



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VINICIUS CEZAR BORBA DE LIMA

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA ENCOSTA NA FORMAÇÃO  
BARREIRAS NA CIDADE DO RECIFE**

Recife

2024

VINICIUS CEZAR BORBA DE LIMA

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA ENCOSTA NA FORMAÇÃO  
BARREIRAS NA CIDADE DO RECIFE**

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

Orientador: Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães

Coorientador: Dr. Jean Joseph Baptiste

Recife

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lima, Vinicius Cezar Borba de.

Análise da estabilidade de uma encosta na formação barreiras na cidade do Recife / Vinicius Cezar Borba de Lima. - Recife, 2024.

102 p. : il., tab.

Orientador(a): Leonardo José do Nascimento Guimarães

Coorientador(a): Jean Joseph Baptiste

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, anexos.

1. Formação Barreiras. 2. Deslizamentos. 3. Encosta. 4. Estabilidade de talude. I. Guimarães, Leonardo José do Nascimento. (Orientação). II. Baptiste, Jean Joseph. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

VINICIUS CEZAR BORBA DE LIMA

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA ENCOSTA NA FORMAÇÃO  
BARREIRAS NA CIDADE DO RECIFE**

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

Aprovado em: 19/04/2024

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Samuel França Amorim (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

À Maria do Carmo, a melhor  
tia-avó, que sempre me apoiou.

## RESUMO

A Região Metropolitana do Recife possui uma ocupação desordenada nas áreas de morro, que cobrem 60% de seu território, com construções irregulares não projetadas e sem fiscalização. Entre as principais mudanças antrópicas temos a alteração da geometria da encosta, descarga de águas servidas e a remoção da vegetação nativa, aumentando a vulnerabilidade a deslizamentos de terra. A partir disso, o objetivo deste trabalho foi analisar a estabilidade de uma encosta localizada no Alto da Telha, bairro de Passarinho, na cidade do Recife. Foi realizada a revisão bibliográfica sobre a Formação Barreiras, os movimentos de massa, as investigações recomendadas para o seu estudo, os parâmetros geotécnicos importantes do solo e os métodos de equilíbrio limite para analisar a estabilidade. O programa de investigação geotécnica e levantamento topográfico, para obter características da encosta e retirar amostras deformadas e indeformadas de qualidade. Parâmetros geotécnicos como granulometria, plasticidade e resistência ao cisalhamento foram adquiridos a partir dos ensaios de laboratório, e utilizado amostras em condições naturais e inundadas para simular o efeito da chuva no solo. Foi realizada uma correlação entre os dados dos ensaios deste trabalho, com dados de outras bibliografias que estudaram a Formação Barreiras. A partir dos ensaios deste trabalho, a classificação do solo apresentou os tipos SC, CL, CH e ML, de acordo com a SUCS. A coesão dos solos para amostras inundadas foram 64% menores em relação a condição natural. Na análise de estabilidade na condição natural, 4 seções apresentaram perigo de ruptura, com os FS de 1,22, 1,38, 1,16 e 1,20, e uma rompeu com o FS=1. Na condição saturada, duas apresentaram ruptura com o FS de 0,96 e 0,93, e três com perigo de ruptura com os FS de 1,08, 1,12 e 1,06. Para a simulação da saturação gradual das camadas, a seção Córrego da Telha apresentou o FS igual ao da condição em que todos os solos estão saturados, quando foram feitas as saturações de 5 camadas, e para a seção Brumal em 3 camadas. Os baixos fatores de segurança na análise de estabilidade podem ser explicados, em grande parte, devido a inclinação acentuada da geometria das seções topográficas, que estão ao longo de ruas e escadarias que não foram consideradas no estudo.

**Palavras-chave:** Formação Barreiras; Deslizamentos; Encosta; Estabilidade de talude.

## ABSTRACT

The Metropolitan Region of Recife has a disorderly occupation in the hill areas, which cover 60% of this territory, with irregular, unplanned and unsupervised constructions. Among the main anthropogenic changes we have the alteration of the geometry of the slope, discharge of wastewater and the removal of native vegetation, increasing vulnerability to landslides. Based on this, the objective of this work was to analyze the stability of a slope located in Alto da Telha, Passarinho neighborhood, in the city of Recife. A bibliographical review was carried out on the “Formação Barreiras”, the mass movements, the investigations recommended for its study, the important geotechnical parameters of the soil and the limit equilibrium methods to analyze stability. The geotechnical investigation and topographic survey program, to obtain characteristics of the slope and remove quality deformed and undeformed samples. Geotechnical parameters such as particle size, plasticity and shear resistance were acquired from laboratory tests, and samples were used in natural and flooded conditions to simulate the effect of rain on the soil. A correlation was made between the data from the tests in this work, with data from other bibliographies that studied the “Formação Barreiras”. From the tests in this work, the soil classification presented the types SC, CL, CH and ML, according to SUCS. Soil cohesion for flooded samples was 64% lower compared to the natural condition. In the stability analysis in natural conditions, four sections presented a risk of rupture, with FS of 1.22, 1.38, 1.16 and 1.20, and one ruptured with FS=1. In the saturated condition, two presented rupture with FS of 0.96 and 0.93, and three were in danger of rupture with FS of 1.08, 1.12 and 1.06. For the simulation of the gradual saturation of the layers, the Córrego da Telha section presented the FS equal to that of the condition in which all soils are saturated, when saturations were made in five layers, and for the Brumal section in three layers. The low safety factors in the stability analysis can be explained, in large part, due to the steep slope of the geometry of the topographic sections, which are along streets and staircases that were not considered in the study.

**Keywords:** “Formação Barreiras”; Slips; Slopes; Slope stability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Precipitação média mensal, série 2000 a 2019, da Estação Pluviométrica Recife/CPRM.....	12
Figura 2 - Proposta de metodologia para caracterização geológico-geotécnica voltada a estabilização de encostas .....	19
Figura 3 - Distribuição do escoamento da água em uma encosta.....	21
Figura 4 - Gráfico de plasticidade de Casagrande .....	28
Figura 5 - Determinação da envoltória de ruptura.....	30
Figura 6 - Decomposição da força peso (P) para um bloco deslizando .....	32
Figura 7 - Equilíbrio de forças para o método das fatias .....	34
Figura 8 - Superfície do método das fatias, com a região estabilizante e instabilizante .....	36
Figura 9 - Equilíbrio de forças na fatia do método de Fellenius.....	36
Figura 10 - Equilíbrio de forças na fatia do método de Morgenstern-Price .....	38
Figura 11 - Equilíbrio de forças na fatia do método de Spencer.....	39
Figura 12 - Variação do $F_f$ e $F_m$ em função do $\theta$ .....	41
Figura 13 - Locação da encosta de estudo .....	44
Figura 14 - Posicionamento dos receptores GNSS, para o levantamento topográfico .....	45
Figura 15 - Localização dos furos de sondagem SPT do Projeto Morro de Vontade	46
Figura 16 - Locação do SPT-A3, e execução dos SPT-A1 e SPT-A2.....	46
Figura 17 - Execução dos furos SPT eixo B do Projeto Morro de Vontade. ....	46
Figura 18 - Exemplo da coleta das amostras deformadas do Projeto Morro de Vontade .....	47
Figura 19 - Execução dos poços de investigação e retirada dos blocos do Projeto Morro de Vontade.....	48
Figura 20 - Coleta das amostras indeformadas do Projeto Morro de Vontade, ponto B3 .....	48
Figura 21 - Pesagem da capsula mais solo, para o ensaio de umidade em estufa...50	
Figura 22 - Pesagem do picnômetro mais solo e água, para determinar a densidade do solo.....	50
Figura 23 - Ensaio de peneiramento e ensaio de sedimentação.....	51

Figura 24 - Determinação do limite de liquidez (LL).....	52
Figura 25 - Determinação do limite de plasticidade (LP).....	52
Figura 26 - Ensaio de cisalhamento direto .....	53
Figura 27 - Localização das seções na encosta, no programa Google Earth Pro.....	54
Figura 28 - Geometria de uma seção, no programa Civil 3D .....	55
Figura 29 – Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, amostra do poço A1 .....	60
Figura 30 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, amostra do poço A2 .....	61
Figura 31 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, amostra do poço A3 .....	62
Figura 32 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, amostra do poço B1 .....	63
Figura 33 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, amostra do poço B2 .....	64
Figura 34 - Perfil do solo com as divisões das camadas da seção Rua Córrego da Telha.....	69
Figura 35 - Perfil do solo com as divisões das camadas da seção Rua Beta .....	69
Figura 36 - Perfil do solo com as divisões das camadas da seção Rua Brumal .....	69
Figura 37 - Perfil do solo com as divisões das camadas da seção Uruaí .....	70
Figura 38 - Perfil do solo com as divisões das camadas da seção Parau.....	70
Figura 39 - Análise de estabilidade da Rua Córrego da Telha, condição natural .....	73
Figura 40 - Análise de estabilidade da Rua Beta, condição natural .....	74
Figura 41 - Análise de estabilidade da Rua Brumal, condição natural .....	75
Figura 42 - Análise de estabilidade da Rua Uruaí, condição natural .....	76
Figura 43 - Análise de estabilidade da Rua Parau, condição natural .....	76
Figura 44 - Análise de estabilidade da Rua Córrego da Telha, condição saturada ...	78
Figura 45 - Análise de estabilidade da Rua Beta, condição saturada .....	78
Figura 46 - Análise de estabilidade da Rua Brumal, condição saturada .....	80
Figura 47 - Análise de estabilidade da Rua Uruaí, condição saturada .....	80
Figura 48 - Análise de estabilidade da Rua Parau, condição saturada .....	81
Figura 49 - Análise de estabilidade da Rua Córrego da Telha, condição de saturação por camada .....	82

Figura 50 - Análise de estabilidade da Rua Brumal, condição de saturação por camada .....	83
Figura 51 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT A1 .....	90
Figura 52 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT A2 .....	90
Figura 53 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT A3 .....	91
Figura 54 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT B1 .....	91
Figura 55 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT B2 .....	91
Figura 56 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT B3 .....	92
Figura 57 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade natural, Bloco A1 .....	93
Figura 58 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade natural, Bloco A2 .....	93
Figura 59 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade natural, Bloco A3 .....	93
Figura 60 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade natural, Bloco B1 .....	94
Figura 61 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade natural, Bloco B2.....	94
Figura 62 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco A1 .....	95
Figura 63 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco A2 .....	95
Figura 64 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco A3 .....	95
Figura 65 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco B1 .....	96
Figura 66 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco B2.....	96

Figura 67 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco B3.....	96
Figura 68 - Relatório da sondagem SPT-A1.....	97
Figura 69 - Relatório da sondagem SPT-A2.....	98
Figura 70 - Relatório da sondagem SPT-A3.....	99
Figura 71 - Relatório da sondagem SPT-B1.....	100
Figura 72 - Relatório da sondagem SPT-B2.....	101
Figura 73 - Relatório da sondagem SPT-B3.....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos movimentos de massa .....	17
Tabela 2 - Exemplo de métodos de avaliação do solo .....	20
Tabela 3 - Classificação do solo em relação as dimensões das partículas .....	26
Tabela 4 - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade para vários solos .....	29
Tabela 5 - Fator de segurança mínimo recomendado, a depender do risco associado .....	31
Tabela 6 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-A1 .....	61
Tabela 7 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-A2 .....	62
Tabela 8 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-A3 .....	63
Tabela 9 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-B1 .....	64
Tabela 10 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-B2 .....	65
Tabela 11 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-B3 .....	65
Tabela 12 - Resultado dos ensaios de cisalhamento direto eixo A .....	66
Tabela 13 - Resultado dos ensaios de cisalhamento direto eixo B .....	67
Tabela 14 - Valor dos parâmetros do solo para os ensaios de cisalhamento direto ..	67
Tabela 15 - Resumo dos solos retirados da literatura .....	71
Tabela 16 - Correlação do $N_{spt}$ com os parâmetros do solo .....	72
Tabela 17 - Parâmetros do solo utilizados na estabilidade do eixo A, na condição natural .....	73
Tabela 18 - Parâmetros do solo utilizados na estabilidade do eixo B, na condição natural .....	75
Tabela 19 - Parâmetros do solo utilizados na estabilidade do eixo A, na condição saturada .....	77
Tabela 20 - Parâmetros do solo utilizados na estabilidade do eixo B, na condição saturada .....	79

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Formação Barreiras .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Movimentos de massa .....</b>	<b>16</b>
2.2.1	Tipos de movimentos de massa .....	16
2.2.2	Fatores desestabilizadores .....	18
<b>2.3</b>	<b>Métodos de investigação .....</b>	<b>19</b>
2.3.1	Etapas para investigações geológicas e geotécnicas .....	19
2.3.2	Levantamento topográfico .....	20
2.3.3	Ensaio de campo .....	22
2.3.4	Ensaio de laboratório .....	22
<b>2.4</b>	<b>Propriedades dos solos .....</b>	<b>23</b>
2.4.1	Índice de vazios e Porosidade .....	23
2.4.2	Grau de saturação e teor de umidade .....	24
2.4.3	Peso específico .....	25
2.4.4	Granulometria .....	26
2.4.5	Plasticidade e consistência .....	27
2.4.6	Permeabilidade .....	28
2.4.7	Resistência ao cisalhamento dos solos .....	29
<b>2.5</b>	<b>Análise de estabilidade de taludes .....</b>	<b>31</b>
2.5.1	Método das Fatias .....	33
2.5.2	Método de Fellenius .....	35
2.5.3	Método de Bishop Simplificado .....	37
2.5.4	Método de Morgenstern-Price .....	38
2.5.5	Método de Spencer .....	39
2.5.6	Método de Janbu Simplificado .....	41
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>43</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo .....</b>	<b>43</b>
<b>3.2</b>	<b>Levantamentos e ensaios de campo .....</b>	<b>44</b>
3.2.1	Levantamento topográfico .....	44
3.2.2	Sondagem de simples reconhecimento .....	45

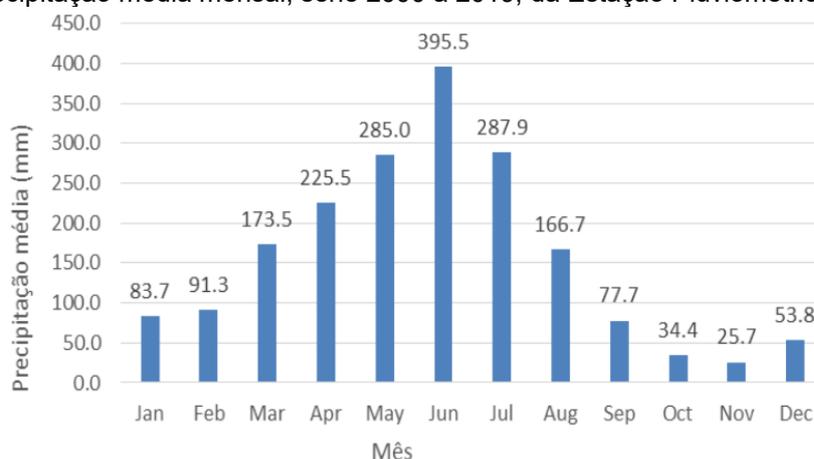
3.2.3	Coleta das amostras.....	47
<b>3.3</b>	<b>Ensaio de laboratório .....</b>	<b>48</b>
3.3.1	Caracterização física do solo.....	49
3.3.2	Resistência ao cisalhamento .....	52
<b>3.4</b>	<b>Estabilidade da encosta.....</b>	<b>54</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1</b>	<b>Sondagem à percussão .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio de caracterização do solo .....</b>	<b>60</b>
<b>4.3</b>	<b>Ensaio de cisalhamento direto.....</b>	<b>65</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise da estabilidade da encosta .....</b>	<b>68</b>
4.4.1	Análise da Estabilidade na condição natural do eixo A .....	72
4.4.2	Análise da estabilidade na condição natural do eixo B.....	74
4.4.3	Análise da estabilidade na condição saturada do eixo A.....	77
4.4.4	Análise da estabilidade na condição saturada do eixo B.....	79
4.4.5	Análise da estabilidade na condição de saturação por camada.....	81
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>84</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>84</b>
<b>5.2</b>	<b>Sugestões para pesquisas futuras .....</b>	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXO A – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA E LIMITES DE CONSISTÊNCIA .....</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXO B – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO NA CONDIÇÃO NATURAL.....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO C – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO NA CONDIÇÃO INUNDADO.....</b>	<b>95</b>
	<b>ANEXO D – RELATÓRIOS DOS FUROS DE SONDAÇÃO A PERCUSSÃO.....</b>	<b>97</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas estão cada vez mais evidentes e intensas com o passar das décadas, em consequência da má gestão dos recursos naturais, da queima de combustíveis fósseis e do uso insustentável das terras, tornando as catástrofes climáticas mais frequentes, de acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, em sua sigla em inglês), em seu Relatório Síntese sobre Mudança Climática (2023). É de conhecimento comum que os desastres naturais relacionados ao clima, atingem principalmente a parcela da população mais vulnerável. Os desastres ambientais mais comuns que ocorrem no Brasil devidos as mudanças climáticas são as enchentes e inundações, os deslizamentos de terra, as secas, os incêndios florestais e as tempestades intensas.

Os deslizamentos de terra são desastres ambientais muito comuns nas regiões de relevo acidentado, com uma declividade acentuada, somado a chuvas intensas e prolongadas (CARVALHO; GALVÃO, 2006), como é o caso das áreas de Mata Atlântica, que ocupa grande parte da região costeira do Brasil. A ocupação irregular das áreas de risco de deslizamentos, aumenta o perigo a vida associado ao desastre, em que muitas vezes podem ser evitados e/ou mitigados. A cidade do Recife está contida nesse contexto, com seu inverno predominantemente chuvoso, dos meses de março a agosto, como apresentado por MELO (2021), com o gráfico da precipitação média mensal na Figura 1. Recife possui duas áreas bem distintas, com o centro predominantemente em cima de mangue, e em sua volta morros.

Figura 1 - Precipitação média mensal, série 2000 a 2019, da Estação Pluviométrica Recife/CPRM



Fonte: MELO (2021).

A Prefeitura do Recife (RECIFE, 2024) caracteriza o território da cidade como 67,43% de morros, 23,26% planícies, 9,31% aquáticas e 5,58% ZEPA, onde a grande parcela é ocupada por famílias de baixa renda, que não possuem condições financeiras para construir moradias adequadas a essa região SANTANA (2019). Ano após ano nos períodos de chuva no município, é comum a ocorrência de deslizamentos de terra nas regiões de morros, que em grande parte gera vítimas, sendo em alguns casos fatais.

A Formação Barreiras é uma das unidades geológicas mais presentes na costa Brasileira, e em especial da região de morros da cidade do Recife, com características da sua origem sedimentar e composição predominante de camadas intercaladas de areias e argilas. Segundo BANDEIRA (2010), as encostas ocupadas pela população na Cidade do Recife corresponde predominantemente aos sedimentos da Formação Barreiras. Esta formação geológica é composta por sedimentos que foram depositados ao longo de milhões de anos, com camadas de grandes espessuras e diversidade litológica, com arenitos, argilitos, calcários e conglomerados.

A variação da presença de solos arenosos e argilosos em camadas intercaladas na Formação Barreiras a torna susceptível a processos erosivos, isto, ligado à sua importância social e ambiental para a Região Metropolitana do Recife, e a ocupação da sociedade utilizando-a para construção de moradias, culmina no grande número de ocorrências de movimentos de terra. Esta ocupação de forma desordenada na região, somado a cortes e aterros inadequados para construção de casas, falta de uma correta drenagem e a remoção da vegetação, agrava ainda mais o problema de ocorrência dos deslizamentos.

Para reduzir os danos socioambientais causados pelos deslizamentos de terra, é preciso conhecer e prevenir o problema antes que o mesmo ocorra. Assim, métodos matemáticos são estudados, desenvolvidos e aperfeiçoados, com o objetivo tentar prever, e quantificar o nível de perigo associado a instabilidade da encosta.

Ao estudar a estabilidade de um talude natural, uma série de fatores devem ser levados em consideração para uma visão completa do problema. A análise da topografia da região, propriedades mecânicas do solo, o estudo hidrológico da bacia a qual a encosta está situada e a geologia local são alguns dos fatores decisivos para entender o problema. Segundo GERSCOVICH (2016), um talude estável pode alcançar a instabilidade através de intervenções externas, como a ação antrópica, e

internas como o intemperismo. Estes tipos de distúrbios no solo serão tomados em consideração na de estabilidade da encosta.

Neste trabalho de conclusão de curso, através de ensaios de campo e de laboratório, com ferramentas de programas computacionais, serão coletados os dados necessários para o estudo da análise de estabilidade de uma encosta da região metropolitana da cidade do Recife, no Alto da Telha, bairro de Passarinho. Encosta esta que faz parte da pesquisa do projeto, pertencente ao Edital FACEPE 21/2022, Apoio a Projetos de Prevenção, Preparação e Mitigação de Desastres decorrentes de Precipitações Intensas, financiado pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE, vinculado à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação – SECTI.

Para o primeiro capítulo, será feito um estudo sobre algumas das características da Formação Barreiras, abrangendo sobre os tipos de movimento de massa, e quais os fatores que desencadeiam a instabilidade do maciço. Também será estudado exemplos de prospecções geotécnicas utilizadas na região de morros da cidade do Recife, algumas propriedades do solo relevantes para o desenvolvimento deste trabalho. E um aprofundamento teórico sobre métodos de análises de estabilidade a serem aplicados, analisando suas formulações matemáticas, e o programa computacional que utilizado para as simulações.

No segundo capítulo, trará as metodologias que foram utilizadas na obtenção dos dados da topografia da região e parâmetros do solo, com a utilização dos ensaios de campo e laboratório com os procedimentos cabíveis segundo as recomendações das normas brasileiras. E os métodos para a realização do cálculo da estabilidade da encosta, utilizando o programa computacional adequado.

O terceiro capítulo, por sua vez, traz os resultados das prospecções geotécnicas e dos ensaios de campo e de laboratório, com os métodos de cálculos para a obtenção dos parâmetros do solo. E o resultado das análises de estabilidade de cada seção da encosta, com os valores do Fator de Segurança para cada cenário analisado.

Por fim, a partir dos resultados obtidos dos estudos e análises de estabilidade, se apontam as conclusões e observações acerca do assunto. Explicar o entendimento sobre o impacto das chuvas em uma encosta da Formação Barreiras na cidade de Recife.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Este capítulo consiste na revisão das bibliografias estudadas no decorrer do trabalho, possuindo o objetivo de entender mais sobre os movimentos de massa em encostas e processos que os envolvem, as prospecções geotécnicas utilizadas na pesquisa, parâmetros mecânicos do solo para uma análise de estabilidade de taludes, e os principais métodos de cálculo.

### **2.1 Formação Barreiras**

A Formação Barreiras é uma unidade geológica do Período Terciário, formada por material de natureza sedimentar que aflora em uma faixa do litoral do Brasil, ao longo de 4.000 km, estendendo-se do Estado do Rio de Janeiro até o Estado do Amapá (MORAIS, 2020).

Segundo LAFAYETTE (2000), a formação barreiras é uma unidade litoestratigráfica, sendo uma das mais extensas na cidade do Recife, possuindo um elevado risco a seus moradores por se tratar de um solo com alta propensão a erosão nas camadas arenosas, que se intercalam com depósitos de argilas, que propiciam o escorregamento. Regiões com alta pluviosidade e solo suscetível à erosão, onde a vegetação original é removida em grande escala, criam pontos de fragilidade na encosta, cuja severidade varia de acordo com o grau de erosão.

Como é explicado por SANTOS JR, COUTINHO e SEVERO (2015), os sedimentos da Formação Barreiras apresentam cores avermelhadas, brancas e até amarelas, com uma tonalidade viva. Segundo LIMA (2002) a granulometria do solo nesse tipo de formação é variada, possuindo horizontes de seixos sub-horizontais, e um leve direcionamento para o mar na forma de tabuleiros elevados a 50m.

Os morros da região norte do Recife possuem uma menor susceptibilidade a erosão, quando comparados com os morros da região sul que possui um solo com a consistência mais fofo. Isso pode ser correlacionado pela zona sul possuir um solo

mais arenoso, e em contrapartida, a região norte com um solo de sedimentos mais argilosos, observados em seus deslizamentos, descrito por LIMA (2002).

O termo deslizamentos, tem sido comumente utilizado no sentido de abranger todo e qualquer movimento coletivo de solos, rochas, material orgânico, ou a soma destes, independente dos processos que o causam, ou qualquer fator precedente ao movimento gravitacional. Com o aumento dos casos de movimentos gravitacionais de massa de solo, a medida em que a população mais carente ocupa as regiões de morros, faz-se necessário o conhecimento mais aprofundado dos tipos de movimentos de massa que possam vir a ocorrer, bem como entender melhor os seus mecanismos de ruptura.

## **2.2 Movimentos de massa**

Os movimentos de massa são eventos que ocorrem naturalmente na natureza, onde encostas sem qualquer intervenção humana estão sujeitos a deslizamentos de terra. Entretanto, à medida que grandes cidades tendem a expandir e migrar para zonas menos favoráveis, como os morros, os movimentos de massa tornam-se cada vez mais preocupantes. Uma vez que agora há elementos expostos ao risco, é cada vez mais importante o estudo desses movimentos, para entender o que pode ou não agravar seus impactos, além de tentar prever sua ocorrência.

### *2.2.1 Tipos de movimentos de massa*

Os movimentos de massa possuem diversas classificações na literatura, onde normalmente são baseadas nos mecanismos de ruptura e suas propriedades. A seguir, estão as classificações em tópicos, os movimentos de massa definidos por alguns autores, tomando como base a classificação aderida por GUIDICINI e NIEBLE (1983):

Tabela 1 - Classificação dos movimentos de massa

Tipo de movimento		Descrição
Escoamentos	Rastejo	são movimentos lentos e contínuos de encostas que possuem limites indefinidos. O movimento é provocado pela ação da gravidade.
	Corrida	são escoamentos rápidos, com característica hidrodinâmica, provocado pela perda de atrito interno que o excesso de água causa
Escorregamentos	Escorregamento rotacional	é onde o colapso da massa ocorre por ruptura ao longo da superfície de escorregamento e rotação em torno de um centro, em forma de arco. O escorregamento é sempre contido pelo material do terreno, geralmente um solo
	Escorregamento translacional	estes podem ocorrer em taludes abatidos e são geralmente extensos, podendo atingir centenas ou milhares de metros. Este tipo de escorregamento pode ser dividido em escorregamentos translacionais de rochas, onde massas rochosas se movimentam ao longo de descontinuidades ou planos de fraqueza preexistentes. E em escorregamentos translacionais de solo, que são movimentos ao longo de uma superfície plana preexistente, e o movimento é de curta duração, velocidade elevada, e grande poder de destruição
Quedas	Queda de blocos	é a queda livre de blocos de rochas que foram deslocados de um ponto elevado, normalmente de penhascos verticais ou taludes íngremes.
	Queda de detritos	é quando ocorre a queda, relativamente livre, de fragmentos de rochas ou terrosos, em pequenas magnitudes.
Subsidências	Subsidência	é o efeito de adensamento ou afundamento de camadas de solo, em superfície, por consequência da remoção de algum componente do substrato
	Recalque	são movimentos verticais de uma estrutura, sendo provocado pelo peso próprio ou a deformação do subsolo por outro fator
	Desabamento	são subsidências bruscas, com o colapso na superfície, que é causado pela ruptura ou remoção total ou parcial do substrato

Fonte: Adaptado pelo autor (2023), de GUIDICINI e NIEBLE (1983).

### 2.2.2 Fatores instabilizadores

Os movimentos de massa, em sua grande maioria, ocorrem devido a redução da resistência interna do solo, ou pelo aumento das solicitações externas sofridas pelo maciço. Os agentes e causas dos movimentos de massa são classificados em 4 tipos descritos a seguir, de acordo com GUIDICINI e NIEBLE (1983).

- Causas internas: as causas internas podem ser provenientes do efeito de oscilações térmicas das massas rochosas, ou pela diminuição dos parâmetros de resistência por intemperismo. As oscilações térmicas ocorrem diariamente ou sazonalmente, provocando variações volumétricas, podendo ocasionar o destaque de blocos. Já a diminuição dos parâmetros de resistência por intemperismo, é o processo no qual o meio rochoso, ou terroso, sofre por alteração da estrutura do material, levando ao enfraquecimento gradual, no qual ocasiona a redução dos parâmetros de resistência do maciço;
- Causas externas: as causas externas são divididas em mudanças na geometria do sistema, efeitos de vibração e mudanças naturais na inclinação das encostas;
- Causas intermediárias: para as causas intermediárias, existe a separação entre a elevação do nível piezométrico em massas homogêneas, elevação da coluna de água em descontinuidades, rebaixamento rápido do lençol freático, erosão subterrânea (pipping), e diminuição do efeito de coesão aparente;
- Atuação da cobertura vegetal: a cobertura vegetal pode causar o movimento de massa pelo efeito do desmatamento, onde antes as florestas desempenhavam um papel na proteção do solo, expondo o solo a processos erosivos.

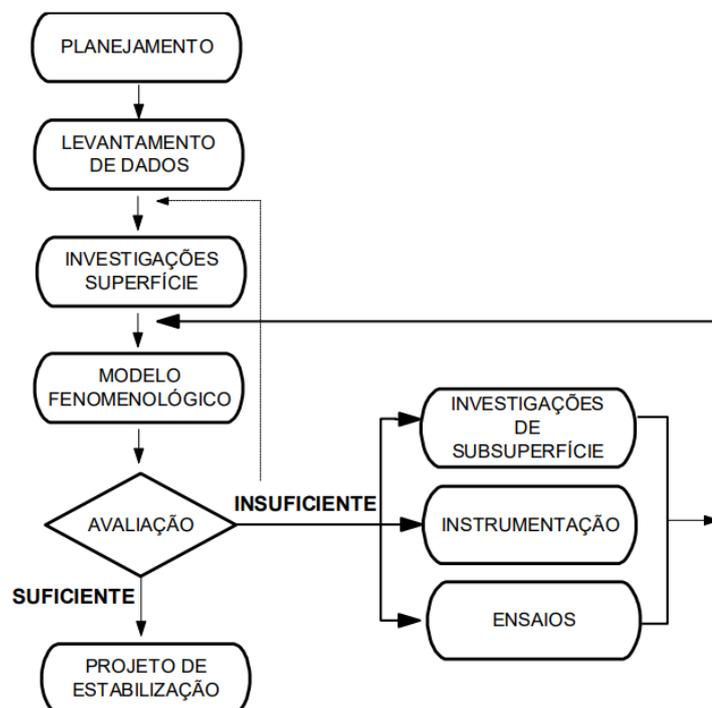
## 2.3 Métodos de investigação

A investigação geotécnica é essencial para a análise de estabilidade, visto que, ao simular um problema buscamos que o modelo computacional se aproxime ao máximo do objeto de estudo em seu estado natural. A necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o solo, conduz a necessidade de realizar ensaios geotécnicos de laboratório e de campo, com o intuito de obter os parâmetros do solo essenciais para o entendimento do problema.

### 2.3.1 Etapas para investigações geológicas e geotécnicas

A organização das investigações geológicas e geotécnicas é primordial para o sucesso da estabilização da encosta, a Figura 2 adaptado por ALMEIDA (2016) de AUGUSTO FILHO (1992) propõe uma metodologia para se seguir.

Figura 2 - Proposta de metodologia para caracterização geológico-geotécnica voltada a estabilização de encostas



Fonte: Adaptado por ALMEIDA (2016) de AUGUSTO FILHO (1992).

Para que o projeto de estabilização seja realizado, é fundamental que um modelo fenomenológico seja satisfatório, isto é, que as hipóteses obtidas através das investigações e análises, explique o comportamento do fenômeno causador da instabilidade. Ao avançar nas etapas é preciso mais investimento, com uma grande diversidade de caracterizações e investigações. A Tabela 2 apresenta alguns dos métodos de avaliação.

Tabela 2 - Exemplo de métodos de avaliação do solo

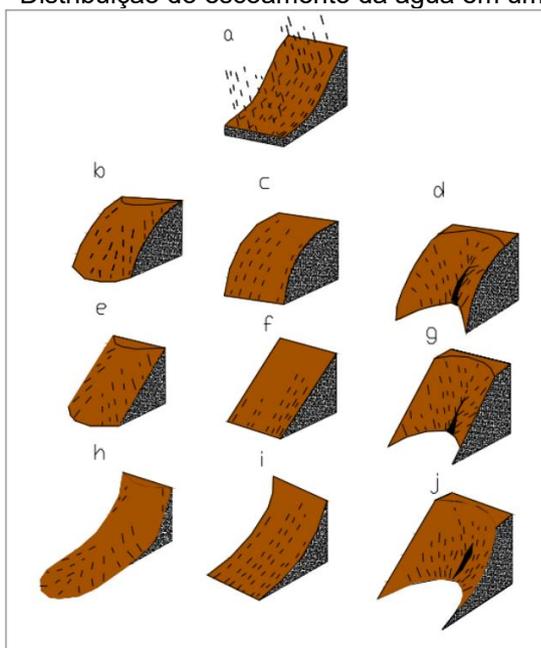
Investigações de subsuperfície	Métodos diretos	Poços, trincheiras, sondagem a trado, Sondagem a percussão (SPT), sondagens rotativas e mistas.
	Métodos indiretos	Geofísicos (métodos sísmicos e métodos elétricos).
Instrumentação		Inclinômetro, piezômetro casa grande, piezômetro elétrico, placas e pinos de recalque, marcos superficiais etc.
Ensaios	Campo	Penetração do cone (CPT), penetração do piezocone (CPTU), palhetam ensaio de placa, permeabilidade etc.
	Laboratório	Determinação da umidade em estufa, análise granulométrica (peneiramento e sedimentação), limites de consistência, resistência do solo (cisalhamento direto).

Fonte: O autor (2023).

### 2.3.2 Levantamento topográfico

A topografia de uma encosta é o principal fator geomorfológico que contribui para os processos erosivos, como é explicado por ALMEIDA (2016), que por meio de fatores como a declividade, forma e comprimento da encosta, influenciam no escoamento e infiltração da água no solo. Taludes com grandes declividades costumam aumentar a velocidade de escoamento da água, ocasionando um carregamento maior de partículas, acelerando a erosão. A distribuição do escoamento da água da chuva de acordo com o relevo topográfico foi representado por POU (1988 apud ALMEIDA, 2017, p. 50), como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Distribuição do escoamento da água em uma encosta



Fonte: POU (1988 apud ALMEIDA, 2017, p. 50).

GERSCOVICH (2016) explica a influência da topografia na ruptura de taludes, que naturalmente ao longo do tempo as rochas são degradadas em materiais menos resistentes, e assim, a geometria da encosta pode proporcionar uma condição de instabilidade do talude. O impacto da ação antrópica na geomorfologia de uma encosta é um fator crítico no estudo da estabilidade de um talude, visto que, naturalmente o solo irá degradar, sofrer alterações que são favoráveis a estabilidade global do maciço.

Portanto, para calcular a estabilidade de um talude é necessário informações da topografia do local, que nos permite simular a geometria de uma encosta fiel a realidade, e assim possibilitando resultados mais coerentes. Parâmetros como a inclinação, o volume do maciço, a extensão do talude, uso e ocupação do solo, vegetação, irregularidade da superfície, bacia de contribuição e depósitos, são alguns dos itens relevantes ao se estudar a topografia. Levantamentos planialtimétricos em escalas apropriadas é essencial, devendo estar em escalas apropriadas para o caso, não apenas da encosta em si, mas também as áreas próximas a região estudada.

### 2.3.3 *Ensaio de campo*

A análise do solo através de ensaios de campo, em geral, é problemática quando comparado aos ensaios de laboratório, devido a necessidade de um ambiente controlado para resultados precisos, muitas vezes gerando custos adicionais ao programa de investigação. Entretanto, pode-se obter parâmetros do solo de forma rápida a depender da escolha e execução do método.

A coleta de amostras utilizadas em ensaios geotécnicos é feita em campo, através de métodos de extração do solo, que são aproveitadas em diversos campos do estudo do solo. Assim, existem duas formas para se coletar amostras de solo: deformada e indeformada, e a escolha do tipo de amostra será baseada no ensaio que ela será utilizada. Para caracterizar um solo quanto sua textura e constituição mineral, é recomendado amostras deformadas, visto que são de fácil coleta. Nos casos de caracterização do solo quanto sua umidade e parâmetros que envolvam sua estrutura, as amostras indeformadas são indicadas.

### 2.3.4 *Ensaio de laboratório*

A caracterização do solo é o principal objetivo dos ensaios de laboratório, que fornecerão a precisão necessária, quando feito corretamente, para o projeto de estabilização de talude. Determinando-se as propriedades, que são as principais fontes de informação sobre o solo, pode-se embasar o modelo fenomenológico e avançar o estudo da estabilidade.

Os ensaios de laboratório possuem normas regulamentadoras, elevando o grau de precisão e confiabilidade em seus resultados. Propriedades como o índice de vazios, porosidade, grau de saturação, teor de umidade, peso específico, granulometria, limites de consistência, permeabilidade e resistência ao cisalhamento são alguns exemplos importantes a serem obtidos em um projeto de estabilidade de talude, e podem ser obtidos através de ensaios em um laboratório de solos.

## 2.4 Propriedades dos solos

O solo é um material complexo, composto por uma parcela sólida, que são os minerais, e outra parcela de vazios podendo ser preenchidos com o ar e/ou água. Essa heterogeneidade do solo proporciona uma grande variabilidade em suas propriedades, tornando a compreensão de suas características um dos pontos mais importantes na análise da estabilidade de uma encosta.

### 2.4.1 Índice de vazios e Porosidade

A relação entre os vazios de um solo são estudadas de diversas formas, obtendo formulações matemáticas que levam em consideração o volume do solo e seus vazios, a porosidade e o índice de vazios é um desses parâmetros.

O índice de vazios de um solo é a relação direta entre o volume dos vazios do solo, e o volume da porção sólida do solo, assim obtendo a fórmula matemática conforme a equação (1). Já a porosidade de um solo se correlaciona com o volume de vazios de um solo e o seu volume total, e é representado em porcentagem, equação (2). A porosidade e o índice de vazios possuem uma ligação direta como pode ser observado na equação (3), equações que são descritas em CAPUTO (2015).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1)$$

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_t} \cdot 100 \quad (2)$$

$$n(\%) = \frac{e}{1+e} \quad (3)$$

Em que:

- $e$  = índice de vazios;
- $n$  = porosidade (%);

- $V_v$ = volume de vazios ( $m^3$ );
- $V_s$ = volume de sólidos ( $m^3$ );
- $V_t$ = volume total ( $m^3$ ).

#### 2.4.2 Grau de saturação e teor de umidade

Os vazios do solo quando preenchidos com água modificam as propriedades do solo, que precisam ser estudadas. O grau de saturação do solo é um indicador da quantidade de água que está ocupando seus vazios em função do volume de solo, dado em porcentagem, ou seja, caso o solo esteja saturado todos os seus vazios estão preenchidos com água, equação (4) DAS (2019), em contrapartida, o teor de umidade é a relação do peso da água e o peso da parcela sólida em uma certa massa de solo, equação (5).

$$S(\%) = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad (4)$$

$$h(\%) = \frac{P_w}{P_s} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que:

- $S$ = grau de saturação (%);
- $h$ = teor de umidade (%);
- $V_v$ = volume de vazios ( $m^3$ );
- $V_w$ = volume de água ( $m^3$ );
- $P_w$ = peso da água (kN);
- $P_s$ = peso de sólidos (kN).

### 2.4.3 *Peso específico*

O solo possui uma ligação direta entre os pesos e os volumes das partes que o compõe, e assim utiliza-se o peso específico para relacionar estas propriedades do solo. O peso específico aparente de um solo é a relação entre o volume total de o peso total de uma certa massa de solo em estado natural considerando as três fases, e pode-se obter o peso específico aparente de um solo seco ao retirar a água dos vazios do solo, CAPUTO (2015), e pode-se correlacionar as duas equações com o teor de umidade do solo como descrito abaixo:

$$\gamma = \frac{P_t}{V_t} \quad (6)$$

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_t} \quad (7)$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma}{1 + h} \quad (8)$$

Em que:

- $\gamma$  = peso específico aparente do solo ( $\text{kN/m}^3$ );
- $\gamma_s$  = peso específico aparente do solo seco ( $\text{kN/m}^3$ );
- $h$  = teor de umidade (%);
- $V_t$  = volume total ( $\text{m}^3$ );
- $P_t$  = peso total (kN);
- $P_s$  = peso de sólidos (kN).

Outra relação importante do solo é quando ele está na condição saturada (quando todos os vazios do solo estão preenchidos com água), modificando seu peso específico, assim tem-se o peso específico saturado, vide equação (9), DAS (2019), e para o solo submerso em água ele sofre a força de empuxo no sentido contrário ao da gravidade, resultando em um peso específico submerso, menor em relação aos demais, para a equação (10) utiliza-se o peso específico aparente do solo ou o peso específico saturado para o caso do solo está saturado.

$$\gamma_{sat} = \frac{P_{sat}}{V_t} \quad (9)$$

$$\gamma_{sub} = \gamma - \gamma_w \quad (10)$$

Em que:

- $\gamma$  = peso específico aparente do solo (kN/m<sup>3</sup>);
- $\gamma_{sat}$  = peso específico saturado (kN/m<sup>3</sup>);
- $\gamma_{sub}$  = peso específico submerso (kN/m<sup>3</sup>);
- $\gamma_w$  = peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>);
- $V_t$  = volume total (m<sup>3</sup>);
- $P_{sat}$  = peso do solo saturado (kN).

#### 2.4.4 Granulometria

A parcela sólida de um solo é composta por grãos, que a depender de suas dimensões o comportamento do solo muda, assim faz-se necessário estudar, classificar e entender o solo de acordo com a granulometria que ele apresenta. De acordo com a NBR 6502:2022 (Solo e rochas– Terminologia), o solo é nomeado de acordo com suas dimensões vide Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação do solo em relação as dimensões das partículas

NOME	DIMENSÃO (mm)
Argila	<0,002
Silte	0,002 – 0,06
Areia fina	0,06 – 0,20
Areia média	0,20 – 0,60
Areia grossa	0,60 – 2,0
Pedregulho fino	2 – 6
Pedregulho médio	6 – 20
Pedregulho grosso	20 - 60
Pedra de mão	60 - 200
Matacão	200 - 1000

Fonte: O autor (2023), adaptado de NBR 6502/2022.

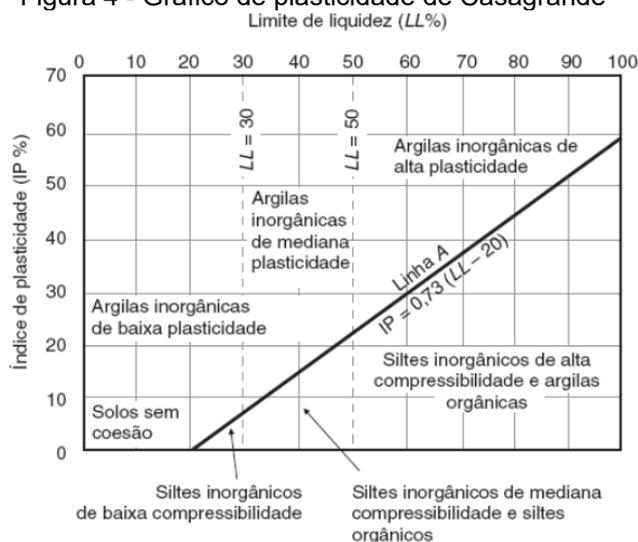
#### 2.4.5 Plasticidade e consistência

O solo torna-se mais complexo à medida que se soma suas características, apresentando propriedades que dependem de diversos fatores em conjunto, que é o caso das propriedades plásticas do solo e de sua consistência. CAPUTO (2015) explica que apenas a granulometria de um solo não é suficiente para caracterizar a textura de um solo fino, as propriedades plásticas do solo são influenciadas pelo teor de umidade do solo, da forma de suas partículas sólidas, da mineralogia de suas partículas e sua composição química. Assim, tem-se a plasticidade como a capacidade de um solo ser moldado na presença de umidade, sem ter uma variação de volume, sendo uma propriedade importante dos solos argilosos.

Para os solos finos, suas propriedades se modificam com a variação da umidade, apresentando-se no estado líquido, plástico, semissólido e sólido. Assim, um dos parâmetros mais importantes são seus limites de consistência, que determina a passagem do solo de um estado para outro. NBR 6502/2022 (Solo e rochas– Terminologia) e CAPUTO (2015), mostram que para a parcela do solo que possui dimensões inferiores a 0,42 mm, e com alta umidade, apresenta-se como um fluido (estado líquido), ao passo que sua umidade é retirada o solo tende a reduzir sua fluidez até uma certa umidade igual ao limite de liquidez (LL), que é quando o solo perde completamente a característica de líquido. Reduzindo continuamente a umidade deste solo, ele apresenta a capacidade de ser moldado facilmente sem perder a forma (estado plástico), até um certo valor de umidade igual ao limite de plasticidade (LP). Continuando a reduzir sua umidade, ele se desmancha ao ser trabalhado (estado semissólido), até alcançar o valor de umidade igual ao limite de contração (LC), entrando no estado sólido.

É possível entender a relação da tensão-deformação de um solo a partir da análise de sua plasticidade, e a influência da umidade nas alterações das características do solo. O índice de plasticidade (IP) fornece um critério de análise da plasticidade de um solo, quanto maior o IP, mais plástico é um solo, e ele pode ser definido pela diferença entre o LL e o LP. A Figura 4 mostra a relação do LL e o IP, que a depender das características, os solos finos podem ser divididos nos grupos descritos.

Figura 4 - Gráfico de plasticidade de Casagrande



Fonte: CAPUTO (2015).

#### 2.4.6 Permeabilidade

Os vazios de um solo são interconectados, gerando caminhos que permitem a água fluir de pontos de maior energia para menor energia, esta propriedade dos solos é denominado permeabilidade, DAS (2019). A permeabilidade é um parâmetro que é influenciado pela temperatura e pelo índice de vazios do solo, visto que, a viscosidade de um fluido, ou seja, sua capacidade de fluir, é proporcional a sua temperatura, quanto maior é a temperatura mais permeável é o solo. À medida que os vazios de um solo são maiores, mais espaço a água tem para percolar em seu interior, e maior será sua permeabilidade. Dito isto, solos que possuem grãos com grandes dimensões, como o caso das areias, possuem alta permeabilidade, o inverso é válido para o caso das argilas, com grãos menores e menos espaço para que a água percole, gerando uma menor permeabilidade.

O coeficiente de permeabilidade é o valor numérico que expressa o grau de permeabilidade de um solo, que pode ser determinado a partir da lei de Darcy. CAPUTO (2015) explica que, o coeficiente de permeabilidade é definido como a velocidade média que a água total (partículas sólidas e os vazios) escoar, através de uma seção transversal do solo, submetida a um gradiente hidráulico, equação (11). É possível obter a vazão de percolação (descarga total) de um solo, ao admitir que a área média de vazios do solo proporcional ao volume de vazios do solo, equação (12).

$$v = k.i \quad (11)$$

$$Q = A.k.i.t \quad (12)$$

Em que:

- $v$  = velocidade média aparente (cm/s);
- $k$  = coeficiente de permeabilidade (cm/s);
- $i$  = gradiente hidráulico (cm/cm);
- $Q$  = descarga total (cm<sup>3</sup>);
- $A$  = área (cm<sup>2</sup>);
- $t$  = tempo (s).

DAS (2019) aponta valores típicos do coeficiente de permeabilidade para alguns tipos de solo, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade para vários solos

Material	Coeficiente de permeabilidade (mm/s)
Solo grosso	$10 - 10^3$
Cascalho fino, grosso, e areia média	$10^{-2} - 10$
Areia fina, silte fofo	$10^{-4} - 10^{-2}$
Silte denso, silte argiloso	$10^{-5} - 10^{-4}$
Argila siltosa, argila	$10^{-8} - 10^{-5}$

Fonte: O autor (2023), adaptado de DAS (2019).

#### 2.4.7 Resistência ao cisalhamento dos solos

A capacidade de um solo em suportar cargas sem que haja uma instabilidade em sua estrutura depende da resistência ao cisalhamento do solo, uma massa de solo rompe quando as cargas superam essa resistência, CAPUTO (2015). A resistência de um solo depende de suas propriedades físicas, químicas e do meio o qual está submetido, podendo variar à medida que o solo sofre alterações.

Coulomb descreve na equação (13), que a resistência ao cisalhamento de um solo é composta por duas componentes: a coesão e o atrito entre as partículas, em relação a tensão normal e tensão cisalhante que o solo está submetido, DAS (2019).

A coesão do solo é o resultado da pressão capilar da água contida no solo, e da força eletroquímica de atração das partículas de argila, CAPUTO (2015), ou seja, solos com baixa quantidade de argila em sua composição tende a não possuir coesão. O atrito, ou atrito interno, entre as partículas é a parcela de resistência que o solo adquire no atrito de contato entre os grãos do solo, e do encaixe que os grãos têm entre si.

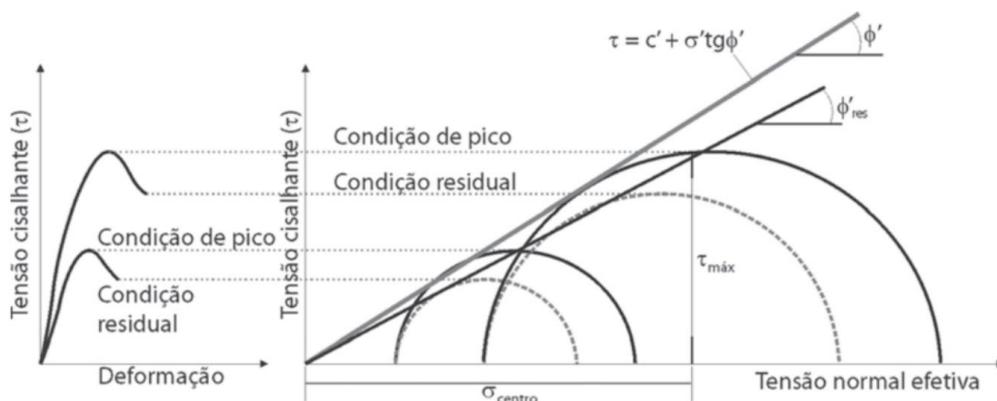
$$\tau_r = c + \sigma \cdot \text{tg}(\varphi) \quad (13)$$

Em que:

- $\tau_r$  = tensão cisalhante;
- $\sigma$  = tensão normal;
- $c$  = coesão do solo;
- $\varphi$  = ângulo de atrito do solo, em graus.

Para um solo saturado, a coesão e o ângulo de atrito do solo pode ser definido a partir do critério de ruptura de Morh-Coulomb. GERSCOVICH (2016) mostra na Figura 5 o traçado de uma envoltória de resistência, que a partir dos círculos de Mohr correspondentes à ruptura nas condições de pico e residual (obtidas experimentalmente a partir de ensaios como cisalhamento direto e triaxial), é possível traçar a reta que melhor descreve as tensões de ruptura.

Figura 5 - Determinação da envoltória de ruptura



Fonte: GERSCOVICH (2016).

Assim, é possível encontrar a coesão efetiva ( $c'$ ) como o intercepto e o ângulo de atrito efetivo ( $\varphi'$ ) sendo a inclinação da reta. Cabe ressaltar que a coesão e o

ângulo de atrito variam de acordo com as condições de drenagem do ensaio, a velocidade do ensaio para solos argilosos, a direção do ensaio, a variação das tensões e a compactação da amostra, GERSCOVICH (2016).

## 2.5 Análise de estabilidade de taludes

A análise da estabilidade de uma encosta consiste em verificar se a encosta está estável, quantificando por meio de uma grandeza, e considerando todos os fatores que influenciam sua estabilidade. O fator de segurança (FS) é uma grandeza associada a uma potencial superfície de ruptura, que quantifica a relação entre as resistências e esforços que envolvem o deslizamento.

O fator de segurança é baseado na relação entre as forças resistentes e forças cisalhantes, assim, a ruptura ocorre quando em uma certa superfície de cisalhamento, as forças cisalhantes igualam as forças resistentes correspondendo a um fator de segurança igual a 1, desencadeando o movimento de massa. Os valores do fator de segurança mínimo para uma encosta dependem do grau de risco associado a elas, que envolvem o potencial de dano à população. A norma NBR 11682/2009 (Estabilidade de encostas), recomenda valores mínimos para o FS, Tabela 5, a depender do nível de segurança necessário para o talude.

Tabela 5 - Fator de segurança mínimo recomendado, a depender do risco associado

FATOR DE SEGURANÇA MÍNIMO			
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

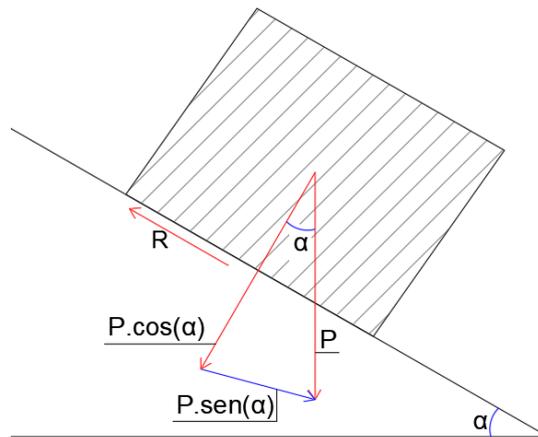
Fonte: Adaptado pelo autor (2023), de NBR 11682:2009.

O cálculo do fator de segurança pode ser feito através do método de equilíbrio limite, sendo o método mais utilizado e estabelecido na literatura. Esse é um método analítico, que para determinar o grau de estabilidade admite-se uma potencial superfície de ruptura que possui o FS constante ao longo da linha de ruptura.

Considera-se que a massa de solo acima dessa superfície é um corpo livre, que se rompe bruscamente sem deformar. E subdivide-se o solo em fatias, que são calculadas individualmente pelas equações da estática. Além disso, é admitido que o estado de ruptura do solo é definido pelo critério de Morh-Coulomb, ou seja, que a ruptura depende de uma combinação das tensões normal e cisalhante atuantes no solo.

Para deduzir o fator de segurança, é preciso iniciar o problema a partir do balanço de forças atuantes em um bloco deslizando em uma rampa:

Figura 6 - Decomposição da força peso (P) para um bloco deslizando



Fonte: O autor (2023).

Assim, temos a força perpendicular ( $P \cdot \cos \alpha$ ), e a força resistente ( $R$ ), que pode ser escrita em função da área da base do bloco ( $A$ ), e da resistência ao cisalhamento do contato entre o bloco e o plano inclinado ( $\tau$ ):

$$R = \tau \cdot A \quad (14)$$

Podemos relacionar a força resistente ao movimento do bloco com a lei de Coulomb, equação (13), admitindo que a coesão é nula, e levando em consideração que a tensão normal é a força dividida pela área, resultando na abaixo:

$$R = \frac{P \cdot \cos \alpha \cdot \text{tg} \varphi}{A} \quad (15)$$

A condição de equilíbrio limite é o momento quando a força resistente e a força que tende o bloco a movimentar são iguais, assim podemos igualar as duas, e descobrir que o ângulo  $\alpha$  é igual ao ângulo  $\varphi$ , que é o ângulo de atrito do solo. O fator

de segurança será dado como a relação entre as forças resistentes e as forças solicitantes:

$$FS = \frac{\text{Forças resistentes}}{\text{Forças solicitantes}} = \frac{P \cdot \cos\alpha \cdot \operatorname{tg}\varphi}{P \cdot \cos\alpha} = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (16)$$

Com essa relação, temos que para o momento que o ângulo  $\alpha$  for menor que o ângulo  $\varphi$ , o talude está em equilíbrio. E quando o valor do ângulo  $\alpha$  for maior que o ângulo  $\varphi$ , o talude rompeu e desencadeou o movimento de massa.

A partir da teoria do equilíbrio limite, diversos métodos foram desenvolvidos, com diferentes considerações adicionais. Entre esses métodos, ALMEIDA (2016) destaca uma divisão entre métodos não rigorosos, não satisfazem integralmente as premissas de equilíbrio estático global ou para as fatias individuais, e métodos rigorosos, que satisfazem integralmente as condições de equilíbrio estático, fornecendo teoricamente resultados mais confiáveis.

O primeiro método desenvolvido para analisar uma superfície circular foi o de Fellenius (1936) ou método ordinário, posteriormente Bishop (1955) desenvolveu seu método de cálculo chamado Bishop Simplificado, onde a diferença entre esses métodos é a direção da resultante das forças laterais das lamelas, MASSAD (2010). Ao longo do tempo, foram desenvolvidos mais métodos como os de Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967) e Janbu (1968). Chugh (1986) baseado nos métodos de Morgenstern-Price e Spencer, desenvolveu o equilíbrio-limite geral (GLE).

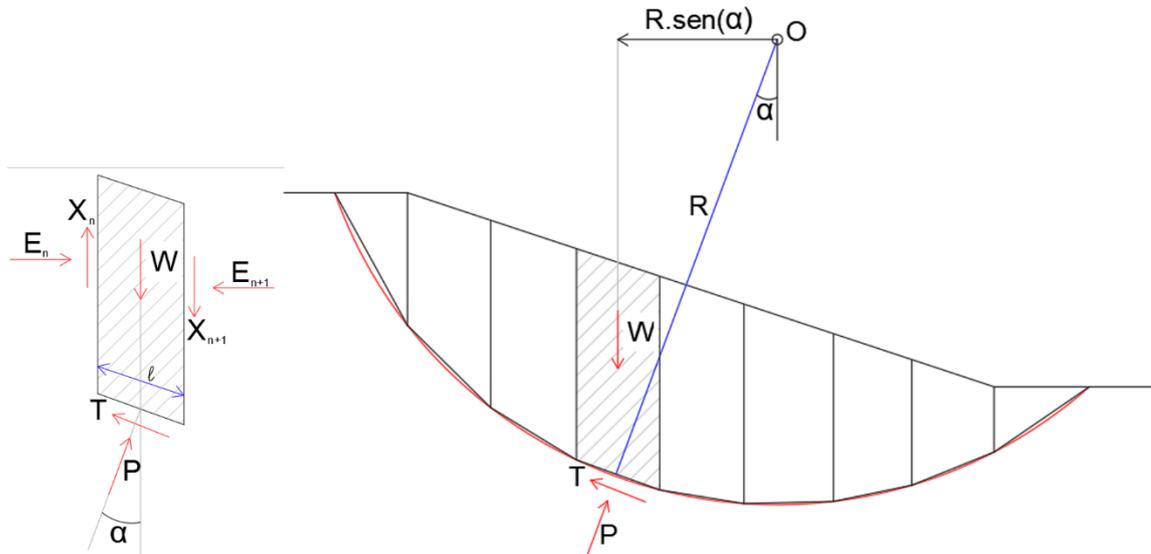
### 2.5.1 Método das Fatias

Desenvolvido por Fellenius, de acordo com FIORI (2015), o método das Fatias é o mais utilizado no estudo de estabilidade de taludes, por apresentar a possibilidade de analisar um solo heterogêneo, com qualquer geometria e em termos de tensão efetiva ou total, ou seja, a poropressão do solo pode ser incluída na análise.

Esse método consiste na subdivisão do talude em fatias verticais, onde é assumido que a base da fatia é linear. É feito o equilíbrio de forças de cada fatia, para a tensão normal a base da fatia sendo gerada pelo peso do solo na mesma fatia. E o

equilíbrio do conjunto é calculado pelas equações de momentos, tomando como referência o centro do círculo da superfície arbitrada, como pode ser visto a seguir:

Figura 7 - Equilíbrio de forças para o método das fatias



Fonte: O autor (2023).

Temos que, a relação entre as tensões no solo e as forças atuantes nas fatias pode ser dado pelas duas equações a seguir:

$$P = \sigma \cdot l \quad (17)$$

$$T = \tau_s \cdot l \quad (18)$$

Unindo essas duas equações com a equação do fator de segurança, e o critério de ruptura, chegamos à expressão da força tangencial:

$$FS = \frac{\tau_r}{\tau_s} = \frac{c + \sigma \cdot tg(\varphi)}{\frac{T}{l}} = \frac{l \cdot [c + \sigma \cdot tg(\varphi)]}{T}$$

$$T = \frac{l \cdot c + \sigma \cdot l \cdot tg(\varphi)}{FS} = \frac{l \cdot c + P \cdot tg(\varphi)}{FS} \quad (19)$$

Considerando o somatório dos momentos das forças entre fatias igual a zero, temos:

$$\begin{aligned}\sum T.R &= \sum W.R.sen\alpha \\ \sum T &= \sum W.sen\alpha\end{aligned}\quad (20)$$

Substituindo a equação (19) na equação (20), e considerando que o fator de segurança é constante ao longo da superfície, e o valor total do comprimento da superfície é igual a L:

$$\begin{aligned}\sum \frac{l.c + P.tg(\varphi)}{FS} &= \sum W.sen\alpha \\ \frac{L.c + tg(\varphi).\sum P}{FS} &= \sum W.sen\alpha \\ FS &= \frac{L.c + tg(\varphi).\sum P}{\sum W \times sen\alpha}\end{aligned}\quad (21)$$

Em que:

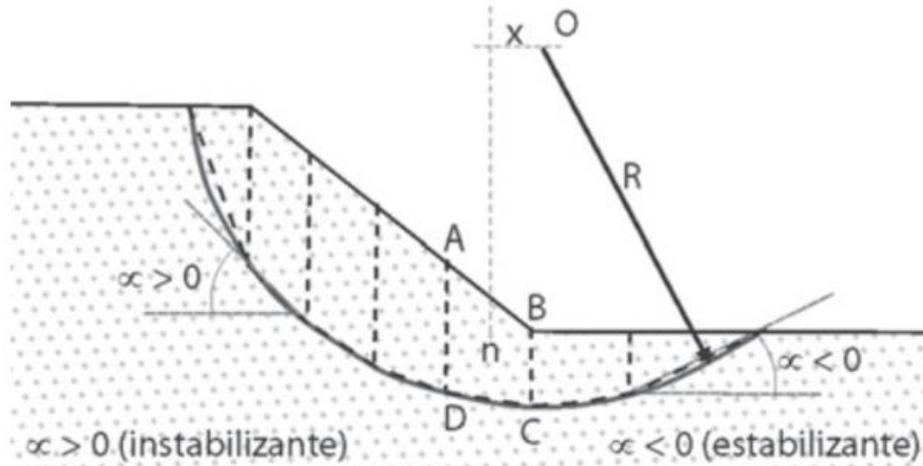
- L= comprimento total da superfície;
- P= componente do peso de cada fatia de solo normal a base;
- c= coesão do solo;
- $\varphi$ = ângulo de atrito do solo, em graus;
- W= peso de cada fatia de solo;
- $\alpha$ = ângulo entre o raio e o centro da base de cada fatia.

### 2.5.2 Método de Fellenius

Também conhecido como método ordinário ou sueco, o método de Fellenius é o mais simples entre os demais. As forças atuantes nas fatias tem seu equilíbrio calculado nas direções normal e tangencial a superfície de ruptura. A partir das hipóteses simplificadoras, este método possui as características de ser conservativo, fornecer valores não confiáveis para superfícies muito profundas, devido aos altos valores de poropressão, e nas regiões onde o valor de  $\alpha$  é negativo, ou seja, na região

estabilizante, Figura 8, a tensão efetiva se torna negativa, e é recomendado anular este termo.

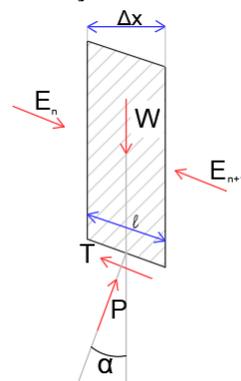
Figura 8 - Superfície do método das fatias, com a região estabilizante e instabilizante



Fonte: GERSCOVICH (2016).

A fórmula do fator de segurança em termos efetivos, equação (22), é obtida ao fazer o equilíbrio de forças nas fatias dado pela Figura 9, na direção normal a base da lamela. O método pode ser feito em termos de tensões efetivas, e ao desconsiderar a atuação das pressões neutras nas laterais das fatias, e assim com a força resultante das pressões neutras na base da lamela, pode levar a graves erros no resultado, MASSAD (2010).

Figura 9 - Equilíbrio de forças na fatia do método de Fellenius



Fonte: O autor (2023).

$$FS = \frac{\sum [c' \cdot l + (W \cdot \cos \alpha - u \cdot \Delta x \cdot \sec \alpha) \cdot \tan \phi']}{\sum (W \cdot \sin \alpha)} \quad (22)$$

Em que:

- $l$  = comprimento da fatia;

- $P$ = componente do peso de cada fatia de solo normal a base;
- $c'$ = coesão do solo em termos efetivos;
- $\varphi'$ = ângulo de atrito efetivo do solo, em graus;
- $W$ = peso de cada fatia de solo;
- $\alpha$ = ângulo entre o raio e o centro da base de cada fatia;
- $u$ = pressão neutra;
- $\Delta x$ = largura horizontal da fatia.

### 2.5.3 Método de Bishop Simplificado

Segundo GERSCOVICH (2016), no método de Bishop Simplificado (ou modificado) o equilíbrio de forças nas fatias é feito considerando as direções horizontais e verticais, resultando no valor da força normal. Propõe também, que para as forças entre lamelas, as parcelas das componentes tangenciais sejam desprezadas, não existindo forças cisalhantes entre as fatias.

O cálculo do FS para esse método inicia-se ao fazer o equilíbrio das forças entre as fatias, e fazendo as componentes tangenciais igual a zero, resultando na equação (23), em que  $U=u.l$  é a parcela da pressão neutra.

$$W = (P + u.l). \cos(\alpha) + T. \operatorname{sen}(\alpha) \quad (23)$$

A equação (19) em termos efetivos é igual a:

$$T = \frac{l.c' + P.tg(\varphi')}{FS} \quad (24)$$

Substituindo-a na equação (23), e fazendo  $\Delta x=l/\cos\alpha$  temos:

$$P = \frac{W - u.\Delta x - \frac{c'.l.\operatorname{sen}(\alpha)}{FS}}{\cos(\alpha) + \frac{tg(\varphi').\operatorname{sen}(\alpha)}{FS}} \quad (25)$$

Podemos encontrar o valor do FS, no processo iterativo, ao unir as equações (24) e (25) na equação (20):

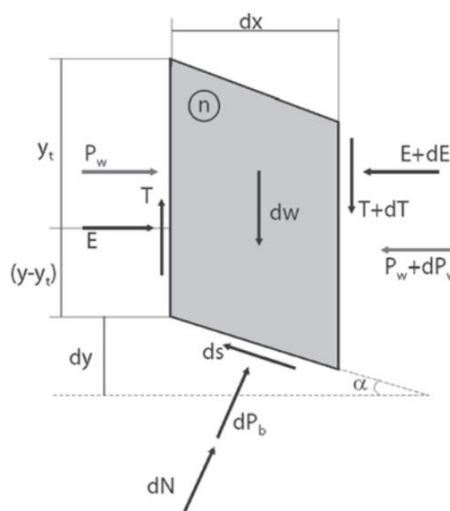
$$FS = \frac{\sum \left\{ l \cdot c' + \left[ \frac{W - u \cdot \Delta x - \frac{c' \cdot \Delta x \cdot \text{tg}(\alpha)}{FS}}{\cos(\alpha) + \frac{\text{tg}(\varphi') \cdot \text{sen}(\alpha)}{FS}} \right] \cdot \text{tg}(\varphi') \right\}}{\sum W \cdot \text{sen}(\alpha)}$$

$$FS = \frac{\sum \left\{ \frac{[\Delta x \cdot c' + (W - u \cdot \Delta x) \cdot \text{tg}(\varphi')]}{\cos(\alpha) + \frac{\text{tg}(\varphi') \cdot \text{sen}(\alpha)}{FS}} \right\}}{\sum W \cdot \text{sen}(\alpha)} \quad (26)$$

#### 2.5.4 Método de Morgenstern-Price

Satisfazendo as três equações de equilíbrio, o método de Morgenstern e Price (1965) é um dos mais completos, de acordo com GERSCOVICH (2016). Entretanto, devido à complexidade do método, geralmente é resolvido em computadores, não sendo possível a resolução manual. Ele resolve problemas para uma superfície qualquer, onde os esforços que atuam nas fatias são infinitesimais, Figura 10.

Figura 10 - Equilíbrio de forças na fatia do método de Morgenstern-Price



Fonte: GERSCOVICH (2016).

Diferente dos métodos mais rigorosos que assumem uma relação constante entre os esforços entre fatias, o método de Morgenstern-Price estabelecem que o ângulo da força resultante varia ao longo da superfície, de acordo com a equação (27):

$$T = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (27)$$

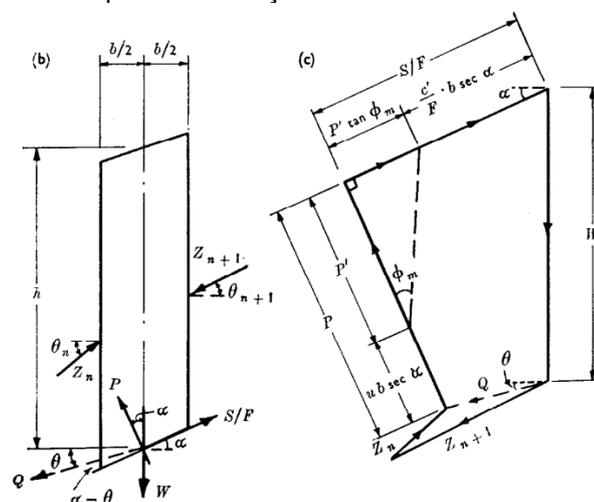
Em que:

- $T$ = esforço tangencial atuante entre fatias;
- $E$ = esforço normal atuante entre fatias;
- $\lambda$ = parâmetro escalar, obtido através da solução do FS;
- $f(x)$ = função arbitrária.

### 2.5.5 Método de Spencer

O método de Spencer (1967) é considerado rigoroso, o qual não despreza as forças entre fatias e satisfaz todas as equações de equilíbrio. Segundo LIMA (2002), o método considera que as forças são paralelas entre si, com uma força resultante para cada fatia que atua no centro da base de cada fatia, formando um ângulo constante com o eixo horizontal, solucionando problemas para superfícies de rupturas circular ou qualquer, vide Figura 11.

Figura 11 - Equilíbrio de forças na fatia do método de Spencer



Fonte: SPENCER (1967).

Ao realizar o equilíbrio de forças nas direções normais e paralelas a base da fatia, é possível obter o valor da resultante  $Q$ , em função do fator de segurança, e adotando um valor para  $\theta$ , como apresentado abaixo:

$$Q = \frac{\frac{c'.b.\sec(\alpha)}{FS} + \frac{\text{tg}(\varphi').[W.\cos(\alpha) - u.b.\sec(\alpha)]}{FS} - W.\text{sen}(\alpha)}{\cos(\alpha - \theta) \cdot \left[1 + \frac{\text{tg}(\varphi').\text{tg}(\alpha - \theta)}{FS}\right]} \quad (28)$$

SPENCER (1967) mostra que, ao assumir que a poropressão é constante em todo o talude, onde  $u=r_u.\gamma.h$ , e  $r_u$  é o coeficiente de poropressão,  $Q$  pode ser calculado por:

$$Q = \gamma.H.b. \left[ \frac{\frac{c'}{FS.\gamma.H} + \frac{h.\text{tg}(\varphi').[1 - 2.r_u + \cos(2.\alpha)]}{2.H.FS} - \frac{h.\text{sen}(2.\alpha)}{2.H}}{\cos(\alpha).\cos(\alpha - \theta) \cdot \left[1 + \frac{\text{tg}(\varphi').\text{tg}(\alpha - \theta)}{FS}\right]} \right] \quad (29)$$

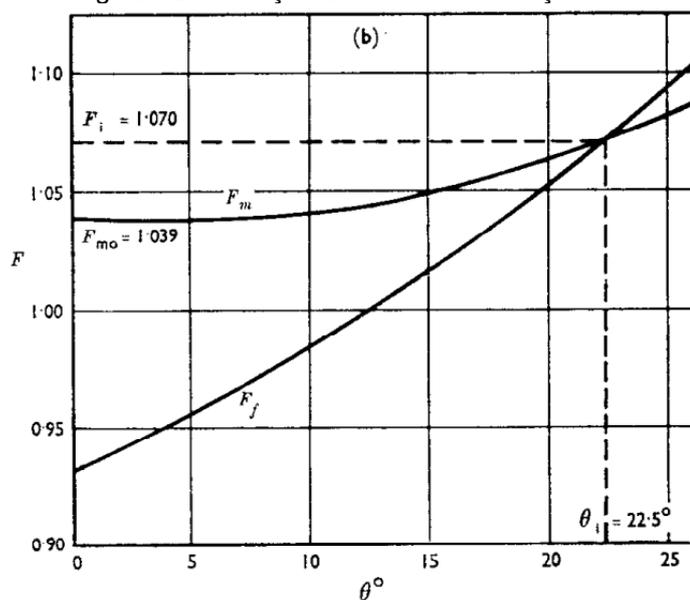
Para o equilíbrio de forças, ao adotar o valor de  $\theta$ , achamos a igualdade abaixo:

$$\sum Q.\cos(\theta) = \sum Q.\text{sen}(\theta) = \sum Q = 0 \quad (30)$$

E para o equilíbrio dos momentos, temos a relação:

$$\sum [Q.\cos(\alpha - \theta)] = 0 \quad (31)$$

O método consiste no cálculo de dois fatores de segurança, um por meio da equação (30) do equilíbrio de forças ( $F_f$ ), e o outro através da equação (31) do equilíbrio dos momentos ( $F_m$ ). O fator de segurança ( $FS$ ) é encontrado quando os valores de  $F_f$  e  $F_m$  são iguais, para diferentes valores de  $\theta$ , como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Variação do  $F_f$  e  $F_m$  em função do  $\theta$ 

Fonte: SPENCER (1967).

### 2.5.6 Método de Janbu Simplificado

O método de Janbu generalizado, é um método rigoroso que demanda um grande esforço computacional, em função disto, Janbu (1968) desenvolveu o método Janbu simplificado, possibilitando que o fator de segurança seja obtido através de cálculos mais simples. Segundo SILVA (2011), este método utiliza apenas o equilíbrio entre forças, ignorando as forças tangenciais entre fatias, e introduz um fator de correção  $f_0$ , que será multiplicado pelo fator de segurança resultante da equação do equilíbrio de forças com relação a direção horizontal, como compensação pelas forças ignoradas no método.

Esse método possibilita a solução de problemas com uma superfície de ruptura qualquer, entretanto, GERSCOVICH (2016) afirma que o método não fornece bons resultados para superfícies em forma de cunha. O equilíbrio de forças paralelas a base da fatia, vide Figura 7, é dado por:

$$T + E_{n+1} \cdot \cos(\alpha) - E_n \cdot \cos(\alpha) = W \cdot \sin(\alpha) \quad (32)$$

Ao substituir a equação (24) na equação (32), e reorganizando os termos, chegamos à relação:

$$\sum E_{n+1} - E_n = \sum W \cdot \operatorname{tg}(\alpha) - \frac{[l \cdot c' + P \cdot \operatorname{tg}(\varphi')]}{\cos(\alpha) \cdot FS} = 0 \quad (33)$$

Assim, o fator de segurança multiplicado pelo fator de correção, pode ser encontrado ao substituir a equação (25) na equação (33):

$$FS = f_0 \cdot \frac{\sum \left\{ \frac{[\Delta x \cdot c' + (W - u \cdot \Delta x) \cdot \operatorname{tg}(\varphi')]}{\cos(\alpha) \cdot \left[ \cos(\alpha) + \frac{\operatorname{tg}(\varphi') \cdot \operatorname{sen}(\alpha)}{FS} \right]} \right\}}{\sum W \cdot \operatorname{tg}(\alpha)} \quad (34)$$

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

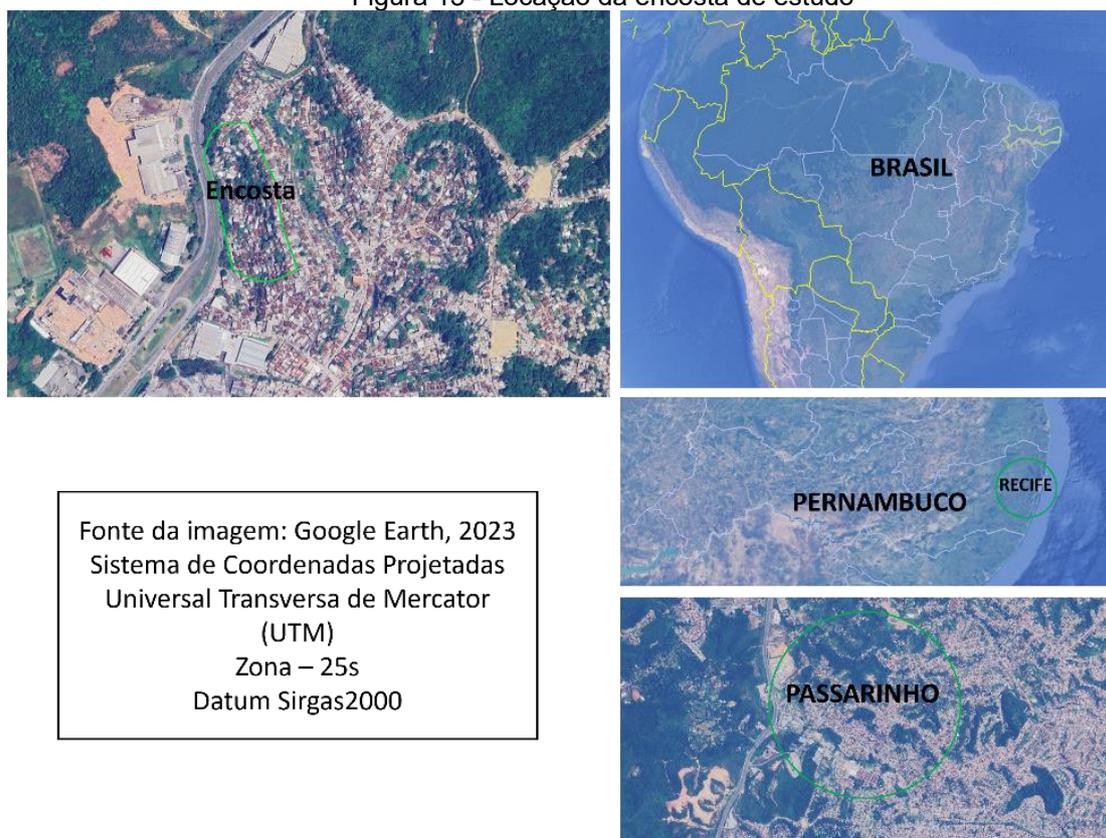
No decorrer deste capítulo, será apresentado as metodologias utilizadas no estudo da topografia, investigação geotécnica de campo e de laboratório e análise de estabilidade da encosta, bem como os materiais utilizados para este fim.

#### **3.1 Área de estudo**

No estudo, foi utilizado uma encosta localizada no bairro de Passarinho da cidade do Recife, especificamente próximo à Rua Alto da Telha. Esta é uma região que possui encostas íngremes, que faz parte da pesquisas do Projeto Morro de Vontade, coordenado pela professora Sávia Gavazza, da Universidade Federal de Pernambuco, em parceria com o Governo do Estado de Pernambuco. O projeto tem como objetivo realizar estudos sobre a região de morros do Recife, pesquisando metodologias de redução da infiltração da água da chuva, e sistemas de alerta de deslizamentos de terra.

Á área da geotecnia do projeto atuou nas análises das características do solo, infiltração da água e a estabilidade da encosta oeste, a região de estudo pode ser vista na Figura 13. A região de estudo apresentou uma grande densidade populacional, com a presença de casas ocupadas ao longo dos taludes analisados no trabalho. A rede de drenagem local observada está em estado precário, em que grande parte leva diretamente a encosta. A vegetação local é abundante, com grande variedade de espécies, com a presença de grandes arvores em alguns pontos do talude.

Figura 13 - Localização da encosta de estudo



Fonte: O autor, adaptado de Google Earth Pro (2023).

### 3.2 Levantamentos e ensaios de campo

O primeiro passo no estudo da estabilidade da encosta, foi a realização do levantamento topográfico, para obter os dados do relevo da região. Em seguida, foi executado o programa de investigação do solo, com ensaios de campo e coleta de amostras deformadas e indeformadas do solo.

#### 3.2.1 Levantamento topográfico

A equipe de cartografia do Projeto Morro de Vontade realizou o levantamento topográfico, com o objetivo de representar as características do relevo da região, através do método de aerofotogrametria. A ferramenta utilizada foi um veículo aéreo

não tripulado (drone), com o auxílio de um receptor GNSS, onde o modelo do drone foi o DJI Phantom 4 Pro, e o modelo do receptor GNSS foi o Polaris S100. A partir do geoprocessamento, foi possível obter o Modelo Digital do Terreno (MDT).

Figura 14 - Posicionamento dos receptores GNSS, para o levantamento topográfico



Fonte: Equipe de Cartografia Projeto Morro de Vontade (2023).

### 3.2.2 Sondagem de simples reconhecimento

O programa de investigação geotécnica de campo do Projeto Morro de Vontade, contou com a execução de 06 (seis) furos de investigação de simples reconhecimento, utilizando a ferramenta Standart Penetration Test (SPT), realizados pela Engenharia e Consultoria de Solos e Fundações – ENSOLO. Com a necessidade de abranger grande parte da encosta, os furos de sondagem foram realizados em dois seguimentos: o eixo A e o eixo B, cada um com 03 (três) furos, localizados no topo, meio e base da encosta, como pode ser visto abaixo:

Figura 15 - Localização dos furos de sondagem SPT do Projeto Morro de Vontade



Fonte: O autor (2023).

O equipamento SPT, cumpriu a função de retirar as amostras deformadas do solo até grandes profundidades, e obter a resistência à penetração do amostrador padrão ( $N_{spt}$ ), realizando conforme a norma NBR-6484/2020 (Solo–Sondagem de simples reconhecimento com SPT–Método de ensaio).

Figura 16 - Locação do SPT-A3, e execução dos SPT-A1 e SPT-A2



Fonte: O autor (2023), adaptado do Projeto Morro de Vontade.

Figura 17 - Execução dos furos SPT eixo B do Projeto Morro de Vontade.



Fonte: O autor (2023), adaptado do Projeto Morro de Vontade

### 3.2.3 Coleta das amostras

As coletas de amostras de solo, foram realizadas de 03 (três) formas distintas, uma delas é a obtenção de amostras deformadas pela recuperação do testemunho do bico do SPT, que foi possível obter o solo em diversas profundidades, Figura 18. A coleta de solo deformado, armazenados em sacos plásticos cobertos por sacos de rafia, com o auxílio de pá e picareta, Figura 18. A realização de poços de investigação, seguindo a NBR-9604/2016 (Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento), Figura 19.

Figura 18 - Exemplo da coleta das amostras deformadas do Projeto Morro de Vontade



Fonte: O autor (2023).

O processo de retirada das amostras indeformadas foi a partir da moldagem de bloco, onde realizou-se 4 moldagens: bloco A1, bloco A2, bloco B1 e bloco B2, com dimensões médias de 40 centímetros de base quadrada e 60 centímetros de altura, localizados próximos das sondagens com seus respectivos nomes, vide Figura 19. Os blocos foram esculpidos após o poço alcançar uma profundidade de 1,20 metros, possuindo as dimensões de 1,50x1,50 metros.

Figura 19 - Execução dos poços de investigação e retirada dos blocos do Projeto Morro de Vontade



Fonte: O autor (2023).

Para a localização dos SPT-A3 e SPT-B3, não foram executados poços de inspeção e coleta de blocos, devido à falta de recursos financeiros do projeto. A coleta das amostras indeformadas para estes pontos foram realizadas através da moldagem de caixas para o ensaio de cisalhamento direto, de poços superficiais, Figura 20.

Figura 20 - Coleta das amostras indeformadas do Projeto Morro de Vontade, ponto B3



Fonte: O autor (2023).

### 3.3 Ensaios de laboratório

Na etapa dos ensaios de laboratório, foram executados ensaios de granulometria e Limites de Atterberg, para a caracterização física do solo, utilizando as amostras deformadas coletadas de campo. E a realização de ensaios de

cisalhamento direto, a partir da coleta de amostras indeformadas, para a determinação da resistência ao cisalhamento do solo.

### 3.3.1 Caracterização física do solo

A execução dos ensaios de caracterização, seguiram de acordo com as normas técnicas a seguir:

- NBR-6457/2016 (Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização);
- NBR-13602/2020 (Solo — Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo — Ensaio de dispersão SCS);
- NBR-6458/2016 (Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água);
- NBR-6459/2016 (Solo — Determinação do limite de liquidez);
- NBR-7180/2016 (Solo — Determinação do limite de plasticidade).

#### 3.3.1.1 Umidade

A determinação da umidade do solo, para todas as amostras em laboratório, seguiram a utilização de uma estufa, Figura 21. Utilizou-se 03 (três) capsulas para cada ensaio, que foram pesadas e posto dentro uma fração de solo de mesma origem, que é avaliado o peso do solo na umidade natural. As capsulas com o solo foram inseridas na estufa por 24 horas, até toda a água ser expulsa de seus vazios. A umidade do solo é obtida, ao determinar o peso da água que foi expulsa na secagem, em relação ao peso da amostra seca.

Figura 21 - Pesagem da capsula mais solo, para o ensaio de umidade em estufa



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

### 3.3.1.2 Densidade

A densidade real do solo para as amostras foram feitas através do picnômetro. O picnômetro foi pesado e colocado uma amostra de 10 gramas de solo seco, e coberto com água destilada. Uma bomba de vacuo foi utilizada para retirar o ar dos vazios do solo, e assim os vazios do solo possuindo apenas água. Todas as etapas foram pesadas em uma balança de precisão, como ilustrado na Figura 22, e tirado a densidade do solo com a relação entre o peso do picnômetro vazio, peso do picnômetro com o solo, peso do picnômetro com o solo e a água, e o peso do picnômetro somente com água.

Figura 22 - Pesagem do picnômetro mais solo e água, para determinar a densidade do solo



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

### 3.3.1.3 Análise granulométrica

A análise da granulometria foi realizada para cada camada de solo, executadas em duas etapas: peneiramento e sedimentação. O peneiramento seguiu conforme a NBR-7181/2016, para a parcela fina e grossa do solo. E na sedimentação, foram realizados dois procedimentos: sedimentação com defloculante e agitação mecânica, baseado na NBR-7181/2016, e sedimentação sem defloculante, de acordo com a NBR-13602/2020.

Figura 23 - Ensaio de peneiramento e ensaio de sedimentação



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

### 3.3.1.4 Limites de consistência

Os limites de consistência do solo foram obtidos para todas as camadas, através da coleta de amostras deformadas dos ensaios SPT. Assim, foi calculado o índice de plasticidade, através da equação que relaciona os termos, para que seja feito a classificação do solo quanto a plasticidade.

O limite de liquidez seguiu as metodologias da norma, através do aparelho de Casagrande, como é ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Determinação do limite de liquidez (LL)



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

E para o limite de plasticidade, foi utilizado a placa de vidro com superfície esmerilhada, permitindo a constante redução da umidade no processo de rolar a porção de solo, até alcançar as recomendações da norma.

Figura 25 - Determinação do limite de plasticidade (LP)



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

### 3.3.2 Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento dos solos foram determinadas a partir do ensaio de cisalhamento direto, sendo o procedimento mais antigo para tal, e baseado no critério de Morh-Coulomb. Entretanto, este ensaio não consegue medir parâmetros de deformação do solo e poropressão.

O ensaio consiste na moldagem de blocos, que são colocados na ferramenta ilustrada na Figura 26, para que uma tensão normal seja aplicada constantemente no solo, ao passo que é aplicado uma tensão cisalhante em um plano de ruptura pré-estabelecido. Os valores das tensões cisalhantes são observados, criando a relação entre as tensões normais e as tensões cisalhantes, incluindo as tensões de ruptura do solo. Este ensaio permite que sejam determinados a coesão e o ângulo de atrito do solo.

Figura 26 - Ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023)

Ao realizar o ensaio, as amostras indeformadas apresentaram a umidade preservada, para que os parâmetros de resistências sejam equivalentes ao seu estado natural. Entretanto, para a mesma região em dias de chuva, a infiltração da água pode causar a saturação do solo, reduzindo sua resistência. Assim, para que a simulação considere o solo em dias de chuva (saturado), foram realizados ensaios com amostras saturadas, submersas em água destilada por 24 ou 48 horas, a depender quantidade de argila encontrada no solo.

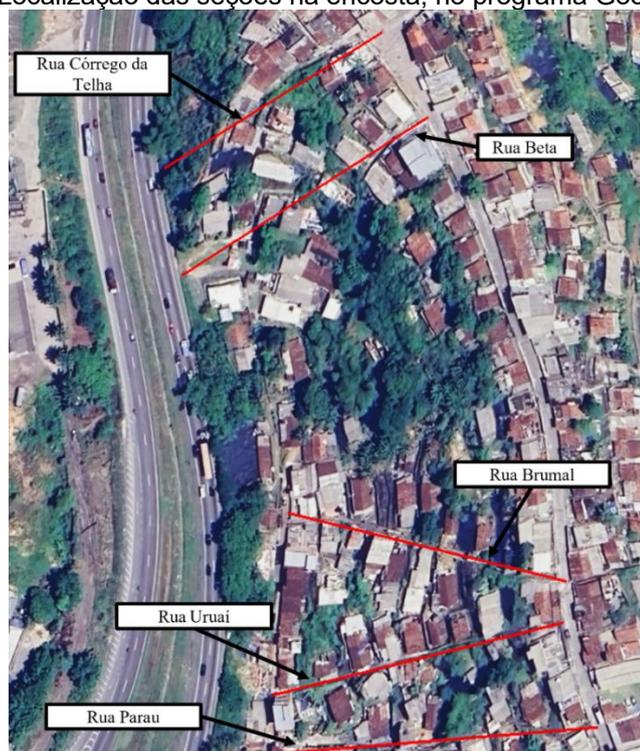
### 3.4 Estabilidade da encosta

O cálculo da estabilidade da encosta foi realizada através do programa computacional Slide 2, da empresa Rocsiencie. Este programa tem a função de fornecer as equações para o cálculo da estabilidade de taludes em duas dimensões, através do método do equilíbrio limite. Para o estudo, foram utilizados os métodos de Bishop simplificado, Janbu corrigido, Spencer e GLE/Morgenstern-Price.

O programa Slide2 fornece uma interface simples para a criação e importação de geometrias, além de ser capaz de analisar a infiltração da água e seu escoamento no solo através do método de Elementos Finitos, incluir uma análise probabilística gerando diversos cenários hipotéticos, e a possibilidade de incluir solos heterogêneos e em superfícies de rupturas complexas. Para os materiais, foi utilizado o modelo de Mohr-Coulomb.

A análise de estabilidade foi realizada para 05 (cinco) seções, que acompanham ruas ou escadarias locais, nomeadas conforme a respectiva rua em sua proximidade, distribuídas de acordo com a necessidade de representar toda a extensão da encosta, Figura 27.

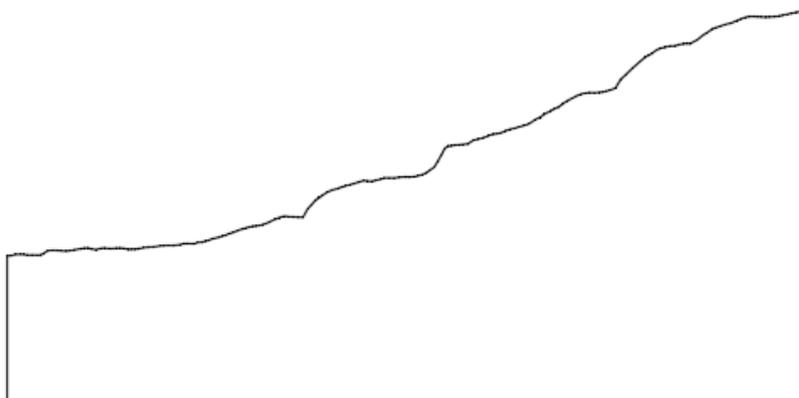
Figura 27 - Localização das seções na encosta, no programa Google Earth Pro



Fonte: O autor (2023).

O grupo de topografia forneceu a nuvem de pontos georreferenciada, resultado do MDT da encosta, para todas as seções solicitadas pelo projeto. A geometria das seções foram criadas a partir da nuvem de pontos, com o auxílio do programa computacional Civil 3D, Figura 28, da empresa Autodesk. Compatibilizando os dados dos perfis do solo, retirados dos ensaios de campo e laboratório, foram adicionados as seções no programa Slide2. O programa fornece uma ferramenta para integrar o perfil do solo com suas camadas a geometria da seção, chamada de “Borehole Editor”. Esta ferramenta fornece métodos de interpolação entre as camadas, e assim foi utilizado para o estudo o método de interpolação linear.

Figura 28 - Geometria de uma seção, no programa Civil 3D



Fonte: O autor (2023).

As análises de estabilidade foram divididas em 03 (três) cenários: solo em seu estado natural, solo saturado e solo saturado ao longo do tempo. Devido à falta de dados da permeabilidade do solo, as simulações para a saturação ao longo do tempo foram realizadas da seguinte forma: inicialmente todo solo do talude está em seu estado natural, cada análise posterior o solo será saturado camada por camada, iniciando a partir da boca do furo de sondagem SPT, simulando a saturação proveniente da chuva ao longo do tempo de incidência no solo. Para o cenário do solo em seu estado natural, os dados de entrada no programa Slide2 foram equivalentes aos parâmetros obtidos dos ensaios de solo em seu estado natural, e em contrapartida, para o cenário saturado foram utilizados os ensaios com o solo saturado.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo visa apresentar os resultados obtidos ao longo do estudo, como o exemplo das sondagens SPT realizadas na encosta, os ensaios de caracterização do solo realizados no laboratório e as análises de estabilidade da encosta, objeto de estudo do projeto Morro de Vontade, localizada no Alto da telha, bairro de Passarinho da cidade do Recife, Pernambuco.

### 4.1 Sondagem à percussão

A investigação de campo através do ensaio de sondagem de simples reconhecimento, precedeu-se em seis pontos de sondagem ao longo da encosta: topo da encosta, na meia encosta e base da encosta para dois eixos escolhidos, um em cada ponta da encosta, nomeados de SPT-A1, SPT-A2, SPT-A3, SPT-B1, SPT-B2 e SPT-B3, assim obtendo o eixo A e eixo B, Figura 27. As sondagens foram realizadas através do Projeto Morro de Vontade, com a autorização dos moradores locais, no entorno de suas casas.

O perfil do solo no topo da encosta de eixo A (SPT-A1), Figura 68, é constituído de sete camadas de solo, sua cota da boca de furo é de 77 m. A primeira camada, com 1 m de espessura, é composta por um aterro de areia média, com matéria orgânica, com poucos restos de construção, cinza escuro. A segunda camada, que possui a espessura de 1 m, é uma areia fina, fofa, vermelho escuro. A terceira camada, com 3 m de espessura, é composta por areia média, de pouco compacta até medianamente compacta, vermelho escuro. A quarta camada, com 1 m de espessura, é uma areia fina, medianamente compacta, creme claro. A quinta camada, possui 1 m de espessura, sendo uma areia média, compacta, roxo. A sexta camada possui 2 m de espessura, composta por uma argila siltosa, de baixa plasticidade, e consistência dura, roxo claro. A sétima camada, com 1 m de espessura, é uma areia fina, muito compacta, roxo. A oitava camada, com 0,3m de espessura, consiste em uma argila siltosa, de baixa plasticidade, e consistência dura, roxo claro. O  $N_{spt}$  cresce de acordo

com a profundidade, com valores de 1 golpe/0,30 m no primeiro metro de profundidade, 7 golpes/0,30 m para 3 m de profundidade, e 48 golpes/0,30 m para 7 metros de profundidade. Não foi encontrado nível de água na sondagem.

O perfil do solo no meio da encosta do eixo A (SPT-A2), Figura 69, possui sete camadas, e sua cota da boca de furo é de 61 m. A primeira camada, com 2 m de espessura, é uma areia fina, pouco compacta, de cor creme. A segunda camada, com 1,10 m de espessura, é uma areia fina, medianamente compacta, de coloração variegada (pardo). A terceira camada, com 2,90 m de espessura, é uma areia fina, de pouco compacta a medianamente compacta, cor creme. A quarta camada, possui 1 m de espessura, consiste em uma argila siltosa, de baixa plasticidade, e de consistência muito rija, e coloração variegada (creme). A quinta camada, com 1 m de espessura, é uma areia fina, pouco compacta, de cor creme. A sexta camada, possui 3 m de espessura, e é composta por uma areia média, de pouco compacta a medianamente compacta, de cor creme com veios creme claro. A sétima camada, com 4,45 m de espessura, é uma areia fina, medianamente compacta, de coloração variegada (creme). O Nspt varia ao longo da profundidade, com o valor mínimo de 5 golpes/0,30 m aos 3,50 m de profundidade, e valor máximo de 21 golpes/0,30 m aos 6 m de profundidade. Não foi encontrado nível de água na sondagem.

O perfil do solo na base da encosta do eixo A (SPT-A3), Figura 70, é constituído de oito camadas, a cota da sua boca de furo é de 45 m. A primeira camada, possui uma espessura de 0,40 m, é um aterro de areia média, com presença de restos de construção e de matéria orgânica, de cor cinza escuro. A segunda camada, com uma espessura de 2,60 m, é uma areia média, de pouco compacta a fofa, de coloração pardo. A terceira camada, com 0,55 m de espessura, é uma areia fina, siltosa, pouco compacta, com cor rósea. A quarta camada, possui 3,45 m de espessura, composta por uma areia fina, variando de pouco compacta a medianamente compacta, de cor creme. A quinta camada, é composta por uma areia média, com 1 m de espessura, medianamente compacta, de cor creme. A sexta camada, com 1,05 m de espessura, é uma areia fina, compacta, de cor pardo. A sétima camada, é uma areia média, com 5,85 m de espessura, que varia de medianamente compacta a compacta, de cor vermelha com veios creme. A oitava camada, possui uma espessura de 0,45 m, e é composta por uma areia fina, compacta, de cor rósea com veios creme. O Nspt da sondagem varia de acordo com a profundidade, com valores menores a baixa profundidade, e aumentando a medida que se aprofunda, com o valor de mínimo de

1 golpe/0,30 m a 2 m de profundidade, e chegando ao máximo de 31 golpes/0,30 m aos 10 m de profundidade, porém reduzindo a 13 golpes/0,30 m a 13 m de profundidade. Não foi observado a presença do nível de água na sondagem.

O perfil do solo no topo da encosta do eixo B (SPT-B1), Figura 71, possui nove camadas de solo, com a cota de sua boca de furo com 65 m. A primeira camada, com 1 m de espessura, é um aterro de areia média, com matéria orgânica, e coloração cinza escuro. A sua segunda camada, é uma areia fina, com 1 m de espessura, medianamente compacta, marrom. A terceira camada, é uma areia fina, com 2,90 m de espessura, medianamente compacta, e coloração variegada (roxo). A quarta camada, possui 1,05 m de espessura, é uma argila siltosa, de baixa plasticidade e consistência dura, de coloração creme escuro. A quinta camada, é uma areia fina, de 2,05 m de espessura, medianamente compacta, de cor creme escuro. A sexta camada, com 1 m de espessura, é uma areia fina, medianamente compacta, de cor roxa. A sétima camada, é uma areia fina, medianamente compacta, de coloração creme. A oitava camada, é composta por uma areia média, com 5,05 m de espessura, medianamente compacta, de coloração creme com veios róseos. A nona camada, possui 0,45 m de espessura, é composta por uma argila siltosa, de baixa plasticidade e consistência muito rija, e coloração cinza claro. O Nspt da sondagem aumenta nas camadas mais superficiais, atingindo um máximo de 45 golpes/0,30 m em 5 m de profundidade, e reduz para camadas mais profundas para depois voltar a aumentar, como vemos aos 8 m um Nspt de 9 golpes/0,30 m, e Nspt de 22 golpes/0,30 m em 15,50 m de profundidade. Não foi encontrado nível de água na sondagem.

O perfil do solo do meio da encosta do eixo B (SPT-B2), Figura 72, contém nove camadas de solo, e cota da boca de furo é de 50 m. Sua primeira camada, é uma areia fina, com espessura de 1 m, medianamente compacta, de cor creme. A segunda camada, com 1 m de espessura, é uma argila siltosa, com baixa plasticidade e de consistência rija, de coloração vermelha. A terceira camada, é uma areia fina, com 2,20 m de espessura, de medianamente compacta a compacta a medianamente compacta, de cor vermelha com veios de cor creme. A quarta camada, possui uma espessura de 4,35 m, composta por uma areia média, de medianamente compacta a compacta a medianamente compacta, de coloração creme a creme com veios cinza claro. A quinta camada, é uma areia fina, com espessura de 0,70 m, medianamente compacta, com cor creme com veios vermelhos. Sua sexta camada, possui 1 m de espessura, composta por uma areia fina, medianamente compacta, de cor vermelha

com veios cinza claro. A sétima camada, é uma areia fina com espessura de 2,95 m, medianamente compacta, com cor rósea a rósea com veios creme. A oitava camada, é um silte argiloso com pouca matéria orgânica, de baixa plasticidade com consistência muito rija, com cor cinza a cinza escuro. A nona camada, é uma areia média, medianamente compacta a compacta, de cor pardo. O Nspt da sondagem varia em toda extensão da sondagem, com o valor mínimo de 10 golpes/0,30 m aos 3,50 m, e valor máximo de 23 golpes/0,30 m aos 15,40 m de profundidade. Não foi encontrado nível de água na sondagem.

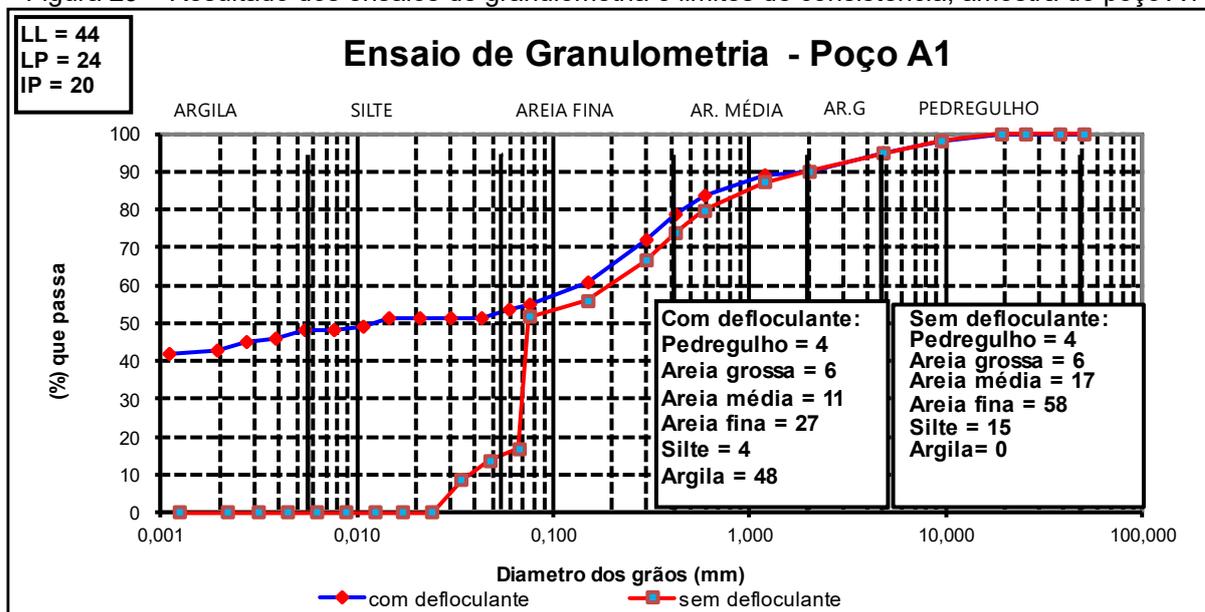
O perfil do solo da base da encosta de eixo B (SPT-B3), Figura 73, com cota da sua boca de furo em 44 m, e onze camadas de solo. Sua primeira camada, com 0,30 m de espessura, é um aterro de areia fina, com muito pouco restos de construção, de cor marrom. A segunda camada, possui 1,45 m de espessura, é constituído de uma areia fina, de pouco compacta a medianamente compacta, de coloração variegada (vermelho escuro). A terceira camada, é uma areia fina, com 1 m de espessura, medianamente compacta, de cor variegada (creme). A quarta camada, é uma areia média, com 0,30 m de espessura, pouco compacta, de cor creme. A quinta camada, é constituída de uma argila siltosa, com 0,70 m de espessura, de baixa plasticidade e consistência média, e cor variegada (vermelho escuro). A sexta camada, com 2,10 m de espessura, é uma areia fina, siltosa, argilosa, de compacta a medianamente compacta, vermelho com veios cinza claro. A sétima camada, possui 2,10 m de espessura, constituída de uma areia média, medianamente compacta, de cor variegada (creme) a creme. A oitava camada, é um silte argiloso, com 1,05 m de espessura, de baixa plasticidade e consistência rija, de coloração rósea. A nona camada, com 4 m de espessura, é uma areia média, de medianamente compacta a compacta a medianamente compacta, de cor variegada (rósea). A décima camada, é uma areia média, com 1 m de espessura, medianamente compacta, vermelha. A décima primeira camada, com 1,10 m de espessura, é composta por uma areia média, de muito compacta a medianamente compacta, de cor creme. O valor do Nspt varia em toda a extensão da sondagem, crescendo em alguns pontos em maiores profundidades, com valores de 18 golpes/0,30 m em 1 m de profundidade, 5 golpes/0,30 m aos 3 m de profundidade, 50 golpes/0,27 m aos 14 m de profundidade e 11 golpes/0,30 m com 15 m de profundidade. Não foi encontrado o nível de água na sondagem.

## 4.2 Ensaios de caracterização do solo

Os ensaios de caracterização do solo foram realizados nos primeiros metros de profundidade, com amostras recolhidas em campo através da sondagem SPT, e nas amostras dos poços de inspeção, com e sem defloculante na sedimentação. A classificação do solo, seguiu conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), que utiliza as informações das porcentagens de quantidade de cada tipo de solo na amostra, e os limites de consistência, e a ASTM para a granulometria.

Para os ensaios da localização A1, a amostra do poço foi retirada a uma média de 1,20 metros de profundidade. Para o ensaio com o defloculante, foi apresentado um valor maior de argila com 48%, seguido por 44% de areia e 4% de silte e pedregulho, classificado assim como solo tipo CL. Sem o defloculante, os resultados mostraram 81% de areia, 15% de silte e 4% de pedregulho sem apresentar a argila, o solo foi classificado como SC, como pode ser visto na Figura 29.

Figura 29 – Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, amostra do poço A1



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023)

A execução dos ensaios de caracterização da sondagem SPT-A1, seguiram o passo a passo conforme o ensaio do poço A1, e seus resultados são apresentados na Tabela 6.

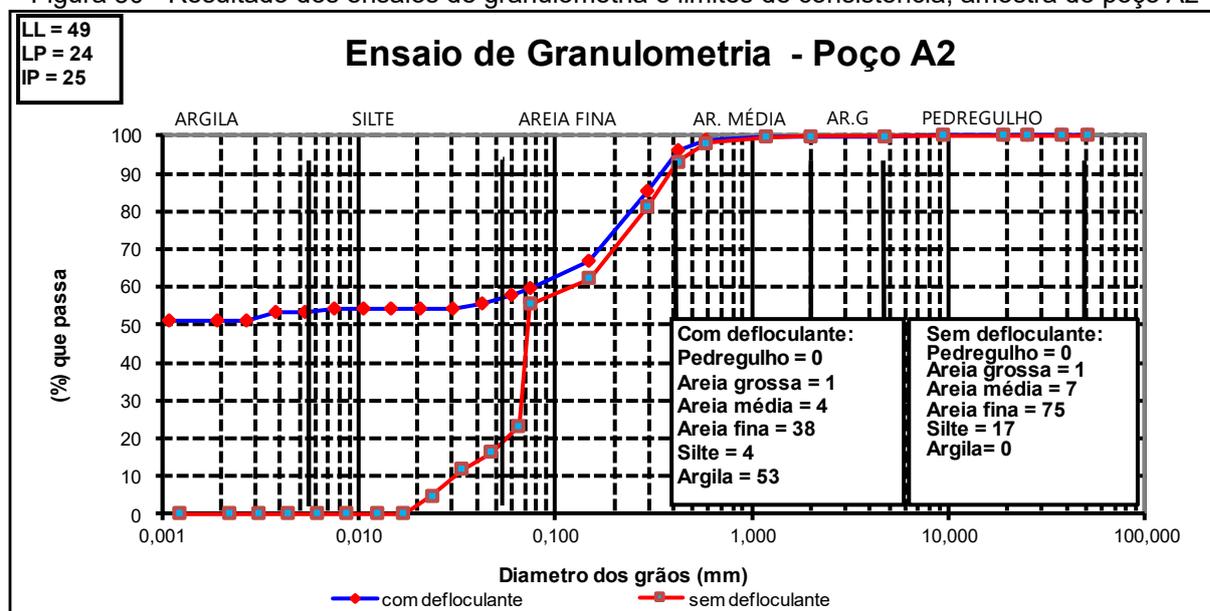
Tabela 6 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-A1

Prof. (m)	Defloc.	Composição granulométrica (%)						Limites de Atterberg (%)			Classific. SUCS
		Pedreg.	Areia			Silte	Argila	LL	LP	IP	
			Areia grossa	Areia média	Areia fina						
0,65-1	Sim	0,6	2,4	10	28	6	53	42	22	20	CL
	Não	0,6	2,4	15	66	16	0				SC
1,45-2	Sim	0,2	0,8	19	38	3	39	38	19	19	SC
	Não	0,2	0,8	24	61	14	0				SC
2,45-3	Sim	0,6	3,1	33,3	32	1	30	38	20	18	SC
	Não	0,6	3,1	39,3	48	9	0				SC
3,45-3,6	Sim	1	2	28	37	2	30	39	19	20	SC
	Não	1	2	37	51	9	0				SC

Fonte: O autor (2023).

As amostras do poço A2 foram retiradas a uma profundidade de 1,20 metros. Com o defloculante, foi apresentado a maior fração sendo argila com 53%, seguido por 43% de areia, 4% de silte e 0% de pedregulho, classificado como solo tipo CL. Sem o defloculante, os resultados mostraram 83% de areia, seguido de 17% de silte e 0% de argila e pedregulho, classificado como solo tipo SC, como pode ser visto abaixo:

Figura 30 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, amostra do poço A2



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

A caracterização das amostras retiradas da sondagem SPT-A2, seguiram o passo a passo conforme o ensaio do poço A2, seus resultados são apresentados resumidos na Tabela 7.

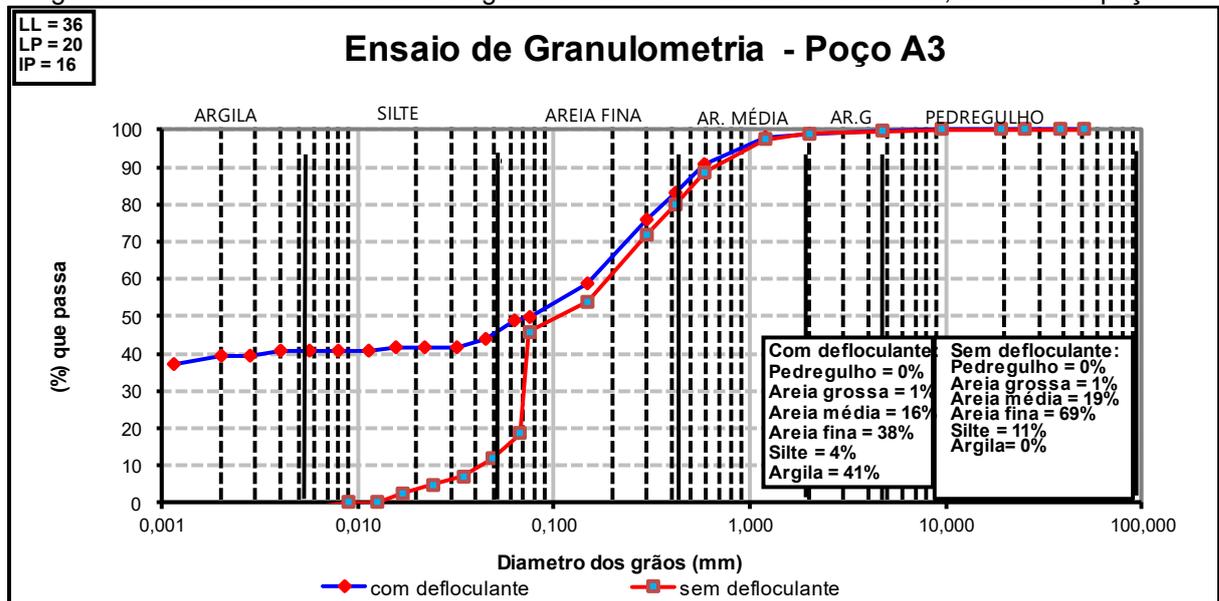
Tabela 7 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-A2

Prof. (m)	Defloc.	Composição granulométrica (%)						Limites de Atterberg (%)			Classific. SUCS
		Pedreg.	Areia			Silte	Argila	LL	LP	IP	
			Areia grossa	Areia média	Areia fina						
0,45-1	Sim	0,1	0,2	5	31,7	3	60	55	25	30	CH
	Não	0,1	0,2	5,4	68,3	26	0				CH
1-1,45	Sim	0,4	0,2	5,4	41	1	52	49	24	25	CL
	Não	0,4	0,2	6,4	72	21	0				SC
1,45-2	Sim	0	0,1	21,2	43,7	1	34	42	20	22	SC
	Não	0,1	0	20,9	63	16	0				SC

Fonte: O autor (2023).

O ensaio da amostra do poço A3 foi retirado aos 1,20 metros de profundidade. Onde o ensaio com o defloculante apresentou 55% de areia, 41% de argila, 4% de silte e não teve porcentagem de pedregulho, resultando na classificação do solo do tipo CH. Sem o defloculante, os resultados mostraram 89% de areia, 11% de silte e 0% de pedregulho e argila, a classificação do solo foi tipo SC, como pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, amostra do poço A3



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023)

A execução dos ensaios de caracterização da sondagem SPT-A3, seguiram o passo a passo conforme o ensaio do poço A3, e seus resultados são apresentados na Tabela 8.

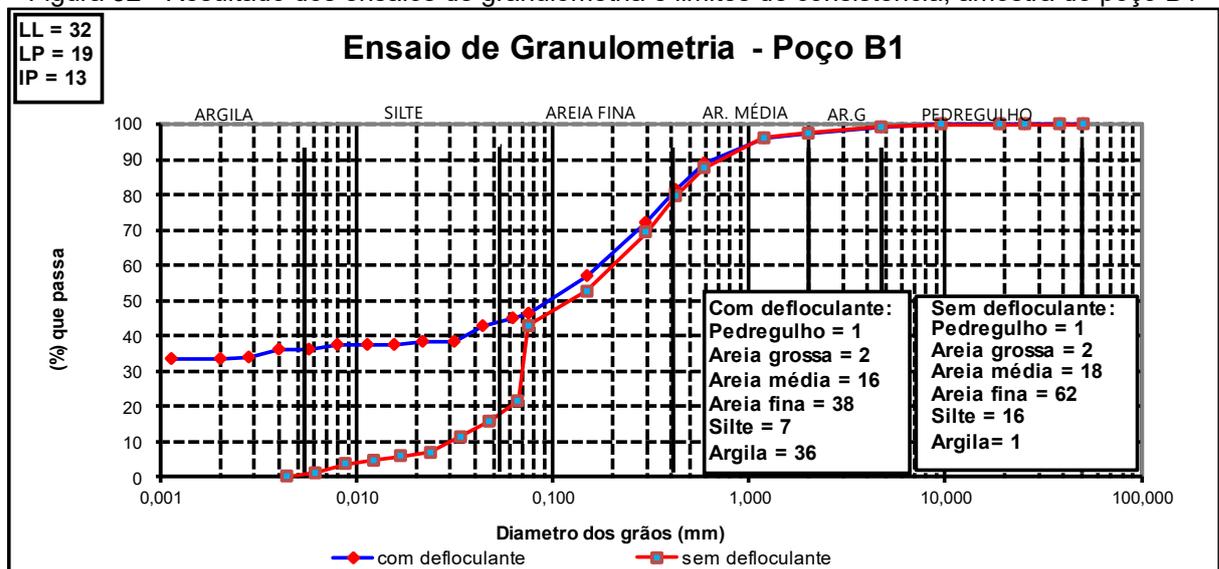
Tabela 8 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-A3

Prof. (m)	Defloc.	Composição granulométrica (%)						Limites de Atterberg (%)			Classific. SUCS
		Pedreg.	Areia			Silte	Argila	LL	LP	IP	
			Areia grossa	Areia média	Areia fina						
0,45-1	Sim	2	2	19	36	9	32	35	18	17	SC
	Não	2	2	23	62	11	0				SC
1-2	Sim	0,6	1,4	19,5	36,5	5	37	37	19	18	SC
	Não	0,6	1,4	23	59	15,5	0,5				SC
2,65-3	Sim	0,7	0,5	5,8	29	22	42	48	30	18	ML
	Não	0,7	0,5	8,8	64	26	0				ML

Fonte: O autor (2023).

As amostras do poço B1 foram extraídas de uma profundidade de 1,20 metros. Com o defloculante a amostra apresentou a maior fração sendo de areia com 56%, seguido por 36% de argila, 7% de silte e 1% de pedregulho, classificado como solo tipo SC. Sem o defloculante, os resultados mostraram 82% de areia, seguido de 16% de silte e 1% de argila e pedregulho, e assim classificado como solo tipo SC, como pode ser visto abaixo:

Figura 32 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, amostra do poço B1



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

A caracterização das amostras retiradas da sondagem SPT-B1, seguiram o passo a passo conforme o ensaio do poço B1, seus resultados são apresentados resumidos na Tabela 9.

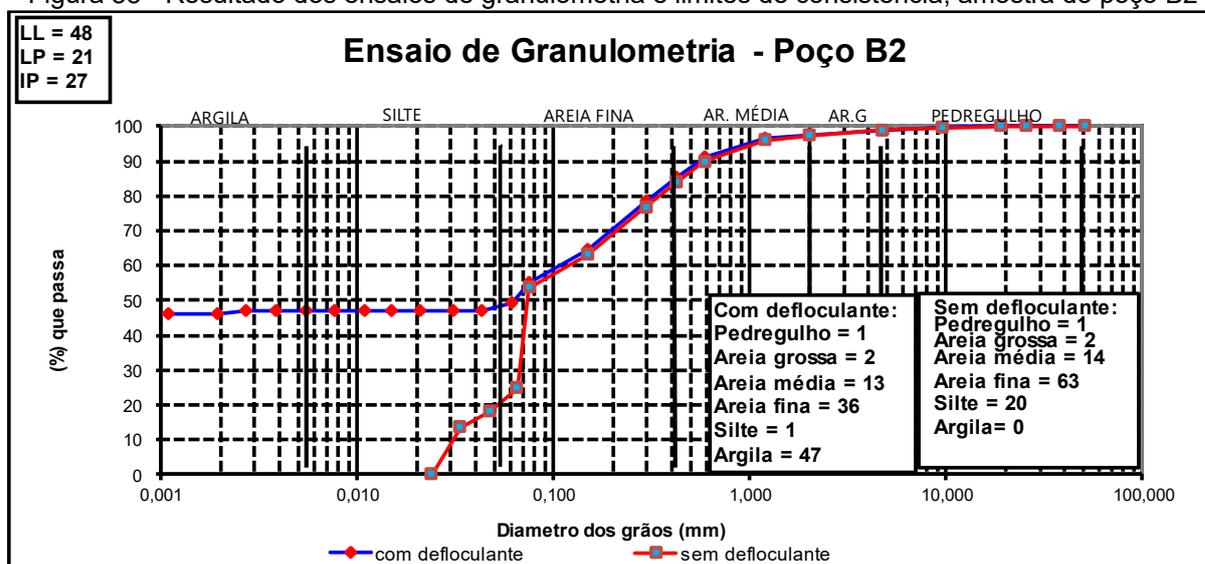
Tabela 9 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-B1.

Prof. (m)	Defloc.	Composição granulométrica (%)						Limites de Atterberg (%)			Classific. SUCS
		Pedreg.	Areia			Silte	Argila	LL	LP	IP	
			Areia grossa	Areia média	Areia fina						
0-1	Sim	0,6	2,4	10	28	6	53	39	20	19	SC
	Não	0,6	2,4	15	66	16	0				SC
1-2	Sim	0,2	0,8	19	38	3	39	56	27	29	CH
	Não	0,2	0,8	24	61	14	0				CH
2-3	Sim	0,6	3,1	33,3	32	1	30	62	27	35	CH
	Não	0,6	3,1	39,3	48	9	0				CH

Fonte: O autor (2023).

O ensaio da amostra do poço B2 foi retirado aos 1,20 metros de profundidade. Com o defloculante o ensaio apresentou a maior porção sendo 51% de areia, 47% de argila e 1% de silte e pedregulho, e assim classificado como solo tipo CL. Sem o defloculante, os resultados mostraram 79% de areia, 20% de silte, 1% de pedregulho e 0% de argila, classificado como solo tipo SC, como pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, amostra do poço B2



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023)

A execução dos ensaios de caracterização da sondagem SPT-B2, seguiram o passo a passo conforme o ensaio do poço B2, e seus resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-B2

Prof. (m)	Defloc.	Composição granulométrica (%)						Limites de Atterberg (%)			Classific. SUCS
		Pedreg.	Areia			Silte	Argila	LL	LP	IP	
			Areia grossa	Areia média	Areia fina						
0,45-1	Sim	0,1	0,4	6,5	20	6	67	64	32	32	CH
	Não	0,1	0,4	8,5	71	20	0				CH
2,55-3	Sim	0,1	0,3	3,6	34	7	55	46	22	24	CL
	Não	0,1	0,3	3,6	63	33	0				CL

Fonte: O autor (2023).

Para o poço B3 não foram realizados os ensaios de caracterização do solo, entretanto, os ensaios foram realizados para as amostras retiradas da sondagem SPT-B3. Suas caracterizações foram feitas de acordo com os ensaios anteriores, para o caso com defloculante e sem defloculante, ao longo da profundidade, os resultados são apresentados abaixo:

Tabela 11 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo coletado na sondagem SPT-B3

Prof. (m)	Defloc.	Composição granulométrica (%)						Limites de Atterberg (%)			Classific. SUCS
		Pedreg.	Areia			Silte	Argila	LL	LP	IP	
			Areia grossa	Areia média	Areia fina						
1,45-1,75	Sim	0	1	4	18	9	68	68	31	37	CH
	Não	0	1	8	47	44	0				CH
2,2-2,75	Sim	0	0	20	53	4,5	22,5	27	13	14	SC
	Não	0	0	41	54	5	0				SC
3,2-3,75	Sim	0,6	3,1	33,3	32	1	30	47	27	20	SC
	Não	0,6	3,1	39,3	48	9	0				SC

Fonte: O autor (2023).

### 4.3 Ensaio de cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto utilizaram as amostras indeformadas, o qual foram retiradas das proximidades das sondagens SPT. Para as amostras A1, A2, B1 e B2, a coleta foi a uma profundidade de 1,20 a partir da moldagem de blocos, e para as amostras A3 e B3, a coleta foi realizada em um poço superficial.

As amostras foram utilizadas no ensaio para obter os parâmetros de resistência do solo em duas condições, através do ensaio de cisalhamento direto, uma na

condição natural, que a amostra tem a umidade de campo preservada, e na condição do solo inundado, com a imersão da amostra em água destilada antes da execução do ensaio. Houve uma exceção da amostra B3, que devido ao desenvolvimento do projeto não foi realizado o ensaio na condição natural. As tensões utilizadas para os ensaios foram de 50, 100, 150 e 200 kPa. Os resultados dos ensaios nas amostras nas condições natural e inundado, são mostrados nas tabelas a seguir:

Tabela 12 - Resultado dos ensaios de cisalhamento direto eixo A

Amostra	$\sigma_n$ (kPa)	W (%)	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sec}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Condição do Solo	Condição de Ruptura
						$\tau_{rup}$
A1	50	17,65	15,2	12,9	Natural	59,19
	100	17,61	15,1	12,8		104,99
	150	17,56	15,4	13,1		143,56
	200	17,64	15,2	13,0		158,75
	50	21,67	17,2	14,5	Inundado	52,67
	100	24,79	15,2	12,8		79,60
	150	22,41	15,0	12,7		115,42
	200	19,84	14,9	12,6		146,78
A2	50	15,79	16,4	14,1	Natural	78,70
	100	15,38	16,5	14,3		120,36
	150	15,66	16,4	14,1		153,75
	200	15,93	16,3	14,0		192,26
	50	22,57	16,4	14,2	Inundado	53,76
	100	23,55	16,8	14,5		75,27
	150	17,88	16,4	14,2		93,84
	200	18,64	16,9	14,6		145,35
A3	50	19,22	16,9	14,2	Natural	55,77
	100	20,56	15,6	12,9		87,77
	150	18,95	16,2	13,6		116,65
	200	18,72	14,6	12,3		150,86
	50	22,39	16,6	13,8	Inundado	44,88
	100	18,27	15,4	13,0		80,32
	150	19,25	16,9	14,2		109,49
	200	19,09	16,7	15,4		141,77

Fonte: O autor (2023)

Tabela 13 - Resultado dos ensaios de cisalhamento direto eixo B

Amostra	$\sigma_n$ (kPa)	W (%)	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sec}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Condição do Solo	Condição de Ruptura
						$\tau_{rup}$
B1	50	22,25	17,0	13,9	Natural	72,02
	100	21,20	17,1	14,1		102,30
	150	22,05	16,9	13,9		138,55
	200	20,84	17,0	14,0		169,46
	50	20,46	18,0	15,0	Inundado	44,91
	100	22,51	17,7	14,5		58,46
	150	21,59	16,4	13,5		107,12
	200	20,95	17,5	14,7		136,58
B2	50	18,83	17,3	14,6	Natural	55,77
	100	18,41	17,3	14,7		103,64
	150	18,42	17,3	14,6		135,52
	200	18,53	17,3	14,6		172,80
	50	22,85	18,6	15,6	Inundado	45,47
	100	22,52	17,0	14,3		76,05
	150	21,51	17,0	14,2		109,95
	200	20,03	17,0	14,4		157,97
B3	50	22,78	16,8	13,7	Inundado	40,59
	100	22,23	16,6	13,8		70,65
	150	22,05	16,1	13,3		102,70
	200	20,53	16,8	14,0		132,18

Fonte: O autor (2023)

O resultado da coesão e do ângulo de atrito das amostras, com o solo natural e inundado, são possíveis serem vistas na Tabela 14, obtidos através da envoltória de resistência pelo critério de Coulomb. O peso específico e a umidade do solo no ensaio foram dados como a média dos resultados dos ensaios para cada amostra, para cada condição.

Tabela 14 - Valor dos parâmetros do solo para os ensaios de cisalhamento direto

Amostra		W (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)
A1	Condição Natural	17,60	15,2	32	30
	Condição Inundado	22,17	15,6	19	28
A2	Condição Natural	15,69	16,4	42	33
	Condição Inundado	20,66	16,6	18	27
A3	Condição Natural	19,36	15,8	24	28
	Condição Inundado	19,75	16,4	14	29
B1	Condição Natural	21,58	17,0	38	30
	Condição Inundado	21,38	17,4	5	29
B2	Condição Natural	18,55	17,3	35	31
	Condição Inundado	21,73	17,4	3	33
B3	Condição Inundado	21,90	16,6	10	28

Fonte: O autor (2023)

#### 4.4 Análise da estabilidade da encosta

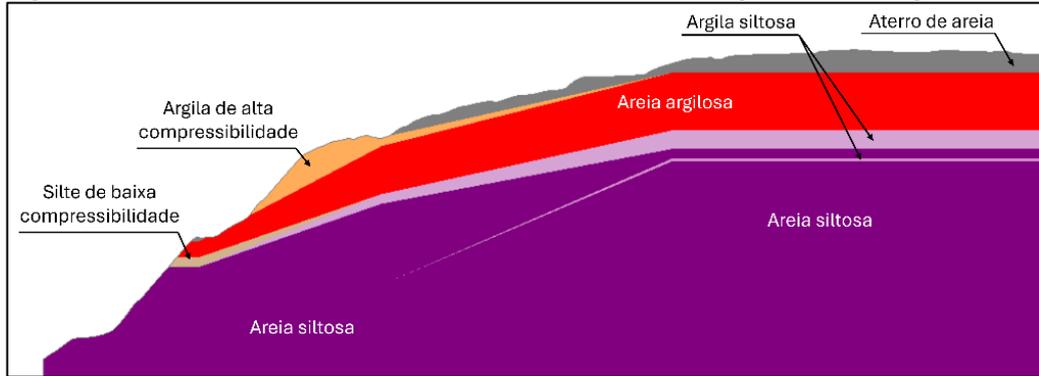
A estabilidade das encostas foi calculada através do programa Slide2, a partir dos métodos de Bishop simplificado, GLE/Morgenstern-Price, Spencer e Janbu corrigido. Os dados de entrada para o programa foram obtidos através dos ensaios de laboratório e de campo, para assim alcançar uma simulação da encosta o mais próximo da realidade e de forma coerente.

Dessa forma, a condição em que o solo se encontra afeta diretamente a estabilidade da encosta, com isto, foram realizadas simulações com o solo em 3 condições: natural, saturado e saturação gradual. O solo em estado natural, com ele possuindo sua umidade igual ao momento da coleta da amostra. O solo em estado saturado, com a amostra saturada em laboratório, simulando assim um solo susceptível a chuvas por longos períodos, com alta umidade. E a saturação gradual, com o solo sendo saturado camada por camada de solo, para se aproximar de um solo susceptível a chuvas ao longo do tempo.

Com base na topografia da encosta do Alto da Telha, este possuindo uma grande área para ser analisada, foi-se necessário a realização de diversas seções ao longo dela, resultando em 5 seções que correspondem as respectivas ruas localizadas no morro. A escolha das seções foi realizada considerando-se uma distância aceitável entre elas, para uma distribuição homogênea da encosta simulada, além da inclinação aparente que suas geometrias aparentam, buscando os casos críticos para serem analisados. Assim, as seções são: Rua Córrego da Telha, Rua Beta, Rua Brumal, Rua Uruaí e Rua Paraú.

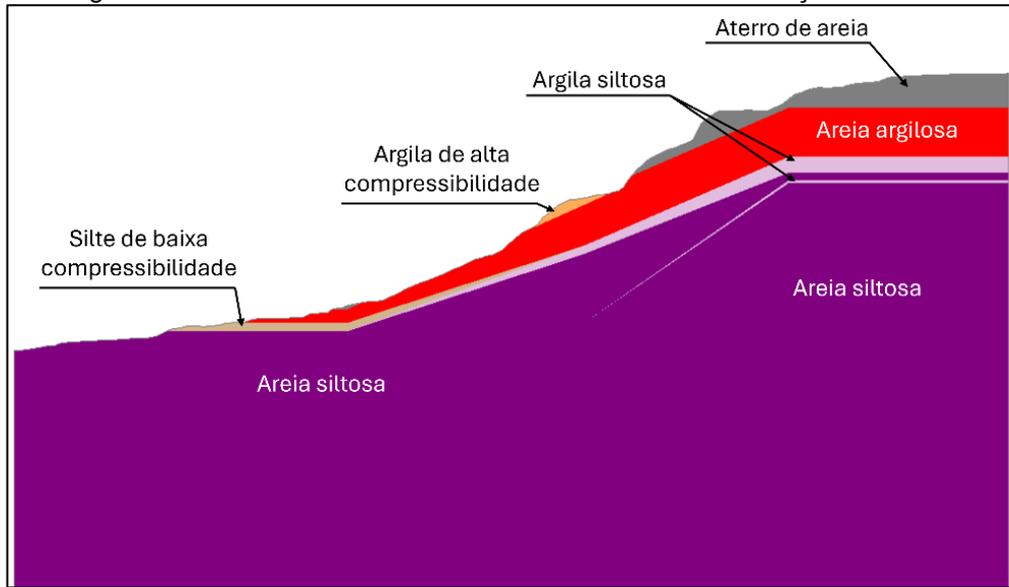
Tendo em vista a localização dos ensaios realizados em campo, foi utilizado os ensaios do eixo A para a Rua Córrego da telha e Rua Beta, e os ensaios do eixo B para a Rua Brumal, Rua Uruaí e Rua Paraú. As camadas de solo foram estabelecidas segundo o relatório de sondagem da ENSOLO, e as caracterizações dos ensaios de laboratório, com o objetivo de simplificar a estabilidade e representar o solo da encosta com suas características, representado nos perfis do solo a seguir:

Figura 34 - Perfil do solo com as divisões das camadas da seção Rua Córrego da Telha



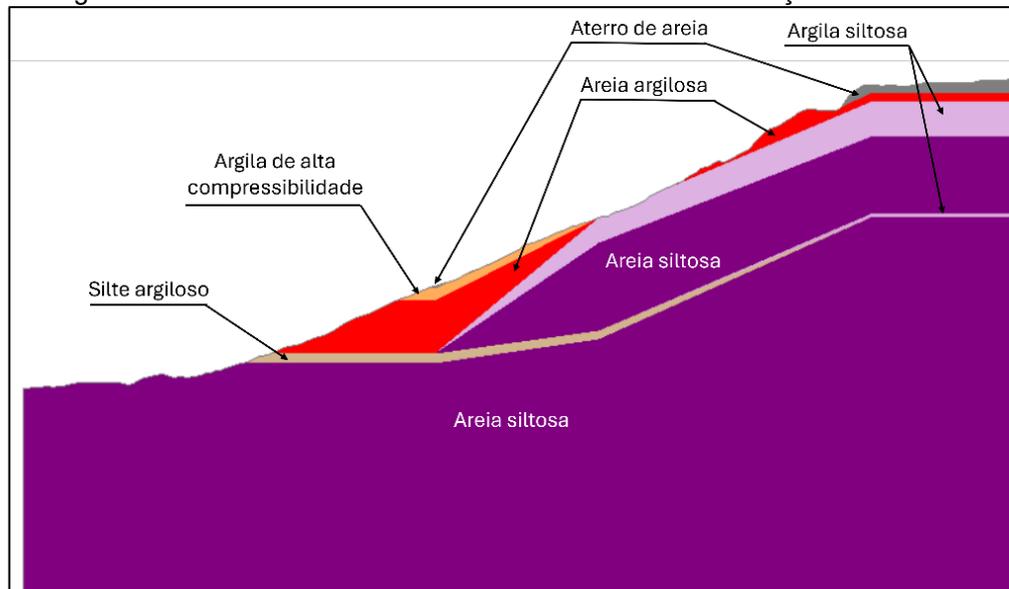
Fonte: O autor (2024).

Figura 35 - Perfil do solo com as divisões das camadas da seção Rua Beta



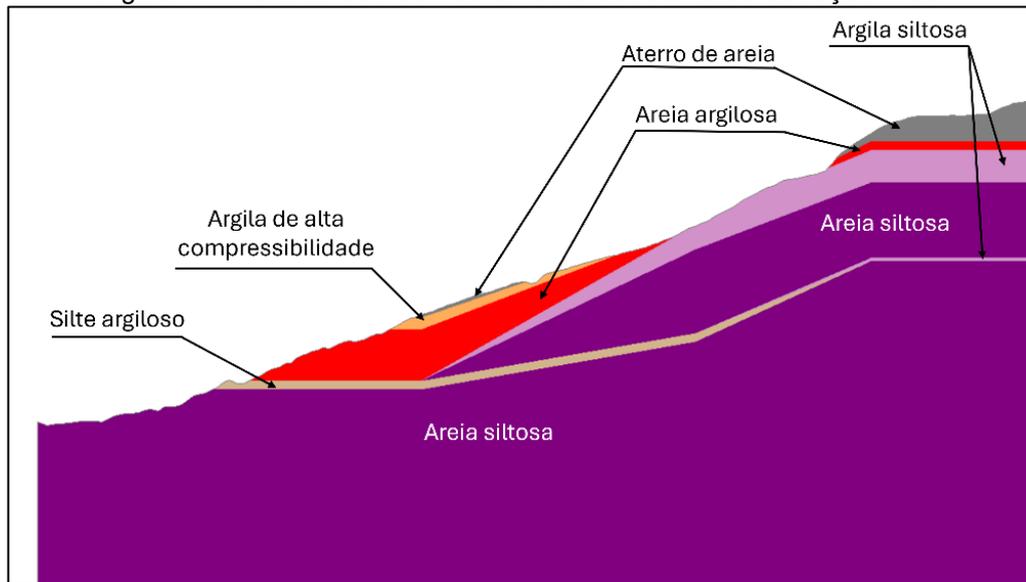
Fonte: O autor (2024).

Figura 36 - Perfil do solo com as divisões das camadas da seção Rua Brumal



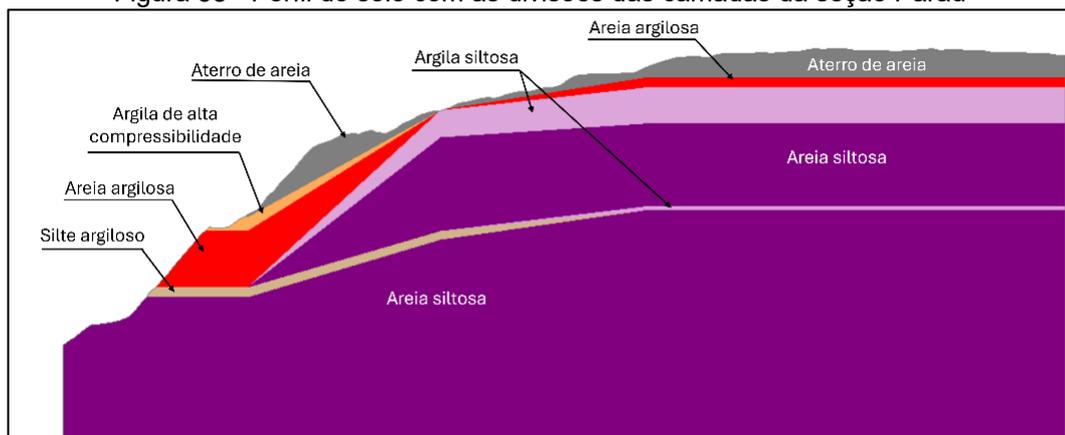
Fonte: O autor (2024).

Figura 37 - Perfil do solo com as divisões das camadas da seção Uruaí



Fonte: O autor (2024).

Figura 38 - Perfil do solo com as divisões das camadas da seção Parau



Fonte: O autor (2024).

Para a análise de estabilidade da encosta completa, as sondagens SPT alcançaram grandes profundidades, com o objetivo de encontrar os parâmetros do solo dentro do maciço. Entretanto, os ensaios para encontrar os valores da resistência do solo não permitem utilizar as amostras indeformadas retiradas das sondagens, além de agregar mais confiabilidade para os parâmetros do solo retirados dos ensaios deste trabalho, os valores de coesão, ângulo de atrito e peso específico do solo foi dado pela média entre os valores dos ensaios deste trabalho e de literaturas com solos na Formação Barreiras, e para os dados não existentes foi utilizado uma correlação com o  $N_{spt}$ .

As bibliografias foram escolhidas por apresentarem pesquisas atuais na região da Formação Barreiras, com solos similares aos deste estudo, a Tabela 15 apresenta os solos utilizados na pesquisa.

Tabela 15 - Resumo dos solos retirados da literatura

Bibliografia	Nome/classificação	Condição	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c' (kPa)	$\varphi'$ (°)
BEZERRA (2018)	PI1A1/SM	Natural	18,5	4,3	36
		Saturado	18,8	0	36
	PI2A1/SM-SC	Natural	16,8	11	31
		Saturado	16,9	3,4	31
SOUZA (2016)	CL	Natural	-	10-28,75	32,92- 35,32
		Saturado	-	1-6,19	30,73-32
ALMEIDA (2016)	ML	Natural	13,39	28,3	34,3
		Saturado	16,1	6,9	32
MEIRA (2008)	SC	Natural	-	1-4,2	28-34
		Saturado	-	0,4-3,5	23-26

Fonte: O autor (2024).

Ao analisar o perfil do solo e a camada dos ensaios de caracterização e cisalhamento direto dos blocos, é possível identificar que os blocos A1, A2 e A3 estão na mesma camada de areia argilosa, com isto, foi utilizado uma média dos resultados destes ensaios para esta camada de areia argilosa. Os blocos B2 e B3 estão localizados na camada de argila de alta compressibilidade, utilizando assim a média dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto destes blocos para esta camada.

Para a correlação foi escolhido as correlações de JOPPERT (2007), que fornece uma correlação para solos com a classificação muito próxima dos solos do estudo, além de ser uma correlação estabelecida na literatura. Ele fornece uma tabela que relaciona o número de golpes padrão da sondagem SPT, com o peso específico natural e saturado do solo, coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo, um resumo dos dados utilizados é apresentado na Tabela 16. Foi utilizado a média do  $N_{spt}$  de cada camada na correlação, com os valores arredondados em favor da segurança, ou seja, o peso específico arredondado para cima e os valores de resistência do solo arredondados para baixo.

Tabela 16 - Correlação do Nspt com os parâmetros do solo

Tipo de solo	Faixa de Nspt	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )		Ângulo de atrito efetivo (°)	Coesão efetiva (kPa)
		Natural	Saturado		
Areia pouco siltosa/pouco argilosa	9 – 18	19	20	32	-
Areia média e fina muito argilosa	5 – 8	18	19	28	0,5
	9 – 18	19	20	30	0,75
Argila porosa vermelha e amarela	6 – 10	17	18	25	3,0
	≥ 10	18	19	25	3,0 a 7,0
Argila siltosa pouco arenosa	11 – 19	19	19	24	3,0
	≥ 30	20	20	25	5,0
Silte arenoso pouco argiloso	5 – 8	18	19	25	1,5
	9 – 18	19	20	26	2,0

Fonte: Adaptado de JOBERT (2007).

Ao analisar os valores dos parâmetros dos solos na correlação em comparação com os solos deste estudo e da literatura, é possível observar que a correlação propõe parâmetros em favor da segurança, e este é um dos fatores de escolha deste método para obter os dados da estabilidade. Entretanto, as primeiras simulações apresentaram fatores de segurança abaixo de 0,5 para diversos casos de ruptura localizada na camada de aterro de areia e de areia siltosa. Como não houve a ruptura da encosta em campo, os parâmetros de coesão foram limitados a um mínimo de 3 na condição natural e saturada, para que reduza a quantidade de rupturas localizadas.

#### 4.4.1 Análise da Estabilidade na condição natural do eixo A

A média dos parâmetros para a análise de estabilidade, na condição natural do eixo A, são apresentados na Tabela 17.

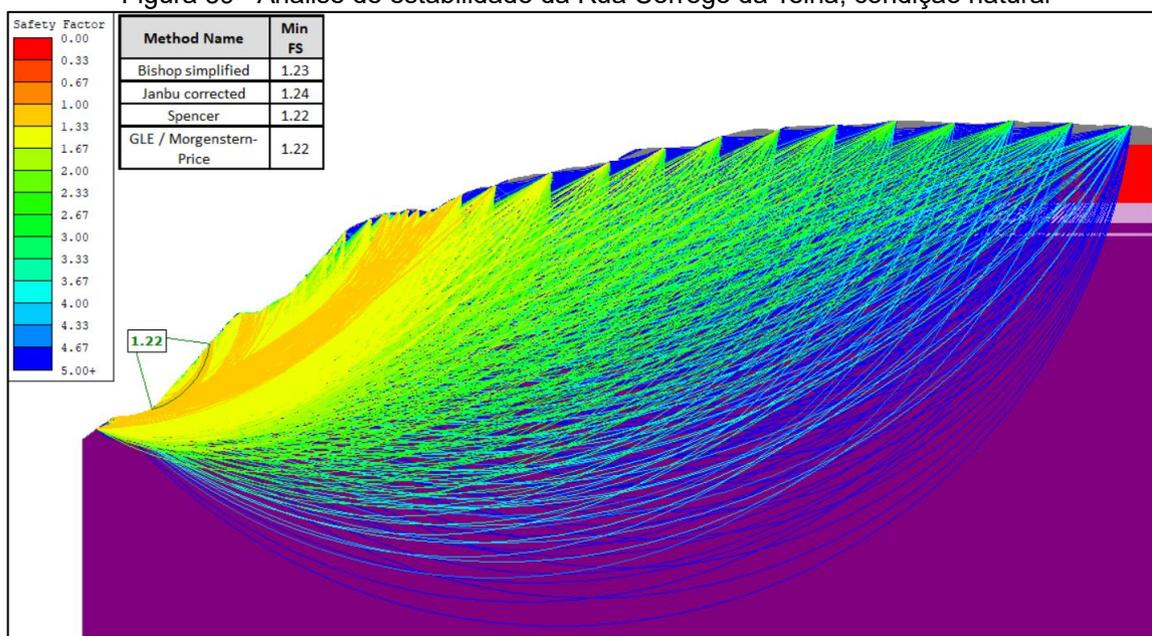
Tabela 17 - Parâmetros do solo utilizados na estabilidade do eixo A, na condição natural

Condição Natural – Eixo A: ruas Córrego da Telha e Beta					
Camada	Parâmetro	Este trabalho	Literatura	Correlação Nspt	Valor final
1º - Aterro de areia	c' (kPa)	-	11	-	11
	$\phi'$ (°)	-	31	-	31
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	16,8	-	16,8
2º - Argila de alta compr.	c' (kPa)	35	-	-	35
	$\phi'$ (°)	31	-	-	31
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,3	-	-	17,3
3º - Areia argilosa	c' (kPa)	32	11/4,2	-	15
	$\phi'$ (°)	30	31/28/34	-	30
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,8	-	-	15,8
4º - Argila siltosa	c' (kPa)	-	-	5	5
	$\phi'$ (°)	-	-	25	25
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	-	20	20
5º - Silte de baixa compr.	c' (kPa)	-	28,3	-	28,3
	$\phi'$ (°)	-	34,3	-	34,3
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	13,39	-	13,39
6º - Areia siltosa	c' (kPa)	-	4,3	-	4,3
	$\phi'$ (°)	-	36	-	36
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	18,5	-	18,5

Fonte: O autor (2024).

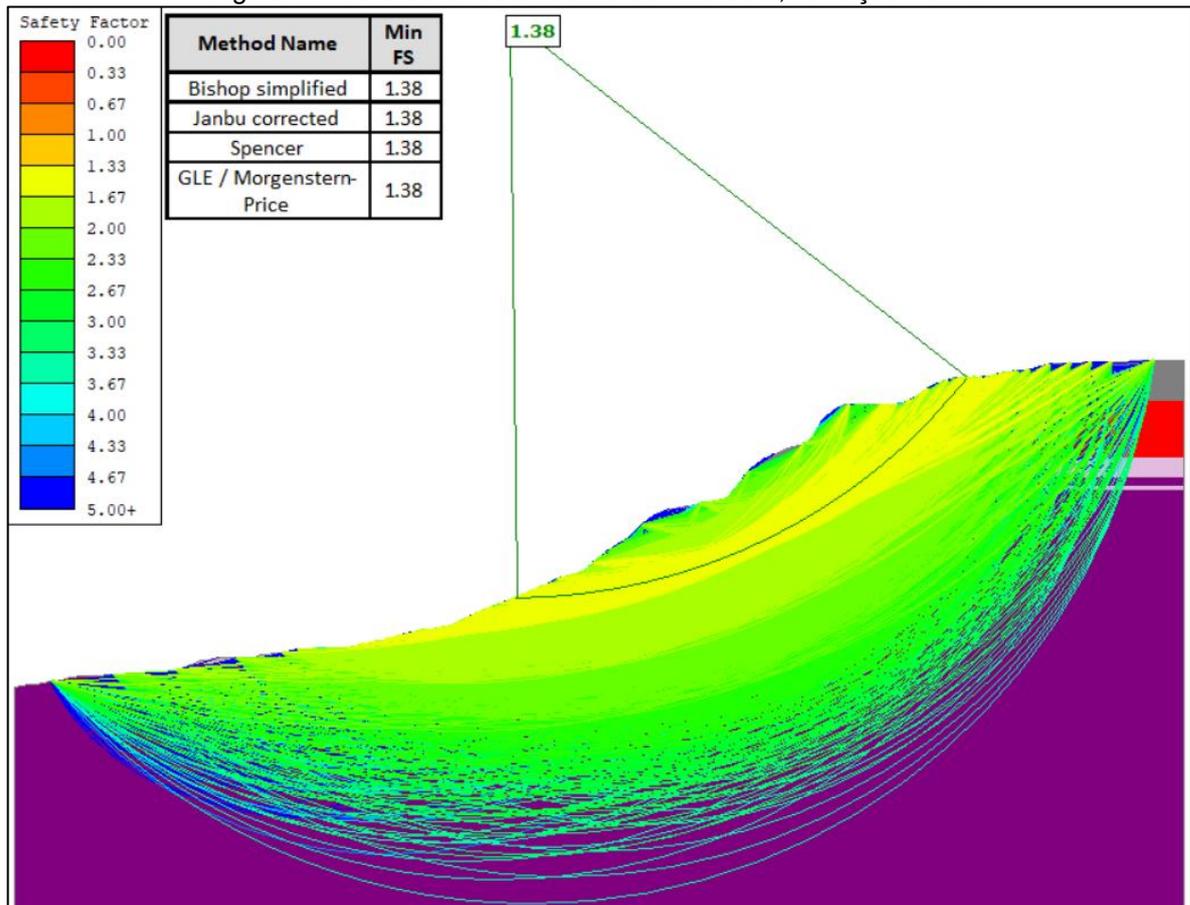
A estabilidade da Rua Córrego da Telha e Rua Beta na condição natural utilizou a mesma separação das camadas, e os mesmos parâmetros de solo, visto que as duas seções estão próximas aos estudos do eixo A.

Figura 39 - Análise de estabilidade da Rua Córrego da Telha, condição natural



Fonte: O autor (2024).

Figura 40 - Análise de estabilidade da Rua Beta, condição natural



Fonte: O autor (2024).

As duas estabilidades apresentaram o fator de segurança mínimo menor que 1,5 recomendado por norma para zonas de risco a vida. Cunhas localizadas podem ser observadas com os menores FS para a seção Córrego da Telha. Para a seção Beta os menores FS foram próximos da camada de argila siltosa.

#### 4.4.2 Análise da estabilidade na condição natural do eixo B

Os dados de entrada do solo, utilizados na análise de estabilidade do eixo B, são apresentados abaixo:

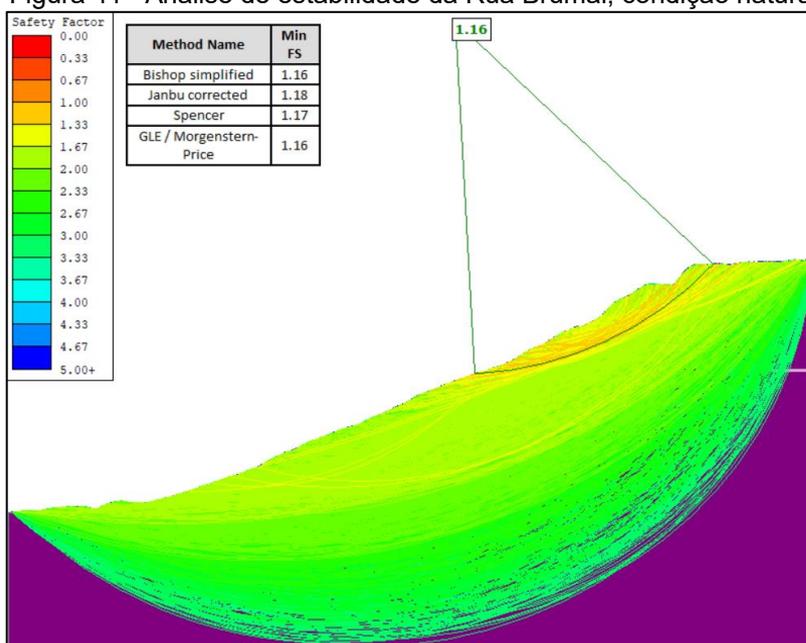
Tabela 18 - Parâmetros do solo utilizados na estabilidade do eixo B, na condição natural

Condição Natural – Eixo B: ruas Brumal, Uruaí e Parau					
Camada	Parâmetro	Este trabalho	Literatura	Correlação Nspt	Valor final
1º - Aterro de areia	c' (kPa)	-	11	-	11
	$\phi'$ (°)	-	31	-	31
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	16,8	-	16,8
2º - Areia argilosa	c' (kPa)	32	11/4,2	-	15
	$\phi'$ (°)	30	31/28/34	-	30
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,8	-	-	15,8
3º - Argila de alta compr.	c' (kPa)	35	-	-	35
	$\phi'$ (°)	31	-	-	31
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,3	-	-	17,3
4º - Argila siltosa	c' (kPa)	-	-	3	3
	$\phi'$ (°)	-	-	24	24
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	-	19	19
5º - Silte argiloso	c' (kPa)	-	-	2,0	3
	$\phi'$ (°)	-	-	26	26
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	-	19	19
6º - Areia siltosa	c' (kPa)	-	4,3	-	4,3
	$\phi'$ (°)	-	36	-	36
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	18,5	-	18,5

Fonte: O autor (2024).

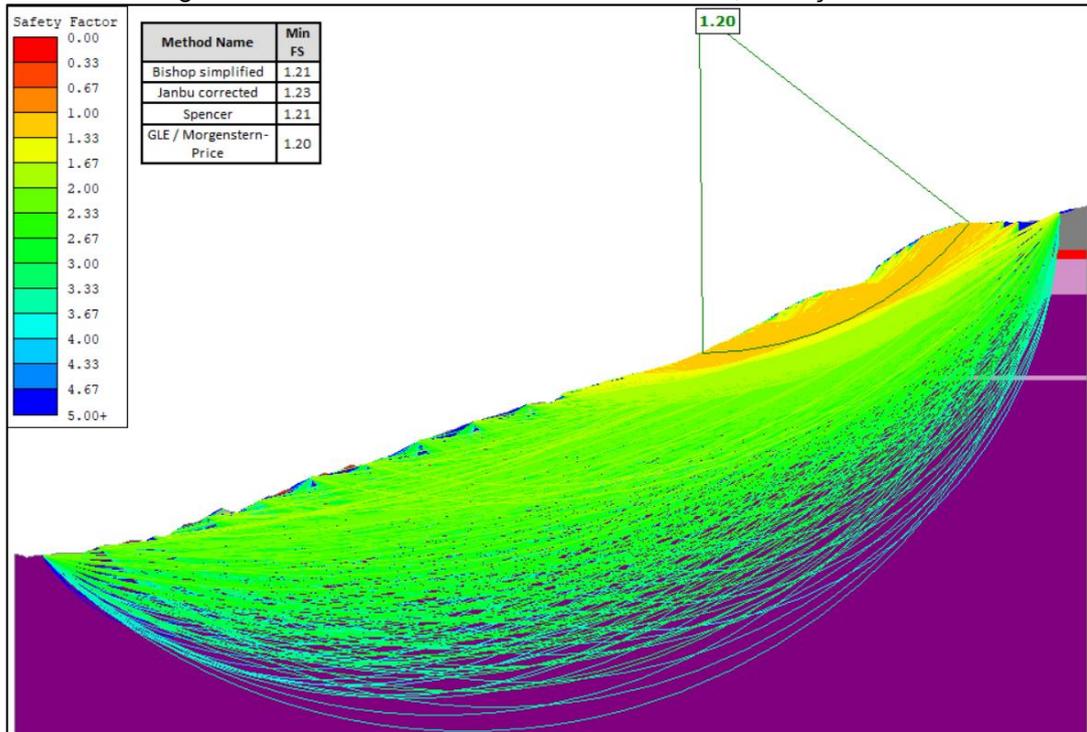
Os valores da correlação para argila siltosa são diferentes do solo do eixo A, como previsto, devido a utilização do Nspt na correlação, onde valores de Nspt para a argila siltosa deste eixo são menores comparativamente.

Figura 41 - Análise de estabilidade da Rua Brumal, condição natural



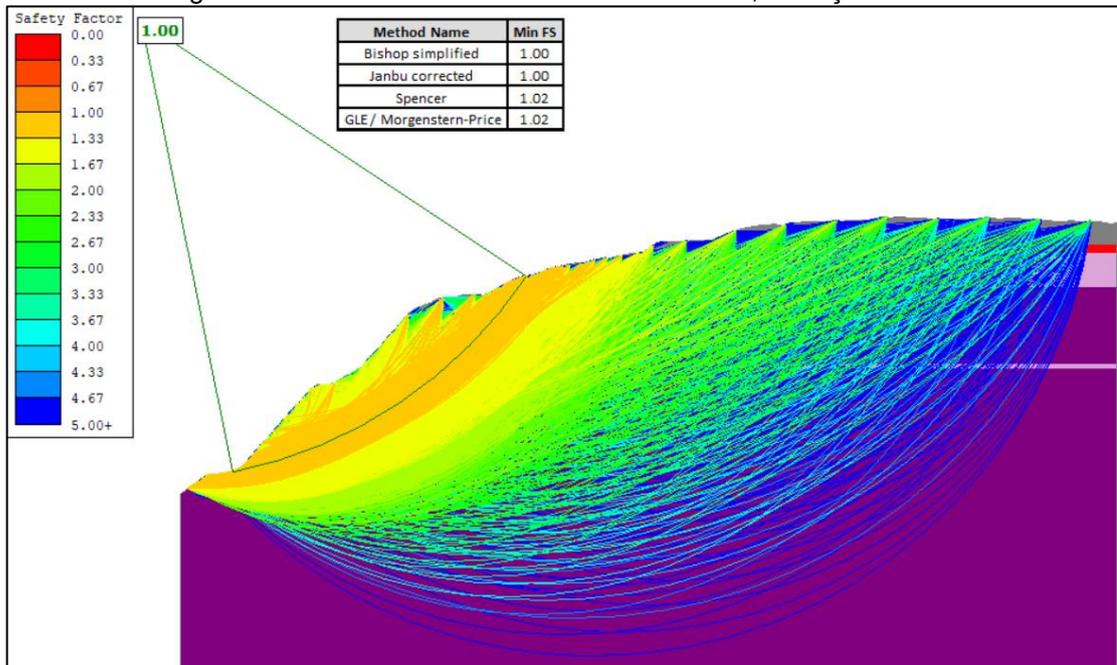
Fonte: O autor (2024).

Figura 42 - Análise de estabilidade da Rua Uruaí, condição natural



Fonte: O autor (2024).

Figura 43 - Análise de estabilidade da Rua Parau, condição natural



Fonte: O autor (2024).

#### 4.4.3 Análise da estabilidade na condição saturada do eixo A

Com os resultados dos ensaios de resistência saturados, e a correlação para solos saturados, a Tabela 19 apresenta dos dados de entrada do solo para o eixo A na condição saturada.

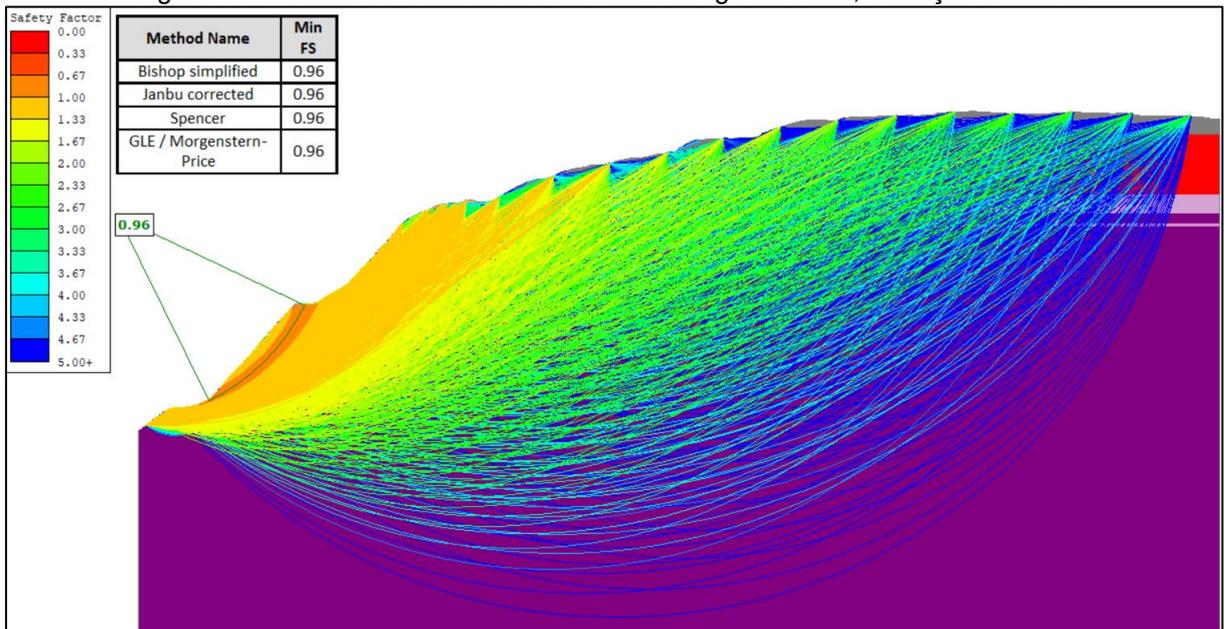
Tabela 19 - Parâmetros do solo utilizados na estabilidade do eixo A, na condição saturada

Condição Saturado – Eixo A: ruas Córrego da Telha e Beta					
Camada	Parâmetro	Este trabalho	Literatura	Correlação N <sub>spt</sub>	Valor final
1º - Aterro de areia	c' (kPa)	-	3,4	-	3,4
	φ' (°)	-	31	-	31
	γ (kN/m <sup>3</sup> )	-	16,9	-	16,9
2º - Argila de alta compr.	c' (kPa)	6,5	-	-	6,5
	φ' (°)	30,5	-	-	30,5
	γ (kN/m <sup>3</sup> )	17	-	-	17
3º - Areia argilosa	c' (kPa)	18	3,4/1/4,2	-	6
	φ' (°)	28	31/28/34	-	30
	γ (kN/m <sup>3</sup> )	16,4	16,9	-	16,7
4º - Argila siltosa	c' (kPa)	-	-	5	5
	φ' (°)	-	-	25	25
	γ (kN/m <sup>3</sup> )	-	-	20	20
5º - Silte de baixa compr.	c' (kPa)	-	-	1,5	3
	φ' (°)	-	-	25	25
	γ (kN/m <sup>3</sup> )	-	-	19	19
6º - Areia siltosa	c' (kPa)	-	0	-	3
	φ' (°)	-	36	-	36
	γ (kN/m <sup>3</sup> )	-	18,8	-	18,8

Fonte: O autor (2024).

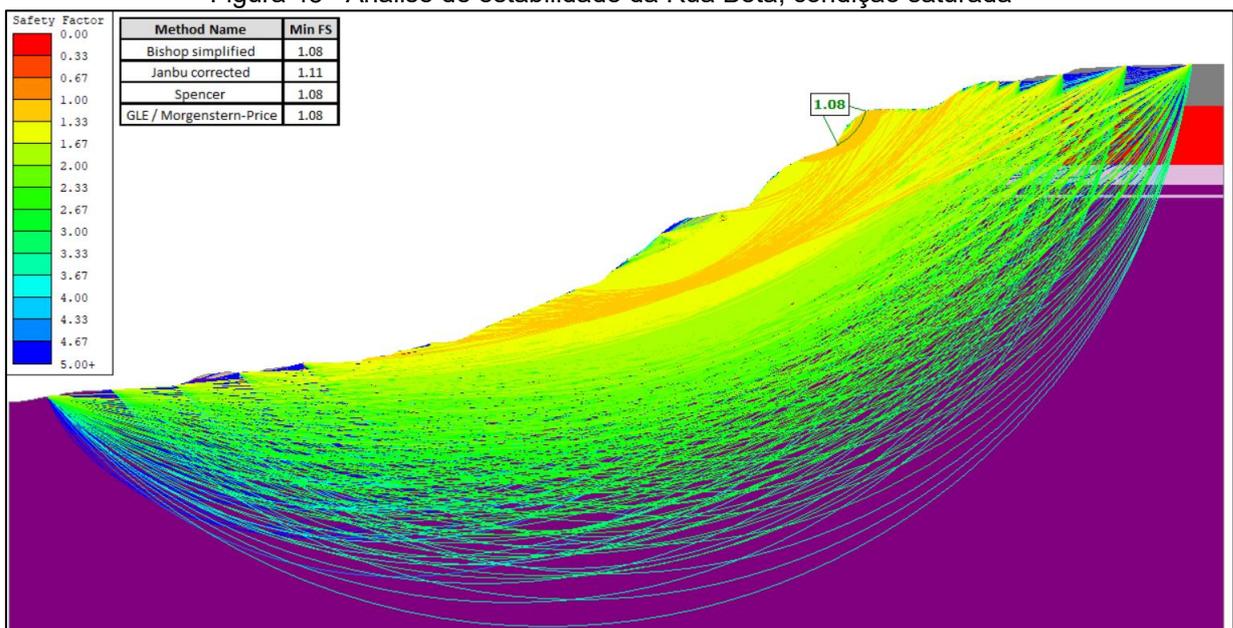
A estabilidade no programa Slide2 para as ruas do eixo A, com as camadas na condição saturada, são apresentados a seguir:

Figura 44 - Análise de estabilidade da Rua Córrego da Telha, condição saturada



Fonte: O autor (2024).

Figura 45 - Análise de estabilidade da Rua Beta, condição saturada



Fonte: O autor (2024).

A estabilidade da seção Córrego da Telha na condição saturada apresentou um FS abaixo de 1, indicando que já ocorreu uma ruptura. Para a seção Beta na condição saturada, o FS está próximo de 1, na iminência de romper. As duas seções apresentaram os menos fatores de segurança com cunhas de ruptura localizadas, em pontos de alta declividade.

#### 4.4.4 Análise da estabilidade na condição saturada do eixo B

A Tabela 20 apresenta os dados para a estabilidade das camadas das ruas Brumal, Uruaí e Parau, na condição saturada.

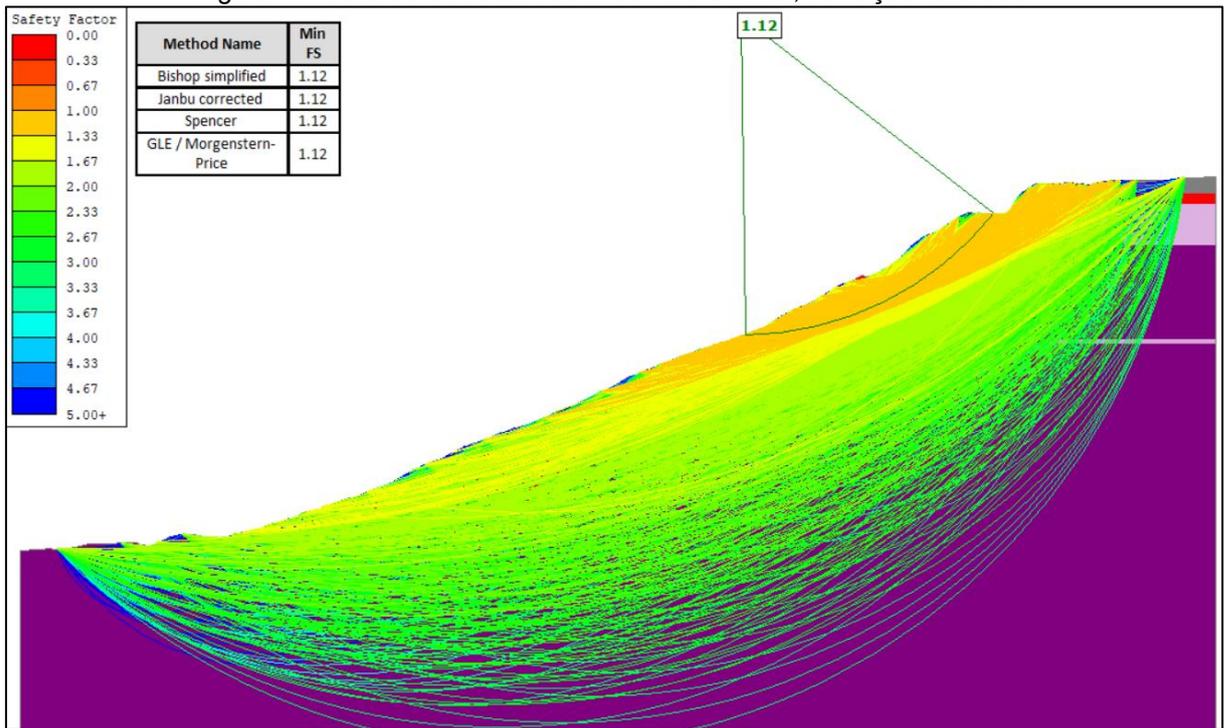
Tabela 20 - Parâmetros do solo utilizados na estabilidade do eixo B, na condição saturada

Condição Saturado – Eixo B: ruas Brumal, Uruaí e Parau					
Camada	Parâmetro	Este trabalho	Literatura	Correlação Nspt	Média
1º - Aterro de areia	c' (kPa)	-	3,4	-	3,4
	$\varphi'$ (°)	-	31	-	31
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	16,9	-	16,9
2º - Areia argilosa	c' (kPa)	18	3,4/1/4,2	-	6
	$\varphi'$ (°)	28	31/28/34	-	30
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	16,4	16,9	-	16,7
3º - Argila de alta compr.	c' (kPa)	6,5	-	-	6,5
	$\varphi'$ (°)	30,5	-	-	30,5
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17	-	-	17
4º - Argila siltosa	c' (kPa)	-	-	3	3
	$\varphi'$ (°)	-	-	24	24
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	-	19	19
5º - Silte argiloso	c' (kPa)	-	-	2	3
	$\varphi'$ (°)	-	-	26	26
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	-	20	20
6º - Areia siltosa	c' (kPa)	-	0	-	3
	$\varphi'$ (°)	-	36	-	36
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	-	18,8	-	18,8

Fonte: O autor (2024).

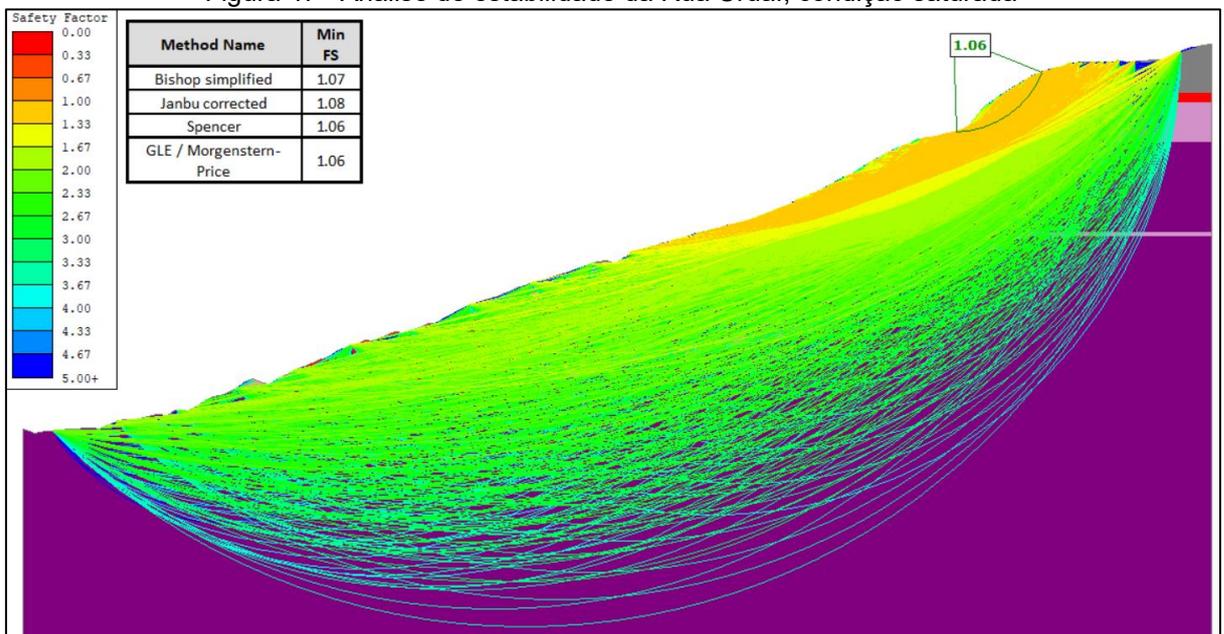
Segue abaixo, os resultados da análise da estabilidade no Slide2, para a condição saturada do eixo B.

Figura 46 - Análise de estabilidade da Rua Brumal, condição saturada



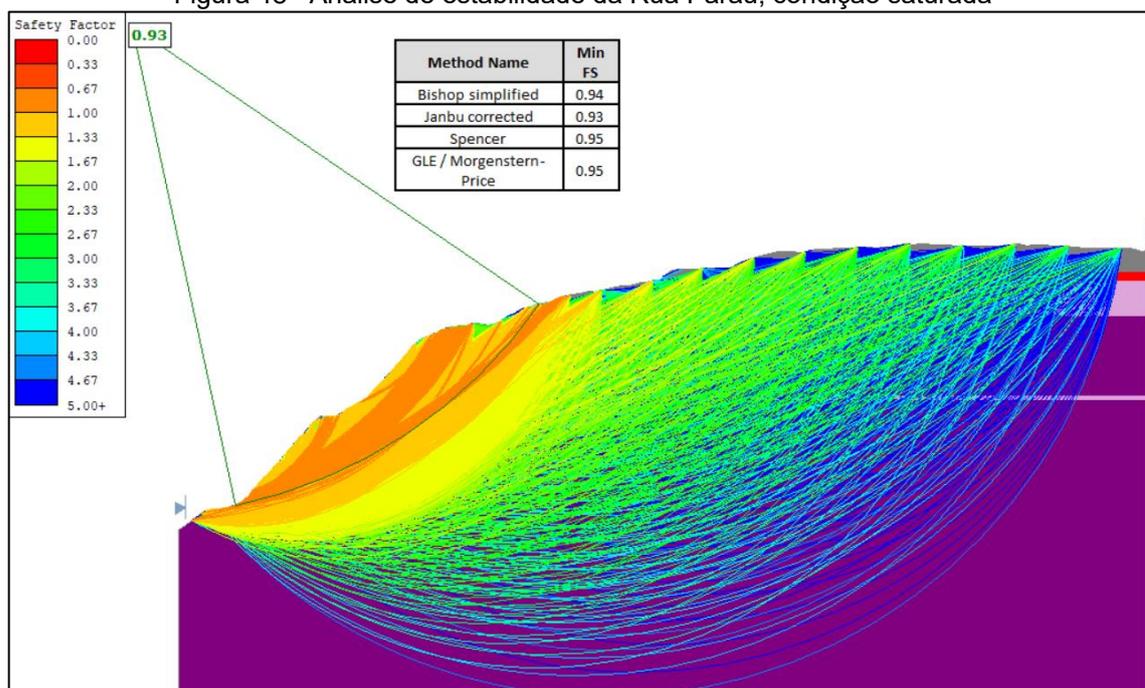
Fonte: O autor (2024).

Figura 47 - Análise de estabilidade da Rua Uruaí, condição saturada



Fonte: O autor (2024).

Figura 48 - Análise de estabilidade da Rua Parau, condição saturada



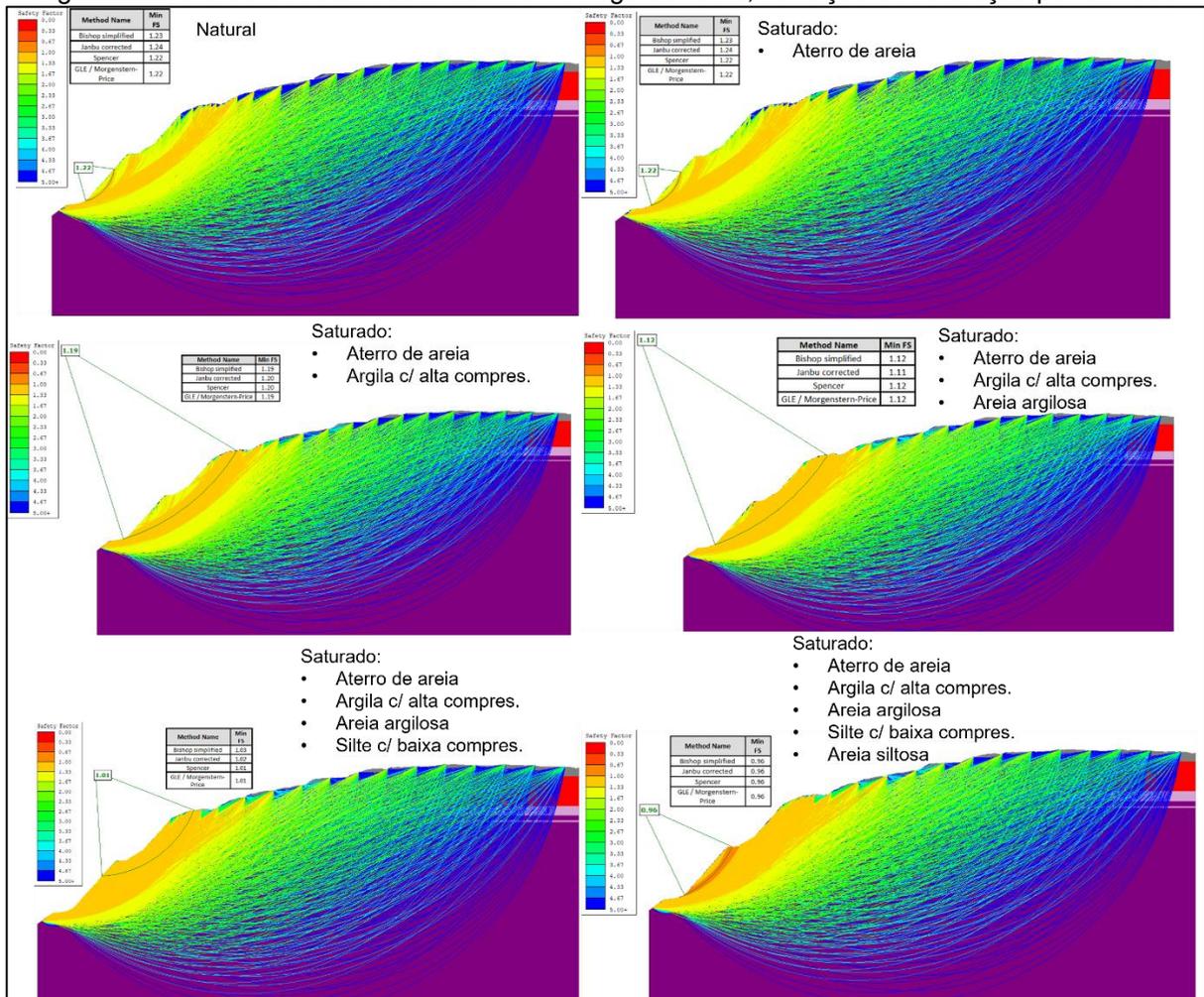
Fonte: O autor (2024).

#### 4.4.5 Análise da estabilidade na condição de saturação por camada

A análise da estabilidade, para o solo saturado ao longo da profundidade, foi realizada com a Rua Córrego da Telha do eixo A, e a Rua Brumal para o eixo B. A escolha das ruas foi levando em consideração a grande variação do FS na seção Córrego da Telha, para analisar a influência a saturação nesse caso, além de apresentar cunhas de rupturas que passam em diversas camadas. Para a escolha da Rua Brumal, foi levado em consideração que ela apresentou cunhas de rupturas maiores, com pouca variação do FS e que passam em diversas camadas.

A Figura 49 apresenta os resultados da estabilidade na condição de saturação ao longo das camadas, para a Rua Córrego da Telha

Figura 49 - Análise de estabilidade da Rua Córrego da Telha, condição de saturação por camada

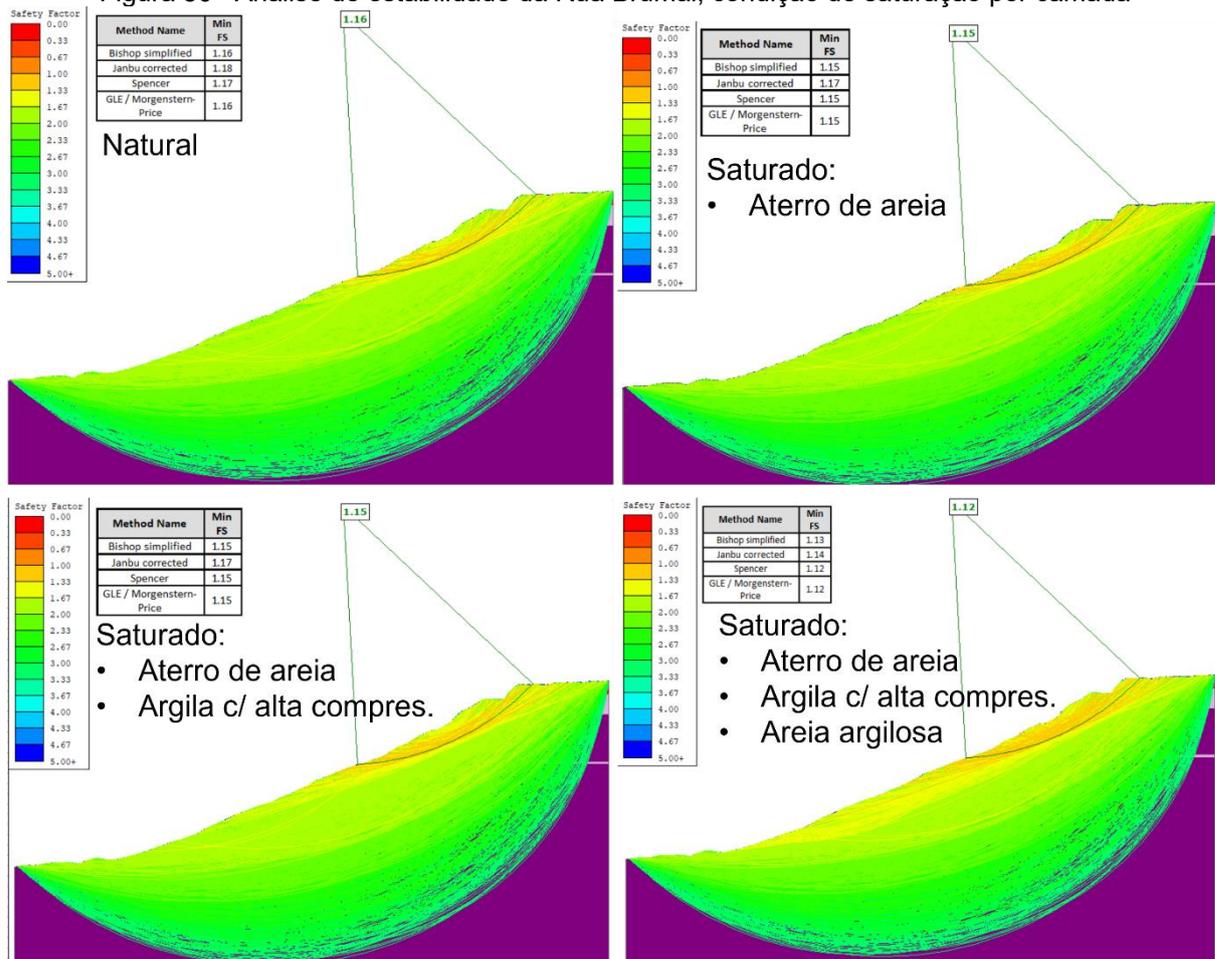


Fonte: O autor (2024).

Para este caso, é perceptível que o fator de segurança mínimo varia em diversas superfícies distintas, passando entre as diversas camadas, com cunhas localizadas e cunhas maiores, a depender da camada saturada. O pior caso se deu ao saturar o silte com baixa compressibilidade, com o FS reduzindo em 0,11, apresentando um fator de segurança de 1,01, podendo considerar pela proximidade de FS=1 que o talude rompeu.

A análise da estabilidade da encosta na seção da Rua Brumal, para a condição de saturação ao longo das camadas, pode ser visto na Figura 50.

Figura 50 - Análise de estabilidade da Rua Brumal, condição de saturação por camada



Fonte: O autor (2024).

Utilizou-se os dados das camadas de aterro de areia, argila com alta compressibilidade e areia argilosa, na condição saturada, para encontrar os mesmos valores do fator de segurança mínimo que a análise da mesma seção na condição apenas saturado. Apresentando o FS final de 1,12, com o maior volume de cunhas de rupturas próximo de 1 nas camadas de areia argilosa e argila siltosa.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando o estudo geológico-geotécnico efetuado nesta pesquisa, em relação a instabilidade da encosta localizada no bairro de Passarinho da cidade do Recife/PE, será apresentado nesse capítulo as principais conclusões obtidas no decorrer da pesquisa, além de recomendações e sugestões para pesquisas futuras.

### 5.1 Conclusões

As 06 (seis) sondagens à percussão na encosta apresentaram uma distribuição entre dois eixos, que abrangeram toda a encosta. O limite das sondagens variou entre 10,3 e 15,5 metros de profundidade. Apresentaram camadas com solos similares, com coerência na continuidade das camadas.

Nos ensaios de caracterização do solo com defloculante, a argila se mostrou presente em todas as caracterizações, com a porcentagem indo de 22,5 até 68%. E para a caracterização sem defloculante, apenas duas amostras apresentaram argila, com 0,5 e 1%. Os limites de liquidez (LL) tiveram um máximo de 68% e o mínimo de 27%, para o limite de plasticidade (LP) ele foi de 13 até 32%, e para índice de plasticidade (IP) seu mínimo foi de 13 até o máximo de 37. Na classificação do solo, foram apresentados areia argilosa (SC), argila de baixa compressibilidade (CL), argila de alta compressibilidade (CH) e silte de baixa compressibilidade (ML).

Os ensaios de cisalhamento direto natural, apresentaram uma alta variação da coesão indo de 24 até 42 kPa, para o ângulo de atrito a variação foi menor, indo de 27 até 33 graus. Para o peso específico natural dos solos, temos um mínimo de 15,2 kN/m<sup>3</sup> até um máximo de 17,3 kN/m<sup>3</sup>. Já no cisalhamento direto saturado, o resultado da coesão variou entre 3 e 19 kPa, com uma redução média em relação ao natural de 64%, e o ângulo de atrito indo de 27 até 33 graus. O peso específico do solo saturado foi de 15,6 até 17,4 kN/m<sup>3</sup>.

Na análise de estabilidade na condição natural, quatro seções apresentaram perigo de ruptura, com o FS de 1,22, 1,38, 1,16 e 1,20, e uma ruptura na Rua Parau,

com o FS igual a 1. Com superfícies geralmente localizadas em pontos de grande declividade da encosta.

Para a análise da estabilidade na condição saturada, as seções Córrego da Telha e Parau resultaram no FS de 0,96 e 0,93 respectivamente, apresentando ruptura. As seções Beta, Brumal e Uruaí tiveram seu FS de 1,08, 1,12 e 1,06 respectivamente, na iminência de romper, e abaixo do 1,5 estabelecido por norma.

A simulação da seção Córrego da Telha na condição de saturação gradual das camadas, apresentou o FS=0,96 quando foram saturadas as camadas de aterro de areia, argila com alta compressibilidade, areia argilosa, silte com baixa compressibilidade e areia siltosa, com a cunha de ruptura majoritariamente na camada de areia siltosa. Porém a simulação aponta que o talude está na iminência de romper ao alcançar a saturação da camada de silte com baixa compressibilidade com o FS=1,01, com uma cunha que passa as camadas de argila de alta compressibilidade, areia argilosa e silte com baixa compressibilidade.

A análise da seção Rua Brumal, na condição de saturação gradual, temos que o fator de segurança mínimo se mantém constante entre as saturações, com o FS=1,12 igual a condição de saturação completa ao saturar as camadas de aterro de areia, argila com alta compressibilidade e areia argilosa. A cunha de ruptura final está majoritariamente na camada de argila siltosa, passando pelas camadas de areia argilosa e aterro de areia.

Todas as análises de estabilidade apontam que a encosta está em risco de ruptura, que pode ser explicado em parte, pela inclinação acentuada na geometria das seções utilizadas na estabilidade. Essa inclinação é proveniente da retirada das seções topográficas ao longo de ruas e escadarias, que é um fator não considerado neste estudo.

## **5.2 Sugestões para pesquisas futuras**

1. Analisar a estabilidade considerando fatores extras aos utilizados neste estudo, como a presença de escadarias e ruas impermeabilizadas;
2. Fazer o estudo da estabilidade com o solo saturado em campo, com a retirada de amostras após as chuvas;

3. Realizar pesquisas com mais ensaios de campo e laboratório, para cobrir outras áreas não estudadas da encosta, e obter um conhecimento mais detalhado de toda a encosta;
4. Estudar as correlações dos parâmetros do solo com o  $N_{spt}$  para a região da Formação Barreiras, com o objetivo de obter valores mais precisos para estudos na região;
5. Propor soluções de estabilização de encostas para as regiões que apresentaram instabilidade;
6. Estudar a redução do fator de segurança pela infiltração da chuva, através de métodos mais atuais na análise de estabilidade de taludes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. O. de. **Estudo geotécnico e análise de estabilidade da encosta Bela Vista no município de Ipojuca-PE**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13602**: Solo: Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo: Ensaio de dispersão SCS. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm: Determinação da massa específica, da massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484**: Solo: Sondagem de simples reconhecimento com SPT: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: Solos e rochas: Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BANDEIRA, A. P. N. **Parâmetros técnicos para gerenciamento de áreas de risco de escorregamentos de encostas na Região Metropolitana do Recife**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2010.

BEZERRA, J. M. B. **Caracterização da Formação Barreiras da Cidade de João Pessoa com base em sondagens SPT e estudo geotécnico de uma encosta com alto risco de deslizamento**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2018.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**, volume 1: fundamentos. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2015.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**: mecânica das rochas, fundações e obras de terra, volume 2. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2015.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. **Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas**. Ler Comunicação. Brasília: [s.n.], 2006.

CHUGH, A. K. **Variable interslice force inclination in slope stability analysis**. Soils and Foundation, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 26, No. 1, 1986. p. 115-121.

DAS, B. M. **Advanced soil mechanics**. 5. ed. Nova York: CRC Press, 2019.  
FIORI, A. P. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 3. ed. São Paulo: Livros Oficina de Textos, 2015.  
GERSCOVICH, D. M. S. Estabilidade de taludes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GUIDICINE, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1983.

IPCC (2023). **Climate Change 2023**: Synthesis Report. Sexto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Genebra, Suíça: IPCC, 2023. p. 35-115.

JOPPERT JUNIOR, I. **Fundações e contenções em edifícios**: qualidade total na gestão do projeto e execução. 1. ed. São Paulo: PINI, 2007.

LAFAYETTE, K. P. V. **Comportamento geomecânico de solos de uma topossequência na Formação Barreiras em uma encosta na área urbana do Recife-PE**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2000.

LIMA, A. F. **Comportamento geomecânico e análise de estabilidade de uma encosta de Formação Barreiras na área urbana da Cidade do Recife**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2002.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MELO, C. R. de. **Utilização de informações espaciais de alta resolução para Análise de suscetibilidade de deslizamento sob situação de Precipitações intensas**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2021.

MORAIS, A. D. de. **Propriedades geotécnicas de sedimentos da Formação Barreiras e análise de estabilidade de falésias considerando a condição não saturada: estudo de caso em Barra de Tabatinga/RN**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2020.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. **The analysis of the stability of general slip surfaces**. *Geotechnique*, Vol. 15, No. 1, 1965, p. 77-93.

RECIFE. Prefeitura do Recife. **Caracterização do território**. [S.l.]: Prefeitura do Recife. Disponível em: <https://www2.recife.pe.gov.br/pagina/caracterizacao-do-territorio#:~:text=Composi%C3%A7%C3%A3o%20da%20%C3%A1rea%20territorial%3A%2067,Clima%3A%20tropical%2D%C3%BAmido>. Acesso em: 11 maio, 2024.

SANTANA, J. K. R. **Análise evolutiva da ocupação dos morros da cidade do Recife**. In: Simpósio Nacional de Geografia Urbana, 16., 2019, Vitória-ES. Anais do XVI SIMPURB.

SILVA, J. P. M. **Os métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na análise de estabilidade de taludes**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2011.

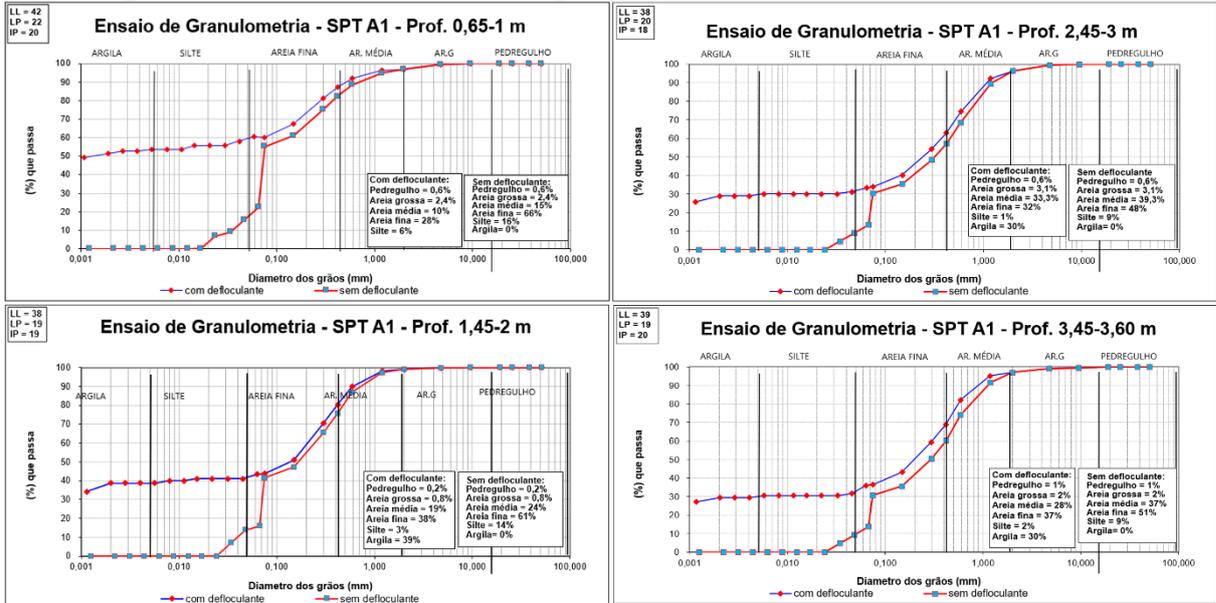
SOUZA NETO, D. P. de. **Estudos geotécnicos de um aterro de solos da Formação Barreiras na Região Metropolitana do Recife**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2016.

SPENCER, E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Geotechnique*, Vol. 17, No. 1, 1967, p. 11-26.

VARNES, D. J. **Slope movement types and processes**. Special Report, 1978, p. 11-33.

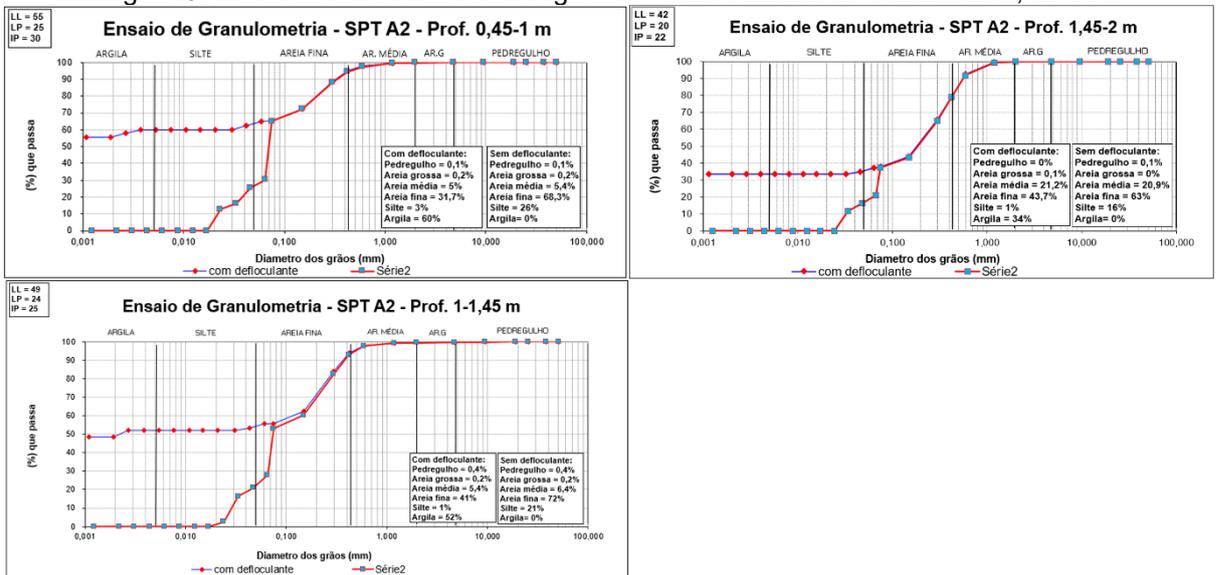
## ANEXO A – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA E LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Figura 51 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT A1



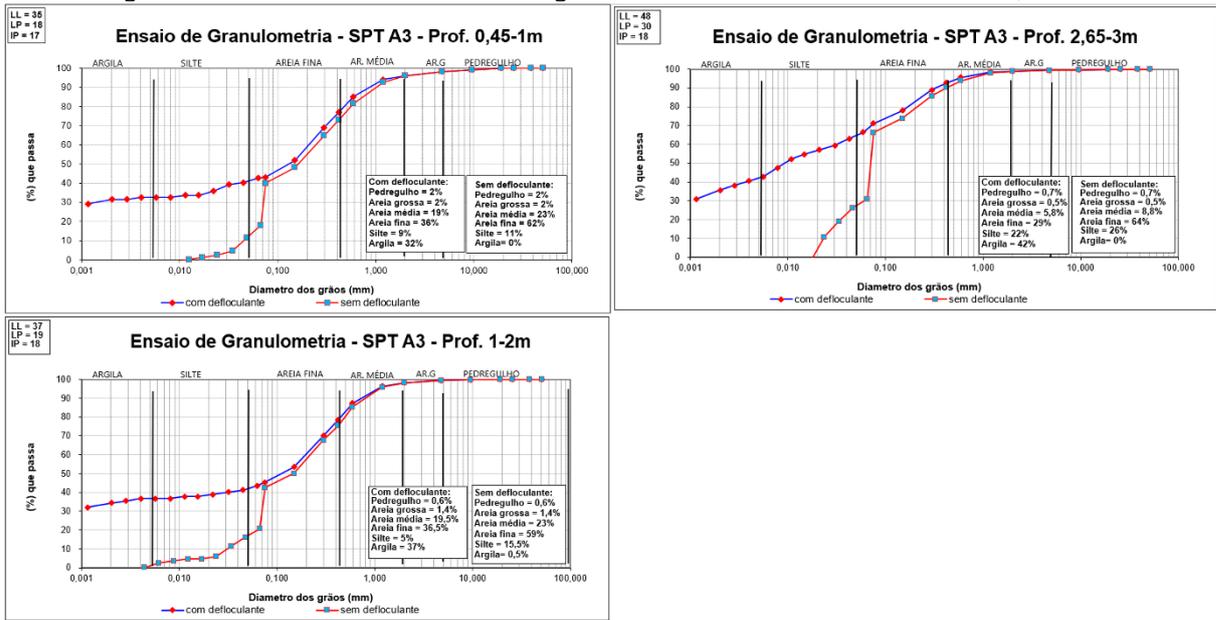
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 52 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT A2



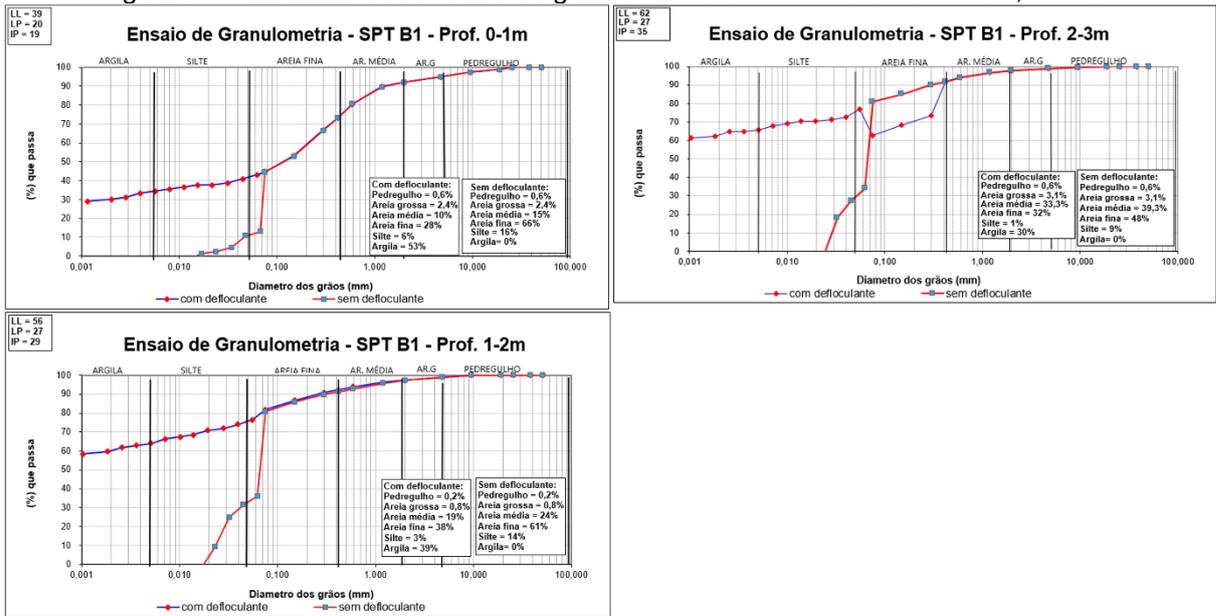
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 53 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT A3



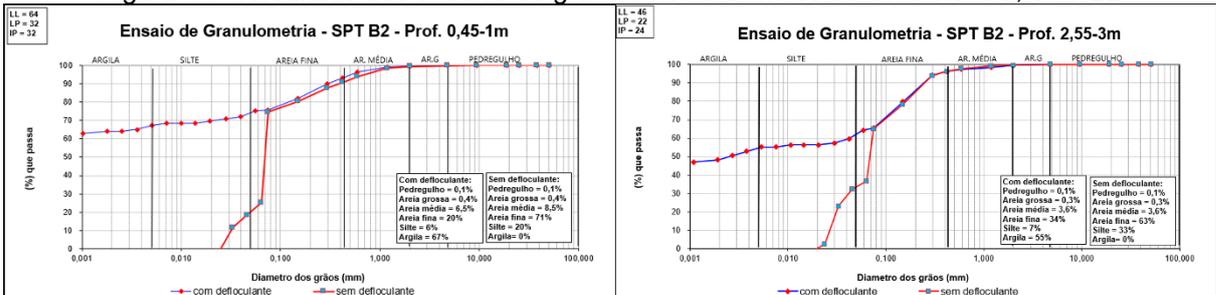
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 54 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT B1



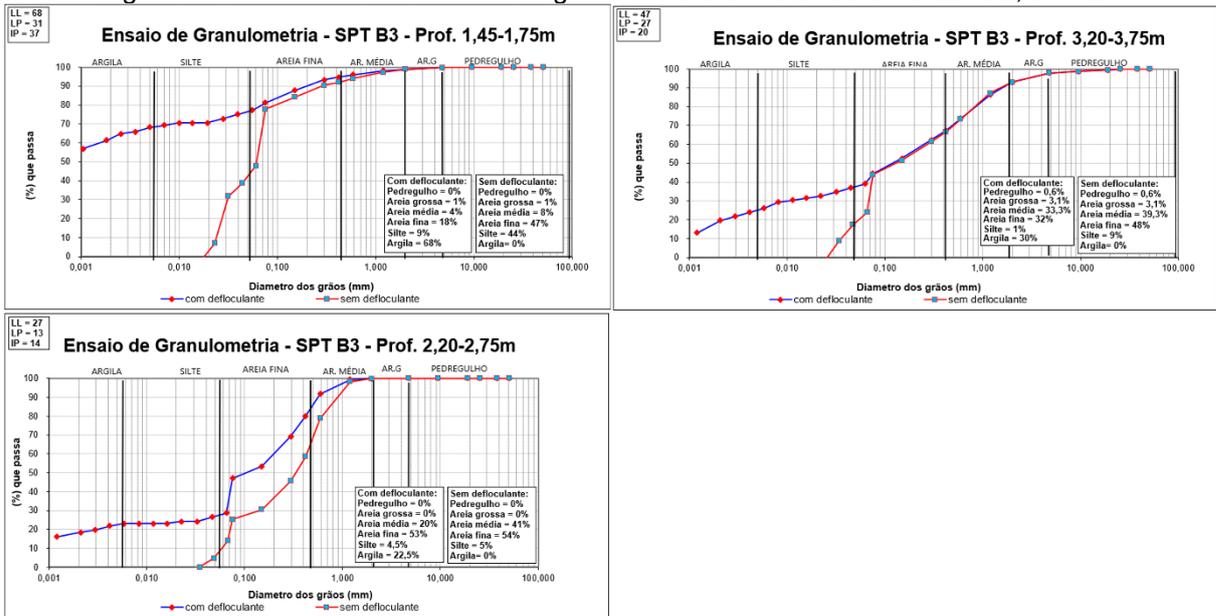
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 55 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT B2



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

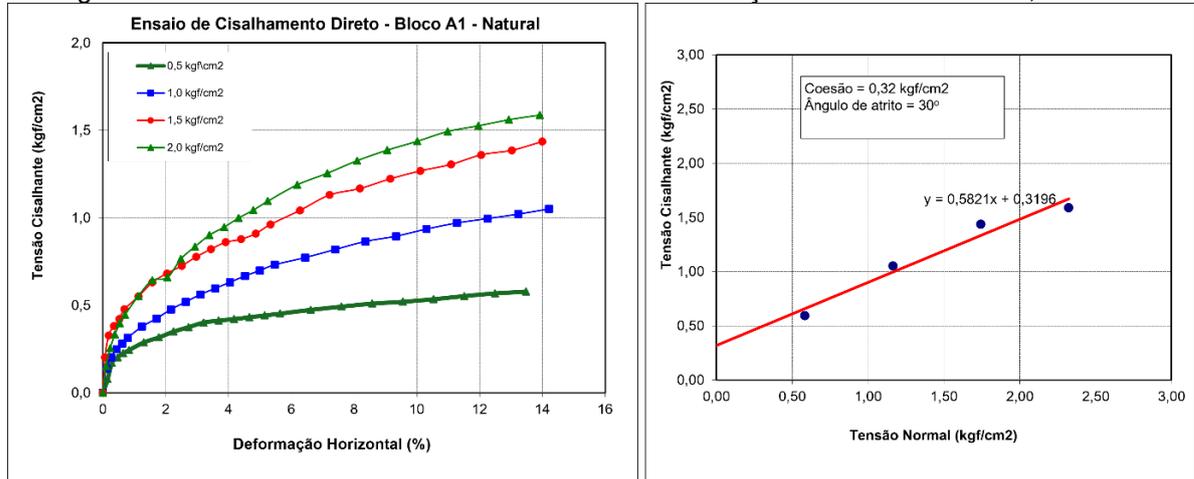
Figura 56 - Resultado dos ensaios de granulometria e limites de consistência, SPT B3



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

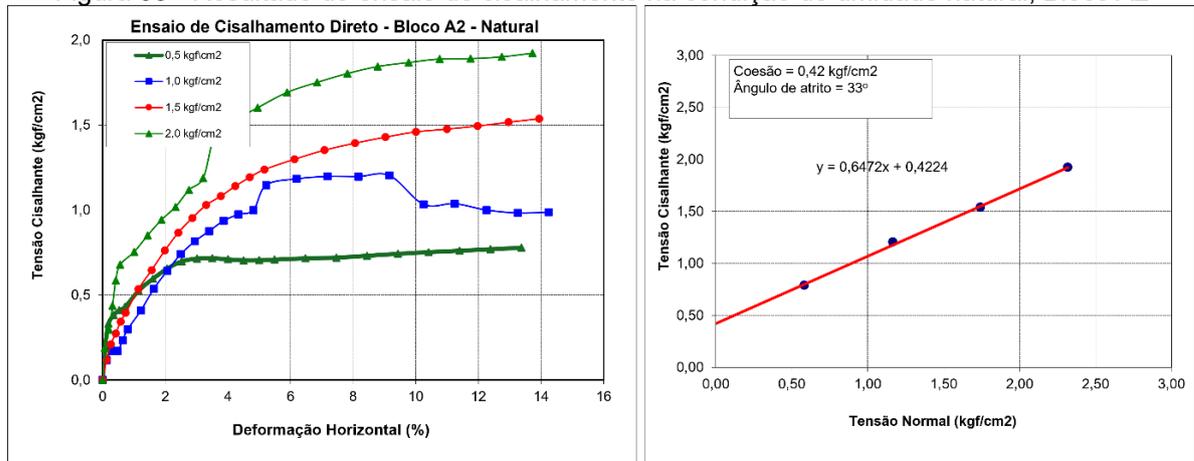
## ANEXO B – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO NA CONDIÇÃO NATURAL

Figura 57 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade natural, Bloco A1



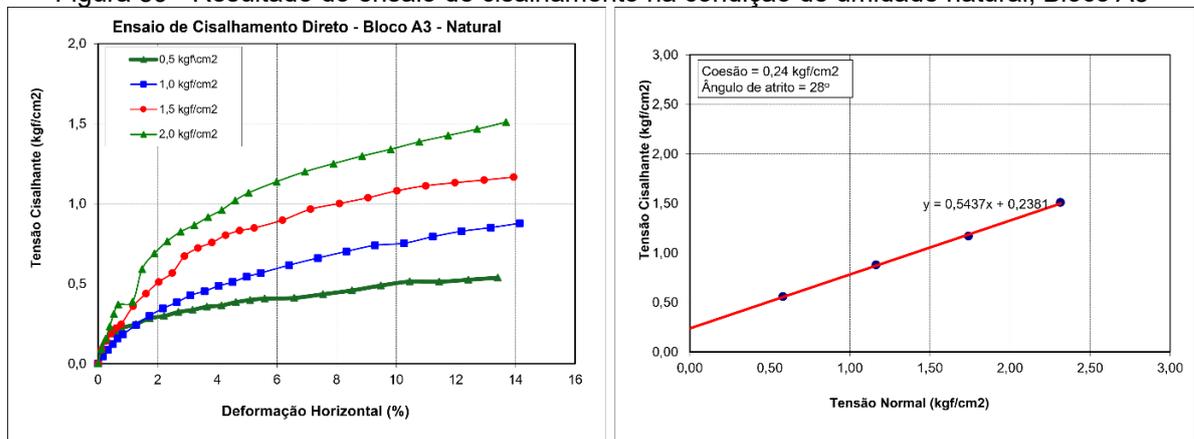
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 58 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade natural, Bloco A2



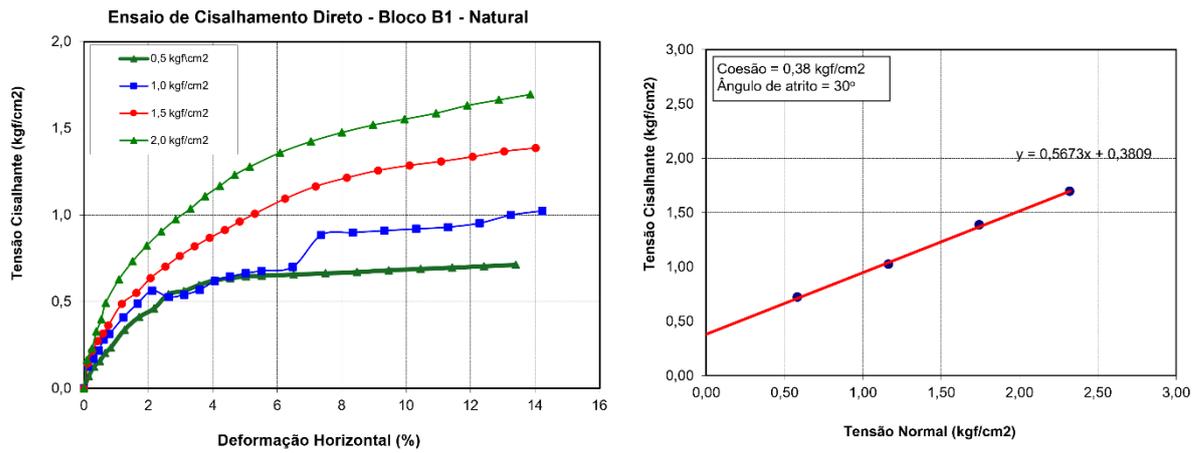
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 59 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade natural, Bloco A3



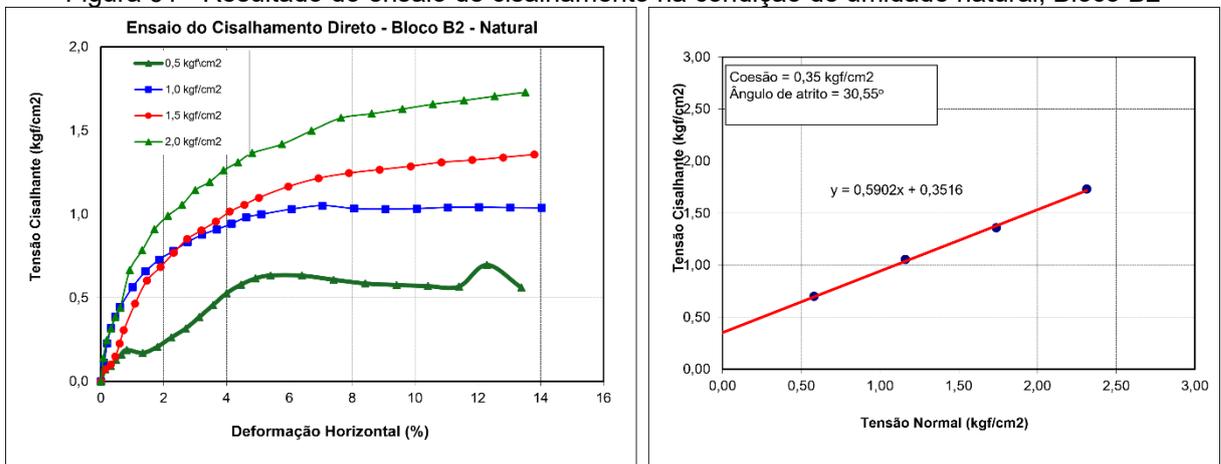
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 60 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade natural, Bloco B1



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

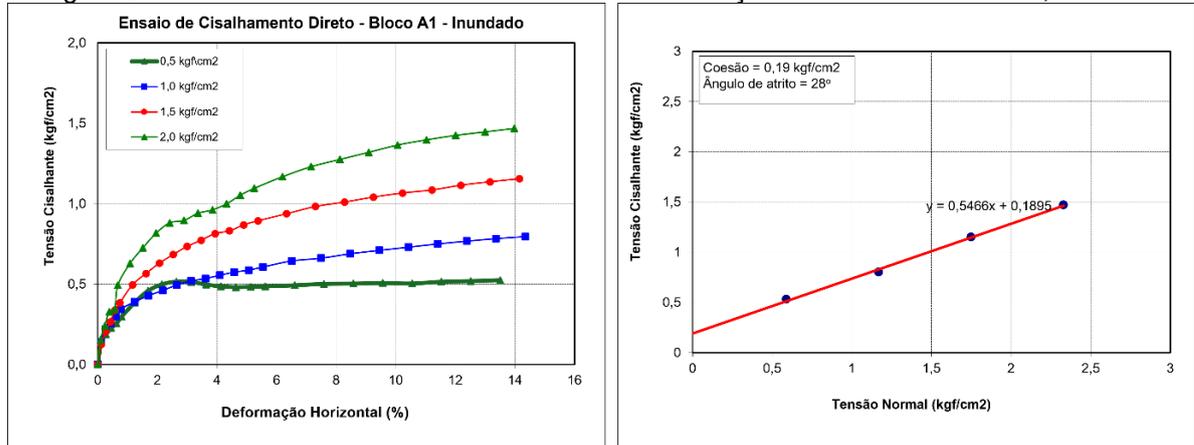
Figura 61 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade natural, Bloco B2



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

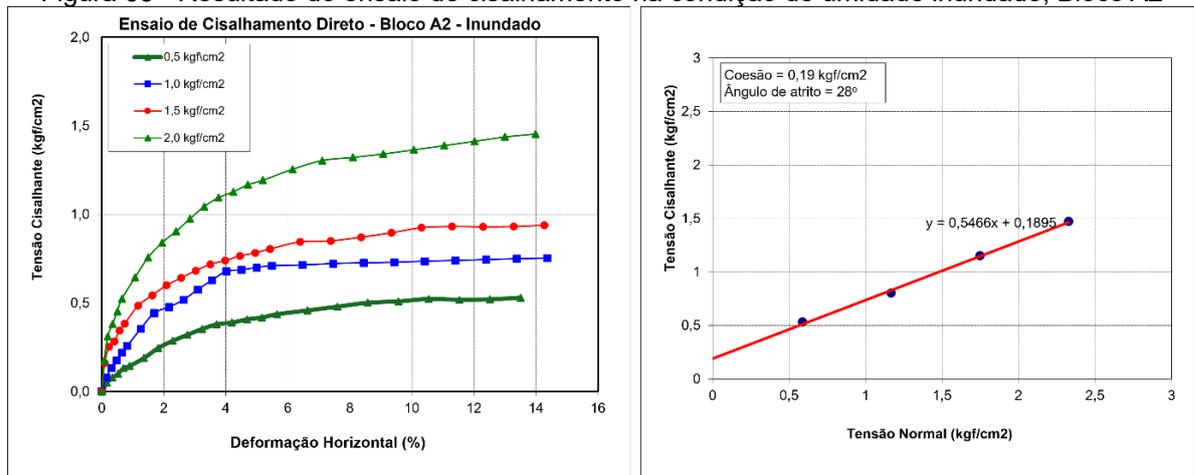
## ANEXO C – GRÁFICOS DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO NA CONDIÇÃO INUNDADO

Figura 62 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco A1



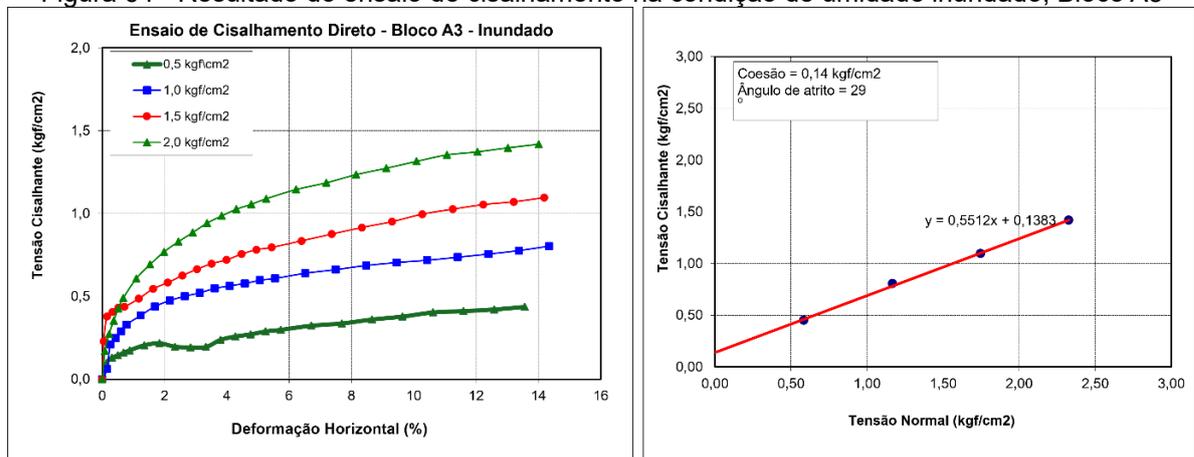
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 63 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco A2



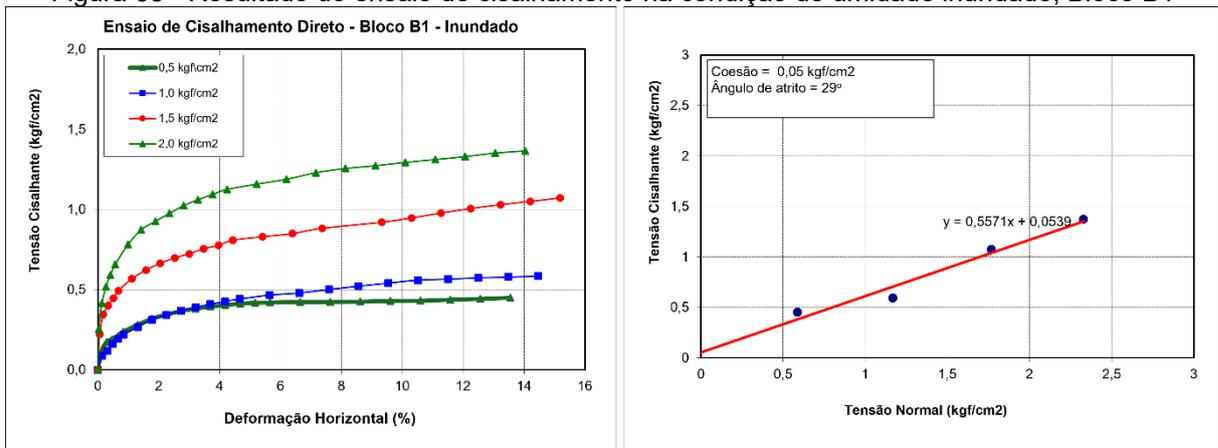
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 64 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco A3



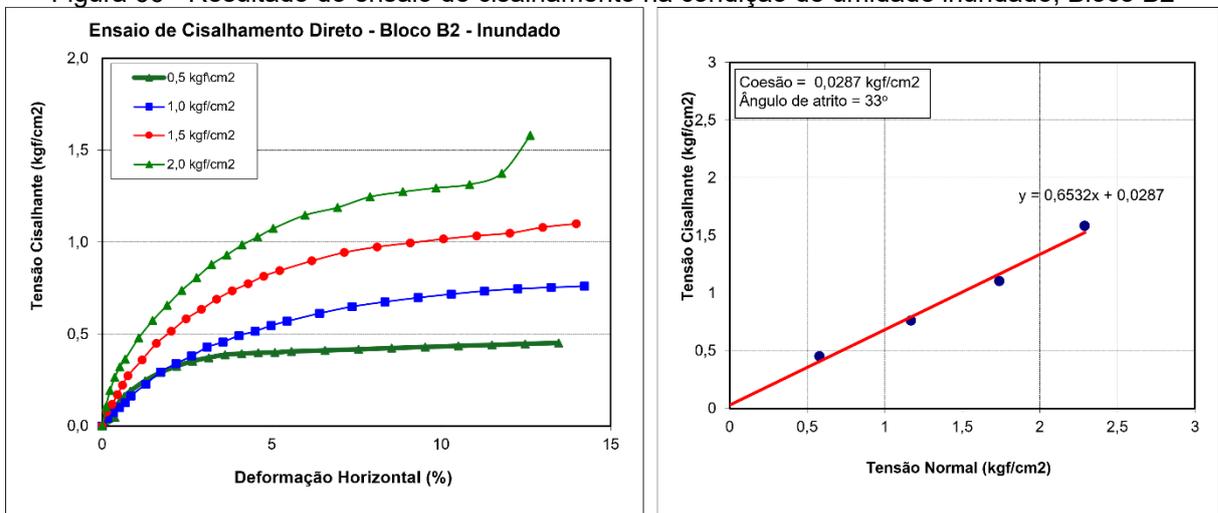
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 65 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco B1



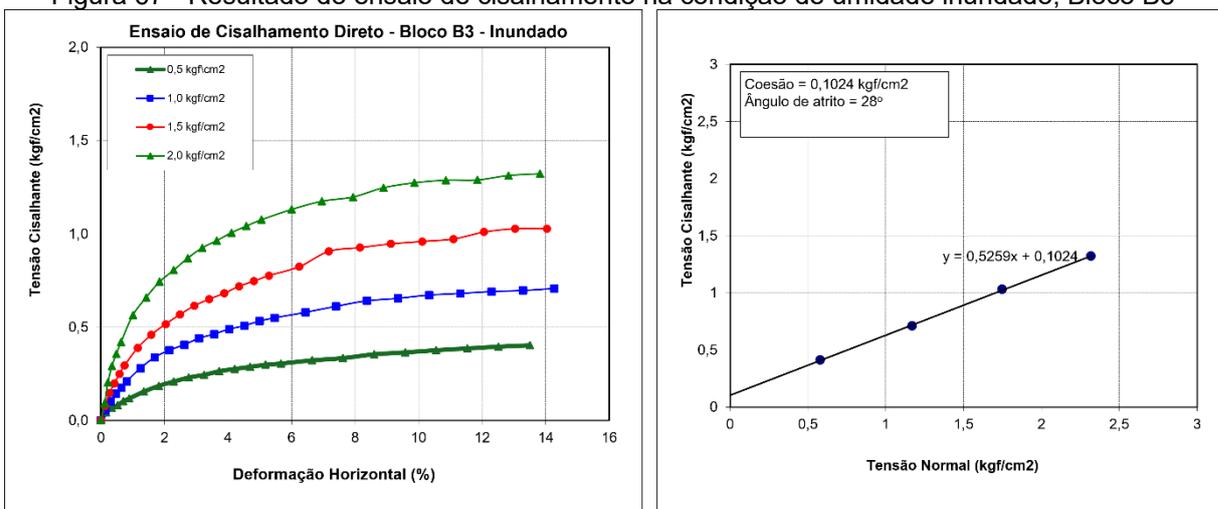
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 66 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco B2



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

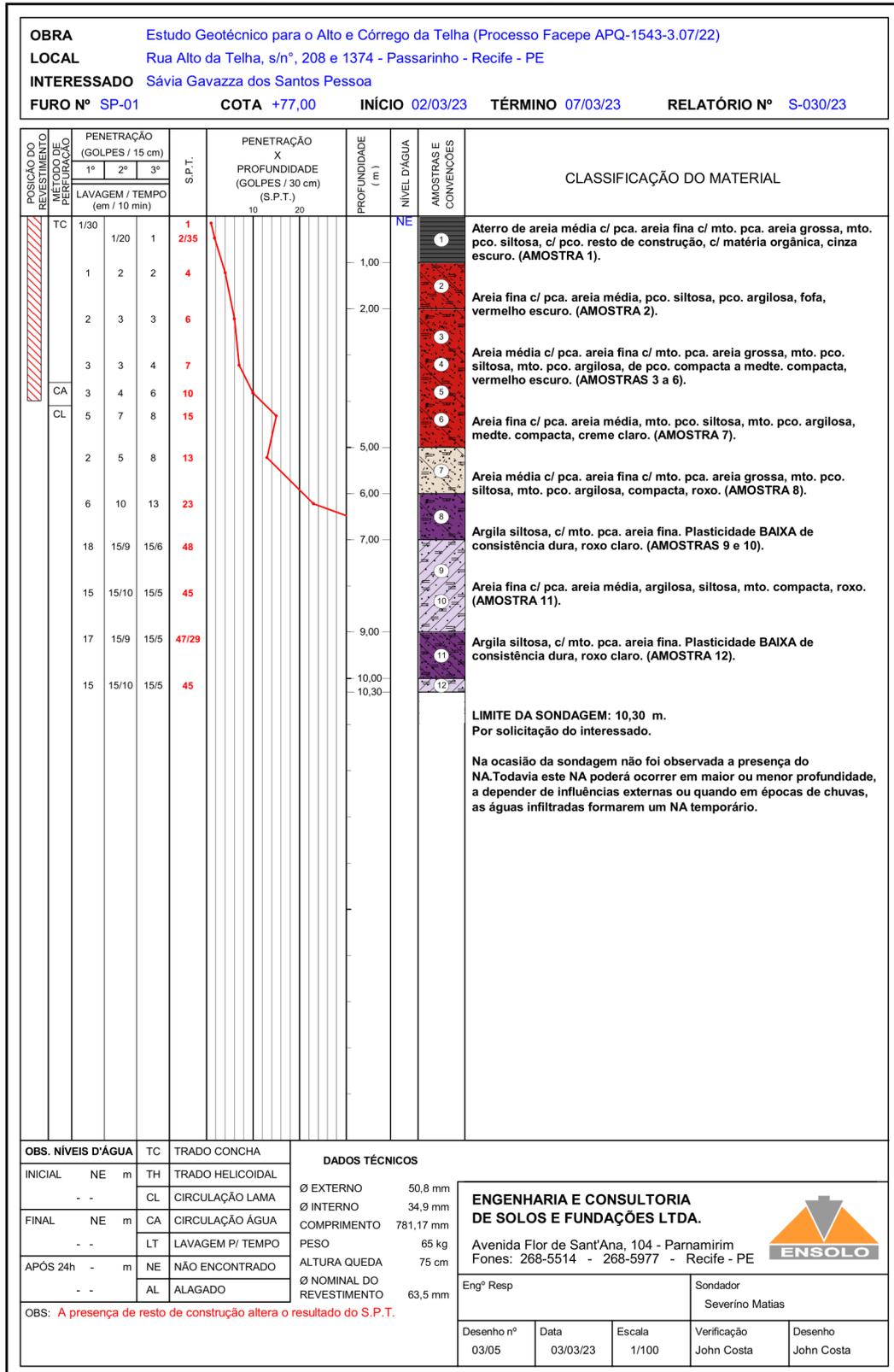
Figura 67 - Resultado do ensaio de cisalhamento na condição de umidade inundado, Bloco B3



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

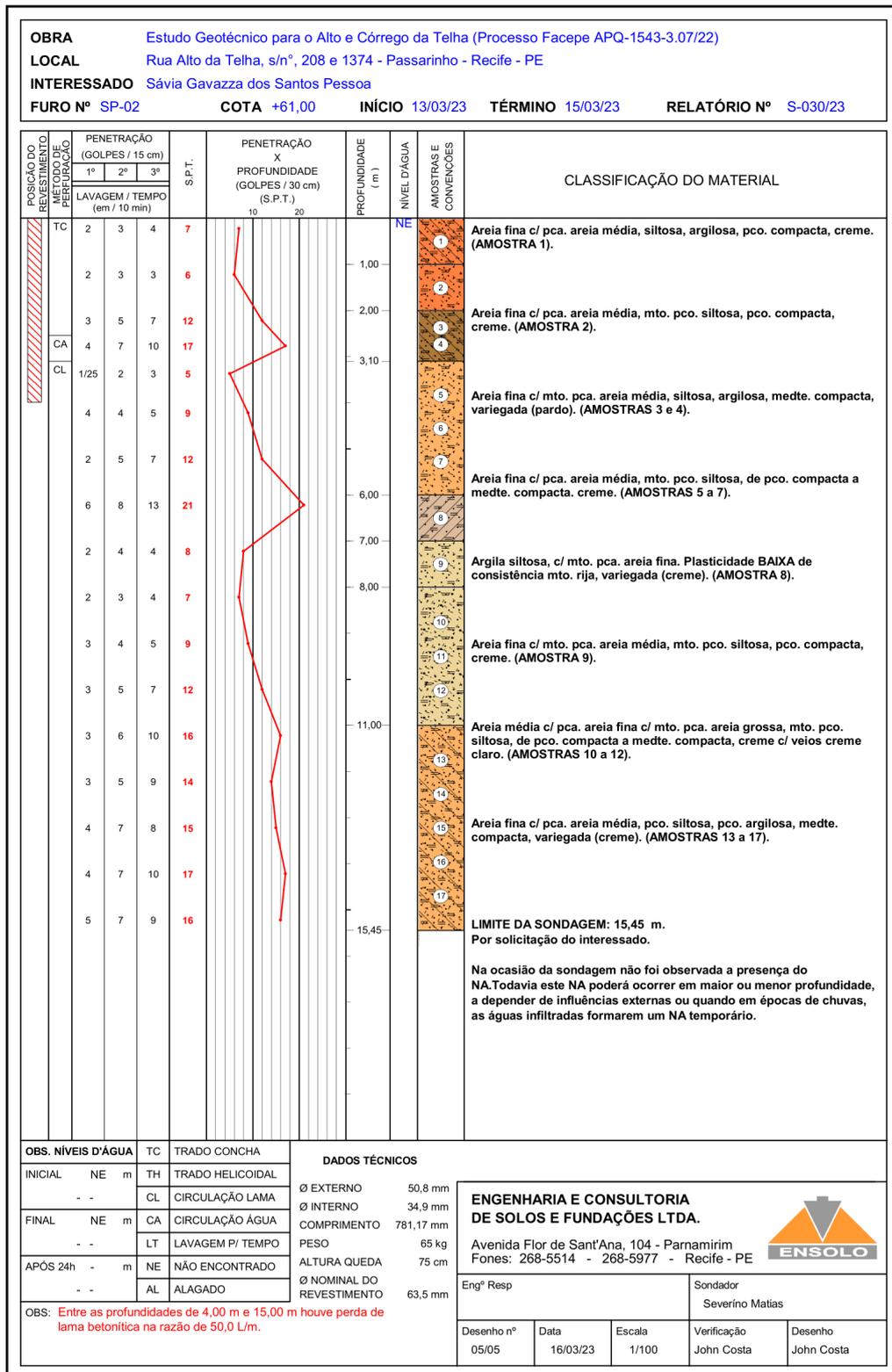
**ANEXO D – RELATÓRIOS DOS FUROS DE SONDAGEM A PERCUSSÃO**

Figura 68 - Relatório da sondagem SPT-A1



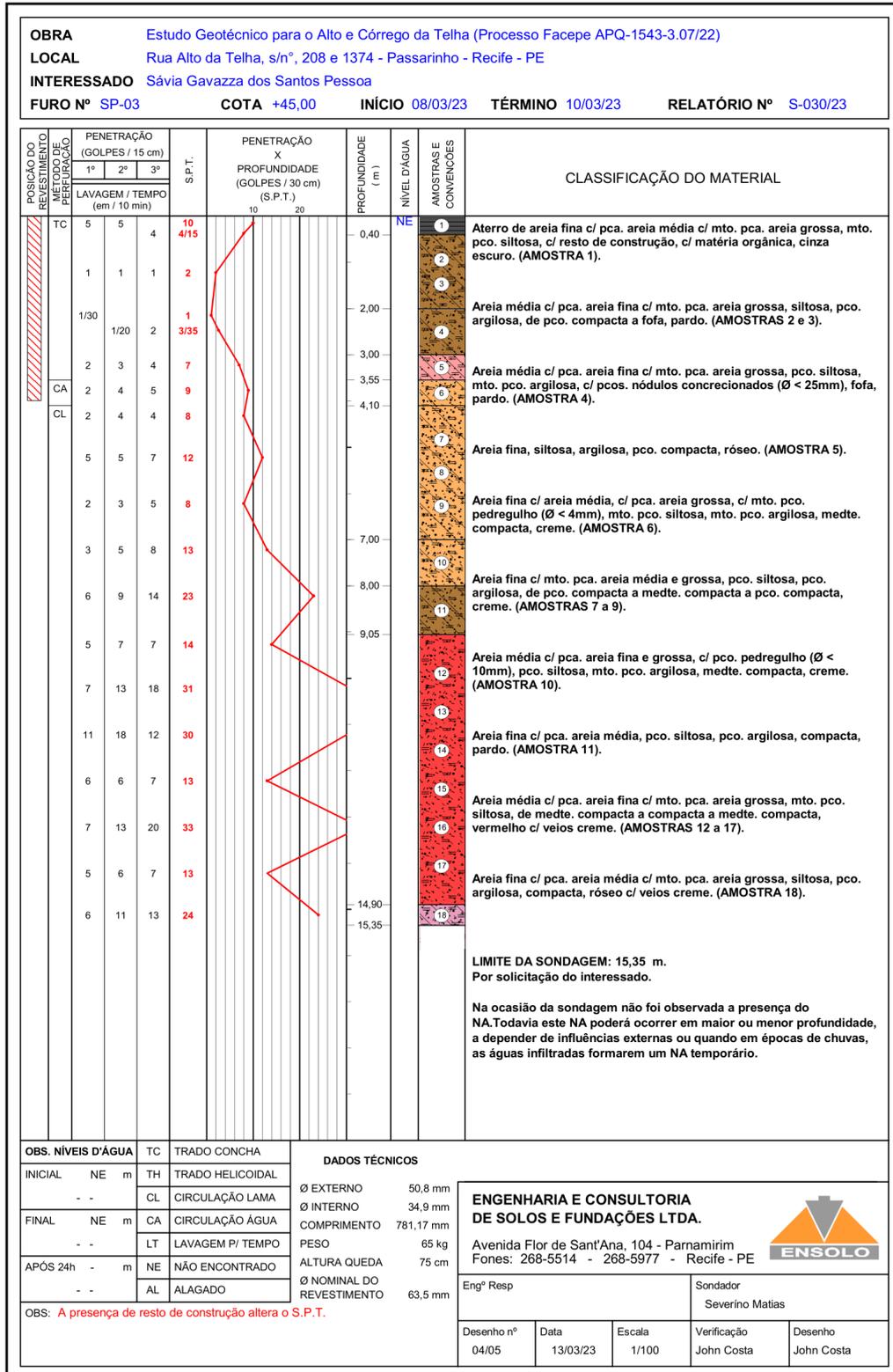
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 69 - Relatório da sondagem SPT-A2



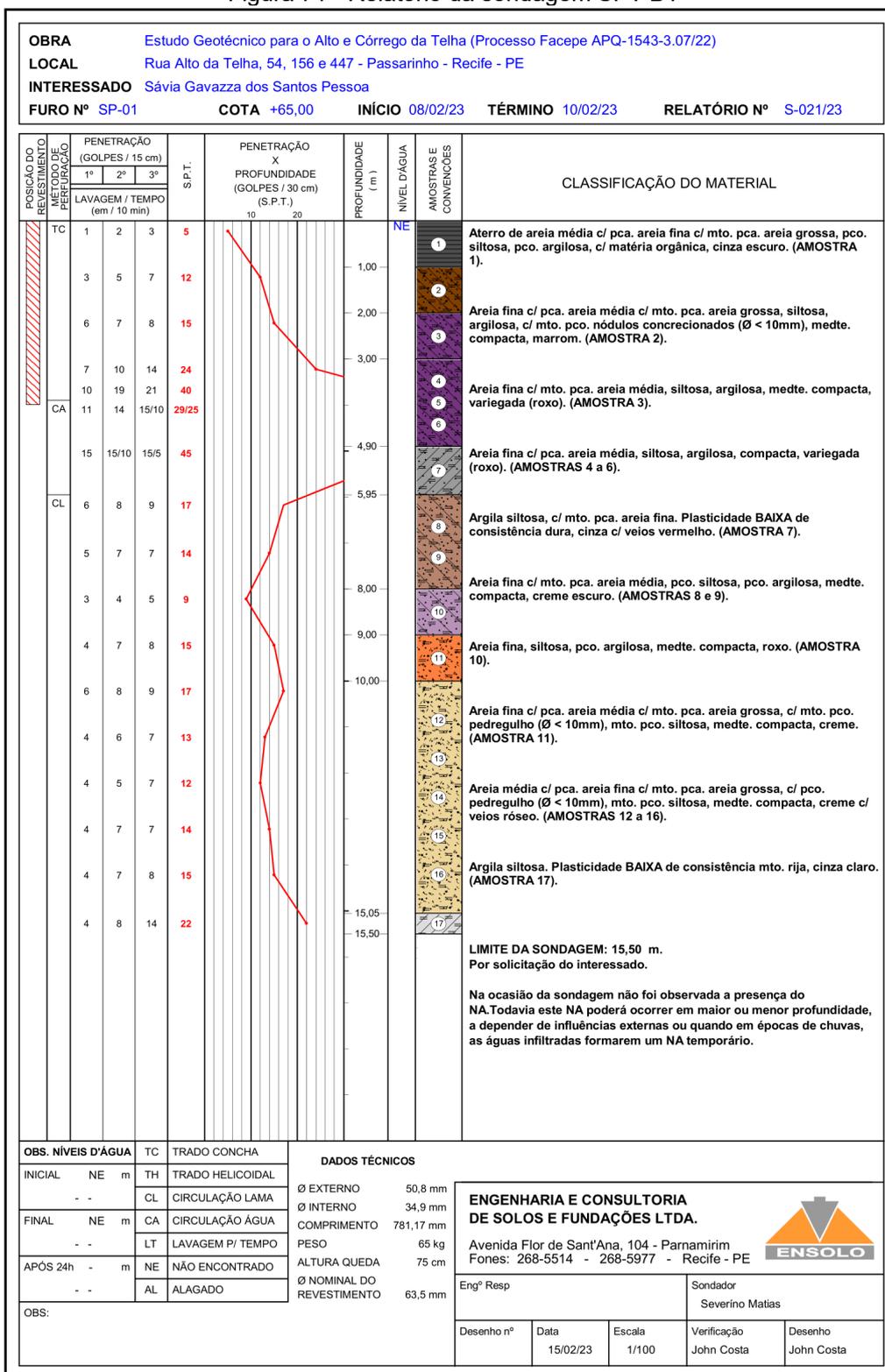
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 70 - Relatório da sondagem SPT-A3



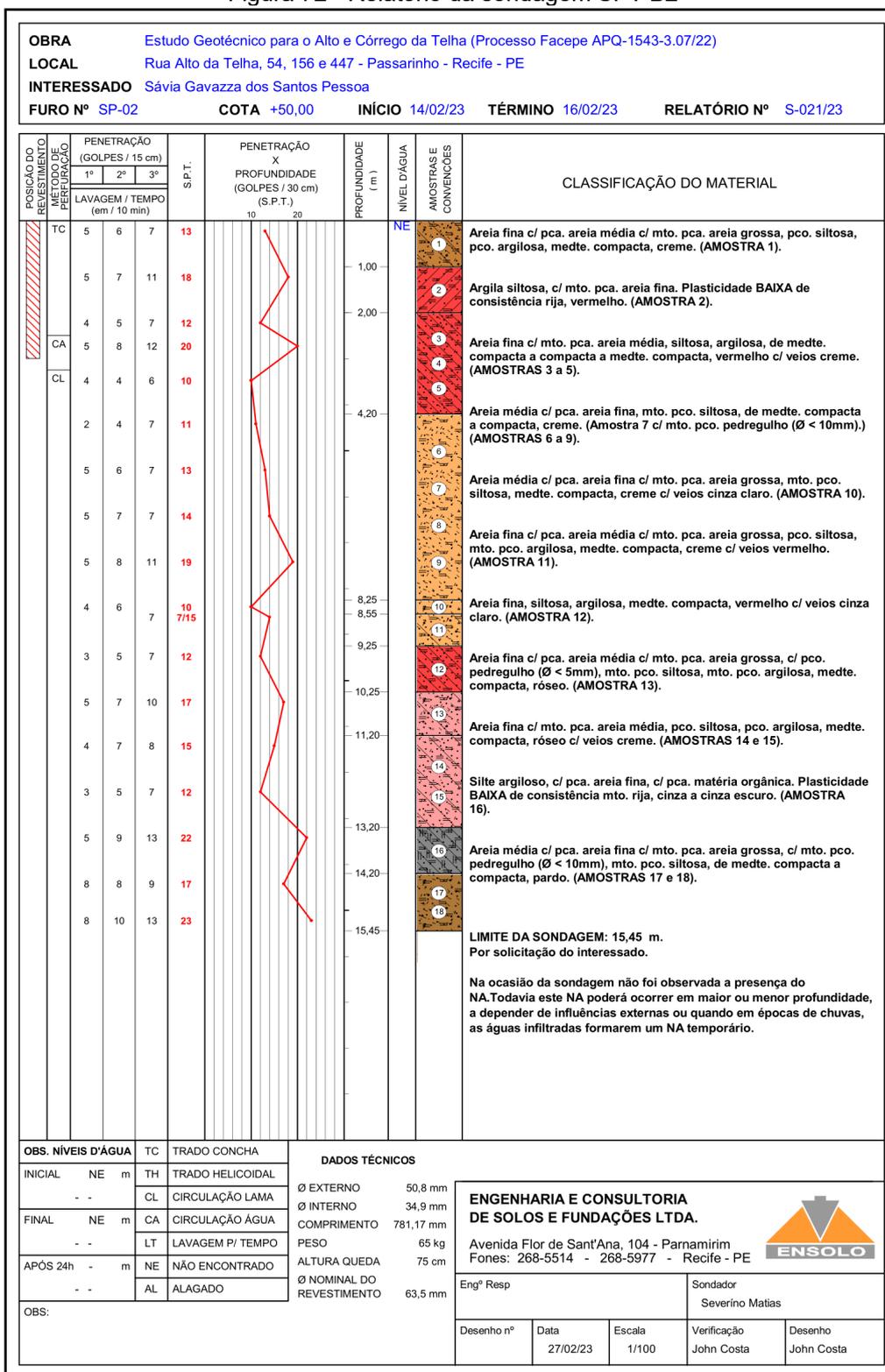
Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 71 - Relatório da sondagem SPT-B1



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 72 - Relatório da sondagem SPT-B2



Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).

Figura 73 - Relatório da sondagem SPT-B3

OBRA		Estudo Geotécnico para o Alto e Córrego da Telha (Processo Facepe APQ-1543-3.07/22)											
LOCAL		Rua Alto da Telha, 54, 156 e 447 - Passarinho - Recife - PE											
INTERESSADO		Sávia Gavazza dos Santos Pessoa											
FURO Nº	SP-03	COTA	+44,00	INÍCIO	24/02/23	TÉRMINO	28/02/23	RELATÓRIO Nº	S-021/23				
POSICÃO DO REVESTIMENTO PERFORAÇÃO	PENETRAÇÃO (GOLPES / 15 cm)	S.P.T.			PENETRAÇÃO X PROFUNDIDADE (GOLPES / 30 cm) (S.P.T.)	PROFUNDIDADE (m)	NÍVEL D'ÁGUA	AMOSTRAS E CONVENÇÕES	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL				
		1º	2º	3º									
LAVAGEM / TEMPO (em / 10 min)													
TC	1/30	2	4	1		0,30	NE	1	Aterro de areia fina c/ pca. areia média c/ mto. pca. areia grossa, siltosa, pco. argilosa, c/ mto. pco. resto de construção, marrom. (AMOSTRA 1).				
	5	7	11	18		1,75	2	Areia fina c/ mto. pca. areia média, siltosa, argilosa, de pco. compacta a medte. compacta, variegada (vermelho escuro). (AMOSTRAS 2 e 3).					
	5	6	8	14		2,75	3	Areia fina c/ pca. areia média, pco. siltosa, mto. pco. argilosa, medte. compacta, variegada (creme.) (AMOSTRA 4).					
	2	3	4	5		3,05	4	Areia média c/ pca. areia fina c/ mto. pca. areia grossa, c/ mto. pco. pedregulho (Ø < 6mm), mto. pco. siltosa, pco. compacta, creme. (AMOSTRA 5).					
	3	3	4	7		3,75	5	Argila siltosa, c/ pca. areia fina. Plasticidade BAIXA de consistência média, variegada (vermelho escuro). (AMOSTRA 6).					
	3	6	9	15		5,85	6	Areia fina, siltosa, argilosa, de pco. compacta a medte. compacta, vermelho c/ veios cinza claro. (AMOSTRAS 7 e 8).					
	3	5	8	13		6,90	7	Areia média c/ pca. areia fina c/ mto. pca. areia grossa, c/ mto. pco. pedregulho (Ø < 5mm), siltosa, pco. argilosa, medte. compacta, variegada (creme). (AMOSTRA 9).					
	5	7	10	17		7,95	8	Areia média c/ pca. areia fina c/ mto. pca. areia grossa, mto. pco. siltosa, medte. compacta, creme. (AMOSTRA 10).					
	4	7	8	15		9,00	9	Silte argiloso, c/ pca. areia fina. Plasticidade BAIXA de consistência rija, róseo. (AMOSTRA 11).					
	6	7	8	15		10,00	10	Areia média c/ pca. areia fina c/ mto. pca. areia grossa, mto. pco. siltosa, de medte. compacta a compacta a medte. compacta, variegada (róseo). (AMOSTRAS 12 a 15).					
	10	10	16	26		11,00	11	Areia média c/ pca. areia fina c/ mto. pca. areia grossa, pco. siltosa, pco. argilosa, medte. compacta, vermelho. (AMOSTRA 16).					
	8	12	17	29		12,00	12	Areia média c/ pca. areia fina c/ mto. pca. areia grossa, mto. pco. siltosa, mto. compacta, creme. (AMOSTRA 17).					
	6	6	5	11		13,00	13	Areia média c/ pca. areia fina, mto. pco. siltosa, mto. pco. argilosa, medte. compacta, creme. (AMOSTRA 18).					
	4	6	8	14		14,00	14	LIMITE DA SONDAÇÃO: 15,10 m. Por solicitação do interessado.					
	20	15/7	15/5	50/27		14,65	15	Na ocasião da sondagem não foi observada a presença do NA. Todavia este NA poderá ocorrer em maior ou menor profundidade, a depender de influências externas ou quando em épocas de chuvas, as águas infiltradas formarem um NA temporário.					
	2	5	6	11		15,10	16						
	OBS. NÍVEIS D'ÁGUA		TC	TRADO CONCHA		DADOS TÉCNICOS		<b>ENGENHARIA E CONSULTORIA DE SOLOS E FUNDAÇÕES LTDA.</b> Avenida Flor de Sant'Ana, 104 - Parnamirim Fones: 268-5514 - 268-5977 - Recife - PE 					
	INICIAL	NE m	TH	TRADO HELICOIDAL		Ø EXTERNO	50,8 mm						
-	-	CL	CIRCULAÇÃO LAMA		Ø INTERNO	34,9 mm							
FINAL	NE m	CA	CIRCULAÇÃO ÁGUA		COMPRIMENTO	781,17 mm							
-	-	LT	LAVAGEM P/ TEMPO		PESO	65 kg							
APÓS 24h	- m	NE	NÃO ENCONTRADO		ALTURA QUEDA	75 cm							
-	-	AL	ALAGADO		Ø NOMINAL DO REVESTIMENTO	63,5 mm							
OBS: A presença de resto de construção altera o resultado do S.P.T.							Engº Resp	Sondador Severino Matias					
Desenho nº	Data	Escala	Verificação	Desenho									
	03/03/23	1/100	John Costa	John Costa									

Fonte: Projeto Morro de Vontade (2023).