cisalhamento direto.	53
Figura 34 – Amostra rompida após ensaio de cisalhamento.	54
Figura 35 - Inserção das características da simulação.	55
Figura 36 - Modelagem do talude.....	56
Figura 37 – Adição dos solos.	56
Figura 38 – Início da simulação.....	57
Figura 39 – Curva de granulometria dos solos.....	60
Figura 40 – Resultado do ensaio de limite de liquidez 01.	62
Figura 41 – Resultado do ensaio de limite de liquidez 02.	62
Figura 42 – Resultado do ensaio de limite de liquidez 03.	63
Figura 43 – Resultado do ensaio de limite de liquidez 04.	63
Figura 44 – Tabela de classificação de solos.	66
Figura 45 – Umidade ótima do solo 01.....	68
Figura 46 – Umidade ótima do solo 02.....	68
Figura 47 – Umidade ótima do solo 03.....	69
Figura 48 – Umidade ótima do solo 04.....	69
Figura 49 – Curvas de deformação do solo 01.....	70
Figura 50 – Coesão e atrito interno do solo 01.....	71
Figura 51 – Curvas de deformação do solo 02.....	71
Figura 52 – Coesão e atrito interno do solo 02.....	72
Figura 53 – Curvas de deformação do solo 03.....	72
Figura 54 – Coesão e atrito interno do solo 03.....	73
Figura 55 – Curvas de deformação do solo 04.....	73
Figura 56 – Coesão e atrito interno do solo 04.....	74
Figura 57 – Perfil 01.	75
Figura 58 – Perfil 02.	75
Figura 59 – Perfil 03.	76
Figura 60 – FS da Seção 01 do Talude 11, método Bishop.....	77
Figura 61 – FS da Seção 02 do Talude 11, método Bishop.....	78
Figura 62 – FS da Seção 03 do Talude 11, método Bishop.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de movimentos de massas e suas consequências.	21
Tabela 2 - Fatores condicionantes de processos erosivos.	26
Tabela 3 – Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.....	30
Tabela 4 – Levantamento das patologias dos Taludes do Rodoanel de Teresina.	37
Tabela 5 – Estado dos taludes estudados.	37
Tabela 6 – Especificação da granulometria do material para ensaio.....	50
Tabela 7– Especificações do ensaio de compactação.	50
Tabela 8– Quantidade de golpes por energia de compactação.....	51
Tabela 9 – Ensaio de Teor de umidade do solo 01.....	58
Tabela 10 – Ensaio de Teor de umidade do solo 02.....	58
Tabela 11 - Ensaio de Teor de umidade do solo 03.....	59
Tabela 12 – Ensaio de Teor de umidade do solo 04.....	59
Tabela 13 – Análise do solo com base na granulometria.	61
Tabela 14 – Ensaio de limite de plasticidade do solo 01.	64
Tabela 15 – Ensaio de limite de plasticidade do solo 02.	64
Tabela 16 – Ensaio de limite de plasticidade do solo 03.	65
Tabela 17 – Ensaio de limite de plasticidade do solo 04.	65
Tabela 18 – Análise dos Limites de Atterberg.....	66
Tabela 19 – Classificação SUCS.....	67
Tabela 20 – Resumo das características físicas dos solos.	74
Tabela 21 – Relação de fator de segurança por método.....	79

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	29
Equação 2	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SUCS	Sistema Universal de Classificação de solos
NBR	Norma Brasileira regulatória
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
FS	Fator de segurança

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
c	Coesão
φ	Ângulo de atrito interno
S	Força solicitante
τ	Tensão cisalhante
σ	Tensão normal no plano de ruptura
Tg	Tangente
g	Grama
kg	Quilograma
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
kgf	Quilograma-força
kPa	Kilopascal
m ²	Metro quadrado
h	Horas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	TALUDES	19
2.1.1	Taludes rodoviários	19
2.2	MOVIMENTO DE MASSAS	20
2.2.1	Escorregamento	22
2.2.2	Queda de blocos	23
2.2.3	Tombamentos	24
2.2.4	Escoamento	25
2.2.5	Erosão	25
2.3	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	26
2.3.1	Análise de estabilidade	28
2.3.2	Fator de segurança	29
2.3.3	Modelagem no Geoslope/SLOPE W	30
2.3.4	Estruturas de contenção	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	RODOANEL DE TERESINA	34
3.2	ESCOLHA DO TALUDE	34
3.2.1	Levantamento de manifestações patológicas e riscos	36
3.3	TALUDE ESCOLHIDO	38
3.4	LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	40
3.4.1	Divisão das seções a serem trabalhadas	42
3.5	COLETA DE MATERIAL	42
3.6	ENSAIOS	43
3.6.1	Ensaio de Teor de Umidade	45
3.6.2	Ensaio Granulometria	45
3.6.3	Limites de Atterberg	46
3.6.4	Ensaio de Limite de Liquidez	47
3.6.5	Ensaio de Limite de Plasticidade	48
3.6.6	Ensaio de Compactação de solo	49
3.6.7	Ensaio de Cisalhamento Direto	51

3.7	ANÁLISE DE ESTABILIDADE	54
3.7.1	Modelagem.....	55
4	RESULTADOS	58
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	58
4.1.1	Teor de umidade do solo	58
4.1.2	Análise granulométrica.....	59
4.1.3	Índice de plasticidade	61
4.1.4	Classificação SUCS.....	66
4.1.5	Compactação dos solos	67
4.2	CISALHAMENTO DIRETO	70
4.3	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE	74
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

A construção de estradas em países com grande dimensão territorial, como o Brasil, tende a apresentar significativos desafios, por conta de obstáculos naturais e longas distâncias entre cidades, a qual conta com a engenharia para auxiliar na resolução. Por conta disso, há necessidade de se fazer cortes e aterros para contornar esses obstáculos, o que torna tais intervenções algo fundamental (Machado, 1986).

Os taludes são estruturas que surgem a partir desses cortes e aterros, eles originam-se da necessidade de conformar o terreno natural com a plataforma da estrada, apresentando uma inclinação para auxiliar na manutenção de sua estabilidade.

Segundo Filho (1998), as primeiras obras voltadas a promover a estabilidade de taludes, surgiram com o desenvolvimento da engenharia de geologia, durante a construção das primeiras grandes obras civis da humanidade.

No Brasil, são gastos significativos recursos em obras de estabilização de taludes, sendo que esses custos são passíveis de redução, uma vez que, boa parte desse gasto é feito de maneira emergencial, ou seja, proveniente de contratações em curto espaço de tempo o que sacrifica o planejamento e resulta em custos adicionais (ANDRADE, 2009).

Como uma forma de resolver essa questão, um diagnóstico prévio da condição dos taludes se torna fundamental, por colaborar para a redução dos custos de manutenção a longo prazo.

A falta de um adequado diagnóstico prévio voltados à análise de estabilidade de taludes pode resultar em uma série de acidentes, onde se destacam o rompimento da barragem de rejeitos em Mariana (2015), o rompimento da barragem de rejeitos em Brumadinho (2019), e os deslizamentos de terra ocorridos no Rio de Janeiro em 2011, os quais foram responsáveis por perdas de vidas e da própria infraestrutura em si (SOUZA, 2019).

No Piauí, a construção do Rodoanel de Teresina pode ser vista como exemplo de obra rodoviária que demandou a materialização de obras de terra significativas para os padrões da região. Com o objetivo de desviar parte do tráfego pesado que acontecia por dentro da cidade, foi concebido um rodoanel que implicou em grandes

desafios topográficos, uma vez que foi necessário a construção de inúmeros taludes de corte ao longo do traçado da nova via, com cerca de 28 km de extensão (CERQUEIRA, 2020).

Dado o exposto, esse trabalho buscou avaliar um dos taludes localizado no Rodoanel de Teresina, analisando as características do solo e, posteriormente, a sua estabilidade, por meio do cálculo do fator de segurança com auxílio do software SLOPE W.

A escolha desse tema se deu por conta da crescente preocupação com as condições dos taludes rodoviários existentes no entorno da Capital piauiense e como uma forma de contribuir para a redução dos riscos de incidentes envolvendo a ruptura de solo. Para tanto, é importante ter conhecimento das condições geotécnicas dos cortes, uma vez que, com esse conhecimento é possível avaliar a necessidade de intervenções e, por conseguinte, reduzir custos necessários a eventuais ações não programadas de estabilização.

Por conseguinte, este trabalho tem como objetivo a análise física e de estabilidade de um talude representativo do Rodoanel de Teresina, como foi descrito em Cerqueira (2020). É importante registrar que há sinais de erosão aparente nos cortes e, conseqüentemente, a necessidade de uma análise mais profunda da situação, buscando investigar possíveis problemas que podem levar à estabilidade.

A obtenção das características do talude escolhido para o estudo, por meio de um levantamento topográfico e dos ensaios de caracterização de solo, foram os dados de entrada para a realização do cálculo do fator de segurança na comparação dos momentos de tombamento e contra tombamento. Esses dados permitiram modelar no Geoslope a verificação de estabilidade, buscando identificar a condição mais crítica existente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TALUDES

Os taludes são superfícies inclinadas de rocha ou de solo, segundo Gerscovich (2012), eles se dividem em duas categorias, os taludes naturais e os taludes construídos (de corte ou de aterro).

A formação dos taludes está ligada a diversos fatores, como a ação do tempo, a ação humana e os desastres ambientais, essas ações podem ocorrer durante milhares de anos ou em poucos dias. Todos apresentam riscos de alterar as características iniciais dos taludes, fazendo assim necessário o seu monitoramento para garantir a segurança dos moradores do entorno do talude. (VARNES, 1978)

A presença de obstáculos para construções representa um desafio que tem o auxílio de intervenções humanas como uma alternativa para sua dissolução. Nas obras de terra, de uma maneira geral, são utilizadas duas soluções: (i) os cortes, quando a encosta é modelada com a redução de sua altura ou inclinação e (ii) os aterros, alternativa aplicada quando o local possui um desnível muito acentuado no percurso, sendo necessário depositar material na área de menor cota para evitar riscos à população beneficiária da intervenção.

2.1.1 Taludes rodoviários

Enquanto por um lado os taludes rodoviários são responsáveis por reduzir percursos permitindo a construção de estradas em locais com obstáculos naturais; por outro, eles criam uma necessidade de fiscalização perene, desde o seu processo construtivo até depois de sua entrega.

Os taludes rodoviários exercem grande influência na segurança viária, uma vez que deslizamentos e instabilidades nessas estruturas podem causar acidentes graves, interrupções no tráfego e perdas de vidas humanas.

A falta de manutenção adequada dos taludes pode resultar em riscos para os usuários das estradas (ABNT, 2009). Fica destacada a importância de estratégias eficazes de monitoramento e intervenção preventiva para manter a via segura. Tendo

em vista isso, é necessário entender que o seu controle, por parte dos responsáveis pela via, exerce um papel crucial na segurança das estradas (IPT, 1991), já que o monitoramento ajuda a prevenir rompimentos que podem causar, como já registrado, perdas de vidas e materiais.

Figura 1 – Registro de um talude rodoviário.



Fonte: Autor (2024).

2.2 MOVIMENTO DE MASSAS

Os movimentos de massas são incidentes em que massas de solo ou rocha são afetados pela gravidade, fazendo com que ela progrida pela jusante e para o exterior (MENDONÇA, 2021). Dentro desse fenômeno existem várias categorias, cada uma com características próprias, dentre elas os escorregamentos, as quedas de blocos, escoamentos e tombamentos. (GUILDICINI, 1983)

A ocorrência desses fenômenos representa uma grande problemática para algumas regiões do mundo, principalmente naquelas com relevo acidentado, uma vez que a população acaba precisando recorrer a construção de suas casas em locais impróprios e, muitas vezes, sem estudo de segurança geotécnica, causando significativos riscos à vida humana e à infraestrutura.

Um dos tipos de infraestrutura mais afetado é a rodoviária, que por envolver grandes percursos, acaba precisando atravessar regiões com o relevo sinuoso, e a ruptura dos taludes são umas das principais razões de incidentes com vítimas, por conta de suas inclinações excessivas e falta de manutenção adequada.

Tabela 1 – Tipos de movimentos de massas e suas consequências.

Tipo de movimento			Tipo de material		
			Rocha	Engenharia de solos	
				Predominantemente grosseiro	Predominantemente fino
Quedas			De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos			De rocha	De detritos	De terra
Escorregamentos	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rochas	Abatimento de detritos	Abatimento de terra
	Translacional	Muitas unidades	De blocos rochosos De rocha	De blocos de detritos De detritos	De blocos de terra De terra
Dispersões laterais			De rocha	De detritos	De terra
Escoamentos			De rocha (Fluência profunda)	De detritos (rastejamento)	De terra (rastejamento)

Fonte: Adaptado de Varnes (1978).

Entre os vários autores que desenvolveram trabalhos sobre os tipos de movimentos de massas, Gerscovich (2012) classifica Varnes (1978) como o mais internacionalmente reconhecido, tendo o seu trabalho dividindo os movimentos em cinco categorias, conforme se reproduz na Tabela 01.

A ação dos movimentos de massas pode gerar perdas de vidas humanas, além de prejuízos de origem econômica, uma vez que os deslocamentos de solos por

eles causados apresentam risco a possíveis construções localizadas na jusante da encosta, como o ocorrido no Rio de Janeiro, ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Escorregamento do morro dos cabritos, Rio de Janeiro 1998.



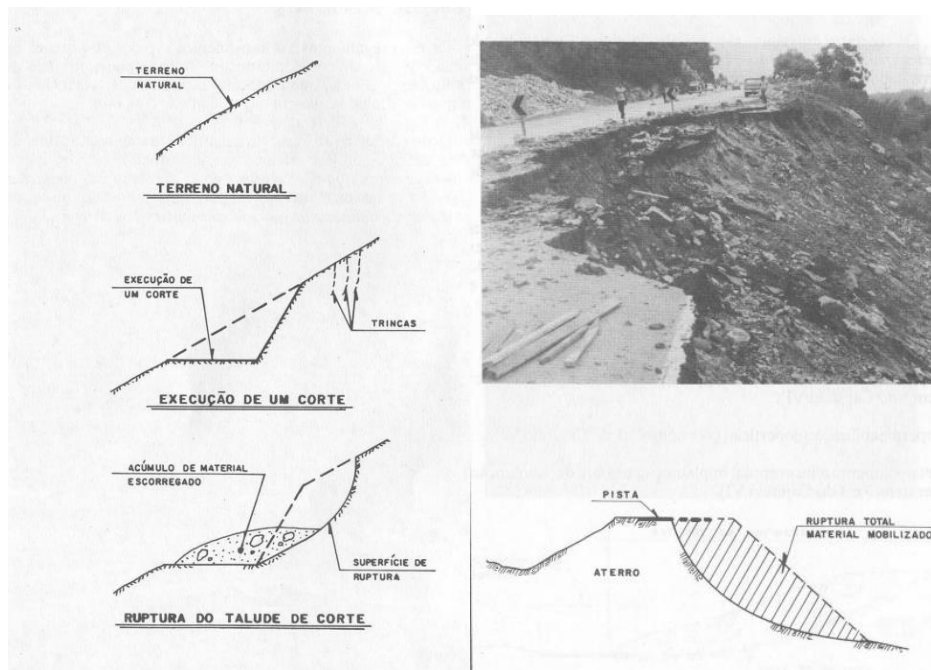
Fonte: Gerscovich (2012).

2.2.1 Escorregamento

O escorregamento se caracteriza como um movimento em que uma camada de material que se encontra na superfície se desprende da base, por conta de uma maior fragilidade na ligação entre eles, que facilita com que, após receber o impacto gravitacional, esse material seja deslocado por meio da ação de cisalhamento (GERSCOVICH, 2012).

Uma das principais características desse movimento de massas é seu rompimento ocorrer em porções de solo de dimensões variadas, o que gera um maior risco de obstrução dos locais afetados, independentemente de o talude ser de corte ou natural, como é possível se visualizar na Figura 3.

Figura 3 – Divisão entre taludes de corte e de aterro.



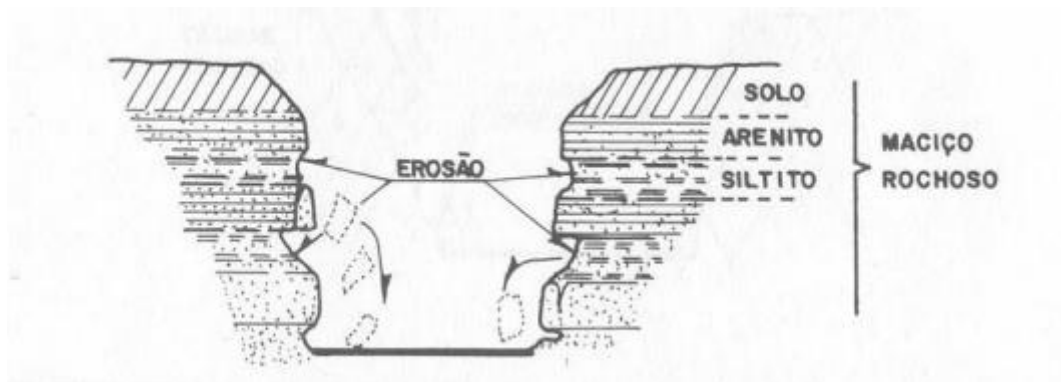
Fonte: IPT (1991).

2.2.2 Queda de blocos

A queda de blocos, segundo a NBR 11682, consiste em desprendimento de fragmentos do solo, independentemente do tamanho ou da altura dele. Representa um grande risco em taludes localizados na beira de estrada, por conta da sua rápida evolução, desde o desprendimento até a queda, uma vez que por conta da alta velocidade dos veículos que trafegam e dos fragmentos, o impacto acaba sendo maximizado.

Assim como visto na Figura 03, os fragmentos que se desprendem do maciço sofrem com influência das cargas gravitacionais, que levam eles a ir de encontro com o solo. Entre os motivos principais, destacam-se os processos erosivos e a ocorrência de vibrações, este último resultado de obras com escavações e tremores de terra, segundo Gerscovich (2012).

Figura 4 – Erosão de solo.



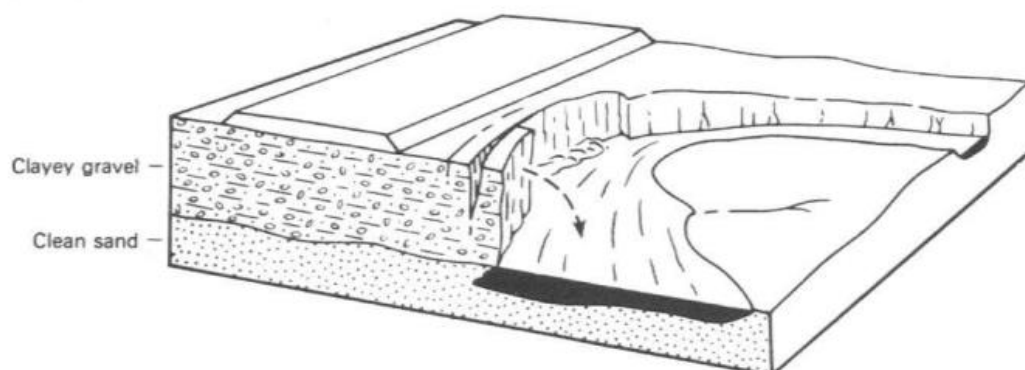
Fonte: IPT (1991).

2.2.3 Tombamentos

Quando uma massa rochosa ou de solo executa um movimento de rotação direcionada a frente, por influência da gravidade, recebe a nomenclatura de tombamento (BRAJA, 2013).

É um movimento comum de ocorrer em taludes com poucos graus de inclinação, que causa falta de estabilidade em massas de solos com maior grau de compactação, por conta da amplificação do impacto das cargas em massas maiores e mais compactas.

Figura 5 – Tombamento de bloco.



Fonte: Varnes (1978).

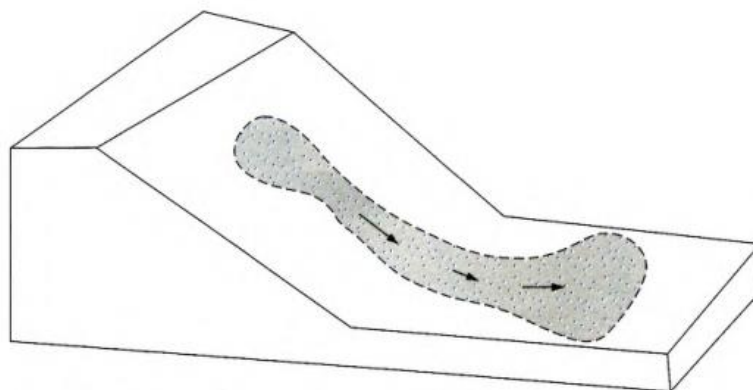
Dentre alguns outros fatores que causam o tombamento do solo estão a instabilidade geológica, o tipo de solo e sua capacidade de suporte, as condições

climáticas, a presença de vegetação, a ação humana, como desmatamento e construções inadequadas, entre outros.

2.2.4 Escoamento

O escoamento de solo é um movimento essencialmente superficial, que ocorre quando o material ultrapassa seu limite de liquidez, se tornando um fluido (ABNT, 2009). Os impactos acabam sendo amplificados em locais com ausência de vegetação na superfície, uma vez que as raízes são responsáveis por dar suporte ao solo, evitando que, mesmo ele ao se tornar líquido, uma boa parte fique retida na cobertura vegetal (IPT, 1991).

Figura 6 – Escorregamento de solo.



Fonte: Braja (2013).

O estudo desse movimento de massa trata dos deslocamentos grandes quantidades de material ao longo da superfície terrestre, podendo ser causado por diversos fatores. Esses eventos podem resultar em deslizamentos de terra, corridas de solo e fluxos piroclásticos (BRAJA, 2013), representando um grande risco para áreas habitadas ou de infraestrutura, dando destaque ao cobrimento da superfície de estradas, que pode causar acidentes com os veículos que trafegam na via.

2.2.5 Erosão

Uma das principais causas de movimentos de massas é a erosão, caracterizada por ser uma evolução natural do talude que, com o passar do tempo, acaba resultando em patologias, sendo essas responsáveis pelos movimentos de massa.

Dentro dos processos erosivos, existe a divisão entre os com influência de fatores externos e de fatores internos, Tabela 02, sendo o primeiro causado por problemas relacionados à ação do tempo (como drenagem e retaludamento), enquanto o segundo ocorre pela ação dos componentes do próprio talude (como o solo).

Tabela 2 - Fatores condicionantes de processos erosivos.

Fatores Internos	- Fluxo interno
	- Tipo de solo
	- Desagregabilidade
	- Erodibilidade
	- Características geológicas e geomorfológicas
	- Presença de trincas de origem tectônica
Fatores externos	- Potencial de erosividade da chuva
	- Condições de infiltração
	- Escoamento superficial
	- Topografia

Fonte: Gerscovich (2012).

A erosão de solo em encostas refere-se ao processo de desgaste e remoção do solo, causado pela ação da água, vento ou atividade humana, em terrenos inclinados (GERSCOVICH, 2012). Esse fenômeno é de extrema importância devido aos graves impactos que ele resulta, como deslizamentos de terra, degradação do solo e perda de terras estáveis. Compreender os efeitos e a relevância desse fenômeno é essencial para a implementação de medidas eficazes de prevenção e mitigação.

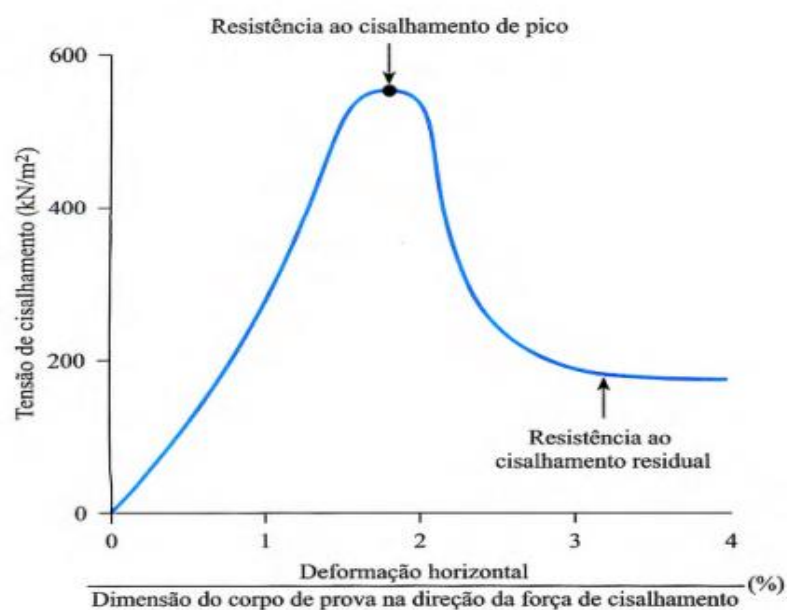
2.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A resistência ao cisalhamento, conhecida como resistência residual, é a capacidade de um solo de suportar a ação de fenômenos externos, mesmo após sofrer fortes desgastes na sua estrutura original. O valor da resistência residual é um

índice de suporte de cargas que um solo mantém após ter sofrido deteriorações, por meio ciclos de umidade e secagem repetitivos (SKEMPTON,1964).

Segundo Fonseca (2006), esse fator é importante para casos em que o talude estudado apresenta deteriorações visíveis. Uma vez que é provável que ele apresente maiores fragilidades quanto a sua estrutura e, conseqüentemente, precise de intervenções por parte da engenharia.

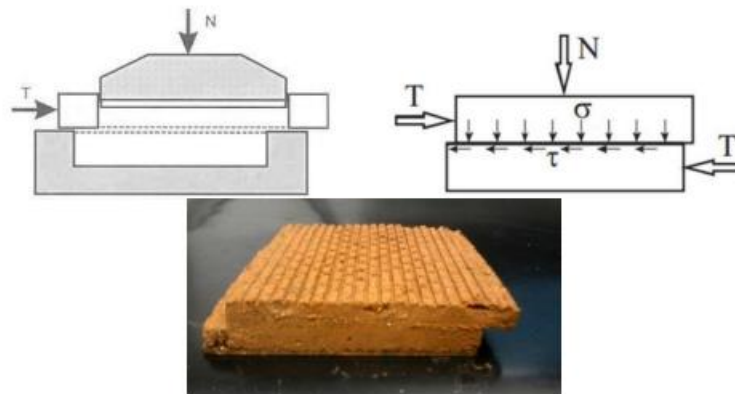
Figura 7 – Resistência ao cisalhamento de pico e residual.



Fonte: Braja (2013).

Para a obtenção da resistência residual de uma amostra, realiza-se o ensaio de cisalhamento direto ou Direct Shear Test, que é baseado na teoria de Mohr-Coulomb, isto é, simula-se a aplicação de cargas em um corpo de prova até ele sofrer uma deformação, após atingir a sua resistência de pico e, depois disso, medir a resistência residual daquela amostra (MARAGON, 2018).

Figura 8 – Ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Maragon (2018).

Com o resultado do ensaio de cisalhamento direto, é possível obter um diagnóstico sobre a condição do solo presente no talude estudado, podendo caracterizar a resistência ao cisalhamento em uma condição adversa que possa acontecer por fenômenos naturais fora do comum, que cada vez mais atuam em curtos espaços de tempo.

O ensaio de resistência ao cisalhamento do solo também é importante para analisar a condição física que o solo de uma região se encontra. Uma vez que, ele revela a capacidade do solo em resistir a ação de forças cisalhantes, que a longo prazo podem causar o colapso de um talude.

2.3.1 Análise de estabilidade

Os taludes são cortes de terra que delimitam uma superfície maciça de terra ou rocha, natural ou construído por meio de um corte ou aterro (BARBOSA, 2012).

Segundo Gerscovich (2012), os taludes naturais estão sempre sujeitos a problemas de instabilidade com o passar do tempo, pois determinados fatores alteram o estado de tensões da massa e provocam tensões cisalhantes que se igualam à resistência ao cisalhamento do solo. Uma vez que as variações entre tipos de solo podem ser responsáveis por reduzir significativamente a segurança do talude, aumentando, assim, a probabilidade de ocorrer alguma ruptura (FREITAS, 2021).

A análise de taludes é fundamental para a engenharia geotécnica, uma vez que é importante a avaliação e minimização dos riscos de instabilidade em encostas

e taludes. Os dados estudados na avaliação dos taludes consideram os fatores como o tipo de solo, a geometria do talude, a presença de água e atividades humanas na área. A importância desse tipo de análise reside na prevenção de deslizamentos de terra, erosões e colapsos, que podem causar danos materiais e colocar em risco a vida das pessoas que vivem ou transitam próximas às áreas de taludes.

2.3.2 Fator de segurança

O fator de segurança em taludes é essencial para avaliar a estabilidade de encostas e vertentes, tendo em conta as propriedades geotécnicas do solo, o embasamento rochoso e as condições ambientais. A compreensão da importância desse fator permite antecipar potenciais falhas e garantir a segurança de projetos de engenharia civil, geotécnica e de infraestrutura. A análise cuidadosa do fator de segurança fornece subsídios para a tomada de decisões embasadas, assegurando a estabilidade de taludes e prevenindo riscos associados a instabilidades.

Para o cálculo do fator de segurança de um talude existem vários métodos, que se utilizam de teorias distintas para chegar ao valor do fator de segurança (Fs). Dentre os quais Massad (2010) destaca Fellenius, Bishop e Morgenstern e Price, como os utilizados com mais frequência.

Em geral, o fator de segurança (Fs), costuma ser definido por meio da relação entre a resistência ao cisalhamento do solo e a tensão cisalhante atuante, como observado na Equação 01. Já para o cálculo da resistência ao cisalhamento temos a Equação 02, que serve como dado de entrada para a definição da fase anterior.

$$\text{Equação 1} \quad F_s = \frac{s}{\tau}$$

$$\text{Equação 2} \quad S = c + \sigma * \operatorname{tg} \varphi$$

Segundo Ayala (2018), para um talude ser considerado estável seu fato de segurança (FS) deve ser maior que 1. Caso o fator de segurança (FS) seja menor que 1, o talude está em iminência de ruptura. A Tabela 03 apresenta um resumo dos valores mínimos para o fator de segurança (FS).

Tabela 3 – Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

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

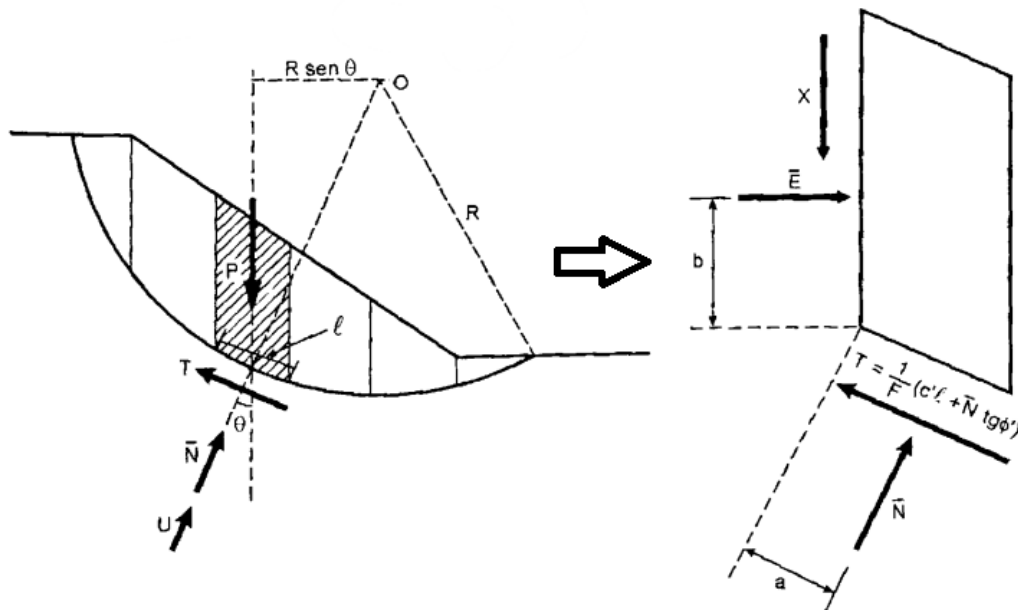
Fonte: Adaptado de ABNT (2009)

Vale destacar que apesar de o FS acima de 1 ser adotado como estável em Barbosa (2012), é comum adotar um fator de segurança de até 0,5, tornando o FS recomendado 1,5, seguindo o valor da ABNT (2009).

2.3.3 Modelagem no Geoslope/SLOPE W

O SLOPE W baseia-se no método das fatias, que se encontra resumido na Figura 09, para analisar a estabilidade dos taludes (FREITAS, 2021). Ele é de fundamental importância para automatizar o cálculo do FS, além de facilitar o encontro da situação crítica de cisalhamento em um talude. Fazendo, assim, uma análise robusta dos dados obtidos a partir dos ensaios de laboratório de solos.

Figura 9 – Método das fatias.



Fonte: Massad (2010).

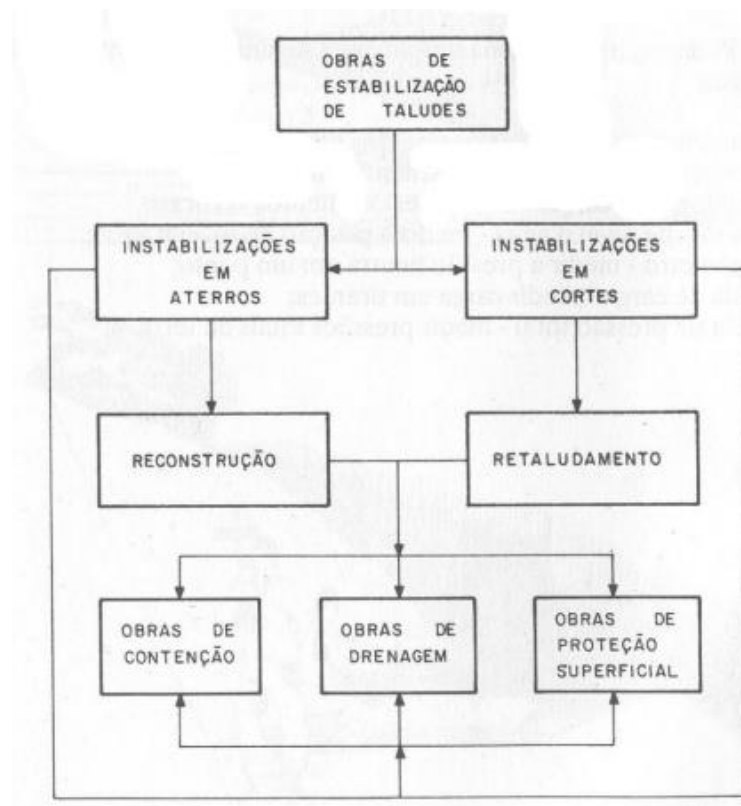
O principal motivo para a escolha do SLOPE W, é por conta da sua capacidade de resolver problemas complexos (GEOSLOPE, 2007). Uma vez que ele se destaca por ser altamente preciso e considerar as forças normal e cisalhante.

2.3.4 Estruturas de contenção

A contenção e estabilização de taludes é crucial no campo da engenharia rodoviária e nas construções próximas a encostas. A importância da estabilização de taludes é enorme, uma vez que, alguns locais próximos a essas estruturas de terra só ficam apropriados para receber construções, após a estabilização do talude, por conta do risco de movimentos de massas (GUIDICINI, 1983).

Assim, o impacto potencial de taludes instáveis na infraestrutura, no meio ambiente e nas vidas de moradores não pode ser desprezado. Portanto, é importante ser feita uma avaliação da situação de cada talude, para determinar os riscos e medidas a serem implementadas. A qual pode ser desenvolvida por meio de uma sequência de passos, conforme se apresenta na Figura 10, isto é, um fluxograma para investigação e solução de problemas em taludes.

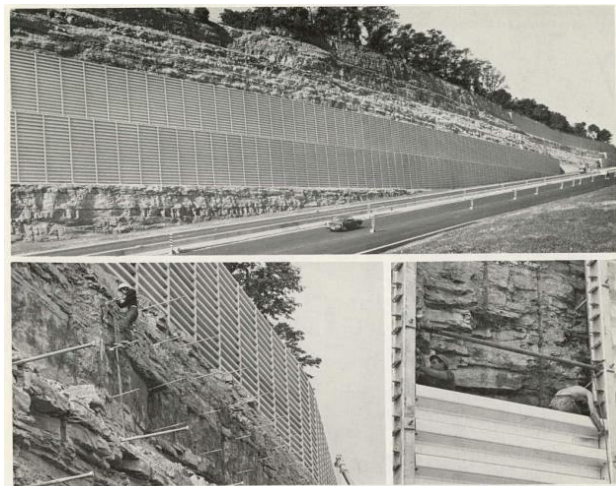
Figura 10 - Fluxograma de serviço para estabilização de taludes.



Fonte: IPT (1991).

Para a estabilização de taludes, é necessário se levar em conta os aspectos físicos dele, desde a sua inclinação até a resistência do solo, uma vez que existe uma grande gama de soluções para estabilização. Entre as soluções para resolver essa problemática, existem duas subdivisões, a com intervenção e a sem intervenção.

Figura 11 – Contenção de taludes.

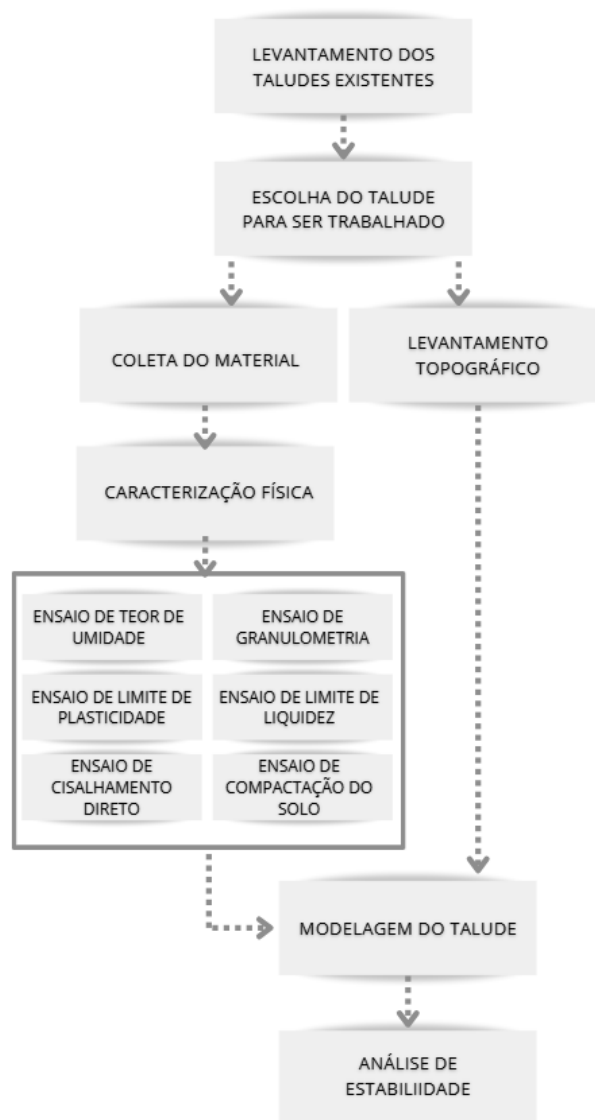


Fonte: Varnes (1978).

3 METODOLOGIA

Como base da metodologia dessa pesquisa, será utilizado as orientações do manual de geotecnia do IPT, de 1991, atrelado aos estudos para estabilidade de taludes presentes em Gerscovich (2012). A Figura 12, apresenta um fluxograma de trabalho, com o intuito de descrever a ordem das atividades desenvolvidas neste trabalho.

Figura 12 – Fluxograma de trabalho.

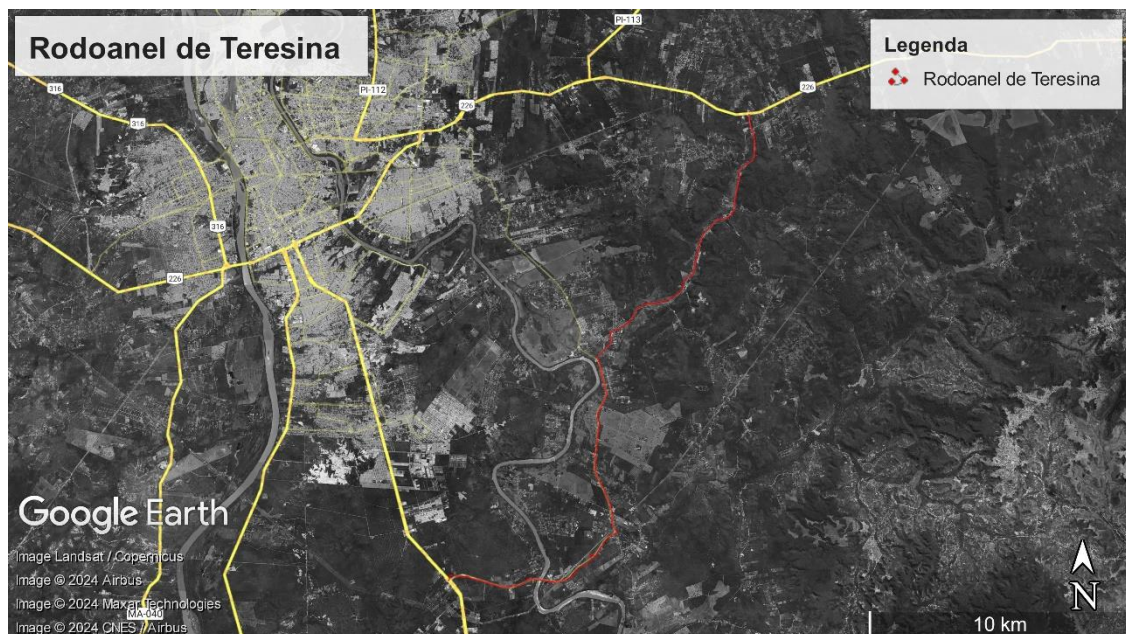


Fonte: Autor (2024).

3.1 RODOANEL DE TERESINA

O local para realização da pesquisa foi o Rodoanel de Teresina, obra entregue em 2019 e que possui aproximadamente 29 km de extensão, ver Figura 13, ligando a BR-343 à BR-316. O projeto teve como finalidade reduzir o tráfego de veículos pesados pelo perímetro urbano de Teresina, além de reduzir em mais de 10 km o percurso anterior (GOVERNO DO PIAUÍ, 2012).

Figura 13 – Traçado do Rodoanel de Teresina.



Fonte: Autor (2024).

A previsão inicial era de serem gastos R\$ 80.000.000,00 com a implantação da solução de desvio de tráfego e ser entregue em um prazo máximo de 12 meses, a partir do seu início em 2012 (GOVERNO DO PIAUÍ, 2012).

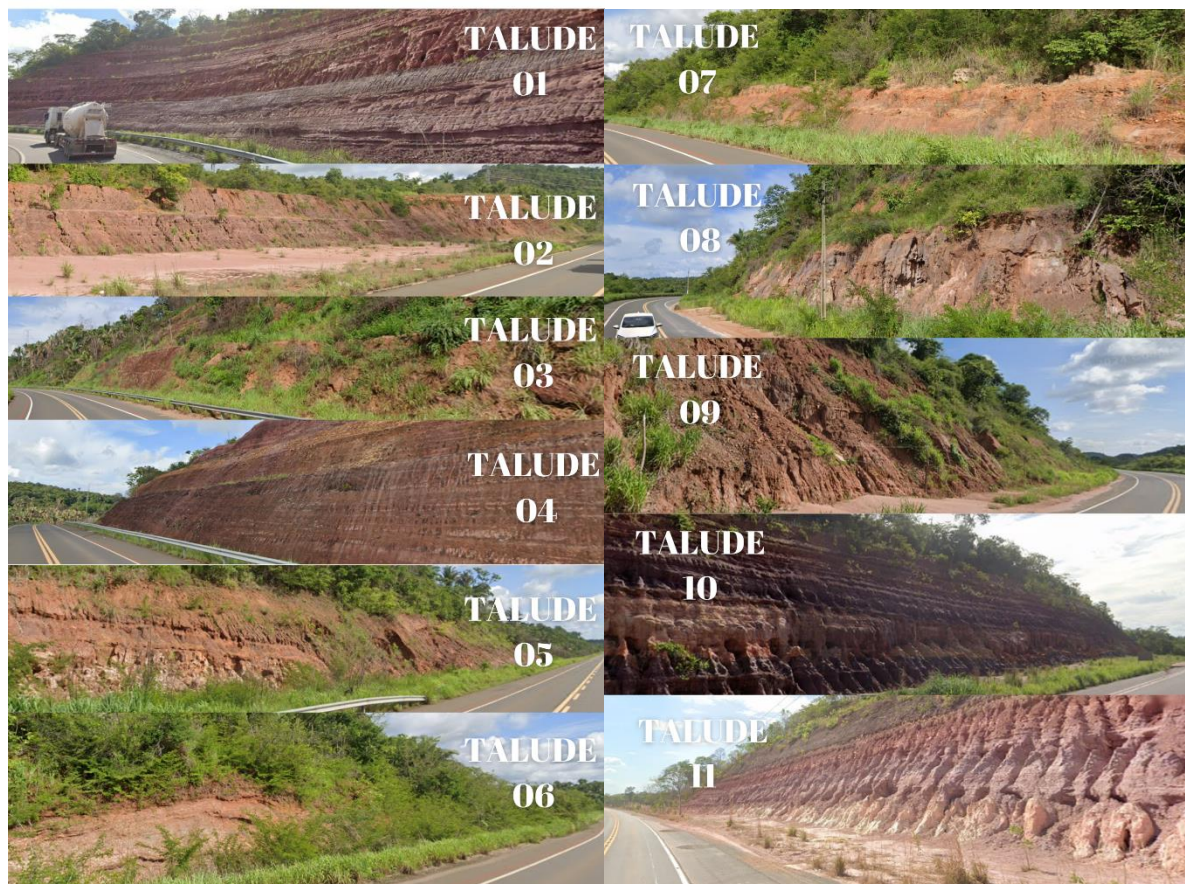
A obra do rodoanel, entretanto, custou ao seu final R\$ 122.997.001,21 de execução, somados a R\$ 12.910.085,04 de projetos complementares e licenciamento ambiental (SEPLAN-PI, 2019). Foi entregue apenas em 2019 em razão de paralisações e troca da empresa responsável pela execução, o que causou um abandono de parte das estruturas que já haviam sido iniciadas e passaram, por conseguinte, longos períodos sem receber fiscalizações.

3.2 ESCOLHA DO TALUDE

Na tentativa de encurtar ao máximo o percurso da via, foi escolhido um traçado com grande necessidade de execução de cortes, por conta do relevo acidentado. Tendo em vista isso, no presente trabalho, inicialmente, debruçou-se com a necessidade de levantar a quantidade de taludes existentes no Rodoanel de Teresina, classificá-los de acordo com o nível de degradação, a exemplo do proposto pelo IPT (1991), e, após isso, escolher o talude mais comprometido para analisar sua estabilidade.

Assim, foi realizado um levantamento da quantidade de taludes presentes no rodoanel e sua localização, utilizando a ferramenta do Google Street View. E, posteriormente, indo à campo para confirmar a presença dos taludes. A Figura 14, apresenta os 11 taludes encontrados nessa etapa de levantamento para subsidiar a análise de manifestações patológicas e outras problemáticas.

Figura 14 – Levantamento dos taludes do Rodoanel de Teresina.



Fonte: Autor (2024).

3.2.1 Levantamento de manifestações patológicas e riscos

Para o levantamento da situação dos taludes, aplicou-se a metodologia estabelecida no manual de geotecnia do IPT, o qual tem como foco orientações para diagnósticos e soluções para problemas em taludes, editado em 1991. Basicamente, o referido manual consiste em uma ficha de cadastro, ver Figura 15, para investigar problemas em taludes, de acordo com o estado em que eles se encontram.

Figura 15 – Ficha de cadastramento de taludes.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO-DER		DR-	RC-
FICHA Nº 1	DATA __/__/__	PREENCHIDA POR:	
CADASTRAMENTO			
Local:	SP-	Km:	Fotos:
Cadastramento anterior:	() Sim - Data __/__/__	() Não	
Em caso positivo: Houve evolução do problema?	() Sim	() Não	
Foram realizadas obras?	() Sim	() Não	
Especificar:			
Existe projeto de obras de estabilização ?	() Sim	() Não	
Dados geométricos do corte ou aterro:	Vol. aproximado de material (m ³):		
Altura (m):	Inclinação (°):		
Extensão (m):	Declividade (%):		
() PROBLEMAS EM CORTE			
() EROÇÃO	() ESCORREGAMENTO	() QUEDA DE BLOCOS	
() em sulcos	() devido à inclinação acentuada	() por estruturas residuais	
() diferenciada	() ao longo de estruturas residuais	() por descalçamento	
() longitudinal em plataforma	() no contato solo/rocha		
() associada a obras de drenagem (ravina e boçoroca)	() por saturação		
	() por evolução de erosão (sulcos profundos ou diferenciada)	() ROLAMENTO DE BLOCOS	
() DESAGREGAÇÃO SUPERFICIAL	() em corpo de talus		
() PROBLEMAS EM ATERRO			
() EROÇÃO	() ESCORREGAMENTO, por problemas:	() RECALQUE	
() em sulcos	() na fundação	() deficiência de fundação	
() longitudinal em plataforma	() no corpo do aterro	() deficiência de drenagem	
() associada a obras de drenagem (ravina e boçoroca)	() em travessia de linhas de drenagem	() rompimento de bueiro	
() erosão interna (piping)	() nos sistemas de drenagem e proteção superficial	() má compactação	
() OUTROS PROBLEMAS	Presença de água: () Sim () Não		
Especificar:	() áreas saturadas		
	() surgências localizadas		
CROQUI - planta simplificada e seção (utilizar o verso)			
GRAVIDADE DA SITUAÇÃO			
() Nível 0-Não oferece perigo para o tráfego (local estabilizado)	() Nível 2-Em evolução, perigo a curto/médio prazo para o tráfego		
() Nível 1-Pode oferecer perigo a longo prazo para o tráfego	() Nível 3-Em evolução, com perigo imediato para o tráfego		

Fonte: IPT (1991).

Arelado à ficha de cadastro, foram acrescentados outros dados como a proximidade com a pista, se possui drenagem, a quantidade de materiais e a presença de outros riscos, obtendo-se como resultado o Tabela 04.

Tabela 4 – Levantamento das patologias dos Taludes do Rodoanel de Teresina.

Talude	Proximidade da pista (M)	Drenagem	Variação de materiais	Patologia	Fator atípicos
1	4,0	Não	5	Erosão (Média)	
2	15,0	Não	1	Nenhuma	
3	5,0	Não	2	Nenhuma	
4	6,0	Não	5	Nenhuma	
5	5,0	Não	1	Erosão (Alta)	
6	6,0	Não	1	Erosão (Alta)	
7	4,0	Não	1	Erosão (Média)	
8	2,0	Não	2	Erosão (Alta) Escorregamento (Médio)	Material invadindo acostamento.
9	2,0	Não	2	Erosão (Alta)	Proximidade com a pista.
10	15,0	Não	4	Erosão (Alta) Queda de Blocos (média)	
11	12,0	Não	4	Erosão (Alta) Queda de Blocos (Média) Escorregamento (Médio)	Material invadindo acostamento e poste de linha de alta tensão no topo do talude.

Fonte: Autor (2024).

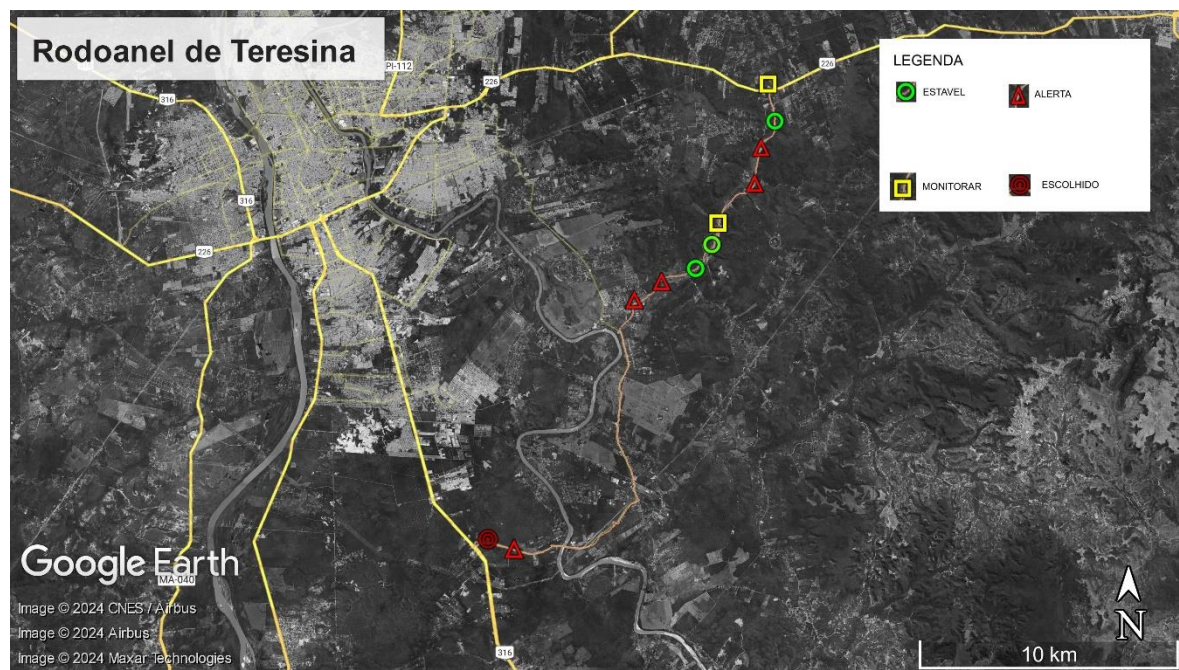
Tabela 5 – Estado dos taludes estudados.

Talude	Estado
1	Nível II (Monitorar)
2	Nível I (Estável)
3	Nível III (Alerta)
4	Nível III (Alerta)
5	Nível II (Monitorar)
6	Nível I (Estável)
7	Nível I (Estável)

Fonte: Autor (2024).

Após esse levantamento, foi produzido um mapa, Figura 16, com auxílio do Google Earth, para representar a localização de cada talude e seu nível de comprometimento.	8	Nível III (Alerta)	nível de
	9	Nível III (Alerta)	
	10	Nível III (Alerta)	
	11	Nível III (Alerta)	

Figura 16– Mapa dos taludes do Rodoanel por nível de risco.



Fonte: Autor (2024).

3.3 TALUDE ESCOLHIDO

Posteriormente ao levantamento de dados sobre os taludes do rodoanel, o talude escolhido acabou recaindo no de número 11, por conta do mesmo estar com um alto nível de erosão aparente, possuir sinais de queda de blocos, presença de escorregamento de material (inclusive invadindo a pista), indícios de intervenções de retaludamento, durante a etapa de construção da via (Figura 17), e a presença de um poste de alta tensão situado próximo ao pé do talude.

O talude não possui a presença de dispositivos de drenagem, que segundo Varnes (1978), é fundamental para dissipar os impactos da água da chuva, que causa perda de material e acaba levando solo em estado líquido para a pista, podendo causar acidentes aos veículos que utilizam a via.

Figura 17– Cronologia do Talude estudado.



Fonte: Autor (2024)

O talude 11, Figura 18, fica localizado próximo à BR-316, na zona sul de Teresina, ele é o talude mais próximo da zona urbana da Capital, e seu rompimento causaria a interrupção de todo o tráfego do rodovial para quem busca evitar trafegar dentro do município. Em caso de colapso, também aumentaria em 30 km o percurso para moradores de alguns povoados, que hoje tem esse trecho como o único acesso pavimentado a região central de Teresina.

Figura 18– Talude estudado.



Fonte: Autor (2024).

3.4 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Para o levantamento topográfico do talude 11, foi utilizada a NBR 13133, que dispõe sobre levantamento topográfico. O objetivo deste levantamento foi chegar as dimensões do talude, sua altura, seu comprimento, sua inclinação e delimitar até que cota cada camada de solo estava situada, para servir de dado de entrada na modelagem no software.

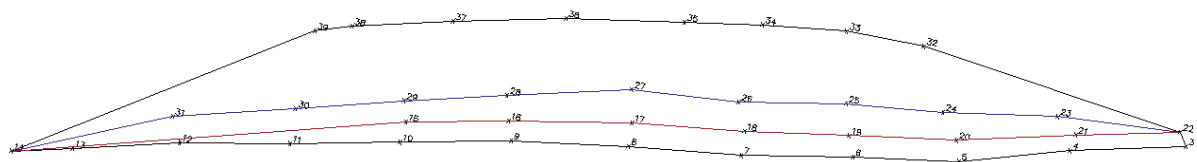
Figura 19 – Levantamento topográfico.



Fonte: Autor (2024).

Como materiais, foram utilizados uma estação total e um prisma, sendo a estação instalada em um ponto fixo em frente ao talude, e o prisma sendo deslocado para o local em que se havia o objetivo de captar a localização, tendo ao final se somado 39 pontos, Figura 20.

Figura 20 – Pontos do levantamento topográfico.



Fonte: Autor (2024).

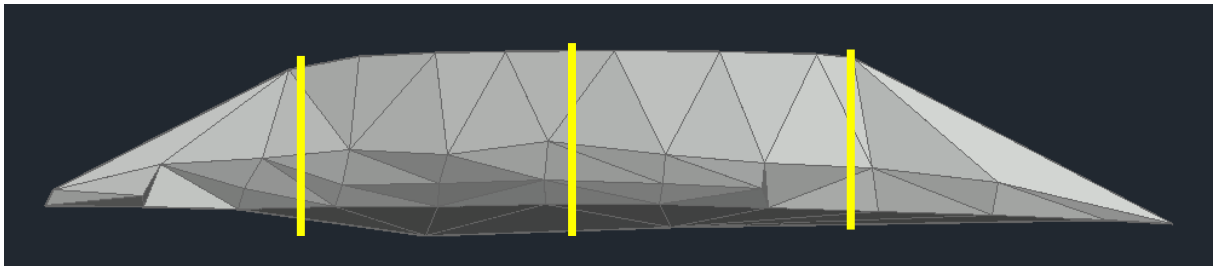
Após a coleta dos pontos, foi utilizado o software Topograph 98 para digitalizar os pontos e fazer a triangulação entre eles, tendo como resultado as curvas de nível da superfície de interesse. Outro ponto de interesse foram as medidas do talude como altura máxima, que é igual a aproximadamente 18,0 m e o comprimento, igual a 153,09 m.

3.4.1 Divisão das seções a serem trabalhadas

Após a digitalização no Topograph 98, os pontos foram extraídos do aplicativo, com o objetivo de serem levados ao Civil 3D para a modelagem de 3 seções. Cada seção contém um perfil geotécnico com a delimitação de altura, inclinação e identificação das camadas de solo presentes no talude.

As seções escolhidas, ver Figura 21, foram selecionadas por estarem uma em cada extremidades do talude e uma ao centro. Com isso foi possível analisar a estabilidade do talude em vários pontos específicos da sua extensão.

Figura 21 – Seções a serem trabalhadas.

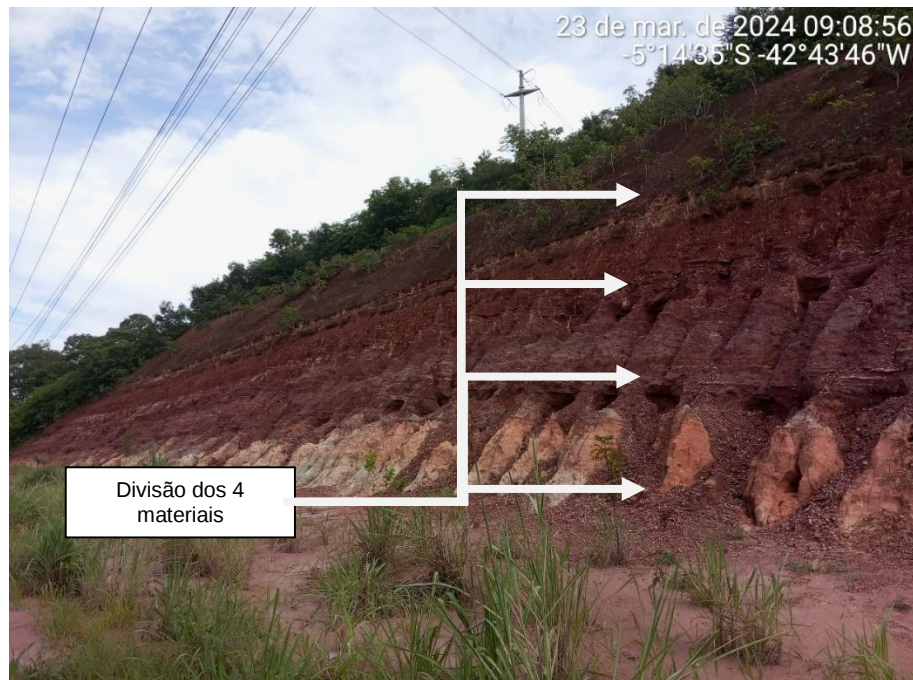


Fonte: Autor (2024).

3.5 COLETA DE MATERIAL

A coleta de material seguiu as diretrizes da DNER-PRO 003, de 1994, que discorre sobre a forma mais adequada de se realizar a coleta de amostras de solo já deformadas, ou seja, que tiveram sua estrutura básica quebrada durante a coleta. Para o trabalho, foram coletados aproximadamente 30 kg de solo para cada uma das quatro camadas de materiais identificadas no talude, ver Figura 22.

Figura 22 – Camadas de material do talude.



Fonte: Autor (2024).

Por conseguinte, uma vez coletados, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos e encaminhadas ao Laboratório de Solos do IFPI – Campus Teresina Zona Sul, onde foram colocados para secagem prévia, seguindo a NBR 6457 de 2016. O objetivo da secagem foi atingir a umidade hidróscópica, isto é, a umidade residual onde ele entra em equilíbrio com a umidade relativa do ar. Cabe registrar que a secagem prévia consumiu 96 horas, para o material chegar na condição adequada.

Figura 23 – Visão geral do material das quatro camadas coletadas do talude.



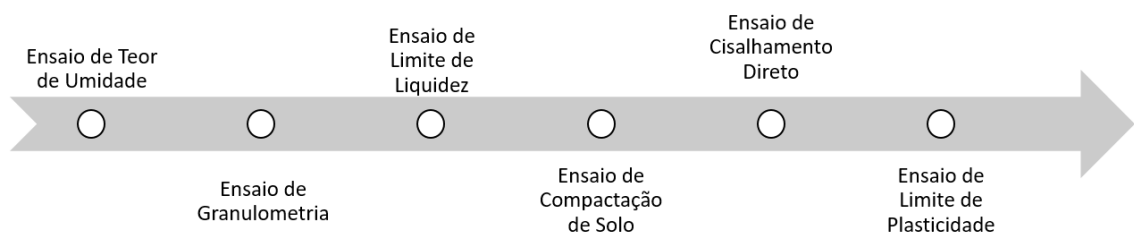
Fonte: Autor (2024).

3.6 ENSAIOS

A importância da caracterização, física e mecânica, dos solos está atrelada a necessidade de compreender as características específicas de cada tipo de solo, diante da tomada de decisões. Através da caracterização se consegue ter um indicativo de como o solo irá se comportar sob diferentes condições de carga, umidade e temperatura, fornecendo dados essenciais para a elaboração de projetos geotécnicos seguros e eficientes. Além disso, a caracterização dos solos permite a identificação de potenciais problemas geotécnicos, promovendo a prevenção de acidentes e falhas estruturais.

Os ensaios de caracterização física do solo desta pesquisa foram feitos no Laboratório de Solos do IFPI – Campus Teresina zona sul. O objetivo desses ensaios foi quantificar o limite de plasticidade, limite de liquidez, o grau de compactação, o ângulo de atrito interno, a coesão e o peso específico, informações fundamentais para o cálculo da estabilidade do talude. A escolha da ordem de execução, Figura 24, foi proposta com o objetivo de conhecer o material a medida em que se avançasse nos ensaios, admitindo um grau crescente de complexidade, até chegar ao ensaio de cisalhamento direto, crucial para a análise de estabilidade.

Figura 24 – Fluxo de ensaios realizados.



Fonte: Autor (2024).

Para a preparação dos solos para os ensaios de caracterização, foi empregada a NBR 6457, que dispõe sobre o método de preparação de amostras.

3.6.1 Ensaio de Teor de Umidade

A realização do ensaio de teor de umidade, descrito na NBR 6457, teve como missão conhecer a umidade hidrosfópica do solo, uma vez que, após o solo ser colocado para secar em um lugar arejado, ele tende a chegar ao menor percentual de umidade possível. Em geral, esse é o primeiro passo em muitos ensaios geotécnicos.

Para esse ensaio, foram utilizados 200 g do solo da camada 01, na condição de seco ao ar, esse material foi previamente destorroado e passado pela peneira de 2,0 mm, para retirar possíveis pedregulhos, uma vez que ele atrapalharia no aferimento do valor da umidade, por não possuírem a capacidade de acumular água. O material separado foi dividido em três cápsulas, que foram pesados, figura 25, antes e depois de receberem o solo. Após a pesagem, o solo foi levado à estufa por 24 horas, sendo aferido seu peso depois desse período. O processo foi posteriormente repetido com o material das três outras camadas.

Figura 25 – Pesagem da amostra após secagem.



Fonte: Autor (2024).

3.6.2 Ensaio Granulometria

A realização do ensaio de granulometria teve por objetivo conhecer a distribuição dos grãos em termos de dimensão, possibilitando identificar a proporção das suas texturas. Para tanto, adotou-se a classificação do Sistema Unificado de classificação de solos - SUCS.

No Talude escolhido, foram encontrados quatro horizontes de solo bem definidos, sendo assim, com base na norma de preparação de amostras, NBR 6457, foram coletados 1 kg de cada material para fazer a verificação da granulometria, de maneira separada, orientando-se pela NBR 7181.

Figura 26 – Sequências de peneiras.



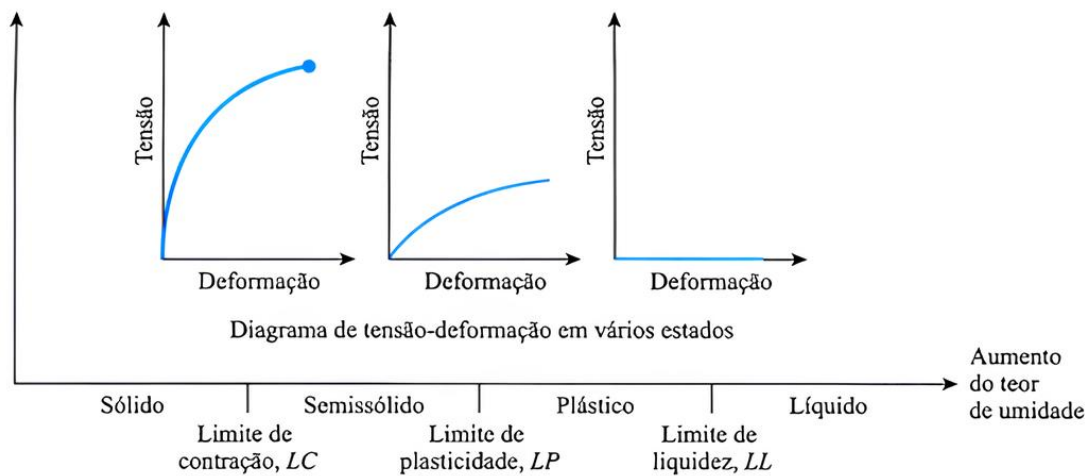
Fonte: Autor (2024).

O ensaio consistiu na separação de uma porção de material que foi submetido a passagem por duas sequências de peneiras, uma grossa e uma fina, para descobrir a massa de solo retida por peneira, tendo ao final um gráfico com a porcentagem passante para expressar a curva granulométrica. Para esse ensaio foi adotada apenas a etapa de peneiramento, excluindo-se a sedimentação, que é a responsável por caracterizar solos da fração argila e fração silte, por conta de limitações técnicas.

3.6.3 Limites de Atterberg

Os limites de Attenberg, são as zonas de transformação física do solo, seja do sólido para o plástico ou do plástico para o líquido. A Figura 27, apresenta as características do solo em cada um desses estados, a base teórica para esses ensaios pautou-se na NR 7180, na NBR 6457 e na NBR 6459.

Figura 27 – Limites dos solos.



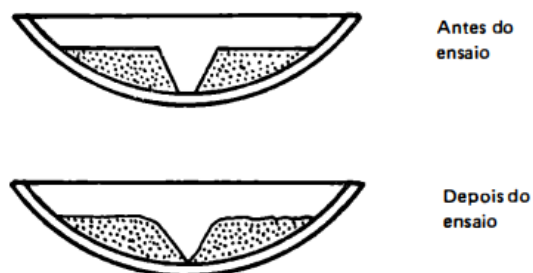
Fonte: Braja (1941).

3.6.4 Ensaio de Limite de Liquidez

O limite de liquidez é caracterizado como o ponto em que o solo deixa o estado plástico e passa para o estado líquido. Quando essa passagem acontece, o solo perde suas características plásticas e passa a apresentar uma maior resistência as deformações e, ao mesmo tempo, perde a capacidade de se modelar.

Com o intuito de conhecer os limites dos solos experimentados, foram tomados 200 g de cada um dos materiais trabalhados e, seguindo a NBR 6459/2016, foi adicionada água em pequenas quantidades, entre cinco e sete vezes, tendo em cada umidade, ensaiado o material no aparelho Casagrande, com o objetivo de conhecer a relação entre umidade e a quantidade de golpes necessária para o fechamento de uma canelura em 1 cm de comprimento, Figura 28.

Figura 28 – Antes e depois do ensaio de liquidez.



Fonte: Caputo (1967).

O resultado do ensaio é apresentado de forma gráfica, ilustrando a relação entre a quantidade de golpes aplicada no aparelho de Casa Grande e a umidade do solo, no que se denomina curva de plasticidade, sendo também quantificado o teor de umidade para o fechamento da canelura em 1 cm com a aplicação de 25 golpes, em decorrência da própria definição de norma do Limite de Liquidez.

Figura 29 – Procedimentos do ensaio de liquidez do solo.



Fonte: Autor (2024).

3.6.5 Ensaio de Limite de Plasticidade

O ensaio de limite de Plasticidade, também realizado no Laboratório de Solos do IFPI - Zona Sul, utilizou como base a NBR 7180 e a NBR 6457, a primeira recaindo sobre a preparação das amostras para o ensaio e a segunda quanto à metodologia do ensaio em si. Este ensaio teve como objetivo identificar o nível de umidade em que o solo deixa de ser plástico e se transforma em sólido, materializando o limite de plasticidade - LP. O registro dos procedimentos da determinação do LP pode ser vistos na Figura 30.

O experimento aconteceu com a tomada de 200 g de cada um dos materiais coletados, sendo ensaiados um por vez, de acordo com a NBR 7180. O ensaio resume-se na modelagem manual de uma porção de solo tomado da amostra até se aproximar da forma de um gabarito padrão, aplicando-se uma sequência de rolagens, o que é acompanhado da perda de umidade e, conseqüentemente, da condição

plásticae. Esse procedimento foi realizado 5 vezes para se obter uma média final para o limite de plasticidade - LP.

Figura 30 – Procedimentos do ensaio de plasticidade do solo.



Fonte: Autor (2024).

3.6.6 Ensaio de Compactação de solo

O ensaio de compactação do solo teve por objetivo conhecer a relação entre o teor de umidade e o peso específico seco do solo sob estudo. Para isso foram ensaiados alguns corpos de prova, em níveis de umidade diferente. Em termos práticos, os corpos de prova foram compactados em um molde metálico, pesados e sua umidade aferida, obtendo, assim, os valores de massa específica úmida e seca para cada teor de umidade adotado.

A análise do grau de compactação dos solos aconteceu seguindo as diretrizes da NBR 6459 e 7182. Na realização desse ensaio foi feita a verificação dos instrumentos a serem utilizados, isto é, seleção da aparelhagem adequada, seguindo as Tabelas 06, 07 e 08, que levam em conta a granulometria dos materiais para indicação do tamanho do molde metálico, do soquete e da energia de compactação.

Tabela 6 – Especificação da granulometria do material para ensaio.

Peneira	Porcentagem retida	Cilindro	Observação
4.8	Menor que 7	Grande ou pequeno	Desprezar material retido
19.1	Menor que 10	Grande	Desprezar material retido
19.1	Maior que 10	Grande	*
19.1	Maior que 30	-	Recomenda-se não ensaiar

*Passar material retido na peneira 19.1 mm através da de 76,2 mm e desprezar o material retido nesta última. Substituir o material retido na peneira de 19.1 mm e que passe na de 76,2 mm por igual quantidade material retido na peneira de 4.8 e que passe na de 19,1 mm.

Fonte: Adaptado de ABNT (2016).

Tabela 7– Especificações do ensaio de compactação.

Ensaio de compactação	Amostra preparada passa integralmente pela peneira (mm)	Cilindro a ser utilizado no ensaio	Quantidade de amostra a ser tomada
Com reuso de material	4.8	Pequeno ou Grande	3 ou 7
	19.1	Grande	7
Sem reuso de material	4.8	Pequeno ou Grande	15 ou 35
	19.1	Grande	35

Fonte: Adaptado de ABNT (2016).

Com base na Tabela 06, para ambos os materiais, foi utilizado o cilindro pequeno, e como o objetivo é simular sua situação em condição natural, foi adotada a energia normal. Os ensaios ocorreram no laboratório de solos do IFPI Zona Sul, onde foi separado 3 kg de cada material, Tabela 07, ensaiando um por vez.

Tabela 8– Quantidade de golpes por energia de compactação.

Cilindro	Características	Energia		
	inerentes a cada grau de compactação	Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Nº de camadas	3	3	5
	Nº de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Nº de camadas	5	5	5
	Nº de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: Adaptado de ABNT (2016).

O ensaio teve início com a preparação do material, seguindo as orientações da NBR 6467. Na sequência, ocorreu a adição de água ao material e homogeneização. Prosseguido com a modelagem do corpo de prova e compactação na energia normal. Ao final, a amostra foi pesada e uma pequena parte foi retirada para aferir o teor de umidade. Todo esse processo foi repetido mais 4 vezes, totalizando 5 corpos de prova, para cada um dos quatro horizontes de solo do talude.

Ao final foi produzido um gráfico com o ponto de compactação ótima do solo, ou seja, em que ele consegue agregar o maior volume de material.

3.6.7 Ensaio de Cisalhamento Direto

Uma das propriedades fundamentais para a análise da segurança de um talude, é o ângulo de atrito interno dos solos que o compõe, já que ele é a informação crucial enquanto parâmetro de resistência para determinação do ponto de resistência máximo as forças de cisalhamento (Pinto, 2006). Para quantificar esse dado, a opção escolhida neste trabalho foi pelo ensaio de cisalhamento direto, seguindo a norma

ASTM D3080-04, uma vez que o Brasil não possui uma norma específica disciplinando o procedimento.

Figura 31 – Modelagem do corpo de prova de cisalhamento direto.



Fonte: Autor (2024).

O ensaio pode ocorrer com amostras deformadas ou indeformadas, tendo se optado neste trabalho pela primeira alternativa, uma vez que se levou em conta a impossibilidade de coletar prismas inteiros da quarta camada de solo do talude.

Durante a Primeira etapa, foi compactado para cada camada de solo três corpos de prova na umidade ótima e energia normal, com o mesmo método visto no tópico sobre o ensaio de compactação, seguido pela moldagem do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento direto, o que ocorreu com auxílio de um gabarito de 60 x 60 mm, e, por fim, sua transferência para a prensa.

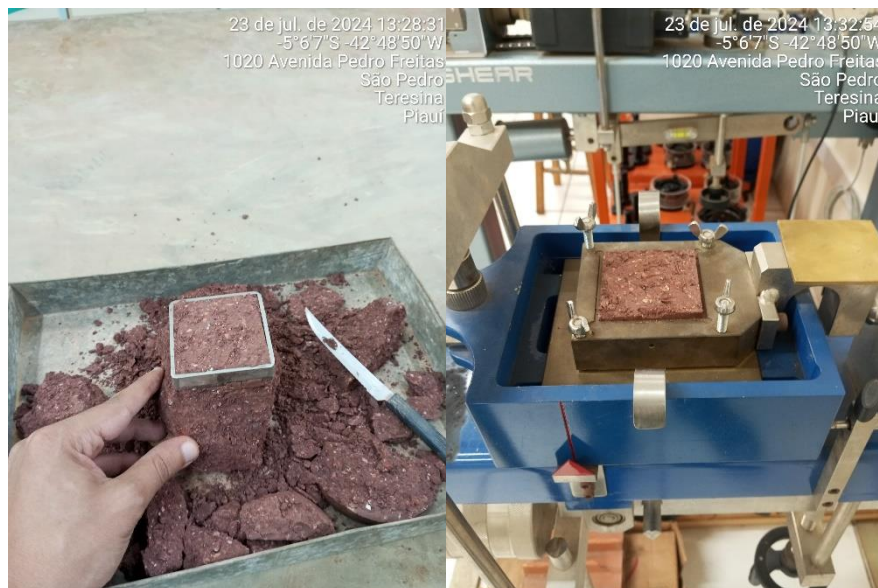
É importante registrar que para este ensaio foi adotada a deformação não drenada, situação mais desfavorável, portanto as cargas horizontais foram colocadas para adensamento por apenas 15 minutos, após este período foram retiradas as travas, e aplicada uma força de 0,05 mm/s, até a amostra atingir uma deformação de 15%.

Figura 32 – Máquina manual de cisalhamento direto.



Fonte: Autor (2024).

Figura 33 – Modelagem do corpo de prova na máquina de cisalhamento direto.



Fonte: Autor (2024).

Durante este ensaio, cada corpo de prova recebeu uma diferente carga afim de descobrir as resistências máxima e residual de cada solo, sendo adotadas as cargas de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, para cada um dos materiais.

Figura 34 – Amostra rompida após ensaio de cisalhamento.



Fonte: Autor (2024).

Após o final dos ensaios, foram conhecidos os valores do ângulo de atrito e coesão de cada um dos quatro horizontes de solo que compõem o perfil geotécnico do talude estudado.

3.7 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Após conhecer o perfil topográfico do talude, caracterizar os materiais e obter suas coesões e ângulos de atrito o trabalho prosseguiu para o estudo de estabilidade.

O FS pode ser obtido através do cálculo manual através da equação 01, que precisa ser feito para cada uma das situações estudadas por vez. Outra maneira para a obtenção do fator de segurança de um talude ou encosta é a modelagem por meio de um software, os mais comuns são o SLOPE W e o GEO5, para esse trabalho o escolhido foi o SLOPE W, por conta da sua maior disponibilidade, sendo utilizada a versão estudantil.

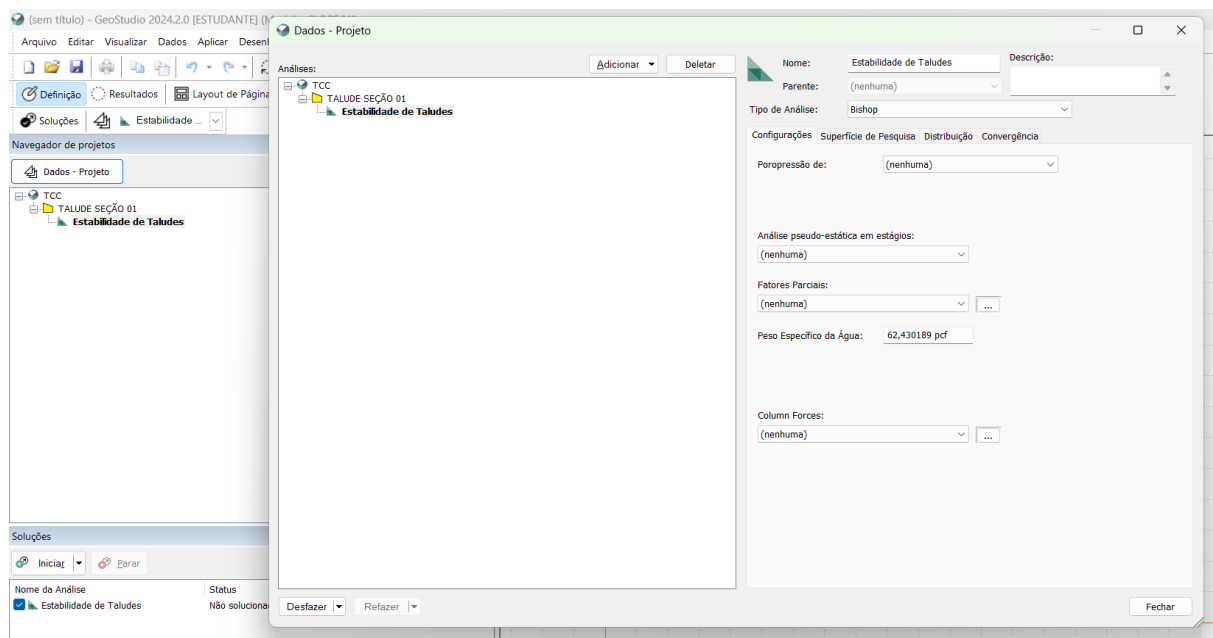
Em busca de otimizar os resultados ficou decidido também a utilização do método de Bishop, que é focado em superfícies circulares e possui a característica de desprezar as forças de cortes atuantes entre as fatias, focando apenas no equilíbrio limite. Segundo Ferreira (2012), o método Bishop tende a apresentar um FS sobrestimado, ou seja, ele é mais rígido quanto a capacidade do talude em se manter estável, tendo em vista isso sua escolha ficou justificada como uma forma de garantir que o talude seja exposto ao pior cenário de esforço.

3.7.1 Modelagem

Durante a modelagem o trabalho sofreu com a limitação de quantidade de materiais, uma vez que o talude possui quatro tipos de solo e a versão estudantil do geoslope, só suporta três, sendo necessário retirar um dos solos para prosseguir com a análise, sendo escolhido o da primeira, levando em conta sua pequena elevação que varia de 0,75m até 2,00m, e suas características físicas parecidas a da segunda camada.

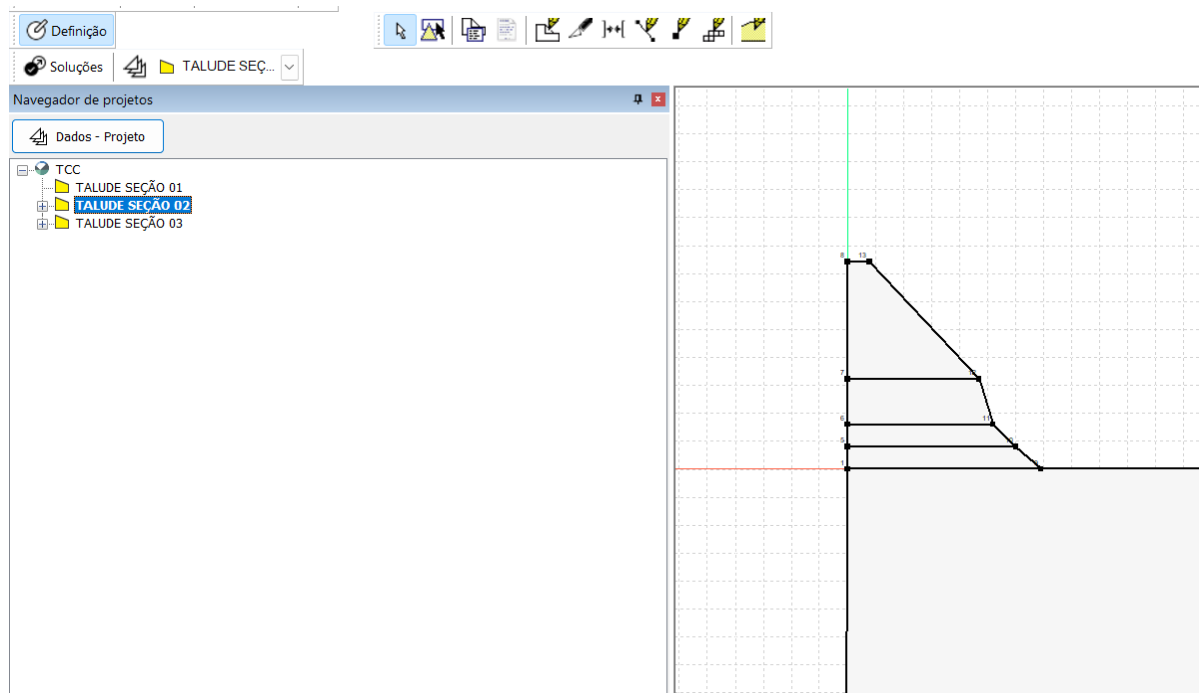
Após a delimitação dos materiais a serem utilizados se deu início a modelagem, que seguiu a metodologia de modelagem de Fritscher (2016), que se inicia com a seleção do método a ser estudado no aplicativo geoslope (Figura 35), prossegue com o desenho do perfil topográfico (Figura 36), continua seleção dos materiais com as características estudadas (Figura 37) e finaliza com a simulação de estabilidade do talude (Figura 38).

Figura 35 - Inserção das características da simulação.



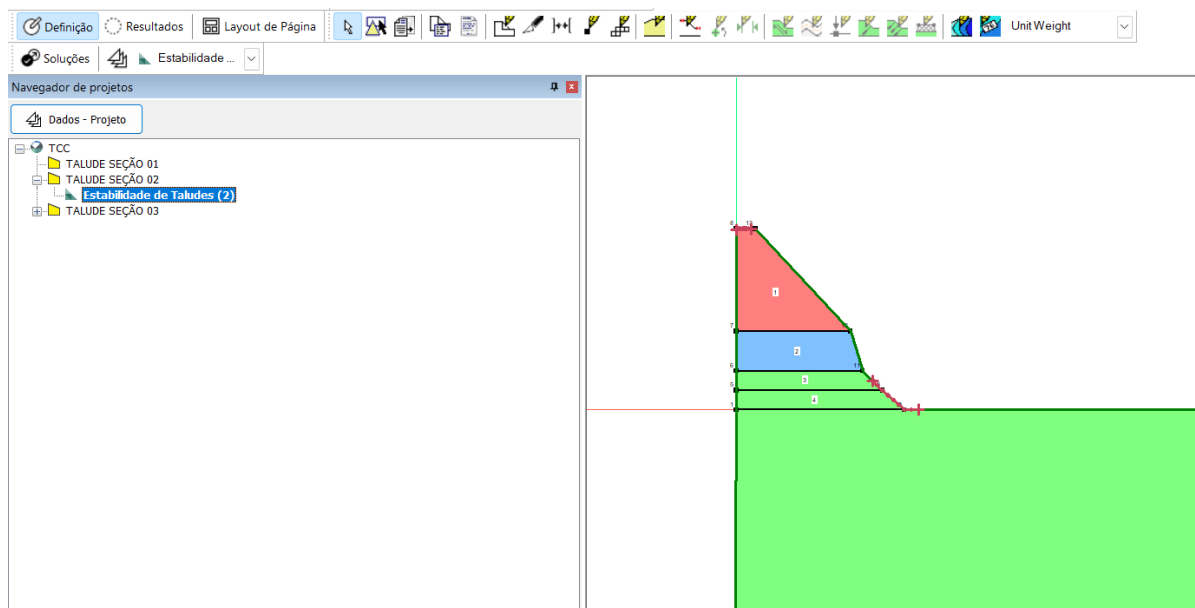
Fonte: Autor (2024).

Figura 36 - Modelagem do talude.



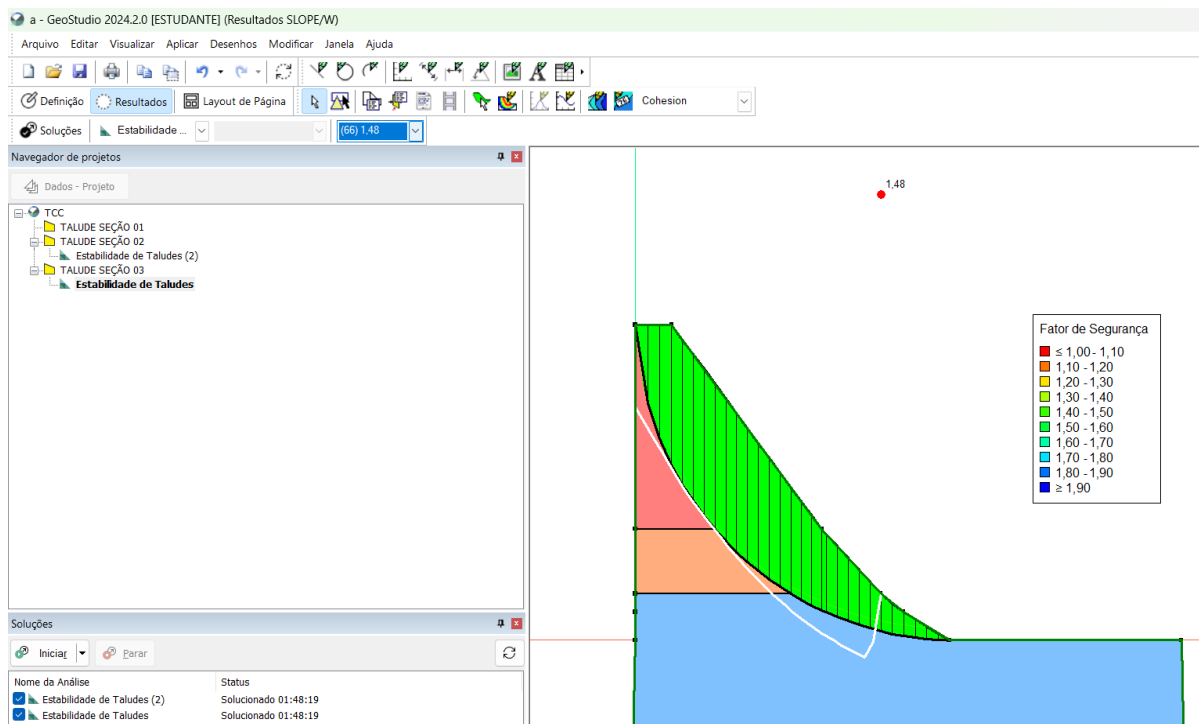
Fonte: Autor (2024).

Figura 37 – Adição dos solos.



Fonte: Autor (2024).

Figura 38 – Início da simulação.



Fonte: Autor (2024).

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física dos solos. Os mesmos serviram como base para classificar o solo dentro da metodologia SUCS e apoio para o ensaio de cisalhamento direto.

4.1.1 Teor de umidade do solo

Os resultados do ensaio de Teor de umidade das quatro camadas de solo se encontram nas tabelas 09, 10, 11 e 12.

Tabela 9 – Ensaio de Teor de umidade do solo 01.

Amostra	01		
Nº da cápsula	1	2	3
Massa da cápsula	8,28	8,67	9,12
Massa da cápsula + Solo + Água	48,31	47,8	50,49
Massa da cápsula + Solo	45,84	46,5	46,75
Solo seco	37,56	37,83	37,63
Água	2,47	1,3	3,74
Teor de umidade %	6,57	3,43	9,93
Teor de umidade médio %	6,65		

Fonte: Autor (2024).

Tabela 10 – Ensaio de Teor de umidade do solo 02.

Amostra	02		
Nº da cápsula	4	5	6
Massa da cápsula	8,77	8,19	8,54
Massa da cápsula + Solo + Água	50,88	48,37	58,1
Massa da cápsula + Solo	47,85	45,85	55,98
Solo seco	39,08	37,66	47,44
Água	3,03	2,52	2,12
Teor de umidade %	7,75	6,69	4,46
Teor de umidade médio %	6,30		

Fonte: Autor (2024).

Tabela 11 - Ensaio de Teor de umidade do solo 03.

Amostra	03		
Nº da cápsula	7	8	9
Massa da cápsula	5,59	8,67	7,06
Massa da cápsula + Solo + Água	10,36	14,17	11,31
Massa da cápsula + Solo	10,05	13,91	11,1
Solo seco	4,46	5,24	4,04
Água	0,31	0,26	0,21
Teor de umidade %	6,95	4,96	5,19
Teor de umidade médio %	5,70		

Fonte: Autor (2024).

Tabela 12 – Ensaio de Teor de umidade do solo 04.

Amostra	04		
Nº da cápsula	10	11	12
Massa da cápsula	8,44	7,15	8,53
Massa da cápsula + Solo + Água	11,46	10,84	11,6
Massa da cápsula + Solo	11,32	10,64	11,48
Solo seco	2,88	3,49	2,95
Água	0,14	0,2	0,12
Teor de umidade %	4,86	5,73	4,06
Teor de umidade médio %	4,88		

Fonte: Autor (2024).

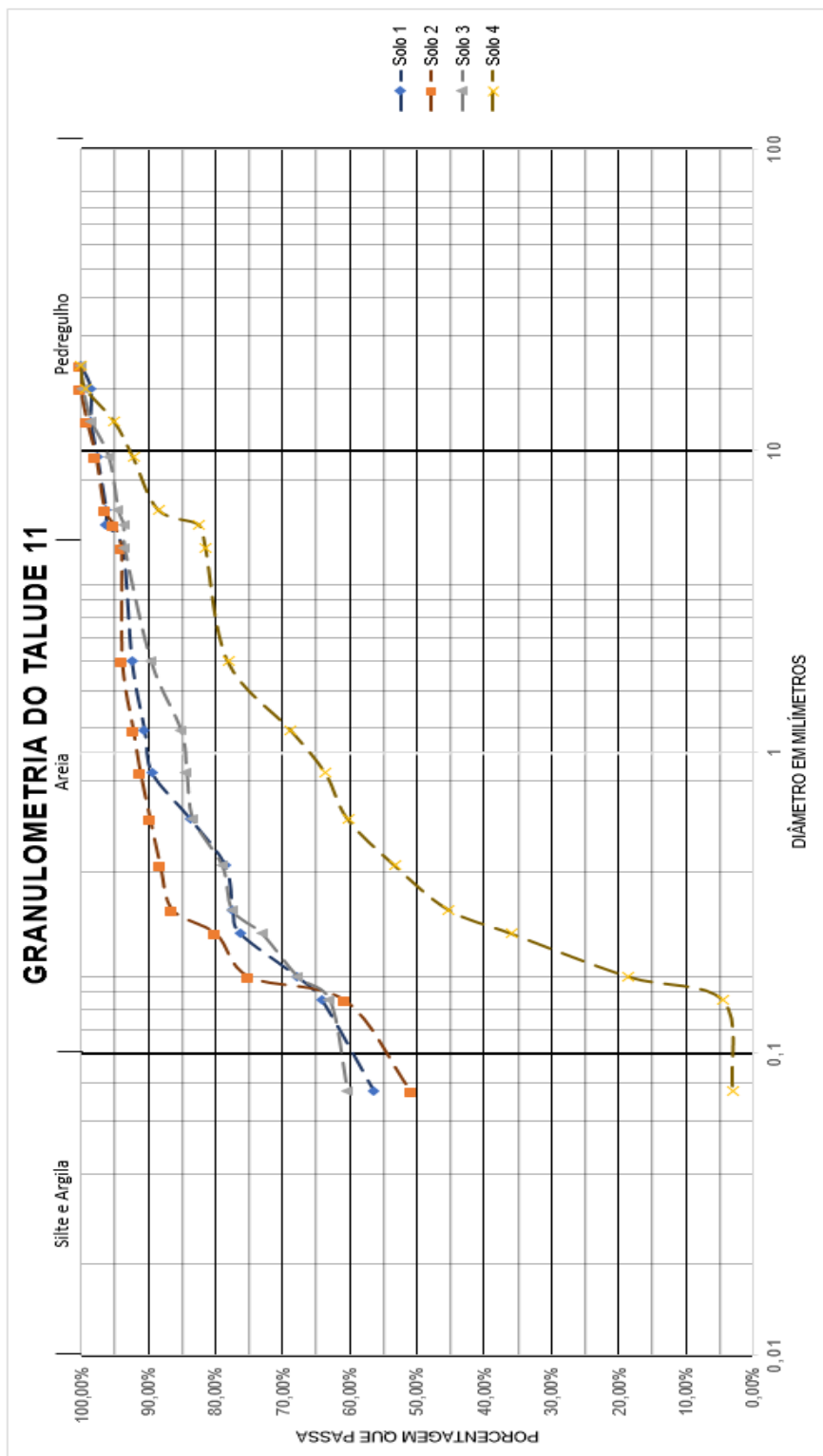
Durante a análise, percebeu-se que os solos possuem teor de umidade que variavam entre 4,88%, no solo localizado na crista do talude, e 6,65%, no solo da base do talude. Esses dados se referem a presença de água nesses materiais mesmo em condições de clima de baixa precipitação pluviométrica, esses resultados colocam o solo 04 com menor saturação entre os quatro solos, uma vez que ele retém menos água.

4.1.2 Análise granulométrica

Foram obtidos como resultados da análise granulométrica, os dados apresentados na Figura 39.

Após se obter estes dados, foi feita a classificação seguindo a metodologia SUCS, que julga o grão de acordo com o diâmetro da partícula, sendo apresentada na Tabela 13.

Figura 39 – Curva de granulometria dos solos.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 13 – Análise do solo com base na granulometria.

Solo	Pedregulho (4,75 mm < X ≤ 75 mm)	Areia (0,075 mm < X ≤ 4,75 mm)	Argila e Silte (X ≤ 0,075 mm)
Solo 1	6%	37%	56%
Solo 2	6%	43%	51%
Solo 3	06%	33%	60%
Solo 4	21%	76%	3%

Fonte: Autor (2024).

Com base nos resultados apresentados no ensaio de granulometria, das quatro amostras de solo, três possuem grande concentração de argila e silte, enquanto o quarto é composto majoritariamente de grãos de areia.

A distinção entre os materiais é de extrema importância, por conta do grau de aderência entre os mesmos, coesão, facilitado entre os solos argilosos, e dificultado quando um solo tem maior presença de areia (OLIVEIRA, 2022).

4.1.3 Índice de plasticidade

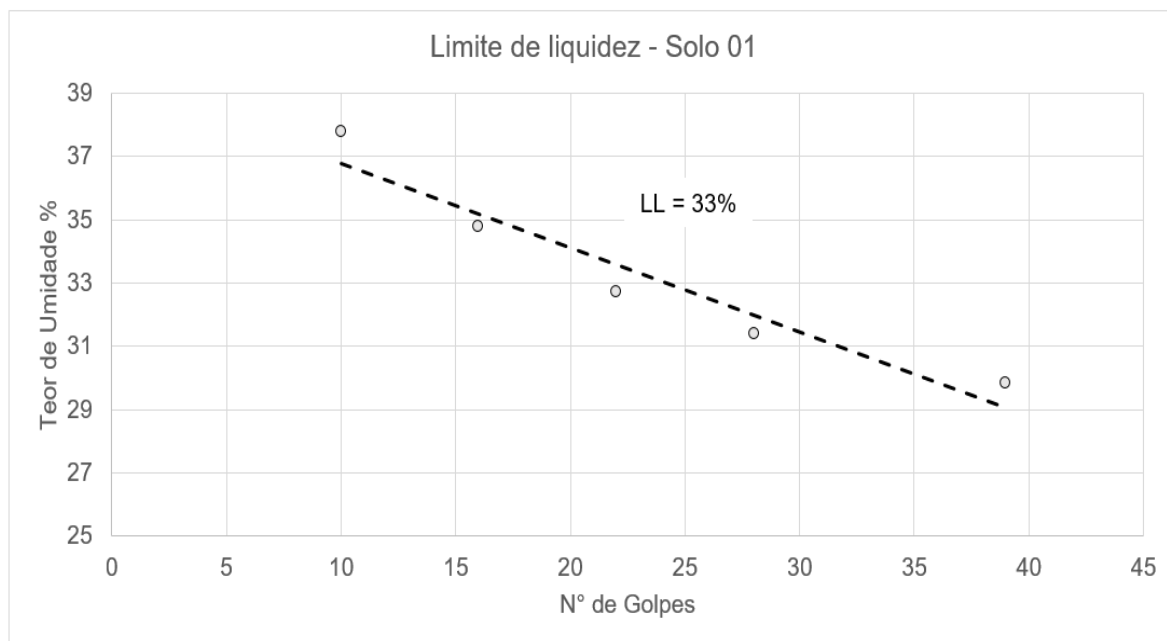
As Figuras 40, 41, 42 e 43 apresentam os resultados obtidos no ensaio de limite de liquidez, sendo que a partir desses resultados foi elaborada uma linha de tendência visando conhecer a umidade onde o solo deixa o estado plástico e chega ao estado líquido, conhecida através da umidade onde a canelura de 1 cm se fecha com a aplicação de 25 golpes.

Após analisar os resultados, concluiu-se que os valores de limite de liquidez dos três primeiros solos, aqueles com maior percentual de argila, tende a permanecer plástico até um maior percentual de umidade. Enquanto isso, o quarto solo, que apresenta maior percentual de areia, possui um limite mais baixo, confirmando o que descrito em Caputo (2022), quando ele classifica solos com grande percentual de areia como não plásticos.

De acordo com Pinto (2006), a presença de areia e outros constituintes no solo pode alterar as propriedades físicas e mecânicas do solo. Em solos com um maior teor de areia, o espaço entre as partículas de argila pode ser aumentado, reduzindo a plasticidade geral do solo, já que as partículas de areia não contribuem para o efeito

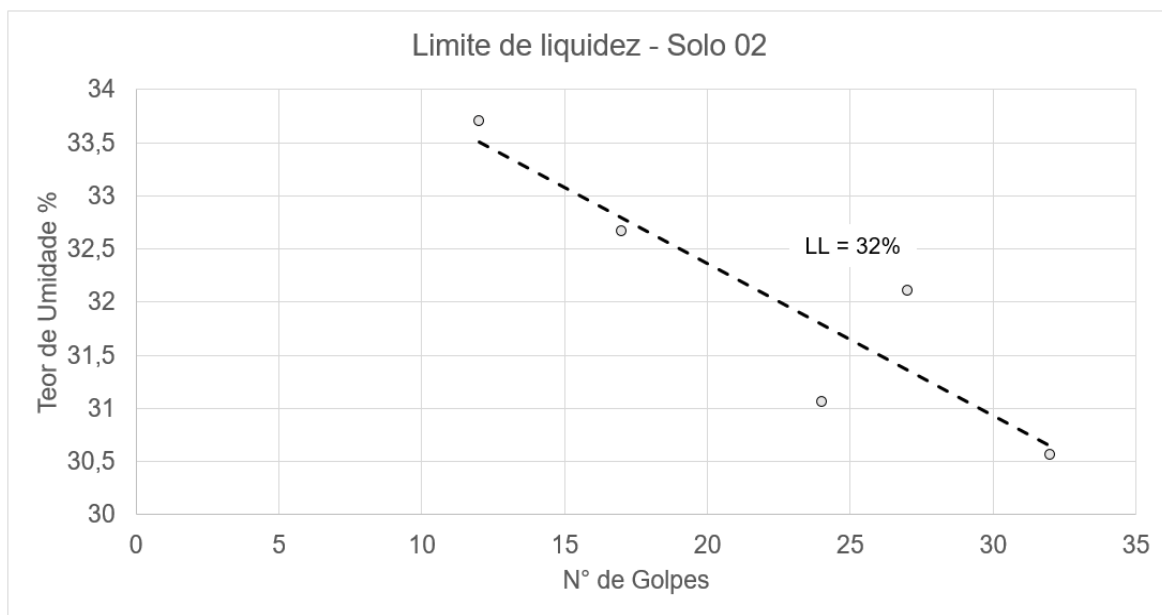
plástico. Isso explica por que solos com teores elevados de argila, mas com uma composição e distribuição específica de areia e outros agregados, podem apresentar índices de plasticidade mais baixos em comparação a solos com menor teor de argila.

Figura 40 – Resultado do ensaio de limite de liquidez 01.



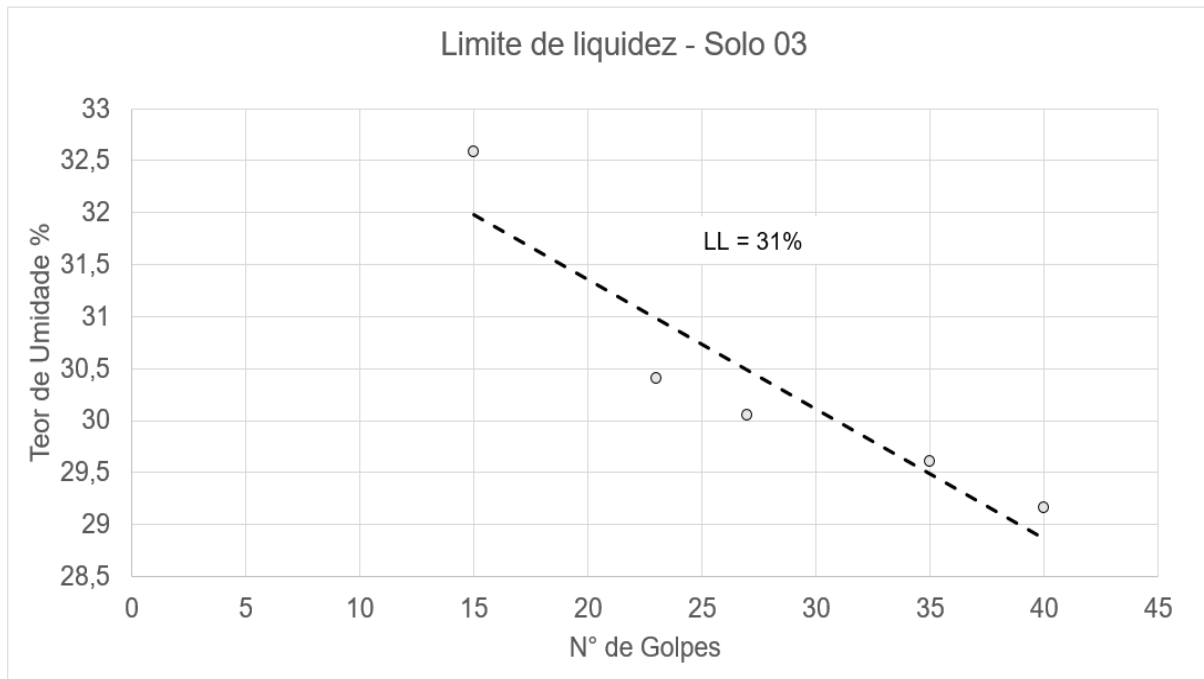
Fonte: Autor (2024).

Figura 41 – Resultado do ensaio de limite de liquidez 02.



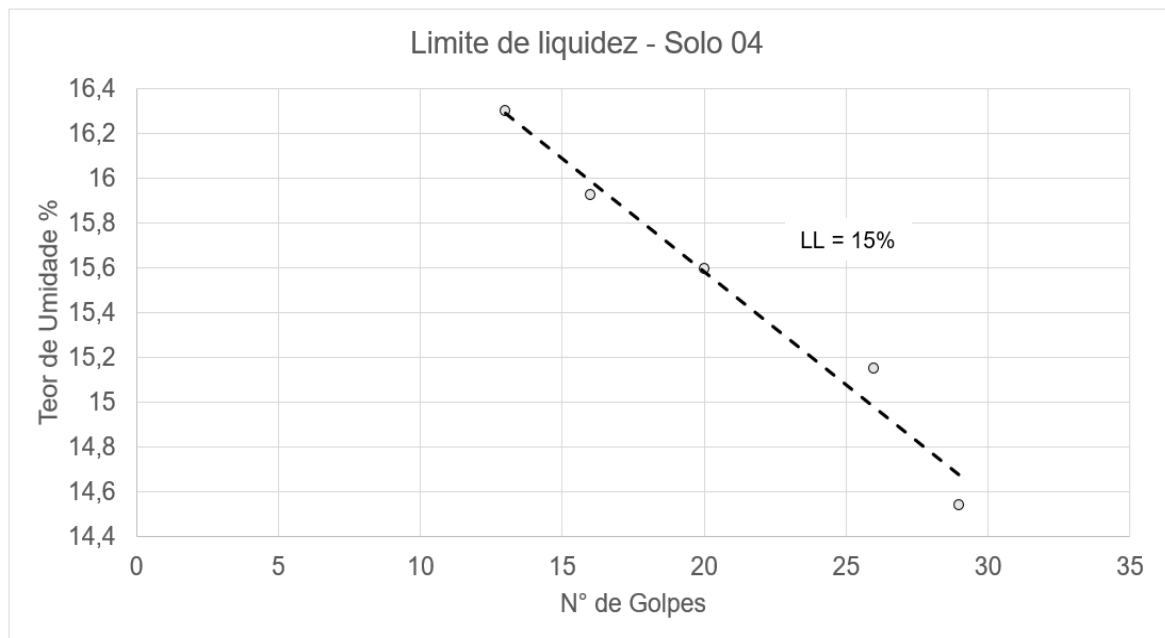
Fonte: Autor (2024).

Figura 42 – Resultado do ensaio de limite de liquidez 03.



Fonte: Autor (2024).

Figura 43 – Resultado do ensaio de limite de liquidez 04.



Fonte: Autor (2024).

Os Quadros 01, 02, 03 e 04 apresentam os resultados do ensaio de limite de plasticidade dos quatro solos ensaiados. Para chegar a um valor mais preciso, a NBR 7180 pede para desconsiderar amostras cuja variação para as demais seja superior a 5%. Nos solos estudados, esta situação não foi encontrada, sendo feita então apenas uma média aritmética entre os valores.

O quarto solo, presente na crista do talude, apresentou características não plásticas, uma vez que não foi possível modelar uma amostra seguindo a metodologia do ensaio. Esta situação, segundo Caputo (1967), acontece em solos com grandes concentrações de areia, o que foi comprovado pela amostra granulométrica.

Tabela 14 – Ensaio de limite de plasticidade do solo 01.

Amostra	01					
Nº da cápsula	A	B	C	D	E	F
Massa da cápsula	9,34	8,66	9,63	9,11	8,98	10,64
Massa da cápsula + Solo + Água	9,34	8,66	9,63	9,11	8,98	10,64
Massa da cápsula + Solo	9,14	8,44	9,38	8,77	8,69	10,30
Solo seco	1,25	1,39	1,36	1,62	1,53	1,64
Água	0,20	0,22	0,25	0,34	0,29	0,34
Teor de umidade %	16,00	15,83	18,38	20,99	18,95	20,73
Teor de umidade médio %	18,48					

Fonte: Autor (2024).

Tabela 15 – Ensaio de limite de plasticidade do solo 02.

Amostra	02				
Nº da cápsula	G	H	I	J	K
Massa da cápsula	8,81	9,01	5,39	7,89	7,17
Massa da cápsula + Solo + Água	10,34	10,49	7,41	9,37	8,75
Massa da cápsula + Solo	10,12	10,30	7,14	9,16	8,53
Solo seco	1,31	1,29	1,75	1,27	1,36
Água	0,22	0,19	0,27	0,21	0,22
Teor de umidade %	16,79	14,73	15,43	16,54	16,18
Teor de umidade médio %	15,93				

Fonte: Autor (2024).

Tabela 16 – Ensaio de limite de plasticidade do solo 03.

Amostra	03				
Nº da cápsula	L	M	N	O	P
Massa da cápsula	18,71	27,63	27,42	19,82	11,35
Massa da cápsula + Solo + Água	19,83	28,62	28,62	21,11	12,67
Massa da cápsula + Solo	19,63	28,46	28,42	20,87	12,45
Solo seco	0,92	0,83	1,00	1,05	1,10
Água	0,20	0,16	0,20	0,24	0,22
Teor de umidade %	21,74	19,28	20,00	22,86	20,00
Teor de umidade médio %	20,77				

Fonte: Autor (2024).

Tabela 17 – Ensaio de limite de plasticidade do solo 04.

Amostra	04
Nº da cápsula	
Massa da cápsula	
Massa da cápsula + Solo + Água	
Massa da cápsula + Solo	
Solo seco	MATERIAL NÃO PLÁSTICO
Água	
Teor de umidade %	
Teor de umidade médio %	

Fonte: Autor (2024).

Após obter os resultados dos ensaios de LL e LP, os valores foram aplicados na fórmula do índice de plasticidade, que consiste em LL menos LP, os resultados estão resumidos na Tabela 14.

Com base nos resultados obtidos, os solos 01,02 e 03 obtiveram resultados próximos, corroborando para a sua classificação em um mesmo grupo. Já o solo 04 não possui plasticidade, uma vez que não foi possível realizar o ensaio de limite de plasticidade.

Tabela 18 – Análise dos Limites de Atterberg.

Solo	Limite de Liquidez %	Limite de Plasticidade %	Índice de Plasticidade %
Solo 01	33	18,48	14,51
Solo 02	32	15,93	16,07
Solo 03	31	20,78	10,23
Solo 04	15	NP	NP

Fonte: Autor (2024).

4.1.4 Classificação SUCS

Após completar os ensaios de granulometria e de limites, foi feita a classificação do solo de acordo com suas características obtidas, sendo escolhida a metodologia SUCS para identificar cada um dos solos em um dos grupos apresentados na Figura 44.

Figura 44 – Tabela de classificação de solos.

TABELA II – CLASSIFICAÇÃO GERAL SUCS		
Classificação geral	Tipos principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (menos que 50 % passando na # 200)	Pedregulho ou solo pedregulhoso (<i>Gravel</i>)	GW, GP, GC e GM
	Areia (<i>Sand</i>) ou solo arenoso	SW, SP, SC e SM
SOLOS FINOS (mais que 50 % passando na # 200)	Silte(M) ou argila(C)	Baixa compressibilidade (LL < 50) ML, CL e OL
		Alta compressibilidade (LL > 50) MH, CH, OH
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfa (<i>Peat</i>)	Pt

Fonte: Sanches (2021).

Os primeiros três solos foram classificados com uma granulometria fina, uma vez que mais de 50% de cada um deles passou pela peneira de 0,075 mm, sendo que eles apresentarem um LL abaixo de 50%. Por conta dessas características, foi necessário analisar a carta de Casagrande para classificá-los, obtendo-se o resultado que todos se encontravam na nomenclatura CL, que corresponde a solos argilosos de baixa compressibilidade.

Enquanto isso, o solo 04 se encontrou do lado oposto, sendo classificado como um solo grosso, uma vez que menos de 50% do seu material passa na peneira de 0,075 mm. Junto ao fato de que mais de 50% do seu material passar na peneira de 4,75 mm. Esse solo se classificou como uma areia, sendo, conforme a metodologia SUCS, uma areia bem graduada, SW, por apresentar grãos uniformes.

Tabela 19 – Classificação SUCS.

Solo	Tipo
Solo 01	CL
Solo 02	CL
Solo 03	CL
Solo 04	SW

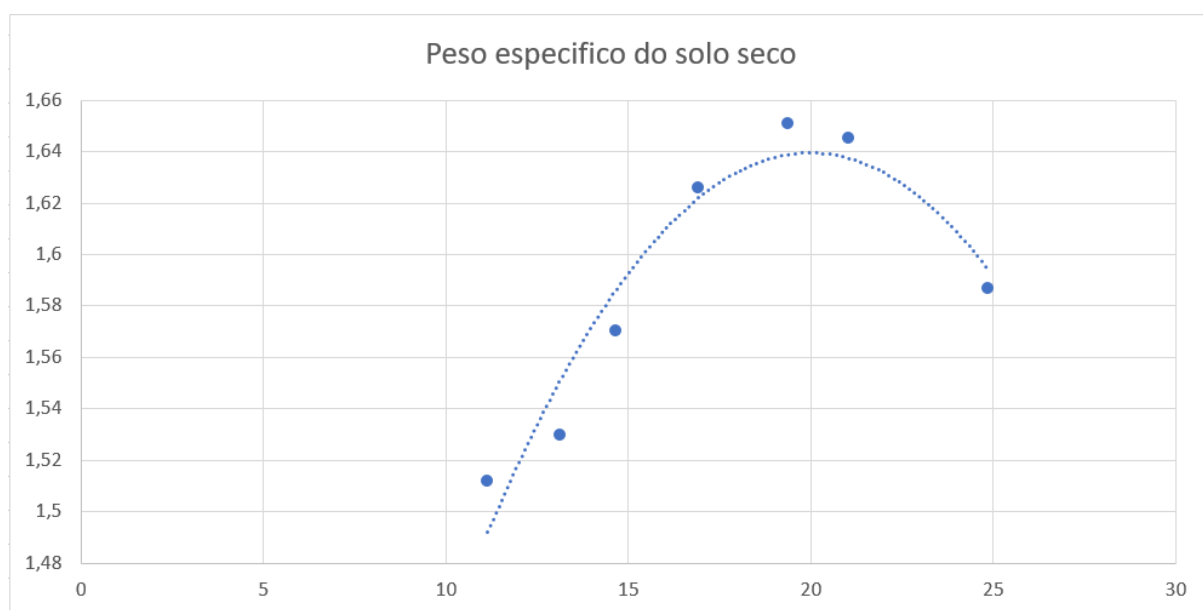
CL- Argila inorgânica de baixa compressibilidade. SW – Areia bem graduada.

Fonte: Autor (2024).

4.1.5 Compactação dos solos

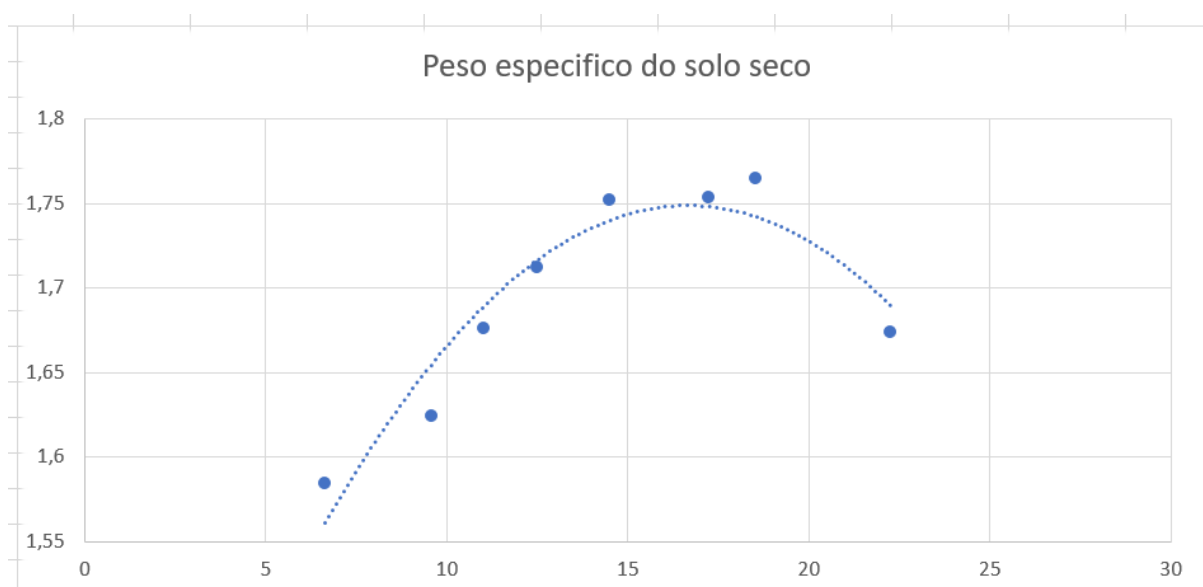
As Figuras 45, 46, 47 e 48 apresentam os resultados do ensaio de compactação dos solos 01, 02, 03 e 04 respectivamente.

Figura 45 – Umidade ótima do solo 01.



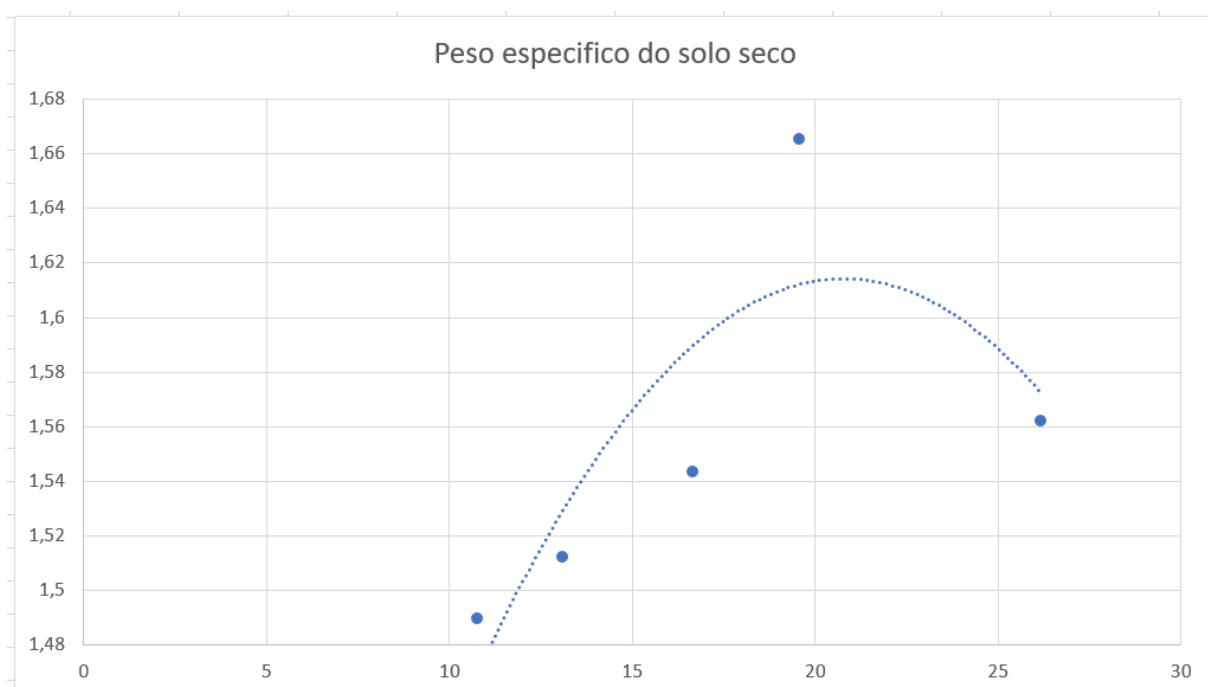
Fonte: Autor (2024).

Figura 46 – Umidade ótima do solo 02.



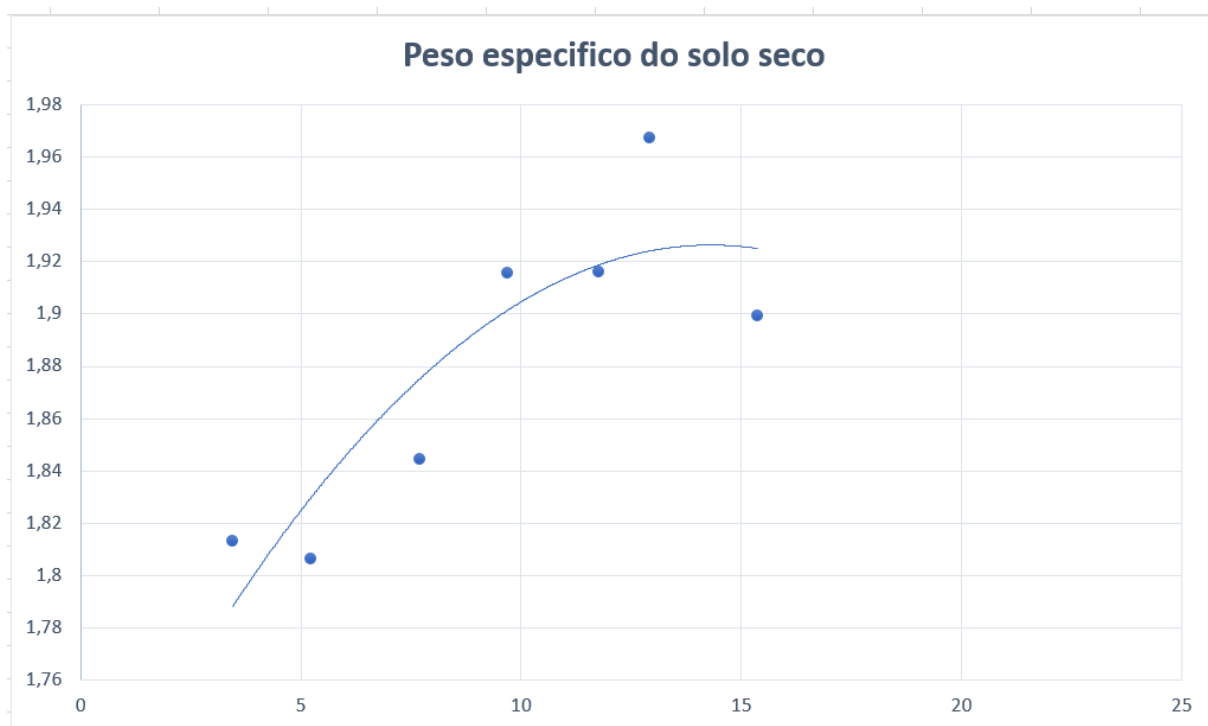
Fonte: Autor (2024).

Figura 47 – Umidade ótima do solo 03.



Fonte: Autor (2024).

Figura 48 – Umidade ótima do solo 04.



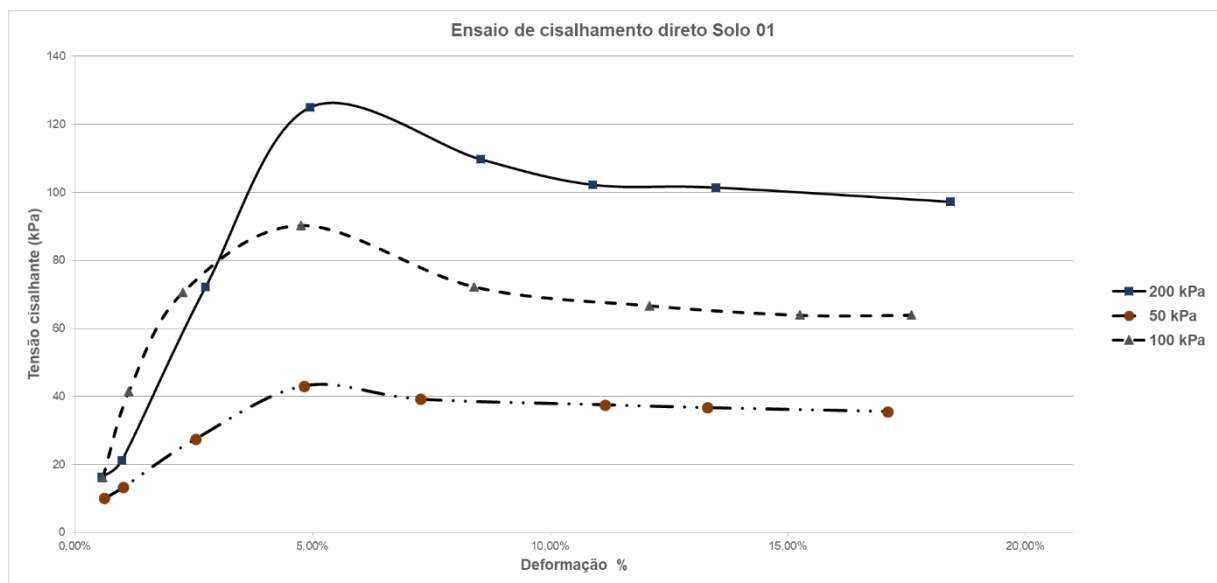
Fonte: Autor (2024).

Com base no resultado obtido, ficou comprovado que a umidade ótima dos solos 01, 02 e 03 é próxima dos 20%, o que fica corroborado por serem solos argilosos, enquanto o solo 04 tem uma umidade ótima mais baixa, por possuir maior porcentagem de areia, o que acaba resultando em uma menor absorção.

4.2 CISALHAMENTO DIRETO

A figura 49 apresenta o gráfico da Tensão cisalhante x deformação do corpo em porcentagem, mostrando o ocorrido com as cargas de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, referentes ao solo 01.

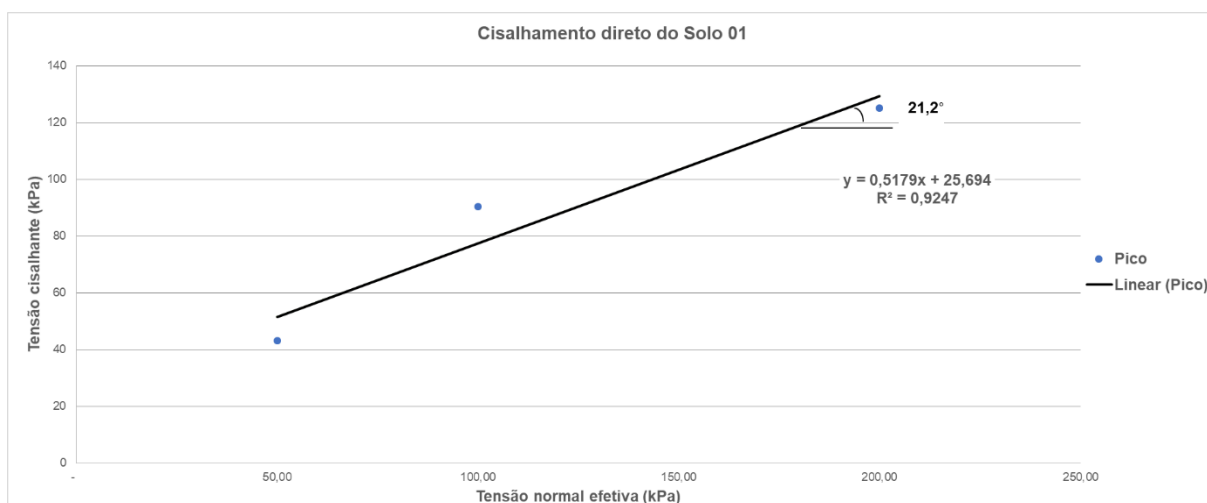
Figura 49 – Curvas de deformação do solo 01.



Fonte: Autor (2024).

A partir desses dados, foi criado um gráfico para descobrir o ângulo de atrito interno do solo, compilando os dados de tensão de pico da Figura 49 e traçando uma linha de tendência. Com esses dados foi feita uma equação para descobrir a coesão do solo, todos esses resultados são apresentados na Figura 50.

Figura 50 – Coesão e atrito interno do solo 01.

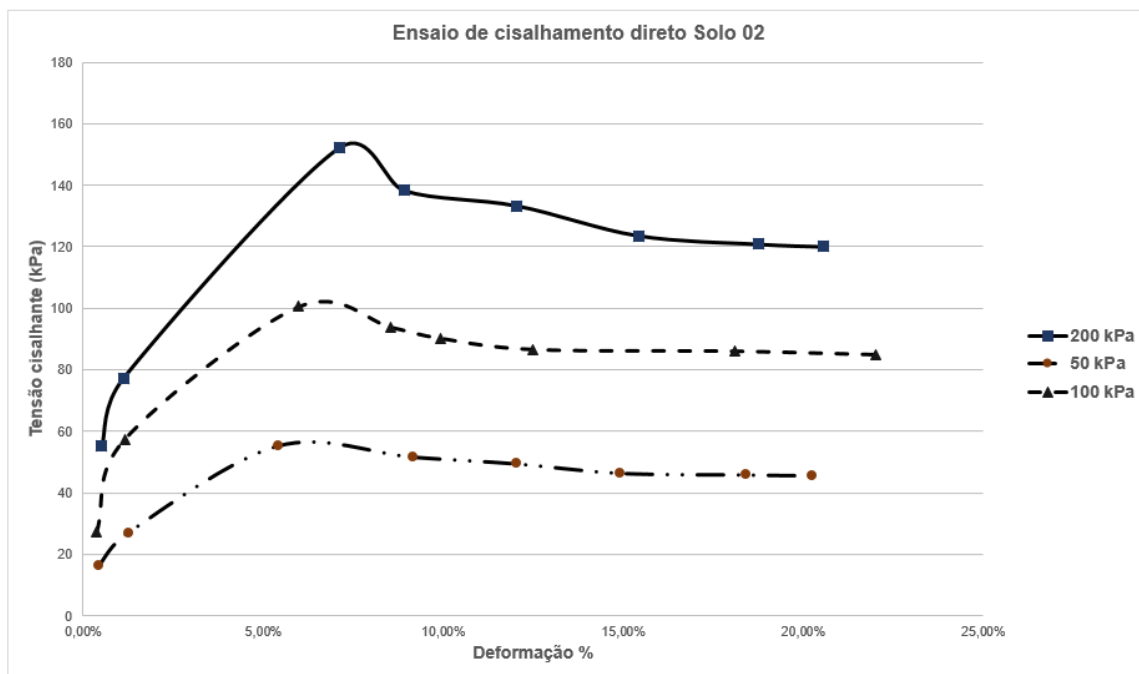


Fonte: Autor (2024).

Como resultado foi obtido um ângulo de atrito interno de $21,2^\circ$ e coesão de 25,7.

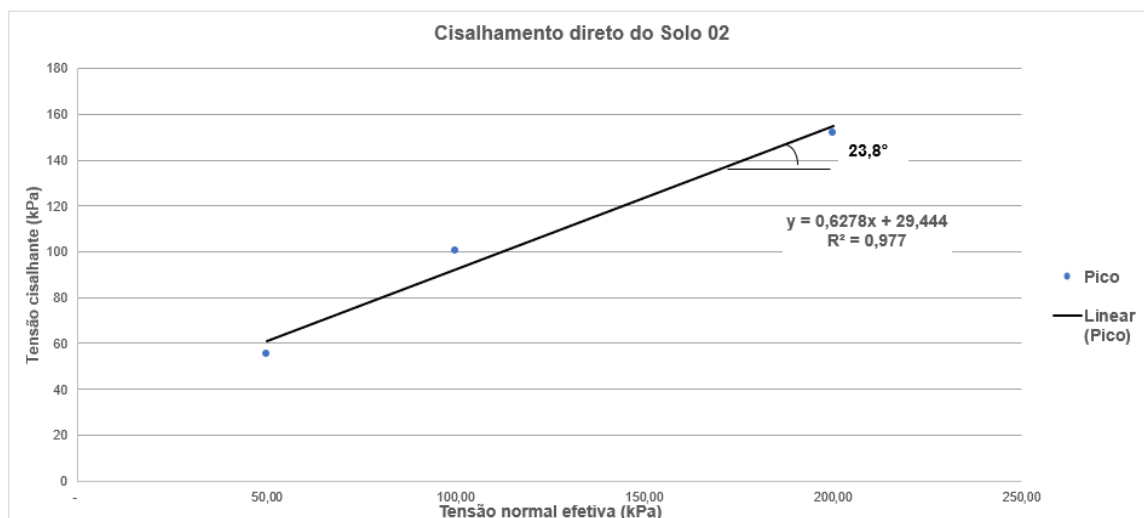
A mesma metodologia foi repetida para o solo 02, dando origem as Figuras 51 e 52. Tendo como resultado, um ângulo de atrito interno de $23,8^\circ$ e coesão de 29,45.

Figura 51 – Curvas de deformação do solo 02.



Fonte: Autor (2024).

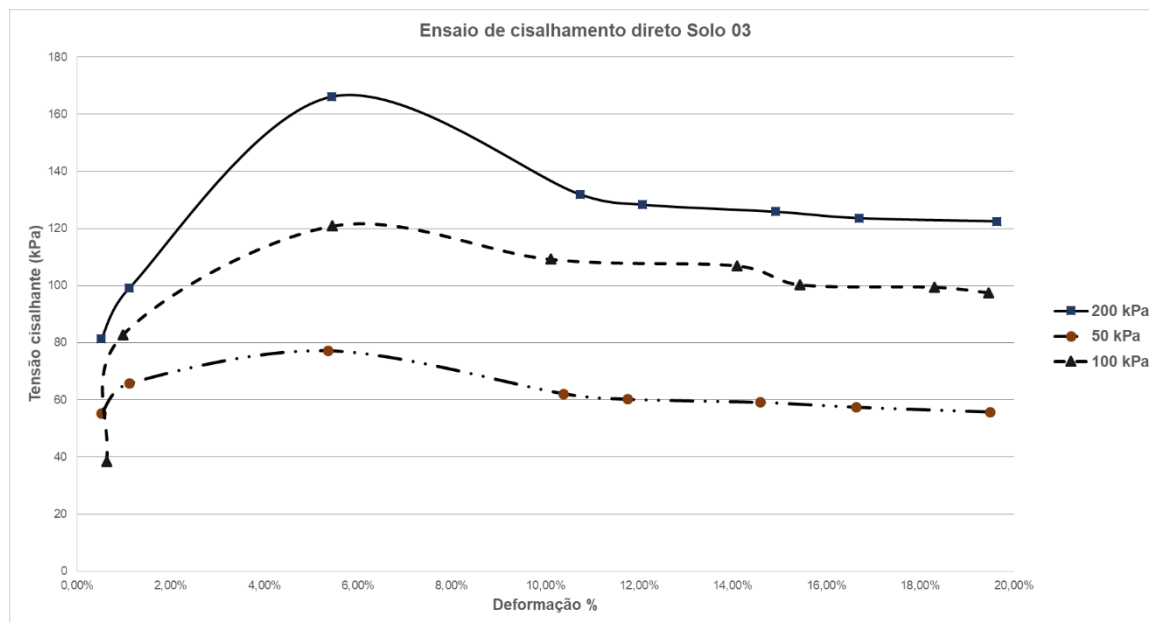
Figura 52 – Coesão e atrito interno do solo 02.



Fonte: Autor (2024).

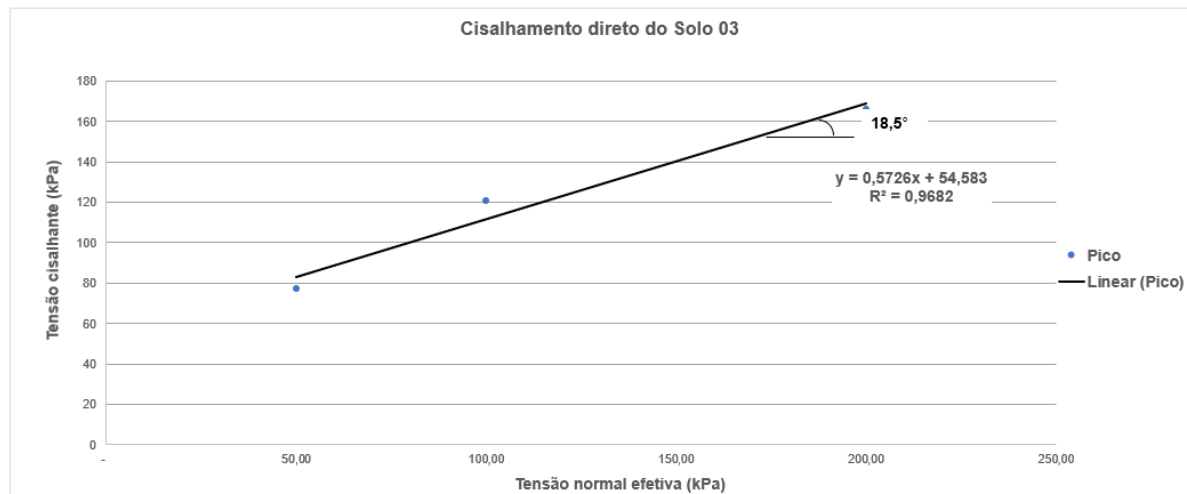
O resultado do solo 03, apresentado nas Figuras 53 e 54, mostra que o material possui um ângulo de atrito interno de 18,5° e coesão de 54,58.

Figura 53 – Curvas de deformação do solo 03.



Fonte: Autor (2024).

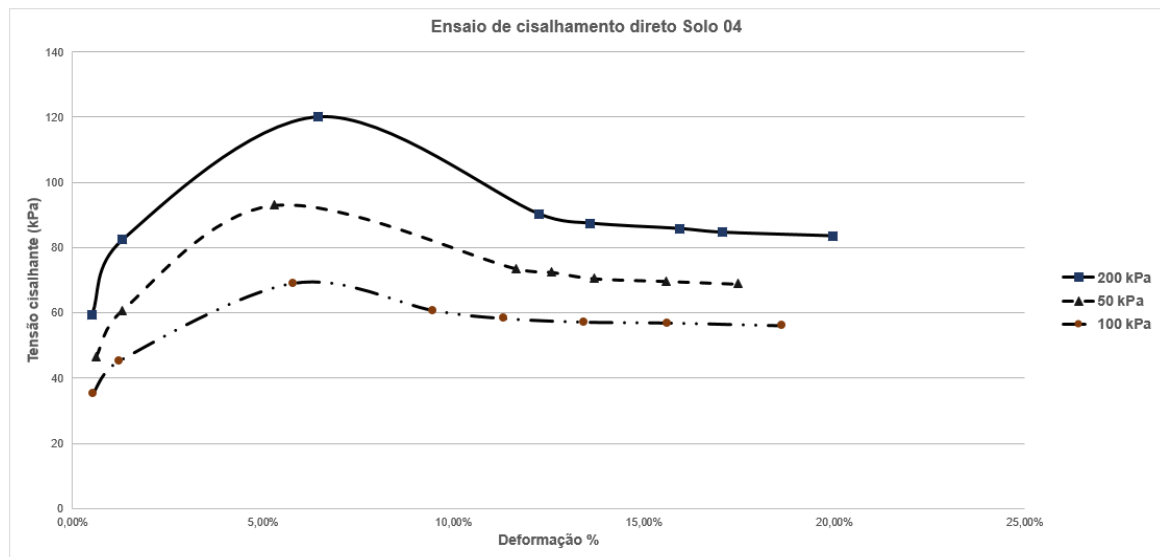
Figura 54 – Coesão e atrito interno do solo 03.



Fonte: Autor (2024).

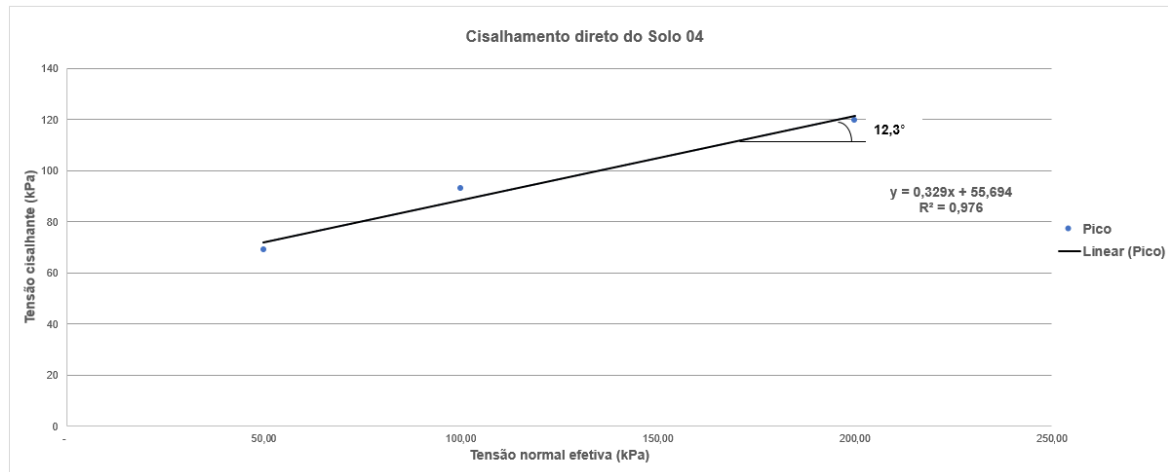
Já para o solo 04, resultado nas Figuras 55 e 56, apresentou um ângulo de atrito interno de 12,3° e coesão de 55,7.

Figura 55 – Curvas de deformação do solo 04.



Fonte: Autor (2024).

Figura 56 – Coesão e atrito interno do solo 04.



Fonte: Autor (2024).

Aos resultados foram resumidos na Tabela 20.

Tabela 20 – Resumo das características físicas dos solos.

Solo	C'	Φ
Solo 01	25,7	21,2°
Solo 02	29,45	23,8°
Solo 03	54,6	18,5°
Solo 04	55,7	12,3°

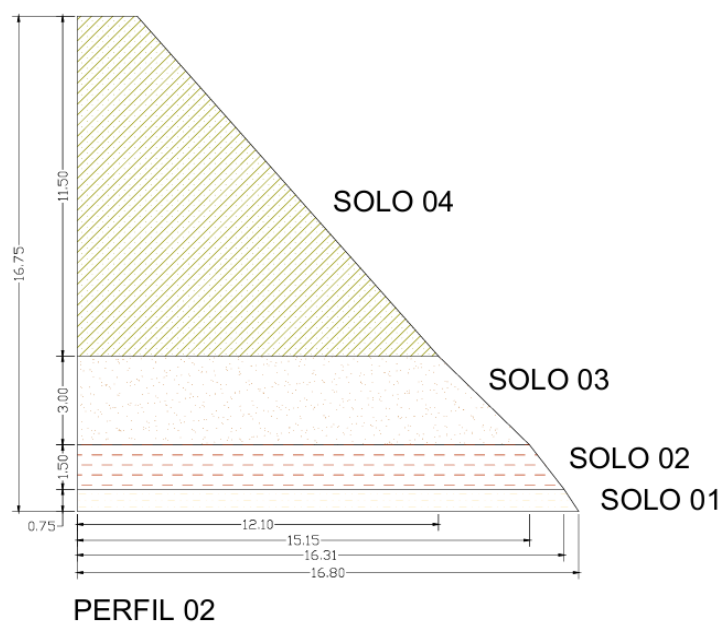
Fonte: Autor (2024).

4.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE

As Figuras 57, 58 e 59 apresentam as seções que foram ensaiadas 1 de cada vez com o objetivo de encontrar situações mais críticas.

Figura 57 – Perfil 01.

PERFIL 01



Fonte: Autor (2024).

Figura 58 – Perfil 02.

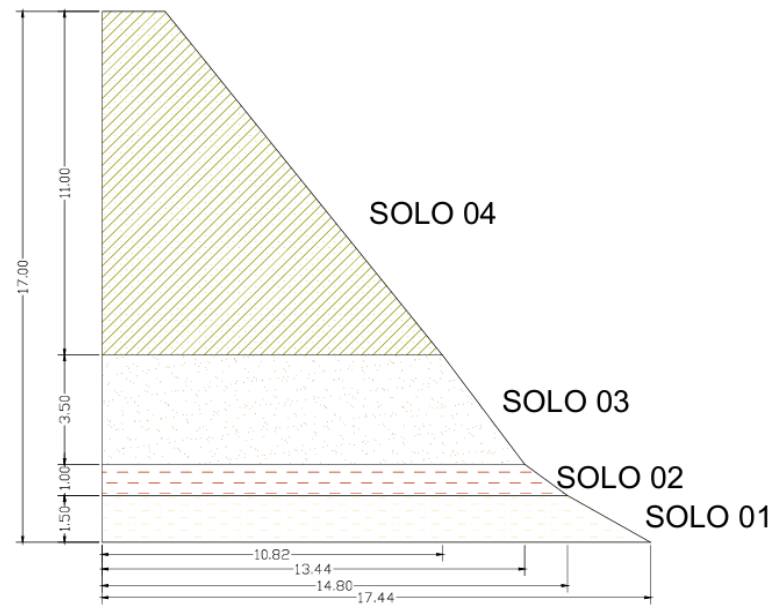
PERFIL 02



Fonte: Autor (2024).

Figura 59 – Perfil 03.

PERFIL 03

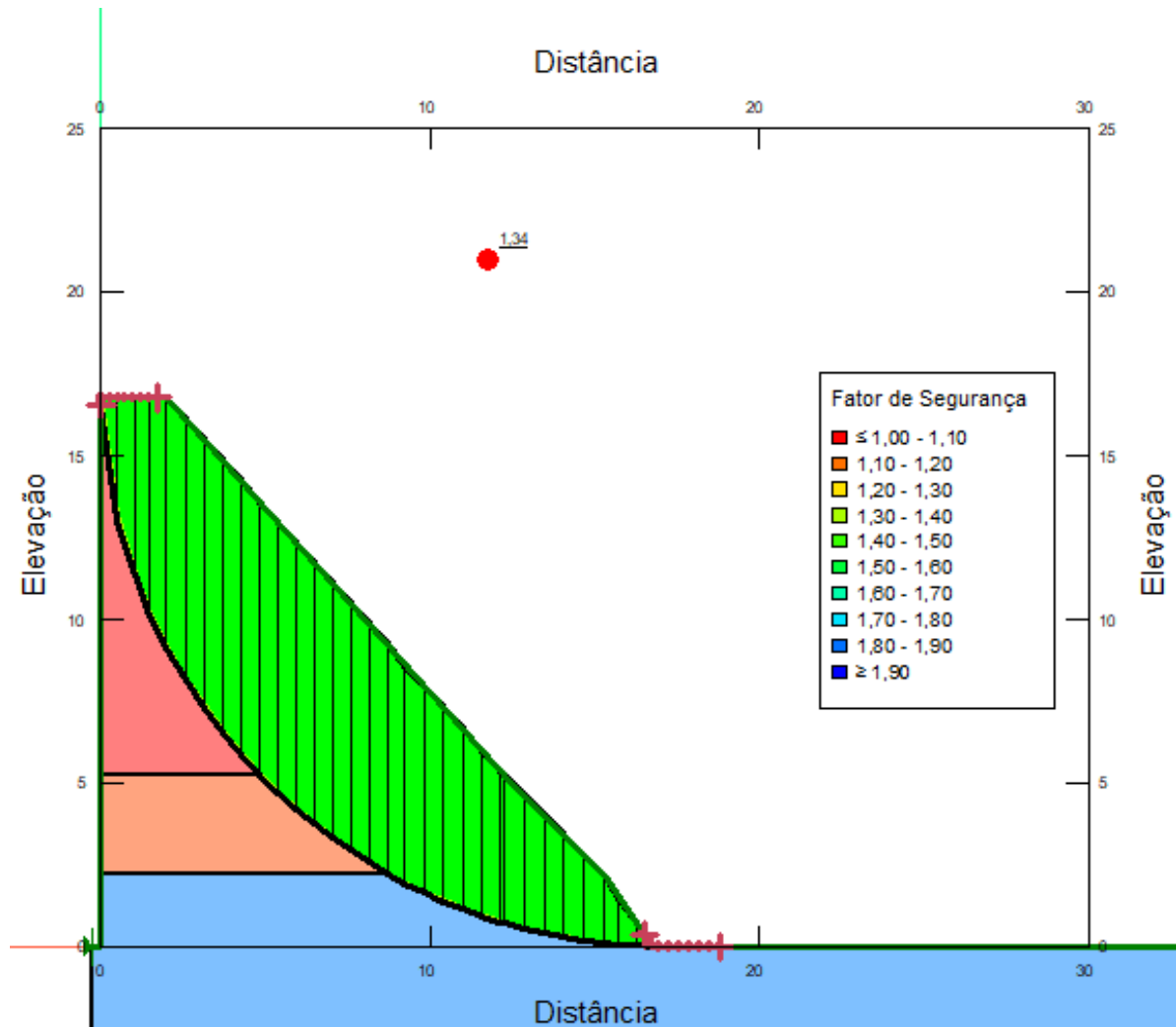


Fonte: Autor (2024).

As seções escolhidas possuem altura que varia entre 16,75 m e 18 m, sendo compostas de quatro camadas de solo, sendo que o solo 01 e solo 02 foram considerados como uma única camada, adotando as características do solo 02, por conta da limitação do software e de sua grande similaridade.

Para a modelagem no Geoslope, realizada pelo método de Bishop, as seções de perfil retiradas do levantamento topográfico. O resultado é apresentado nas Figuras 60, 61, 62 e 63.

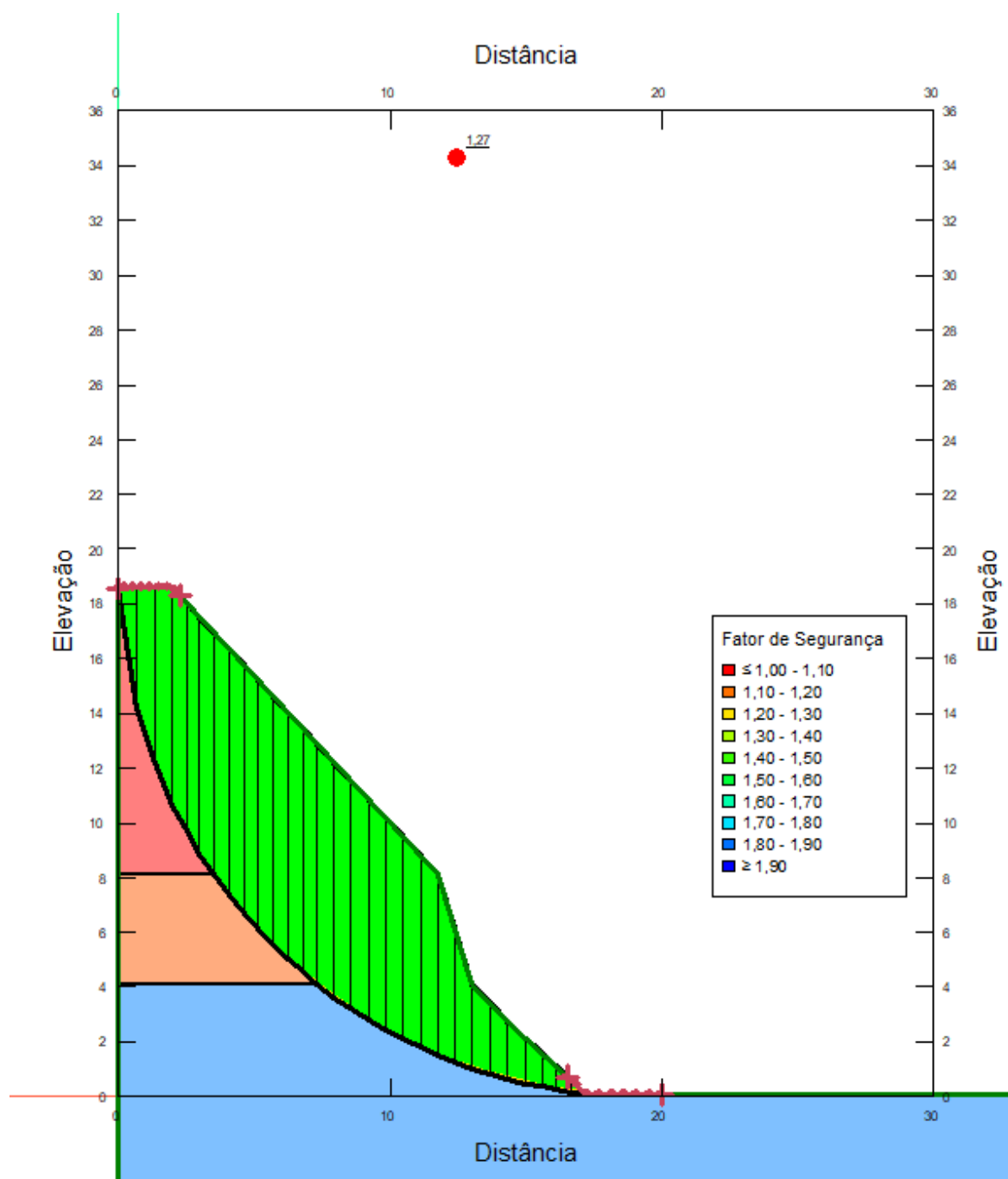
Figura 60 – FS da Seção 01 do Talude 11, método Bishop.



Fonte: Autor (2024).

O resultado da seção 01 apresenta um FS de 1,34, considerado baixo tanto para locais com infraestruturas, tanto com população ao redor, de acordo com a NBR 11.862/2009.

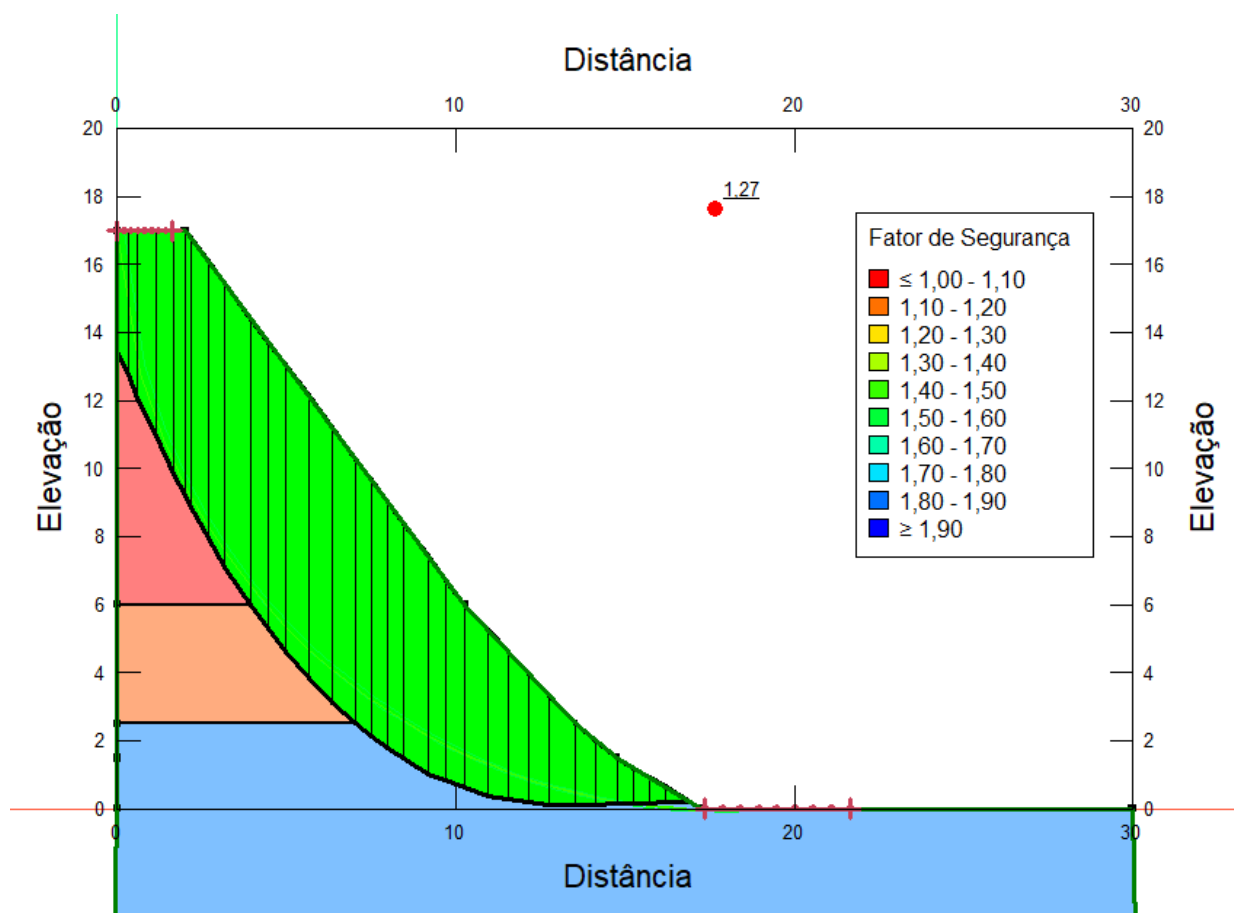
Figura 61 – FS da Seção 02 do Talude 11, método Bishop.



Fonte: Autor (2024).

Para a seção 02, o FS calculado foi de 1,27, apresentando também um risco para os moradores e para infraestrutura.

Figura 62 – FS da Seção 03 do Talude 11, método Bishop.



Fonte: Autor (2024).

A seção 03 também apresentou um FS de 1,27, novamente sendo uma situação crítica.

Os resultados são apresentados novamente de maneira resumida na tabela 21.

Tabela 21 – Relação de fator de segurança por método.

Seção	Bishop
Seção 01	1,34
Seção 02	1,27
Seção 03	1,27

Fonte: Autor (2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os riscos de perdas de vidas e materiais decorrentes de deslizamentos e outros movimentos de massa, apresentados durante a revisão bibliográfica, fica claro que o estudo sobre sua estabilidade é de fundamental importância. Fica também evidente que em casos em que o talude ou encosta não estiver estabilizado é necessário obras de estabilização, projetada para o caso em específico.

Depois da etapa de cadastramento dos taludes do Rodoanel de Teresina, já foi possível identificar uma série de patologias e deficiências das estruturas encontradas, como a falta de drenagem e em alguns casos evidências de rompimento. Optando-se por selecionar o talude número 11 para um estudo mais aprofundado de estabilidade.

A partir dos resultados das três seções modeladas, foi possível notar que o fator de segurança em nenhum dos três casos é suficiente para considerar o talude seguro, conforme a NBR 11.682/2009. Atrelado a isso, o impacto do solo saturado, que não foi ensaiado nesse estudo, tende a reduzir o fator de segurança significativamente e pode representar um risco maior ainda para os usuários do Rodoanel de Teresina.

Fica destacado também a falta de drenagem no talude estudado e nos outros 10 levantados, tornando o impacto da chuva extremamente mais forte. Além da classificação dos solos da base do talude como argilosos, que possui a característica de reter mais água, pode gerar outros multiplicadores de risco. Deixando evidente que a implementação de dispositivos de drenagem é de fundamental importância e necessidade.

Como solução para a situação do talude 11, fica recomendado a aplicação de um dos métodos de estabilização de solo, que pode ser um retaludamento, para reduzir o ângulo do talude junto à construção de bermas de equilíbrio para melhorar a dissipação de energia. Outra solução, o grampeamento do solo com plantas para aumentar a fixação do solo, por conta do efeito das raízes delas, levando a um aumento do ângulo de atrito e da coesão.

As sugestões do autor para futuros trabalhos são a realização o ensaio de cisalhamento das quatro camadas de solo na situação inundada, com o objetivo de levantar uma situação mais crítica, e dimensionar através do Geoslope o efeito de diferentes tipos de contenções no talude estudado.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3080: **Standart test method for direct shear test of soils under consolidated drained condition**, 2012. 7 p.

ANDRADE, Kelly Cristina Andrade. **Processos de instabilização em taludes rodoviários em solos residuais arenosos**: estudo na Rodovia Castello Branco (SP-280), Km 305 a 313. 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Université de São Paulo, São Carlos, 2009. Doi:10.11606/D.18.2009.tde-23032010-102600. Acesso em: 2024-09-06.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6457: **Solo - Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 2024. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6459: **Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7080: **Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7081: **Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7082: **Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016. 9 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 13133: **Execução de levantamento topográfico - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2021. 57 p

AYALA, G. R. **Verificação 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 em Engenharia Civil) -Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

BARBOSA, M. C. R. Estudo da aplicação do vetiver na melhoria dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos em taludes. Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto, 2012.

BRAJA, Das M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos: obras de terra e fundações**. Coautoria de Armando Negreiros Caputo. Atualizado por Paulo José Rocha de

Albuquerque, Jean Rodrigo Garcia. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos: INL, 2022. 384 p., il. ISBN 9788521637684.

CAPUTO, Homero P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: LTC, 1967.

CERQUEIRA, Maria De Jesus Melo et al. **Análise da erodibilidade e caracterização física dos taludes presentes no rodanel de Teresina**. In: Anais do I Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Anais...Diamantina(MG) Online, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-PRO 003/94: **Coleta de amostras deformadas de Solos**. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

FILHO, AUGUSTO, O. & VIRGILI, J.C. **Estabilidade de taludes**. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. Capítulo 15, páginas 243-269.

FREITAS, A, **Estudo das propriedades geotécnicas do solo com aplicação na análise da estabilidade de talude na CE-356**, UFC 2021.

FRITSCHER, Ester Cristina. **Análise de estabilidade de talude: estudo de caso no município de Teutônia/RS**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari – Univates.

FONSECA, A. P., **Análise de mecanismos de escorregamento associados a voçorocamento em cabeceira de drenagem na bacia do rio Bananal**, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

GEOSLOPE (2007). **SLOPE/W 2007 – Slope Stability Analysis, Version 7.15**, User's Manual, Geo-Slope International, Alberta, Canada.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 166 p.

GOVERNO DO PIAUÍ. **Mobilidade urbana é facilitada com a inauguração do Rodanel de Teresina**. DIARIO OFICIAL DO ESTADO, 2012. Disponível em: http://www.diariooficial.pi.gov.br/diario/201212/DIARIO31_209789aa2f.pdf. Acesso em: 06 set. 2024.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 1. ed. São Paulo, 1983.

IPT. **Manual de geotecnia: taludes de rodovias; orientacao para diagnostico e solucoes de seus problemas**. São Paulo: DER. Acesso em: 06 set. 2024. 1991.

MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. **Rede viária florestal**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1986. 157 p

MARANGON, M, **Mecânica dos solos**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz

de Fora, 2018. 209 p