

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO



GUILHERME FERNANDO CAVALCANTI PEREIRA

**ANÁLISE GEOMECÂNICA DE DUAS ENCOSTAS NO MUNICÍPIO DE IPOJUCA -
PE**

RECIFE-PE

2020

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO

Guilherme Fernando Cavalcanti Pereira

**ANÁLISE GEOMECÂNICA DE DUAS ENCOSTAS NO MUNICÍPIO DE IPOJUCA -
PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação da Universidade Católica de Pernambuco, como requisito parcial para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.º Dr. Joaquim Teodoro
Romão de Oliveira

Co-Orientador: Prof.º Dr. Sílvio Romero
de Melo Ferreira

Recife
2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE GEOMECÂNICA DE DUAS ENCOSTAS NO MUNICÍPIO DE IPOJUCA - PE

GUILHERME FERNANDO CAVALCANTI PEREIRA

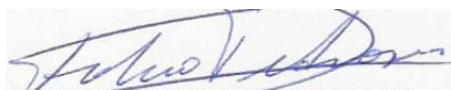
Aprovado em 28/08/2020

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira - UNICAP

(Orientador)



Prof. Dr. Fábio José de Araújo Pedrosa - UNICAP

(Avaliador Interno)



Prof.^a Dr.^a Kalinny Patrícia Vaz Lafayette - UPE

(Avaliador Externo)

P434a Perei, Guilherme Fernando Cavalcanti.
Análise geomecânica de duas encostas no município de Ipojuca - PE / Guilherme Fernando Cavalcanti Perei, 2020.
152 f. : il.

Orientador: Joaquim Teodoro Romão de Oliveira.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia Civil, 2020.

1. Taludes (Mecânica do solo) - Ipojuca.
2. Solos - Compactação - Ipojuca. I. Título.

CDU 624.131(81)

Pollyanna Alves - CRB-4/1002

DEDICATÓRIA

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Católica de Pernambuco, pelo excelente quadro docente, direção e administração que mantém este curso como referência no estado e pelas instalações onde foram desenvolvidos os ensaios de laboratório. A Universidade Federal de Pernambuco, por ceder o espaço físico para execução e desenvolvimento de alguns dos ensaios realizados.

Ao meu orientador Prof.º Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira, pelo incentivo e suporte no pouco tempo que lhe coube e pelas suas correções. Ao meu co-orientador Prof. Dr. Sílvio Romero de Melo Ferreira.

Aos meus pais que tornaram meu sonho realidade, transformar-me em Mestre em Engenharia Civil, sem eles nada disso seria possível.

Ao meu Tio Marne Pereira (*in memoriam*) Médico Veterinário e Professor Universitário entusiasta da Ciência nacional e um dos fundadores da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) e da Universidade para o Desenvolvimento do Estado e da Região do Pantanal (UNIDERP) por sempre me estimular e demonstrar interesse no meu percurso acadêmico e profissional.

Aos laboratoristas da UFPE Francisco, Antônio Brito e Gutemberg, e a Leandro da UNICAP, os quais me deram grande suporte técnico na elaboração e execução dos ensaios previstos. Ao Mestre e Engenheiro Civil Alfredo, e também meu amigo.

Aos órgãos públicos, Prefeitura e Defesa Civil de Ipojuca-PE, pois me forneceram diversos dados e apoio logístico quando requisitados.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar com mais inteligência.”

(Henry Ford)

RESUMO

O município de Ipojuca-PE é cercado de morros ocupados de maneira irregular desordenada e indiscriminadamente. Possui o terceiro maior PIB do Estado de Pernambuco com grande relevância socioeconômica para o Estado. O presente trabalho visa analisar o comportamento geomecânico dos solos de dois taludes da Formação Ipojuca no centro urbano da cidade. A investigação geotécnica de campo constou de coleta de amostras indeformadas e amolgadas, determinação da condutividade hidráulica e de voo panorâmico no centro urbano utilizando um *drone*. Em laboratório foram realizados ensaios de caracterização física, química e mineralógica, determinação da curva característica, condutividade hidráulica, edométricos duplos, ensaios de cisalhamento direto com sucções iniciais. Foi também analisada a estabilidade da encosta, com a utilização do programa Slope/W. Os solos são constituídos de areia argilosa, siltes e argilas de alta e baixa plasticidade, apresentam capacidade de troca de cátions e atividade baixas. É verificada a presença de quartzo, sendo o Riolito a rocha matriz. A mineralogia da fração argila é a Caulinita e a curva característica dos solos é unimodal e bimodal. O acréscimo de umidade causa redução na coesão variando de 5-80 kPa com o aumento da umidade, enquanto, o ângulo de atrito é pouco influenciado variando de 15-23°. A superfície potencial de deslizamento, no período do inverno é mais superficial com um fator de segurança próximo de 1,0.

Palavras-chave: Formação Ipojuca; Ipojuca; talude; estabilidade.

ABSTRACT

The municipality of Ipojuca-PE is surrounded by irregularly and indiscriminately occupied hills. It has the third largest GDP in the State of Pernambuco with great socioeconomic relevance for the State. The present work aims to analyze the geomechanical behavior of the soils of two slopes of the Ipojuca Formation in the urban center of the city. The field geotechnical investigation consisted of collecting undisturbed and dented samples, determining hydraulic conductivity and panoramic flight in the urban center using a drone. In the laboratory tests were carried out for physical, chemical and mineralogical characterization, determination of the characteristic curve, hydraulic conductivity, double edometrics, direct shear tests with initial suctions. The slope stability was also analyzed using the Slope / W program. The soils are made up of clay sand, silts and clays of high and low plasticity, have low cation exchange capacity and activity. The presence of quartz is verified, with Riolite being the matrix rock. The mineralogy of the clay fraction is kaolinite and the characteristic curve of the soils is unimodal and bimodal. The increase in humidity causes a reduction in cohesion ranging from 5-80 kPa with increasing humidity, while the friction angle is little influenced, varying from 15-23 °. The potential sliding surface in the winter is more superficial with a safety factor close to 1.0.

Keywords: Ipojuca Formation; Ipojuca; slope; stability.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Mapa de localização do município | 26 |
| Figura 2 – Talude natural, de corte e de aterro | 29 |
| Figura 3 – Alterações dos índices pluviométricos no Brasil (2090-2099)..... | 32 |
| Figura 4 – Casa destruída após deslizamento de terra em San Fratello (ITA)..... | 33 |
| Figura 5 – Deslizamento no Morro do Bumba (Niterói – RJ)..... | 34 |
| Figura 6 – Queda de árvores em Porto Alegre | 34 |
| Figura 7 – Variabilidade espacial obtida através do TRMM para os dias 17 e 18/06/2010 | 35 |
| Figura 8 – Casas destruídas após inundações | 36 |
| Figura 9 – Quedas de árvores em ruas do Recife | 36 |
| Figura 10 – Pátio de São Pedro alagado (Centro do Recife) | 37 |
| Figura 11 – Rio Una transbordando na cidade de Barreiros | 37 |
| Figura 12 – Fluxograma de riscos | 39 |
| Figura 13 –Bairro Los Corales em Vargas (VEN)..... | 41 |
| Figura 14 – Deslizamento em Kahit (TJK)..... | 42 |
| Figura 15 – Deslizamento de terras em Maceió..... | 43 |
| Figura 16 – Deslizamento de terra em Nova Friburgo (RJ)..... | 43 |
| Figura 17 – Estação do Metrô de Cavaleiro (Jaboatão dos Guararapes – PE)..... | 43 |
| Figura 18 – Alto do Reservatório em Nova Descoberta (Recife-PE)..... | 44 |
| Figura 19 – Local do Deslizamento no Bairro do Ibura (Recife-PE)..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 20 – Número de desastres naturais envolvendo o clima (1995-2015) | 45 |
| Figura 21 – Tendências no número de desastres por categoria (geofísica e clima) – 1995/2015 | 46 |
| Figura 22 – Percentual de desastres naturais por tipo (1995-2015)..... | 46 |
| Figura 23 – Número de pessoas afetadas por desastres naturais | 47 |
| Figura 24 – Morros situados em Casa Amarela, Beberibe e Água Fria, bairros do Recife | 50 |
| Figura 25 – Movimentos de Massa (1980-2017) nos Estados do Nordeste..... | 51 |
| Figura 26 – Mapa de Declividade de Ipojuca-PE | 56 |
| Figura 27 – Formação Ipojuca composta por Traquitos (a) e Riolitos (b)..... | 58 |
| Figura 28 – Coluna estratigráfica da Região Metropolitana do Recife | 58 |
| Figura 29 – Mapa geológico de Ipojuca-PE | 59 |
| Figura 30 – Histórico de Precipitações (médias mensais) nas cidades de Ipojuca, Sirinhaém e Rio formoso (1941-2018) | 61 |
| Figura 31 – Mapa geomorfológico de Ipojuca-PE | 63 |
| Figura 32 – Mapa pedológico de Ipojuca-PE | 64 |
| Figura 33 – Locação dos pontos do programa de investigação geotécnica relativos ao Talude 1 | 68 |
| Figura 34 - Locação dos pontos do programa de investigação geotécnica relativos ao Talude 2 | 69 |
| Figura 35 – Locação dos pontos de coleta de amostras | 71 |
| Figura 36 – Poço de Investigação | 73 |
| Figura 37 – Moldagem de caixas de cisalhamento | 73 |
| Figura 38 – Anéis de sucção em processo de saturação | 75 |

| | |
|--|----|
| Figura 39 – Disposição do papel filtro | 75 |
| Figura 40 – Esquema de funcionamento do Permeômetro Guelph..... | 77 |
| Figura 41 – Partes do trado usado no ensaio de campo | 78 |
| Figura 42 – Tubo transparente | 78 |
| Figura 43 – Equipamento pronto para uso | 79 |
| Figura 44 – Tri-Flex II utilizado para determinação da condutividade hidráulica em laboratório | 80 |
| Figura 45 – Amostras no dessecador a vácuo | 82 |
| Figura 46 – Curvas Granulométricas dos solos dos Taludes 1 e 2 | 84 |
| Figura 47 – Potencial de Expansão pelo critério de Skempton (1953) e Van Der Merwe (1964)..... | 86 |
| Figura 48 – Potencial de Expansão pelo critério de Daksanamurthy e Raman (1973) | 87 |
| Figura 49 – Difratomogramas das amostras do Talude 1 | 90 |
| Figura 50 – Umidade volumétrica versus Sucção para a amostra P4 (Topo do Talude)..... | 92 |
| Figura 51 – Umidade volumétrica versus Sucção para a amostra P2 (Meio do Talude)..... | 92 |
| Figura 52 – Umidade volumétrica versus Sucção para a amostra P1 (Base do Talude)..... | 93 |
| Figura 53 – Umidade volumétrica versus Sucção para a amostra P7 (Topo do Talude)..... | 94 |
| Figura 54 – Umidade volumétrica versus Sucção para a amostra P6 (Meio do Talude)..... | 94 |
| Figura 55 – Umidade volumétrica versus Sucção para a amostra P5 (Base do Talude)..... | 95 |

| | |
|---|-----|
| Figura 56 – Coeficiente de permeabilidade <i>versus</i> Tensão efetiva, Talude 1..... | 99 |
| Figura 57 – Coeficiente de permeabilidade <i>versus</i> Tensão efetiva, Talude 2..... | 99 |
| Figura 58 – Índice de vazios x Tensão efetiva; Deformação volumétrica x Tensão efetiva para as amostras do Talude 1..... | 102 |
| Figura 59 – Índice de vazios x Tensão efetiva; Deformação volumétrica x Tensão efetiva para as amostras do Talude 2..... | 104 |
| Figura 60 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P4 (Topo do Talude 1)..... | 107 |
| Figura 61 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto para a amostra P3 (Meio do Talude 1, argila amarelada)..... | 109 |
| Figura 62 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P2 (Meio do Talude 1, argila avermelhada)..... | 110 |
| Figura 63 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P1 (Base do Talude 1)..... | 111 |
| Figura 64 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P7 (Topo do Talude 2)..... | 113 |
| Figura 65 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P6 (Meio do Talude 2)..... | 114 |
| Figura 66 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P5 (Base do Talude 2)..... | 116 |
| Figura 67 – Representação do subsolo, furos SP-01 e SP-03..... | 118 |
| Figura 68 – Representação do subsolo, furos SP-02 e SP-04..... | 119 |

| | |
|--|-----|
| Figura 69 - Representação do subsolo furos SP-05 e SP-06..... | 120 |
| Figura 70 – Representação do Talude 1 em 3D..... | 121 |
| Figura 71 – Representação do Talude 2 em 3D..... | 121 |
| Figura 72 – QR code da série histórica da Rua Ver. Antônio Bonifácio (1974-2019)..... | 122 |
| Figura 73 – Imagem panorâmica da Rua Ver. Antônio Bonifácio (Centro) e construções desordenadas no topo da encosta..... | 123 |
| Figura 74 – Árvores com raízes profundas e lonas plásticas..... | 123 |
| Figura 75 – Análise de estabilidade da seção 1, Talude 1..... | 124 |
| Figura 76 – Análise de estabilidade da seção 2, Talude 1..... | 124 |
| Figura 77 – Construções irregulares e desordenadas no talude situada à direita da R Ver. Antônio Bonifácio; e árvores de grande porte, edificações posicionadas em regiões de risco..... | 127 |
| Figura 78 – Análise de estabilidade do Talude 2..... | 127 |
| Figura 79 – Fator de Segurança x Sobrecarga para o Talude 1 – Método de Bishop..... | 129 |
| Figura 80 – Fator de Segurança x Sobrecarga para o Talude 2 – Método de Bishop..... | 129 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Classificação dos tipos de movimentos gravitacionais de massa | 30 |
| Tabela 2 – Resumo da classificação de movimentos de massa | 30 |
| Tabela 3 – Eventos naturais extremos de acordo com a origem..... | 32 |
| Tabela 4 – Principais causas dos movimentos de massa | 48 |
| Tabela 5 – Agentes/causas dos escorregamentos..... | 49 |
| Tabela 6 – Resumo do Programa de Investigação geológico-geotécnica..... | 52 |
| Tabela 7 – Fator de segurança e condições de estabilidade do talude ou encosta .. | 53 |
| Tabela 8 – Principais métodos de estabilidade de taludes..... | 54 |
| Tabela 9 – Área e População Total, em Áreas de Morro e Planície, por municípios. | 55 |
| Tabela 10 – Resumo das características geológicas de Ipojuca..... | 60 |
| Tabela 11 – Unidades litoestratigráfica de Ipojuca-PE..... | 63 |
| Tabela 12 – Índice de Desenvolvimento Humano Médio | 66 |
| Tabela 13 – Programa de investigação geotécnica em campo e em laboratório realizado na Rua Ver. Antônio Bonifácio, Centro - Ipojuca-PE..... | 69 |
| Tabela 14 – Nomenclatura dos pontos..... | 71 |
| Tabela 15 – Localização e quantidade das amostras para os Taludes 1 e 2..... | 72 |
| Tabela 16 – Equações utilizadas para determinação dos parâmetros e do coeficiente de condutividade hidráulica <i>in situ</i> | 79 |
| Tabela 17 – Granulometria, consistência e atividade referente as amostras dos Taludes 1 e 2..... | 83 |
| Tabela 18 – Granulometria, Plasticidade e Atividade em outros estudos | 85 |
| Tabela 19 – Resumo do potencial de expansão do solo estudado | 87 |
| Tabela 20 – Caracterização Química dos Solos do Talude 1 | 88 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 21 – Caracterização Química dos Solos do Talude 2 | 88 |
| Tabela 22 – Relação Umidade x Sucção | 91 |
| Tabela 23 – Valores de k , α e $H(\%)$ | 97 |
| Tabela 24 – Valores de tensão vertical (σ), tempo de ensaio (Δt) e condutividade hidráulica (k) para as amostras de ambos os taludes | 97 |
| Tabela 25 – Dados dos Ajustes..... | 98 |
| Tabela 26 – Relação dos valores da condutividade hidráulica e tipos de materiais.. | 99 |
| Tabela 27 – Permeabilidade do solo da Formação Barreiras do Estado de Pernambuco..... | 100 |
| Tabela 28 – Índices e tensões das amostras dos Taludes 1 e 2..... | 101 |
| Tabela 29 – Módulos edométricos dos solos do Talude 1 | 103 |
| Tabela 30 – Módulos edométricos dos solos do Talude 2 | 105 |
| Tabela 31 – Índice de Vazios de alguns solos de Pernambuco e Rio Grande do Norte | 105 |
| Tabela 32 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto das amostras do Talude 1 | 106 |
| Tabela 33 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto das amostras para o Talude 2 | 112 |
| Tabela 34 – Parâmetros de resistência do solo de estudos anteriores | 117 |
| Tabela 35 – Dados de entrada dos solos utilizados na análise de estabilidade..... | 122 |
| Tabela 36 – Fator de segurança para diferentes métodos de cálculo de estabilidade do Talude 1 (Seção 1)..... | 125 |
| Tabela 37 – Fator de segurança para diferentes métodos de cálculo de estabilidade do Talude 1 (Seção 2)..... | 126 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 38 – Fator de segurança para diferentes métodos de cálculo de estabilidade do Talude 2 (Seção 1)..... | 128 |
|--|-----|

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AASTHO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al – Alumínio

AMBS – Associação Brasileira de Mecânica dos Solos

ASTM – American Society for Testing and Materials

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Climas

CETENE – Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste

CONPDEC - Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil

CPRH – Agência Estadual de Meio Ambiente

CRED – Centro para Pesquisas sobre Epidemiologia e Desastres

CONDEPE/FIDEM – Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco

COT – Carbono Orgânico Total

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

DRX – Difração de Raios-X

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EM-DAT – Banco de Dados Internacional de Desastres

Fe – Ferro

FS – Fator de Segurança

GEGEP – Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ITEP – Instituto de Tecnologia de Pernambuco

K – Potássio

LA - Latossolos

LabGeo – Laboratório de Geotecnia

LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica

Na - Sódio

pH – Potencial Hidrogeniônico

S2ID – Sistema Integrado de Informações sobre Desastres

Si - Sílica

U.F.P.E – Universidade Federal de Pernambuco

UNICAP – Universidade Católica de Pernambuco

USP – Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

°C – graus Celsius

m/cm/mm – metro, centímetro, milímetro

e – índice de vazios

N / S / NE / CO / SE – norte, sul, nordeste, centro-oeste, sudeste

m², m³ – metro quadrado, metro cúbico

un – unidade

s - segundos

h – hora

kCal/h.m.°C – condutibilidade térmica

pç – peça

kgf – kilo-grama força

kPa, MPa – kilo Pascal, Mega Pascal

% - percentual

ψ – sucção

γ_g – peso específico do grão

γ_s – peso específico seco

σ - tensão

2λ – comprimento de onda

μ - densidade

D – Darcy

K – Coeficiente de Permeabilidade

E_{eod} – Módulo Edométrico

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO | 25 |
| 1.1. Objetivos | 27 |
| 1.2. Estrutura da Dissertação | 27 |
| CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 29 |
| 2.1. Tipos de Movimentos | 29 |
| 2.2. Eventos Extremos de Precipitação e Deslizamento de Encostas | 31 |
| 2.3. Riscos Geológicos | 38 |
| 2.4. Histórico de Escorregamentos no Brasil e no Mundo | 41 |
| 2.5. Causas e Fatores influentes | 47 |
| 2.5.1. Chuvas | 49 |
| 2.5.2. Ação Antrópica | 50 |
| 2.6. Investigação Geotécnica para Estabilização de Talude | 51 |
| 2.7. Métodos de Análise de Estabilidade | 53 |
| 2.8. Características Geológicas, Geomorfológicas e Pedológicas do Solo de Ipojuca-PE | 54 |
| 2.8.1. Geologia | 55 |
| 2.8.2. Geomorfologia | 61 |
| 2.8.3. Pedologia | 64 |
| 2.9. Histórico de Deslizamento em Ipojuca-PE | 65 |
| 2.9.1. Histórico do crescimento urbano e populacional do Município de Ipojuca-PE | 65 |
| 2.9.2. Processo de Urbanização de Ipojuca | 66 |
| CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 68 |
| 3.1. Investigação Geotécnica | 70 |
| 3.1.1. Sondagem de Reconhecimento | 70 |
| 3.2. Imagens Aéreas Realizadas com <i>Drone</i> | 70 |

| | |
|---|------------|
| 3.3. Coleta de Amostras | 70 |
| 3.3.1. Caracterização Física do Solo | 74 |
| 3.3.2. Caracterização Química do Solo..... | 74 |
| 3.3.3. Caracterização Mineralógica do Solo..... | 74 |
| 3.4. Determinação da Curva Característica do Solo..... | 74 |
| 3.5. Condutividade Hidráulica | 76 |
| 3.5.1. Condutividade avaliada em campo | 76 |
| 3.5.2. Condutividade avaliada em laboratório | 80 |
| 3.6. Compressibilidade do Solo | 81 |
| 3.7. Resistência ao Cisalhamento..... | 81 |
| | |
| CAPÍTULO 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 83 |
| | |
| 4.1. Caracterização Física | 83 |
| 4.1.1. Granulometria e Peso Específico dos Grãos | 83 |
| 4.1.2. Limites de Consistência | 85 |
| 4.2. Caracterização Química | 88 |
| 4.3. Caracterização Mineralógica | 89 |
| 4.4. Relação Sucção/Umididade | 91 |
| 4.5. Condutividade Hidráulica | 96 |
| 4.5.1. Condutividade Hidráulica em campo | 96 |
| 4.5.2. Tri-Flex II..... | 97 |
| 4.6. Avaliação da Compressibilidade..... | 100 |
| 4.6.1. Endométrio Duplo | 100 |
| 4.7. Resistência ao Cisalhamento..... | 106 |
| 4.8. Estratigrafia..... | 117 |
| 4.9. Análise da Estabilidade das Encostas | 120 |
| 4.10. Análise do Comportamento do Solo..... | 129 |
| | |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DA PESQUISA..... | 131 |
| | |
| 5.1. Sugestões para continuação da pesquisa..... | 132 |

| | |
|---|-----|
| REFERÊNCIAS | 132 |
| APÊNDICE A – Resultados dos Ajustes da Curva Característica | 143 |
| APÊNDICE B - Índices físicos e condições iniciais e finais das amostras de solo na condição natural e saturada, Ensaio do Edométrico Duplo | 146 |
| ANEXO A – Resultados das Sondagens fornecidas pela Prefeitura de Ipojuca | 148 |

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

A análise do comportamento geomecânico dos taludes no município de Ipojuca-PE é de extrema importância porque é uma das 15 cidades que forma a Região Metropolitana do Recife (RMR) e que sofre com o processo de ocupação antrópica desordenada nas áreas de morros, causando problemas de movimentação de massa nas encostas. Sendo o Brasil um dos países que mais sofrem com desastres naturais mais especificamente com as precipitações intensas e os deslizamentos de massa (CRED e UNISDR, 2015). A problemática da movimentação de massa no país é muito complexa devido à ocupação de regiões mais elevadas, os morros.

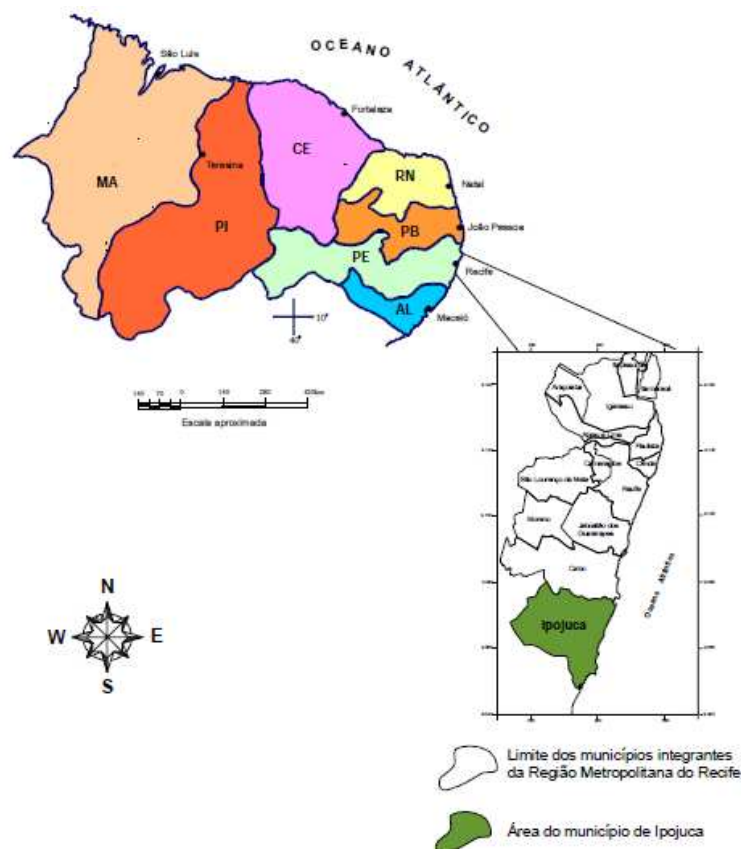
A desigualdade de renda per capita e a escassez de terras em regiões mais planas, fez com que ocorresse a ocupação e o crescimento desordenado nas regiões de encostas, gerando vários problemas de cunho socioeconômico, decorrentes de fatores como a ausência de planejamento e o uso de técnicas construtivas inadequadas para determinadas regiões. Além disso, não há uma análise dos riscos fazendo com que a população tenha que conviver com a problemática do deslizamento de barreiras, algo recorrente no município.

Atualmente o referido município possui 80.637 habitantes, uma densidade demográfica de 151,39 hab./km², de acordo com o Censo de 2010 (IBGE, 2011). Contudo dados mais atualizados relativos ao Estado de Pernambuco e em especial na Região Metropolitana e Zona da Mata mostram a elevada densidade populacional, atingindo, de acordo com o IBGE (2011) a marca de 1.275,75 hab./km², devido a essa alta concentração populacional presente da RMR os menos abastados tiveram que procurar regiões mais afastadas do centro e em áreas mais periféricas e mais elevadas, pois as regiões mais planas pertenciam às classes mais ricas ou serviam para a agricultura, voltadas para a plantação de cana-de-açúcar.

Diversos pesquisadores e estudiosos da Mecânica dos Solos elaboraram trabalhos relativos à estabilidade de taludes no Grande Recife. Um deles é citado Da Silva et al. (2017) representando o caso do deslizamento na Bacia do Rio Tejió, onde os estudiosos analisaram os riscos geomorfológicos da área analisada.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho foi realizada no Município de Ipojuca (PE), localizado na Zona da Mata Sul do estado, a referida cidade é caracterizada por regiões de elevada declividade. A pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento geomecânico dos solos de dois taludes da Formação Ipojuca, ambas situadas no Município de Ipojuca-PE (Figura 1). Como os respectivos taludes possuem mesma formação geológica, foram realizados os mesmos ensaios previstos para ambas as encostas. A realização deste trabalho será basicamente experimental, onde serão realizados os ensaios de caracterização física, química, mineralógica e hidromecânica. Também será realizada uma simulação da análise da estabilidade dos taludes, utilizando o Slope/W e elaboração em 3D do perfil do subsolo com os dados da sondagem, através do programa Geo5.

Figura 1 – Mapa de localização do município



Fonte: CPRM/FIDEM (1999)

A pesquisa elaborada nesta dissertação foi desenvolvida na UNICAP e UFPE que estuda o comportamento geomecânico dos solos da Formação Ipojuca e a

análise de estabilidade das encostas. Esta pesquisa também tem o propósito de contribuir para sociedade civil, visto que os maiores beneficiados com este trabalho serão os moradores residentes nas citadas áreas de risco, haja vista que a Prefeitura do Município de Ipojuca (PE) e a Defesa Civil da referida cidade, terão dados técnicos e científicos sobre o terreno em questão, podendo ter uma maior segurança em uma possível intervenção preventiva ou corretiva, caso necessário.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é analisar o comportamento geomecânico dos solos de dois taludes da Formação Ipojuca. Dentre os objetivos específicos são:

- Caracterizar fisicamente, quimicamente e mineralogicamente o solo de duas encostas situadas em Ipojuca-PE;
- Elaborar o perfil do subsolo;
- Analisar a estabilidade dos taludes em diferentes condições de climatológicos;
- Realizar ensaios hidromecânicos para entender o comportamento do solo sob sucções distintas;

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em mais 4 capítulos, nos quais os conteúdos se subdividem da seguinte forma:

O Capítulo 2 descreve a revisão bibliográfica relativa à estabilidade de taludes, trazendo o histórico de escorregamentos no Brasil, os critérios de classificação de movimento de massa, caracterização de cada tipo de movimento de massa, agentes e fatores causadores de escorregamentos, fatores geológicos e geomecânico significativos, métodos aplicados na investigação e apresentação dos dados, métodos para cálculo de estabilidade de taludes e estabilização, enfatizando os problemas localizados na Zona da Mata Sul de Pernambuco.

O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada na investigação geotécnica *in situ*, em laboratório e para análise da estabilidade do talude.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos através dos ensaios de campo, ensaios de laboratório e a análise da estabilidade da encosta.

Já no Capítulo 5, encontram-se as conclusões da dissertação, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

No Apêndice A estão os ajustes das curvas características; já no Apêndice B encontram-se os índices físicos e condições iniciais e finais das amostras de solo.

E no Anexo A podem ser encontrados os perfis de sondagem à percussão (SPT) fornecidos pela Prefeitura do Município de Ipojuca-PE.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Revisar-se-á o histórico do movimento de massa que atingem diversos países do mundo, sendo o Brasil um dos mais afetados. Serão abordadas as temáticas relativas aos tipos de movimentos; os fatores; os agentes; as causas; o programa de investigação; principais métodos de cálculo de estabilidade de taludes e as características da Zona da Mata Sul de Pernambuco.

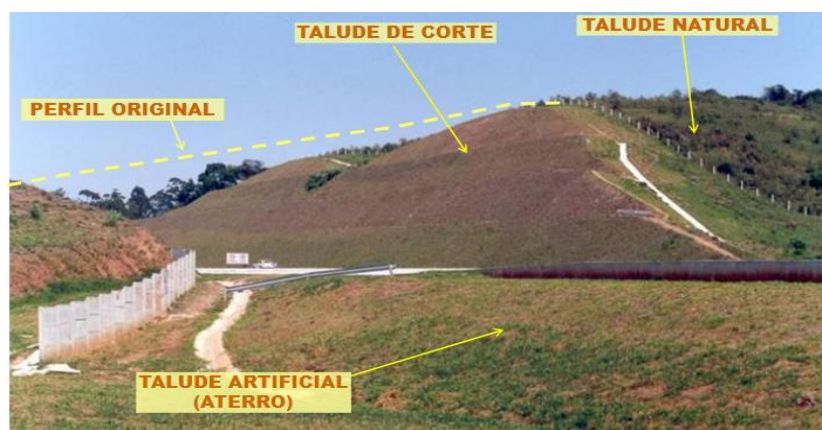
De modo que serão verificadas as características geológicas e geotécnicas da região analisada, com o intuito de elencar as características da região, as respectivas análises e discussões serão tratadas nos capítulos seguintes.

2.1. TIPOS DE MOVIMENTOS

Os taludes e/ou encostas naturais são definidos como superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos, que se originam de processos geológicos e geomorfológicos variados, podendo apresentar modificações devido a ações humanas, tais como: cortes, desmatamentos, excesso de carga [...] (OLIVEIRA e BRITO, 1998).

Define-se encosta como qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. A encosta pode ser natural, também denominado talude, ou construído pelo homem, como, por exemplo, os aterros e cortes (GERSCOVICH, 2016). A Figura 2 mostra os tipos de taludes que podem ser encontrados.

Figura 2 – Talude natural, de corte e de aterro



Existem diversas classificações para os movimentos de massa, cada estudioso pode adotar um critério específico. Autores consagrados como Cruden e Varnes (1996) que elaboraram sua classificação de movimentos gravitacionais de massa, descrevendo as características típicas, porém alguns autores como Coutinho et al. (2005) adaptaram a classificação mencionada (Tabela 1).

Hungr (2004) criou uma classificação com o intuito de resumir todos os movimentos de massa e suas respectivas características (Tabela 2).

Tabela 1 – Classificação dos tipos de movimentos gravitacionais de massa

| Tipos de Movimento | Tipo de Material | | |
|--------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| | Rocha | Solo | |
| | | Predominantemente Grosso | Predominantemente Fino |
| Queda | Queda de rocha | Queda de detritos | Queda de solo |
| Tombamento | Tombamento de rocha | Tombamento de detritos | Tombamento de solo |
| Deslizamento | Deslizamento de rocha | Deslizamento de detritos | Deslizamento de solo |
| Expansão Lateral | Expansões laterais de detritos | Expansões laterais de detritos | Expansões laterais de solo |
| Fluxo | Movimento lento/ Fluxo de rocha | Movimento lento/ Fluxo de detritos | Movimento lento/ Fluxo de solo-lama |

Fonte: Adaptado de Cruden e Varnes (1996)

Tabela 2 – Resumo da classificação de movimentos de massa

| Tipo de movimento | Rocha | Solo |
|--------------------------------|--|---|
| Queda | 1. Queda de rochas/gelo | 2. Queda de pedregulho/detrimento/silte |
| Tombamento | 3. Tombamento de bloco de rocha 4. Tombamento a flexão de rocha | 5. Tombamento de cascalho/areia/silte |
| Escorregamento ou deslizamento | 6. Escorregamento rotacional de rocha 7. Escorregamento planar de rocha 8. Escorregamento em cunha de rocha 9. Escorregamento de rocha 10. Escorregamento irregular de rocha | 11. Escorregamento rotacional de argila/silte 12. Escorregamento planar de argila/silte 13. Escorregamento de pedregulho/areia/detrimento 14. Escorregamento composto de argila/silte |
| Espalhamento lateral | 15. Espalhamento de talude de rocha | 16. Espalhamento de areia/silte liquefeito 17. Espalhamento de argila sensível |
| Fluxo | 18. Avalanche de rocha/gelo | 19. Fluxo seco de areia/silte/detrimento 20. Corrida úmida de areia/silte/detrimento 21. Fluxo úmido de areia/silte/detrimento 22. Corrida de detritos 23. Corrida de lodos 24. Inundação de detritos 25. Avalanche de detritos 26. Fluxo de terra 27. Fluxo de turfa |
| Deformação de talude | 28. Deformação de talude de montanha 29. Deformação de talude de rocha | 30. Deformação de talude de solo 31. Rastejo de solo 32. Solifluxão |

Fonte: Hungr (2014)

2.2. EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO E ESCORREGAMENTOS DE TALUDES

Atualmente os eventos climáticos extremos estão cada vez mais presentes em todo o mundo e acontecem em curto prazo, ocorrendo com alta intensidade e valores acima da média histórica (HEATCOTE, 1985). Em geral são quantificados estes eventos em minutos ou em anos de recorrência, onde a frequência de tais eventos pode ser limitada em tempo de retorno de 10 anos.

Albala-Bertrand (1993, p. 20) propõe a mensuração de alguns parâmetros para determinação de eventos naturais:

1. Magnitude: máxima energia liberada por um evento particular em uma dada localidade;
2. Frequência: incidência média que um evento de uma dada magnitude ocorre em uma área;
3. Duração: período de tempo no qual um evento perigoso persiste;
4. Extensão da área: área geográfica coberta por um evento;
5. Velocidade de avanço: período de tempo entre o surgimento de um evento e seu pico;
6. Padrão de dispersão espacial: padrão de distribuição de um evento sobre uma área geográfica afetada;
7. Regularidade: período de recorrência de um evento;

Dias e Herrmann (2002) os eventos extremos atuam de forma direta ou indireta. Os eventos de extrema precipitação, causados pelas instabilidades severas, por exemplo, atuam indiretamente na deflagração de enchentes e dos movimentos de massa. Outros fenômenos potencialmente destrutivos podem ser citados como, por exemplo, vendavais, tornados, granizos. Cerca de 2/3 dos desastres naturais ocorridos em todo o mundo estão vinculados às instabilidades atmosféricas severas.

Vicente (2004) apresenta a classificação de eventos extremos correlacionando-os com a origem (Tabela 3). Os eventos hidrometeorológicos, os quais podem ser destacados como: secas, tornados, chuvas intensas concentradas (podendo acarretar inundações e deslizamentos de encostas).

Tabela 3 – Eventos naturais extremos de acordo com a origem

| Eventos Hidrometeorológicos | Eventos Geológicos |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Secas - Inundações - Furações - Ciclones - Tornados - Tempestades (de neve, tropicais) - Geadas - Descargas elétricas - Episódios pluviais concentrados | <ul style="list-style-type: none"> - Terremotos - Tsunamis - Erupções vulcânicas - Desmoronamentos - Avalanches |

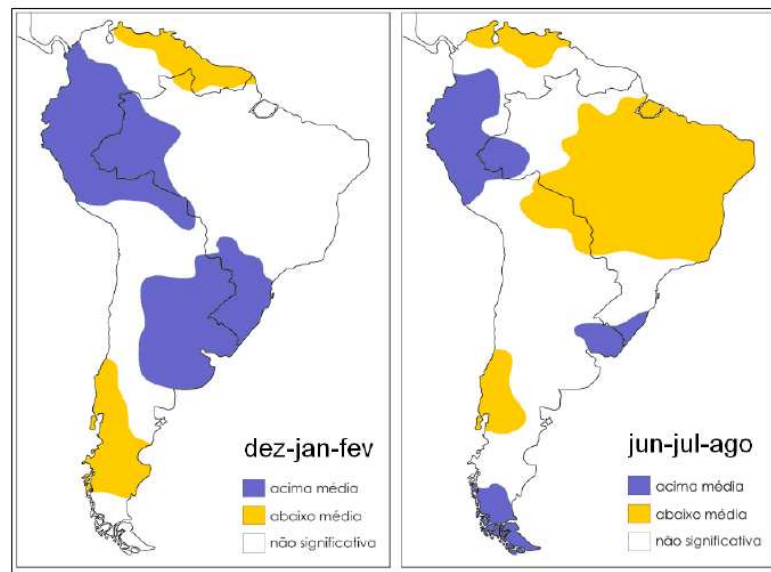
Fonte: White (2004); Turner (1978); Monteiro (1991)

Uma das grandes problemáticas relacionadas ao clima desde o final do século XX e início do XXI remetem a uma tendência na frequência e na intensidade dos eventos extremos de precipitações em função de alterações climáticas. Segundo Vicente (2004, p. 19):

[...] as projeções realizadas pelo IPCC (1996) fazendo uso de Modelos de Circulação Geral (*General Circulation Models, GCM(s)*) estimam crescimento da média global de precipitações em virtude do aumento de gás carbônico e demais gases presentes no efeito estufa. O mecanismo que favorece tal aumento é explicado pela elevação da temperatura média, levando mais vapor d'água à atmosfera e maior transporte para as altas latitudes do Hemisfério Norte e consequentemente há uma intensificação na convergência de vapor e precipitação.

Scheuren et al. (2008) em todo o mundo com o aumento da frequência de eventos extremos tem gerado prejuízos relevantes. A Figura 3 mostra uma projeção na alteração dos índices pluviométricos para o final do século XXI (2090-2099).

Figura 3 – Alterações dos índices pluviométricos no Brasil (2090-2099)



Fonte: Marcelino (2008)

Saito et al. (2009) apenas no ano de 2007, cerca de 133 países foram atingidos por desastres naturais e os prejuízos são de ordem variadas e não apenas socioeconômicos, mas ambientais também.

Zhang e Wang (2019) criaram um modelo de representação 3D para mostrar o deslizamento de massa causado por abalos sísmicos na cidade de Hokkaido.

Alguns eventos extremos podem ser elencados, por exemplo, em fevereiro de 2010 no sul da Itália, na região da Calábria, onde houve grandes deslizamentos de terras causando a destruição de estradas e edificações, afetando mais de 2000 pessoas (Figura 4).

Figura 4 – Casa destruída após deslizamento de terra em San Fratello (ITA)



Fonte: Folha (2010)

O Brasil é um dos países que não fica alheio a tais eventos, onde foram registrados vários casos de eventos extremos. A Figura 5 mostra um deslizamento no mês de abril de 2010 no estado do Rio de Janeiro, mais especificamente no município de Niterói, foi verificado índice pluviométrico de 288 mm em 24h, o maior valor registrado em 40 anos.

Figura 5 – Deslizamento no Morro do Bumba (Niterói, RJ)



Fonte: Loguercio (2013)

No ano de 2015 um temporal atingiu o estado do Rio Grande do Sul após atingir algumas regiões do estado, um temporal causou transtornos na Região Metropolitana de Porto Alegre, ocasionando quedas de árvores, semáforos desligados e falta de energia em alguns pontos. A Figura 6 mostra o temporal veio acompanhado por ventos fortes, que chegaram a 71 km/h no cais do porto, segundo o Sistema Metroclima, da prefeitura (G1, 2015).

Figura 6 – Queda de árvores em Porto Alegre



Fonte: G1 (2015)

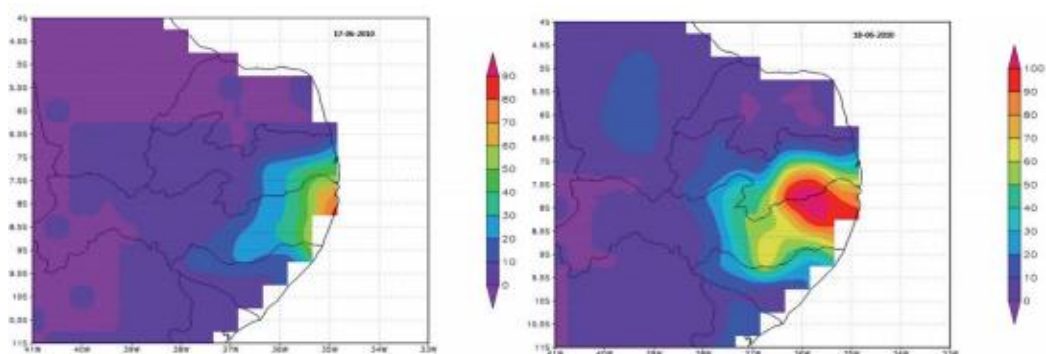
O Estado de Pernambuco é um dos estados do Brasil que é afetado pelos eventos extremos, sendo no ano de 2010 registradas inundações na Mata Sul de Pernambuco. Alguns estudiosos desenvolveram modelos para entender o mecanismo de funcionamento de tais eventos.

No modelo numérico foi levado em consideração à ocupação das áreas margeadas por rios e igarapés associada às transformações espaciais transformaram a paisagem da bacia do rio Una, com construções de habitações próximas às margens e em encostas. Em junho de 2010 diversas cidades localizadas na mata sul do estado de Pernambuco sofreram com as consequências de uma considerável inundação ao longo da bacia do rio Una, com perdas econômicas, materiais e de vida. As marcas ainda estão registradas nas construções de cidades como Palmares e Barreiros (ALVES; CAVALCANTI; NÓBREGA, 2013). O modelo numérico desenvolvido por Alves, Cavalcanti e Nóbrega (2013) considera as seguintes premissas:

- Áreas com fortes declives possuem maior probabilidade de inundação rápida do que áreas mais planas;
- Canais com maior número de contribuintes (magnitude Shreve) possuem maior potencial de inundação;
- Canais muito próximos possuem maior possibilidade de potencializar os efeitos de suas inundações particulares. Assim, áreas com maior densidade de canais por km² são mais susceptíveis a inundações de maiores proporções;

O modelo numérico desenvolvido com os dados da TRMM (2013) mostra a massa de ar se deslocando na região da Mata Sul do Estado de Pernambuco, Figura 7.

Figura 7 - Variabilidade espacial de obtida através do TRMM para os dias 17 e 18/06/10



Fonte: TRMM (2013)

Figura 8 – Casas destruídas após inundações



Fonte: EBC (2010)

A Figura 8 mostra casas destruídas após eventos extremos na Mata Sul de Pernambuco. Os eventos extremos em Pernambuco têm se tornado cada vez mais frequentes, no ano de 2018 chuvas acima do previsto para o mês de fevereiro cuja média histórica é de 118 mm e a precipitação mensurada foi de 107,9 mm em apenas 12 h (MEIRELES, 2018).

A RMR entre os meses de janeiro e fevereiro de 2019 também sofreram com chuvas torrenciais que causaram quedas de árvores (Figura 9), e alagamentos por toda a cidade (Figura 10) em apenas 3 h de chuva intensa de aproximadamente 70 mm foi equivalente ao esperado para 21 dias do mês de janeiro.

Figura 9 – Quedas de árvores em ruas do Recife



Fonte: G1 PE (2019)

Figura 10 – Pátio de São Pedro alagado (Centro do Recife)



Fonte: G1 PE (2019)

No ano de 2019 fortes chuvas voltam a atingir o município de Barreiros e regiões circunvizinhas. Segundo o Diário de Pernambuco (2019) no dia 29/05/19 : “Foi registrado, somente nas últimas 24h, mais de 212 mm, segundo o monitoramento pluviométrico da Apac. Isso representa 75% do esperado para o mês e chega próximo da média histórica, que é de 283 mm.” (Figura 11).

Figura 11 – Rio Una transbordando na cidade de Barreiros - dia (29/05/19)



Fonte: Diário de Pernambuco (2019)

Os eventos extremos são cada vez mais recorrentes no Mundo e no Brasil, modelos para prevê-los são desenvolvidos por todo o mundo, mas há uma grande dificuldade técnica em criá-los devido à falta de dados que deem maiores subsídios ao mencionados modelos. Aliado a isto, os processos erosivos afetam quase todo o

litoral brasileiro, fenômeno que se intensificará devido à elevação do nível do mar, de aumento de tempestades e mudanças no regime das marés (PEDROSA, 2015).

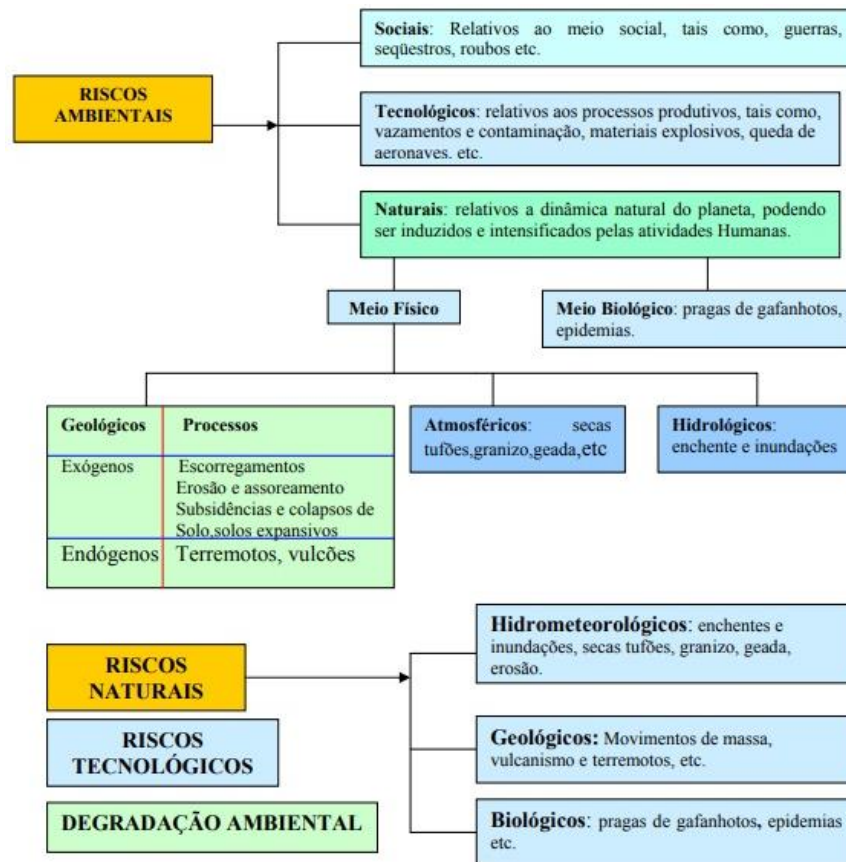
No Brasil as grandes cidades são afetadas com certa constância nos últimos 20 anos, no contexto estadual a Mata Sul de Pernambuco é a região mais atingida por chuvas torrenciais do estado ocasionando alguns acidentes, como por exemplo, Cavaleiro (Jaboatão dos Guararapes, PE) (TEIXEIRA et al., 1999); Alto do Reservatório (Nova Descoberta, Recife, PE) (LAFAYETTE, 2000; LIMA, 2002); casos no Ibura (Recife, PE) (SANTANA, 2006; NE10, 2015; SANTOS, 2018a).

2.3. RISCOS GEOLÓGICOS

A Região Metropolitana do Recife (RMR) cresceu de maneira desordenada e sem planejamento, tais erros de planificação do desenho urbano da cidade alterou a paisagem natural, a vegetação e a drenagem devido às intervenções humanas aterrando mangues, córregos, fazendo cortes sem conhecimento técnico em taludes.

Entretanto, deve-se diferenciar perigo e risco, onde “Risco é a probabilidade ou chance de lesão ou morte” (SANDERS e McCORMICK, 1993, p. 675). E “Perigo é uma condição ou um conjunto de circunstâncias que têm o potencial de causar ou contribuir para uma lesão ou morte” (SANDERS e McCORMICK, 1993, p. 675). A Figura 12 mostra um fluxograma de riscos.

Figura 12 – Fluxograma de riscos



Fonte: Pfeltzgraff (2007)

O setor da ONU, a UNDRR, que trabalha com ações para mitigar desastres naturais, afirma que devem ser adotadas cinco medidas básicas: identificação dos riscos; análise de riscos; planejamento para situações de emergências; informações públicas e treinamento.

Augusto Filho (1994) cita que a mitigação dos problemas gerados por desastres naturais pode ser feita realizando algumas ações:

- Restrições da ocupação das áreas sujeitas a algum tipo de risco;
- Legislação adequada;
- Execução de medidas estruturais;
- Desenvolvimento de sistemas de alerta;

Augusto Filho (1994) os termos risco atual e potencial, podem ser definidos como: risco atual sendo o risco instalado em áreas ocupadas e mostra locais que devem sofrer intervenções estruturais e não-estruturais. Já o risco potencial é

caracterizado pelo fato da suscetibilidade ao surgimento de novas situações de risco, onde ainda não foram ocupadas, podem planejar o uso e ocupação do solo nestes locais.

Os riscos geológicos na Região Metropolitana do Recife torna problemática a vida dos moradores dos morros, pois podem trazer perdas não só materiais, mas também humanas. A grande maioria dos riscos geológicos nos morros da região é causada pelas ocupações desordenadas e indiscriminadas. Em geral a população de baixa renda vem a ocupar estes lugares. Os primeiros trabalhos no Brasil relativos aos riscos geológicos começaram nos anos 80 com Prandini et al. (1987) e Sobreira (1989).

Existe uma grande dificuldade na obtenção de dados junto aos órgãos oficiais. Ainda assim, foram desenvolvidos trabalhos relevantes na RMR, podemos citar Bandeira (2003) que verificou no ano de 2009 os dados da Defesa Civil dos municípios de Recife, Olinda e Jaboatão dos Guararapes, os dados se referentes ao intervalo de tempo de 1984-2003 (ALHEIROS; LIMA FILHO; MONTEIRO, 1988; BANDEIRA, 2003).

Verificações de documentos de Defesa Civil de Camaragibe registrados a partir de 2001 e de Jaboatão dos Guararapes partindo do ano de 2004 bem como manchetes de jornais de grande circulação do estado de banco de dados para o catálogo de acidentes naturais elaborados por Bandeira (2010).

E o município de Ipojuca, situado na RMR, não foi exceção à regra, onde o processo de desenvolvimento socioeconômico da referida cidade, se deu de maneira desordenada e sem planejamento algum por parte dos órgãos públicos. A paisagem natural foi modificada, bem como a vegetação e a drenagem, causadas pela ocupação antrópica, ocupando e cortando os morros indiscriminadamente.

Em linhas gerais, a contenção deste tipo de movimento de massa é controlada via obras de prevenção ou recuperação de taludes habitados, dando ênfase na drenagem das águas pluviais e correções feitas na tubulação de água fria.

2.4. HISTÓRICO DOS ESCORREGAMENTOS NO MUNDO E NO BRASIL

As primeiras análises e estudos relacionados aos deslizamentos no mundo remontam há mais de mil anos, existem relatos nos países asiáticos tais como China e Japão referentes às movimentações de terra.

O histórico de deslizamento em todo o mundo iniciou-se em períodos imemoriáveis podendo citar o deslizamento ocorrido em Flims, situado na Suíça, tal evento ocorreu a mais de 8000 a.C e movimentou cerca de 12km³ de rocha e foi 300 vezes maior que o histórico deslizamento de Goldau (VON POSCHINGER; WASSMER; MAISCH, 2006). Outro grande exemplo é a China, sendo um dos países mais antigos no relato dos deslizamentos, documento datados em 186 a.C (BRABB, 1991).

Um outro evento de grande porte, que pode ser mencionado é o Evento de Tauredunum, localizado no até então no Reino de Orleans possessão dos francos, onde um deslizamento maciço de uma montanha de Tauredunum em 563 d.C, causou a devastação no entorno e provocou um tsunami no Lago de Genebra, tal onda causou a devastação de todos os vilarejos que circundavam o lago e atingiu a cidade de Genebra, derrubando as muralhas da cidade e matando centenas de moradores (SEYLAZ, 1955).

Diversos deslizamentos de grandes proporções foram datadas, segundo Wierzorek et al. (2001, p. 44) “em 1999 o Bairro de Los Corales situado no estado de Vargas (VEN) ficou sob três metros de lama, mais de 10mil pessoas foram mortas e inúmeras casas foram destruídas” (Figura 13).

Figura 13 –Bairro Los Corales em Vargas (VEN)



Fonte: Wierzorek et al. (2001)

A Figura 14 mostra um grave deslizamento de terra na União Soviética, “[...] no ano de 1949 devido a um terremoto na cidade de Kahit, hoje pertence ao país Tadjiquistão, enterrando 33 aldeias, matando cerca de 12 mil pessoas” (YABLOKOV, 2001, p. 91).

Figura 14 – Deslizamento em Kahit (TJK)



Fonte: Yablokov (2001)

Os movimentos de massa são largamente estudados no Brasil, pois diversos estados da União sofrem com a problemática dos deslizamentos de terra. Os estudos nesta área não têm finalidade apenas acadêmica, mas implicações socioeconômicas, devido a ocupações desordenadas nas regiões de morro, causando perdas de vidas humanas e materiais. Tais movimentos nos taludes em diversas cidades brasileiras, causando em inúmeras ocasiões vítimas fatais (AUGUSTO FILHO, 1995).

As Figuras 15 a 19 mostram alguns deslizamentos de massa no Brasil, observe os deslizamentos ocorridos em Maceió – AL (SANTOS, 2018b); Nova Friburgo – RJ (SOARES et al., 2019); Estação do Metrô de Cavaleiro - Jaboatão dos Guararapes – PE (TEIXEIRA et al., 1999); Alto do Reservatório em Nova Descoberta – Recife – PE (LAFAYETTE, 2000; LIMA, 2002); Bairro do Ibura - Recife – PE (SANTANA, 2006).

Figura 15 – Deslizamento de terras em Maceió (AL)



Fonte: Santos (2018b)

Figura 16 – Deslizamento de terra em Nova Friburgo (RJ)



Fonte: Ferreira et al (2019)

Figura 17 – Estação do Metrô de Cavaleiro (Jaboatão dos Guararapes – PE)



Fonte: Teixeira et al. (1999)

Figura 18 – Alto do Reservatório em Nova Descoberta (Recife – PE)



Fonte: Lima (2002)

Figura 19 – Local do Deslizamento no bairro do Ibura (Recife-PE)



Fonte: Santana (2006)

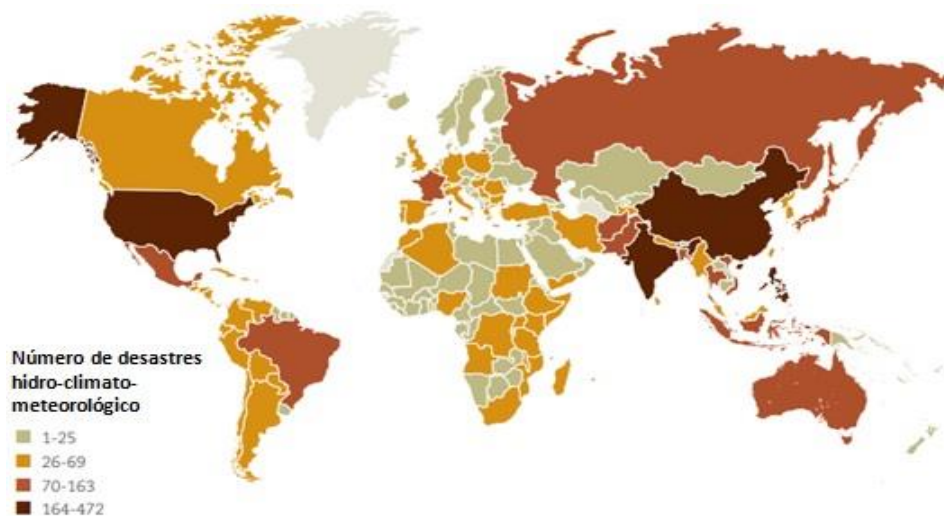
Antes da aparição da Mecânica dos Solos, registravam-se as ocorrências de movimentação de massa no Brasil vinculando-os a dois fatores: caráter catastrófico e nível de desenvolvimento do meio técnico na época (LIMA, 2002). Aliado ao que fora mencionado o processo de urbanização e o êxodo rural, o qual atingiu ápices entre os séculos XX e XXI, fez com que a maior parte da população do planeta estivesse instalada em áreas consideradas como urbanas, entretanto esta migração trouxe agravantes para a temática da gestão territorial e conseqüentemente para a qualidade de vida da população, gerando sobrecarga ambiental em determinadas áreas e levando a ocorrência de desastres naturais (MENDONÇA, 2004).

Tais eventos têm como causas maiores as ações antrópicas, gerando desequilíbrios ecológicos devido à movimentação de massas, geração de resíduos,

como os escombros e/ou construções atingidas, e ainda contaminação das águas, que funcionam como vetores na proliferação de doenças afetando gravemente a saúde pública (TAVARES, 2013).

Outros autores revelam o impacto socioeconômico dos desastres naturais que via de regra alcança regiões que possuem valor comercial menor inferior ou são ocupadas sem a devida autorização ou acompanhamento técnico, fazendo com que famílias de baixa renda as habitem. Nestes casos eventos climáticos e desastres, a problemática da reconstrução do espaço somam-se à dificuldade de dar assistência às necessidades básicas (FREITAS et al., 2012). O Brasil situa-se entre os países com maior número de desastres naturais (Figura 20).

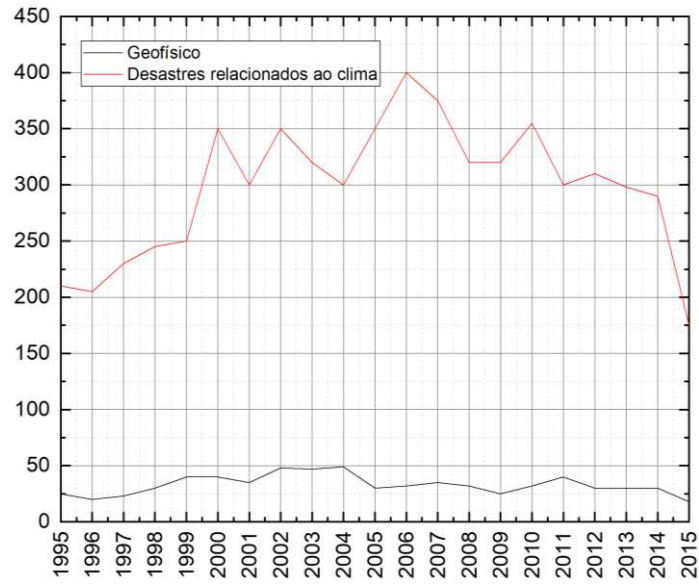
Figura 20 – Número de desastres naturais envolvendo o clima (1995-2015)



Fonte: CRED e UNISDR (2015)

As Figuras 21 e 22 mostram a tendência no número de desastres em um período de 20 anos; e os percentuais de desastres naturais estratificados por tipo de evento respectivamente.

Figura 21 – Tendências no número de desastres por categoria (geofísica e clima) – 1995/2015



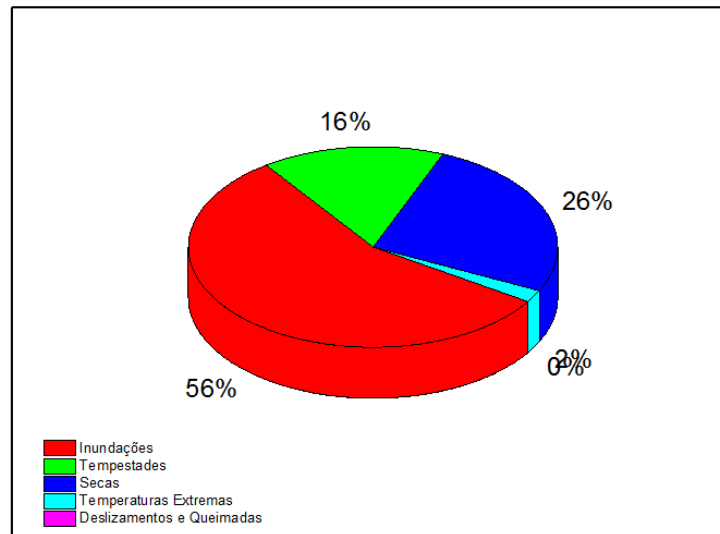
Fonte: Adaptado de CRED e UNISDR (2015)

Figura 22 – Percentual de desastres naturais por tipo (1995-2015)



Fonte: Adaptado de CRED e UNISDR (2015)

Figura 23 – Número de pessoas afetadas por desastres naturais



Fonte: Adaptado de CRED e UNISDR (2015)

A Figura 23 mostra a quantidade de pessoas afetadas pelos desastres. No Brasil em geral os deslizamentos de massa mais intensos são nas regiões urbanas, muito em função da alta concentração habitacional em áreas de morros.

Ao longo dos anos há um crescimento no interesse nos engenheiros na análise e controle dos escorregamentos, pois não se trata apenas de um problema gerado pela natureza, mas também é um problema socioeconômico, onde dados avaliam que no período de 1988-1991 foram gastos mais de 7,1 milhões de dólares em obras de contenção no Rio de Janeiro (AMARAL et al, 2011).

2.5. CAUSAS E FATORES INFLUENTES

Os agentes causadores dos movimentos de massa são de origens diversas, devendo-se emparelhar os agentes *versus* causas para facilitar a análise.

Guerra, Lopes & Filho (2007) avaliaram que as áreas onde estão instaladas comunidades carentes e que tenham ocorrência de desmatamentos ou retirada da vegetação de encostas e proximidades, ou incêndios florestais onde se observam cortes inadequados em taludes, são mais propensas à ocorrência de deslizamentos das encostas. Além disso, a elevada precipitação em determinadas épocas do ano, quando aliado à declividades elevadas, conferem maior abrangência aos eventos de deslizamento.

Silva, Camello & Almeida (2015) apontam em estudo realizado que a ocupação inadequada, o desmatamento de encostas e o acúmulo de água na superfície do solo são possíveis causas e agravantes dos deslizamentos.

Os principais agentes podem ser classificados da seguinte forma: Geológico: tipo de rocha, estrutura da rocha, estado de alteração, direção das camadas, grau de fraturamento etc; Geomorfológico: declividade, forma da encosta, comprimento da encosta, orientação etc; Hidrológico: clima, volume e intensidade das precipitações, dinâmica da água no solo etc (GERSOVICH, 2016).

Gersovich (2016) as causas dos movimentos de massa podem ser causadas por fatores internos, quando ocorre o colapso sem que haja mudança nas condições geométricas da encosta ou resultam na diminuição da resistência interna do material, como, por exemplo, efeitos das oscilações térmicas e/ou diminuição da resistência (coesão e ângulo de atrito) dos solos e rochas.

A Tabela 4 mostra que as causas externas podem ter origem quando os agentes provocam um aumento das tensões de cisalhamento, sem que haja diminuição da resistência do material, como, por exemplo, o aumento da inclinação das encostas e deposição de material na sua parte superior. A Tabela 5 mostra os agentes/causas dos escorregamentos relacionados aos condicionantes naturais e antrópicos.

Tabela 4 – Principais causas dos movimentos de massa

| Causas | Fenômenos |
|-------------------------------------|---|
| Geológicas | Materiais fracos ou sensíveis |
| | Materiais alterados |
| | Orientação de descontinuidade (acamamento, xistosidade, falha, contato, entre outros) |
| | Contraste na permeabilidade e/ou dureza dos materiais |
| Morfológicas | Atividades vulcânicas |
| | Dinâmica glacial |
| | Erosão fluvial, por ondas do mar ou glaciais do pé e lateral das encostas |
| | Erosão subterrânea (pipping) |
| | Carregamento por deposição |
| | Degelo |
| | Intemperismo por congelamento e derretimento |
| Intemperismo por variação de volume | |
| Antrópicas | Escavações |
| | Carregamentos |
| | Exploração do lençol freático |

| | |
|--|-------------------------|
| | Desmatamento |
| | Irrigação |
| | Mineração |
| | Vibrações artificiais |
| | Vazamento de tubulações |

Fonte: USGS (2004)

Tabela 5 – Agentes/causas dos escorregamentos

| Causas | Características | Fenômenos |
|----------------------------------|---|--|
| Condicionantes Naturais | Geomorfológicas (relevo, topografia, declividade) | Tais características determinam a capacidade de suporte do solo aos diversos tipos de uso e ocupação |
| | Geológicas | |
| | Pedológica | |
| | Geotécnicas | |
| | Climáticas (chuvas) | Regiões serranas de clima tropical e subtropical favorecem a ocorrência de chuvas intensas |
| Condicionantes Antrópicas | Desmatamento | Erosão do solo |
| | Obras de terraplenagem | Aterros com estabilidade precária |
| | Assentamentos clandestinos | Ocupação desordenada e construções sem conhecimento técnico adequado |

Fonte: Vieira et al. (2004)

2.5.1. Chuvas

As precipitações atuam como principal agente físico influenciando os escorregamentos no Brasil. Em geral observa-se que os maiores acidentes registrados relacionado a temática analisada, ocorreram em períodos chuvosos.

Sabe-se que as chuvas podem contribuir diretamente para a diminuição da estabilidade dos taludes, devido à elevação do nível d'água e da poropressão do solo. A água percola o solo com certa facilidade e onde houver trincas, fissuras, a água ocupará estes vazios em estruturas de solos saprolíticos, diminuindo a coesão.

Há mais de 100 anos são registrados os dados relativos aos eventos da natureza, desde as precipitações, intensidade de terremotos, entre outros estando correlacionados aos fenômenos dos deslizamentos em uma tentativa de previsão de tais eventos. Existem várias abordagens na tentativa da criação de um modelo preditivo através de relações empíricas, modelos probabilísticos, físico-matemáticas, dentre outros.

Diversos pesquisadores vêm trabalhando nesta temática como Romero, Ramis e Alonso (2006); Andrada, Pinheiro e Dolif Neto (2015); Freira, Freitas e Coelho (2015); Sillmann et al. (2017); Ferreira et al. (2018); Guimarães e Catadi (2019) encontraram diferenças nos modelos devido às características do solo do local, permeabilidade, vegetação, declividade, dentre outros.

O monitoramento das precipitações tem como objetivo antecipar-se as deflagrações dos escorregamentos, pois além de ser mais fácil e barato de monitorar quando comparado ao acompanhamento de outros parâmetros como: grau de saturação do solo e nível d'água das encostas.

2.5.2. Ação Antrópica

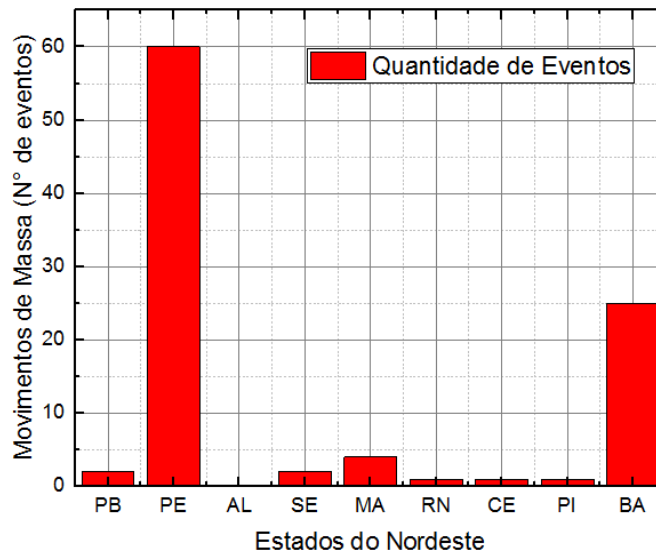
A ação antrópica também influencia tais eventos, se levando em conta que no Brasil, desde o período colonial, os mais abastados ocupavam os melhores terrenos urbanos e rurais, causando um processo de gentrificação, forçando a população mais humilde a ocupar os terrenos restantes, em regiões de morros e encostas, sobrecarregando os maciços de terra em tais regiões (Figura 24).

Figura 24 – Morros situados em a) Casa Amarela, b) Beberibe e c) Água Fria, bairros do Recife



Fonte: Adaptado de CONDERM (2004)

Figura 25 – Movimentos de Massa (1980-2017) nos Estados do Nordeste



Fonte: Adaptado de S2ID (2017)

A Figura 25 mostra os deslizamentos de terra em regiões de morro é um evento frequente nos Estados do Nordeste. Há também a problemática de cortes e aterros realizados de maneira indiscriminada, alterando as tensões atuantes no maciço, como consequências destas alterações são: trincas geradas por tração no topo das encostas, mudança na geometria do maciço, remoção da cobertura vegetal nativa, desencadeamento de instabilizações.

2.6. INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA PARA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES

As principais características para avaliação da instabilidade de uma dada região são: determinação da geometria do maciço; o mecanismo de movimentação; a natureza e o estado do material mobilizado; identificação, caracterização e mapeamento das unidades geológico-geotécnicas.

Sendo a geologia fundamental para o entendimento dos processos que podem gerar os escorregamentos das encostas. De acordo com Terzaghi (1950), o conhecimento geológico é um requisito fundamental para a formação de um conceito claro sobre os processos causadores do colapso de um talude. Note o resumo do programa de investigação geológico-geotécnica (Tabela 6), proposto por Guidicini e Nieble (1976) e Oliveira e Brito (1996).

Tabela 6 – Resumo do Programa de Investigação geológico-geotécnica

| DADOS DA REGIÃO | | | |
|-------------------------------|---|---|---|
| Dados da Região em estudo | <ul style="list-style-type: none"> • Mapas geológicos • Mapas geomorfológicos • Mapas topográficos • Mapas geotécnicos • Índices pluviométricos e relação deste com ocorrência de instabilidades na área de estudo | | |
| INVESTIGAÇÕES SUPERFICIAIS | | | |
| Investigações | Tipos | Informações Gerais | |
| SUPERFÍCIE | Levantamentos de Campo | <ul style="list-style-type: none"> • Formações Geológicas • Perfil de alteração • Estruturas geológicas (foliação, fraturas, etc) • Instabilizações existentes (tipo e características) • Feições de movimentação (trincas, degraus, etc) • Surgências da água e zonas de saturação • Geometria do talude, encostas e processo de estabilização. • Tipo de cobertura • Inferências antrópicas (terraplenagem, obras, redes de esgoto e água, edificações, etc) | |
| | Levantamentos Topográficos | Avaliação preliminar | Destaque no local, utilizando-se de plantas de pequena escala, dos seguintes aspectos: <ul style="list-style-type: none"> • Bacias de contribuição • Continuidade da encosta • Litologias principais • Depósitos, etc |
| | | Expedito | Fases iniciais de estudo utilizando trena, inclinômetro e bússola |
| | | Planialtimétrico | Levantamento dos aspectos de interesse de acordo com vistorias realizadas em campo (afloramentos rochosos, feições de instabilidades, turgências, etc). Utilização de técnicas de irradiação. |
| | Levantamentos Fotogramétricos | Aerofotogramétricos Tradicionais | Através da interpretação de fotografias, pode-se obter várias características da região. |
| | | Aerofotogramétricos Oblíquos de baixa altitude | |
| Fotográficos Terrestres | | | |
| INVESTIGAÇÕES SUBSUPERFICIAIS | | | |
| SUBSUPERFÍCIE | Métodos Diretos | Poços | Acesso direto aos diferentes horizontes do terreno obtendo amostras deformadas. |
| | | Sondagem a trado | Nível de água, horizontes em maciços terrosos, amostras deformadas, ensaios de permeabilidade e pesquisa de jazidas para aterro. |
| | | Sondagem à Percussão | Horizontes em maciços terrosos e transição solo/rocha, amostras pouco deformadas, ensaio SPT. |
| | | Sondagem Rotativa | Horizontes em maciços terrosos e rochosos, amostras pouco deformadas, ensaio de permeabilidade, ensaio de perda de água. |
| | Métodos Indiretos | Geofísicos | Levantamentos extensivos, extrapolações a partir de algumas investigações de subsuperfície. Identificação do topo rochoso e posição do lençol freático. |
| INVESTIGAÇÕES SUPERFICIAIS | | | |
| INSTRUMENTAÇÃO | Marcos superficiais, prismas óticos, extensômetros, fissurômetros, medidores de recalque, indicadores de movimentação em profundidade, inclinômetros, células de carga em tirantes, células de pressão total, piezômetros, tensiômetros, medidores de vazão. | Permite a obtenção de dados quantitativos sobre a geometria da superfície de ruptura, deslocamentos horizontais e verticais de áreas instáveis, comportamento hidrogeomecânico e avaliação de resistência, deformabilidade e estado de tensões do talude ou encosta. | |
| ENSAIOS DE LABORATÓRIO | Análise granulométrica, determinação de índices físicos, limites de consistência, compactação, resistência ao cisalhamento. | Os ensaios de laboratório buscam a determinação das propriedades e dos parâmetros de interesse dos maciços terrosos em relação ao processo de instabilização. | |

Fonte: Guidicini e Nieble (1976) e Oliveira e Brito (1996)

2.7. MÉTODOS DE ESTABILIDADE DE TALUDE

Os métodos de estabilidade de talude auxiliam na análise de estabilidade dos mesmos verificando se estão estáveis ou não através da determinação de alguns parâmetros tais como: fator de segurança crítico e a possível superfície de deslizamento segundo a ABNT NBR 11.682/09 “Estabilidade de Taludes”.

Podem-se citar os métodos mais conhecidos, são eles: os analíticos que se baseiam no conceito de equilíbrio-limite. Existem também os métodos experimentais, onde são empregados modelos físicos de diferentes escalas (LIMA, 2002). E há também os métodos observacionais, os quais se analisam a partir da experiência acumulada via análise de rupturas anteriores (retroanálise, ábacos, etc).

O fator de segurança é dada por uma relação entre a resultante dos esforços solicitantes e das forças resistentes ao escorregamento, podendo assumir valores superior, inferior ou igual a 1 (CARVALHO, 1991), Tabela 7.

Tabela 7 – Fator de segurança e condições de estabilidade do talude ou encosta

| FATOR DE SEGURANÇA E CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DO TALUDE OU ENCOSTA | |
|---|---|
| FATOR DE SEGURANÇA (FS) | CONDIÇÃO DE ESTABILIDADE |
| FS < 1 | Talude instável: caso o talude venha a ser modificado geometricamente com cortes e/ou aterros; nestas condições, deverá sofrer rupturas. |
| FS = 1 | Condição limite de estabilidade associada à iminência de ruptura; condição adotada geralmente nos cálculos de retroanálise. |
| FS > 1 | Condição estável: quanto mais próximos de 1 o FS, mais precária e frágil a condição de estabilidade do talude, quanto mais distante de 1 o FS, menores serão as possibilidades de o talude vier a sofrer ruptura quando submetido a condições críticas. |

Fonte: Carvalho (1991)

Para a determinação do fator de segurança deve-se conhecer previamente a geometria da ruptura e admitir um regime de deformação rígido plástico (sistema plastificador).

Os principais métodos de estabilidade se baseiam no equilíbrio-limite, onde no método empregado é considerado o equilíbrio de uma porção do talude limitada pela superfície de ruptura. É adotado como critério de ruptura o ciclo de Mohr-Coulomb, estabelecem-se as condições de equilíbrio do maciço. Os métodos mais consagrados encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Principais métodos de estabilidade de taludes

| PRINCIPAIS MÉTODOS DE CÁLCULO DE ESTABILIDADE | |
|---|--|
| MÉTODOS LINEARES | <ul style="list-style-type: none"> • Taludes Infinitos • Método de Culmann • Método de Rendlic • Método do Círculo de Atrito |
| MÉTODOS NÃO-LINEARES | <ul style="list-style-type: none"> • Método Ordinary (Fellenius) • Método de Bishop • Método de Bishop modificado • Método de Spencer • Método de Morgenstern-Price • Método de Jambu • Método de Sarma • Método de Blocos |

Fonte: Autor (2020)

Existem diversos programas computacionais, os quais realizam a análise de estabilidade de taludes, calculam o fator de segurança fazendo uso dos métodos de estabilidade mais usuais (métodos lineares e não-lineares), nos quais os dados de entrada são: a geometria da encosta, as características do solo, a definição do *grid* e os raios da cunha de ruptura.

2.8. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS, GEOMORFOLÓGICAS E PEDOLÓGICAS DO SOLO DE IPOJUCA-PE

No ano de 1999 em um censo realizado à época a população de Ipojuca era de 59.281 habitantes (CPRM; FIDEM, 1999). E no ano de 2010, a população do referido município é atingiu 80.637 habitantes, com um aumento de 36% quando comparado com o último censo, onde podem ser divididos em 57.719 habitantes residentes da zona urbana e 20.918 habitantes da zona rural, o que dá uma taxa de 74,06% de urbanização (Tabela 9). Houve um aumento na oferta de imóveis, onde no mesmo período mencionado a oferta aumentou em 64%, muito em função do crescimento industrial do Complexo Portuário de Suape.

Tabela 9 – Área e População Total, em Áreas de Morro e Planície, por Municípios

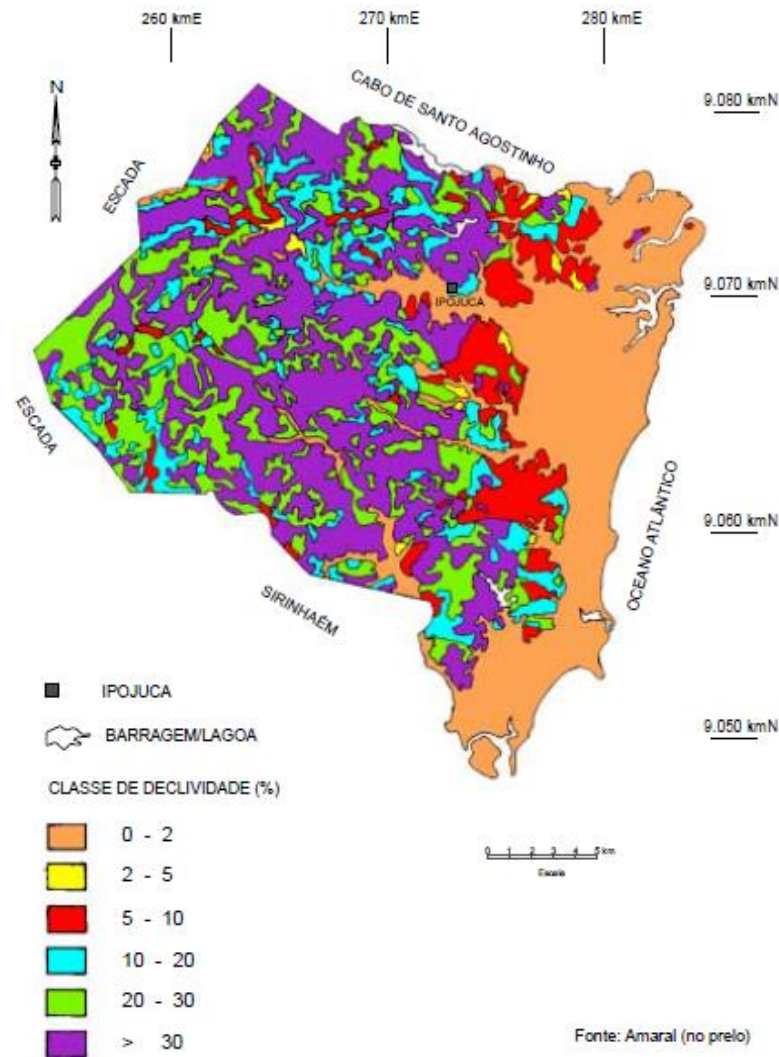
| Municípios | Área (Km ²) | Total | População (habitante) | | | |
|-------------------------|----------------------------|-----------|-----------------------|----|-----------|----|
| | | | Morro | | Planície | |
| | | | Absoluta | % | Absoluto | % |
| Abreu e Lima | 138 | 89.039 | 59.173 | 66 | 29.866 | 34 |
| Araçoiaba | 90 | 15.108 | 8.884 | 59 | 6.224 | 41 |
| Cabo de Sto. Agostinho | 445 | 152.977 | 79.646 | 52 | 73.331 | 48 |
| Camaragibe | 51 | 128.702 | 111.174 | 86 | 17.528 | 14 |
| Igarassu | 300 | 82.277 | 44.004 | 53 | 38.273 | 47 |
| Ilha de Itamaracá | 67 | 15.858 | 14.342 | 45 | 1.516 | 55 |
| Ipojuca | 527 | 59.281 | 7.517 | 26 | 51.764 | 74 |
| Itapissuma | 75 | 20.116 | 13.599 | 68 | 6.517 | 32 |
| Jaboatão dos Guararapes | 259 | 581.556 | 251.621 | 43 | 329.935 | 57 |
| Moreno | 193 | 49.205 | 45.256 | 92 | 3.949 | 8 |
| Olinda | 41 | 367.902 | 191.792 | 52 | 176.110 | 48 |
| Paulista | 99 | 262.237 | 100.626 | 38 | 161.611 | 62 |
| Recife | 218 | 1.422.905 | 469.332 | 33 | 953.573 | 67 |
| São Lourenço da Mata | 263 | 90.402 | 65.868 | 73 | 24.534 | 27 |
| RMR | 2.766 | 3.337.565 | 1.457.017 | 44 | 1.880.548 | 56 |

Fonte: Área: FIDEM; População total: IBGE (2000); FIDEM: População em morros e planícies (2000)

2.8.1. Geologia

O município de Ipojuca-PE é recortada por diversas formações geológicas, sendo complexo o processo de análise e determinação da sua características geológicas, a sua topografia é marcada, por um terreno com declividade acentuada, Figura 26.

Figura 26 – Mapa de Declividade de Ipojuca-PE



Escala 1:5000

Fonte: CPRM; FIDEM (1999)

A Formação Ipojuca está presente na região em estudo e tem origem vulcânica, cuja origem remonta ao Período Cretáceo (85-100 m.a), segundo Sial, Borba e Long (1987) apud CPRM/FIDEM (1999). E composta por traquitos, riolitos, basaltos, andesitos, ignimbritos, tufos vulcânicos e granitos subvulcânicos. De acordo com a Embrapa (2006, p.15), Figura 27:

[...] Ipojuca, os solos são predominantemente Argissolos Vermelho-Amarelos. Distróficos e alguns deles apresentam argila de atividade alta, caráter aluminico e, por vezes, horizonte plíntico. Numa proporção menor, e em áreas localizadas, ocorrem manchas de Nitossolos Vermelhos, muito provavelmente correlacionados com o material de origem de rochas básicas. Devido às condições ambientais de alto intemperismo, que possibilita o desenvolvimento de perfis de alteração bastante profundos, não

se tem observado o substrato rochoso nos locais onde estes solos encontram-se desenvolvidos. Na parte mais ao leste dos referidos municípios, destacam-se áreas com sedimentos do Grupo Barreiras, onde são formados solos distróficos coesos como os Argissolos Amarelos e Latossolos Amarelos em relevo suave ondulado e plano [...]

Os estudos desenvolvidos ainda detalham mais sobre a formação da região analisada, segundo a Embrapa (2006, p. 16):

Na parte mais ao leste dos referidos municípios, destacam-se áreas com sedimentos do Grupo Barreiras, onde são formados solos distróficos coesos como os Argissolos Amarelos e Latossolos Amarelos em relevo suave ondulado e plano [...]. Nas áreas baixas, correspondentes aos domínios das várzeas, destacam-se solos como Gleissolos e, em menor proporção, alguns Neossolos Flúvicos e Cambissolos. Cumpre salientar que ao longo de toda planície costeira (baixada litorânea), desde a Zona da Mata Norte até a Mata Sul, ocorrem grandes domínios de Espodossolos Hidromórficos associados com Neossolos Quartzarênicos. Já nas desembocaduras dos rios, onde as águas doces se misturam com as salgadas, são comuns ambientes com a vegetação de mangue. Nestas áreas, em escalas generalizadas, tradicionalmente são mapeados os denominados solos de mangue.

No município de Ipojuca são encontrados quatro tipos de formações geológicas, Lima Filho (1996) apud CPRM (1999) afirma que as unidades geológicas correspondem a seguinte estratigrafia:

O **Complexo Gnáissico-Migmatítico** é formado predominantemente, por ortognaisses, gnaisses milonitizados, de composição granítica a granodiorítica, por vezes tonalítica. A atitude de foliação apresenta direção predominante NE (secundariamente NW) e mergulhos para SE, geralmente superiores a 45°.

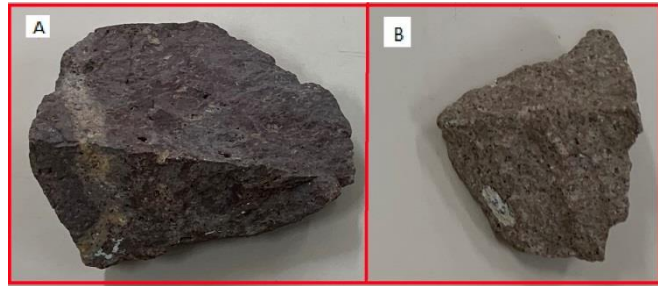
Os **Granitóides** são constituídos por cinco tipos petrográficos, denominados biotita granitos (com variações para quartzomonzonitos e quartzo-sienitos), biotita granitos porfíricos, muscovita-biotita granitos, quartzo-sienitos e leucogranitos.

O **Grupo Pernambuco** engloba litologias de origem sedimentar e vulcânica que preenchem a bacia sedimentar que se localiza a sul da cidade do Recife, estendendo-se até a região de Sirinhaém. Está constituído pelas Formações Cabo, Estiva, Ipojuca e Algoduais. As duas primeiras e a última, compostas por rochas de origem sedimentar, e a outra, por rochas de origem vulcânicas.

As **Coberturas Quaternárias** estão constituídas por sedimentos inconsolidados, de idade quaternária (\pm 120.000 anos até hoje), formando os

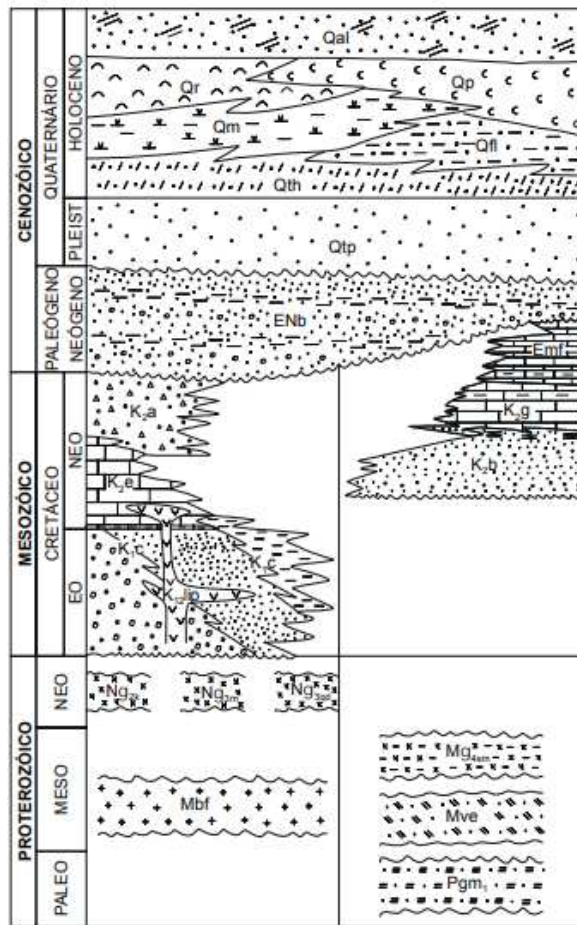
Depósitos Aluvionares, Sedimentos de Praia, Sedimentos Flúvio-Lagunares, Depósitos de Mangues, Terraços Litorâneos Holocênicos e Terraços Litorâneos Pleistocênicos. Observe a Figura 28, com a evolução e modificações das rochas matrizes e surgimento dos solos ao longo das eras.

Figura 27 – Formação Ipojuca composta por Traquitos (a) e Riolitos (b)



Fonte: Autor (2020)

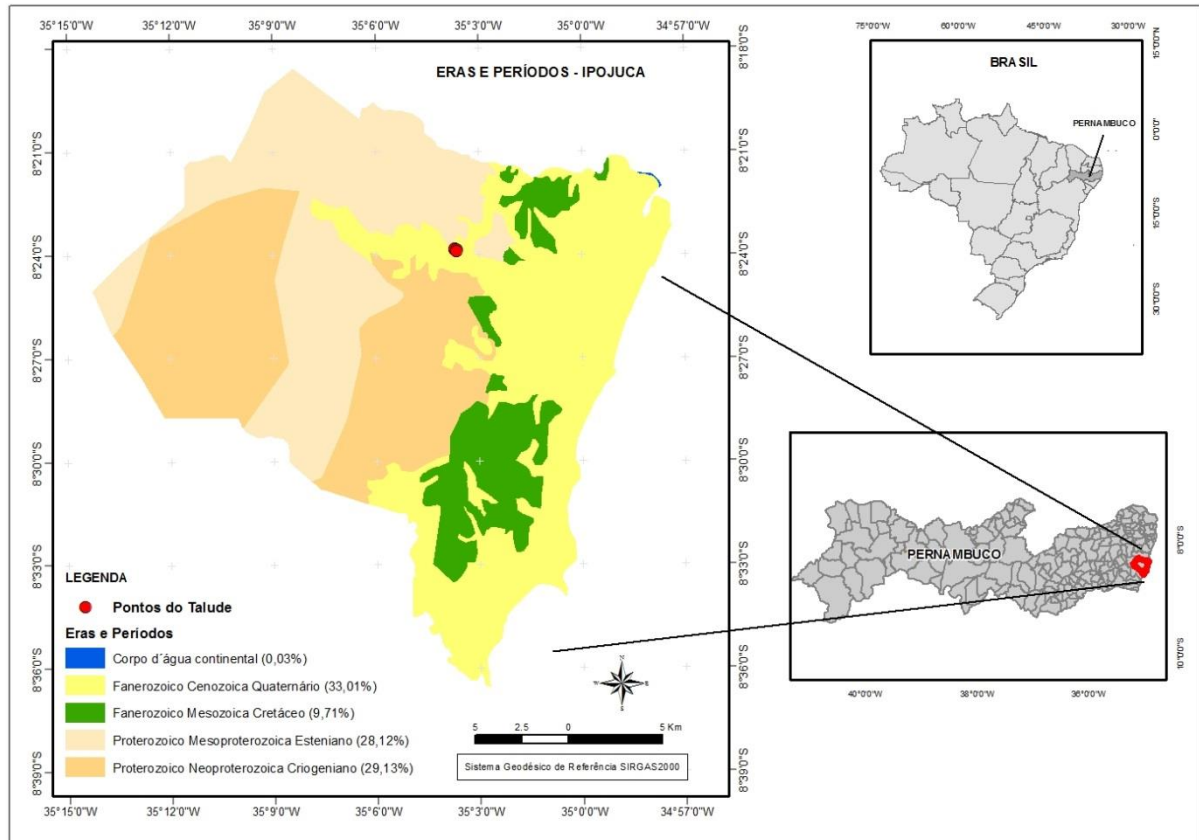
Figura 28 – Coluna estratigráfica da Região Metropolitana do Recife



Fonte: CPRM (2003)

Observe as formações geológicas presentes no município de Ipojuca-PE: A Figura 29 mostra o mapa geológico do referido município, onde fora marca a região de coleta de amostras.

Figura 29 – Mapa geológico de Ipojuca-PE



Escala: 1:500.000

Fonte: Adaptado de IBGE (2019)

A Formação Ipojuca por Amaral e Menor (1979), a Suíte Vulcânica de Ipojuca (K12λip), abrange desde riolitos (ri), traquitos (tq) e basaltos (bs) até o granito intrusivo do Cabo de Santo Agostinho (grc), além de ignibritos (ig) e rochas piroclásticas (pi). A idade dessas formações vulcânicas, segundo vários autores, é neocretáica (CPRM, 2003).

Contudo, pela Figura 26 nota-se que o ponto de coleta está localizado em uma formação geológica da Era Cenozoica Quaternária, o que é incorreto, este erro é induzido devido a escala do mapa que é de 1:5000. A Era correta é Fanerozoico

Mesozoico Cretáceo. As características litológicas do referido município podem ser encontrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resumo das características geológicas de Ipojuca

| Unidade Geológica | Sigla | Litologia | Ambiente de Origem | Morfologia | Consequências do tectonismo | Importância natural e Atividade Econômica |
|-------------------------|------------------|---|----------------------------------|---|--|---|
| Coberturas Quaternárias | Q _p | Areias quartzosas | Marinho | Praias | NO* | Proteção natural da costa |
| | Q _m | Argilas com matéria orgânica, siltes, areias finas | Áreas de interferência das marés | Áreas baixas sob ação das marés | NO* | Berçário natural da fauna estuarina e marinha |
| | Q _{th} | Areias finas e médias com concha | Linha de praias antigas | Elevações até 5m paralelas à praia | NO* | Água subterrânea Areias |
| | Q _{qp} | Areias finas e médias | Linha de praias antigas | Elevações até 10m paralela à praia | NO* | Água subterrânea Areias |
| | Q _{dfi} | Areias finas, siltes, argilas e sedimentos turfáceos | Lagoas antigas | Planície pouco ondulada inundável | NO* | Areias Turfas |
| | Q _{ai} | Areias finas e grossas com intercalações de siltes e argilas | Fluvial | Material da calha de drenagem | NO* | Água subterrânea Areias Argilas |
| FM. Algodóais | K _a | Arcócio médio a grosseiro com seixos angulosos | Leques aluviais | Morros arredondados | Sedimentação em grabens | Água subterrânea Caulim Cerâmica branca e papel |
| FM. Ipojuca | K _{iv} | Vulcanitos: traquitos, riolitos e basaltos | Vulcânica | Morros arredondados ou alongados | Ocorrência sob forma de derrames | Argila betonítica Água subterrânea |
| FM. Estiva | K _c | Calcário, arcósios, argilas e folhelhos | Intermaré e submaré | Morros arredondados | Fraturas | Cal artesanal Corretivo de solo |
| FM. Cabo | K _c | Conglomerados de grã variada | Leques aluviais e lagos | Morros arredondados | Presença de vulcanitos seccionado sedim. da Fm. Cabo | Água subterrânea Material de empréstimo |
| FM. Granitoides | N _y | Biotita granitoide de grã média, leucogranitos, biotita granitoide, porfirítico e quartzo | Plutônico | Morros arredondados com cotas altas e declividades fortes | Fraturas e Falhas | Brita Rocha ornamental Água subterrânea |
| Ortog. Migmatíticos | N _x | Ortognaisses granodioríticos e tonalíticos migmatizados | Crustal | Morros arredondados com declividades fortes | Fraturas e Falhas | Brita Água subterrânea |

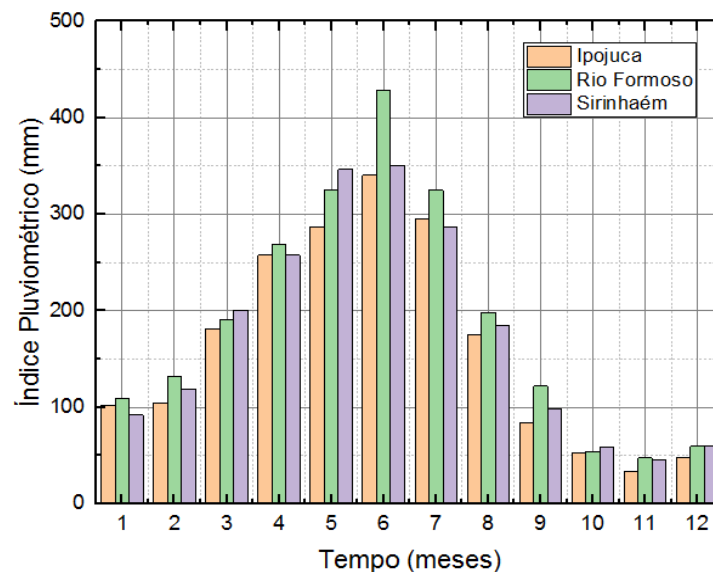
*NO = Não observado

Fonte: CPRM/FIDEM (1999)

O clima da Zona da Mata pernambucana apresenta um regime de chuvas durante o período de inverno, sendo os meses de maio a julho os de maiores índices pluviométricos. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região pode ser enquadrado no tipo de clima de Ams', caracterizada como um clima tropical chuvoso com verão seco (menos de 60 mm no mês mais seco) e precipitação pluviométrica anual superior a 2.000 mm na região mais próxima ao litoral e mais a oeste o clima predominante é o topo As' (clima tropical chuvoso com verão seco e estação chuvosa no outono) (EMBRAPA, 2006).

A Figura 30 mostra que as maiores taxas de precipitações se concentram nos meses de Maio a Julho. Outros municípios próximos que podem ser mencionados são Rio Formoso e Sirinhaém, ambos pertencentes ao Estado de Pernambuco, os quais apresentam também elevadas taxas pluviométricas.

Figura 30 – Histórico de Precipitações (médias mensais) nas cidades de Ipojuca, Sirinhaém e Rio Formoso (1941-2018)



Fonte: Adaptado de APAC (2019)

2.8.2. Geomorfologia

No tocante a unidade geomorfológica observada no município de Ipojuca-PE, se caracteriza pela presença de oito unidades de relevo, sendo classificadas em: Planícies Fluviais (Flúviolacustres), Planícies Flúviomarinhas; Planícies Costeiras,

Domínio de Colinas Amplas e Suaves, Domínio de Colunas Dissecadas e de Morros baixos, Domínio de Morros e Serras Baixas (AMARAL, 1988).

Na região central e oeste as unidades de Domínio de Colinas Dissecadas e de Morros baixos, Domínio de Morros e Serras baixas apresentam alterações sofridas pelas rochas pré-cambrianas de embasamento cristalino. Nestas localidades referidas há predominância de vales em “V”, linhas cumeadas, cumes de morro, colinas arredondadas e encostas convexas, o que resulta no surgimento de ravinas, deslizamentos e voçorocamento em alguns locais (LIMA, 2016).

Já a unidade Domínio de Colinas Amplas e Suaves pode ser observada nos sedimentos da Bacia do Cabo, em que há predominância de vales em “U”, cumes arredondados e angulares, morros e colinas.

Nas Planícies Costeiras são observados os Terraços Marinheiros Pleistocênicos, sedimentos arenosos remanescentes da penúltima transgressão marinha, encontram-se em uma faixa que cobre todo o litoral do município. As composições litológicas subdividem-se em dois níveis distintos: Terraço marinho superior (4-8m de altitude) formado no Pleistoceno e Terraço marinho inferior (< 6m e altitude) formado no Holoceno (LIMA, 2016).

Para as Planícies Fluviais, os depósitos de origem fluvial, assentados em várzeas dos rios em épocas de cheias, estão sujeitas as inundações periódicas dos rios.

A Planície Flúviomarinha, localiza-se ao longo da costa e é composta por sedimentos finos areno-argilosos depositados com interferência das correntezas, formado no Quaternário. As praias, arrecifes, terraços e planícies, mangues, bancos de areia, planície flúvio-lagunar e depósitos de assoreamento são exemplos desta formação.

Os manguezais são regiões baixas e periodicamente sujeitas a inundações, em geral localizam-se ao longo das margens dos cursos d'água, são influenciados pelo mar e têm uma vegetação característica, a qual forma-se em substratos finos e com abundância de matéria orgânica (Tabela 11).

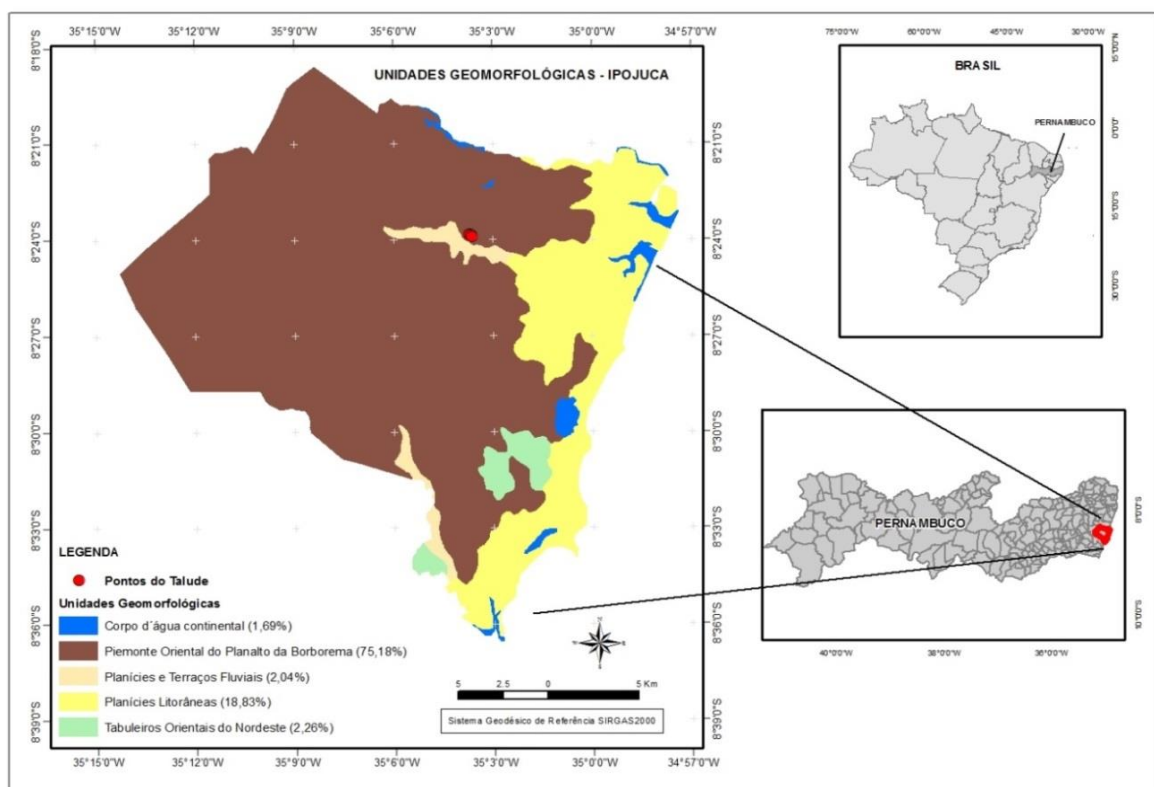
Tabela 11 – Unidades litoestratigráfica de Ipojuca-PE

| Períodos Geológicos | | Litologias |
|---------------------|---|---|
| Quaternário | Depósitos fluviais, de praias e mangues | Areias quartzosas, siltes e argilas orgânicas |
| Terciário | Formação Barreira | Areias argilosas a siltosas |
| | Formação Algodóais | Conglomerados com componentes vulcânicos |
| Cretáceo | Formação Estiva | Calcários e margas |
| | Granito do Cabo | Granito |
| | Suíte Ipojuca | Riolitos, traquitos, tufos e basaltos |
| | Formação Cabo | Conglomerados, arcósios, argilitos |
| Pré-Cambriano | Embasamento Cristalino | Granitos, gnaisses e migmatitos |

Fonte: Lima (2016), dados do GEGEP (UFPE)

Os taludes estudados apresentam formatos convexos em quase todas suas extensões com algumas regiões côncavas. Observe o mapa geomorfológico de Ipojuca-PE, Figura 31.

Figura 31 – Mapa geomorfológico de Ipojuca-PE



Escala: 1:500.000

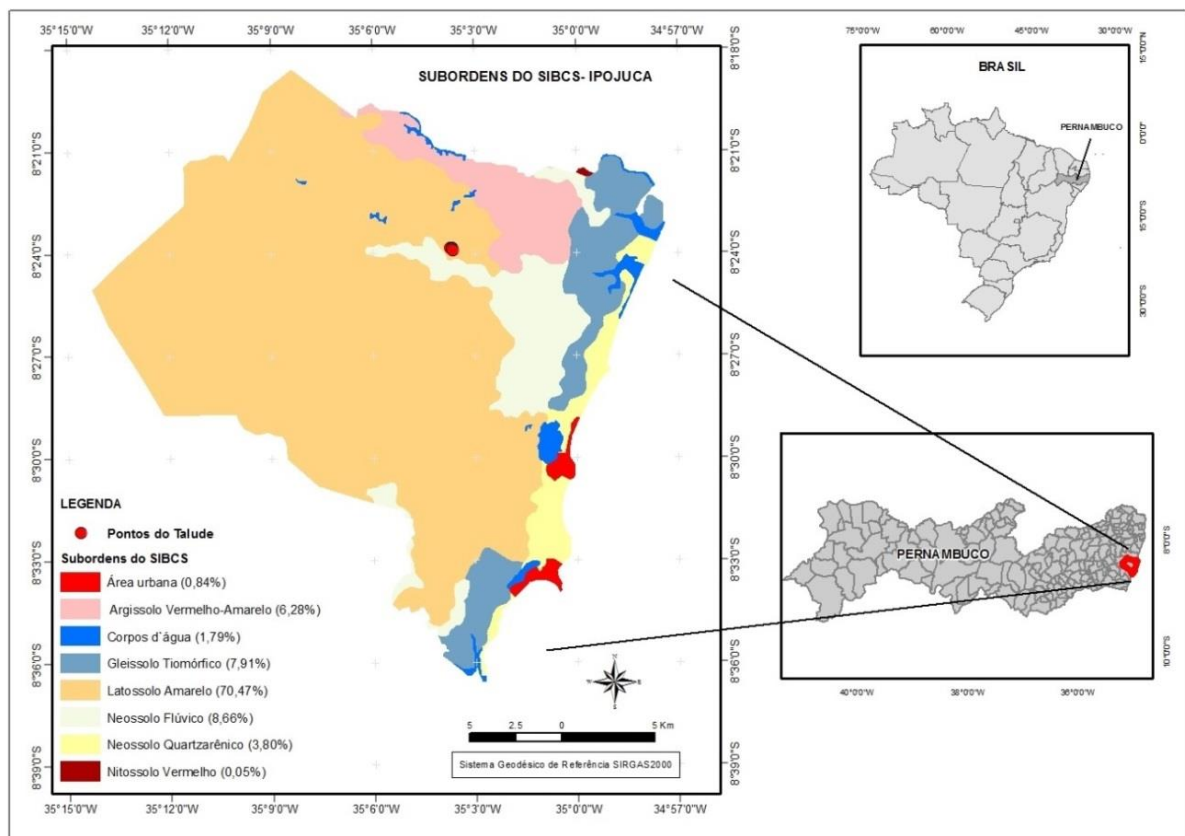
Fonte: Adaptado de IBGE (2019)

2.8.3. Pedologia

O município de Ipojuca-PE apresenta uma pedologia bem diversificada, onde a presença de latossolos amarelos; gleissolo tiomórfico; neossolo quartzênico; argissolo vermelho-amarelo; neossolo flúvico.

Há outras classificações do solo que podem merecem ser mencionadas, a correlação existente entre a classificação nacional e a WRB/FAO e Soil Taxonomy (Taxonomia do Solo) é o Latossolo (SiBCS), *Ferrasols* (WRB/FAO) e *Oxisols* (Soil Taxonomy). A região estudada está situada em uma área de Latossolo Amarelo (LAd), Figura 32.

Figura 32 – Mapa pedológico de Ipojuca-PE



Escala: 1:500.000

Fonte: Adaptado de IBGE (2019)

2.9. HISTÓRICO DE DESLIZAMENTOS EM IPOJUCA-PE

Os taludes analisados se encontram na Rua Vereador Antônio José Bonifácio, Centro, situada em Ipojuca-PE. O presente justifica-se pela ausência de análises sobre o solo da Formação Ipojuca, pela problemática da ocupação antrópica desordenada nos morros, bem como pelo impacto causado nas análises de estabilidade dos taludes. Ambos os taludes analisados são compostos pela Formação Ipojuca.

As duas encostas formavam um único maciço de terra, contudo com o acelerado crescimento populacional foram abertas vias para facilitar o deslocamento da população e com isto, a ocupação em ambos os taludes deu-se de maneira distinta.

O relevo da região é ondulado a moderadamente ondulado, cujas declividades podem variar entre a vegetação primitiva (Mata Atlântica), praticamente não existe mais, apesar de haverem algumas reservas ambientais.

2.9.1. Histórico do Crescimento Urbano e Populacional do Município de Ipojuca-PE

A região passou pela dominação holandesa no século XVII e em meados no ano de 1645, o Capitão-Mor Amador de Araújo inicia-se em Ipojuca um foco de resistência à ocupação holandesa (IBGE, 1958).

Como consequência do desenvolvimento urbano e demográfico, houve a necessidade por novas terras levando a população a ocupar de maneira desordenada as regiões de morro. Com o 'boom' econômico vivido pelo Brasil entre o período de 2002-2014, o Estado de Pernambuco apresentou taxas de crescimento acima da taxa média brasileira e em especial o município de Ipojuca-PE era a cidade do estado, a qual recebia os investimentos mais vultuosos.

Alguns dados socioeconômicos mostram que apesar do município citado possuir alta arrecadação financeira e grandes investimentos, nem sempre a evolução econômica acompanha a *performance* social.

Tabela 12 – Índice de Desenvolvimento Humano Médio

| Índice de Desenvolvimento Humano Municipal e seus componentes – Município – Ipojuca - PE | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|
| IDHM e componentes | 1991 | 2000 | 2010 |
| IDHM Educação | | | |
| % de 18 anos ou mais com fundamental completo | 11,49 | 21,94 | 40,70 |
| % de 5 a 6 anos na escola | 37,18 | 54,89 | 92,82 |
| % de 11 a 13 anos nos anos finais do fundamental REGULAR SERIADO ou com fundamental completo | 15,60 | 35,17 | 73,94 |
| % de 15 a 17 anos com fundamental completo | 3,96 | 14,10 | 31,21 |
| % de 18 a 20 anos com fundamental completo | 4,07 | 6,47 | 22,89 |
| IDHM Longevidade | 0,597 | 0,712 | 0,774 |
| Esperança de vida ao nascer | 60,82 | 67,72 | 71,44 |
| IDHM Renda | 0,440 | 0,523 | 0,613 |
| Renda per capita | 123,97 | 206,67 | 362,68 |

Fonte: IBGE (2010)

O crescimento do IDHM do Estado de Pernambuco apresenta uma melhoria contínua como pode ser visto na Tabela 12. Contudo ainda está abaixo da média nacional e o município de Ipojuca possui o IDHM abaixo da média estadual, mostrando pequena evolução ao longo dos anos.

Através do Censo de 1991 ao Censo de 2010, a população cresceu substancialmente saindo de pouco mais de 45.000 habitantes para mais de 80.000 moradores. Alguns dados trazidos pelo Portal Atlas Brasil são bem significativos:

A renda per capita média de Ipojuca cresceu 192,55% nas últimas duas décadas, passando de R\$ 123,97, em 1991, para R\$ 206,67, em 2000, e para R\$ 362,68, em 2010. Isso equivale a uma taxa média anual de crescimento nesse período de 5,81%. A taxa média anual de crescimento foi de 5,84%, entre 1991 e 2000, e 5,79%, entre 2000 e 2010. A proporção de pessoas pobres, ou seja, com renda domiciliar per capita inferior a R\$ 140,00 (a preços de agosto de 2010), passou de 74,95%, em 1991, para 54,06%, em 2000, e para 27,22%, em 2010. A evolução da desigualdade de renda nesses dois períodos pode ser descrita através do Índice de Gini, que passou de 0,46, em 1991, para 0,53, em 2000, e para 0,50, em 2010.

2.9.2. Processo de Urbanização do Município de Ipojuca

O processo de urbanização nas cidades brasileiras foi acelerado e sem planejamento algum, segundo IBGE (1958, p. 137):

O município de Ipojuca foi criado em 30 de março de 1843, pela Lei Provincial nº 152. Recebe o referido nome devido ao Rio Ipojuca, pertence à Região Metropolitana do Recife (RMR), historicamente, seu território é repleto de engenhos voltados para a produção da cana-de-açúcar e derivados. Por séculos, os engenhos simbolizaram o poder dos senhores de engenho e posteriormente os usineiros no Estado de Pernambuco.

A construção do Complexo Portuário de Suape, estabeleceu-se em uma localidade do município e mudou o perfil socioeconômico local. Contudo só a partir do ano de 2010 indústrias e demais investimentos ganharam força na região portuária de Suape. Dois grandes empreendimentos marcaram a reestruturação socioeconômica do município e da RMR, foram a construção da Refinaria Abreu e Lima e o Estaleiro Atlântico Sul.

O processo acelerado de urbanização de Ipojuca trouxe diversos problemas já existentes nas capitais brasileiras como: alta densidade populacional aliado ao pouco investimento de infraestrutura, zona urbana é relativamente pequena causando desordenamento urbano e ocupação sem controle de áreas de morro.

Algumas medidas foram tomadas para tentar frear aos problemas socioespaciais, sendo criado um Planos e Diretrizes para Suape, elaborados pelo Governo de Pernambuco, em que o primeiro plano diretor de Suape foi elaborado em 1973, destinado às áreas para implantação do porto e do complexo industrial.

A Rua Ver. Antônio Bonifácio não foi exceção a regra. Os taludes situados na mencionada rua foram ocupados de maneira irregular e as encostas sofreram com cortes indiscriminados e edificações de grande porte.

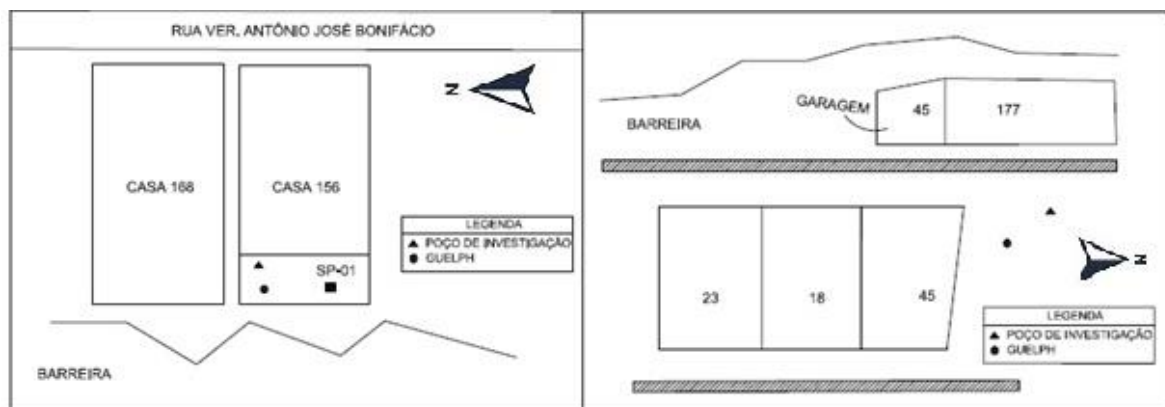
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

São apresentados os materiais e métodos empregados no programa de investigação geotécnica, de campo e de laboratório e da análise dos resultados.

As Sondagens de Simples Reconhecimento (SPT) foram realizadas por uma empresa prestadora de serviços à Prefeitura de Ipojuca-PE, tais resultados foram fornecidos pelo corpo técnico de Engenharia da referida prefeitura.

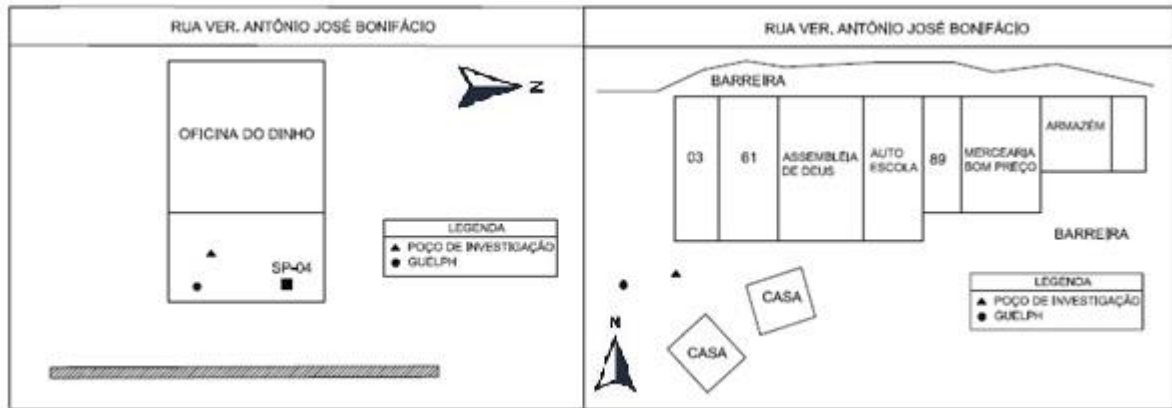
O ensaio de condutividade hidráulica foi realizado em campo utilizando o Permeâmetro Guelph. Também foram coletadas amostras indeformadas e deformadas para realização de ensaios de caracterização física, química, mineralógica e hidromecânica, tais como: sucção; condutividade hidráulica; edométricos duplos; cisalhamento direto. As Figuras 33 e 34 mostram a localização dos pontos do programa de investigação geotécnica.

Figura 33 – Localização dos pontos do programa de investigação geotécnica relativos ao Talude 1



Fonte: Autor (2020)

Figura 34 - Locação dos pontos do programa de investigação geotécnica relativos ao Talude 2



Fonte: Autor (2020)

A Tabela 13 elenca o programa experimental elaborado para a análise e desenvolvimento da temática em estudo para os taludes situados em Ipojuca.

Tabela 13 – Programa de investigação geotécnica em campo e em laboratório realizado na Rua Ver. Antônio Bonifácio, Centro - Ipojuca-PE

| INVESTIGAÇÃO GEOTECNICA EM CAMPO | |
|--|--|
| INVESTIGAÇÃO GEOTECNICA | SERVIÇOS EXECUTADOS |
| Retirada de Amostras | Abertura de poços de investigação com retiradas de amostras indeformada moldadas in loco e amostras deformadas. |
| Condutividade Hidráulica | Utilização do Permeâmetro Guelph. |
| Umidade | Retira de cápsulas na profundidade desejada para determinação da umidade em laboratório. |
| INVESTIGAÇÃO GEOTECNICA EM LABORATÓRIO | |
| INVESTIGAÇÃO GEOTECNICA | SERVIÇOS EXECUTADOS |
| Caracterização do solo | Ensaio de granulometria das amostras coletadas nos poços P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7. E os limites de consistência. |
| Sucção e Umidade | Anéis moldados in loco para coleta de amostras indeformadas fazendo uso da técnica do papel filtro. |
| Condutividade Hidráulica – Tri-Flex II | Determinação da condutividade hidráulica nas amostras P1, P4, P5 e P7 em laboratório usando o Tri-Flex II. |
| Edométrico Duplo | Ensaio realizados com as amostras dos pontos P1, P2, P4, P5, P6 e P7 nos laboratórios da UFPE e Unicap. |
| Cisalhamento Direto | Ensaio realizados com as amostras dos pontos P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7 em laboratório da UFPE. |
| PROCESSAMENTO DE DADOS | |
| - | PROGRAMAS UTILIZADOS |
| Interpolação da Curva Característica | Usou-se o programa Origin 2019 para ajuste não-linear das curvas e determinação dos parâmetros das equação dos ajustes. |
| Elaboração do Perfil em 3D | Elaboração dos perfis em 3D usando o programa Geo5, obtidos através da sondagem SPT. |
| Análise de Estabilidade de Taludes | Utilização do programa Slope/W para análise da estabilidade das duas encostas adotando os métodos de fatias para condições climáticas distintas. |

Fonte: Autor (2020)

Após a fase de coleta de amostras e da realização dos ensaios de campo e em laboratório, realizou-se o ajuste das curvas características usando as equações clássicas de autores consagrados, análise de estabilidade dos taludes e elaboração do perfil do subsolo fazendo uso dos programas Slope/W e Geo5 respectivamente.

3.1. INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

É o conjunto de práticas e ensaios referentes à caracterização do solo, ensaios de sondagem para reconhecimento das camadas do subsolo e imagens aéreas.

3.1.1. Sondagens de Simples Reconhecimento

As Sondagens de Simples Reconhecimento do solo foram fornecidas e se encontram no Anexo A. Foi utilizado o *Standard Penetration Test* (SPT) como ferramenta para determinação do perfil geotécnico e de resistência à penetração do amostrador padrão (N_{SPT}), segundo a ABNT NBR 6484/01 – Método de Execução de Sondagem.

3.2. IMAGENS AÉREAS REALIZADAS COM DRONE

A Prefeitura de Ipojuca elencou sete bairros com áreas de risco ao deslizamento, seis deles foram mapeados através de voos com *drone* (modelo “DJI Spark Fly More Combo – CPPT000909”) e registradas imagens aéreas, à exceção de São Roque, pois os profissionais da Defesa Civil recomendaram não sobrevoar a área devido a problemas de segurança pública.

3.3. COLETA DE AMOSTRAS

As amostras indeformadas e deformadas foram coletadas da Base, Meio e Topo de ambos os taludes analisados através da abertura de poços de investigação segundo a ABNT NBR 9604/16 – Abertura de Poços e Trincheira de Inspeção de Solo com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas.

A Figura 35 mostra a localização dos taludes, os locais onde foram coletadas as amostras e realizados os ensaios de campo. E a Tabela 14 mostra as

coordenadas geográficas e suas respectivas cotas dos locais investigados em ambos os taludes.

Figura 35 – Localização dos pontos de coleta de amostras e realização de ensaios



P(i) = Poços de coleta de material; G(i) = Locais de Ensaio de Condutividade em campo; SP = Sondagens à Percussão (SPT)
Fonte: Google Earth (2020)

Tabela 14 – Nomenclatura dos pontos

| Localização | Pontos | Coordenadas Geográficas (Lat-Long) | Cota (m) |
|-------------|-------------------------------|------------------------------------|----------|
| Talude 1 | P4 (topo) | (-8°23'51,35"; -35°3'43,16") | 0,50 |
| | P2 (meio, argila avermelhada) | (-8°23'53,13"; -35°3'42,42") | 0,50 |
| | P3 (meio, argila amarelada) | (-8°23'52,22"; -35°3'42,47") | 0,50 |
| | P1 (base) | (-8°23'52,96"; -35°3'42,09") | 0,50 |
| | G1 (topo) | (-8°23'50,76"; -35°3'43,27") | 0,50 |
| | G2 (base) | (-8°23'52,96"; -35°3'42,09") | 0,50 |
| | SP-01 | (-8°23'51,97"; -35°3'42,12") | 0-8,45 |
| | SP-03 | (-8°23'51,27"; -35°3'42,01") | 0-5,45 |
| | SP-05 | (-8°23'57,78"; -35°3'41,79") | 0-23,5 |
| | SP-06 | (-8°23'57,80"; -35°3'41,16") | 0-8,45 |

| | | | |
|----------|-----------|------------------------------|--------|
| Talude 2 | P7 (topo) | (-8°23'56,09"; -35°3'39,20") | 0,50 |
| | P6 (meio) | (-8°23'52,57"; -35°3'39,69") | 0,50 |
| | P5 (base) | (-8°23'52,31"; -35°3'39,99") | 0,50 |
| | G3 (base) | (-8°23'52,12"; -35°3'39,86") | 0,50 |
| | G4 (topo) | (-8°23'55,80"; -35°3'39,92") | 0,50 |
| | SP-02 | (-8°23'53,46"; -35°3'39,65") | 0-8,45 |
| | SP-04 | (-8°23'51,72"; -35°3'39,92") | 0-8,45 |

P(i) = Poços de coleta de material; G(i) = Locais de Ensaio de Condutividade em campo; SP = Sondagens à Percussão (SPT)

Fonte: Autor (2020)

Tabela 15 – Localização e quantidade das amostras coletadas e ensaiadas

| LOCALIZAÇÃO | AMOSTRAS | QUANTIDADE DE AMOSTRAS INDEFORMADAS | | | | PROFUNDIDADE (m) |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------|--------|------------------|------------------|
| | | Cisalhamento | Edométrico | Sucção | Tri-Flex II | |
| Talude 1 | P4 (topo) | 9 | 2 | 6 | 1 | 0,50 |
| | P3 (meio, argila amarelada) | 3 | 0 | 0 | 0 | 0,50 |
| | P2 (meio, argila avermelhada) | 9 | 2 | 6 | 0 | 0,50 |
| | P1 (base) | 9 | 2 | 6 | 1 | 0,50 |
| Talude 2 | P7 (topo) | 9 | 2 | 6 | 1 | 0,50 |
| | P6 (meio) | 9 | 2 | 6 | 0 | 0,50 |
| | P5 (base) | 9 | 2 | 6 | 1 | 0,50 |
| Total | | 57 | 12 | 36 | 4 | - |
| LOCALIZAÇÃO | AMOSTRAS | QUANTIDADE DE AMOSTRAS DEFORMADAS | | | PROFUNDIDADE (m) | |
| Talude 1 | P4 (topo) | 1 saco com 10 kg | | | 0,50 | |
| | P3 (meio, argila amarelada) | 1 saco com 10 kg | | | 0,50 | |
| | P2 (meio, argila avermelhada) | 1 saco com 10 kg | | | 0,50 | |
| | P1 (base) | 1 saco com 10 kg | | | 0,50 | |
| Talude 2 | P7 (topo) | 1 saco com 10 kg | | | 0,50 | |
| | P6 (meio) | 1 saco com 10 kg | | | 0,50 | |
| | P5 (base) | 1 saco com 10 kg | | | 0,50 | |

Fonte: Autor (2020)

A Tabela 15 apresenta os quantitativos de amostras coletadas e ensaiadas. As amostras indeformadas foram coletadas dos poços de investigação com áreas de (1,0 x 1,0) m.

A Figura 36 mostra os poços foram escavados com pá e picareta, a profundidade atingida foi de 0,50 m. Não foram retirados blocos indeformados devido às dificuldades topográficas e aos locais de coleta ser em áreas residenciais. Entretanto foram moldadas *in loco* as amostras (Figura 37), para posterior ensaio em

laboratório. As amostras indeformadas foram envolvidas com papel filme, seguido de papel alumínio e foram devidamente etiquetadas.

Figura 36 – Poço de investigação



Fonte: Autor (2018)

Figura 37 – Moldagem de caixas de cisalhamento



Fonte: Autor (2018)

As amostras deformadas foram coletadas na mesma profundidade das amostras indeformadas e guardadas em sacos plásticos, cujo peso era de aproximadamente 10 kg por poço de coleta, todas as amostras eram devidamente etiquetadas.

3.3.1. Caracterização Física do Solo

Os ensaios de caracterização física do solo, tais como: granulometria; limites de consistência; peso específico real dos grãos; teor de umidade. Os referidos ensaios são normatizados pela ABNT, cujas normas reguladoras são: NBR 6467/16 – Preparação de Amostras; NBR 7181/16 - Análise Granulométrica; NBR 6458/17 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm; NBR 6459/17 – Limite de Liquidez; NBR 7180/1 – Limite de Plasticidade; NBR 7182/20 – Ensaio de Compactação.

3.3.2. Caracterização Química do Solo

No presente trabalho foram realizados os seguintes ensaios químicos do solo: Potencial Hidrogeniônico (pH), a taxa de Alumínio total, Ferro total, Sódio total, Potássio total, Percentual de Saturação em Bases, Acidez Potencial, Salinidade, Silicato, Hidrogênio Extraível, Carbono Orgânico total, Condutividade Elétrica a 25°C para o Topo, Meio e Base de ambos os taludes.

Para mensuração dos índices desejados seguiram-se as normas do Manual de Métodos de Análise do Solo editado pela EMBRAPA (SILVA et al., 2001).

3.3.3. Caracterização Mineralógica do Solo

Foi realizada a difração de raio-X em amostras de solo do Topo, Meio e Base do Talude 1 com o intuito de verificar os argilos minerais presentes no solo em questão, foram seguidos os procedimentos encontrados no Manual de Análise do Solo da EMBRAPA (SILVA et al., 2001). O programa utilizado para identificação das fases do material foi o Match 2.

3.4. DETERMINAÇÃO DA CURVA CARATERÍSTICA DO SOLO

O método do papel filtro foi utilizado para obtenção da curva característica das amostras de solo (ASTM D 5298, 2003; LUCAS et al., 2011).

A referida técnica consiste basicamente na equalização das umidades do papel filtro e da umidade do solo para posterior determinação da umidade pós-equalização. Com o resultado da umidade é possível determinar a sucção correspondente àquela umidade. Foi utilizado o papel filtro calibrado da Whatman 42 e foi adotado o tempo mínimo de 7 dias para equalização da umidade.

Foram verificadas que os solos analisados são Latossolos amarelos, tais solos não apresentam comportamento expansivo. Então as amostras foram saturadas devido ao tempo hábil disponibilizado para realização dos ensaios (Figura 38). Após o procedimento descrito anteriormente, são colocados papéis filtro comum e as amostras de solo ficam em contato direto com este papel.

Figura 38 – Anéis de sucção em processo de saturação



Fonte: Autor (2019)

A referida técnica permite a determinação simultânea da sucção mátrica e total do solo. Para medição da sucção total utiliza-se uma tela polimérica separando o solo do papel, já na sucção mátrica o solo fica em contato direto com o papel filtro (Figura 39). Nas semanas seguintes, foi realizado o processo de secagem das amostras, fazendo a amostra de solo perder umidade por secagem ao ar livre.

Figura 39 – Disposição do papel filtro



Fonte: Autor (2019)

Concluído o procedimento descrito anteriormente, as amostras eram pesadas usando uma balança eletrônica semi-analítica (modelo: AD 500, capacidade: 500 g e precisão: 0,001 g). Sendo posteriormente envelopadas com papel filme, seguido de papel alumínio, etiquetadas durante o tempo mínimo adotado para equalização das umidades do solo e papel.

3.5. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

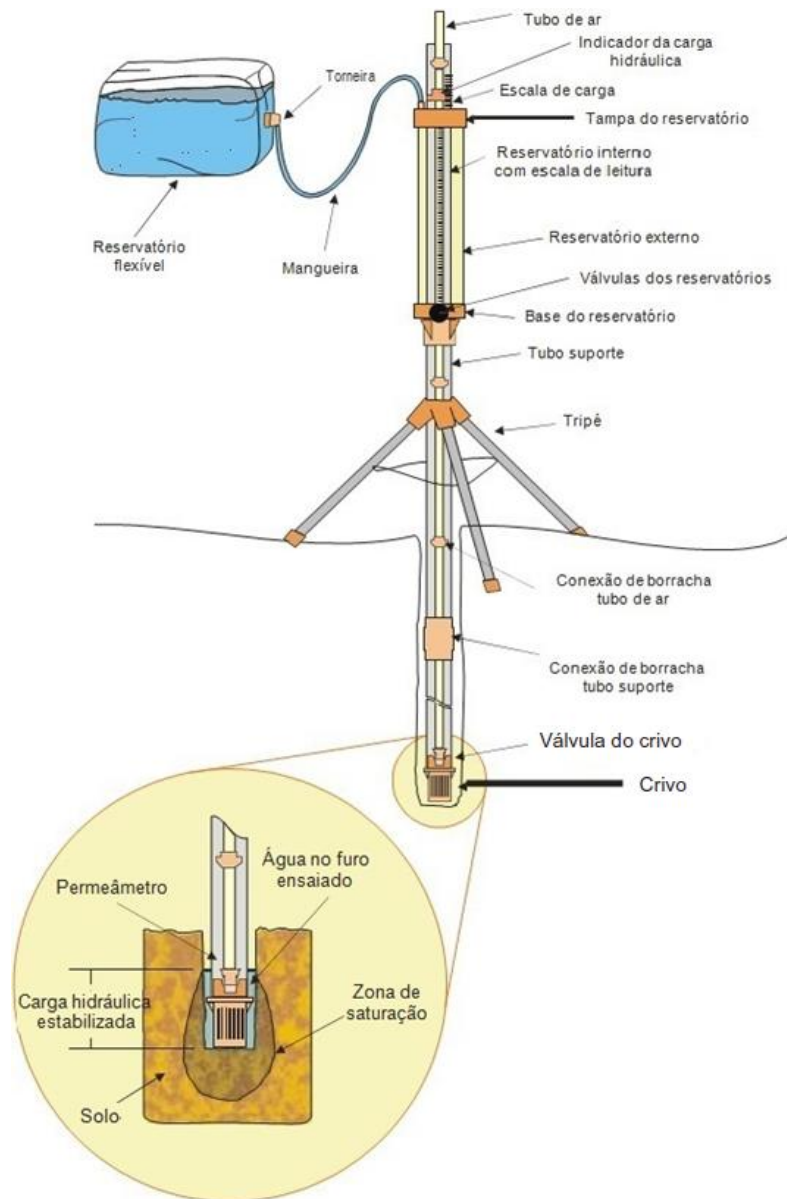
Foi determinada a condutividade hidráulica em campo e em laboratório para as amostras coletadas no Topo e Base de ambos os taludes.

3.5.1. Condutividade avaliada em campo

Foi realizado o ensaio de condutividade hidráulica em campo com auxílio do Permeâmetro Guelph em ambas as encostas localizadas na Rua Ver. José Antônio Bonifácio.

Divide-se em duas etapas o ensaio de condutividade hidráulica, inicia-se com o procedimento da perfuração do solo e a montagem do equipamento para por fim realizar o ensaio (Figura 40).

Figura 40 – Esquema do funcionamento do Permeâmetro Guelph



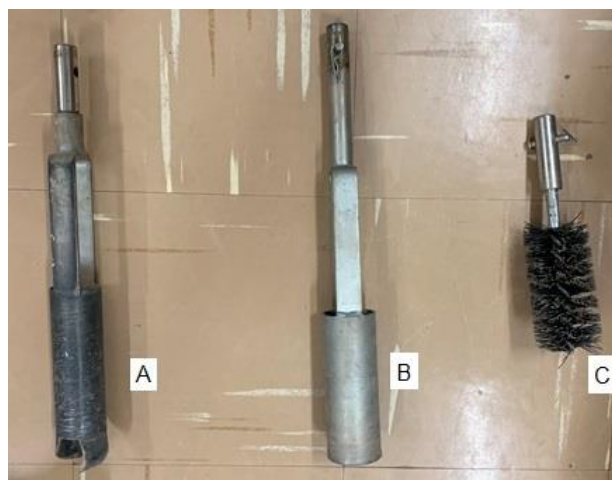
Fonte: Lima (2002)

Não há normais nacionais para realização do ensaio de condutividade hidráulica *in situ* utilizando o Permeômetro Guelph. Então, segue-se a norma norte-americana ASTM D5126/16 e as recomendações dos fabricantes do equipamento. Contudo, há limitações técnicas do mencionado permeômetro, pois deve-se utilizar à profundidade de 15-75 cm, para profundidades superiores a 75 cm pode haver perda de precisão (IMPACT TEST EQUIPMENT, 2019).

Owntec (2020) assegura que as variações das medidas podem ser da ordem de 10^{-2} - 10^{-6} cm/s, para grandes profundidades os valores podem ser da ordem de 10^{-7} cm/s em diante, porém a fabricante não garante precisão do equipamento.

Para a realização do ensaio deve-se fazer um furo com trado manual (60 mm de diâmetro). Após atingir a profundidade desejada, troca-se para o trado manual nivelador, onde se nivela o fundo do furo e por fim troca-se novamente o trado manual, coloca-se a escova de aço para reabrir os poros do solo que por ventura viriam a fechar-se (Figura 41).

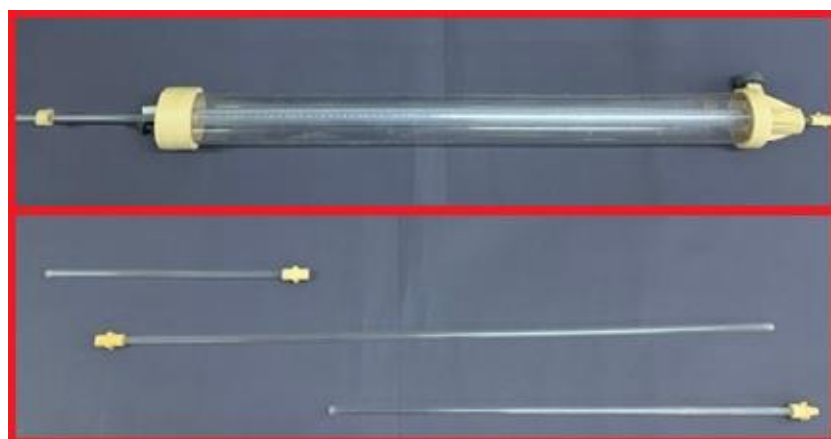
Figura 41 – Partes do trado usado no ensaio de campo



a) Trado usado na perfuração, b) Trado regulador da base do furo, c) Escova de aço

Fonte: Autor (2019)

Figura 42 – Tubo transparente



Fonte: Autor (2019)

Figura 43 – Equipamento pronto para uso



Fonte: Autor (2019)

A Figura 42 mostra a montagem da parte principal do equipamento, tubo transparente e suas conexões que deve-se conectar a peça principal as suas respectivas conexões (varas de acrílico). A Figura 43 mostra novos tubos circunscritos às conexões de acrílico que devem ser encaixados no tubo principal do equipamento. Concluídas as etapas anteriormente descritas, deve-se encher o referido permeâmetro com o reservatório de água.

Com o equipamento pronto para uso inicia-se o ensaio de condutividade hidráulica em campo. Durante a execução do ensaio, foi necessário aplicar uma carga hidráulica de 5 e 10 cm respectivamente, na bureta graduada situada na parte superior do equipamento.

São anotadas as leituras através da régua do aparelho e o tempo cronometrado em cada uma das medições realizadas. O critério de parada foi definido quando as leituras se mantivessem uma diferença constante durante três medições consecutivas. Para o cálculo da condutividade hidráulica são utilizadas as equações elencadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Equações utilizadas para determinação dos parâmetros e do coeficiente de condutividade hidráulica *in situ*

| DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA | | |
|--|---|--|
| Parâmetros | Equação | Descrição |
| R_1 (cm/s) | $R_1 = \frac{\Delta L_{5cm}}{\Delta T}$ | Velocidade média de percolação com carga hidráulica de 5 cm |
| R_2 (cm/s) | $R_2 = \frac{\Delta L_{10cm}}{\Delta T}$ | Velocidade média de percolação com carga hidráulica de 10 cm |
| C_1 | $C_1 = 4 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{H_1}{2 \cdot \alpha} \right) - \sqrt{\left(\frac{\alpha}{H_1} \right)^2 + \frac{1}{4} + \frac{\alpha}{H_1}} \right]$ | Fator de forma depende da relação H/α , onde $H_1 = 5$ cm. |
| C_2 | $C_2 = 4 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{H_2}{2 \cdot \alpha} \right) - \sqrt{\left(\frac{\alpha}{H_2} \right)^2 + \frac{1}{4} + \frac{\alpha}{H_2}} \right]$ | Fator de forma depende da relação H/α , onde $H_2 = 10$ cm. |

| | | |
|-------|---|--|
| G_1 | $G_1 = G_2 \frac{H_2 C_1}{H_1 C_2}$ | Coeficiente de ajuste da carga de 5 cm. |
| G_2 | $G_2 = \frac{H_1 C_1}{\pi(2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))}$ | Coeficiente de ajuste da carga de 10 cm. |
| Q_1 | $R_1 * A$ | Vazão para a carga hidráulica de 5 cm. |
| Q_2 | $R_2 * A$ | Vazão para a carga hidráulica de 10 cm. |
| K_s | $G_2 * Q_2 - G_1 * Q_1$ | Coeficiente de cond. hidráulica. |

Fonte: Autor (2020)

3.5.2. Condutividade em laboratório

A condutividade hidráulica também foi determinada em laboratório utilizando o equipamento denominado Tri-Flex 2 sendo coletadas amostras indeformadas que foram moldadas *in loco* através de tubos de PVC com 10 cm de diâmetro e altura variando de 7-10 cm, em poços abertos a uma profundidade de 0,50 m no Topo e Base das encostas.

Este ensaio foi realizado de acordo com ABNT NBR 14545/19 “Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável”, Figura 44.

Figura 44 – Tri-Flex II, utilizado para determinação da condutividade hidráulica em laboratório



Fonte: Autor (2019)

3.6. COMPRESSIBILIDADE DO SOLO

A compressibilidade do solo foi realizada por meio de Ensaio Edométrico Duplo em células convencionais utilizando das prensas edométricas com amostras indeformadas do Topo, Meio e Base de ambas as encostas, ensaio este normatizado pela ABNT NBR 16.853/20 “Solos – Ensaio de Adensamento Unidimensional”.

Os corpos-de-prova foram moldados *in loco* através da cravação de anéis com diâmetros variados, porém o anel moldado em campo possui diâmetro superior ao usado na célula do edométrico. Sendo necessário à redução do diâmetro da amostra indeformada em laboratório, pois é utilizado o anel de 60 cm de diâmetro. A seguir, será apresentada a síntese dos ensaios realizados.

- 6 ensaios edométricos completos sem inundação na condição de umidade natural;
- 6 ensaios edométricos completos previamente inundados;

Todos os ensaios edométricos completos seguiram ciclos de carregamentos e descarregamentos, onde as tensões aplicadas foram: 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 e 1280 kPa. O tempo de adensamento por carga foi de 24 horas, já para o período de inundação das amostras foi de 24 horas.

Alguns cuidados antes da execução do ensaio foram tomados, tais como a fixação de um plástico com o intuito de cobrir a célula, preservando a umidade inicial do solo em questão (FERREIRA, 2012).

3.7. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

O Ensaio de Cisalhamento Direto foi realizado no Laboratório de Solos Não-Saturados da UFPE. Foram coletadas amostras do Topo, Meio e Base de ambos os taludes através da moldagem *in loco* de caixas de cisalhamento de dimensões (10 x 10 x 4) cm.

Os ensaios foram realizados nas condições de umidade natural, umidade saturada e com sucção controlada. Nas três condições ensaiadas foram aplicadas

tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, sendo utilizado um corpo-de-prova para cada tensão normal ensaiada. O tempo de adensamento nesta condição durava 30 minutos.

Nos ensaios com a umidade saturada a amostra era submersa em água destilada durante 24 horas, após este intervalo de tempo, era iniciado o ensaio. Nos ensaios com sucção controlada as amostras ficaram em dessecadores com uma solução de NaCl na base do equipamento referido até os corpos-de-prova atingirem a sucção desejada (Figura 45). Concluída a etapa anterior foi utilizada uma prensa de cisalhamento direto, onde foi controlada a referida sucção. O tempo de adensamento das amostras para estas condições durava cerca de 30 minutos.

Após a conclusão do ensaio, a amostra era destruída e era coletado material para obtenção da umidade pós-ensaio.

A velocidade utilizada no ensaio foi de 0,48 mm/min (HEAD, 1994), sendo a mesma utilizada para as três situações.

Figura 45 – Amostras no dessecador a vácuo



Fonte: Autor (2019)

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e análises dos ensaios de campo e de laboratório de dois taludes localizados no Centro de Ipojuca-PE, a criação do perfil do subsolo e avaliação da estabilidade dos taludes são abordados neste capítulo.

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os resultados da caracterização Física dos solos dos Taludes 1 e 2, localizados na base, meia encosta e topo das encostas são apresentados na Tabela 17.

4.1.1. Granulometria e Peso específico real dos grãos

A Figura 46 mostra as curvas granulométricas obtidas e a Tabela 17 mostra a composição granulométrica, os valores de pesos específicos dos grãos obtidos e os índices de consistência.

Tabela 17 – Granulometria, consistência e atividade referente às amostras dos Taludes 1 e 2

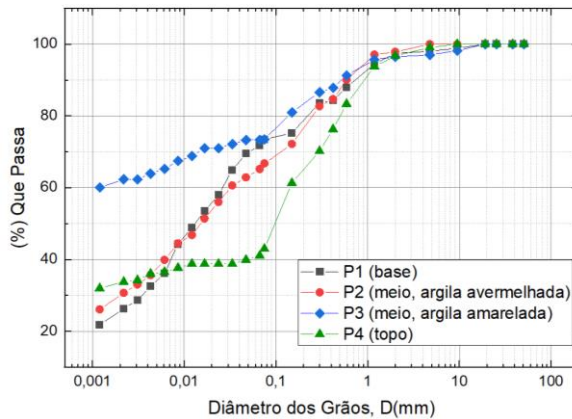
| TALUDE 1 | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-------|--------|-----------|----------------------------------|----------------------|-------|-------|------|---|-------------------------|
| AMOSTRAS | COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%) | | | | | LIMITES DE ATTEMBERG | | | | ATIVIDADE $I_A = \frac{IP}{\phi \leq 2 \cdot \mu}$ | CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA |
| - | Areia | Silte | Argila | < 2 μ | δ (kN/m ³) | LL(%) | LP(%) | IP(%) | IC | I _A | - |
| P4 (topo) | 56 | 5 | 39 | 34 | 26,5 | 47 | 37 | 10 | 1,68 | 0,29 | SC |
| P3 (meio, argila amarelada) | 26 | 8 | 66 | 60 | 26,7 | 70 | 43 | 27 | 1,62 | 0,45 | CH |
| P2 (meio, argila avermelhada) | 34 | 20 | 46 | 26 | 26,6 | 62 | 36 | 26 | 1,47 | 1,0 | CH |
| P1 (base) | 26 | 30 | 44 | 22 | 26,8 | 66 | 53 | 13 | 2,39 | 0,59 | CH |
| TALUDE 2 | | | | | | | | | | | |
| P7 (topo) | 46 | 6 | 48 | 37 | 26,6 | 46 | 31 | 15 | 1,85 | 0,40 | CL |
| P6 (meio) | 30 | 39 | 31 | 26 | 27,6 | 71 | 45 | 26 | 1,92 | 1,0 | MH |
| P5 (base) | 42 | 38 | 20 | 10 | 27,2 | 56 | 44 | 12 | 2,36 | 1,2 | MH |

2 μ = Percentual de argila; δ = Peso específico real dos grãos; LL = Limite de Liquidez; LP = Limite de Plasticidade; IP = Índice de Plasticidade; IC = Índice de Consistência; I_A = Índice de Atividade;

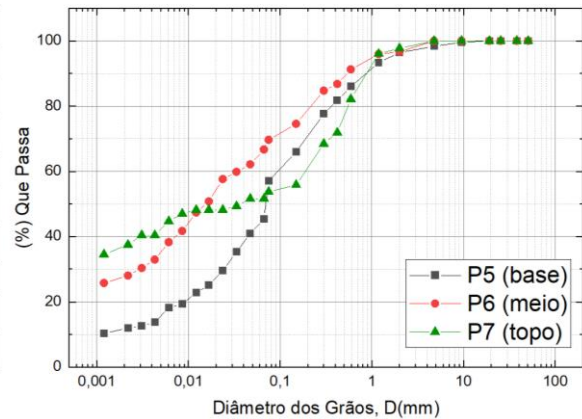
Fonte: Autor (2020)

Figura 46 – Curvas granulométricas dos solos dos Taludes 1 e 2

a) Solos do Talude 1



b) Solos do Talude 2



Fonte: Autor (2020)

No Talude 1 o solo da Base é mais argiloso que no Topo, sendo a Meia encosta a interface que apresenta o maior teor de argila (66 %). Já o solo do Topo é mais arenoso que as demais interfaces (Meio e Base), sendo a região que apresenta o maior teor de areia (56 %). O solo da Meia Encosta é o mais plástico que as demais regiões (Topo e Base) e apresenta o maior valor de IP (27) indicando uma argila altamente plástica, as demais amostras são medianamente plásticas. Todas as amostras apresentaram $IC > 1,0$ indicando argilas duras.

No Talude 2 o solo da Base é menos argiloso do que as demais interfaces (Meio e Topo) apresentando o menor teor de argila (20 %). Já o solo da Meia encosta é menos arenoso que as demais interfaces (Topo e Base) apresentando o menor teor de areia (30 %). O solo da Meia Encosta é mais plástico que as demais regiões (Topo e Base) e apresenta o maior valor de IP (26) indicando uma argila altamente plástica, as demais amostras são medianamente plásticas. Todas as amostras apresentaram $IC > 1,0$ indicando argilas duras.

Os solos do Topo de ambas as encostas apresentam granulometrias abertas indicando solos lixiviados. E a partir da análise da composição granulométrica do solo, observa-se que há grande quantidade de finos nas amostras de ambos os taludes com mais de 50% de material passando na peneira de número # 200 (0,075mm), como mostra a Tabela 17.

Tabela 18 - Granulometria, plasticidade e atividade presente em outros estudos

| Local | Ref. | Prof. (m) | Descrição do solo | Formação Geológica | Granulometria (%) | | | | Limites de Atterberg (%) | | Ativ. |
|------------|------------------------|-----------|---|------------------------|-------------------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|----------|
| | | | | | Arg. | Silte | Areia | Ped. | LL | IP | |
| Camaragibe | Silva (2007) | 1,5-6,3 | Areia argilosa | FB/ Planície Aluvial | 20-28 | 8-12 | 57-68 | 0-8 | 32-42 | 12-14 | 0,5-0,7 |
| Recife | Coutinho et al. (2006) | 0-5,0 | Areia argilosa e siltosa | FB/ A ser identificada | 8-30 | 3-15 | 55-87 | 0-2 | 29-34 | 11-15 | - |
| Recife | Lima (2002) | 1,3 | Argila arenosa | FB/ A ser identificada | 58 | 3 | 39 | 0 | 42 | 16 | 0,3 |
| Camaragibe | Bandeira (2003) | 0,5-5 | Areia argilosa | FB/ Aluvial Proximal | 20-48 | 8-31 | 40-57 | 0-8 | 45-49 | 14-19 | 0,7-1,1 |
| | | 0,5-4 | Areias argilosas e siltosas | FB/ Canal Fluvial | 10-35 | 4-24 | 58-85 | 0 | 20-31 | 6-11 | 0,3-0,5 |
| Cabo | Lafayette (2006) | 0,5-6 | Areias argilosas e siltosas | FB/ Canal Fluvial | 5-39 | 1-7 | 66-94 | 0,5-2 | 20-32 | 4-13 | 0,3-0,5 |
| Camaragibe | Bandeira (2003) | 0,5-5,0 | Argila arenosa | SR/ Granito - maduro | 8-41 | 4-66 | 27-59 | 0-2 | 27-47 | 10-23 | 0,5-6,0 |
| Ipojuca | Presente dissertação | 0,5 | Argilas arenosas e siltosas; Areia argilosa | SR/ Quartzo - maduro | 39-66 | 5-30 | 26-55 | 0 | 46-71 | 10-27 | 0,29-1,2 |

FB – Formação Barreiras; SR – Solo Residual

Fonte: Adaptado de Silva (2007)

A Tabela 18 mostra os valores da granulometria, plasticidade e índice de atividade dos solos de Formações Barreiras previamente estudados e dos solos das encostas analisadas. É verificado que a granulometria do solo da Formação Ipojuca apresenta maiores teores de argila. Em relação à plasticidade, a maioria dos solos das Formações Barreiras varia de medianamente plástico a altamente plástico, assim como o solo estudado. Os valores do índice de atividade dos solos também apresentam valores similares.

4.1.2. Limites de Consistência

A Tabela 17 apresenta os resultados dos ensaios de Limite de Liquidez e Plasticidade para todas as amostras. Com relação ao Índice de Atividade das argilas verifica-se que as amostras P2, P5 e P6 são classificadas como normal de acordo com o critério de Skempton (1953). As demais amostras são classificadas como inativas, pois o $I_A < 0,75$.

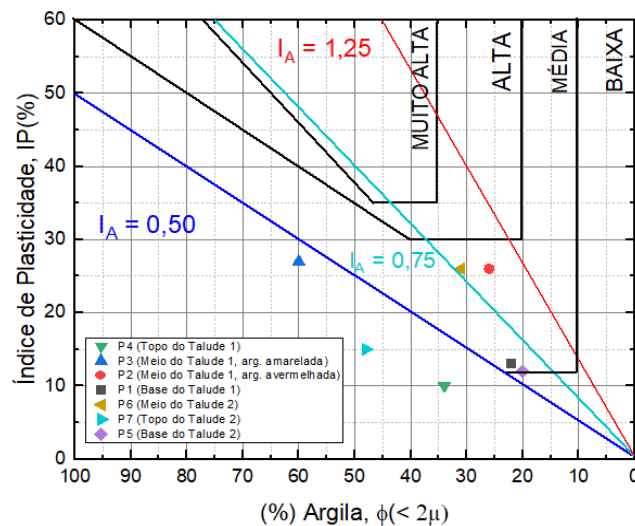
Classificando as amostras de solo pelo Sistema de Classificação Unificada (USCS, sigla em inglês) verifica-se que as amostras P4 e P7 são classificadas como SC (areia argilosa) e CL (argila arenosa); as amostras P6 e P5 são classificadas em

MH (solo siltoso e fino arenoso respectivamente); as demais amostras são classificadas como CH (argila inorgânica de alta compressibilidade).

Pela classificação rodoviária da ASTM D 3282 (2015) e AASSHTO (2017), a HRB (Highway Research Board) ou TRB (sigla em português) as amostras P7 e P5 são classificadas em Solos Siltosos A-5 e A-4 respectivamente, inapropriados para pavimentação. As demais amostras são classificadas como Solos Argilosos (A-7-6 ou A-6) sendo considerados inadequados para uso em pavimentação.

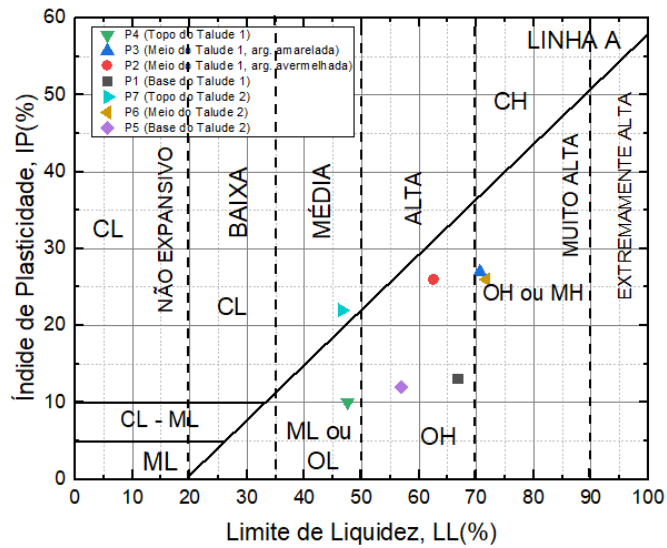
Ao analisar o potencial de expansão dos solos, foram considerados os critérios de Skempton (1953); Daksanamurthy e Raman (1973) verificou-se que parâmetro varia de média a alta (Figuras 47 e 48).

Figura 47 – Potencial de expansão pelo critério de Skempton (1953) e Van der Merwe (1964)



Fonte: Adaptado de Skempton (1953) e Van der Merwe (1964)

Figura 48 – Potencial de expansão pelo critério de Daksanamurthy e Raman(1973)



Fonte: Adaptado de Daksanamurthy e Raman (1973)

Tabela 19 – Resumo do Potencial de expansão do solo estudado

| LOCALIZAÇÃO | AMOSTRA | CRITÉRIO | CLASSIFICAÇÃO |
|-------------|--|--|----------------|
| Talude 1 | P4 (topo) | Skempton (1953) e Van der Merwe (1964) | Inativa; Baixa |
| | | Dakasanamurthy e Raman (1973) | Média |
| | P3 (meio, argila amarelada) | Skempton (1953) e Van der Merwe (1964) | Inativa; Baixa |
| | | Dakasanamurthy e Raman (1973) | Alta |
| | P2 (meio, argila avermelhada) | Skempton (1953) e Van der Merwe (1964) | Normal; Média |
| | | Dakasanamurthy e Raman (1973) | Alta |
| P1 (base) | Skempton (1953) e Van der Merwe (1964) | Inativa; Média | |
| | Dakasanamurthy e Raman (1973) | Alta | |
| Talude 2 | P7 (topo) | Skempton (1953) e Van der Merwe (1964) | Inativa; Baixa |
| | | Dakasanamurthy e Raman (1973) | Média |
| | P6 (meio) | Skempton (1953) e Van der Merwe (1964) | Normal; Média |
| | | Dakasanamurthy e Raman (1973) | Muito alta |
| | P5 (base) | Skempton (1953) e Van der Merwe (1964) | Ativa; Média |
| | | Dakasanamurthy e Raman (1973) | Alta |

Fonte: Autor (2020)

A Tabela 19 mostra a classificação qualitativa da expansividade dos solos variando de baixa à alta, e atividade variando de inativa à ativa. Estas qualificações serão discutidas com os resultados da análise química e mineralógica dos solos. Foi observado que os pontos de coleta de material nos taludes estudados estão localizados em áreas de Latossolo Amarelo que correspondem a mais de 70% de todo o município de Ipojuca (IBGE, 2010), o sistema de classificação brasileira de solos (SiBCS) nomeia o solo analisado em LAd (Latosolo Amarelo). Os Latossolos são solos de alto grau de intemperismo onde preponderam solos não expansivos.

4.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Os resultados da caracterização Química das amostras de solos dos Taludes 1 e 2 são apresentados nas Tabela 20 e 21 respectivamente..

Tabela 20 – Caracterização Química dos solos do Talude 1

| Determinação | Unidade | P1 (base) | P2 (meio, argila avermelhada) | P4 (topo) |
|---|-----------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| pH em Água | - | 6,50 | 5,00 | 6,40 |
| pH em KCl | - | 5,80 | 4,73 | 6,11 |
| pH em CaCl ₂ | - | 6,10 | 4,84 | 6,23 |
| Condutividade elétrica | mS/cm a 25°C | 190,30 | 101 | 103,45 |
| Carbono Orgânico (CO) | g/kg | 4,1 | 0,80 | 3,50 |
| Matéria Orgânica | g/kg | 0,020 | 0,187 | 0,558 |
| Ca ²⁺ trocável | cmol _e /kg | 2,81 | 0,34 | 1,83 |
| Mg ³⁺ trocável | cmol _e /kg | 1,91 | 1,11 | 1,23 |
| Na ⁺ trocável | cmol _e /kg | 4,72 | 4,32 | 1,06 |
| K ⁺ trocável | cmol _e /kg | 2,22 | 4,08 | 2,54 |
| H ⁺ extraível | cmol _e /kg | 0,3 | 4,30 | 0,40 |
| Al ³⁺ trocável | cmol _e /kg | 0,3 | 1,50 | 0,05 |
| Valor S (soma dos cátions) | cmol _e /kg | 11,96 | 11,35 | 6,71 |
| Acidez potencial (H ⁺ e Al ³⁺) | cmol _e /kg | 0,60 | 5,80 | 0,45 |
| Valor T (Capacidade de Troca Catiônica) | cmol _e /kg | 12,26 | 15,65 | 7,11 |
| Valor V (Saturação de base) | % | 97,55 | 72,52 | 94,37 |
| Saturação de sódio | % | 38,50 | 27,60 | 14,91 |
| Saturação de alumínio | % | 2,44 | 11,67 | 0,74 |
| Fe ₂ O ₃ no extrato sulfúrico | % | 6,17 | 4,17 | 4,89 |
| Al ₂ O ₃ no extrato sulfúrico | % | 13,14 | 11,49 | 4,81 |
| SiO ₂ | % | 5,00 | 8,48 | 4,61 |

Fonte: Autor (2020)

Tabela 21 – Caracterização Química dos solos do Talude 2

| Determinação | Unidade | P5 (base) | P6 (meio) | P7 (topo) |
|---|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| pH em Água | - | 7,80 | 4,99 | 4,47 |
| pH em KCl | - | 6,69 | 4,21 | 3,94 |
| pH em CaCl ₂ | - | 7,28 | 4,22 | 3,98 |
| Condutividade elétrica | mS/cm a 25°C | 195,10 | 99,04 | 105,30 |
| Carbono Orgânico (CO) | g/kg | 0,012 | 0,146 | 0,538 |
| Matéria Orgânica | g/kg | 0,02 | 0,25 | 0,93 |
| Ca ²⁺ trocável | cmol _e /kg | 3,70 | 0,50 | 1,50 |
| Mg ³⁺ trocável | cmol _e /kg | 1,70 | 1,30 | 1,39 |
| Na ⁺ trocável | cmol _e /kg | 0,01 | 2,09 | 0,01 |
| K ⁺ trocável | cmol _e /kg | 1,1 | 1,2 | 1,1 |
| H ⁺ extraível | cmol _e /kg | 3,60 | 5,60 | 5,00 |
| Al ³⁺ trocável | cmol _e /kg | 0,00 | 1,50 | 0,50 |
| Valor S (soma dos cátions) | cmol _e /kg | 6,51 | 6,59 | 4,50 |
| Acidez potencial (H ⁺ e Al ³⁺) | cmol _e /kg | 3,60 | 7,10 | 5,50 |
| Valor T (Capacidade de Troca Catiônica) | cmol _e /kg | 10,11 | 12,19 | 9,50 |
| Valor V (Saturação de base) | % | 64,23 | 41,93 | 41,27 |
| Saturação de sódio | % | 0,01 | 17,09 | 0,11 |
| Saturação de alumínio | % | 0,00 | 22,76 | 11,34 |
| Fe ₂ O ₃ no extrato sulfúrico | % | 4,15 | 4,00 | 2,90 |
| Al ₂ O ₃ no extrato sulfúrico | % | 17,60 | 12,40 | 5,80 |
| SiO ₂ | % | 4,32 | 8,65 | 14,64 |

Fonte: Autor (2020).

Para as amostras P7 (Topo do Talude 2), P6 (Meio do Talude 2) e P2 (Meio do Talude 1), os valores dos pH(s) $< 5,0$ sendo classificados em fortemente ácido para o solo em KCl que, em contato com a amostra de terra, induz a troca de cátions devido à maior concentração dos íons K^+ , liberando íons H^+ e Al^{3+} para a solução, com consequente aumento da acidez (EBELING et al., 2008). As demais amostras P4 (Topo do Talude 1), P5 (Base do Talude 2) e P1 (Base do Talude 1) os valores dos pH(s) são 6,11; 6,69 e 5,8 sendo classificados em levemente ácido, neutro e moderadamente ácido respectivamente (GUIMARÃES, 2002).

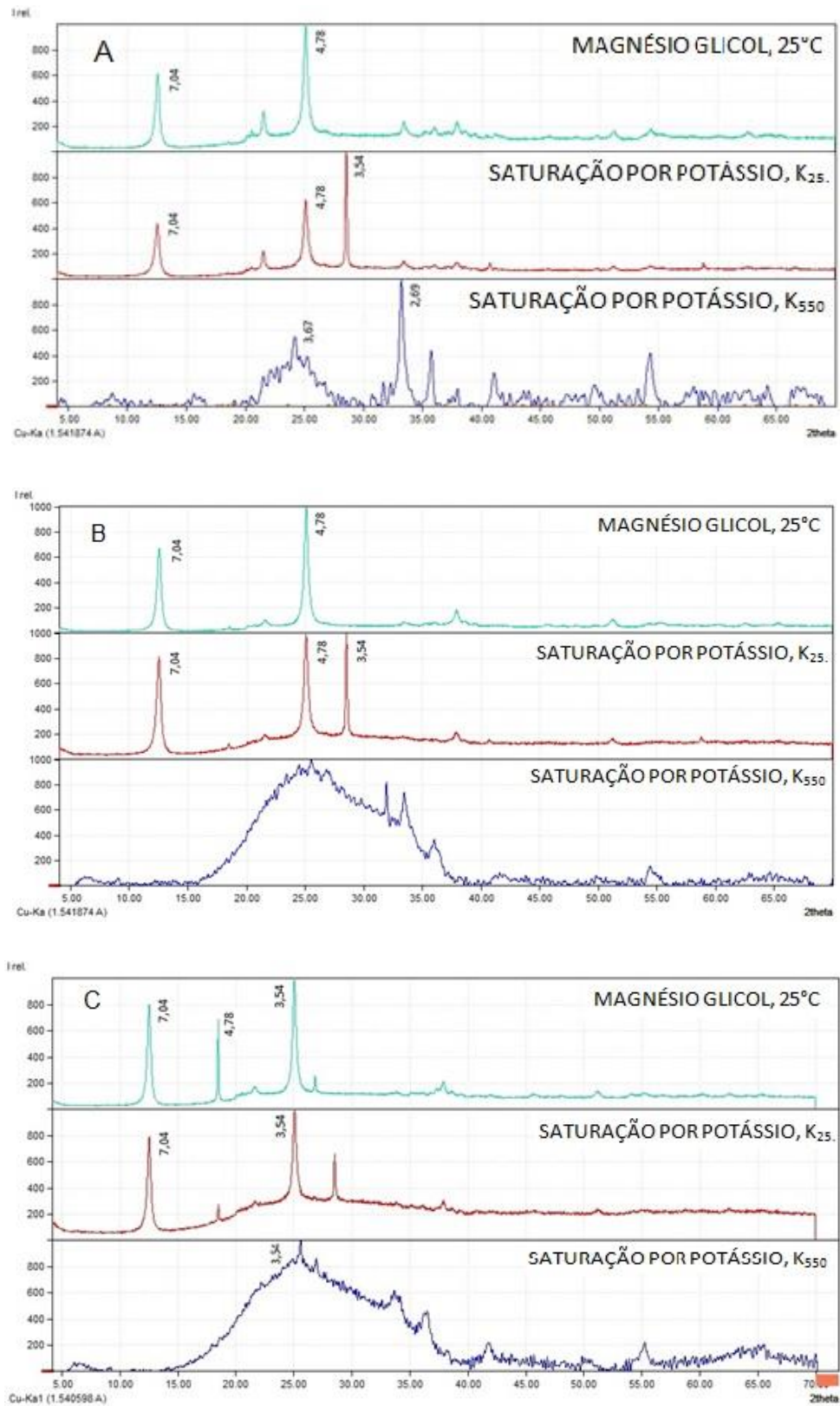
Todas as amostras de solo apresentam valores de $V > 50 \%$ indicam solos mais férteis, exceto as amostras P7 (Topo do Talude 2), P6 (Meio do Talude 2) e P2 (Meio do Talude 1), pois $V < 50 \%$, o que indicam solos pouco férteis (SILVA et al., 2001). Deve-se ressaltar que a amostra P2 (Meio do Talude 1) o valor $V > 50 \%$ e $pH < 5,0$ e de acordo com a Embrapa (2010, p. 10) “A maioria das culturas apresenta boa produtividade quando no solo é obtido valor $V\%$ entre 50 e 80% e valor de pH entre 6,0 e 6,5”, valores estes que podem ser considerados ácidos e apesar da amostra P2 (Meio do Talude 1) possuir $pH < 5,0$ ainda pode ser considerado um solo com elevada produtividade.

Os resultados relativos ao CTC para todas as amostras de ambos os taludes são considerados baixos ($< 27 \text{ mmol}_c/\text{kg}$) confirmando a baixa atividade do solo. Tal valor indica uma baixa capacidade nutritiva dos solos nestas regiões (PAIVA, 2016).

4.3. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Os resultados dos difratogramas das amostras P4, P2 e P1 (Topo, Meio e Base do Talude 1 respectivamente) são apresentados na Figura 49. Os difratogramas mostram que há presença de quartzo e caulinita. Estes argilominerais não são expansivos. Isto confirma que métodos indiretos (Skempton (1953) e Van der Merwe (1964); Dakasanamurthy e Raman (1973)) utilizados na caracterização de solos expansivos não apresenta acurácia na identificação de solos expansivos. Os valores da CTC de todas as amostras são baixos ($< 27 \text{ cmol}_c/\text{kg}$), os solos são Latossolos e não apresentam argilominerais expansivos confirmando o comportamento não expansivo dos solos.

Figura 49 – Difratogramas das amostras do Talude 1



a) P4 (Topo do Talude) b) P2 (Meio do Talude, argila avermelhada) c) P1 (Base do Talude)

Fonte: Autor (2020)

Através da inspeção tátil-visual do solo percebe-se um brilho intenso no solo, onde se acreditava na presença de Mica. Contudo, após a análise da Figura 49 não foi detectada a fase da mica, tal brilho é justificado pela presença dos cristais de quartzo identificados nos difratogramas.

Pelas Figuras 26 e 49 pode-se concluir que a rocha matriz que originou o solo residual do talude indica ser um Traquito ou Riolito, rochas estas presentes na Formação Ipojuca. Entretanto, o Traquito apresenta baixos percentuais de quartzo (em torno de 10 %) em sua composição mineralógica. Sendo o Riolito a rocha mãe devido à intensidade do pico de quartzo encontrado nos difratogramas.

4.4. RELAÇÃO SUCÇÃO/UMIDADE

São apresentados os resultados das curvas característica de ambos os taludes estudados, a Tabela 22 mostra as condições de umidade de campo e as respectivas sucções. Foram utilizados para ajustar as curvas características às equações de Van Genuchten (1980), Fredlund & Xing (1994), Durner (1994) e Gitirana Jr. & Fredlund (2004), os valores dos ajustes das curvas características podem ser encontrados no Apêndice A.

Tabela 22 – Relação Umidade x Sucção

| LOCALIZAÇÃO | AMOSTRAS | UMIDADE (%) | SUCÇÃO (kPa) |
|-------------|-----------|-------------|--------------|
| Talude 1 | P4 (topo) | 18,8 | 4684,25 |
| | P2 (meio) | 25 | 2821,32 |
| | P1 (base) | 32 | 667,91 |
| Talude 2 | P7 (topo) | 14 | 5090 |
| | P6 (meio) | 18,48 | 4903,9 |
| | P5 (base) | 25 | 2821,32 |

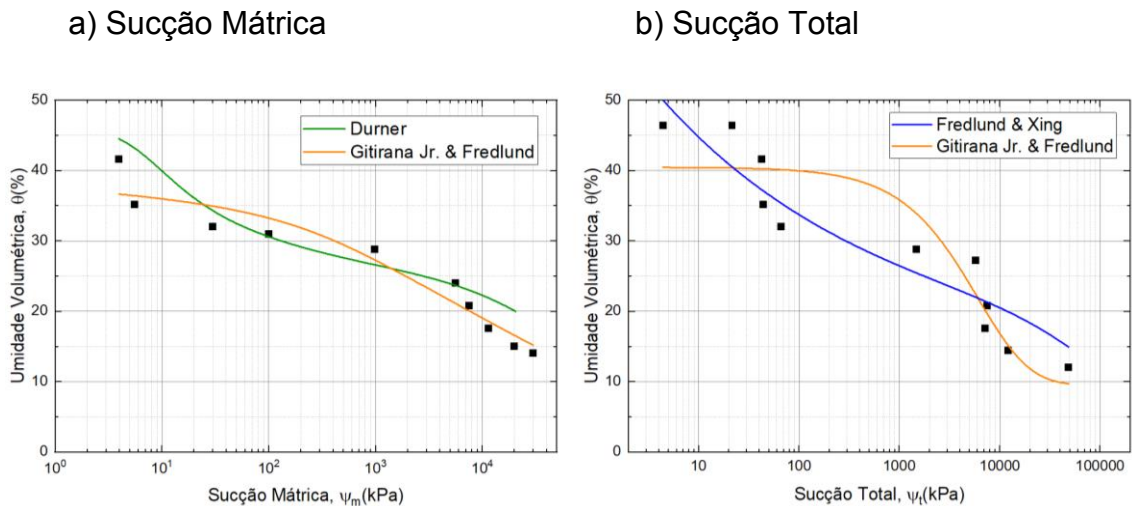
Fonte: Autor (2020)

A Figura 50 apresenta o comportamento bimodal do solo da amostra P4 (Topo do Talude 1). Tal comportamento justifica-se pelos difratogramas da Figura 49, pois foi verificado que o solo tem como rocha matriz o Traquito corroborando a origem vulcânica deste solo e a formação de um solo residual maduro.

Os demais solos apresentam comportamento unimodal (Figuras 51 e 52), pois apresentam um deslocamento vertical. O solo do Topo do Talude 1 apresenta

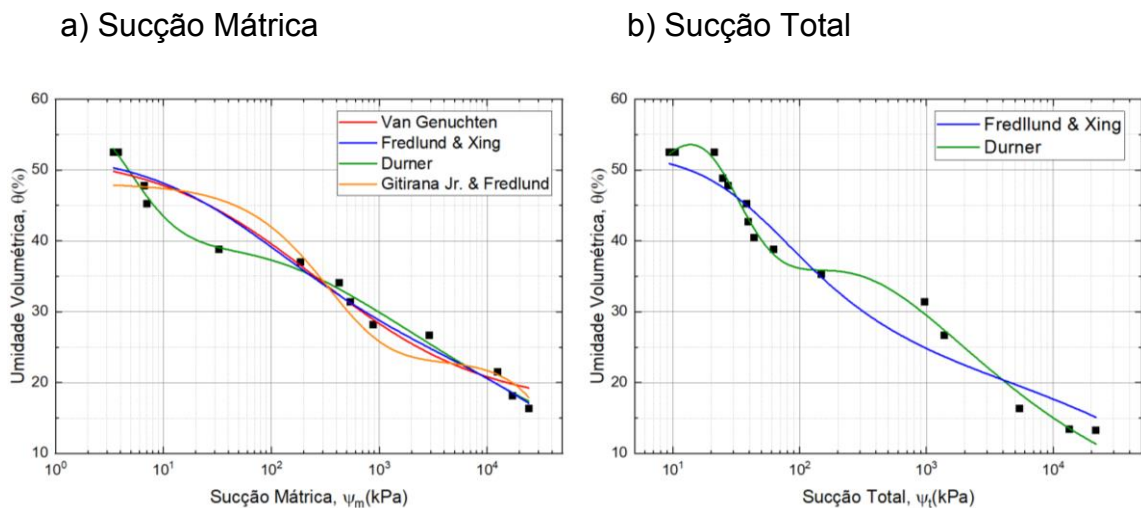
deslocamentos verticais melhores definidos, contudo, os solo do Meio e Base do Talude 1 apresenta comportamento unimodal devido a proximidade do lençol freático torna-se mais difícil a detecção e visualização dos deslocamentos.

Figura 50 – Umidade volumétrica *versus* Sucção mátrica e total, amostra P4 (Topo do Talude 1)



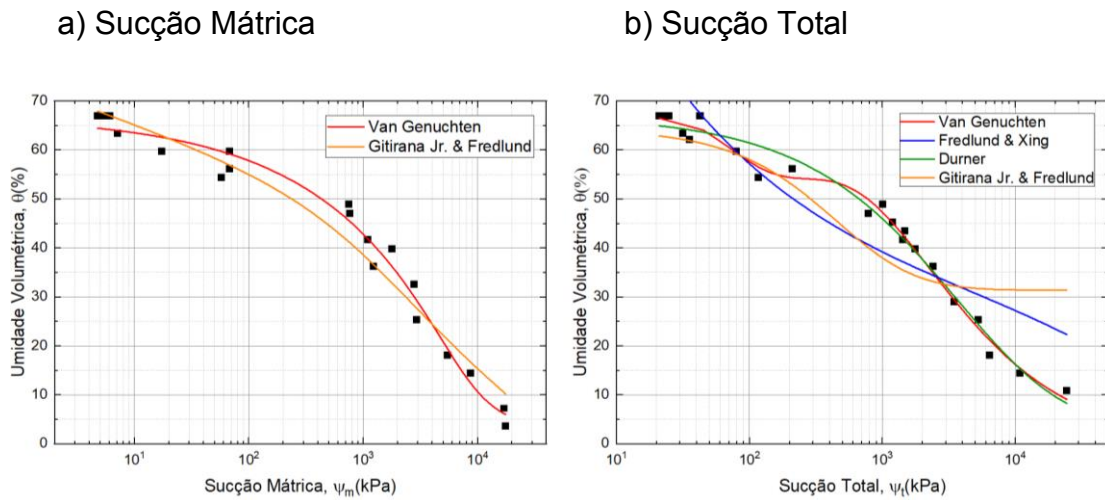
Fonte: Autor (2020)

Figura 51 – Umidade volumétrica *versus* Sucção mátrica e total, amostra P2 (Meio do Talude 1)



Fonte: Autor (2020)

Figura 52 – Umidade volumétrica versus Sucção mátrica e total, amostra P1 (Base do Talude 1)

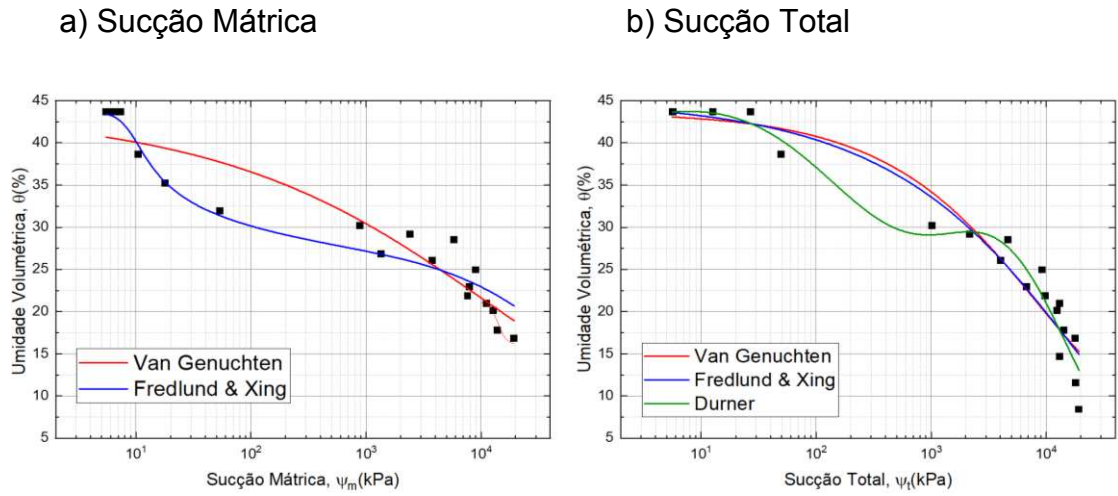


Fonte: Autor (2020)

A Figura 53 mostra o comportamento bimodal do solo da amostra P7 (Topo do Talude 2). Já as Figuras 54 e 55 mostram as curvas características dos solos do Talude 2 que apresentam comportamento unimodal, pois os deslocamentos verticais são mais suaves tornando difícil a identificação do carácter bimodal dos solos, sendo aproximados para solos de comportamento unimodal.

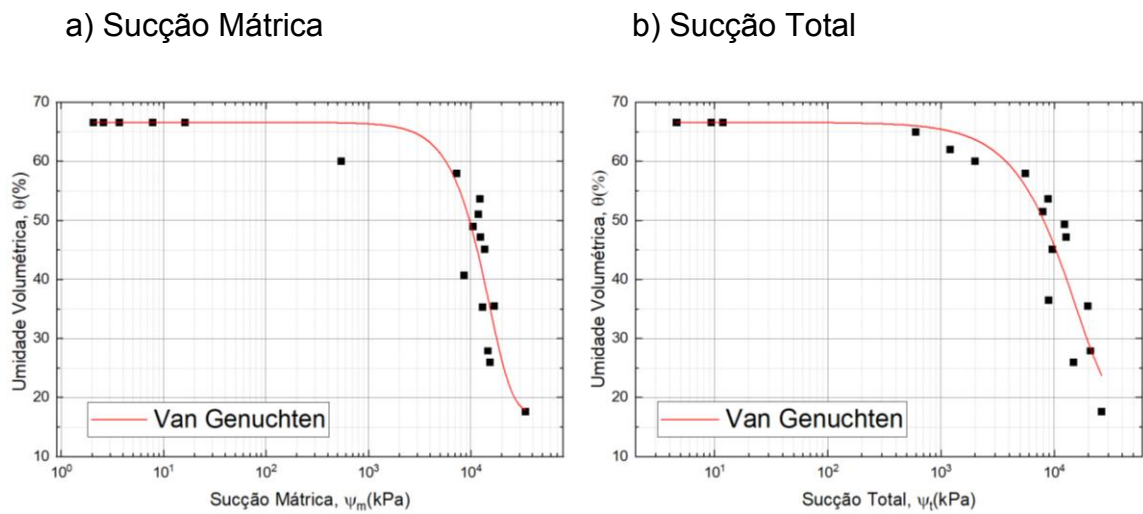
Os solos do Topo e Meio do Talude 2 apresentam o deslocamento vertical melhores definidos, contudo, o solo da Base do Talude 2 também apresenta comportamento unimodal, porém devido a proximidade do lençol freático torna-se menos evidente tal deslocamento.

Figura 53 – Umidade volumétrica *versus* Sucção mátrica e total para a amostra P7 (Topo do Talude 2)



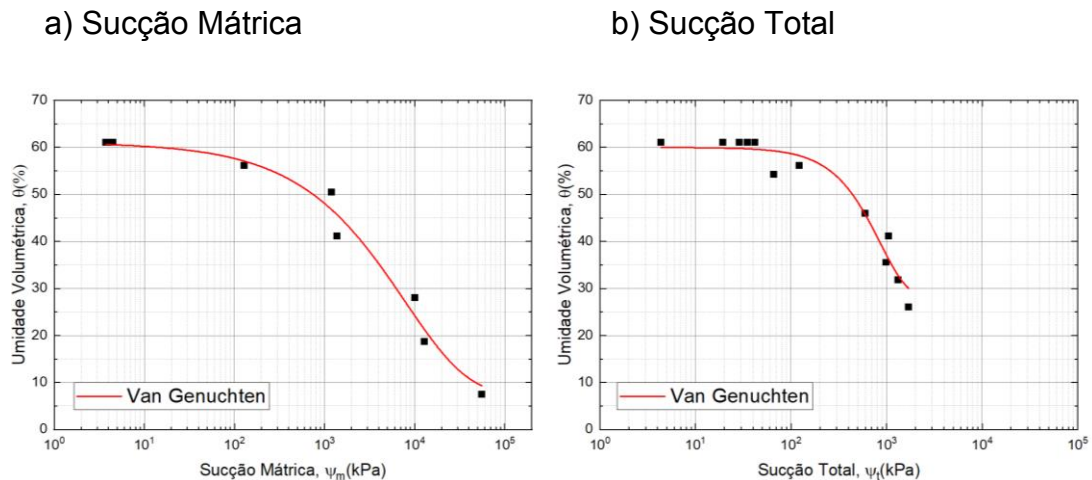
Fonte: Autor (2020)

Figura 54 – Umidade volumétrica *versus* Sucção mátrica e total amostra P6 (Meio do Talude 2)



Fonte: Autor (2020)

Figura 55 – Umidade volumétrica versus Sucção mátrica e total amostra P5 (Base do Talude 2)



Fonte: Autor (2020)

Os solos encontrados no topo de ambos os taludes apresentam distribuições granulométricas abertas características de solos com comportamento bimodal (Figura 50 e 53), os demais solos apresentam comportamento unimodal. A variação no comportamento do solo pode ser atribuída às condições de intemperismo e ocupação antrópica em ambas as encostas são diferentes favorecendo a variação do comportamento do solo.

Os solos mais superficiais se encontram praticamente saturados, pois a umidade do solo mensurada foi elevada e verificou-se a presença do lençol freático raso cerca de 50 cm. Assim, as regiões mais próximas à superfície, os solos apresentam valores de sucção baixos.

O solo analisado é localizado em uma região tropical e são marcados principalmente pelo intemperismo avançado, que resulta em agregação de partículas, geralmente por cimentação (FRANZOI, 1990). Com isso, em função da frequente agregação das partículas dos solos tropicais, desenvolve-se nesses solos um comportamento em dois estágios definidos pela macro e microestrutura, comportamento bimodal, que consiste basicamente em solos que apresentam dois deslocamentos para cima.

Entretanto por ser um fator dependente da condição não saturada dos solos, alguns elementos podem interferir na magnitude da sucção total como, a granulometria do solo, a mineralogia, a estrutura do solo, a trajetória de saturação

prévia e posterior secagem, o grau de saturação, a proximidade com o nível do lençol freático, a presença de raízes de plantas, entre outros. A granulometria e a mineralogia são parâmetros que refletem na magnitude da sucção dos solos. O primeiro determina a porcentagem do tamanho das partículas presentes em um solo, possibilitando inferir sobre o seu comportamento mecânico e hidráulico pela presença da fração fina (argila e silte).

A estrutura do solo diz respeito ao tamanho dos seus vazios, ou seja, os vazios nos solos não saturados têm sido assemelhados a tubos capilares e a manifestação da capilaridade introduz um aumento circunstancial da tensão normal entre as partículas (CALLE, 2000; LAFAYETTE, 2000), o que influencia no valor da sucção. Isso reflete na capacidade de retenção de água devido ao volume de poros, sejam macro ou mesoporos existentes no solo. Os processos de saturação prévia e posterior secagem fazem surgir às condições de maior estresse no solo, que são os períodos de expansão, quando o solo é umedecido, e de contração, com a perda d'água (FERREIRA et al., 2015).

Em alguns solos pode ocorrer expansão de elevada expressão, uma vez que, sua composição mineralógica apresenta características atrativas à adesão das moléculas de água a sua estrutura. Além disso, esses processos originam o fenômeno da histerese, que segundo Santos (2015), deriva-se da variação de umidade, fazendo com que os parâmetros relacionados com a quantidade de água no solo tenham valores diferentes no processo de umedecimento e no de secagem.

4.5. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os resultados da condutividade hidráulica dos solos do Topo e Base de ambas as encostas, determinados em campo utilizando o Permeômetro Guelph e em laboratório usando o Tri-flex II, serão apresentados a seguir.

4.5.1 Condutividade Hidráulica em campo

Os resultados obtidos da condutividade hidráulica dos solos determinados *in situ* no Topo e na Base dos Taludes 1 e 2 são mostrados na Tabela 23. Pode-se observar que o valor do coeficiente de permeabilidade de campo

diminui com o aumento da profundidade indicando a presença de material menos poroso e mais coeso a maiores profundidades.

Tabela 23 – Valores de k , α e $H(\%)$

| Localização | Amostras | Profundidade (m) | $\alpha(\text{cm}^{-1})$ | $h(\%)$ | $k(\text{cm/s})$ |
|-------------|-----------|------------------|--------------------------|---------|---|
| Talude 1 | P4 (topo) | 0,50 | 0,12 | 29,55 | $4,46 \times 10^{-5}$ (H = 5 cm) $1,05 \times 10^{-4}$ (H = 10 cm) |
| | P1 (base) | 0,50 | 0,12 | 34,16 | $1,40 \times 10^{-6}$ |
| Talude 2 | P7 (topo) | 0,50 | 0,12 | 18,70 | $4,48 \times 10^{-3}$ |
| | P5 (base) | 0,50 | 0,12 | 27,31 | $6,84 \times 10^{-7}$ |

k = coeficiente de permeabilidade; h = umidade; α = coeficiente de forma;

Fonte: Autor (2020)

4.5.2. Tri-Flex II

Os valores da Condutividade Hidráulica determinada em laboratório usando o Tri-flex II são apresentados nas Tabelas 24 e 25 para os solos de ambos os taludes. É verificado que o coeficiente de permeabilidade decresce com o aumento da tensão.

Tabela 24 – Valores de tensão vertical (σ), tempo de ensaio (Δt) e condutividade hidráulica (k) das amostras de ambos os taludes

| Talude 1 | | | | |
|--|-------------|----------------|----------------|-----------------------|
| P4 (Topo) | | | | |
| Profundidade equivalente à tensão aplicada (m) | V_P (kPa) | σ (kPa) | Δt (s) | k (cm/s) |
| 4,52 | 100 | 120 | 6,47 | $8,86 \times 10^{-4}$ |
| 6,40 | 100 | 170 | 21 | $4,68 \times 10^{-4}$ |
| 8,30 | 100 | 220 | 115,67 | $4,95 \times 10^{-4}$ |
| 10 | 500 | 270 | 47,95 | $2,38 \times 10^{-5}$ |
| 12 | 500 | 320 | 119,67 | $9,58 \times 10^{-6}$ |
| 14 | 500 | 370 | 223,67 | $5,12 \times 10^{-6}$ |
| 15,84 | 500 | 420 | 246,33 | $4,65 \times 10^{-6}$ |
| P1 (Base) | | | | |
| Profundidade equivalente à tensão aplicada (m) | V_P (kPa) | σ (kPa) | Δt (s) | k (cm/s) |
| 4,48 | 500 | 120 | 493,33 | $2,95 \times 10^{-6}$ |
| 8,20 | 500 | 220 | 900 | $1,35 \times 10^{-6}$ |
| 10 | 500 | 270 | 1076,33 | $1,13 \times 10^{-6}$ |
| 12 | 500 | 320 | 1187 | $1,02 \times 10^{-6}$ |
| 13,80 | 500 | 370 | 1452,33 | $8,35 \times 10^{-7}$ |

| | | | | |
|--|------------------|----------------|----------------|-----------------------|
| 15,70 | 500 | 420 | 1603 | $7,56 \times 10^{-7}$ |
| Talude 2 | | | | |
| P7 (topo) | | | | |
| Profundidade equivalente à tensão aplicada (m) | ∇P (kPa) | σ (kPa) | Δt (s) | k (cm/s) |
| 4,51 | 100 | 120 | 9,37 | $5,20 \times 10^{-4}$ |
| 6,39 | 100 | 170 | 11,71 | $4,16 \times 10^{-4}$ |
| 8,27 | 100 | 220 | 23,89 | $2,04 \times 10^{-4}$ |
| 10,15 | 100 | 270 | 79,75 | $6,11 \times 10^{-5}$ |
| 12 | 100 | 320 | 381 | $1,28 \times 10^{-5}$ |
| 13 | 100 | 370 | 1260,33 | $3,86 \times 10^{-6}$ |
| P5 (base) | | | | |
| Profundidade equivalente à tensão aplicada (m) | ∇P (kPa) | σ (kPa) | Δt (s) | k (cm/s) |
| 4,41 | 500 | 120 | 1082,67 | $8,23 \times 10^{-7}$ |
| 8,0 | 500 | 220 | 2398,33 | $3,72 \times 10^{-7}$ |
| 10 | 500 | 270 | 2595,67 | $3,43 \times 10^{-7}$ |
| 11,76 | 500 | 320 | 2764,33 | $3,22 \times 10^{-7}$ |
| 13,60 | 500 | 370 | 3018,67 | $2,95 \times 10^{-7}$ |
| 15,44 | 500 | 420 | 3337,33 | $2,67 \times 10^{-7}$ |

Fonte: Autor (2020)

Pela Tabela 25 estima-se os valores do coeficiente de permeabilidade a uma profundidade de 0,5 m para as amostras P4 e P1 (Topo e Base do Talude 1), os valores obtidos são $1,42 \times 10^{-4}$ e $3,93 \times 10^{-6}$ cm/s respectivamente. Analogamente para as amostras P7 e P5 (Topo e Base do Talude 2), os valores são $8,91 \times 10^{-4}$ e $9,54 \times 10^{-7}$ cm/s, respectivamente.

Os resultados em campo e laboratório quando comparados, é verificado que os valores da condutividade em campo são 10-100 vezes maiores que os resultados obtidos em laboratório (DANIEL, 1994; DANIEL et al., 1985).

Tabela 25 - Dados dos ajustes

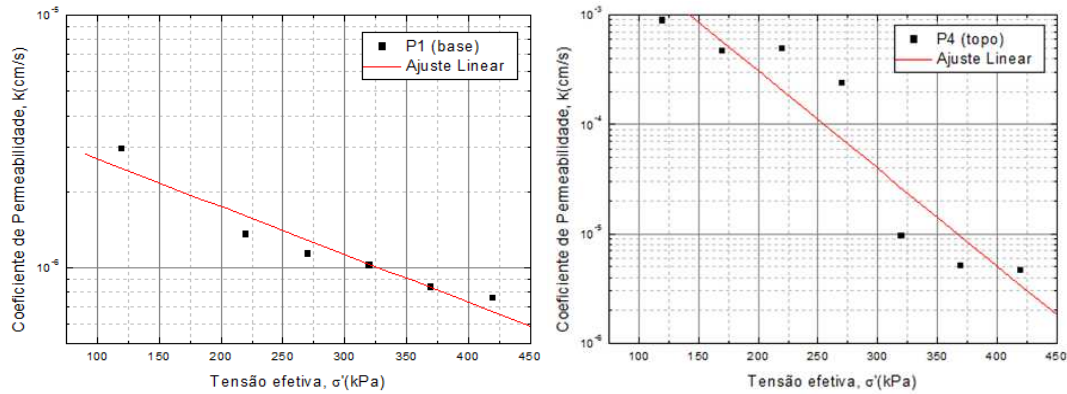
| TALUDE 1 | | | |
|-----------------|-------------|--|----------------|
| AMOSTRAS | LOCALIZAÇÃO | EQUAÇÃO AJUSTADA | R ² |
| P4 (topo) | Talude 1 | $k = 10^{-1,73-0,00891 \cdot \sigma'}$ | 0,94 |
| P1 (base) | | $k = 10^{-5,38-0,00189 \cdot \sigma'}$ | 0,96 |
| TALUDE 2 | | | |
| P7 (topo) | Talude 2 | $k = 10^{-1,93-0,00902 \cdot \sigma'}$ | 0,97 |
| P5 (base) | | $k = 10^{-6-0,00148 \cdot \sigma'}$ | 0,91 |

Fonte: Autor (2020)

Pela Tabela 26 a amostra P5 (Base do Talude 2) pode ser classificada como um solo de muito baixa condutividade hidráulica (TERZAGHI e PECK, 1967). As

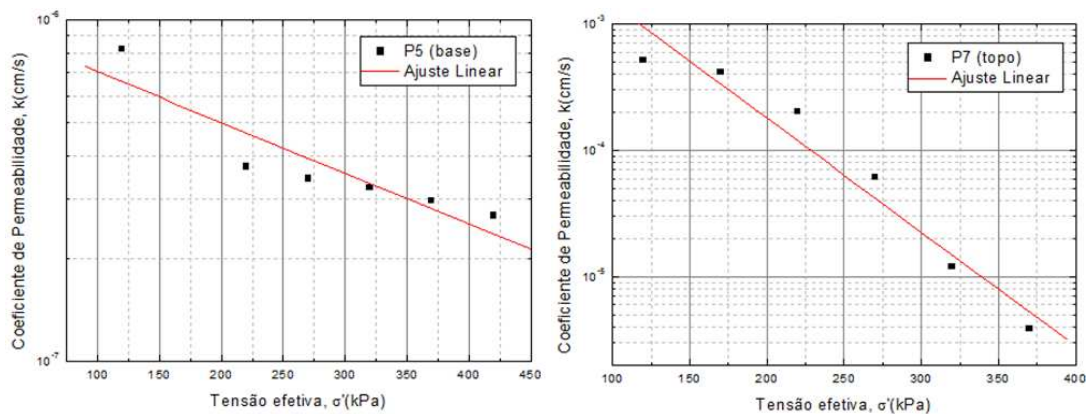
demais amostras podem ser classificadas como de baixa condutividade hidráulica (TERZAGHI e PECK, 1967).

Figura 56 – Coeficiente de permeabilidade *versus* Tensão efetiva, Talude 1



Fonte: Autor (2020)

Figura 57 – Coeficiente de permeabilidade *versus* Tensão efetiva, Talude 2



Fonte: Autor (2020)

As Figuras 56 e 57 mostram o comportamento da condutividade hidráulica do solo sob diferentes tensões, em que os valores dos coeficientes de permeabilidade decrescem com o aumento das tensões.

Esses resultados se mostram consistentes quando comparados com a composição do material. Para a amostra P4 (Topo do Talude 1) é composta por 56 % de areia justificando a maior permeabilidade na camada mais superficial. Para a amostra P1 (Base do Talude 1) é composta por mais de 70 % de finos (#200 mm) com 26 % de areia, o que justifica uma menor permeabilidade na camada mais superficial.

Para a amostra P7 (Topo do Talude 2) é composto por 46 % de areia e 52 % de finos (silte e argila) justificando a maior permeabilidade do solo. Já para a amostra P5 (Base do Talude 2) é composta por 42 % de areia, 38 % de silte e 20 % de argila, o que justifica a baixa permeabilidade do solo devido à presença de grande quantidade de finos.

Tabela 27 - Permeabilidade de Solos da Formação Barreiras do Estado de Pernambuco

| SOLOS | REFERÊNCIA | LOCAL | PERMEABILIDADE SATURADA | |
|-----------------------|-------------------------|-------------------|--|---|
| | | | “in situ” (Guelph) cm/s | Laboratório (Triflex II) cm/s |
| FORMAÇÃO BARREIRAS | Coutinho et al. (1999) | Recife, PE | $4,78 \times 10^{-5}$ | - |
| | Lafayette (2000) | Recife, PE | $2,5 \times 10^{-5}$ | $7,6 \times 10^{-5}$ |
| | Lima (2002) | Recife, PE | 1,79 a $9,07 \times 10^{-7}$ | $1,24 \times 10^{-5}$ a $6,43 \times 10^{-7}$ |
| | Lafayette et al. (2005) | Cabo, PE | 4,03 a $8,94 \times 10^{-5}$ | - |
| | Silva et al. (2005) | Camaragibe, PE | $1,2 \times 10^{-6}$ a $3,6 \times 10^{-7}$ | $1,2 \times 10^{-6}$ a $4,8 \times 10^{-7}$ |
| | Severo et al. (2005) | Timbau do Sul, RN | $1,75 \times 10^{-5}$ a $6,6 \times 10^{-8}$ | $6,5 \times 10^{-5}$ a $1,8 \times 10^{-8}$ |
| | Silva (2007) | Camaragibe, PE | 1,25 a $7,3 \times 10^{-6}$ | 1,22 e $4,84 \times 10^{-6}$ |
| | Meira (2008) | Ibura, Recife, PE | $1,3 \times 10^{-9}$ a $9,1 \times 10^{-7}$ | $1,0 \times 10^{-9}$ a $6,4 \times 10^{-7}$ |
| | Magalhães (2013) | Camaragibe, PE | - | 5,37 a $9,22 \times 10^{-5}$ |
| FORMAÇÃO IPOJUCA | Presente dissertação | Ipojuca, PE | $5,75 \times 10^{-5}$ a $1,62 \times 10^{-4}$ | 3,32 a $5,10 \times 10^{-4}$ |
| | | | $4,48 \times 10^{-3}$ a $6,48 \times 10^{-7}$ | $1,42 \times 10^{-4}$ a $8,35 \times 10^{-7}$ |

Fonte: Adaptado de Coutinho e Severo (2009)

A Tabela 27 mostra os resultados de pesquisas anteriores, onde os solos analisados são provenientes de Formações Barreira. Os valores do coeficiente de condutividade hidráulica do estudo atual se assemelham com os solos das Formações Barreiras.

4.6. AVALIAÇÃO DA COMPRESSIBILIDADE

Serão apresentados, a seguir, os resultados relacionados aos ensaios de deformação do solo.

4.6.1. Edométrico Duplo

As tabelas com os índices físicos das amostras utilizadas nos ensaios edométricos com e sem inundação são encontradas no Apêndice B. As Figuras 58 e

59 mostram Deformação Volumétrica x Tensão Vertical de Consolidação para as amostras de ambos os taludes.

Os solos de ambas as encostas são não expansivos. A Tabela 28 mostra os índices de Compressão (C_c) e Descompressão (C_s) do solo variam a depender da faixa de tensão assumindo valores entre 0,063-0,461 e 0,028-0,284 para os Taludes 1 e 2 respectivamente.

Tabela 28 – Índices e tensões das amostras dos Taludes 1 e 2

| Edométrico Duplo – Índices e Tensões | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------|----------|---------------------------|-------|-------|---------------------|----------------------|-------|-----|-----|
| Local | Amostras | Umidade | Intervalo de Tensão (kPa) | C_c | C_s | σ_{v0} (kPa) | σ'_{vm} (kPa) | | | |
| Talude 1 | P4 (topo) | Natural | 10-1280 | 0,388 | 0,144 | 40 | 80 | | | |
| | | Saturada | 10-1280 | 0,337 | | | | | | |
| | | | 20-80 | 0,189 | | | | | | |
| | | | 80-1280 | 0,481 | | | | | | |
| | P2 (meio, argila avermelhada) | Natural | 10-40 | 0,053 | 0,101 | 198 | 500 | | | |
| | | | 40-320 | 0,101 | | | | | | |
| | | | 320-1280 | 0,284 | | | | | | |
| | | Saturada | 10-20 | 0,063 | | | | 0,028 | 34 | 80 |
| | | | 20-80 | 0,112 | | | | | | |
| | | | 80-1280 | 0,461 | | | | | | |
| | P1 (base) | Natural | 10-20 | 0,076 | 0,144 | 40 | 80 | | | |
| | | | 20-40 | 0,128 | | | | | | |
| 40-1280 | | | 0,350 | | | | | | | |
| Saturada | | 10-20 | 0,094 | 0,284 | | | | 34 | 108 | |
| | | 160-1280 | 0,111 | | | | | | | |
| Talude 2 | P7 (topo) | Natural | 10-1280 | 0,423 | 0,121 | 20 | 30 | | | |
| | | Saturada | 10-1280 | 0,357 | | | | 0,121 | 100 | 100 |
| | P6 (meio) | Natural | 10-160 | 0,068 | 0,030 | 40 | 100 | | | |
| | | | 160-1280 | 0,111 | | | | | | |
| | | Saturada | 10-160 | 0,114 | | | | 0,046 | 200 | 350 |
| | | | 160-1280 | 0,318 | | | | | | |
| | | | 10-1280 | 0,357 | | | | | | |
| | P5 (base) | Natural | 10-80 | 0,104 | 0,106 | 34 | 105 | | | |
| | | | 80-1280 | 0,279 | | | | | | |
| | | Saturada | 10-80 | 0,139 | | | | 0,099 | 20 | 80 |

Fonte: Autor (2020)

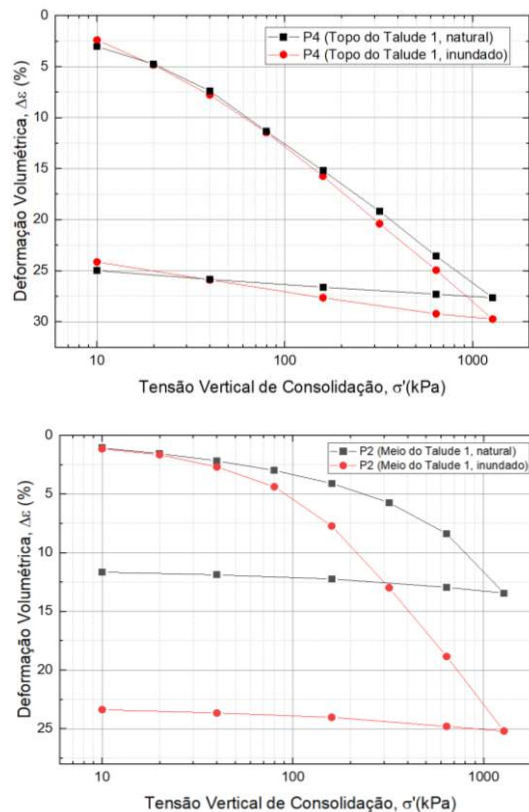
A Tabela 28 mostra que as maiores deformações ocorreram no trecho de compressão virgem, no trecho de recompressão do solo as deformações foram muito pequenas para ambos os taludes. As amostras P4 e P7 (Topo do Talude 1 e 2 respectivamente) apresentam os maiores teores de areia (56 % e 46 % respectivamente) sendo os solos mais porosos, contudo, a porosidade pouco influencia na rigidez do solo. Também apresentam comportamento não elástico

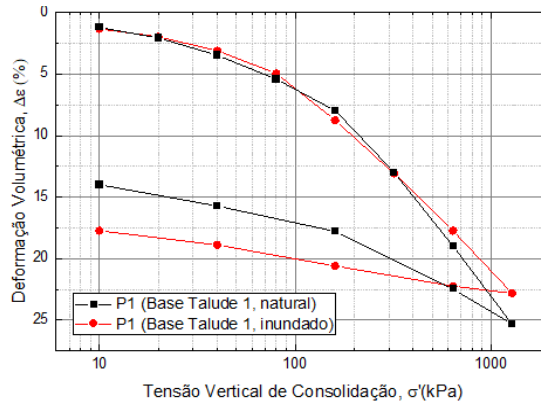
menos marcante. Os demais solos (meio e base) de ambos os taludes apresentam comportamento não elástico muito marcante devido aos elevados teores de argila presentes, a recompressão e compressão virgem são mais facilmente identificáveis.

Para as amostras do Talude 1 analisando os dados obtidos nos ensaios edométricos duplos realizados tanto na condição de umidade natural e saturada respectivamente, os valores apontam para a região do Topo do Talude como sendo a mais propícia a sofrer deformações ou colapso, seguida das regiões Meio e Base do Talude respectivamente.

Já para as amostras do Talude 2, as maiores deformações surgiram na região do Meio do Talude, seguida das regiões Base e Topo da Encosta respectivamente, na condução de umidade natural. Na condição de umidade saturada, as deformações maiores apresentaram-se na região do Topo do Talude, seguida das regiões Meio e Base da Encosta respectivamente. Foi verificado também que os valores da deformação volumétrica dos solos de ambos os taludes foram próximos indicando rigidez similar.

Figura 58 – Índice de Vazios x Tensão efetiva; Deformação Volumétrica x Tensão Vertical de Consolidação para as amostras do Talude 1





Fonte: Autor (2020)

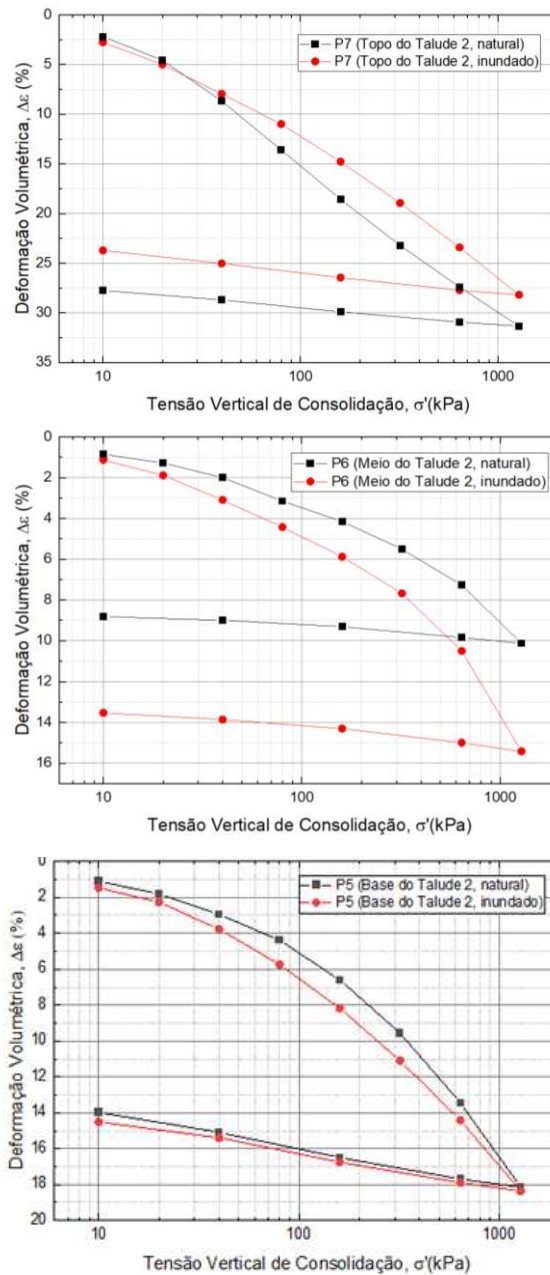
A Tabela 29 mostra os resultados obtidos para o módulo edométrico das amostras do Talude 1 nas condições de umidade natural e saturada. Os valores encontrados são considerados baixos indicando solos não expansivos e pouco compressivos, observe que o solo da Base do Talude sofreu colapso.

Tabela 29 – Módulos edométricos dos solos do Talude 1

| Módulo do Edométrico Duplo | | | |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------|
| Amostras | Intervalo de Tensão (kPa) | Módulo Edométrico (MPa) | |
| | | Solo natural | Solo Inundado |
| P4 (topo) | 10-20 | 0,21 | 0,29 |
| | 20-40 | 0,35 | 0,38 |
| | 40-80 | 0,56 | 0,51 |
| | 80-160 | 0,97 | 1,04 |
| | 160-320 | 1,78 | 2,01 |
| | 320-640 | 3,65 | 3,66 |
| | 640-1280 | 6,92 | 7,91 |
| P2 (meio, argila avermelhada) | 10-20 | 1,05 | 1,02 |
| | 20-40 | 1,60 | 0,96 |
| | 40-80 | 2,42 | 1,18 |
| | 80-160 | 3,63 | 1,19 |
| | 160-320 | 4,87 | 1,56 |
| | 320-640 | 6,01 | 2,66 |
| | 640-1280 | 6,33 | 5,03 |
| P1 (base) | 10-20 | 0,77 | 0,60 |
| | 20-40 | 0,89 | 0,74 |
| | 40-80 | 1,08 | 1,06 |
| | 80-160 | 1,05 | 1,61 |
| | 160-320 | 1,84 | 0,97 |
| | 320-640 | 3,44 | 3,98 |
| | 640-1280 | 6,30 | 6,90 |

Fonte: Autor (2020)

Figura 59 – Índice de Vazios x Tensão efetiva; Deformação Volumétrica x Tensão Vertical de Consolidação para as amostras do Talude 2



Fonte: Autor (2020)

A Tabela 30 mostra os resultados obtidos para o módulo edométrico das amostras do Talude 2 nas condições de umidade natural e saturada. Os valores encontrados são considerados baixos indicando solos não expansivos e pouco compressivos, observe que o solo do Topo do Talude sofreu colapso.

Tabela 30 – Módulos edométricos dos solos do Talude 2

| Módulo Edométrico – Ensaio Edométrico Duplo | | | |
|---|---------------------------|-------------------------|---------------|
| Amostras | Intervalo de Tensão (kPa) | Módulo Edométrico (MPa) | |
| | | Solo natural | Solo inundado |
| P7 (topo) | 10-20 | 0,22 | 0,22 |
| | 20-40 | 0,26 | 0,26 |
| | 40-80 | 0,43 | 0,43 |
| | 80-160 | 0,85 | 0,85 |
| | 160-320 | 1,83 | 1,83 |
| | 320-640 | 4,03 | 4,03 |
| | 640-1280 | 8,58 | 8,58 |
| P6 (meio) | 10-20 | 1,17 | 0,65 |
| | 20-40 | 1,38 | 0,82 |
| | 40-80 | 1,74 | 1,50 |
| | 80-160 | 4,00 | 2,76 |
| | 160-320 | 5,92 | 4,44 |
| | 320-640 | 9,01 | 5,66 |
| | 640-1280 | 11,22 | 6,50 |
| P5 (base) | 10-20 | 0,71 | 0,62 |
| | 20-40 | 0,87 | 0,67 |
| | 40-80 | 1,39 | 1,02 |
| | 80-160 | 1,82 | 1,67 |
| | 160-320 | 2,68 | 2,77 |
| | 320-640 | 4,13 | 4,88 |
| | 640-1280 | 6,80 | 8,19 |

Fonte: Autor (2020)

Pela Tabela 31 compara-se o solo analisado com outros encontrados nos Estados de Pernambuco e no Rio Grande do Norte. Segundo Souza (2014) os índices de vazios iniciais (e_0) dos solos das Formações Barreiras possuem valores de (e_0) relativamente baixos.

Tabela 31 – Índices de Vazios de alguns solos de Pernambuco e Rio Grande do Norte

| LOCAL | SOLO | e_0 |
|------------|---|-----------|
| PERNAMBUCO | Formação Barreiras, Lafayette et al. (2000) | 0,62-0,82 |
| | Formação Barreiras, Fácies: Leque Fluvial Lafayette et al. (2003; 2005) | 0,82-0,84 |
| | Formação Barreiras, Silva et al. (2005) | 0,65-0,91 |
| | Formação Barreiras, Coutinho et al. (1999) | 0,62-0,69 |
| | Formação Barreiras, Fácies: Leque Proximal Bandeira et al. (2004) | 0,63-0,84 |
| | Formação Barreiras, Silva (2007) | 0,61-0,92 |

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| | Formação Barreiras, Meira (2008) | 0,62-0,98 |
| RIO GRANDE DO NORTE | Formação Barreiras Severo et al. (2006) | 0,40-0,75 |
| PERNAMBUCO | Formação Ipojuca, Presente dissertação | 1,2-1,6 |

e_0 = índice de vazios

Fonte: Adaptado de Coutinho e Severo (2009)

4.7. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

São apresentados os resultados de resistência dos solos sob três condições de umidade distintas. São apresentadas as curvas de Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal; Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal; Envoltória de ruptura; e Valores (coesão e ângulo de atrito) x Sucção obtidas dos ensaios de Cisalhamento Direto das três condições de umidade distintas. A Tabela 32 resume os valores obtidos no Ensaio de Cisalhamento Direto para as amostra do Talude 1.

Tabela 32 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto das amostras do Talude 1

| Cisalhamento Direto – Parâmetros de Resistência do Solo | | | | |
|---|--------------|----------------|---------|------------|
| Amostras | ψ (kPa) | Umidade | c (kPa) | Φ (°) |
| P4 (topo) | 4684,25 | Natural | 80 | 23 |
| | 1447,44 | Sucção Imposta | 47,5 | 15 |
| | 0 | Saturada | 35,5 | 19 |
| P3 (meio, argila amarelada) | 1670,32 | Natural | 39 | 22 |
| P2 (meio, argila avermelhada) | 8072,36 | Sucção Imposta | 70 | 25 |
| | 2821,32 | Natural | 46 | 16 |
| | 0 | Saturada | 5 | 21 |
| P1 (base) | 1927,52 | Sucção Imposta | 43 | 15 |
| | 667,91 | Natural | 15 | 21 |
| | 0 | Saturada | 12 | 22 |

c = coesão; Φ = ângulo de atrito; ψ = sucção;

Fonte: Autor (2020)

A Figura 60 mostra as curvas Tensão x Deslocamento e Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal para a amostra P4 (Topo do Talude 1). A Envoltória de ruptura foi estabelecida para as tensões de 50, 100 e 200 kPa

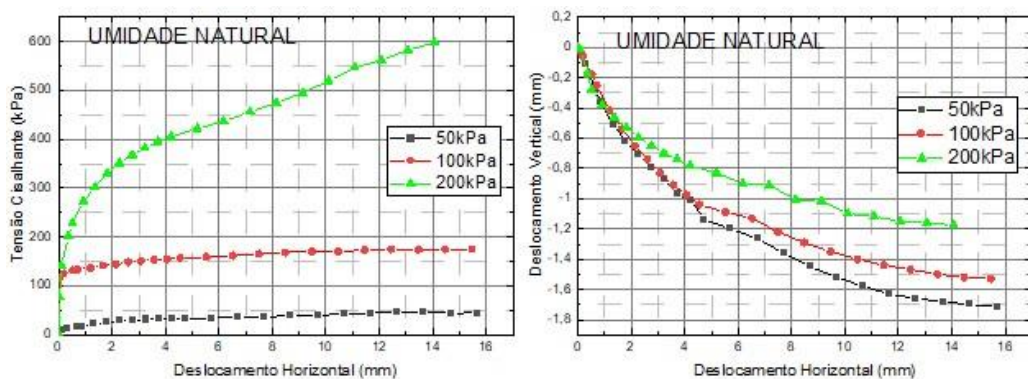
utilizando o critério de De Campos e Carrilho (1995) para determinação da tensão cisalhante.

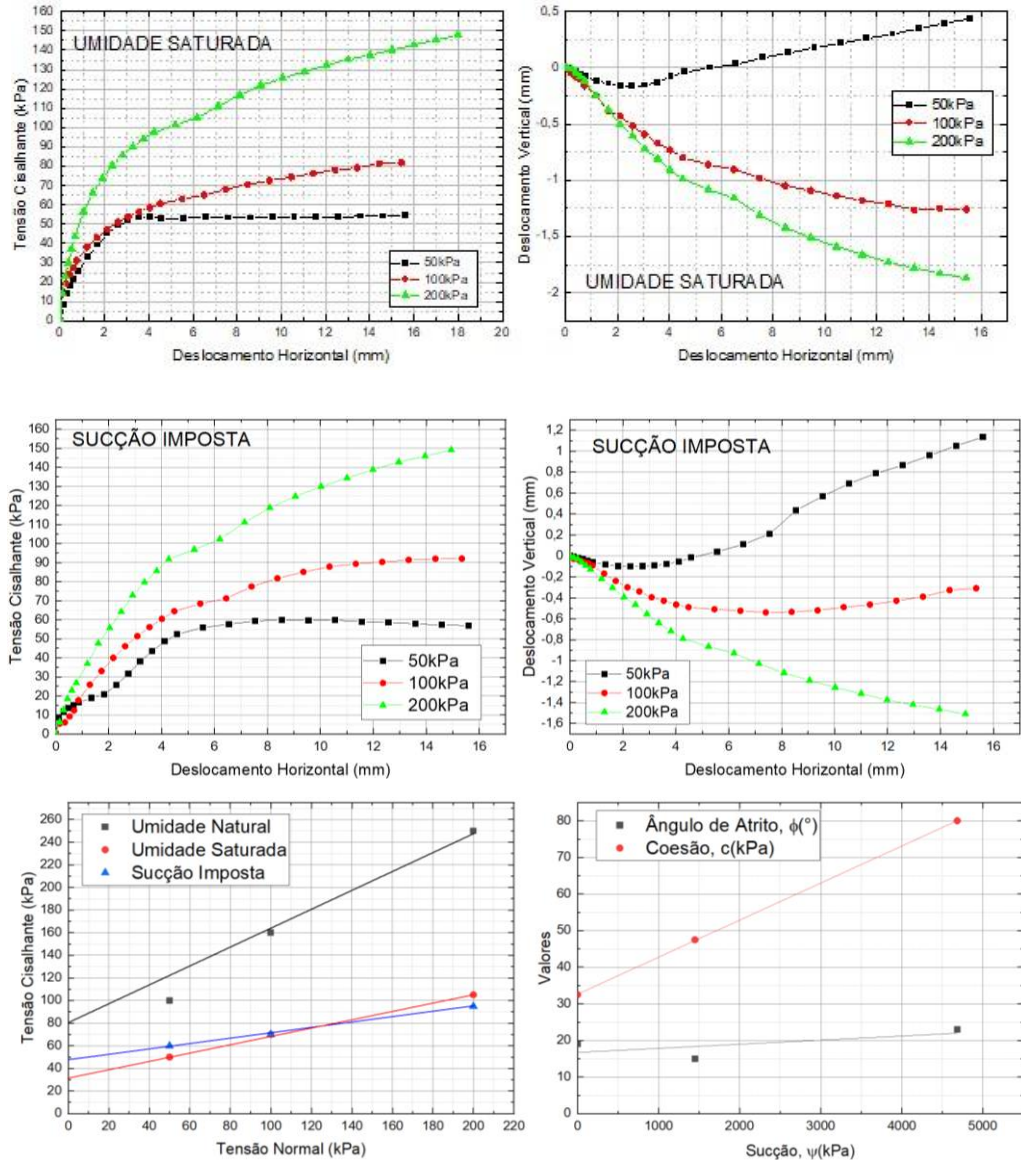
Observa-se através das curvas Tensão x Deslocamento que o solo apresenta comportamento plástico nas três condições de umidade ensaiadas, pois a tensão cisalhante cresce indefinidamente ao longo do deslocamento horizontal.

Pela granulometria da amostra P4 (Topo do Talude 1), o solo é classificado como SC (areia argilosa) com Índice de Consistência (IC) $> 1,0$ indicando uma areia medianamente compacta, cuja ruptura deveria ser do tipo frágil. Entretanto quando o material foi coletado (agosto/2019) a umidade do solo estava elevada ($w = 27\%$), alterando o comportamento do solo de frágil para plástico (FERREIRA et al., 2012).

Pela Figura 60 observa-se uma redução da coesão devido ao aumento da umidade, a qual possui um comportamento linear variando de 80 a 35,5 kPa, outro fator que pode influenciar na perda de coesão é a grande quantidade de areia (cerca de 26%). Para o Ângulo de Atrito o comportamento verificado é linear e pouco é afetado pela variação da umidade. Deve-se fazer uma ressalva para a condição de umidade natural para a tensão de 200 kPa foram observadas grandes deformações, é atribuído a isto a ajustes do extensômetro no dia do ensaio.

Figura 60 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P4 (Topo do Talude 1)

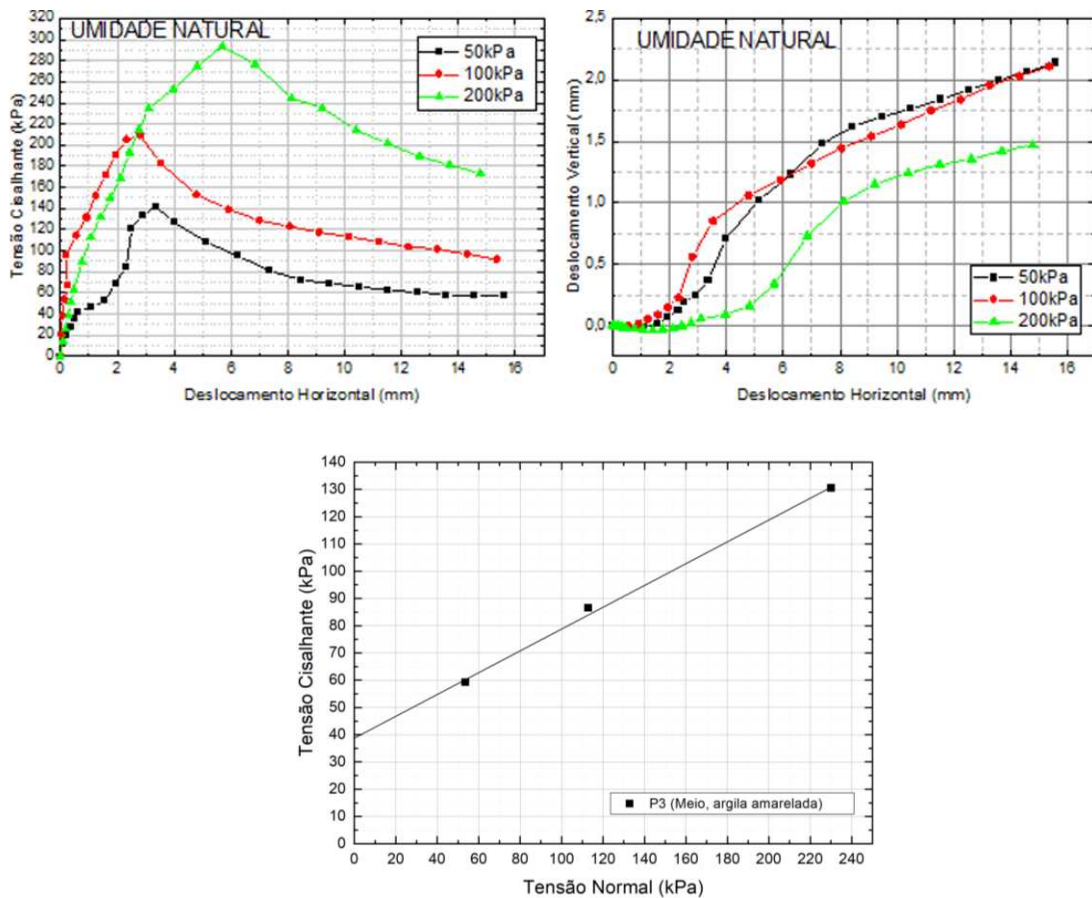




Fonte: Autor (2020)

A Figura 61 apresenta a curva Tensão x Deslocamento; onde o solo apresentou comportamento frágil, devido a uma tensão máxima ou “de pico”, na condição de umidade natural. Tal comportamento justifica-se pela classificação da amostra P3 (Meio do Talude 1, argila amarelada) como CH (argila inorgânica de alta plasticidade) e o $IC > 1,0$ indicando uma argila dura, cuja característica é a ruptura frágil. Entretanto, não foi possível ensaiar mais amostras dessa região, pois foi construído um muro de contenção no local de coleta das amostras.

Figura 61 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto na condição de umidade natural para a amostra P3 (Meio do Talude 1, argila amarelada)



Fonte: Autor (2020)

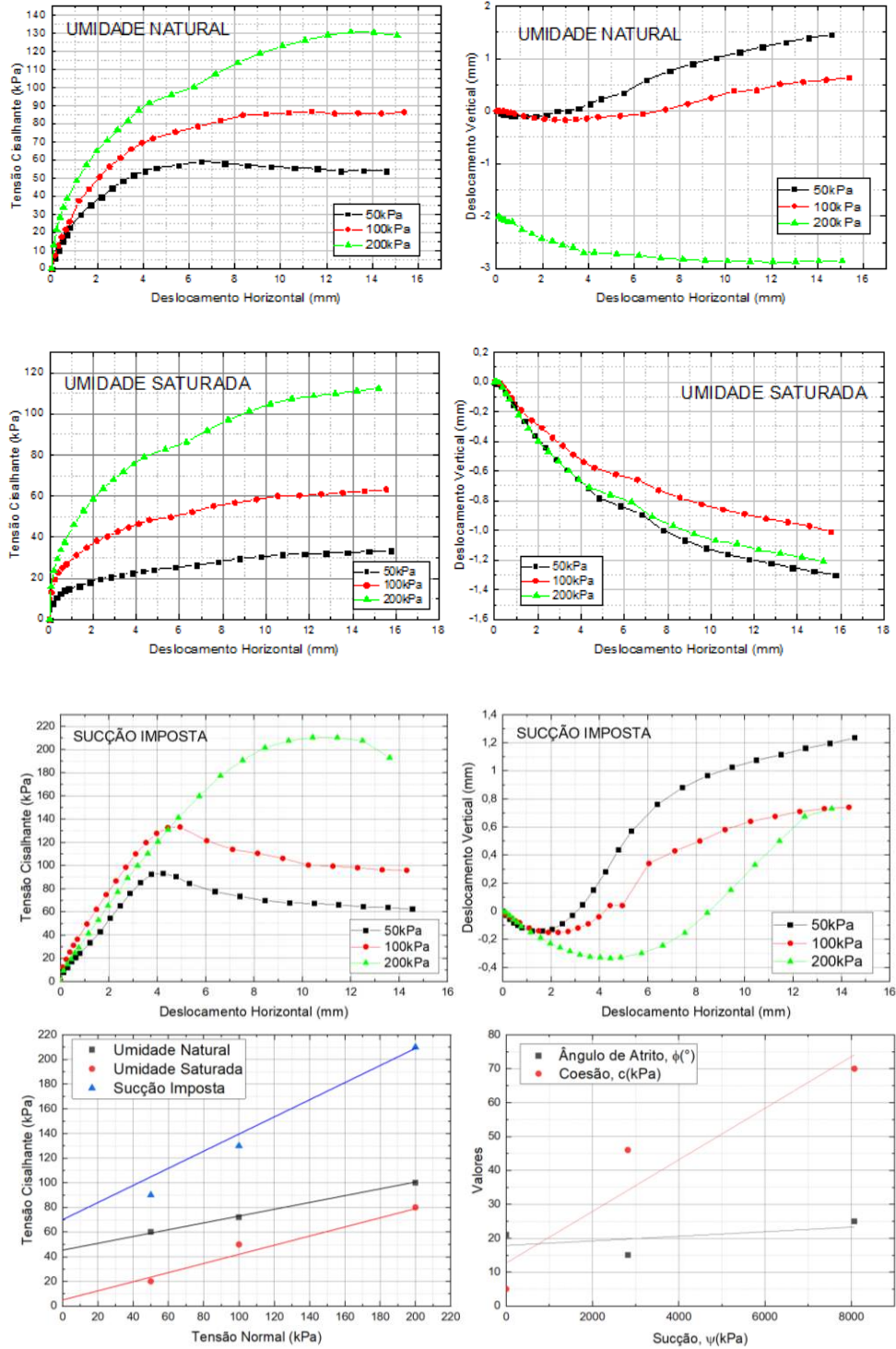
A Figura 62 mostra a curva Tensão x Deslocamento para a amostra P2 (Meio do Talude 1, argila avermelhada), onde o solo apresentou comportamento frágil na condição de sucção controlada, pois verificou-se uma tensão máxima cisalhante (ou de “pico”). Para as demais condições de umidade o solo apresentou comportamento plástico.

Era esperado um solo com comportamento frágil, pois o material foi classificado como CH e o $IC > 1,0$ indicando uma argila dura, cuja característica é comportamento frágil. Porém no dia da coleta do material (agosto/2019) a umidade natural ($h = 22,34\%$) era próxima da umidade saturada ($h = 28,5\%$) modificando o comportamento de frágil para plástico.

Pela Figura 62 observa-se que a coesão decresce consideravelmente quando há aumento da umidade, o referido parâmetro varia de linearmente. O ângulo de

atrito também apresenta comportamento linear e pouco é influenciado pela variação da umidade.

Figura 62 - Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P2 (Meio do Talude 1, argila avermelhada)



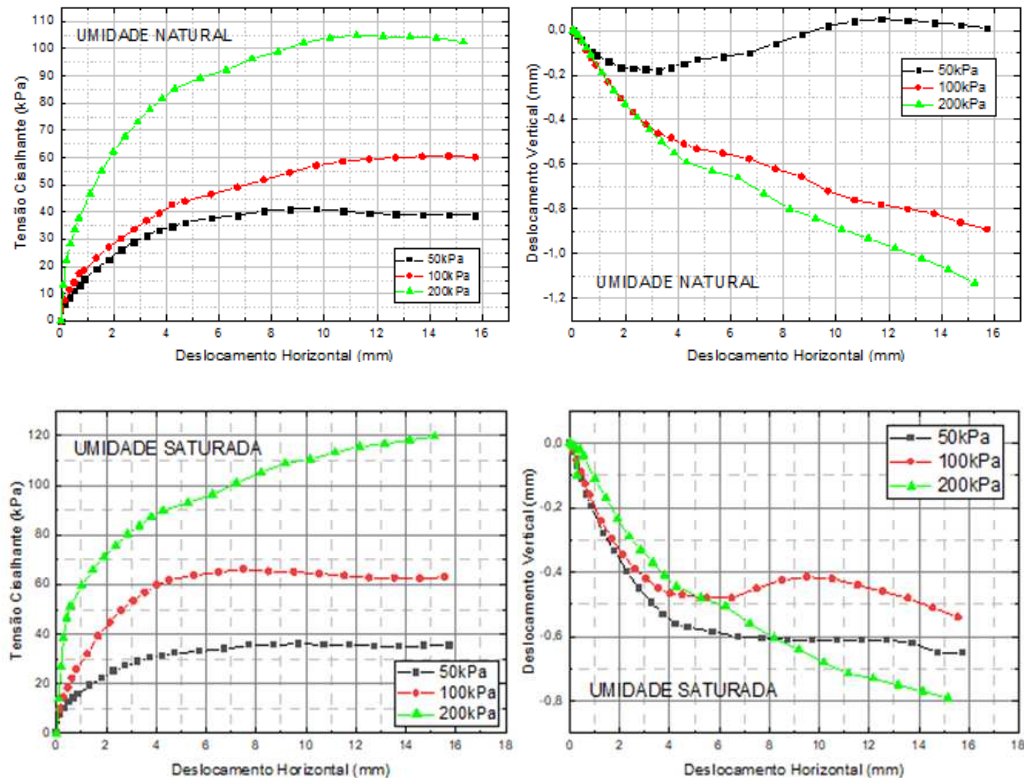
Fonte: Autor (2020)

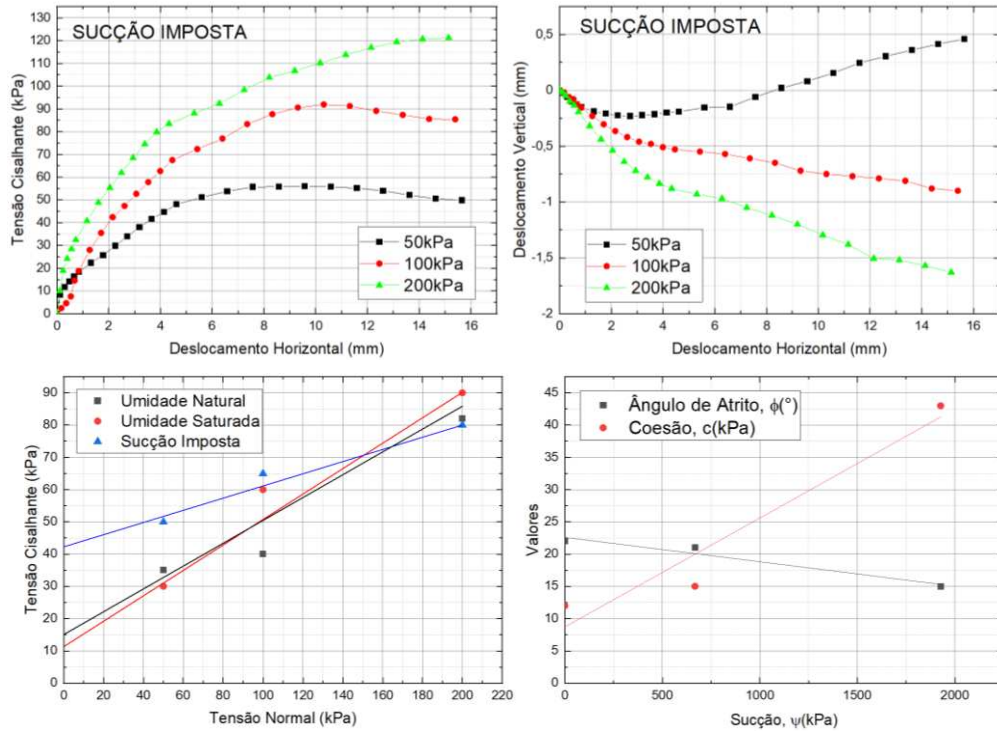
A Figura 63 mostra as curvas de Tensão x Deslocamento, onde a amostra P1 (Base do Talude 1) apresentou comportamento plástico nas três umidades ensaiadas, pois a tensão cisalhante cresce indefinidamente.

Contudo, era esperada uma ruptura frágil, pois o material é classificado como CH e possui $IC > 1,0$ (argila dura). Porém a amostra de solo ensaiada apresenta grande quantidade de areia e as umidades natural e saturada eram elevadas ($h_{nat} = 32,4\%$ e $h_{sat} = 36,15\%$) modificando o comportamento de ruptura de frágil para plástico.

Pela Figura 63 notou-se também um decréscimo da coesão, cujo parâmetro varia linearmente devido ao aumento da umidade. O ângulo de atrito também varia linearmente com a umidade.

Figura 63 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P1 (Base do Talude 1)





Fonte: Autor (2020)

Tabela 33 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto das amostras do Talude 2

| Cisalhamento Direto – Parâmetros de Resistência do Solo | | | | |
|---|--------------|----------------|---------|------------|
| Amostras | ψ (kPa) | Umidade | c (kPa) | Φ (°) |
| P7 (topo) | 5090 | Natural | 70 | 15 |
| | 2566,85 | Sucção Imposta | 42 | 21 |
| | 0 | Saturada | 30 | 20 |
| P6 (meio) | 4903,9 | Natural | 173 | 34 |
| | 1254,3 | Sucção Imposta | 76,5 | 37 |
| | 0 | Saturada | 15 | 16 |
| P5 (base) | 2566,85 | Natural | 34 | 26 |
| | 941,89 | Sucção Imposta | 27 | 19 |
| | 0 | Saturada | 22 | 23 |

c = coesão; Φ = ângulo de atrito; ψ = sucção

Fonte: Autor (2020)

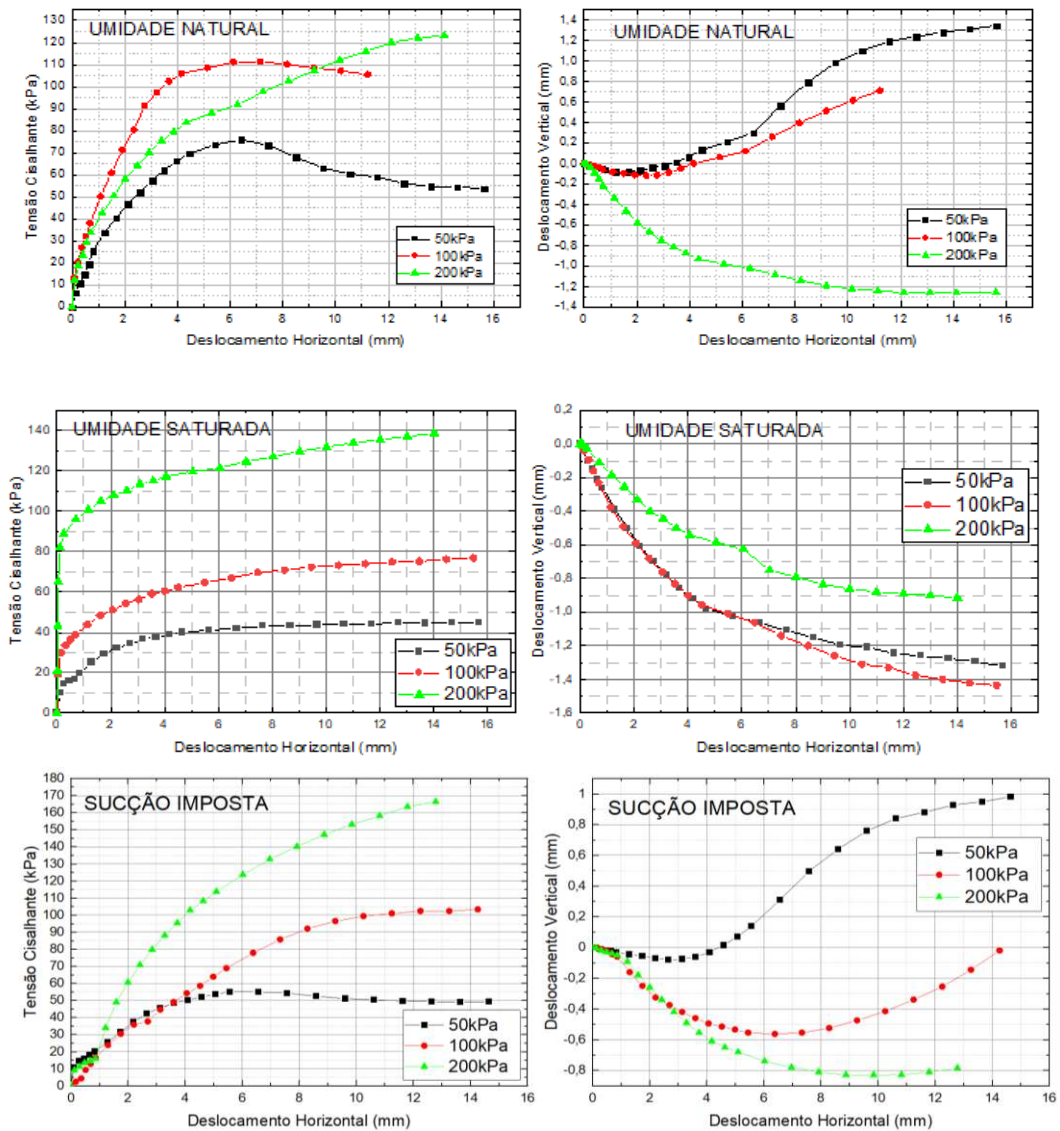
A Tabela 33 mostra resumidamente os parâmetros obtidos no Ensaio de Cisalhamento Direto utilizando três umidades distintas.

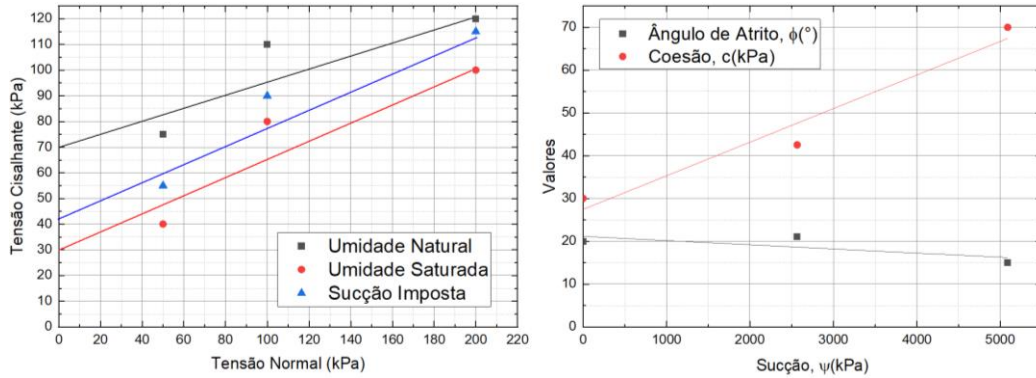
A Figura 64 mostra a curva Tensão x Deslocamento da amostra P7 (Topo do Talude 2). Observa-se que o solo apresenta comportamento frágil para a condição

de umidade natural, pois apresenta uma tensão de cisalhamento máxima ou “de pico”. Sendo característico de solos como argilas rijas ou duras ou areias compactas, o material é classificado como CL (argila arenosa) e $IC > 1,0$ indicando uma argila dura corroborando o resultado do comportamento de “pico”. Nas demais condições de umidade o comportamento apresentado foi plástico.

Pela Figura 64 observa-se que a coesão decresce linearmente com o aumento da umidade. O ângulo de atrito varia linearmente com a umidade sendo pouco influenciado.

Figura 64 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P7 (Topo do Talude 2)

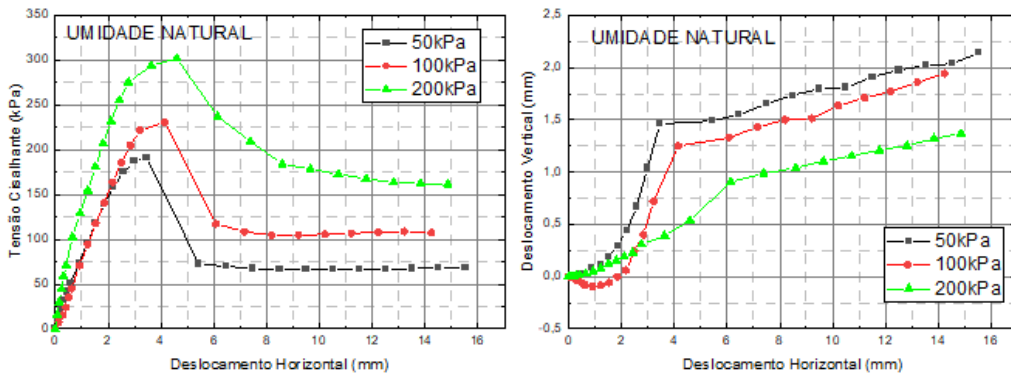


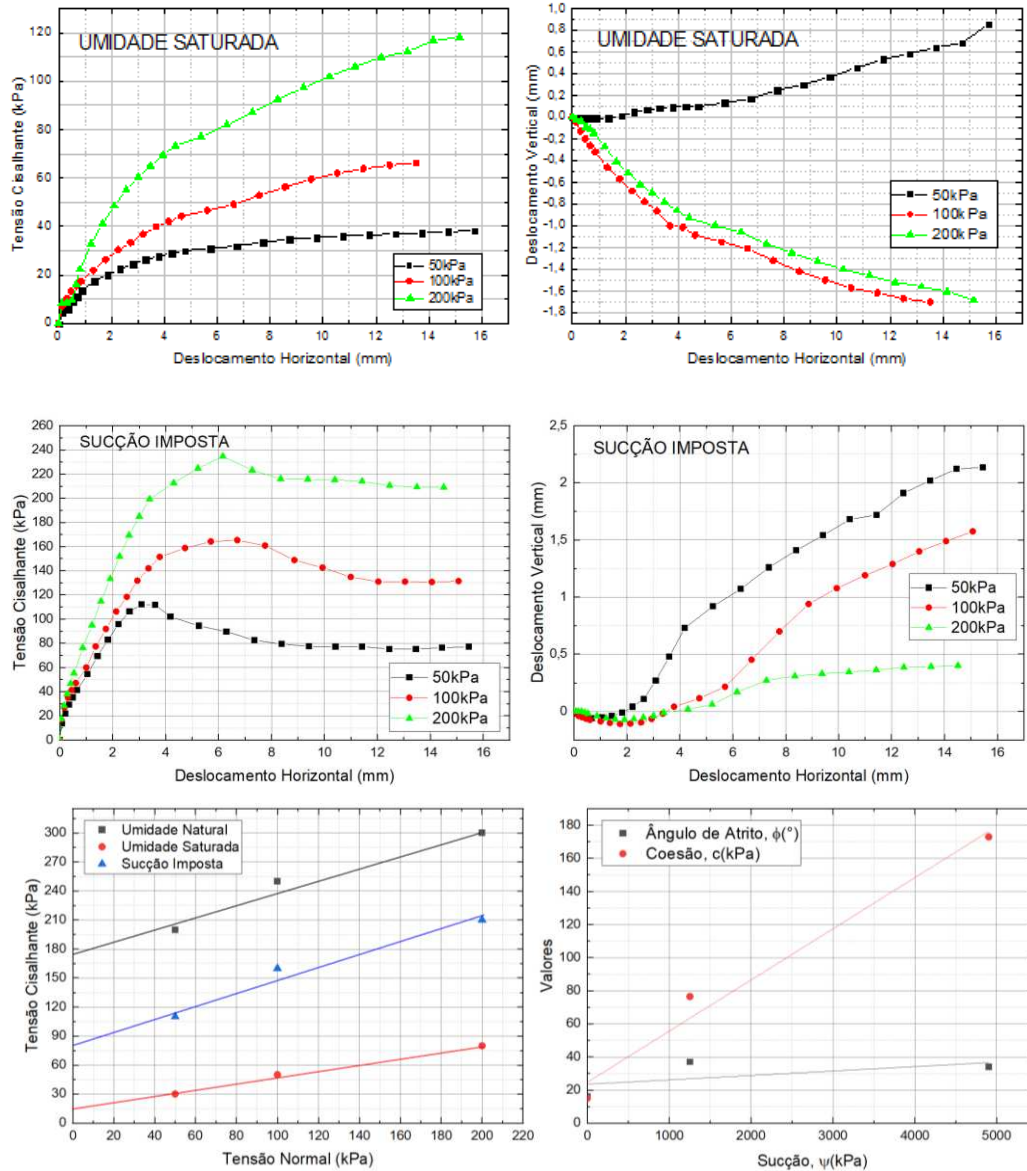


Fonte: Autor (2020)

A Figura 65 mostra as curvas de Tensão x Deslocamento para a amostra P6 (Meio do Talude 2). Observou-se que para a condição de umidade saturada o solo apresentou comportamento plástico causado pelo aumento da umidade ($h_{sat} = 38,2\%$). Nas demais condições de umidade, o solo apresentou comportamento frágil, pois apresentaram tensão cisalhante máximo ou de “pico”, sendo justificado pela classificação do material em MH (solo siltoso) e $IC > 1,0$ característico de silte e argilas duras validando o comportamento frágil do solo. Pela Figura 65 há uma diminuição dos valores da coesão variando linearmente. E o ângulo de atrito variando linearmente com a umidade.

Figura 65 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P6 (Meio do Talude 2)





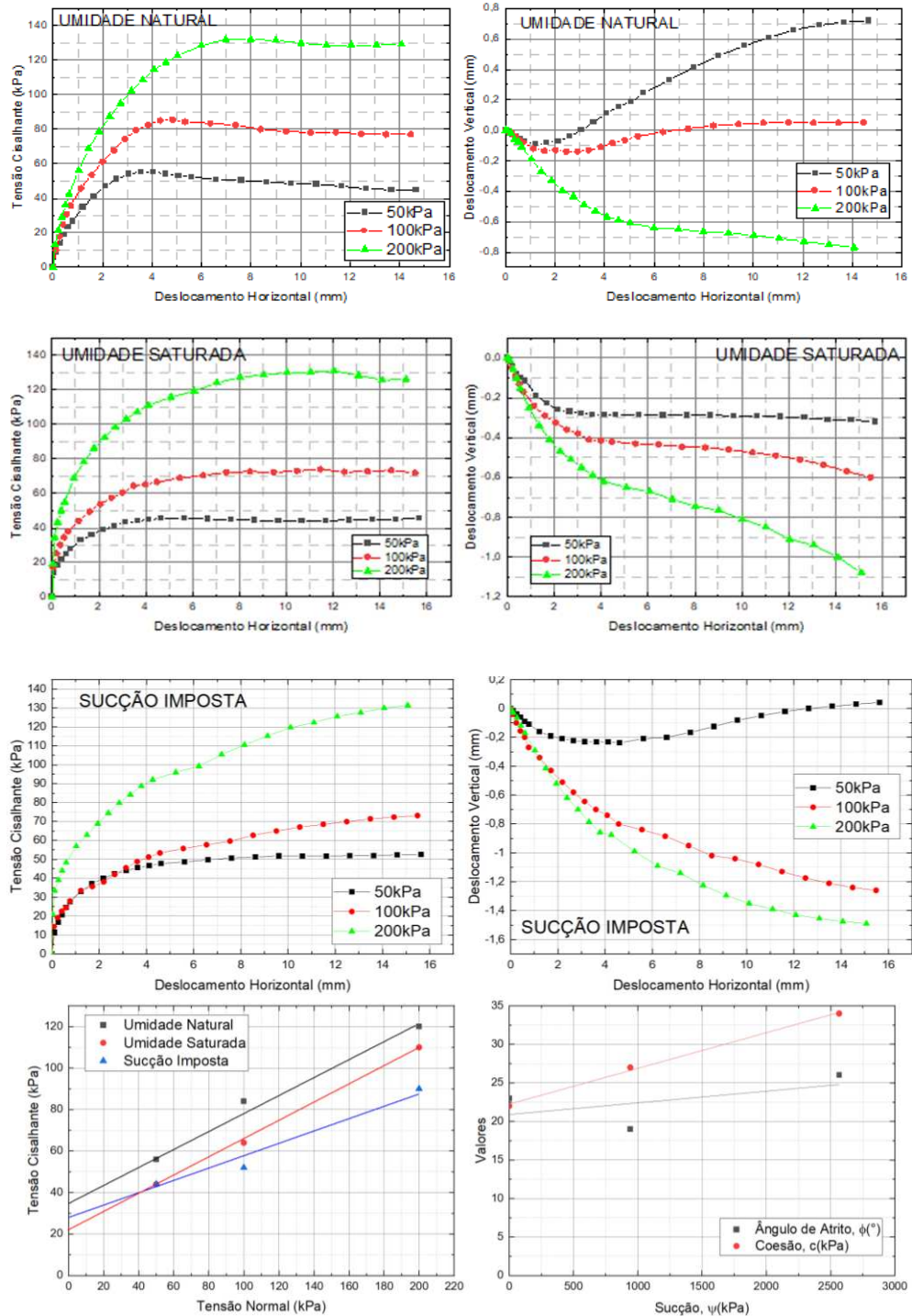
Fonte: Autor (2020)

A Figura 66 mostra as curvas de Tensão x Deslocamento para a amostra P5 (Base do Talude 2) para a condição de umidade natural o solo apresentou comportamento frágil, pois apresenta tensão de cisalhamento máxima ou de “pico”. Nas demais condições de umidade, o solo apresentou comportamento plástico, pois a tensão cisalhante cresce indefinidamente.

O material da referida amostra é classificado em MH (solo fino arenoso) e o $IC > 1,0$ característico de areias compactas, siltes e argilas duras justificando o comportamento frágil. Porém na condição de umidade saturado a mudança no comportamento de frágil para plástico justifica-se pelo aumento da umidade do solo e pelos elevados teores de areia em sua composição granulométrica, pois favorece

a diminuição da coesão na presença de água. A Figura 66 mostra que a coesão decresce com o aumento da umidade de maneira linear. E o ângulo de atrito varia linearmente com a umidade.

Figura 66 – Resultados comparativos dos ensaios de cisalhamento direto em três umidades distintas para a amostra P5 (Base do Talude 2)



Fonte: Autor (2020)

Tabela 34 – Parâmetros de resistência do solo de estudos anteriores

| AMOSTRAS | ENSAIO | CONDIÇÃO DE UMIDADE DO CP | c (kPa) | Φ (°) |
|--|---------------------|---------------------------|---------|------------|
| FORMAÇÃO BARREIRAS, HORTO DE DOIS IRMÃOS, RECIFE (SANTOS, 2001) | Cisalhamento Direto | Natural | 13 | 31 |
| | Cisalhamento Direto | Inundada | 0 | 30 |
| FORMAÇÃO BARREIRAS, ALTO DO RESERVATÓRIO, RECIFE (LAFAYETTE, 2000; LIMA, 2002) | Cisalhamento Direto | Natural | 28-84 | 31-34 |
| | Cisalhamento Direto | Inundada | 1-13 | 16-32 |
| FORMAÇÃO BARREIRAS, CAMARAGIBE (SILVA, 2007) | Cisalhamento Direto | Natural | 45,7-47 | 31,3-44,2 |
| | Cisalhamento Direto | Inundada | 0-3,7 | 31,2- 34,6 |
| FORMAÇÃO BARREIRAS, ALTO DO PADRE CÍCERO, CAMARAGIBE (MAGALHÃES, 2013) | Cisalhamento Direto | Natural | 13,7-35 | 28-36 |
| | Cisalhamento Direto | Inundada | 3,3-8,7 | 30-35 |
| FORMAÇÃO IPOJUCA, CENTRO DE IPOJUCA, PRESENTE DISSERTAÇÃO | Cisalhamento Direto | Natural | 11-173 | 15-34 |
| | Cisalhamento Direto | Inundada | 5-35,5 | 16-23 |

CP = Corpo-de-prova; c = coesão; Φ = âng. de atrito

Fonte: Autor (2020)

A Tabela 34 mostra os valores da coesão do solo do estudo atual são superiores aos obtidos das Formações Barreiras indicando grande presença de argila, material responsável pelos elevados resultados da coesão. Já para o ângulo de atrito, os resultados obtidos no estudo atual são inferiores aos encontrados nas Formações Barreiras, pois a elevada umidade do solo no dia da coleta e a proximidade do lençol freático podem ter influenciado nos resultados.

4.8. ESTRATIGRAFIA

Os dados relativos à Sondagem de Simples Reconhecimento do Solo (SPT) foi fornecido pela Prefeitura de Ipojuca-PE. Com o auxílio do *software* GEO5 – Módulo de Estratigrafia, foi elaborado os perfis do subsolo. A Figura 67 mostra a localização dos furos SP-01 e SP-03.

Figura 67 – Representação do subsolo, furos SP-01 e SP-03



*A escala vertical está em metros (m); distância dos furos 24 m;

Fonte: Autor (2020)

A sondagem realizada no ponto SP-01 foi finalizada a 8,45 m, sendo encerrada a pedido do cliente. Entretanto a sondagem em SP-03 atingiu a camada impenetrável, sendo encerrada a profundidade de 5,45 m. A Figura 68 mostra o perfil do solo para os furos de sondagem SP-02 e SP-04.

Figura 68 - Representação do subsolo, furos SP-02 e SP-04

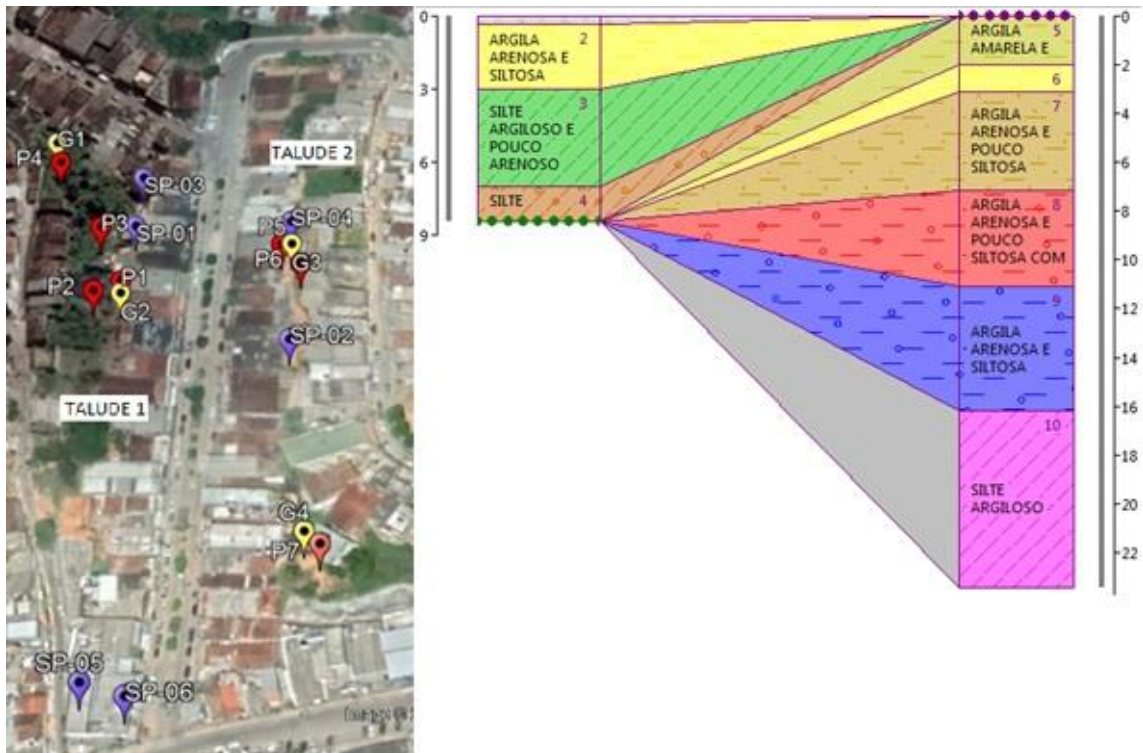


*A escala vertical está em metros (m); distância dos furos 50 m;

Fonte: Autor (2020)

As sondagens realizadas nos pontos SP-02 e SP-04 foram encerradas a uma profundidade de 8,45 m devido à solicitação do cliente, observe que no perfil de sondagem aparece a camada “Argila arenosa com formação de rocha”, tal interpretação da camada está incorreta no perfil de sondagem (Anexo A). Provavelmente, a camada é uma “Argila arenosa com rocha decomposta”. A Figura 69 mostra o perfil do solo para os furos de sondagem SP-05 e SP-06.

Figura 69 – Representação do subsolo furos SP-05 e SP-06



*A escala vertical está em metros (m); distância dos furos 20 m;

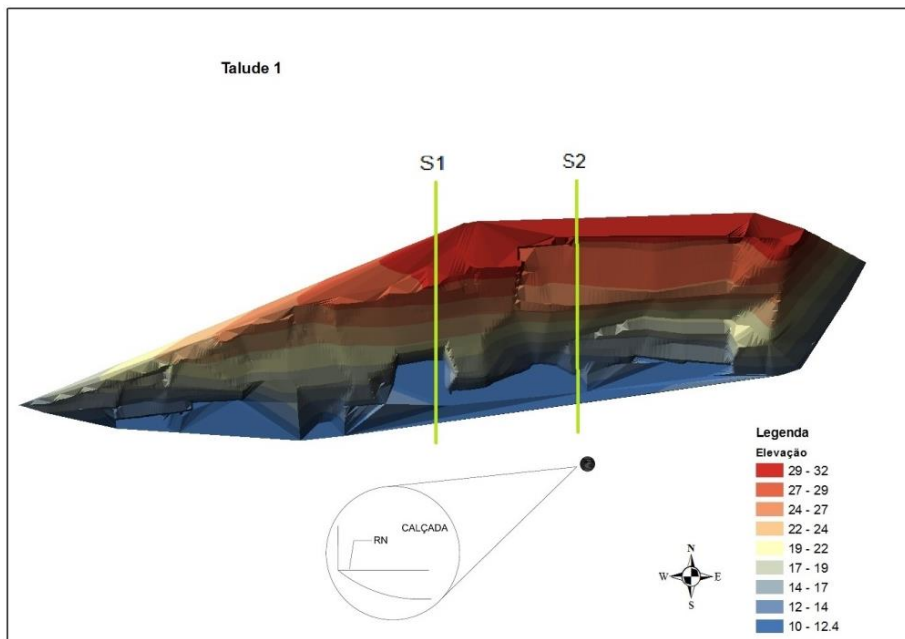
Fonte: Autor (2020)

O furo de sondagem SP-05 atingiu a camada resistente próximo de 24 m de profundidade, sendo encerrada a devido à solicitação do cliente. Já o furo de sondagem SP-06 atingiu a profundidade de 8,45 m, sendo encerrada a profundidade mencionada devido à solicitação do cliente.

4.9. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Foi utilizado o *software* ArcGIS para a representação em três dimensões de ambos os taludes (Figuras 70 e 71). Foi utilizado o programa Slope/W para simular seis condições de umidade (Tabela 35), onde inicialmente foi simulada a condição em que todos os solos do talude estavam na umidade natural (prof. de saturação 0 m). Nas demais condições impostas foram variadas as profundidades de saturação do solo nas camadas mais superficiais (do Topo a Meia Encosta), os demais solos do talude estavam na umidade natural. Também foram aplicadas as sobrecargas de 10, 20, 30, 40, 50, 70, 80 e 100 kN/m²

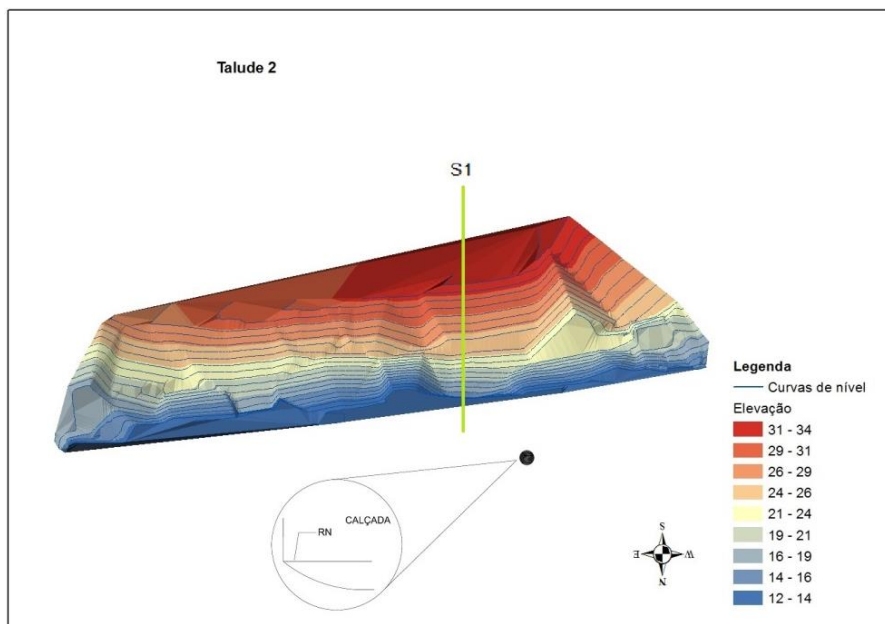
Figura 70 – Representação do Talude 1 em 3D



Escala Vertical – 1:1000; Escala Horizontal – 1:750

Fonte: Autor (2020)

Figura 71 – Representação do Talude 2 em 3D



Escala Vertical – 1:1000; Escala Horizontal – 1:750

Fonte: Autor (2020)

Tabela 35 – Dados de entrada dos solos utilizados na análise de estabilidade

| AMOSTRAS | CONDIÇÃO DE UMIDADE | γ_g (kN/m ³) | c (kPa) | Φ (°) |
|-----------------|---------------------|---------------------------------|---------|------------|
| Talude 1 | | | | |
| Solo 1 | Natural | 26,5 | 80 | 23 |
| | Saturada | | 35,5 | 19 |
| Solo 2 | Natural | 26,6 | 46 | 15 |
| Solo 3 | Natural | 26,8 | 15 | 21 |
| Talude 2 | | | | |
| Solo 1 | Natural | 26,6 | 70 | 15 |
| | Saturada | | 30 | 20 |
| Solo 2 | Natural | 27,6 | 173 | 34 |
| Solo 3 | Natural | 27,2 | 34 | 26 |

γ_g = peso específico real dos grãos; c = coesão; Φ = âng. de atrito

Fonte: Autor (2020)

Após a criação dos taludes em 3D, foi realizada a análise de estabilidade das encostas com auxílio do Slope/W. Os métodos empregados foram Bishop; Fellenius; Spencer; Morgenstein-Price, como mencionado no capítulo de materiais e métodos. Os dados de entrada foram os valores obtidos tanto em campo como em laboratório para ter uma ideia mais fidedigna do comportamento do solo. A Figura 72 mostra um QR code que leva ao vídeo, o qual mostra uma série histórica dos taludes analisados desde 1974 a 2019.

Como descrito no Capítulo 3, materiais e métodos, foram feitas imagens aéreas com auxílio de *drone*. A Figura 73 mostra a vista panorâmica dos taludes estudados e construções desordenadas que auxiliam na análise de estabilidade.

Figura 72 – QR code da Série Histórica da Rua Ver. Antônio Bonifácio (1974-2019)



Fonte: Autor (2020)

Figura 73 – Imagem panorâmica da Rua Ver. Antônio Bonifácio (Centro) e construções desordenadas no topo da encosta



Fonte: Autor (2019)

Figura 74 – Árvores com raízes profundas e lonas plásticas

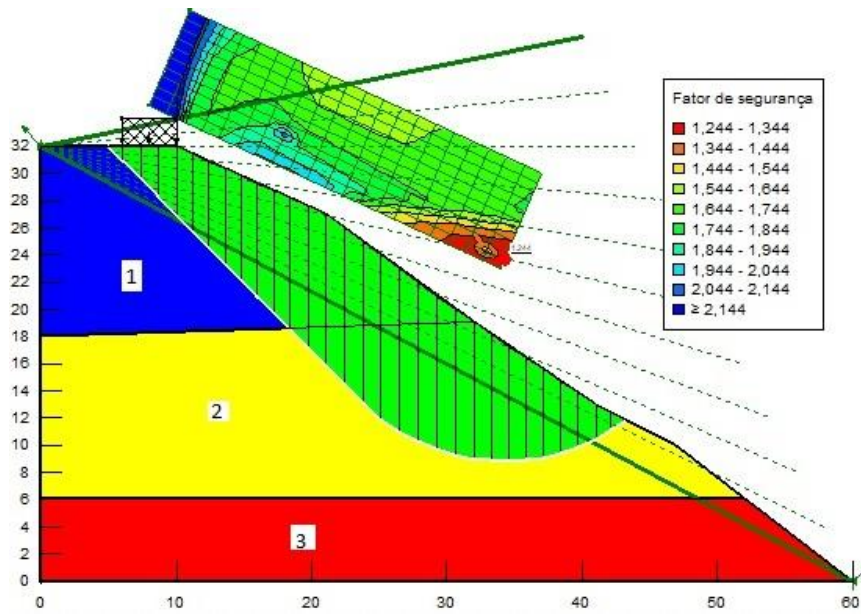


Fonte: Autor (2019)

A Figura 74 mostra o Talude 1 e os possíveis agentes causadores de instabilidade da encosta: árvores de grande porte, construções irregulares, etc. Para realizar a análise de estabilidade, os dados coletados são utilizados como valores de entrada, tais como: peso específico do grão, coesão e ângulo de atrito.

Na análise de estabilidade foram simuladas as condições de umidade natural (prof. de saturação 0 m) e nas demais condições simuladas foi variada a profundidade de saturação, onde o solo está sendo saturado do topo em direção a Meia Encosta. As Figuras 75 e 76 mostram duas seções transversais do Talude 1.

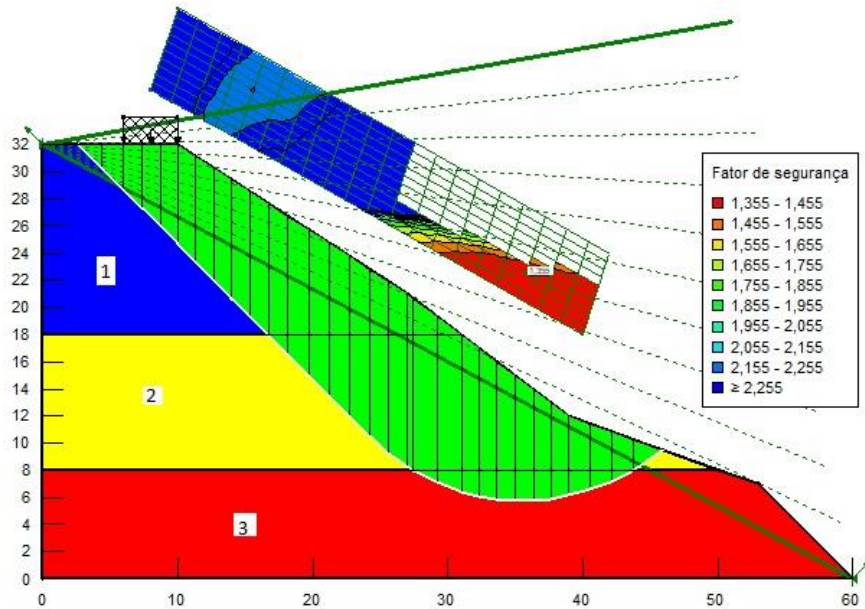
Figura 75 – Análise de estabilidade da seção 1, Talude 1



Solo 1 = Amostra P4 (Topo do Talude 1); Solo 2 = Amostra P2 (Meio do Talude 1); Solo 3 = Amostra P1 (Base do Talude 1).
 *As escalas vertical e horizontal estão em metros.

Fonte: Autor (2020)

Figura 76 – Análise de estabilidade da seção 2, Talude 1



Solo 1 = Amostra P4 (Topo do Talude 1); Solo 2 = Amostra P2 (Meio do Talude 1); Solo 3 = Amostra P1 (Base do Talude 1).
 *As escalas vertical e horizontal estão em metros.

Fonte: Autor (2020)

Tabela 36 – Fator de segurança para diferentes métodos de cálculo de estabilidade do Talude 1 (Seção 1)

| FATOR DE SEGURANÇA DA SEÇÃO 1 | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| MÉTODOS DE ANÁLISE | PROFUNDIDADE DO SOLO SATURADO (m) | SOBRECARGA (kN/m ²) | | | | | | | |
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 70 | 80 | 100 |
| Fellenius | 0 | 1,32 | 1,31 | 1,28 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,24 | 1,22 |
| | 1 | 1,31 | 1,29 | 1,28 | 1,27 | 1,26 | 1,24 | 1,23 | 1,21 |
| | 2 | 1,29 | 1,28 | 1,27 | 1,26 | 1,24 | 1,22 | 1,21 | 1,19 |
| | 3 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,21 | 1,2 | 1,18 |
| | 4 | 1,26 | 1,25 | 1,23 | 1,22 | 1,21 | 1,19 | 1,17 | 1,16 |
| | 14 | 1,08 | 1,07 | 1,06 | 1,05 | 1,04 | 1,02 | 1,01 | 0,99 |
| Bishop | 0 | 1,46 | 1,45 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 |
| | 1 | 1,45 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 |
| | 2 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 |
| | 3 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,35 | 1,34 | 1,31 |
| | 4 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 | 1,34 | 1,33 | 1,3 |
| | 14 | 1,31 | 1,3 | 1,29 | 1,28 | 1,27 | 1,26 | 1,24 | 1,23 |
| Janbu | 0 | 1,32 | 1,31 | 1,3 | 1,29 | 1,28 | 1,26 | 1,25 | 1,23 |
| | 1 | 1,3 | 1,29 | 1,28 | 1,27 | 1,26 | 1,24 | 1,23 | 1,21 |
| | 2 | 1,29 | 1,28 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,23 | 1,22 | 1,2 |
| | 3 | 1,28 | 1,27 | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,21 | 1,19 |
| | 4 | 1,26 | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,2 | 1,19 | 1,17 |
| | 14 | 1,1 | 1,09 | 1,08 | 1,07 | 1,06 | 1,04 | 1,03 | 1,02 |
| Spencer | 0 | 1,48 | 1,47 | 1,46 | 1,45 | 1,44 | 1,44 | 1,42 | 1,41 |
| | 1 | 1,46 | 1,45 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 |
| | 2 | 1,45 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 |
| | 3 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 |
| | 4 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,35 |
| | 14 | 1,33 | 1,32 | 1,31 | 1,3 | 1,29 | 1,27 | 1,26 | 1,25 |
| Morgstern-Price | 0 | 1,45 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 |
| | 1 | 1,45 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 |
| | 2 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,40 | 1,39 | 1,38 | 1,37 |
| | 3 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 |
| | 4 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 | 1,35 |
| | 14 | 1,3 | 1,29 | 1,28 | 1,27 | 1,26 | 1,24 | 1,23 | 1,22 |

Fonte: Autor (2020)

Tabela 37 – Fator de segurança para diferentes métodos de cálculo de estabilidade do Talude 1 (Seção 2)

| FATOR DE SEGURANÇA DA SEÇÃO 2 | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| MÉTODOS DE ANÁLISE | PROFUNDIDADE DO SOLO SATURADO (m) | SOBRECARGA (kN/m ²) | | | | | | | |
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 70 | 80 | 100 |
| Fellenius | 0 | 1,21 | 1,2 | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,6 | 1,15 | 1,12 |
| | 1 | 1,2 | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,15 | 1,14 | 1,13 |
| | 2 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,15 | 1,14 | 1,13 | 1,12 | 1,11 |
| | 3 | 1,17 | 1,16 | 1,15 | 1,14 | 1,13 | 1,12 | 1,11 | 1,1 |
| | 4 | 1,16 | 1,15 | 1,14 | 1,13 | 1,12 | 1,11 | 1,1 | 1,09 |
| | 14 | 1,03 | 1,02 | 1,01 | 1 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,96 |
| Bishop | 0 | 1,47 | 1,46 | 1,45 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,4 | 1,38 |
| | 1 | 1,45 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 |
| | 2 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 |
| | 3 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,35 | 1,33 |
| | 4 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,34 | 1,32 |
| | 14 | 1,2 | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,15 | 1,13 | 1,11 |
| Janbu | 0 | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,21 | 1,19 | 1,18 | 1,17 |
| | 1 | 1,23 | 1,22 | 1,21 | 1,2 | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,16 |
| | 2 | 1,22 | 1,21 | 1,2 | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,15 |
| | 3 | 1,21 | 1,2 | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,15 | 1,14 |
| | 4 | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,15 | 1,14 | 1,13 | 1,11 |
| | 14 | 1,07 | 1,06 | 1,05 | 1,04 | 1,03 | 1,01 | 1 | 0,99 |
| Spencer | 0 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 |
| | 1 | 1,43 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 |
| | 2 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 | 1,33 |
| | 3 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 | 1,32 | 1,3 |
| | 4 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 | 1,35 | 1,30 | 1,25 |
| | 14 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,2 | 1,19 |
| Morgenstein-Price | 0 | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 | 1,35 |
| | 1 | 1,41 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 | 1,35 | 1,34 |
| | 2 | 1,4 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 | 1,35 | 1,34 | 1,33 |
| | 3 | 1,39 | 1,38 | 1,37 | 1,36 | 1,35 | 1,34 | 1,33 | 1,32 |
| | 4 | 1,38 | 1,37 | 1,36 | 1,35 | 1,34 | 1,33 | 1,31 | 1,24 |
| | 14 | 1,25 | 1,24 | 1,22 | 1,21 | 1,2 | 1,19 | 1,18 | 1,16 |

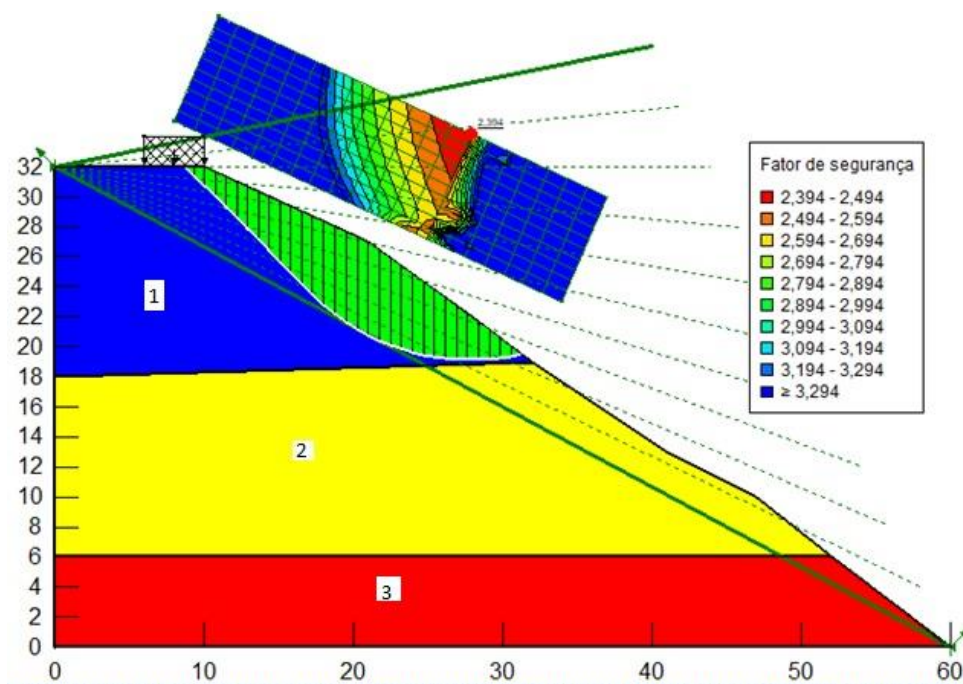
Fonte: Autor (2020)

Figura 77 – Construções irregulares e desordenadas no talude situado à direita da R. Antônio Bonifácio; e árvores de grande porte, edificações posicionadas em regiões de risco



Fonte: Autor (2019)

Figura 78 – Análise de Estabilidade do Talude 2



Solo 1 = Amostra P4 (Topo do Talude 1); Solo 2 = Amostra P2 (Meio do Talude 1); Solo 3 = Amostra P1 (Base do Talude 1).
*As escalas vertical e horizontal estão em metros.

Fonte: Autor (2020)

Tabela 38 – Fator de segurança para diferentes métodos de cálculo de estabilidade do Talude 2 (Seção 1)

| FATOR DE SEGURANÇA DA SEÇÃO 1 | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| MÉTODO DE ANÁLISE | PROFUNDIDADE DO SOLO SATURADO (m) | SOBRECARGA (kN/m ²) | | | | | | | |
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 70 | 80 | 100 |
| Fellenius | 0 | 2,26 | 2,19 | 2,12 | 2,1 | 2 | 1,9 | 1,85 | 1,73 |
| | 1 | 2,22 | 2,18 | 2,09 | 2,05 | 1,97 | 1,93 | 1,82 | 1,66 |
| | 2 | 2,17 | 2,15 | 2,04 | 2,02 | 1,91 | 1,88 | 1,47 | 1,31 |
| | 3 | 2,13 | 2,1 | 2 | 1,91 | 1,7 | 1,41 | 1,31 | 1,16 |
| | 4 | 2,08 | 2,01 | 1,96 | 1,87 | 1,66 | 1,39 | 1,3 | 1,15 |
| | 14 | 1,49 | 1,45 | 1,41 | 1,38 | 1,34 | 1,29 | 1,26 | 1,15 |
| Bishop | 0 | 2,39 | 2,38 | 2,37 | 2,36 | 2,35 | 2,21 | 2,14 | 1,99 |
| | 1 | 2,38 | 2,37 | 2,36 | 2,35 | 2,34 | 2,19 | 2,02 | 1,95 |
| | 2 | 2,36 | 2,35 | 2,34 | 2,21 | 2,07 | 1,73 | 1,67 | 1,45 |
| | 3 | 2,34 | 2,33 | 2,32 | 2,22 | 1,99 | 1,68 | 1,57 | 1,4 |
| | 4 | 2,3 | 2,29 | 2,28 | 2,08 | 1,9 | 1,64 | 1,54 | 1,39 |
| | 14 | 1,6 | 1,59 | 1,58 | 1,57 | 1,56 | 1,55 | 1,51 | 1,39 |
| Janbu | 0 | 2,19 | 2,12 | 2,06 | 2 | 1,94 | 1,84 | 1,79 | 1,66 |
| | 1 | 2,15 | 2,12 | 2,02 | 1,98 | 1,91 | 1,88 | 1,76 | 1,63 |
| | 2 | 2,1 | 2,0 | 1,92 | 1,88 | 1,73 | 1,57 | 1,45 | 1,31 |
| | 3 | 2,06 | 2 | 1,95 | 1,92 | 1,68 | 1,41 | 1,32 | 1,18 |
| | 4 | 2,01 | 1,95 | 1,9 | 1,88 | 1,67 | 1,4 | 1,31 | 1,17 |
| | 14 | 1,45 | 1,44 | 1,42 | 1,38 | 1,36 | 1,3 | 1,26 | 1,18 |
| Spencer | 0 | 2,4 | 2,38 | 2,36 | 2,32 | 2,27 | 2,11 | 2,03 | 1,9 |
| | 1 | 2,33 | 2,32 | 2,31 | 2,29 | 2,24 | 2,22 | 2,2 | 1,87 |
| | 2 | 2,32 | 2,31 | 2,29 | 2,22 | 2,07 | 1,75 | 1,6 | 1,44 |
| | 3 | 2,3 | 2,28 | 2,25 | 2,2 | 1,94 | 1,63 | 1,53 | 1,36 |
| | 4 | 2,25 | 2,24 | 2,2 | 2,07 | 1,88 | 1,62 | 1,52 | 1,35 |
| | 14 | 1,56 | 1,55 | 1,54 | 1,52 | 1,51 | 1,47 | 1,43 | 1,36 |
| Morgenstein-Price | 0 | 2,39 | 2,38 | 2,36 | 2,32 | 2,28 | 2,13 | 2,05 | 1,92 |
| | 1 | 2,37 | 2,35 | 2,33 | 2,3 | 2,25 | 2,22 | 2,21 | 1,9 |
| | 2 | 2,33 | 2,29 | 2,24 | 2,1 | 2,07 | 2 | 1,51 | 1,45 |
| | 3 | 2,3 | 2,27 | 2,2 | 2,18 | 1,95 | 1,65 | 1,54 | 1,37 |
| | 4 | 2,25 | 2,23 | 2,15 | 2,07 | 1,89 | 1,63 | 1,53 | 1,36 |
| | 14 | 1,56 | 1,55 | 1,54 | 1,52 | 1,51 | 1,48 | 1,45 | 1,37 |

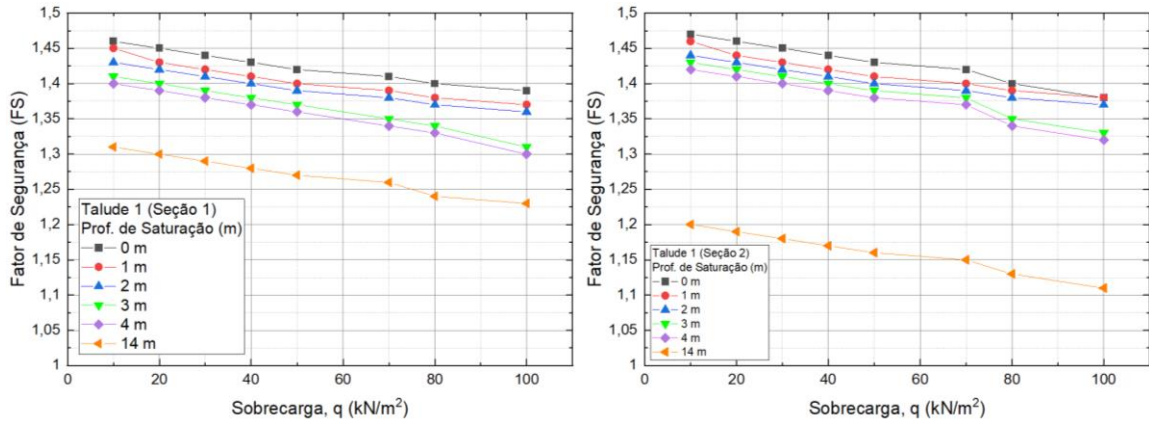
Fonte: Autor (2020)

As Figuras 77 e 78 mostram o Talude 2, onde é verificado a presença de construções irregulares, árvores de grande porte, tubulações de água e esgoto expostas. Já a Figura 80 mostra uma seção transversal do Talude 2.

As Tabelas 36 a 38 mostram os valores do Fator de Segurança (FS) para ambos os taludes na condição de umidade natural são considerados elevados. Porém os valores do FS nas demais condições impostas decrescem com o aumento da profundidade de saturação do solo do topo do talude (Solo 1), o que causa redução da estabilidade do talude. As Figuras 79 e 80 mostram o Fator de Segurança (FS) em função da Sobrecarga, em que foram simuladas várias

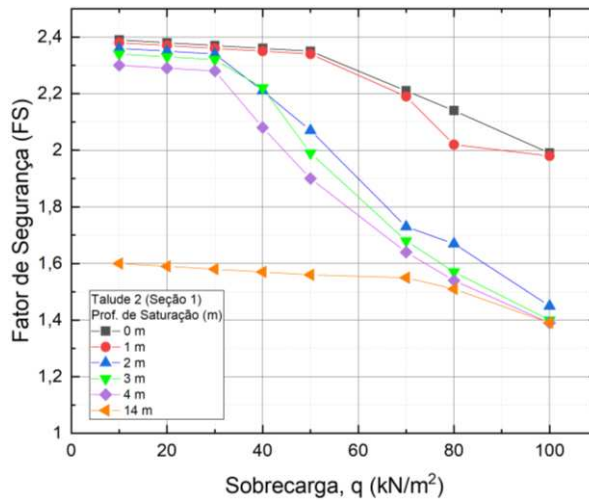
profundidades. Foi verificado que o FS decresce com o aumento da sobrecarga e da umidade do solo atingindo valores próximos a 1,0 causando instabilidade ao maciço.

Figura 79 – Fator de Segurança x Sobrecarga para o Talude 1 - Método de Bishop



Fonte: Autor (2020)

Figura 80 – Fator de Segurança x Sobrecarga para o Talude 1 - Método de Bishop



Fonte: Autor (2020)

4.10. COMPORTAMENTO DO SOLO

As duas encostas analisadas encontram-se no Centro de Ipojuca-PE, Rua Ver. Antônio Bonifácio e apresentam características de risco, especialmente pela ocupação antrópica desordenada com a construção de casas sem auxílio técnico, a retirada da vegetação primária em substituição por outras que não pertencem àquela localidade, a realização de cortes indevidos. As construções irregulares de casas e edificações de maior porte passam a despejar resíduos diretamente nas encostas

devido à ausência de sistemas de drenagem, o plantio de bananeiras e coqueiros é outro fator complicador aumentando a sobrecarga no terreno, há também acúmulo de lixo e queimada dos resíduos com certa periodicidade diminuindo a resistência do solo.

Com o intuito de prever o comportamento do solo sob estas condições foram realizados ensaios de caracterização física, química, mineralógica e geomecânica de ambos os taludes. Apesar dos taludes analisados terem sido formados na mesma era geológica, apresentam padrões de intemperismo diferentes, pois a ocupação antrópica foi distinta em cada um deles alterando algumas características geomecânicas como a compressibilidade, sucção e a resistência do solo.

Na avaliação da compressibilidade dos solos dos taludes, foi verificado que os solos estudados são pouco expansivos. Sendo a região do Topo de ambos os taludes mais suscetível a deformações ou colapso, seguida do Meio e Base de ambas as encostas. No tocante as curvas características dos solos, ambos os taludes apresentaram comportamento unimodal, a exceção das amostras P4 e P7 (Topo do Talude 1 e 2 respectivamente) cujo comportamento é bimodal.

Já o comportamento de ruptura dos solos de ambos os taludes foi frágil, devido à presença de uma tensão cisalhante máxima. Em alguns casos foi verificado comportamento plástico sendo influenciada pela elevada umidade do solo no dia da coleta do material e elevados teores de areia.

Após as análises das propriedades dos solos dos Taludes 1 e 2, realizou-se simulações computacionais utilizando o programa Slope/W para verificar a estabilidade de ambas as encostas que mostraram fatores de segurança (FS) próximos a 1,0.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DA PESQUISA

Neste capítulo, desenvolveram-se as principais conclusões já referidas nesta dissertação e também sugestões para pesquisas futuras.

- As amostras P4 (Topo do Talude 1), P3 (Meio do Talude 1, argila amarelada), P2 (Meio do Talude 1, argila avermelhada) e P1 (Base do Talude 1) sendo classificadas como SC, CH, CH e CH respectivamente. E as amostras P7 (Topo do Talude 2), P6 (Meio do Talude 2) e P5 (Base do Talude 2) sendo classificadas como CL, MH e MH respectivamente;
- Os solos apresentaram caráter ácido, sendo influenciado pela presença de cursos d'água e pela frequência da precipitação na região. E CTC(s) baixos ($< 27 \text{ mmol}_c/\text{kg}$) indicando solos de baixa atividade;
- É verificada a presença de quartzo, sendo o Riolito a rocha matriz. E foi detectada a presença de caulinita, material que pouco influencia na expansão do solo;
- As amostras de solos localizadas na Base são menos permeáveis que as amostras do Topo para ambos os taludes devido a grande quantidade de finos no meio e base dos taludes diminuindo a condutividade hidráulica do solo. Já as amostras de solo do topo de ambos os taludes apresentam elevados teores de areia respectivamente apresentando maior condutividade hidráulica;
- É verificado o comportamento bimodal apenas para as amostras P4 e P7 (Topo do Talude 1 e 2 respectivamente). As demais amostras apresentaram comportamento unimodal;
- Com relação à compressibilidade dos solos, foi verificado que os solos são pouco compressíveis devido aos valores do módulo edométrico serem baixos;
- É verificada uma diminuição da coesão do solo quando há aumento da umidade. Já o ângulo de atrito pouco é influenciado pela referida variação;
- Há uma diminuição do fator de segurança com o aumento da profundidade de saturação do solo do topo do talude (Solo 1) podendo causar instabilidade no maciço, pois os valores se aproximam de 1,0;

5.1. Sugestões para continuação da pesquisa

- É sugerida a continuação deste trabalho através de uma ampliação na quantidade de materiais coletados e simulações variando as condições de contorno das encostas.
- Também é sugerido o mapeamento das demais áreas de risco em Ipojuca e municípios circunvizinhos para melhor compreensão da mecânica dos mesmos e da influência antrópica utilizando *drones*, desenvolvimento de cartas de susceptibilidade, dentre outros materiais que venham a auxiliar os órgãos públicos dos municípios.

REFERÊNCIAS

AASHTO. **AASHTO M 145**: Standard Specification for Classification of Soils and Soil – Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. Washinton: AASHTO, 2017.

ABNT. **NBR 6457 Amostras de solo**: Preparação de Amostras. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. **NBR 6458 Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm**: Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT. **NBR 6459 Solo**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT. **NBR 6484 Solo**: Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT. **NBR 7180 Solo**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. **NBR 7181 Solo**: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. **NBR 7182 Solo**: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

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.

ABNT. **NBR 11682**: Estabilidade de Taludes. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT. **NBR 14545 Solo**: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT. **NBR 16097 Solo**: Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. **NBR 16853**: Solos - Ensaio de Adensamento Unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ALBALA-BERTRAND, J.M. **Political economy of large natural disasters**: with a special reference to developing countries. New York: Oxford University Press, 1993.

ALHEIROS, M.M.; LIMA FILHO, M.F.; MONTEIRO, F.A.J. e OLIVEIRA FILHO, J.S. Sistemas Depositionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental. Soc. Brás. Geol., **Anais XXXV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, Belém (PA), 2: pp. 753- 760, 1988.

ALVES, Keyla Manuela Alencar da Silva; CAVALCANTI, Lucas Costa de Souza; NÓBREGA, Ranyére Silva. Eventos extremos e risco de inundação:: uma análise do comportamento evolutivo dos Distúrbios Ondulatórios de Leste em junho de 2010 sobre a bacia do rio Una - Pernambuco. **GeoTextos**, [s. l.], v. 9, n. 2, 2013.

ANDRADE, K.M; PINHEIRO, H.R; DOLIF NETO, G. Evento Extremo de chuva: análise sinótica, previsão numérica e comparação com eventos anteriores. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, Edição Especial do Simpósio Internacional de Climatologia, p. 175-180, 2015.

AMARAL, A.J.R; MENOR, E.A. A sequência vulcano-sedimentar cretácea da região de Suape (PE): interpretação faciológica e considerações metalogenéticas. In: **Simpósio Geologia do Nordeste**, 9, Natal, Anais... Natal, SBG/Núcleo NE, v. 7, p. 251-269, 1979.

AMARAL, C; LIMA, I. F; VAREJÃO, L. C; SANTANA, M. Carta de risco remanescente a escorregamentos no município de Teresópolis, após o Megadesastre '11 da Região Serrana, In: **SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE**, 12, Nova Friburgo, 2011.

AMARAL, C.A. **Geomorfologia do município de Ipojuca - PE**. Projeto SINGRE. Recife: CPRM, 1988.

ANDRADA, Kelen Martins; PINHEIRO, Henri Rossi; DOLIF NETO, Giovanni. Evento extremo de chuva no Rio de Janeiro: análise sinótica, previsão numérica e comparação com eventos anteriores. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, p. 175-180, 2015.

ASTM (ed.). **ASTM D 2487**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken: ASTM, 2017.

ASTM (ed.). **ASTM D 3282**: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. West Conshohocken: ASTM, 2015.

ASTM (ed.). **ASTM D 5126**: Standard Guide for Comparison of Field Methods for Determining Hydraulic Conductivity in Vadose Zone. West Conshohocken: ASTM, 2016.

ASTM (ed.). **ASTM D 5298**: Standard test method for mesurment of soil potential (suction) using filter paper. Philadelphia, 2003.

AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de Risco a Escorregamentos**: uma Proposta Metodológica e sua Aplicação no Município de Ilha Bela, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 1994.

APAC. **Meteorologia**. 2019. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/>>. Acesso em: 8 out. 2019.

BANDEIRA, A.P. **Mapa de Risco de Erosão e Escorregamento das Encostas com Ocupações desordenadas do Município de Camaragibe-PE**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

BANDEIRA, A.P.N. **Parâmetros Técnicos para Gerenciamento de Área de Riscos de Escorregamentos de Encostas na Região Metropolitana do Recife**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

BISHOP, A.W. **The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes**. Geotechnique, v. 5, n. 1, p. 7-17, 1955.

BRABB, E.E. The World Landslide Problem. **Episodes**, Vol.14, pp.52- 61, 1991.

CALLE, J. A. C. **Análise de ruptura de talude em solo não saturado**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2000.

CARVALHO, P.A.S. **Taludes de Rodovias**: Orientação para Diagnóstico e Soluções de seus Problemas. São Paulo: IPT, 1991.

COUTINHO, R. Q. **Carta geotécnica de aptidão à urbanização frente a desastres naturais do município do Ipojuca**, Pernambuco: relatório técnico. Termo de Cooperação Ministério das Cidades e Universidade Federal de Pernambuco. Recife: Gegep; UFPE, 2014.

COUTINHO, R. Q. et al. **Mapeamento da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa como subsídio à elaboração de carta geotécnica de aptidão à urbanização no município do Ipojuca**, PE. In: Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, 9.,2005., Cuiabá, MT. Anais... Cuiabá, MT: UFMT, 2015.

COUTINHO, R. Q; SEVERO, R. N. F. **Investigação Geotécnica para Projeto de Estabilidade de Encostas**. In: V COBRAE. Anais, São Paulo - SP, 55p. 2009.

COUTINHO, R.Q; SILVA, M.M. **Classificação e Mecanismos de Movimentos de Massa**. Conferência . IV COBRAE – Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Salvador, Bahia, 2005.

CPRM. **Sistemas de Informações Geoambientais da Região Metropolitana do Recife**. Recife, 2003.

CPRM; FIDEM. Governo do Estado de Pernambuco. **Carta geotécnica e de suscetibilidade a processos geológicos do Município de Ipojuca/Pernambuco**. Recife: Superintendência Regional do Recife. Carta geotécnica do município de Ipojuca/PE. Escala 1:100.000, 1999.

CRED; UNISDR. **The Human Cost of Weather related Desasters 1995-2015**. [S. l.]: CRED/UNISDR, 2015.

CRUDEN, D.M; VARNES, D.J. **Landslide Types and Proceses**. LANDSLIDES – Investigation and Mitigation. Transportation Research Board – National Research Council. USA, v. 1, p. 36-75, 1996.

CONDERM . **Viva o Morro**: da Região Metropolitana do Recife. Recife: CONDERM, 2004.

DAKSANAMURTY, V.; RAMAN, V., A Simple Method of Identifying na Expansive Soil. **Soils And Foundation**, v. 13 n 13, n 1 97-104p 1973.

DANIEL, D.E., **State-of-the-Art**: Laboratory Hydraulic Conductivity Tests for Saturated Soils, Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM, Philadelphia, 1994.

DANIEL, D. E. et al., Fixed-Wall vs. Flexible-Wall Permeameters, Hydraulic Barriers in Soil and Rock, **Special Technical Publications 867**, ASTM, Philadelphia, 1985.

DE CAMPOS, T.M.P, CARRILLO, C.W. **Direct Shear Testing on an Unsaturated Soil from Rio de Janeiro**. Unsaturated Soils, Alonso & Delage eds, pp. 31-38, 1995.

DIARIO DE PERNAMBUCO. **Chuva provoca inundações em Barreiros**. Recife, 2019. Disponível em:

<<https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/vidaurbana/2019/05/moradores-registram-inundacoes-em-barreiros-apos-forte-chuva.html>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

DIAS & HERRMANN. Análise da Susceptibilidade a Deslizamentos no Bairro Grande, Florianópolis, SC. In: **Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Vol. 21 (1). p. 91-104, 2002.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, **Water Resour. Res.**, 32(9), 211-223, 1994.

EBELING, Aderson Gilvani *et al.* Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. **SciELO**, Campinas, v. 67, n. 2, 2008.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

EMBRAPA. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2010.

EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO (EBC). **Enchentes em Palmares/PE**. Disponível em: <<https://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/galeria/2010-06-23/enchente-em-pernambuco#>>. Acesso em: 15 de junho de 2016.

FELLENIOUS, W. Calculation of the stability of the Earth dams. Proc. **2th Congress on large Dams**, 4, p. 445-463, 1936.

FERREIRA, Kemmylle Sanny de Matos *et al.* Analysis of a Stabilized Slope During Critical Pluviometric Events Through Field Geotechnical Instrumentation Data. **International Symposium on Field Measurements in Geomechanics**, Rio de Janeiro, 2018.

FERREIRA, R.S. *et al.* Deslizamento de Terra e Rocha: Impactos Ambientais e Sociais, como prevenir. **Multidisciplinary Scientific Journal**, [s. l.], v. 4, p. 95-101, 2019.

FERREIRA, S. R. M. **Influência da mudança de umidade no Comportamento de variação de volume dos solos colapsíveis e expansivos**. In: Arminda Saconi Messias. (Org.). Tratamento de Água: qualidade economia e sustentabilidade. 1ed. RECIFE: Fasa, v.1, p.619-627, 2015.

FERREIRA, S. R. M. *et. al.* Estabilidade de Solos Expansivos de Cabrobó, Paulista s Suape / PE. com Cal. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica, **Anais**, p. 264. Porto de galinhas / PE, 2012.

FOLHA (ed.). **Deslizamentos de terra ameaçam dois povoados no sul da Itália**. 2010. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/mundo/2010/02/694762-deslizamentos-de-terra-ameacam-dois-povoados-no-sul-da-italia.shtml>>. Acesso em: 5 nov. 2019.

FRANZOI, S. **Algumas particularidades resilientes de solos lateríticos e saprolíticos**. 1990. 139 p. Dissertação (Mestrado)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p. 521-532, 1994.

FREIRE, J.L.M.; FREITAS, S.R.; COELHO, C.A.S. Calibração do Modelo Regional BRAMS para a Previsão de Eventos Climáticos Extremos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 30, n. 2, 2015.

FREITAS, C. M. DE; CARVALHO, M.L. DE; XIMENES, E. F.; ARRAES, E. F.; GOMES, J. O. Vulnerabilidade socioambiental, redução de riscos de desastres e construção da resiliência: lições do terremoto no Haiti e das chuvas fortes na Região Serrana, Brasil. **Cien Saude Colet**, v. 17, n. 6, p. 1577-1586, 2012.

G1 (ed.). **Temporal causa transtornos na Região Metropolitana de Porto Alegre**. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2015/01/temporal-causa-transtornos-na-regiao-metropolitana-de-porto-alegre.html>>. Acesso em: 5 nov. 2019.

G1 PE (ed.). **Grande Recife tem raios, chuva intensa e ruas alagadas**. [S. l.], 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pe/paranaiba/noticia/2019/01/28/grande-recife-registra-raios-e-chuva-intensa.ghtml>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

GERSCOVICH, D.M.S. **Estabilidade de Taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, D. G. Soil-water characteristic curve equation with independent properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 130, n. 2, p. 209-212, 2004.

GUERRA, A. J. T.; LOPES, P. B. M.; SANTOS FILHO, R. D.. Características Geográficas e Geomorfológicas da APA, Petrópolis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p.77-86, 2007

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1976.

GUIMARÃES, J. E. P. A Cal. **Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2002.

GUIMARÃES, T.M.; CATADI, M. Análise Paramétrica do Modelo Numérico WRF para previsão de Eventos Extremos de Precipitação na cidade do Rio de Janeiro. **Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Fortaleza, 2019.

HEAD, K.H. **Manual of Soil Laboratory Testing**. New York, Vol. 2 John Wiley 8c Sons, 440p, 1994.

HEATHCOTE, R.L. Extreme event analysis. **Climate impact assessment**. Chichester, John Wiley, 1985, p. 369-01.

HUNGR, O. Classification and terminology. In: JAKOB, M.; HUNGR, O. Debris flow Hazards and Related Phenomena. [S.l.]: **Praxis-Springer**, 2005. p. 47-61, 2005.

IBGE. **Banco de informações Ambientais**. Internet: IBGE, 2019. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Acesso em: 6 nov. 2019.

IBGE. **Censo demográfico 2010: características da população e dos domicílios: resultados do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

IBGE. **Enciclopédia dos municípios brasileiros**. Rio de Janeiro: IBGE, 1958.

IBGE. **Ipojuca**. 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/ipojuca/panorama>>. Acesso em: 5 abr. 2020.

IMPACT TEST EQUIPMENT (ed.). **Guelph Permeameter Kit to ASTM D5126**. [S. l.], 2019. Disponível em: <<http://www.impact-test.co.uk/products/6623-guelph-permeameter-kit-to-astm-d5126/>>. Acesso em: 1 abr. 2020.

IPT. **Curso Básico de Percepção ao Risco Geológico**. Vitória - ES: CPRM, 2017. Disponível em: <<https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Capacitacao/Material%20Did%C3%A1tico/CBPRG%20%202017/Processos%20de%20Movimentos%20de%20Massa%20-%20Deslizamentos,%20Rastejo,%20Corridas%20de%20Detritos.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

JANBU N. **Slope Stability Computations**. Soils Mechanics and Foundation Engineering Report. Technical University of Norway, Trondheim, 1968.

LAFAYETTE, K. P. V. **Comportamento Geomecânico de Solos de uma Topossequência na Formação Barreiras em uma Encosta na área Urbana do Recife-PE**. Dissertação de Mestrado, Recife. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, 122p, 2000.

LIMA, A.F. **Comportamento Geomecânico e Análise de Estabilidade de uma Encosta da Formação Barreira na área urbana da cidade do Recife**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.

LIMA, R.R. **Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização frente a Desastres Naturais e Induzidos elaborada para o Município do Ipojuca-PE na escala de planejamento (1:25.000)**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

LIMA FILHO, M. **Mapa geológico das folhas Ipojuca/ Ponta da Gambôa e Sirinhaém escala 1:25000**. Recife: LAGESE, 1996.

LIMA FILHO, M. F. **de Evolução tectono-sedimentar da Bacia do Rio do Peixe-PB**. Recife, 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 1991.

LOGUERCIO, J.F.C. **Morro do Bumba, Etnografando a transformação de uma Paisagem sob Múltiplos Olhares: da invisibilidade à tragédia, uma página que não deve ser virada**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2013.

LUCAS, J.F.R. *et al.* Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, 2011.

MAGALHÃES, J. S. L. A. **Estudo da estabilidade da encosta Alto do Padre Cícero no Município de Camaragibe-PE**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFPE, Recife-PE, 2013.

MARCELINO, E.V. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos**. In: Caderno Didático N° 1. INPE-15208-PUD/193. Santa Maria – RS, 2008.

MEIRELES, M. **Após fortes chuvas em Pernambuco, moradores da Mata Sul temem novas enchentes e mais destruição.** [S. l.], 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/chuva-provoca-incertezas-em-moradores-da-mata-sul-de-pernambuco.ghtml>. Acesso em: 12 mar. 2020.

MENDONÇA, F. R. Vulnerabilidade e abordagem socioambiental urbana: uma reflexão a partir da RMC e de Curitiba. **Desenvolvimento e Meio ambiente**, v. 10, 2004.

MENEZES, V. G. de. A pluviosidade e os escorregamentos de taludes na zona do Recife. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São Paulo. **Anais**. São Paulo: ABGE, 3ª ed., v. 2, p. 347-358, 1987.

MONTEIRO, C.A. de F. **Clima e excepcionalismo**: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico. Florianópolis, UFSC, 1991.

MORGENSTERN, N.R; PRICE, V.E. The analysis of the stability of general slip surfaces. **Geotechnique**, v. 15, p. 79-83, 1965.

NE10 (ed.). **Fortes chuvas causam deslizamentos de terra na Várzea, no Ibura e em Beberibe.** [S. l.], 2015. Disponível em: <<https://noticias.ne10.uol.com.br/grande-recife/noticia/2015/03/06/fortes-chuvas-causam-deslizamentos-de-terra-na-varzea-no-ibura-e-em-beberibe-536107.php>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

OLIVEIRA, A.M.S. e BRITO, S.N. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1988

OWNTEC (ed.). **Permeâmetro Guelph**. [S. l.], 2020. Disponível em: <http://www.owntec.com.br/produto/permeametro-tipo-guelph/>. Acesso em: 2 abr. 2020.

PAIVA, S.C. **Estudo do Comportamento Geomecânico dos solos expansivos dos Municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca - PE e de suas misturas com cal**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

PEDROSA, F.J.A. Mudanças Climáticas e Gestão Costeira. In: FURTADO, F; PRIORI, L; ALCÂNTARA, E. (org.). **Mudanças Climáticas & Resiliência de Cidades**. 1 ed. Recife: LEPUR, p. 89-106, 2015.

PFALTZGRAFF, Pedro Augusto dos Santos. **Mapa de Suscetibilidade a Deslizamentos da Região Metropolitana do Recife**. Orientador: Ana Lúcia Bezerra Candeias. 2007. 153 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

PRANDINI, F. L. et. al. Cajamar – carst e urbanização: zoneamento de risco. In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, 5, 1987, São Paulo. Anais ..., ABGE, São Paulo. Vol 2. p. 461-470. 1987.

ROMERO, R; RAMIS, C; ALONSO, S. Simulação numérica de um evento de chuva extrema na Catalunha:: papel da orografia e evaporação do mar. **Royal Meteorology Society**, [s. l.], 2006.

S2ID (Sistema Integrado de Informações sobre Desastres). **Sistema Integrado de Informações sobre desastres**. [S. l.]: Governo Federal, 2017. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/>> Acesso em: 14 jan. 2020.

SAITO, S.M; FERREIRA, C.C; SAUSEN, T.M; HANSEN, M.A.F; MARCELINO, I.O.P.V (2009). **Sistematização de Ocorrência de Desastres Naturais na Região Sul do Brasil**. In: Anais XIV simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, INPE, p. 2333-2339, 2009.

SANDERS, M.S; MCCORMICK, E.J. Human Error, Accidente, and Safety. In: SANDERS, M.S; MCCORMICK, E.J. **Human Factors in Engineering and Design**. 7th ed. New York: McGraw-Hill, cap. 20, p. 655-695, 1993.

SANTANA, R.G. **Análise de soluções de engenharia para estabilização de encostas ocupadas na Região Metropolitana de Recife-PE**: Estudo de caso Ruptura ocorrida em encosta com ocupação desordenada na UR 2, Ibura. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

SANTOS, A.N. **Estudos geotécnicos e análise de estabilidade de duas encostas localizadas no Ibura no município de Recife-PE**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018a.

SANTOS, D.L. **Limiar de precipitação de que pode gerar deslizamentos nos complexos de risco de Maceió**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018b.

SANTOS, G. M. **Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca, Pernambuco**. 2015. 196f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2015.

SCHEUREN, J.M; POLAIN, O; BELOW, R.; GUHA-SAPIR, D; PONSERE, S. 2008. **Annual Disaster Statistical Review – The Numbers and Trends 2007**. CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium. Disponível em: <www.emdat.be/Documents/Publications> . Acesso em: 03 nov. 2018

SEYLAZ, L. **A propos de Tauredunum; un nouveau document**, dans Les Alpes, 31, p. 33-39, 1955.

SIAL, A. N.; BORBA, G. S.; LONG, L. E. Cretaceous magmatic province of Cabo, Pernambuco, northeast Brasil (Field trip - guide excursion). **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, v.17, n. 4, p. 667-673, 1987.

SILLMANN, J *et al.* Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities. **Weather and Climate Extreme**, [s. l.], v. 18, p. 65-74, 2017.

SILVA, C.S *et al.* Deslizamentos e Enchentes na Bacia do Rio Tejió: percepção e resiliência frente a riscos geomorfológicos. **OKARA: Geografia em debate**, João Pessoa, n. 2, ed. 2, 2017.

SILVA, M. *et al.* **Manual de Ensaio do Solo**. 3. ed. [S. l.]: EMBRAPA, 2001.

SILVA, M.M. **Estudo Geológico-Geotécnico de uma Encosta com Problemas de Instabilidade no Município de Camaragibe – PE**, Tese de Doutorado, UFPE, Recife – PE, 2007.

SILVA, T. M. da; CAMELLO, T. C. F.; ALMEIDA, J. R. de. Impactos ambientais hidrológicos ocasionados pelo desflorestamento metropolitano: Petrópolis, RJ. **Sustinere**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p.53-64, jul. 2015.

SKEMPTON, A.W. The colloidal “Activity” of clays. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Zurich, Proceeding... Zurich. p. 57-61, 1953.

SOBREIRA, F. G. A ocupação desordenada de encostas na cidade de Ouro Preto. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 42, n. 4, p. 12-16. 1989.

SOUZA, A.P.L. **Estudos Geotécnicos e de Estabilidade de Taludes da Encosta do Alto do Padre Cícero no município de Camaragibe-PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SPENCER, E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. **Geotechnique**, v. 17, p. 11-26, 1967.

TAVARES, R. **Imbricações entre os ritmos do clima e os ritmos da urbanização na formação de risco e vulnerabilidade socioambientais a deslizamentos de terra na Serra do Mar-Ubatuba/SP**. Tese de doutorado. Pós Graduação em Geografia, curso de doutorado, setor de Ciências da Terra - UFPR. 2013.

TEIXEIRA, D.C.L. *et al.* **Análise de Estabilidade de um talude sob condicionantes geológicos e de ocupação ambiental**. Recife: UFPE, 1999.

TERZAGHI, K. **Mecanismos de Escorregamentos de Terra**. Trad. De Ernesto Pichler. São Paulo: Gremio Politécnico. 41p. 1950.

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

TROPICAL RAINFALL MEASURING MISSION (TRMM). Disponível em: <<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 10 de jan. de 2013.

TURNER. B.A. **Man-made disasters**. London: Wykehan, 1978. 254 p.

U.S. Geological Survey (USGS). **Landslides types and processes**. USGS Science for Changing World, USA, v. 1, n. 2004, p. 1-4, 2004.

VAN DER MERWE, D.H. The prediction of Heave from the Plasticity Index and the Clay Fraction. **Civil Engineering**, South Africa v. 6 p. 103 - 107. 1964.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America journal**, Madison, v. 44, n. 5, abr. 1980. p. 892-898.

VICENTE, A.K. **Eventos Extremos de Precipitação na Região Metropolitana de Campinas**. Dissertação de Mestrado em Geografia. Universidade Estadual de Campinas, 2004.

VIEIRA, R.; FURTADO, S.M. de A.; SOUZA, C.E. de. Aplicação do geoprocessamento na prevenção de riscos naturais - os deslizamentos no Município de Blumenau/SC. In: **GIS Brasil - Show International de Geotecnologias**. Anais... Brasil: São Paulo, 2004.

VON POSCHINGER, A; WASSMER, P; MAISCH, M. **The films rockslide: history of interpretation and the new insights**. In: Evans, SG; Scarascia Mugnozza, G; Strom, A; Hermanns, RL (eds). Landslides from massive rock slope failure. NATO science series: IV; Earth and environmental sciences, v. 49. Springer, Heidelberg, p. 329-356. 2006.

WHITE, G.F. Natural Hazards: local, national, global. New York: **Oxford University Press**, 1974.

WIERZOREK, G.F. et al. **Derbris-flow and flooding hazerds associated with the December 1999 storm in coastal Venezuela and strategies for mitigation**. USGS, 2001.

ZHANG, S; WANG, F. Three-dimensional seismic slope stability assessment with the application of Scoops3D and GIS: a case study in Atsuma, Hokkaido. **Geoenvironmental Disasters** , [s. l.], v. 6, n. 9, 2019.

YABLOKOV, A. The Tragedy of Khait: A Natural Disaster in Tajikistan. **Mountain Research and Development**. Berne, Switzerland: International Mountain Society. v. 21, n. 1, p. 91–93, 2001.

APÊNDICE A – Resultados dos Ajustes da Curva Característica

Dados do ajuste da curva característica para a amostra P4 (Topo do Talude 1)

| SUCÇÃO MÁTRICA | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
|------------------------|---|--|
| Durner | $\theta = 17,82 \cdot \left(\frac{1}{[1 + (1,07 \cdot 10^{-4} \cdot \Psi)^{0,45}]^{5,51}} \right) + 20,58 \cdot \left(\frac{1}{[1 + (2,18 \cdot 10^{-6} \cdot \Psi)^{0,44}]^{27,4}} \right)$ | |
| | R ² = 0,91 | |
| Fredlund & Xing | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| | $\theta = C(\psi) \cdot \frac{46,4}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{5,02} \right)^{2,07} \right]^{0,23} \right\}}$ $C(\Psi) = \frac{-\ln \left(1 + \frac{\Psi}{24.353,53} \right)}{\ln \left[1 + \frac{1.000.000}{24.353,53} \right]} + 1$ | |
| | R ² = 0,77 | |
| Gitirana Jr & Fredlund | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| | $S = \frac{70}{1 + (\Psi/\sqrt{180})^{0,2}} + \frac{2}{1 + (\Psi/\sqrt{160000})^{0,29}} \cdot \frac{70}{1 + (\Psi/\sqrt{8000000})^{0,14}} + 8$ | |
| | R ² = 0,93 | |
| SUCÇÃO TOTAL | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| Durner | $\theta = 18,16 \cdot \left(\frac{1}{[1 + (4,82 \cdot 10^{-15} \cdot \Psi)^{0,13}]^{0,8}} \right) + 20,64 \cdot \left(\frac{1}{[1 + (7,66 \cdot 10^{-19} \cdot \Psi)^{0,035}]^{0,078}} \right)$ | |
| | R ² = 0,90 | |
| Fredlund & Xing | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| | $\theta = C(\psi) \cdot \frac{46,4}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{4,55 \cdot 10^8} \right)^{0,25} \right]^{46,76} \right\}}$ $C(\Psi) = \frac{-\ln \left(1 + \frac{\Psi}{21.810,61} \right)}{\ln \left[1 + \frac{1.000.000}{19.310,7} \right]} + 1$ | |
| | R ² = 0,91 | |
| Gitirana Jr & Fredlund | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| | $S = \frac{67}{1 + (\Psi/\sqrt{1600})^{5,26}} + \frac{3}{1 + (\Psi/\sqrt{160000})^{-28,83}} \cdot \frac{67}{1 + (\Psi/\sqrt{350000000})^{-17,34}} + 9,45$ | |
| | R ² = 0,85 | |

Fonte: Autor (2020)

Dados do ajuste da curva característica para a amostra P2 (Meio do Talude 1)

| SUCÇÃO MÁTRICA | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
|-------------------------|--|--|
| Van Genuchten | $\theta = 16,29 + \frac{36,2}{[1 + (0,0046 \cdot \Psi)^{0,58}]^{0,59}}$ | |
| | R ² = 0,96 | |
| Durner | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| | $\theta = 19 \cdot \left(\frac{1}{[1 + (0,38 \cdot \Psi)^{1,30}]^{0,23}} \right) + 17,20 \cdot \left(\frac{1}{[1 + (0,35 \cdot \Psi)^{1,17}]^{0,27}} \right)$ | |
| | R ² = 0,99 | |
| Fredlung & Xing | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| | $\theta = C(\psi) \cdot \frac{52,49}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{27,13} \right)^{0,72} \right]^{0,58} \right\}}$ $C(\Psi) = \frac{-\ln \left(1 + \frac{\Psi}{24.353,53} \right)}{\ln \left[1 + \frac{1.000.000}{24.353,53} \right]} + 1$ | |
| | R ² = 0,99 | |
| Gitirana Jr. & Fredlund | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| | $S = \frac{48}{1 + (\Psi/\sqrt{700})^{4,1}} + \frac{7}{1 + (\Psi/\sqrt{100000})^{1,49}} \cdot \frac{48}{1 + (\Psi/\sqrt{2000000})^{1,11}} + 45$ | |
| | R ² = 0,97 | |
| SUCÇÃO TOTAL | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| Durner | $\theta = 20,62 \cdot \theta_s \cdot \left(\frac{1}{[1 + (0,04 \cdot \Psi)^{1,71}]^{0,30}} \right) + 18,66 \cdot \left(\frac{1}{[1 + (0,037 \cdot \Psi)^{1,59}]^{0,35}} \right)$ | |
| | R ² = 0,98 | |
| Fredlund & Xing | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| | $\theta = C(\psi) \cdot \frac{52,49}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{32,86} \right)^{1,32} \right]^{0,49} \right\}}$ $C(\Psi) = \frac{-\ln \left(1 + \frac{\Psi}{21.810,61} \right)}{\ln \left[1 + \frac{1.000.000}{21.801,62} \right]} + 1$ | |
| | R ² = 0,95 | |

| | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
|-------------------------|---|-----------------------|
| Gitirana Jr. & Fredlund | $S = \frac{48}{1+(\Psi/\sqrt{700})^{2,66}} + \frac{12}{1+(\Psi/\sqrt{100000})^{1,62}} \cdot \frac{48}{1+(\Psi/\sqrt{2000000})^{9,39}} + 37$ | R ² = 0,91 |

Fonte: Autor (2020)

Dados do ajuste da curva característica para a amostra P1 (Base do Talude 1)

| SUCÇÃO MÁTRICA | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
|-------------------------|--|-----------------------|
| Van Genuchten | $\theta = 3,62 + \frac{63,35}{[1 + (1,01 \cdot 10^{-4} \cdot \Psi)^{-2,41}]^{0,17}}$ | R ² = 0,97 |
| Gitirana Jr. & Fredlund | $S = \frac{45}{1+(\Psi/\sqrt{600})^{0,44}} + \frac{6}{1+(\Psi/\sqrt{10000})^{0,094}} \cdot \frac{45}{1+(\Psi/\sqrt{7000000})^{16,09}} + 31$ | R ² = 0,98 |
| SUCÇÃO TOTAL | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| Van Genuchten | $\theta = 3,62 + \frac{63,35}{[1 + (2,28 \cdot 10^{-5} \cdot \Psi)^{0,66}]^{5,02}}$ | R ² = 0,98 |
| Durner | $\theta = 42,42 \cdot \left(\frac{1}{[1 + (0,0086 \cdot \Psi)^{1,12}]^{0,79}} \right) + 20,92 \cdot \left(\frac{1}{[1 + (0,0077 \cdot \Psi)^{1,09}]^{0,88}} \right)$ | R ² = 0,82 |
| Fredlund & Xing | $\theta = C(\Psi) \cdot \frac{66,97}{\ln[e + (\frac{\Psi}{2,21 \cdot 10^{-16}})^{-0,12}]} \quad C(\Psi) = \frac{-\ln(1 + \frac{\Psi}{24.388,44})}{\ln[1 + \frac{1.000.000}{24.388,44}]} + 1$ | R ² = 0,82 |
| Gitirana Jr. & Fredlund | $S = \frac{45}{1+(\Psi/\sqrt{600})^{2,64}} + \frac{6}{1+(\Psi/\sqrt{10000})^{-7,7}} \cdot \frac{45}{1+(\Psi/\sqrt{7000000})^{-7,53}} + 31$ | R ² = 0,91 |

Fonte: Autor (2020)

Dados do ajuste da curva característica para a amostra P7 (Topo do Talude 2)

| SUCÇÃO MÁTRICA | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
|-----------------|--|-----------------------|
| Van Genuchten | $\theta = 8,42 + \frac{35,26}{[1 + (1,4 \cdot 10^{-9} \cdot \psi)^{0,32}]^{36,1}}$ | R ² = 0,90 |
| Fredlund & Xing | $\theta = C(\psi) \cdot \frac{43,68}{\{ \ln[e + (\frac{\psi}{8})^{5,58}]^{0,14} \}} \quad C(\psi) = \frac{-\ln(1 + \frac{\psi}{14.731,26})}{\ln[1 + \frac{1.000.000}{14.731,26}]} + 1$ | R ² = 0,93 |
| SUCÇÃO TOTAL | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| Durner | $\theta = 15,4 \cdot \left(\frac{1}{[1 + (6,66 \cdot 10^{-5} \cdot \Psi)^{0,5}]^{5,48}} \right) + 19,86 \cdot \left(\frac{1}{[1 + (2,7 \cdot 10^{-6} \cdot \Psi)^{0,48}]^{22,37}} \right)$ | R ² = 0,94 |
| Fredlund & Xing | $\theta = C(\psi) \cdot \frac{43,68}{\{ \ln[e + (\frac{\psi}{453.646,76})^{0,42}]^{10,16} \}} \quad C(\Psi) = \frac{-\ln(1 + \frac{\Psi}{19.310,7})}{\ln[1 + \frac{1.000.000}{19.310,7}]} + 1$ | R ² = 0,93 |
| Van Genuchten | $\theta = 8,42 + \frac{35,26}{[1 + (3,8 \cdot 10^{-9} \cdot \Psi)^{0,56}]^{337,96}}$ | R ² = 0,92 |

Fonte: Autor (2020)

Dados do ajuste da curva característica para a amostra P6 (Meio do Talude 2)

| SUCÇÃO MÁTRICA | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
|----------------|---|-----------------------|
| Van Genuchten | $\theta = 17,57 + \frac{49,03}{[1 + (1,61 \cdot 10^{-6} \cdot \Psi)^{1,96}]^{1455,63}}$ | R ² = 0,93 |
| SUCÇÃO TOTAL | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| Van Genuchten | $\theta = 17,57 + \frac{49,03}{[1 + (2,81 \cdot 10^{-7} \cdot \Psi)^{1,36}]^{1893,02}}$ | R ² = 0,96 |

Fonte: Autor (2020)

Dados do ajuste da curva característica para a amostra P5 (Base do Talude 2)

| SUCÇÃO MÁTRICA | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
|----------------|--|-----------------------|
| Van Genuchten | $\theta = 7,48 + \frac{53,59}{[1 + (6,08 \cdot 10^{-9} \cdot \Psi)^{0,62}]^{487,15}}$ | R ² = 0,97 |
| SUCÇÃO TOTAL | EQUAÇÃO AJUSTADA | |
| Van Genuchten | $\theta = 28,05 + \frac{33,02}{[1 + (1,3 \cdot 10^{-6} \cdot \Psi)^{1,03}]^{1163,34}}$ | R ² = 0,96 |

Fonte: Autor (2020)

APÊNDICE B – Índices físicos e condições iniciais e finais das amostras de solo na condição natural e saturada, Ensaio do Edométrico Duplo

Índices físicos, Condições iniciais e finais das amostras do Talude 1

| Edométrico Duplo – Condições iniciais dos solos naturais | | | | |
|---|--|---------------------|-------------------------------|--|
| Amostras | Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³) | Umidade inicial (%) | Grau de saturação inicial (%) | Índice de Vazios inicial (e ₀) |
| P1 (base) | 17,7 | 34,16 | 57,37 | 1,45 |
| P2 (meio, argila avermelhada) | 17,2 | 24 | 40,81 | 1,2 |
| P4 (topo) | 15,7 | 18,80 | 32,70 | 1,47 |
| Edométrico Duplo – Condições finais dos solos naturais | | | | |
| Amostras | Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³) | Umidade final (%) | Grau de saturação final (%) | Índice de Vazios final (e _r) |
| P1 (base) | 17,5 | 28,46 | 69,01 | 1,1 |
| P2 (meio, argila avermelhada) | 16,8 | 18,74 | 66,67 | 0,9 |
| P4 (topo) | 15,5 | 18,44 | 56,07 | 0,73 |
| Edométrico Duplo – Condições iniciais dos solos saturados | | | | |
| Amostras | Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³) | Umidade inicial (%) | Grau de saturação inicial (%) | Índice de Vazios inicial (e ₀) |
| P1 (base) | 17,5 | 30,40 | 55,90 | 1,54 |
| P2 (meio, argila avermelhada) | 16,9 | 19,82 | 33,72 | 1,56 |
| P4 (topo) | 16,1 | 20,82 | 34,81 | 1,58 |
| Edométrico Duplo – Condições finais dos solos saturados | | | | |
| Amostras | Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³) | Umidade final (%) | Grau de saturação final (%) | Índice de Vazios final (e _r) |
| P1 (base) | 13 | 34,16 | 100 | 0,92 |
| P2 (meio, argila avermelhada) | 13,3 | 27,12 | 100 | 0,9 |
| P4 (topo) | 16,9 | 24 | 100 | 0,64 |

Fonte: Autor (2020)

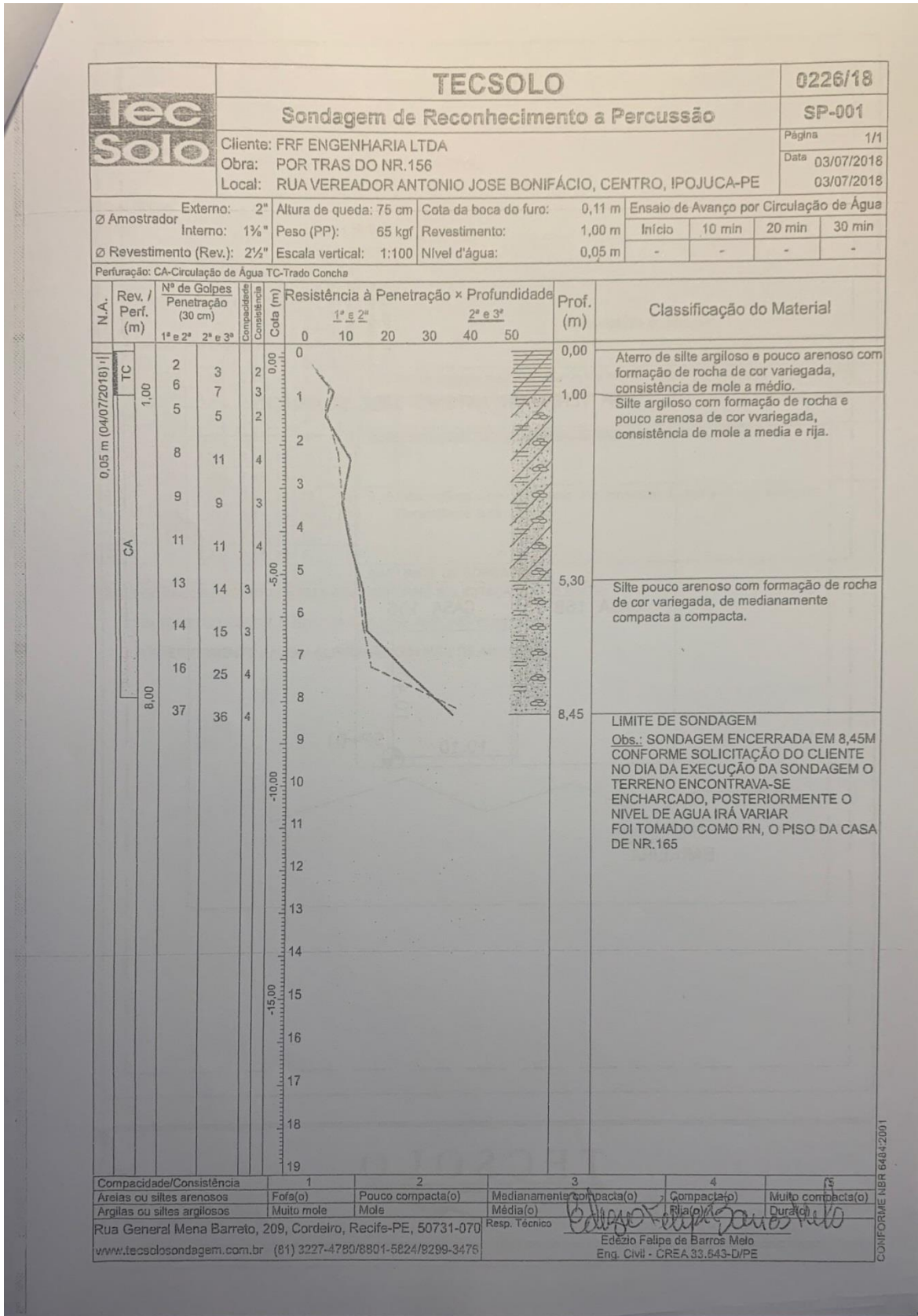
Índices físicos, Condições iniciais e finais das amostras do Talude 2

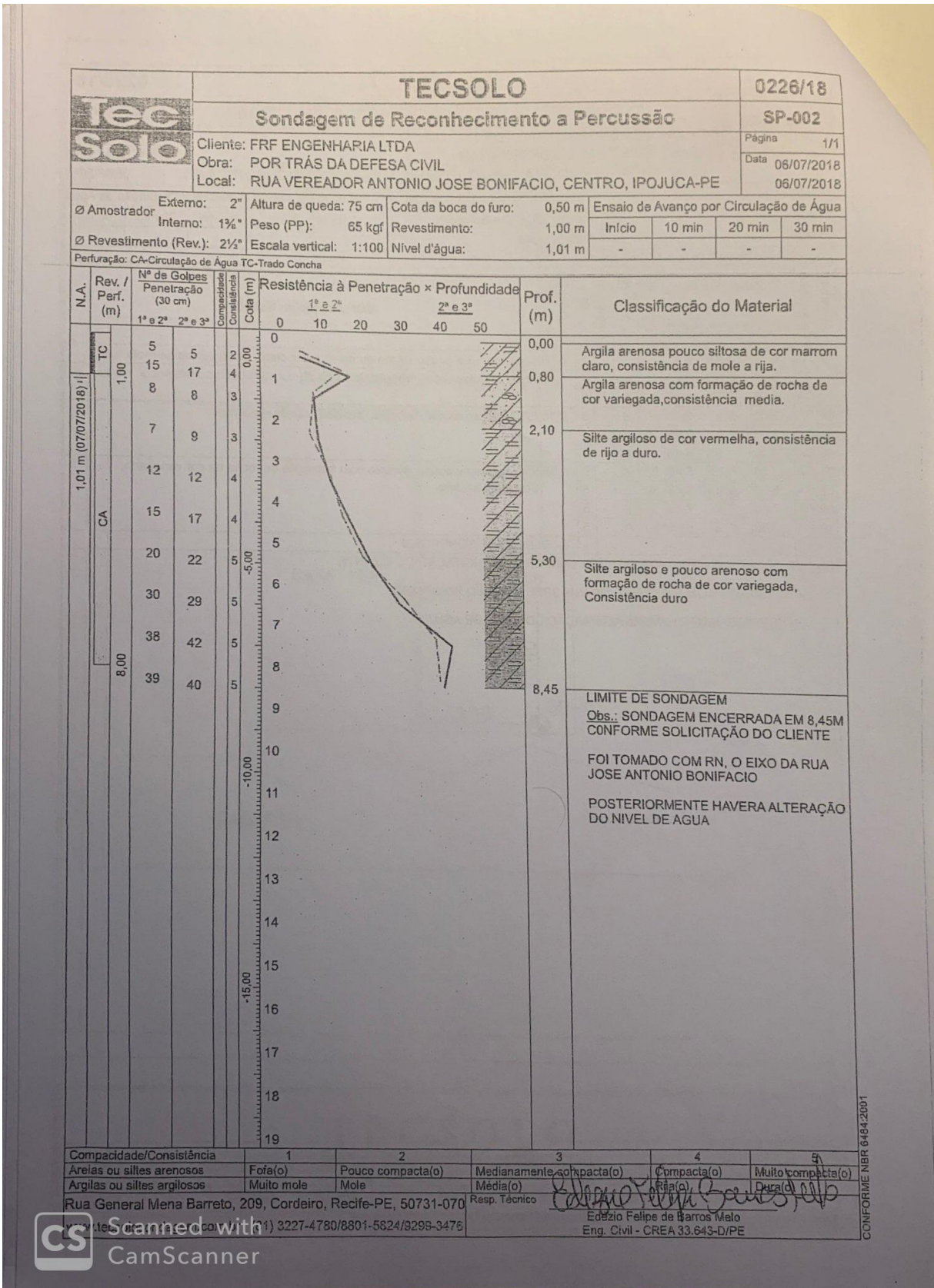
| Edométrico Duplo – Condições iniciais dos solos naturais | | | | |
|--|--|---------------------|-------------------------------|--|
| Amostras | Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³) | Umidade inicial (%) | Grau de saturação inicial (%) | Índice de Vazios inicial (e ₀) |
| P5 (base) | 16,8 | 24,94 | 49,60 | 1,36 |
| P6 (meio) | 11,2 | 18,48 | 34,74 | 1,47 |
| P7 (topo) | 11,9 | 13,79 | 31,34 | 1,17 |
| Edométrico Duplo – Condições finais dos solos naturais | | | | |
| Amostras | Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³) | Umidade final (%) | Grau de saturação final (%) | Índice de Vazios final (e _r) |
| P5 (base) | 16,7 | 29,08 | 78,29 | 1,01 |
| P6 (meio) | 10,5 | 16,06 | 39,36 | 1,13 |

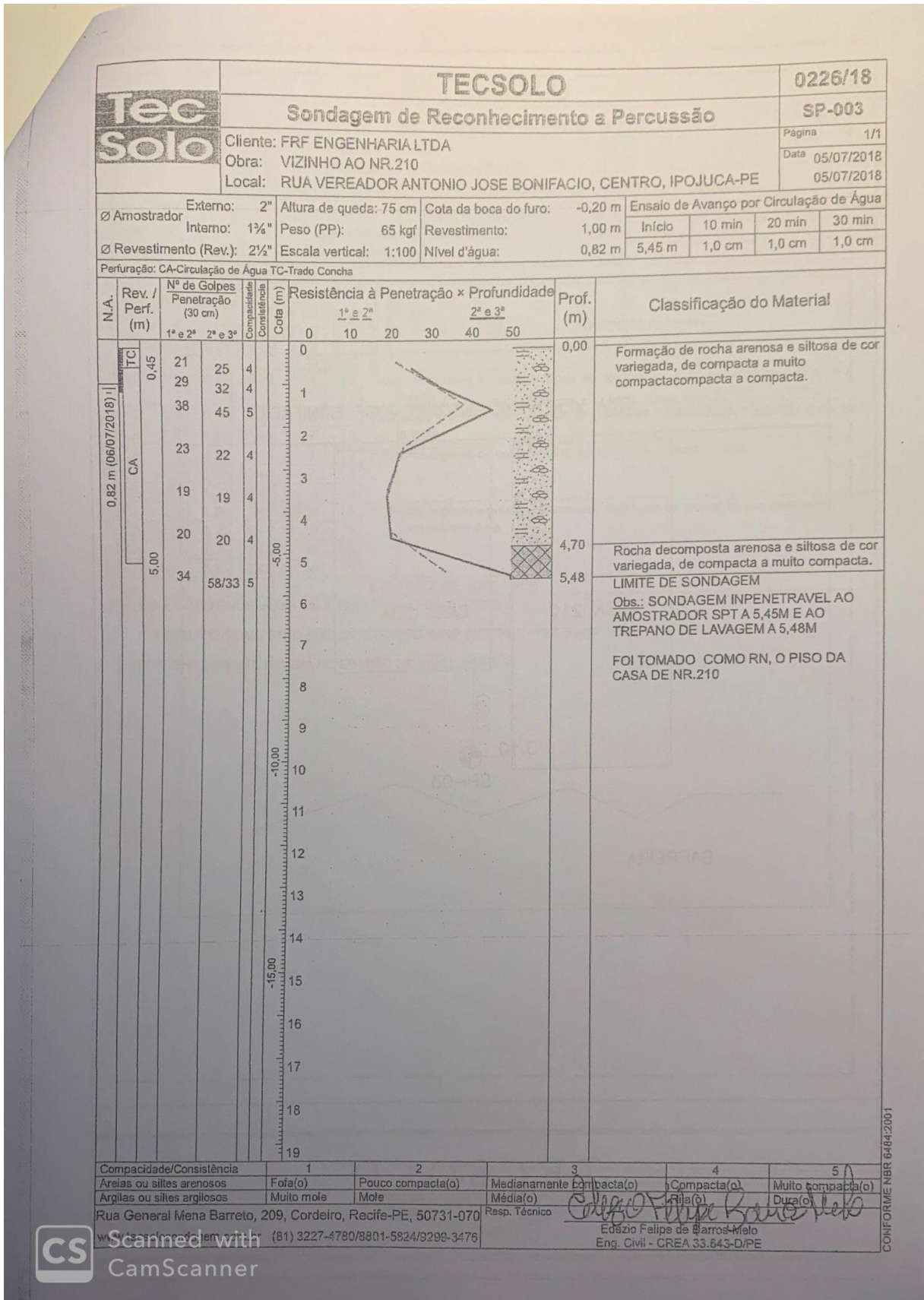
| | | | | |
|--|---|---------------------|----------------------------------|---|
| P7 (topo) | 11,6 | 13,18 | 35,96 | 0,98 |
| Edométrico Duplo – Condições iniciais dos solos inundados | | | | |
| Amostras | Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³) | Umidade inicial (%) | Grau de saturação inicial (%) | Índice de Vazios inicial (e ₀) |
| P5 (base) | 16,7 | 29,06 | 56,33 | 1,4 |
| P6 (meio) | 10,9 | 17,56 | 28,54 | 1,6 |
| P7 (topo) | 11,7 | 13,91 | 23,46 | 1,58 |
| Edométrico Duplo – Condições finais dos solos inundados | | | | |
| Amostras | Peso Específico Aparente Seco (kN/m ³) | Umidade final (%) | Grau de saturação final (%) | Índice de Vazios final (e _f) |
| P5 (base) | 16,8 | 25,65 | 100 | 0,7 |
| P6 (meio) | 12,3 | 26,69 | 100 | 0,74 |
| P7 (topo) | 13,2 | 20,79 | 100 | 0,55 |

Fonte: Autor (2020)

ANEXO A - Resultados das Sondagens fornecidos pela Prefeitura de Ipojuca

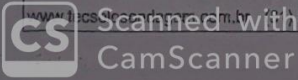


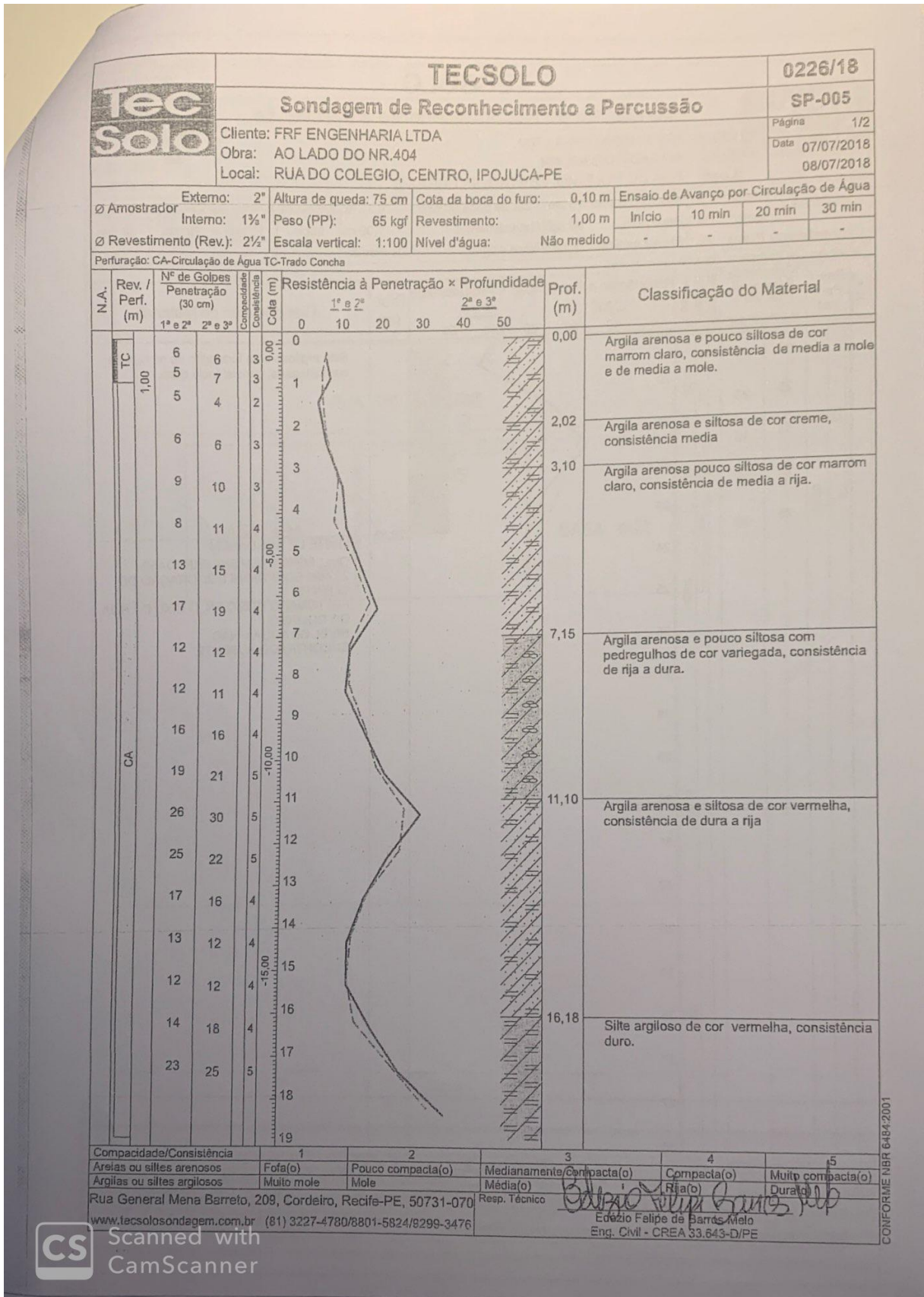




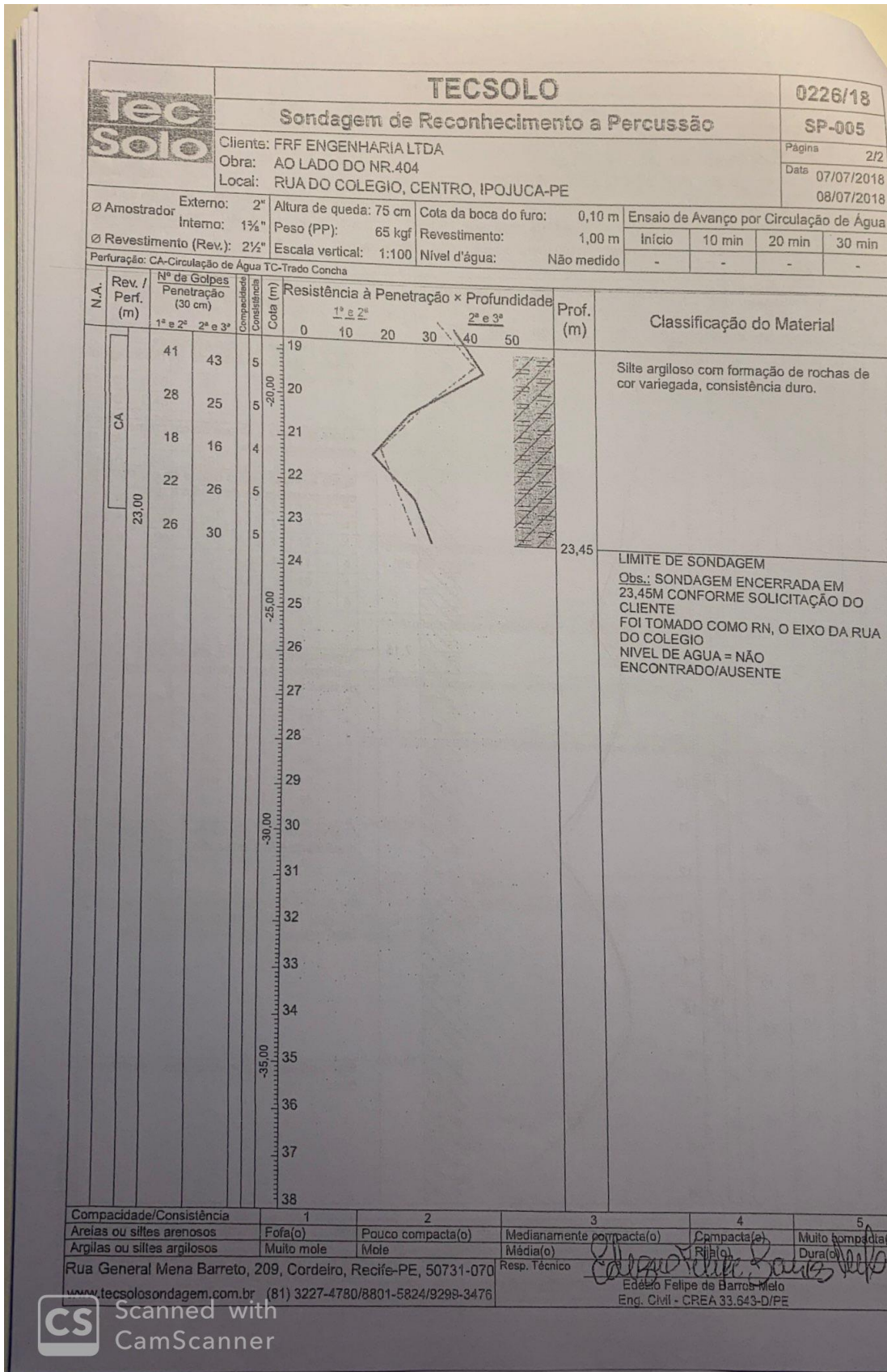
Fonte: Prefeitura de Ipojuca (2019)

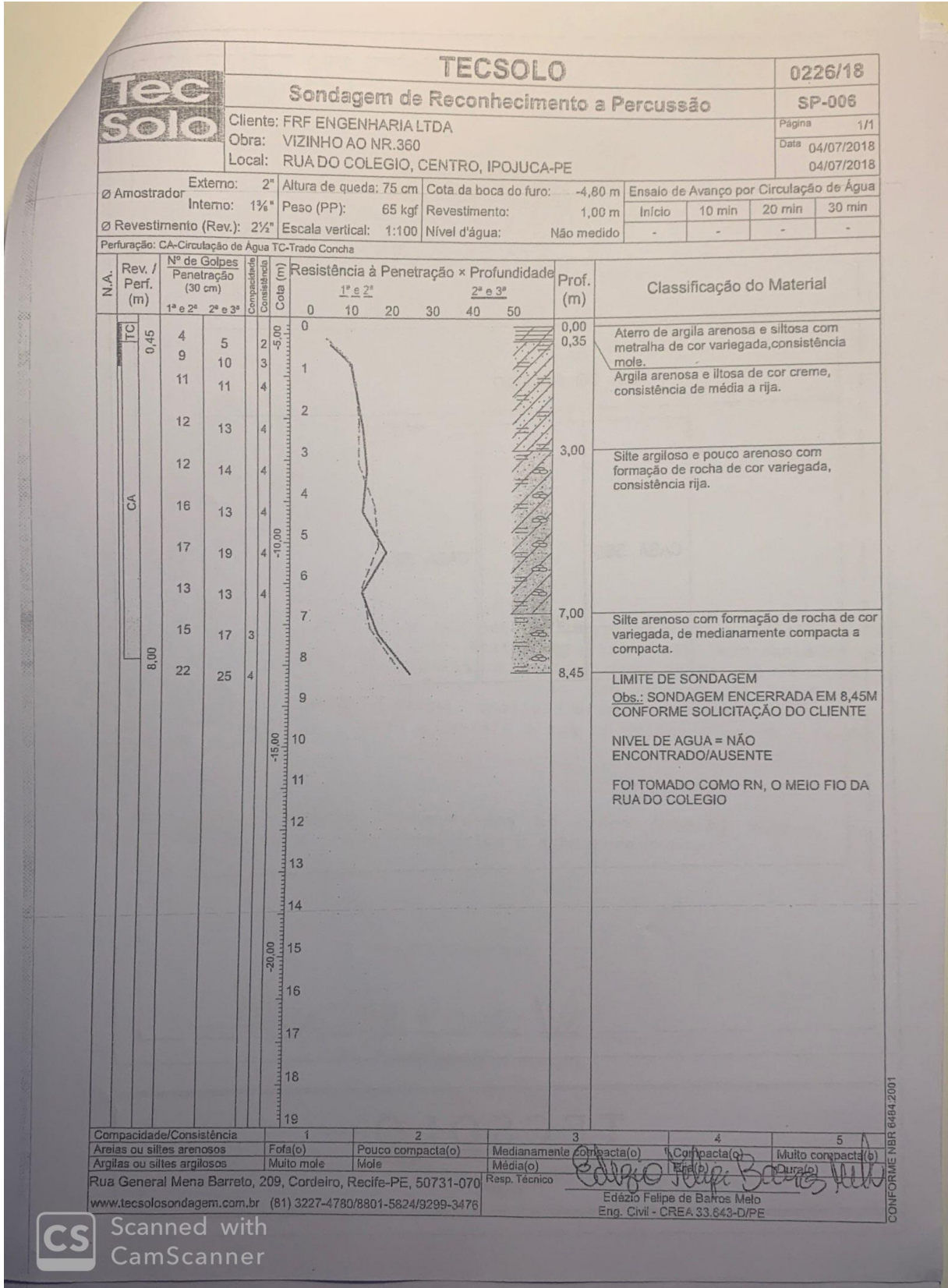
| Tec Solo | | TECSOLO | | | | 0226/18 | | | | | | | |
|---|------------------|--|------------------------|------------------------------|---|------------------------------|---|-------------------------------|---------|-------------------|---------|-----------|--|
| | | Sondagem de Reconhecimento a Percussão | | | | SP-004 | | | | | | | |
| | | Cliente: FRF ENGENHARIA LTDA | | | | Página 1/1 | | | | | | | |
| | | Obra: POR TRÁS DA OFICINA DO DINHO | | | | Data 09/07/2018 | | | | | | | |
| | | Local: RUA VEREADOR ANTONIO JOSE BONIFACIO, CENTRO, IPOJUCA-PE | | | | 09/07/2018 | | | | | | | |
| Ø Amostrador | | Externo: 2" | Altura de queda: 75 cm | Cota da boca do furo: 0,35 m | Ensaio de Avanço por Circulação de Água | | | | | | | | |
| | | Interno: 1 1/2" | Peso (PP): 65 kgf | Revestimento: 1,00 m | Início | 10 min | 20 min | 30 min | | | | | |
| Ø Revestimento (Rev.): 2 1/2" | | Escala vertical: 1:100 | Nível d'água: 1,54 m | | - | - | - | - | | | | | |
| Perfuração: CA-Circulação de Água TC-Trado Concha | | | | | | | | | | | | | |
| N.A. | Rev. / Perf. (m) | Nº de Golpes Penetração (30 cm) | | | Compacidade/Consistência | Cota (m) | Resistência à Penetração × Profundidade | | | | | Prof. (m) | Classificação do Material! |
| | | 1ª e 2ª | 2ª e 3ª | 3ª e 4ª | | | 1ª e 2ª | 2ª e 3ª | 3ª e 4ª | 4ª e 5ª | 5ª e 6ª | | |
| | TC | 4 | 4 | 2 | 0,00 | 0 | | | | | | 0,00 | Argila siltosa e pouco arenosa de cor marrom claro, consistência de mole a media. |
| | 1,00 | 5 | 6 | 3 | | 1 | | | | | | 0,80 | Argila arenosa com formação de rochas de cor variegada, consistência de media a mole |
| | | 7 | 7 | 3 | | 2 | | | | | | 2,80 | Silte argiloso de cor vermelha, consistência de medio a rijo. |
| | | 4 | 4 | 2 | | 3 | | | | | | 5,10 | Silte argiloso e pouco arenoso com formação de rochas de cor variegada, consistência duro. |
| | CA | 9 | 8 | 3 | | 4 | | | | | | | |
| | | 11 | 13 | 4 | | 5 | | | | | | | |
| | | 19 | 21 | 5 | -5,00 | 6 | | | | | | | |
| | | 26 | 30 | 5 | | 7 | | | | | | | |
| | | 34 | 38 | 5 | | 8 | | | | | | | |
| | 8,00 | 34 | 40 | 5 | | 9 | | | | | | 8,45 | LIMITE DE SONDAGEM Obs.: SONDAGEM ENCERRADA EM 8,45M A PEDIDO DO CLIENTE |
| | | | | | | 10 | | | | | | | FOI TOMADO COMO RN, O EIXO DA RUA VEREADOR ANTONIO JOSE BONIFACIO |
| | | | | | | 11 | | | | | | | POSTERIORMENTE HAVERÁ ALTERAÇÃO DO NIVEL DE AGUA |
| | | | | | | 12 | | | | | | | |
| | | | | | | 13 | | | | | | | |
| | | | | | | 14 | | | | | | | |
| | | | | | | 15 | | | | | | | |
| | | | | | | 16 | | | | | | | |
| | | | | | | 17 | | | | | | | |
| | | | | | | 18 | | | | | | | |
| | | | | | | 19 | | | | | | | |
| Compacidade/Consistência | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | | |
| Areias ou siltes arenosos | | Fofa(o) | | Pouco compacta(o) | | Medianamente compacta(o) | | Compacta(o) | | Muito compacta(o) | | | |
| Argilas ou siltes argilosos | | Muito mole | | Mole | | Média(o) | | Rija(o) | | Dura(o) | | | |
| Rua General Mena Barreto, 209, Cordeiro, Recife-PE, 50731-070 | | | | Resp. Técnico | | Edézio Felipe de Barros Melo | | Eng. Civil - CREA 33.643-D/PE | | | | | |





Fonte: Prefeitura de Ipojuca (2019)





Fonte: Prefeitura de Ipojuca (2019)