



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JONAS DA SILVA BEZERRA

**ANÁLISE DO PROCESSO EROSIVO DE UMA ENCOSTA NO BAIRRO DE BOM  
JESUS – ILHA DE ITAMARACÁ/PE**

Recife

2022

JONAS DA SILVA BEZERRA

**ANÁLISE DO PROCESSO EROSIVO DE UMA ENCOSTA NO BAIRRO DE BOM  
JESUS – ILHA DE ITAMARACÁ/PE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Coorientadora: Profa. Dra. Kalinny Patricia Vaz Lafayette.

Recife

2022

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4

B574a Bezerra, Jonas da Silva.  
Análise do processo erosivo de uma encosta no bairro de Bom Jesus –  
Ilha de Itamaracá/PE / Jonas da Silva Bezerra. – 2022.  
268 f.: il., figs., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.  
Coorientadora: Profa. Dra. Kalinny Patricia Vaz Lafayette.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2022.  
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Erosão em encosta. 3. Mapeamento com  
VANT. 4. DPL. 5. Inderbitzen. I. Melo, Silvio Romero Ferreira de  
(Orientador). II. Lafayette, Kalinny Patricia Vaz (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2022-232

JONAS DA SILVA BEZERRA

**ANÁLISE DO PROCESSO EROSIVO DE UMA ENCOSTA NO BAIRRO  
DE BOM JESUS – ILHA DE ITAMARACÁ/PE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 13/05/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

Participação por videoconferência  
Prof. Dra. Kátia Vanessa Bicalho (Examinadora Externa)  
Universidade Federal do Espírito Santo

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice (Examinador Externo)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Prof. Dra. Stela Fucale (Examinadora Externa)  
Universidade de Pernambuco

Participação por videoconferência  
Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira (Examinador Interno)  
Universidade Católica de Pernambuco

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

Dedico este trabalho ao meu irmão Junior, minha mãe Iracilda, minha esposa Adelyn e meus filhos Pedro e Caio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me abençoou muito para chegar até aqui na conclusão de mais uma etapa. Por me dar o maior dos presentes, que é a vida, e pelas pessoas especiais que colocou em meu caminho.

A minha mãe e a minha avó, Iracilda e Eulina (in memoriam), por serem a base para o meu desenvolvimento como pessoa, por me mostrarem o caminho correto e sempre estarem ao meu lado com amor e dedicação.

Aos meus irmãos, Junior e Jaime, por serem a minha referência, me educando e orientando. Por sempre estarem comigo nos momentos mais difíceis e felizes da minha vida. Ao meu pai, José, pela contribuição e incentivo na minha formação.

A minha eterna namorada Adelyn, sempre incentivadora e com muita paciência, sem reclamar do tempo que deixei de passar ao seu lado, para me dedicar ao trabalho. Pela confiança, que me deu força para completar esta jornada.

Aos meus amigos Fabio Ferreira, Gutemberg, Elivelthon Nascimento, Maria Fernanda, Andre Batista, Michele Joyce e Thiago Augusto pela grande ajuda e o apoio no desenvolvimento do trabalho.

A todo o corpo docente que faz parte do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelo incentivo acadêmico e por acreditarem no meu potencial como futuro mestre.

Ao meu orientador, professor Silvio Romero de Melo Ferreira e minha co-orientadora Kalinny Patrícia Vaz Lafayette, pela atenção e confiança, pelos ensinamentos transmitidos e a dedicação. Principalmente por ter acreditado em mim e ter dado todo o apoio e a orientação necessário para esta pesquisa.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

## RESUMO

Os processos erosivos dependem da interação de vários fatores, como a erosividade, erodibilidade, cobertura vegetal, relevo e o manejo do solo. O monitoramento e análise mecanismos da erosão possibilitam informações à minimização ou a mitigação dos processos erosivos. O objetivo da pesquisa é analisar o processo erosivo de uma encosta no Bairro de Bom Jesus município de Itamaracá-PE. Para isto, foram realizadas campanhas em campo (144 ensaios) e laboratório (1005 ensaios) para a caracterização geomecânica, dispersibilidade e erodibilidade do solo. No comportamento geomecânico foram feitos os ensaios de permeabilidade in situ, curvas características, adensamento e o cisalhamento direto. Na avaliação da dispersibilidade e erodibilidade realizaram-se: Ensaio do Torrão, Furo de Agulha, DPL e Inderbitzen Modificado. A área também foi mapeada com uso de VANT e as erosões foram delimitadas e quantificadas (utilizando a USLE). A caracterização física da encosta apresenta áreas do primeiro e segundo terço mais suscetíveis a erosão, com granular alto (acima de 60%) e aumento de solos finos Próximo ao Sopé (acima de 50%). A encosta apresenta caulinita, não indicando expansão, embora há indícios de dispersão além de solo condicionado ao colapso. O terceiro terço da encosta possui uma sucção 5 a 7 vezes menor, além de um adensamento 4 vezes maior que outras áreas. A caracterização mecânica em laboratório (cisalhamento direto) e em campo (DPL) indicam camadas superficiais no Topo da Encosta mais resistentes que as regiões abaixo, retardando os processos erosivos. Na análise da erodibilidade, o Inderbitzen modificado mostra ser um equipamento prático e com resultados satisfatórios, onde a taxa de desagregação encontrada é de 88 kg/m<sup>2</sup> com a umidade seca ao ar evidenciando a maior erodibilidade. O mapeamento demonstra quantidades de sulcos distintas por corte, o Corte A apresenta menor quantidade de sulco, com taxa de desagregação na ordem de 310 kg/m<sup>2</sup>. A USLE identifica uma perda global de 920 kg/m<sup>2</sup>, considerando as perdas a partir do retaludamento da encosta. Por fim, as informações obtidas auxiliam no entendimento da dinâmica erosiva da encosta, e têm potencial para apoiar estudos na RMR, auxiliando as intervenções em áreas erodidas.

**Palavras-chave:** erosão em encosta; mapeamento com VANT; DPL; nderbitzen.

## ABSTRACT

Erosive processes depend on the interaction of several factors, such as erosivity, erodibility, vegetation cover, relief and soil management. The monitoring and analysis of erosion mechanisms provide information for minimizing or mitigating erosion processes. The objective of the research is to analyze the erosion process of a slope in the neighborhood of Bom Jesus, municipality of Itamaracá-PE. For this, field campaigns (144 tests) and laboratory (1005 tests) were carried out for the geomechanical characterization, dispersibility and soil erodibility. In the geomechanical behavior, in situ permeability tests, characteristic curves, densification and direct shear were carried out. In the evaluation of dispersibility and erodibility, the following tests were carried out: Torrão, Furo de Agulha, DPL and Modified Inderbitzen tests. The area was also mapped using UAV and erosions were delimited and quantified (using USLE). The physical characterization of the slope shows areas of the first and second thirds more susceptible to erosion, with high granulation (above 60%) and an increase in fine soils near the foothills (above 50%). The slope presents kaolinite, not indicating expansion, although there are indications of dispersion in addition to soil conditioned to collapse. The third third of the slope has a suction 5 to 7 times lower, in addition to a densification 4 times higher than other areas. Mechanical characterization in the laboratory (direct shear) and in the field (DPL) indicate surface layers at the Top of the Hill are more resistant than the regions below, delaying the erosive processes. In the analysis of erodibility, the modified Inderbitzen proves to be a practical equipment and with satisfactory results, where the rate of disaggregation found is 88 kg/m<sup>2</sup> with air-dried humidity showing the highest erodibility. The mapping shows different amounts of furrows per cut, Cut A has a lower amount of furrow, with a disaggregation rate in the order of 310 kg/m<sup>2</sup>. The USLE identifies a global loss of 920 kg/m<sup>2</sup>, considering the losses from the slope re-slope. Finally, the information obtained helps in understanding the erosive dynamics of the slope, and has the potential to support studies in the RMR, helping interventions in eroded areas.

**Keywords:** slope erosion; mapping with UAV; DPL; inderbitzen.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Processo erosivo avançado	24
Figura 2 –	Ação antrópica em área erodida no bairro de São Paulo, Itamaracá/PE	25
Figura 3 –	Erosão provocando redução da vegetação nativa no bairro de São Paulo em Itamaracá	26
Figura 4 –	Impacto da gota de chuva sobre a superfície	27
Figura 5 –	Esquema do relevo nas encostas	30
Figura 6 –	Mapa de ocorrências de erosões de erosões catalogadas na RMR	34
Figura 7 –	Ocorrência de erosões catalogadas da RMR	34
Figura 8 –	Cicatriz de ravinamento provocada por escoamento hídrico	36
Figura 9 –	Principais mecanismos erosivos	37
Figura 10 –	Erosões em estradas no Cabo de Santo Agostinho	38
Figura 11 –	Evidência de sulcos em áreas do município de Moreno	39
Figura 12 –	Processos erosivos em Jaboatão dos Guararapes	40
Figura 13 –	Erosão em área desmatada para loteamento	41
Figura 14 –	Processo erosivo causando assoreamento	43
Figura 15 –	Formação de ravina oriunda do lançamento de águas servidas	44
Figura 16 –	Mapa de localização da Ilha de Itamaracá	46
Figura 17 –	Índices pluviométricos de Itamaracá	47
Figura 18 –	Detalhamento geológico da Ilha de Itamaracá; A) Carta geológica, B) Planta de corte	48
Figura 19–	Encarte Tectônico	49
Figura 20 –	Coluna estratigráfica da Bacia Pernambuco-Paraíba	50
Figura 21 –	Fluxograma das etapas	55
Figura 22 –	Mapeamento das jazidas de extração do saibro	56
Figura 23 –	Área de Estudo	56
Figura 24 –	Detalhamentos dos pontos de sondagem	58
Figura 25 –	Coleta de Amostra indeformada	58
Figura 26 –	Permeâmetro de Guelph	59

Figura 27 –	Ensaio de DPL	60
Figura 28 –	DPL	60
Figura 29 –	VANT modelo PHANTOM 4-PRO	61
Figura 30 –	Difratômetro	70
Figura 31 –	Ilustração do Pinhole Test	71
Figura 32 –	Amostras sujeitas a análise	73
Figura 33 –	Fotômetro de chama	75
Figura 34 –	Ábaco de dispersividade baseado na química da água intersticial	76
Figura 35 –	Pesagem do papel filtro e do solo	77
Figura 36 –	Prensa de adensamento	77
Figura 37 –	Prensa de cisalhamento analisando a amostra	78
Figura 38 –	Modelo de inderbitzen proposto por Gonçalves e Silva (2019)	80
Figura 39 –	Curva típica de perda de solo acumulada versus o tempo	82
Figura 40 –	Identificação da taxa de erodibilidade e a tensão cisalhante hidráulica crítica	83
Figura 41 –	Detalhe da encosta. a) Seções da encosta; b) Esquema lateral	84
Figura 42 –	Curvas Granulométricas – Seções 01/ Profundidades	86
Figura 43 –	Curvas Granulométricas – Seções 02/ Profundidades	87
Figura 44 –	Curvas Granulométricas – Seções 03/ Profundidades	87
Figura 45 –	Carta de atividade/plasticidade das amostras	88
Figura 46 –	Caracterização física do solo e suscetibilidade à erosão em S-01	93
Figura 47 –	Caracterização física do solo e suscetibilidade à erosão em S-02	94
Figura 48 –	Caracterização física do solo e suscetibilidade à erosão em S-03	95
Figura 49 –	Micrografias da fração areia realizada pelo microscópio ótico	99
Figura 50 –	Difratogramas de raio-X, da Seção S-01 (P-01)	101
Figura 51 –	Difratogramas de raio-X, da Seção S-01 (P-04)	101
Figura 52 –	Difratogramas de raio-X, da Seção S-01 (P-07)	101
Figura 53 –	Difratogramas de raio-X, da Seção S-02 (P-02)	101

Figura 54 –	Difratogramas de raio-X, da Seção S-02 (P-05)	102
Figura 55 –	Difratogramas de raio-X, da Seção S-02 (P-08)	102
Figura 56 –	Difratogramas de raio-X, da Seção S-03 (P-03)	102
Figura 57 –	Difratogramas de raio-X, da Seção S-03 (P-06)	102
Figura 58 –	Difratogramas de raio-X, da Seção S-03 (P-09)	103
Figura 59 –	Resultados do ensaio de permeabilidade saturada (Kfs) de campo com permeâmetro de Guelph, potencial mátrico de fluxo ( $\phi_m$ ) e granulometria da Seção S-01	106
Figura 60 –	Resultados do ensaio de permeabilidade saturada (Kfs) de campo com permeâmetro de Guelph, potencial mátrico de fluxo ( $\phi_m$ ) e granulometria da Seção S-02	106
Figura 61 –	Resultados do ensaio de permeabilidade saturada (Kfs) de campo com permeâmetro de Guelph, potencial mátrico de fluxo ( $\phi_m$ ) e granulometria da Seção S-03	107
Figura 62 –	Curvas características e granulométricas dos solos da Seção 01 (P 01, P 04, P 07)	111
Figura 63 –	Curvas características e granulométricas dos solos da Seção 02 (P 02, P 05, P 08)	112
Figura 64 –	Curvas características e granulométricas dos solos da Seção 03 (P 03, P 06, P 09)	113
Figura 65 –	Tensão vertical versus Índices de vazios e Tensão Vertical versus Deformação Volumétrica	119
Figura 66 –	Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – S-01/P-01 (Topo)	122
Figura 67 –	Envoltórias de resistência em P-01	122
Figura 68 –	Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – S-01/P-04 (Meia Encosta)	123
Figura 69 –	Envoltórias de resistência em P-04	123
Figura 70 –	Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – S-01/P-07 (Próximo ao Sopé)	124

Figura 71 –	Envoltórias de resistência em P-07	124
Figura 72 –	Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – S-02/P-02 (Topo)	126
Figura 73 –	Envoltórias de resistência em P-02	127
Figura 74 –	Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – S-02/P-05 (Meia Encosta)	127
Figura 75 –	Envoltórias de resistência em P-05	128
Figura 76 –	Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – S-02/P-08 (Próximo ao Sopé)	128
Figura 77 –	Envoltórias de resistência em P-08	129
Figura 78 –	Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – S-03/P-03 (Topo)	131
Figura 79 –	Envoltórias de resistência em P-03	131
Figura 80 –	Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – S-03/P-06 (Meia Encosta)	132
Figura 81 –	Envoltórias de resistência em P-06	132
Figura 82 –	Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – S-03/P-09 (Meia Encosta)	133
Figura 83 –	Envoltórias de resistência em P-09	133
Figura 84 –	Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo na umidade natural e inundado previamente: a) Primeiro Terço da encosta, a) Segundo Terço da encosta, a) Terceiro Terço da encosta	135
Figura 85 –	Envoltórias média da resistência ao cisalhamento do solo: a) umidade natural e b) inundado previamente	136
Figura 86 –	Ensaio do Ensaio do Torrão em P-05	140
Figura 87 –	Ensaio do Ensaio do Torrão em P-09	141

Figura 88 –	Carga Hidráulica versus Vazão em todas as Seções	144
Figura 89 –	Ensaio do Furo de Agulha	145
Figura 90 –	Relação entre o percentual de sódio e o total de sais dissolvidos	146
Figura 91 –	Vista frontal do Inderbitzen	150
Figura 92 –	Vista lateral do Inderbitzen	153
Figura 93 –	Taxa de desagregação versus tensão de cisalhamento do escoamento	152
Figura 94 –	Perda de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área (g/cm <sup>2</sup> ) versus tempo (minutos) para vazão de 1,81 l/min. a) Seco ao ar, b) Umidade Natural, c) Pré-umidecido	154
Figura 95 –	Resistência à penetração relacionado a profundidade para os pontos	157
Figura 96 –	Sulcos delimitados na encosta	158
Figura 97 –	Mapeamento da Encosta	159
Figura 98 –	Identificação dos sulcos por corte	160
Figura 99 –	Dimensões dos sulcos nos cortes	161
Figura 100 –	Seções transversais da erosão A-2	163
Figura 101 –	Seções transversais da erosão B-9	164
Figura 102 –	Seções transversais da erosão C-4	164
Figura 103 –	Taxa de perda do solo	165
Figura 104 –	Taxa de perda de solo para os sulcos do corte C	166

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Processos erosivos em cidades da RMR	35
Tabela 2 –	Quantitativo da campanha em campo	57
Tabela 3 –	Valores do fator P para tipos de práticas conservacionistas diferentes	64
Tabela 4 –	Quantitativo da campanha de laboratório	66
Tabela 5 –	Classificação pelo Método LNEC	67
Tabela 6 –	Equações para determinação dos parâmetros de dispersividade de solos	75
Tabela 7 –	Materiais utilizados no Inderbitzen modificado	81
Tabela 8 –	Coeficientes de Uniformidades e de Curvaturas	89
Tabela 9 –	Classificação dos solos da Formação Barreiras na RMR – Pernambuco	91
Tabela 10 –	Resultados da difratometria	100
Tabela 11 –	Propriedades químicas do solo	104
Tabela 12 –	Resultados do ensaio de permeabilidade saturada (Kfs), potencial mátrico do solo ( $\phi_m$ ) e granulometria	105
Tabela 13 –	Permeabilidade de solos da Formação Barreiras	107
Tabela 14 –	Umidade em campo, Sucção do solo e Granulometria média	109
Tabela 15 –	Índices de ajuste do modelo Durner (1994)	114
Tabela 16 –	Índices de ajuste do modelo Seki (2007)	114
Tabela 17 –	Índices de ajuste do modelo Van Genuchten (1980)	115
Tabela 18 –	Condições dos corpos de prova no ensaio edométrico	115
Tabela 19 –	Condições de corpo de prova no ensaio edométrico próximo ao Sopé	116
Tabela 20 –	Resumo dos ensaios EDN e EDI	117
Tabela 21 –	Resultado da Classificação de Reginatto e Ferrero (1973)	118
Tabela 22 –	Dados da envoltória de resistência	134
Tabela 23 –	Valores médios da coesão, ângulo de atrito e percentual de perdas da coesão e ângulo de atrito para cada terço da encosta	136
Tabela 24 –	Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos provenientes da Formação Barreiras da RMR	137

Tabela 25 –	Porcentagem de Dispersividade (PD)	142
Tabela 26 –	Propriedades químicas da água intersticial do solo	146
Tabela 27 –	Resumo das análises de dispersividade	147
Tabela 28 –	Suscetibilidade à erosão pelo método de Meirelles (1967)	148
Tabela 29 –	Obtenção da Tensão Cisalhante Hidráulica Crítica ( $\tau_{crit}$ ) e Taxa de Erodibilidade (K)	155
Tabela 30 –	Deslocamentos iniciais pelo peso próprio	163
Tabela 31 –	Dados para determinação da perda pelo método da USLE	167
Tabela 32 –	Relação das taxas de perda de solo em função do método abordado	168

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DPL	Penetrômetro Dinâmico Leve
DRX	Difração de Raio-X
EDTA	Ácido etilenodiaminotetracético.
GIS	Sistema de Informações Geográficas
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
PMAHC	Parque Metropolitano Armando Holanda Cavalcanti
RMR	Região Metropolitana do Recife
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UNICAP	Universidade Católica de Pernambuco
UPE	Universidade de Pernambuco
USLE	Universal Soil Loss Equation
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	PROBLEMAS E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	19
1.2	OBJETIVOS	21
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	21
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivo Específico</b>	21
1.3	HIPÓTESE	21
1.4	PREMISSA	21
1.5	DELIMITAÇÕES	22
1.6	LIMITAÇÕES	22
1.7	CONSIDERAÇÃO SOBRE O ESTADO DA ARTE	22
1.8	ESTRUTURAÇÃO DA TESE	23
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>24</b>
2.1	EROSÃO DO SOLO	24
2.2	FATORES EROSIVOS	26
<b>2.2.1</b>	<b>Erosividade</b>	27
<b>2.2.2</b>	<b>Erodibilidade</b>	28
<b>2.2.3</b>	<b>Relevo</b>	29
<b>2.2.4</b>	<b>Cobertura Vegetal</b>	31
2.3	TIPOS DE EROSÃO	31
2.4	SUSCETIBILIDADE À EROSÃO	32
2.5	ESTUDOS SOBRE PROCESSOS EROSIVOS NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE (RMR)	33
<b>2.5.1</b>	<b>Ipojuca</b>	35
<b>2.5.2</b>	<b>Cabo de Santo Agostinho</b>	37
<b>2.5.3</b>	<b>Moreno</b>	38
<b>2.5.4</b>	<b>Jaboatão dos Guararapes</b>	39
<b>2.5.5</b>	<b>Recife</b>	40
<b>2.5.6</b>	<b>Camaragibe</b>	42
<b>2.5.7</b>	<b>Abreu e Lima</b>	43
2.6	EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO (USLE)	44
2.7	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ITAMARACÁ	45

2.7.1	<b>Clima</b>	46
2.7.2	<b>Geologia</b>	47
2.7.3	<b>Embasamento Cristalino</b>	50
2.7.4	<b>Formação Beberibe</b>	51
2.7.5	<b>Formação Gramame</b>	51
2.7.6	<b>Formação Maria Farinha</b>	52
2.7.7	<b>Formação Barreiras</b>	52
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>54</b>
3.1	INTRODUÇÃO	54
3.2	LOCAL DA INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO	54
3.3	INVESTIGAÇÃO DE CAMPO	57
3.3.1	<b>Ensaio de permeabilidade “in situ”</b>	59
3.3.2	<b>Ensaio do Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL)</b>	59
3.3.3	<b>Mapeamento do processo erosivo</b>	61
3.3.3.1	Avaliação de perda de Solo	62
3.3.3.2	Taxa de perda do solo	64
3.4	INVESTIGAÇÃO EM LABORATÓRIO	65
3.4.1	<b>Caracterização Física</b>	66
3.4.2	<b>Caracterização Mineralógica</b>	67
3.4.3	<b>Ensaio de Dispersão</b>	71
3.4.4	<b>Caracterização Química</b>	72
3.4.5	<b>Curva característica do solo</b>	76
3.4.6	<b>Ensaio de Compressibilidade</b>	77
3.4.7	<b>Ensaio de resistência ao cisalhamento direto</b>	78
3.4.8	<b>Inderbitzen modificado</b>	79
<b>4</b>	<b>COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DOS SOLOS</b>	<b>84</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	86
4.2	ANÁLISE MINERALÓGICA	97
4.3	ANÁLISE QUÍMICA	103
4.4	ANÁLISE DA PERMEABILIDADE IN SITU	104
4.5	ANÁLISE DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS	108
4.6	ANÁLISE DA COMPRESSIBILIDADE	115
4.7	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO	120

4.8	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 4	137
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DA DISPERSIVIDADE E ERODIBILIDADE DO SOLO</b>	<b>140</b>
5.1	AVALIAÇÃO DA DISPERSIVIDADE	140
5.1.1	<b>Avaliação da dispersividade através do ensaio do torrão (Crumb Test)</b>	140
5.1.2	<b>Avaliação da dispersividade por meio de ensaio sedimentométrico comparativo (SCS)</b>	141
5.1.3	<b>Avaliação da dispersividade por meio do Ensaio do Furo de Agulha (Pinhole Test)</b>	142
5.1.4	<b>Análise da química da água intersticial</b>	145
5.2	ANÁLISE DA ERODIBILIDADE E TAXA DE PERDA DO SOLO	147
5.2.1	<b>Avaliação do processo erodível</b>	147
5.2.2	<b>Análise da erodibilidade obtidos com o Inderbitzen modificado</b>	149
5.3	ANÁLISE DO PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE – DPL	154
5.4	MAPEAMENTO DAS EROSÕES NA ENCOSTA	158
5.4.1	<b>Determinação das taxas de perdas do solo no sulco</b>	165
5.4.2	<b>Avaliação de perdas pelo método da Equação Universal de Perdas de Solo – USLE</b>	167
5.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 5	168
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>171</b>
6.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	173
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>175</b>
	<b>APÊNDICE A – CURVAS GRANULOMÉTRICAS</b>	<b>193</b>
	<b>APÊNDICE B – COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS</b>	<b>211</b>
	<b>APÊNDICE C – CARTAS DE ATIVIDADE/PLASTICIDADE DO SOLO</b>	<b>221</b>
	<b>APÊNDICE D – SUSCETIBILIDADE À EROSÃO</b>	<b>224</b>
	<b>APÊNDICE E – CURVAS DE CISALHAMENTO</b>	<b>233</b>
	<b>APÊNDICE F – MAPEAMENTO DOS SULCOS</b>	<b>242</b>
	<b>APÊNDICE G – TAXAS DE PERDA DO SOLO NOS</b>	<b>266</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as considerações iniciais sobre os processos erosivos, a fim de compreender a problemática adotada para o desenvolvimento do trabalho. O capítulo também descreve a justificativa, os objetivos gerais e específicos, hipótese, premissa, delimitações, limitações, consideração sobre o estado da arte e a estruturação da tese.

### 1.1 PROBLEMAS E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Os ambientes naturais estão sendo constantemente transformados em razão dos processos de expansão atrelado a grandes construções. Ao longo do século XXI foram feitos vários debates acerca da problemática ambiental, além das práticas de conservação, preservação e proteção de ecossistemas (LI et al., 2020; YAN et al., 2021). Apesar dos esforços para a manutenção da biodiversidade, a degradação ambiental ainda é causada principalmente pela ação antrópica. Tal aspecto promove um desafio para gestores, tendo em vista os conflitos e problemas ambientais gerados a partir dos interesses e atividades econômicas dos atores sociais envolvidos (WANG et al., 2019).

Endente-se como degradação ambiental as mudanças impostas pela sociedade aos ecossistemas naturais, alterando as suas características físicas, químicas e biológicas, comprometendo a qualidade de vida dos seres humanos. Neste mesmo contexto, a aceleração dos processos de degradação é decorrente do manejo inadequado somado às condições naturais (SMETANOVÁ et al., 2019).

Um dos processos de degradação ambiental é o uso dos solos de maneira desordenada, que ocasiona uma série de consequências, dentre as quais se destacam: erosão, a perda de solos férteis, o assoreamento de cursos d'água e de reservatórios, a poluição de corpos d'água, a redução do volume de água disponível para abastecimento urbano, a diminuição da produtividade agropecuária, bem como a ocorrência de desastres urbanos, tais como os movimentos de massa em geral (OU et al., 2021).

Neste sentido, a erosão pode ser entendida como um conjunto de ações pelos quais os materiais componentes da crosta terrestre são degradados, dissolvidos e transportados por diversos agentes erosivos. Sendo uma das formas mais agressivas

degradação dos solos, responsável por significativos danos econômicos (COUTO et al., 2016; WANG E ZHANG, 2017; LIU et al., 2019; LOPES et al., 2019; GENG et al., 2021). As erosões causam várias consequências socioeconômicas como a perda de áreas habitáveis ou agriculturáveis, interrupção de vias, assoreamento do leito dos cursos d'água, devido aos sistemas de drenagem ineficientes, exposição do patrimônio público e privado e riscos às comunidades próximas (BELLOCCHI, 2020; FERNÁNDEZ-RAGA et al., 2021).

A maioria dos processos erosivos em áreas urbanas ocorre na retirada da vegetação devido a um aumento vertiginoso da população urbana associada com a falta de planejamento urbano apropriado (SCHOLTEN, 2019). O aumento urbano corrobora na diminuição da capacidade de infiltração da água no solo, aumentando o coeficiente de escoamento superficial da água (SANTOS, 2016).

Diante deste aspecto, entender as características das erosões no solo e avaliar seus fatores são importantes contribuições no estudo de ações preventivas, de conservação e de controle dos processos erosivos. É necessário conhecer as erosões de forma quantitativa e qualitativa, além de equacionar e determinar parâmetros que possam corroborar ou não na sua evolução. Vale salientar que há diferenças nos fatores que originam e/ou potencializam as erosões em cada região, sendo importante identificar as singularidades que cada área apresenta.

Na Região Metropolitana do Recife (RMR) existem vários estudos destacando as condições que favoreceram os processos erosivos. No entanto, os estudos mais evidentes estão concentrados nos municípios de Recife, Jaboatão, Olinda e Cabo de Santo Agostinho e Camaragibe (LIMA, 2002; LAFAYETTE, 2006; BANDEIRA et al., 2006; MEIRA, 2008; SILVA, 2010; MAGALHÃES, 2013; SILVA et al., 2013; HENRIQUE, 2014; SOUZA, 2014; TORRES et al., 2015; ALMEIDA, 2016; GUEDES et al., 2016; FREITAS, 2016; SILVA, 2016; VILAVERDE, 2019; XAVIER, 2020).

O Município de Itamaracá, pertencente a RMR, apesar de não ter apresentado ocorrências de grandes deslizamentos nos últimos anos, tem apresentado inúmeras áreas em processo acelerado de degradação por erosão. Isto pode indicar áreas instáveis com potencial remoção de sedimentos, principalmente em local com ocupação do solo de forma inadequada. O estudo das erosões nas encostas de Itamaracá, proporcionam além da continuidade da identificação das erosões na RMR, um estudo dos processos erosivos nas regiões de extração irregular na ilha que já sofre com erosões marinhas, devido ao avanço do mar em alguns trechos de praia.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o processo erosivo de uma encosta no Bairro de Bom Jesus município de Itamaracá-PE.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar física, química e mineralogicamente o solo da encosta;
- b) Identificar o potencial de dispersão do solo;
- c) Avaliar o comportamento hidromeccânico do solo;
- d) Mapear os processos erosivos existentes na encosta;
- e) Quantificar as perdas de solo na condição de erosão laminar, entressulco e sulco;
- f) Avaliar a perda de sedimentos na encosta.

## 1.3 HIPÓTESE

O comportamento mecânico do solo na superfície da encosta, em conjunto com as características físicas do solo, é capaz ser um dos fatores na diminuição das taxas de perda de sedimentos e escoamento superficial.

## 1.4 PREMISSA

Se tem como premissa o fato de que as erosões ocorrem a partir de inúmeros fatores, por mais que existam predominâncias, a mitigação deste problema decorre da identificação de quais parâmetros influenciam a evolução dos processos erosivos ao longo do tempo e quais as soluções de engenharia que melhor se adequem a realidade do local.

## 1.5 DELIMITAÇÕES

A atual pesquisa se restringe ao estudo dos processos erosivos em uma encosta retalhada, ou seja, a encosta já passou por uma intervenção. As avaliações consideram as erosões laminares, entressulcos e sulcos oriundos após a realização dos cortes na encosta com a identificação dos fatores influentes em cada processo. Não ocorreu uma análise da origem do processo de degradação da área como também não foram avaliadas as erosões anteriores à intervenção realizada.

## 1.6 LIMITAÇÕES

Algumas restrições foram consideradas, a fim de um melhor entendimento do desenvolvimento desta pesquisa, tais como:

- A caracterização mecânica, a dispersividade e a erodibilidade da encosta consideraram amostras de solo das camadas superficiais em cada patamar (até 1,5 m de espessura em cada ponto coletado);
- Alguns ensaios laboratoriais não puderam ser desenvolvidos de maneira mais detalhada devido às medidas adotadas no período de pandemia;
- Os dados do levantamento do Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) identificam o material carregado nas erosões em sulco a partir do último processo de retalhamento na encosta, realizado em 2007.

## 1.7 CONSIDERAÇÃO SOBRE O ESTADO DA ARTE

Diversos trabalhos abordam os processos erosivos em encostas retalhadas e suas influências na estabilidade do solo. Da mesma forma, é de conhecimento a grande documentação existente referente aos fatores que corroboram na evolução das erosões. Muitas pesquisas nesta área são desenvolvidas pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco na Região Metropolitana do Recife (RMR). No entanto, uma área de estudo jamais esgotará suas possibilidades de descobertas e, em virtude disto, o atual trabalho vem contribuir ao estado da arte no que tange o atual contexto discutido por meio dos seguintes tópicos originais:

Comportamento mecânico dos solos condicionado a processos erosivos a partir da aplicação in situ do Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL);

Potencial erosivo em solo de talude de corte por meio da aplicação do Inderbitzen Modificado (erosões laminares e em entressulcos);

Uso do Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) e geoprocessamento para o cálculo de solo erodido em sulcos em Formações Barreiras.

## 1.8 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

A tese é composta de cinco capítulos e três apêndices: o primeiro apresenta a introdução desta pesquisa, na qual são identificados aspectos gerais sobre o tema, sua justificativa, bem como seus objetivos e a estrutura da mesma.

O segundo aborda o referencial teórico, contendo a revisão da literatura necessária para o desenvolvimento do trabalho, abordando os conceitos iniciais da erosão do solo e a degradação causada pelo processo, o estudo dos fatores erosivos (erosividade, erodibilidade, relevo e cobertura vegetal) e os aspectos gerais do município de Itamaracá como: localização, clima e geologia.

Os materiais e métodos aplicados na realização da pesquisa estão descritos no terceiro capítulo, que aborda os parâmetros necessários para a identificação e análise do processo erosivo da encosta, enfatizando os aspectos naturais em que se encontrava o campo experimental atrelado a investigação de laboratório.

No quarto são apresentados e discutidos os resultados geomecânicos da encosta com as caracterizações Físicas, Química e mineralógicas, compressibilidade, Sucção, comportamento mecânico em laboratório (cisalhamento direto). Já o quinto capítulo traz a análise da dispersibilidade através do Ensaio do Torrão, Ensaio do Furo de Agulha e SCS, e da erodibilidade com a caracterização mecânica in situ (DPL), e da perda do solo em estágios diferentes de erosão (inderbitzen, perda no sulco e USLE).

São relatadas no sexto capítulo, as conclusões da pesquisa, onde são feitas as considerações finais do seminário bem como as sugestões complementares. Por fim são apresentados as referências e os apêndices, que apresentam resultados de ensaios que não estão contemplados nos capítulos anteriores.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo foram abordados os principais temas relacionados aos processos erosivos: conceitos iniciais, degradação ambiental e os fatores erosivos (erodibilidade, erosividade, relevo e cobertura vegetal). São apresentados também, os aspectos gerais do município de Itamaracá, evidenciando sua localização, clima e geologia.

## 2.1 EROÇÃO DO SOLO

A erosão do solo é um dos mais importantes tipos de degradação do solo, causando preocupações ambientais em muitas partes do mundo (LUETZENBURG et al., 2020; LI et al., 2020; GHOLAMI et al., 2021). A erosão ocorre quando os agregados são fragmentados em partículas menores (desagregação), sendo transportados através do escoamento superficial até se depositar em regiões mais baixas (FRANCO, 2015). Três etapas caracterizam-se um processo como sendo erosivo: desagregação, transporte e deposição. A Figura 1 apresenta um processo de ravinamento no bairro de São Paulo em Itamaracá.

Figura 1 – Processo erosivo avançado.



Fonte: O autor (2022)

O processo erosivo é natural e tem grande importância para as modificações identificadas na crosta terrestre (SOUSA, 2019). A formação das colinas, planícies,

vales, entre outros, foram estabelecidas através de longos períodos de erosão natural, sendo esse processo considerado normal e benéfico, tendo em vista uma estabilização entre a remoção das partículas com a formação do novo solo (MEIRA, 2008). Quando tal processo ocorre sob condições naturais ou não perturbadas, um estado permanente de equilíbrio é estabelecido de modo que não se verifica maiores danos.

Entretanto, quando esta condição de equilíbrio é alterada, da origem à erosão acelerada devido a rapidez com que se processa (RUBIRA, 2016). A ação antrópica atua com desequilíbrio, destruindo o equilíbrio das condições naturais (Figura 2) e criando sérios problemas em áreas urbanas, nas atividades econômicas e ao próprio meio ambiente (RABELO, 2019). O agravamento dos problemas erosivos está diretamente relacionado ao crescimento da população urbana sem planejamento adequado, podendo ser de 10 a 40 vezes superiores quando comparada a taxa de formação do solo (BOGUNOVIC, 2020).

Figura 2 – Ação antrópica em área erodida no bairro de São Paulo, Itamaracá/PE.



Fonte: O autor (2022).

Nas áreas de clima tropical, a erosão é causada pela água das chuvas, tendo em vista os índices pluviométricos serem mais elevados em relação a outras regiões do mundo, (LACERDA, 2015). Além do mais, em muitas dessas áreas as chuvas são sazonais o que agrava ainda mais a erosão, principalmente quando as chuvas incidem diretamente sobre a superfície do terreno desprotegido da cobertura vegetal, à medida que mais terras são desmatadas (WIJAYANTI et al., 2019).

A maioria dos recursos naturais enfrenta muitos desafios e ameaças. A degradação do solo é um dos desafios do século XXI, onde 6 bilhões de hectares de área são afetadas pela erosão e contaminação do solo, salinização, compactação, impermeabilização, acidificação e desertificação (MOHAMMED et al., 2020; ZHAO et al. 2021).

Existem diversos entendimentos sobre a destruição do meio ambiente provocada pela erosão (Figura 3). Essas percepções, no entanto, dificultam a inserção de tecnologias específicas, que possam mitigar esse processo. Além disso, a falta de comprometimento dos agentes envolvidos na adoção de ações eficazes, também pode ser considerada como problema no controle da erosão.

Figura 3 – Erosão provocando redução da vegetação nativa no bairro de São Paulo em Itamaracá.



Fonte: O autor (2022)

## 2.2 FATORES EROSIVOS

Os fatores que integram o processo de erosão do solo compreendem na erosividade da chuva; erodibilidade do solo; relevo e cobertura vegetal. Esses fatores são identificados através de métodos empíricos e abordados nos processos físicos com determinações e correlações estatísticas, proporcionando uma grande quantidade de variáveis (RIBEIRO, 2016). A quantificação desses fatores disponibiliza ferramentas que identificam o processo erosivo, a fim de criar medidas de controle da erosão.

### 2.2.1 Erosividade

A erosividade pode ser entendida como sendo o potencial da chuva em promover a erosão, ou seja, é a capacidade da energia cinética contida nas gotas de chuva provocar a desagregação das partículas do solo, no momento em que as mesmas são transmitidas na superfície.

A gota de chuva age como uma pequena bomba promovendo a projeção das partículas em diversas direções (Figura 4). Vale salientar que a superfície do solo está sujeita a diferentes energias de impacto das gotas, partindo do princípio de que as mesmas possuem tamanhos e velocidades de queda diferentes, independente do tipo de precipitação (KUBOTA et al., 2019; ZAMBON et al., 2021). Esse fator é muito importante para a avaliação da erosão hídrica, principalmente na área agrícola servindo de parâmetro para manter as características do solo em períodos críticos (SERIO et al., 2019).

Figura 4 – Impacto da gota de chuva sobre a superfície.



Fonte: Adaptado de Meira (2008).

O Fator de erosividade da chuva pode auxiliar nas práticas mecânicas e vegetativas de controle da erosão hídrica, pois quando o solo está protegido pela cobertura vegetal, a água da chuva infiltra de modo gradativo no solo (SHIN et al., 2019). Entretanto, quando a mesma é retirada ou não existe, o impacto da água é mais agressivo.

A relação entre a intensidade da chuva com a perda do solo também não pode ser descartada. Comumente a intensidade é um parâmetro determinado nas estações meteorológicas, para prever a perda de solo. Para a elaboração de um índice de erosividade, o momento e a energia cinética são determinados a partir de uma correlação com a intensidade de chuva.

A energia cinética das gotas de chuva pode ser identificada, partindo do princípio de que cada classe de diâmetro de gota tem uma determinada velocidade terminal, correlacionada com a intensidade de chuva. Esta teoria promoveu o desenvolvimento de muitas relações empíricas, entre a energia cinética e a intensidade ou quantidade de chuva (TEIXEIRA, 2019).

A determinação do índice de erosividade (EI30) consiste no produto da energia cinética total pela sua intensidade em 30 minutos. A identificação da energia cinética, baseia-se em uma análise de regressão, entre os dados de distribuição de diâmetro das gotas de chuva e a velocidade terminal que cada classe de diâmetro das gotas assume no vácuo, que em última análise representa a intensidade de chuva (WATANABE et al., 2016).

### **2.2.2 Erodibilidade**

Os solos, geralmente, possuem níveis de perda de material que variam de acordo com suas características atreladas a capacidade em resistir aos efeitos erosivos (ALENCAR, 2019). A erodibilidade pode ser conceituada como sendo a suscetibilidade do solo em sofrer processos erosivos, isto é, a predisposição maior ou menor do solo de apresentar um desprendimento das partículas (COUTO et al., 2016). Ela está diretamente ligada às características do solo, como o tamanho e distribuição de suas partículas, estabilidade estrutural, textura, teor de matéria orgânica, a natureza dos minerais argílicos presentes no solo, entre outros (CARVALHO, 2016).

Assim como outras propriedades geotécnicas, a erodibilidade possui um comportamento que varia conforme o estado do material. Alguns solos podem ter sua erodibilidade alterada por processos que mudam seus parâmetros mecânicos, ou pela variação da poropressão (positiva ou negativa), substâncias trazidas pelas águas e os efeitos da desidratação.

Uma forma de investigar a erodibilidade é considerando, a influência qualitativa das principais características dos solos a ação da erosão (SOUZA, 2016), sendo as

mais importantes: granulometria, estrutura, permeabilidade, infiltrabilidade e coesão. A alta erodibilidade do solo resulta na degradação do ecossistema além da possibilidade de processos de desertificação (YU et al., 2019).

A erodibilidade em formações edáficas (condições limites do solo) está associada a características de textura, estrutura, densidade aparente e quantidade de matéria orgânica e mineral (SILVA, 2016). Vale reforçar que a textura é o percentual dos diferentes componentes minerais do solo: areia, silte e argila, e a estrutura do solo está baseada na disposição geométrica das partículas.

A estrutura pode ser modificada através de condições climáticas, formas de cultivos, ou agentes externos que possam influenciar na estabilidade da estrutura do solo. O impacto das gotas de chuva, por exemplo, promove a ruptura dos agregados que se encontram pouco estáveis. Já as partículas finas soltas que ocupam os espaços vazios do solo, podem formar uma crosta superficial que impossibilita a circulação da água (PASQUATO, 2016).

Para a compreensão dos processos erosivos deve ser levada em consideração também a densidade dos solos, tendo em vista a necessidade de conhecer o grau de compactação do solo. À medida que a densidade aparente aumenta, o grau de compactação varia e a porosidade diminui reduzindo a infiltração de água no solo (ALMEIDA et al, 2016).

### **2.2.3 Relevo**

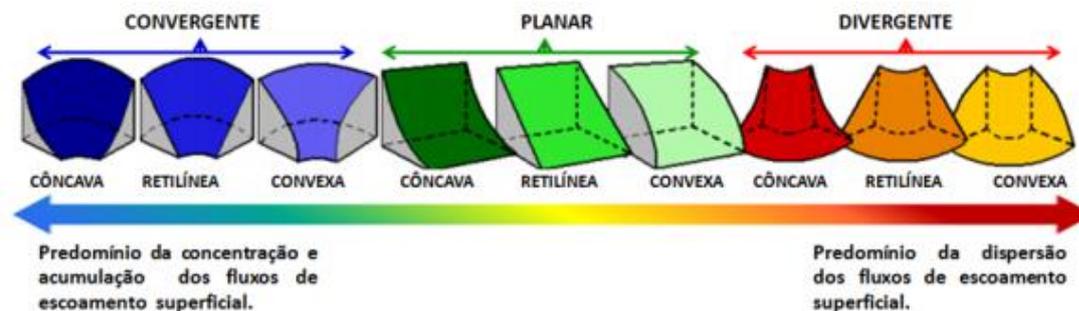
Em relação à geomorfologia do solo o fator que mais influencia na erosão é o relevo. O aumento da declividade, além do comprimento da rampa, indica a velocidade do processo erosivo. Relevos mais acentuados, como morros, possuem uma maior velocidade na erosão (FERNÁNDEZ-RAGA et al., 2021). Já em regiões com a declividade mais suave apresentam menor escoamento da água, diminuindo o potencial erosivo (SETYAWAN et al., 2019).

Com a declividade do terreno é possível identificar a gênese e evolução do processo erosivo. No entanto, na evolução do processo erosivo, a inclinação não deve ser levada em conta separadamente, e sim em conjunto com as características da superfície do solo que igualmente afetam sua remoção (HAN et al., 2019).

A forma da área, além das inclinações, tem um efeito nas taxas de infiltração, escoamento e conseqüentemente no processo erosivo. Existem encostas com formas côncavas, convexas, retilíneas e mistas. As de forma côncava retêm os materiais transportados para a sua parte inferior, diminuindo sua inclinação e promovendo erosões lineares, que desaparecem com o acúmulo de sedimentos ricos em umidade (MEDEIROS et al, 2016).

Nas encostas convexas acontece um aumento progressivo na inclinação, podendo provocar algum tipo de erosão hídrica com a formação de sulcos, ravinas e/ou voçorocas. No caso das formas retilíneas o transporte de sedimentos pela encosta acontece de maneira uniforme, com a possibilidade de formar sulcos de erosão (Figura 5). As encostas que apresentam formas mistas (convexo na parte superior e côncavo na parte inferior) desenvolvem processos erosivos na parte central e sedimentação na parte inferior (SABZEVARI, 2019).

Figura 5 – Esquema do relevo nas encostas.



Fonte: Silva Neto (2013).

Nos últimos anos, a análise da microtopografia tem ganhado uma relevância significativa, tendo em vista que permite inferir áreas que estão sofrendo com processos erosivos (RANGEL e GUERRA, 2018). A importância de quantificar a forma do terreno é fundamental para entender os mecanismos e a evolução dos processos erosivos (JIANG et al., 2020)

#### 2.2.4 Cobertura vegetal

A remoção da cobertura vegetal do solo não apenas pode resultar o surgimento de erosões, como também grandes movimentos de terras. Isso acontece, devido a

influência da vegetação nas taxas de escoamento superficial bem como na erosão. A cobertura vegetal possui maior influência sobre o processo erosivo, do que qualquer outro fator físico considerado individualmente (NIU et al, 2016).

Atualmente pesquisas tem se concentrado no impacto da vegetação na erosão do solo. Os estudos se intensificam principalmente através do controle que a biomassa vegetal ou cobertura vegetal exerce sobre a entrega de sedimentos e descarga de escoamento, (CERDÀ et al., 2021).

A cobertura vegetal tanto pode ser natural, quanto artificial ou de cultura como as plantações (ANESEYEE, et al., 2020). Saliendo que a vegetação natural pode ser considerada como primitiva (virgem), quando não há nenhuma intervenção humana, ou secundária, quando alterada de alguma maneira pelo homem. Em todas as situações, o solo apresenta uma maior ou menor proteção contra as intempéries.

Coberturas vegetais leves influenciam significativamente a erosão do solo, mesmo em períodos de intensidade baixa de chuva. Enquanto proteções vegetais mais densas diminuem o potencial erosivo do solo, mesmo em períodos com alta frequência de precipitação (ZHANG et al., 2019; WU et al., 2020; CHEN et al., 2021).

### 2.3 TIPOS DE EROSÃO

Em ambientes sujeitos a ação antrópica, a tendência de feições erosivas do tipo linear é maior ainda, podendo ser classificados como sulcos, ravinas e voçorocas. A água do escoamento superficial resulta em cortes em forma de sulcos, que ao se aprofundar evoluem para ravinas e posteriormente para voçorocas (RUBIRA, 2016).

Os sulcos são pequenas incisões em forma de filetes muito rasos que tem até 60 cm de profundidade (FRANCO, 2015). Eles podem passar despercebidos até que comecem a interferir no trabalho de preparo do solo e diminuir sua produtividade. Podem ser eliminados por operações normais de preparo de solo e se desenvolvem em áreas nas quais a erosão laminar é mais intensa. A erosão de sulco é um fenômeno de pequena escala, mas de ocorrência universal (OU et al., 2021).

A formação dos sulcos ocorre extensivamente em áreas afetadas pelo homem (ação antrópica) e terrenos em declive. O sulco é responsável pela perda do solo entre 50% e 70% do total erodido naquela região. Devido às pequenas dimensões, os solos transportados nos sulcos são de granulometria fina além de nutrientes, esgotando a fertilidade do local (GUO et al., 2019; AKSOV et al., 2020; OU et al., 2021).

As ravinas são sulcos mais profundos (a partir de 60 cm), ocorrendo quando a água do escoamento superficial escava o solo, atingindo seus horizontes inferiores. Geralmente tem um formato em “V” e possui formas retilíneas, alongadas e estreitas. São raras as ramificações e não chega a atingir o lençol freático (FRANCO, 2015).

A erosão tipo voçoroca é a mais grave, haja vista que envolvem os fluxos superficiais e subsuperficiais da água infiltrada no solo. A diferença entre as ravinas e as voçorocas está na presença, no caso das voçorocas, do nível freático aflorando no fundo do canal, o que condiciona uma evolução da erosão (lateral e longitudinal).

## 2.4 SUSCETIBILIDADE À EROSÃO

A erosão dos solos é um processo geomorfológico que vem acarretando a degradação ambiental em vários países do mundo. Ela consiste em processos dinâmicos complexos, que dependem de muitos fatores de influência, como tipo de solo e suas características intrínsecas (textura, mineralogia, cimentação, estrutura, relação silte/argila), comprimento da encosta, características de chuva, fatores hidráulicos, cobertura do solo, uso da terra, atividades humanas, entre outros (MEYER, 1980; MEYER & HARMON, 1989; KINNELL, 2005 ; SHI et al., 2012 ; SHI et al., 2019 ; ZHUANG et al., 2015 ; TEIXEIRA GUERRA et al., 2017; LI et al., 2019; ZHANG et al., 2021; SANTOS & GUERRA, 2021).

Existem várias análises que contribuem para a verificação de processos erosivos nos solos. A relação silte/argila, a exemplo, pode ser um indicador do grau de intemperismo do solo, tendo em vista que solos mais jovens apresentam elevada proporção de silte associados a dispersão natural, selamento superficial ou suscetibilidade à erosão (PORTELA et al., 2014). A relação também pode ser utilizada para avaliar o estágio de intemperismo dos solos, onde valores inferiores a 0,7 para solos de textura média ou inferior a 0,6 nos solos de textura argilosa, indicam alto grau de intemperismo (MARCATTO, 2017).

A mineralogia do solo tem efeitos importantes na dispersão da argila e também influencia na estabilidade de agregados, escoamento superficial e na perda de solo. A caulinita não apresenta grau elevado de propriedades coloidais e, portanto, são menores as características de plasticidade, coesão, dilatação e contração, sendo

menos resistente à erosão que os minerais argílicos do tipo 2:1 (esmectita e illita) (ALIASGHAR et al., 2014).

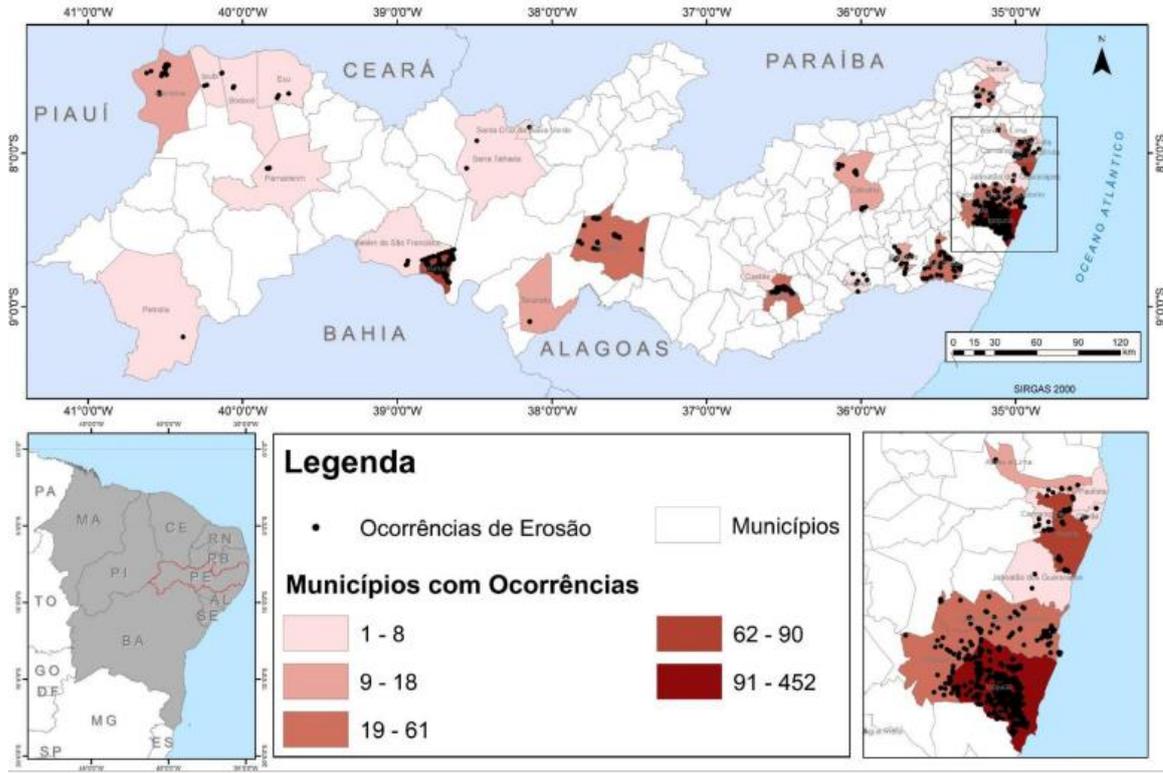
Solos com suscetibilidade alta à erosão correspondem aos que apresentam texturas médias (franco-arenosa, franca, franco-limosa e limosa), isto é, com teores elevados de limo e de areia fina a muito fina e com teores baixos de argila (< 25%). Os solos com suscetibilidade média à erosão correspondem aos solos com texturas franco-argilo-arenosa, franco-argilosa e franco-argilo-limosa. Por outro lado, os solos com suscetibilidade baixa à erosão compreendem os solos que apresentam texturas finas, como sejam a argilo-arenosa, argilosa e argilo-limosa (MARTINS, 2017).

## 2.5 ESTUDOS SOBRE PROCESSOS EROSIVOS NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE (RMR)

A Região Metropolitana do Recife (RMR) há muitos anos convive com processos erosivos, gerando impactos ambientais significativos. Este processo ocorre através de uma acelerada expansão urbana em terrenos de sedimentação Cenozóicos, mais suscetíveis a processos morfodinâmicos, como erosões e escorregamentos (XAVIER, 2020).

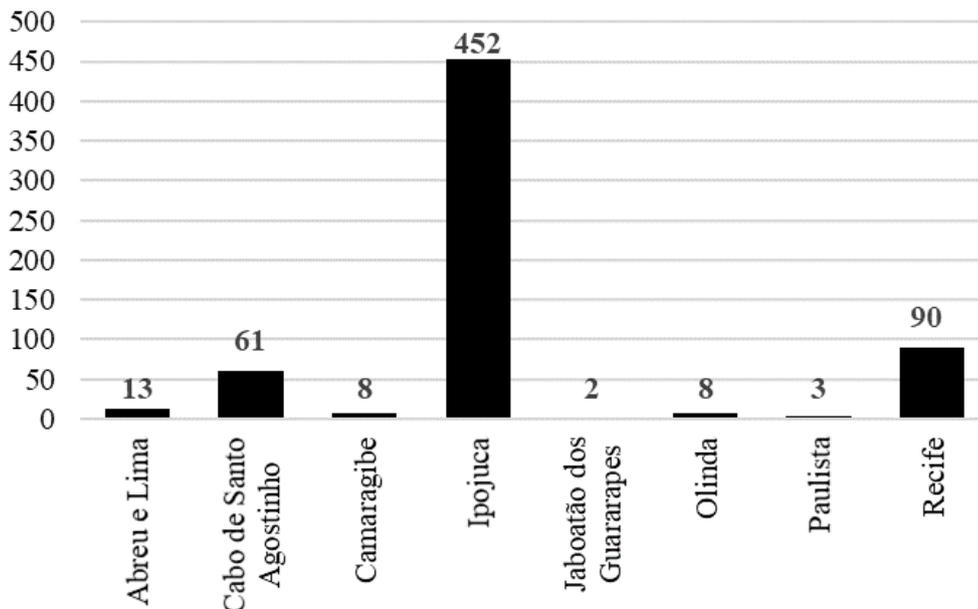
Os processos erosivos ocorrem principalmente em praias e morros, afetando construções e espaços utilizados pelas comunidades que residem, ou utilizam dessas áreas (VILLA VERDE, 2019). Nos morros a ocupação ocorre, predominantemente, por uma população de baixa renda, devido à apropriação do mercado imobiliário das áreas mais favoráveis à construções de moradias. As Figuras 6 e 7 apresentam os dados de ocorrência de erosões catalogadas na RMR. A Tabela 1 apresenta as principais características dos processos de erosão nos estudos desenvolvidos na RMR.

Figura 6 – Mapa de ocorrências de erosões catalogadas na RMR.



Fonte: Xavier (2020).

Figura 7 – Ocorrência de erosões catalogadas da RMR.



Fonte: Xavier (2020).

Tabela 1 – Processos erosivos em cidades da RMR.

<b>Município</b>	<b>Principais Características</b>	<b>Autor(es)</b>
Ipojuca	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ravinamentos, voçorocas e deslizamentos;</li> <li>- Ação antrópica com papel decisivo na erosão;</li> <li>- Regiões turísticas (Porto de Galinhas) com alta suscetibilidade;</li> <li>- Formação Cabo e Algoduais.</li> </ul>	Henrique (2014); Torres et al. (2015); Almeida (2016).
Cabo de Santo Agostinho	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erosões em áreas de preservação ambiental;</li> <li>- Ausência de cobertura vegetal em partes da região;</li> <li>- Formação barreiras e solos residuais.</li> </ul>	Lafayette (2006); Silva et al. (2013); Guedes et al. (2016).
Moreno	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior evidência de erosão laminar com alguns sulcos;</li> <li>- Deslizamentos em taludes de corte;</li> </ul>	Freitas (2016)
Jaboatão dos Guararapes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Índícios de processos erosivos;</li> <li>- Crescimento desordenado de bairros;</li> <li>- Ocorrência de deslizamentos.</li> </ul>	Ramos (2019)
Recife	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processos erosivos em áreas de ocupação urbana desordenada;</li> <li>- Argilas expandidas (calcíticas e dolomíticas);</li> <li>- Formação gramane, Beberibe e barreiras.</li> </ul>	Lima (2002); Meira (2008); Villa Verde (2019).
Camaragibe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Padrão de erosão mais brusca;</li> <li>- Rápida remoção de sedimentos da encosta;</li> <li>- Construções de moradias em áreas de risco;</li> <li>- Assoreamento de linhas de drenagem;</li> <li>- Formação barreiras.</li> </ul>	Bandeira (2003); Bandeira et al. (2006); Silva (2007); Silva (2010); Magalhães (2013); Souza (2014).
Abreu e Lima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processos erosivos lineares em grande intensidade;</li> <li>- Exploração irregular da areia;</li> <li>- Retirada da cobertura vegetal;</li> </ul>	Silva (2016)

Fonte: O autor (2022).

### 2.5.1 Ipojuca

O município de Ipojuca vem apresentando ao longo do tempo, vários processos erosivos, os tipos de ravinamentos e voçorocamento, além de deslizamentos. Dos municípios atingidos pelos processos erosivos, Ipojuca se destaca apresentando 452 ocorrências de erosões catalogadas. O município se localiza-se em um contexto de

relevo formado por colinas convexas típicas do Piemonte da Borborema, tendo sua cobertura vegetal natural substituída pelo cultivo da cana-de-açúcar, que favorecem o aparecimento de ocorrências (Figura 8) (XAVIER, 2020).

Figura 8 – Cicatriz de ravinamento provocada por escoamento hídrico.



Fonte: Torres et al. (2015).

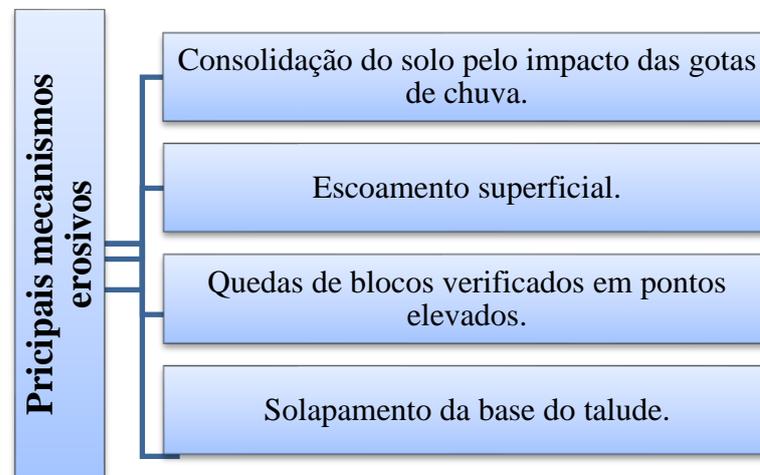
A maior concentração de áreas críticas, ou seja, com alta suscetibilidade a erosões, estão localizadas ao sul, próximo da praia de Porto de Galinhas, e ao norte, nas proximidades do Complexo Portuário e Industrial de Suape. Os processos erosivos também são influenciados pelo fator geológico, pois estas áreas estão localizadas nas Formações Cabo (conglomerados de seixos e blocos do embasamento) e Algoduais (conglomerados de seixos vulcânicos), o que sugere maior atenção e estudos geotécnicos (TORRES, 2015).

Outros estudos também foram desenvolvidos no município. No bairro de Rurópolis a geomorfologia tem papel decisivo no grau de suscetibilidade de erosões. Vale ressaltar que a altura da encosta e as suas declividades também foram relatadas (HENRIQUE, 2014; ALMEIDA, 2016). A região do estudo, em sua grande maioria, apresentou condições de risco de alta a muito alta. Por isso houve a necessidade de se analisar as condições de estabilidade do talude.

### **2.5.2 Cabo de Santo Agostinho**

Os estudos para analisar os processos erosivos no município do Cabo de Santo Agostinho se concentraram em uma área de preservação ambiental pertencente ao Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti (PMAHC). Foram constatados importantes processos erosivos, envolvendo perfis de solos da Formação Barreiras e solos residuais de granito. A Figura 9 apresenta os principais mecanismos erosivos encontrados na região (LAFAYETTE, 2006).

Figura 9 – Principais mecanismos erosivos.



Fonte: O autor (2020) adaptado de Lafayette (2006).

A ausência de cobertura vegetal possui um papel fundamental para a evolução dos processos erosivos nas encostas. As queimadas que ocorriam na vegetação arbustiva local deixavam as áreas de solo mais expostas a erosão (SILVA et al., 2013). No entanto, a partir da implantação do Parque e das propostas de trilhas para um uso racional do geoturismo no Granito do Cabo e circunvizinhanças, as áreas degradadas diminuíram e houve uma retomada da vegetação nas áreas erodidas, diminuindo os processos erosivos. As erosões também foram identificadas na estrada de acesso ao parque, observação levantada por Guedes (2019), quando afirma que as superfícies de rolamento das estradas de terra apresentavam erosões com atuação intensa na área (Figura 10).

Figura 10 – Erosões em estradas no Cabo de Santo Agostinho



Fonte: Guedes (2019).

Atualmente alguns estudos descrevem que trechos de estradas pavimentadas aumentam a área impermeável em uma região e, portanto, alteram as condições hidrológicas das mesmas às chuvas. Durante a precipitação, a superfície da estrada rapidamente gera escoamento, aumentando os processos erosivos em torno da via (YU et al., 2021).

### **2.5.3 Moreno**

O município de Moreno é constituído geomorfologicamente por colinas íngremes e planícies de inundação, contribuindo para a ocorrência e predisposição de processos relacionados a erosões, quedas de blocos e inundações. Os processos erosivos identificados no município se resumiram a erosão laminar, com maior frequência e alguns sulcos (Figura 11). Os deslizamentos observados foram pontuais, normalmente em taludes de cortes que deslizavam atrás de moradias, não registrando no município evento de grande proporção (FREITAS, 2016).

Figura 11 – Evidência de sulcos em áreas do município de Moreno



Fonte: Freitas (2016)

As classes pedológicas identificadas no município indicaram solos do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo e Argissolo amarelo, ambos com alta suscetibilidade aos processos erosivos em função, principalmente, de uma de suas características morfológicas que é a mudança textural abrupta. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, a descontinuidade textural abrupta faz com que em um evento de precipitação a água percole rapidamente do horizonte superficial para o horizonte subsuperficial, onde devido ao incremento de argila, cria uma barreira dificultando a percolação da água, favorecendo um escoamento lateral e erodindo o horizonte superficial.

#### **2.5.4 Jaboatão dos Guararapes**

O município tem grande déficit de investimento em áreas de risco, os registros mostram um número crescente de pontos de risco na cidade, que desencadeiam o aumento de ocorrências de movimento de massa, desabamentos, erosões severas e inundações. As condições ambientais do território favorecem os processos erosivos nos solos areno-argilosos da formação barreiras e do solo residual, os problemas são quase sempre induzidos pelos cortes executados para a extração da areia e ocupações desordenadas (SANTANA, 2021).

Na implantação do conjunto habitacional no bairro do Curado, o crescimento de forma desordenada sem nenhum planejamento, principalmente com as ocupações

das encostas (Figura 12), desencadeou um aumento na ocorrência de deslizamentos além dos indícios de processos erosivos na região (RAMOS, 2019).

Figura 12 – Processos erosivos em Jaboatão dos Guararapes.



Fonte: Ramos (2019)

### 2.5.5 Recife

A Formação Barreiras é uma das unidades geológicas mais importantes encontradas nos morros do Recife (LIMA, 2002). Esse tipo de formação se constitui através de sedimentos com granulometria variada, além de horizontes de seixos sub-horizontais. O solo de Recife é essencialmente areno-argiloso, composto de caulinitas e illitas provenientes do embasamento cristalino, e as rochas vulcânicas básicas, têm como alteração, os filossilicatos de ferro e magnésio, dos grupos das esmectitas e cloritas, e com isso, argilas expansivas (VILLA VERDE, 2019).

A formação desses argilominerais nos solos tem um papel importante nas ocorrências de deslizamentos. Além disso, a instabilidade das encostas devido ao relevo maduro e a falta da cobertura vegetal também contribuem para os processos erosivos.

A erosão urbana, ocasionada pela ação antrópica sobre os tabuleiros dissecados morfologicamente instáveis (Figura 13) e nos morros com encostas de declividade elevada, induz diferentes processos de desestabilização, com erosão pronunciada nas camadas mais arenosas, e com deslizamentos naquelas mais argilosas (MEIRA, 2008).

Figura 13 – Erosão em área desmatada para loteamento.



Fonte: Meira (2008)

Os processos erosivos podem ser identificados em toda a capital pernambucana, no Alto do Marreco as encostas estão tendo processos erosivos ocasionados, dentre outros, pela verticalização das casas próximas da encosta. Nas margens da BR 101 Norte, sentido Recife – Paulista, é possível ver ravinas, que se não forem estabilizadas, poderão desenvolver voçorocas, e com isso, prejudicar a recarga do lençol freático por contaminação de poluentes e também danificar as vias rodoviárias. Próximo ao Terminal Integrado de Passageiros da Macaxeira, existem processos de ravinamentos, indicando a instabilidade evidenciada pode trazer risco ao tráfego existente na localidade (VILLA VERDE, 2019).

No Bairro de Lagoa Encantada, além da ocupação irregular, a população residente nos morros não contribui para o controle dos processos erosivos. São lançamentos de lixo do topo das encostas, que chegam nas bases e atingem casas e canos de águas clandestinos, causando vazamentos que contribuem para o aumento das erosões e conseqüentemente deslizamentos.

Outro aspecto importante refere-se a regiões localizadas entre fronteiras municipais. As encostas que ficam no limite entre os municípios de Recife e Camaragibe, possuem impasse na mitigação do risco. No topo está o município de Recife, na base está o município de Camaragibe A encosta é um divisor de águas, e isso contribui para os processos erosivos, além disso, está praticamente verticalizada e apresentando movimento de rastejo percebido pelo recalque da rodagem.

### 2.5.6 Camaragibe

Ocupações desordenadas no Município de Camaragibe foram classificadas como possuindo um grau de risco alto de erosões e escorregamento em algumas de suas encostas. No Vale das Pedreiras foi observado invasões no topo da encosta, o que pode indicar que critérios técnicos necessários para construção de moradias com este condicionamento do solo não foram adotados (BANDEIRA, 2003; SILVA, 2007; SILVA, 2010; SOUZA, 2014).

A ocupação dos morros de Camaragibe pode também alterar o processo de interceptação da chuva pelas copas vegetais, a correção mecânica do solo pelos sistemas radiculares da vegetação e plena promoção da infiltração da água, favorecendo o escoamento superficial, que resulta na intensificação dos processos erosivos. Esses processos alteram a paisagem de forma generalizada, se propagando até em regiões mais afastadas do local que onde as erosões iniciaram (ALMEIDA, ROCHA e SILVA, 2018).

Os morros constituídos pela formação barreiras, apresentam um padrão erosivo mais brusco. Nesta região a rápida remoção de sedimentos /solos nas encostas, seja para a exploração de material, seja para a construção de casas, expõe à erosão dos solos, antes preservados da ação intempérica. A Figura 14 mostra um caso de erosão que promoveu o assoreamento na linha de drenagem, na localidade do córrego do desastre (BANDEIRA et al., 2006).

Figura 14 – Processo erosivo causando assoreamento.



Fonte: Bandeira et al. (2006)

Nesta situação, o processo erosivo é desencadeado pelos sedimentos fluviais arenosos e inconsolidados que ficam expostos em taludes subverticais, extremamente instáveis para materiais arenosos sendo rapidamente removidos pelas chuvas mais intensas. Esse processo erosivo rápido, por sua vez, impede que o material venha a desenvolver um latossolo, que seria o seu elemento de estabilização. Nesse caso, sem o componente argiloso não se desenvolve e conseqüentemente não se manifestam os fenômenos de deslizamentos, apenas os de erosão. (MAGALHÃES, 2013).

### 2.5.7 Abreu e Lima

A presença de processos erosivos dentro no município de Abreu e Lima é expressiva, ocorrendo em muitos pontos e em grande intensidade. A ocupação de áreas de morro atrelada a retirada de cobertura vegetal potencializa a erosão do local (SILVA, 2016).

Outro aspecto é a exploração irregular de areia do leito do Córrego da Areia e das encostas, como fonte de renda para os moradores locais que revendem o material para os comerciantes de armazéns de construção das proximidades. O solo transportado pelo processo erosivo proporcionou o assoreamento do Córrego da Areia, provocando inclusive a mudança do seu curso natural.

A inexistência de elementos de drenagem e esgotamento sanitário na encosta indica um local propício à ocorrência de erosão linear. A Figura 15 apresenta a condição encontrada em campo alguns metros a jusante do escoamento.

Figura 15 – Formação de ravina oriunda do lançamento de águas servidas.



Fonte: Silva (2016).

## 2.6 EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO (USLE)

Investigar a erosão do solo em escala regional é um desafio devido às dificuldades em equilibrar a precisão com o custo, especialmente em áreas onde o terreno e o uso do solo são complexos (DUAN et al., 2020). Várias equações foram desenvolvidas, a fim de quantificar os processos erosivos, dentre os principais, a equação universal de perda de solo (USLE), (Equação 1), que foi desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965) e posteriormente revisada para RUSLE por Renard et al. (1997), que é um modelo empírico comumente usado para estimar a erosão do solo em áreas onde há falta de dados medidos.

$$A = R.K.LS.C.P \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: A = Perda média anual do solo por unidade de área e de tempo, em t ha-1 ano-1; R = Fator de erosividade da precipitação, em MJ mm ha-1 h-1 ano-1; K = Fator de erodibilidade do solo, em t. h MJ-1 mm-1; LS = Fator topográfico, considerando o comprimento e o declive da encosta; C = Fator de uso e manejo do solo; P = Fator de prática de conservação do solo.

Usando uma combinação de sensoriamento remoto, modelagem de sistemas de informação Geográfica (GIS) e o RUSLE, foi realizada uma estimativa de perda de solo para o continente europeu com uma resolução de 100 m. Na África, um estudo

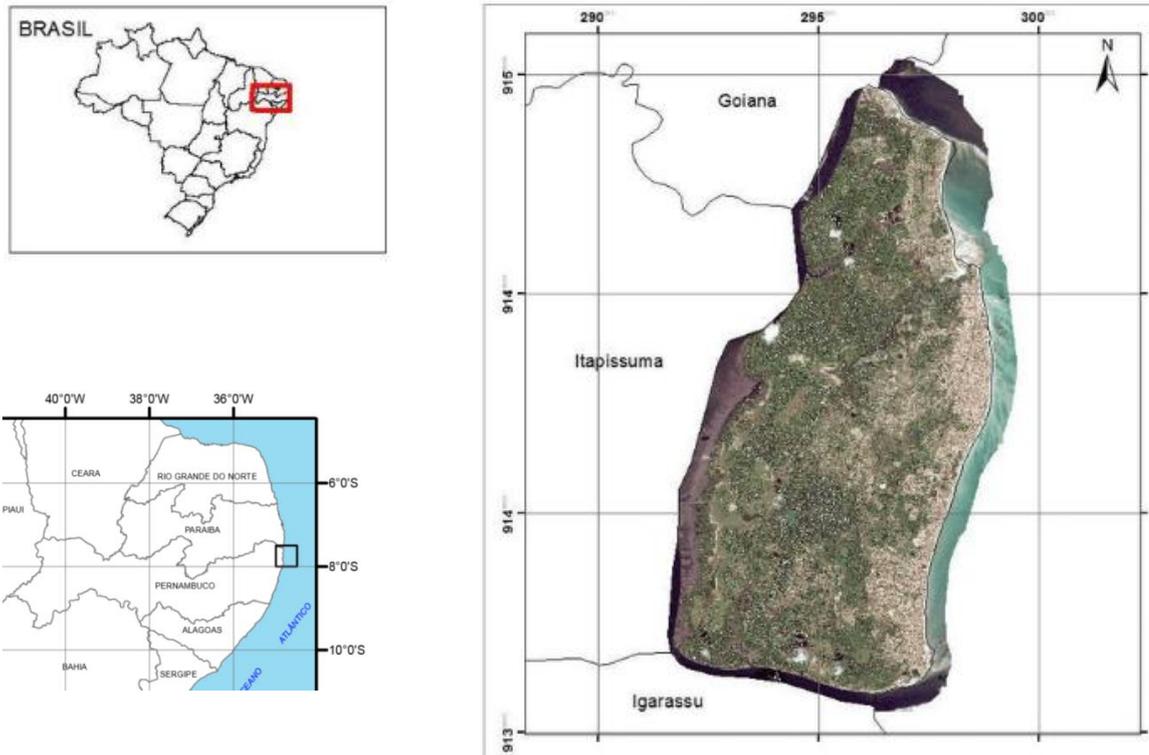
recente analisou a perda de solo e a exportação de sedimentos da bacia hidrográfica de Winike, na Etiópia, concluindo que as mudanças no uso da terra afetam muito a quantidade de perda de solo em áreas cultivadas (TESSEMA et al., 2020; MARQUES et al., 2021).

No Brasil, a USLE auxiliou na identificação das perdas de solo em muitas regiões, como na bacia Pirirm no Amapá (HYSLOP et al., 2019), na bacia de São Marcos em Brasília (SEGEDI, 2019), no Parque dos Veadeiros (SILVA et al., 2020), e em Pernambuco, na análise da erosão hídrica em Serra Talhada (JARDIM et al., 2017).

## 2.7 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ITAMARACÁ

O município de Ilha de Itamaracá está situado na mesorregião Metropolitana e na Microrregião Itamaracá do Estado de Pernambuco, restringindo-se a norte com Goiana, a sul com Igarassu, a leste com Oceano Atlântico, e a oeste com Itapissuma (QUEIROZ, 2017). A Ilha está localizada no litoral norte de Pernambuco, a 55 km do Recife, capital do estado, entre as latitudes  $7^{\circ} 35' S$  e  $7^{\circ} 55' S$  e longitudes  $34^{\circ} 48' W$ ,  $34^{\circ} 52' W$  cujo acesso é feito pela BR-101; PE-035 (Figura 16). O município foi instituído em 31/12/1958, pela Lei Estadual n. 3.338.

Figura 16 – Mapa de localização da Ilha de Itamaracá.

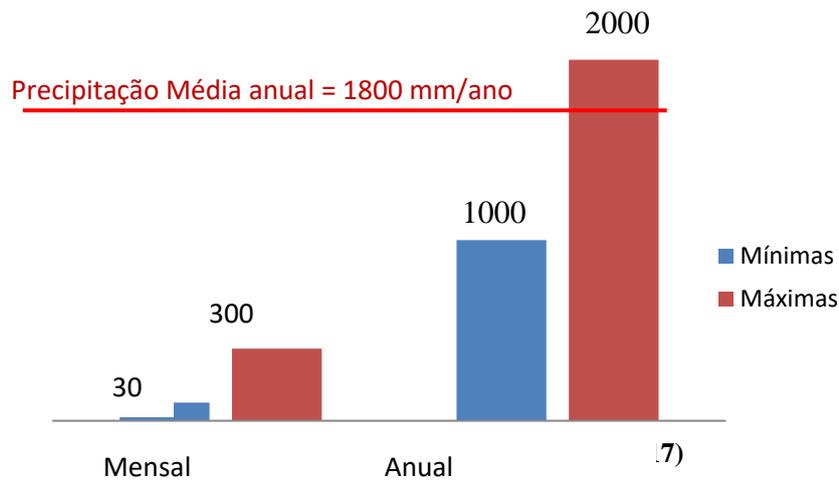


Fonte: Adaptado de Queiroz (2017).

### 2.7.1 Clima

O clima da ilha é o mesmo encontrado ao longo do litoral, influenciados constantemente pelo fluxo do ar “caallariano” (LIRA, 2010). As precipitações dominantes acontecem no inverno, principalmente, pelas emissões da Frente Polar Ártica-FPA, enquanto os suprimentos do outono derivam das oscilações da Convergência Intertropical - CIT. A estação seca acontece entre os meses de setembro a fevereiro, e a estação chuvosa no período de março a agosto. A taxa de evaporação está abaixo da precipitação, resultando um balanço anual positivo e contribuindo para uma intensa decomposição das rochas, gerando solos agricultáveis. A Figura 17 apresenta os índices pluviométricos de Itamaracá.

Figura 17 – Índices pluviométricos de Itamaracá



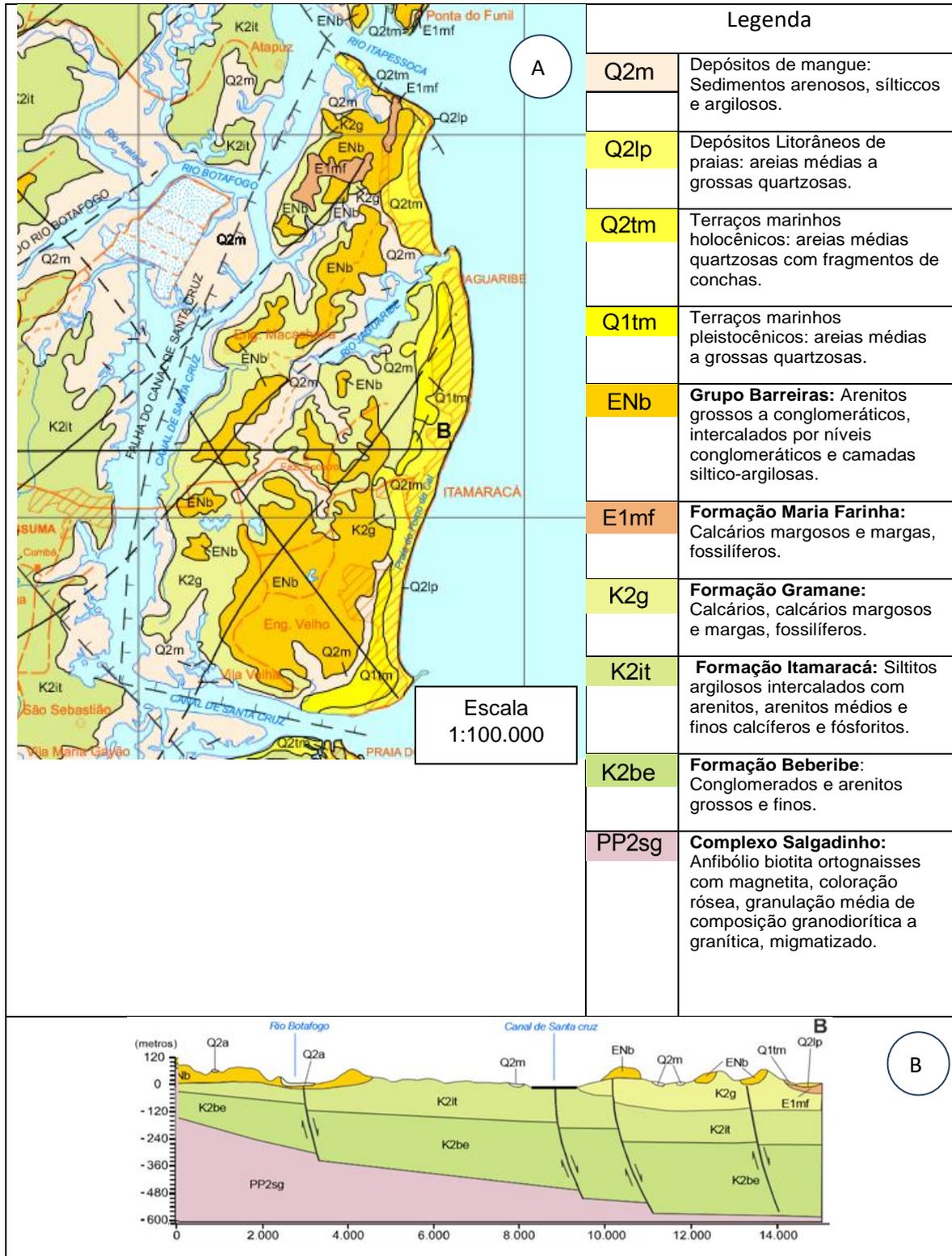
Fonte: Adaptado de APAC (2021).

A posição geográfica da Ilha de Itamaracá garante um clima tropical típico, com temperaturas altas e umidade constante (QUEIROZ, 2017). Conforme a classificação de Köppen, o clima na ilha é do tipo As` e Am's: A temperatura média é de 27o C e a amplitude térmica em torno dos 5o C, 'sendo atenuada nos meses mais quentes, setembro – novembro, pelos alísios de Sudeste, estação seca no verão e chuvas frequentes no outono e no de inverno (VALENÇA, 2017).

### 2.7.2 Geologia

Geologicamente a Ilha de Itamaracá está inserida na Província Borborema, formado pelos litotipos do Complexo Salgadinho, Formação Beberibe, Formação Itamaracá, Formação Gramane, Formação Maria Farinha, do Grupo Barreiras e dos Depósitos Flúvio- marinhos. A Figura 18 apresenta o detalhamento geológico do município.

Figura 18 – Detalhamento geológico da Ilha de Itamaracá; A) Carta geológica, B) Planta de corte.



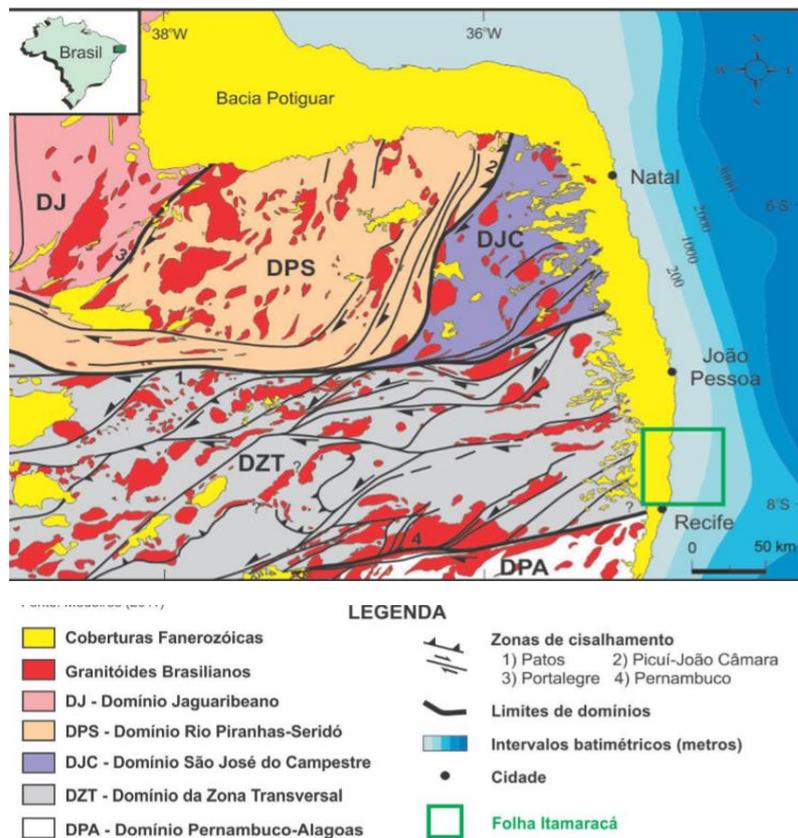
Fonte: Valença (2017).

O litoral de Pernambuco tem uma dimensão de 187 km, com uma linha de praia mais ou menos contínua e separada em duas bacias pelo Lineamento Pernambuco

(que é uma falha transcorrente), sendo distinguida por critérios geofísicos e geotectônicos: a Bacia Paraíba (norte) tem a maioria da superfície de tabuleiros e planície costeira; a Bacia Pernambuco (sul) ocorre um predomínio colinoso em substituição a superfície de tabuleiros.

A Bacia Pernambuco é de idade Aptiana (período Cretáceo inferior), teve seu desenvolvimento na evolução da Margem Continental Brasileira com a abertura do Oceano Atlântico enquanto a Bacia Paraíba de idade Campaniana (período Cretáceo Superior) se desenvolveu sob condições de baixo tectonismo (Figura 19) e teve sua formação retardada devido à resistência encontrada na zona de cisalhamento, quando da geração das bacias sedimentares marginais (LIRA, 2010).

Figura 19 – Encarte Tectônico.



Fonte: Valença (2017).

Recobrimo indistintamente rochas pré-cambrianas e sedimentares formadoras das bacias cretáceas, encontram-se os sedimentos terciários das Formações Maria Farinha e Barreiras, bem como os sedimentos quaternários que formam a Planície Costeira Pernambucana. Neste grupo estão presentes os Terraços Marinheiros

Pleistocênicos e Holocênicos, os depósitos flúvio-lagunares e os depósitos de mangue. A Figura 20 mostra a coluna estratigráfica da Bacia Pernambuco-Paraíba.

Figura 20 – Coluna estratigráfica da Bacia Pernambuco-Paraíba.

IDADES		LITOESTRATIGRAFIA DA BACIA SEDIMENTAR PERNAMBUCO-PARAÍBA
QUATERNÁRIO		COBERTURAS SUPERFICIAIS
TERCIÁRIO		FORMAÇÃO BARREIRAS
	PLIOCENO	
	MIOCENO	
	OLIGOCENO	
	EOCENO	
	PALEOCENO	FORMAÇÃO MARIA FARINHA
CRETÁCEO		FORMAÇÃO GRAMAME
	MAASTRICHTIANO	
	CAMPANIANO	FORMAÇÃO BEBERIBÉ
	SANTONIANO	
	CONIACIANO	
	TURONIANO	
	CENOMANIANO	
	ALBIANO	
	APTIANO (ALAGOAS)	
PRÉ-CAMBRIANO		EMBASAMENTO

Fonte: Lira (2010).

### 2.7.3 Embasamento Cristalino

O embasamento cristalino é constituído por dois tipos litológicos distintos: rochas graníticas e rochas metassedimentares (LIRA, 2010). Essas rochas são constituídas, principalmente, por granitos, migmatitos, gnaisses e xistos. As rochas do embasamento cristalino armazenam água nas fraturas em volume reduzido e, em geral, de má qualidade química. Estão sempre cobertas por um manto de alteração areno-argiloso, com três a quatro metros de espessura em média, mas que pode atingir mais de 10 metros.

### 2.7.4 Formação Beberibe

No município de Itapissuma, na subida para Chã do Chadrão, a ocorrência da Formação Beberibe foi observada em uma retirada de areia para a construção civil, que formavam duas jazidas de areia. Na primeira, localizada no topo, o arenito é friável e de cor branca. Na segunda, exposta na parte mais basal, observa-se um arenito conglomerático com níveis de laterização, formando uma camada com diagênese média e forte (VALENÇA, 2017).

### **2.7.5 Formação Gramame**

A formação Gramame possui um pacote sedimentar que pode atingir 55m, apresentando dois terços de calcários argilosos acinzentados da fácies marinha plena, incluindo argila em finas camadas, em geral bioturbadas, intercalados com margas e argilas mais puras. Uma seqüência dolomítica aparece na base que microscopicamente apresenta-se como foraminíferos-biomicríticos argilosos (SILVA, 2004).

A abundância da fauna caracteriza-se pela presença de gastrópodes, cefalópodes, crustáceos, equinodermas, dentes e escamas de peixes, típicos de ambiente marinho relativamente calmo, de águas quentes e pouco profundas. A presença dessa formação na Ilha de Itamaracá por toda ala oeste e, circundando os morros da Formação Barreiras.

Aproximadamente a 300 metros da estrada principal e se dirigindo pela via que leva até Vila Velha, pode-se observar um afloramento bastante intemperizado com composição mal preservada, com granulometria fina a média, na porção mais superior do pacote sedimentar, intercalado com níveis de marga. A transição entre Cretáceo-Terciário é observada em dois afloramentos: O primeiro na praia de Jaguaribe. O segundo, observado na pedreira do cimento Poty, com seqüência carbonática da Formação Gramame na base, e da Formação Marina Farinha, no topo. Em geral, trata-se de uma alternância de margas calcárias e calcários margosos de cor cinza a esverdeada com grau variável de bioturbações.

### **2.7.6 Formação Maria Farinha**

Essa formação encontra-se no Período Terciário e, seu conteúdo fossilífero é típico da Paleoceno em quase todos seus leitos sedimentares. A seqüência litológica indica um ambiente marinho regressivo. Dados sísmicos indicam que essa formação ocorre também na plataforma continental.

Em Itamaracá, ocorrem dois afloramentos importantes: no Pontal de Jaguaribe e na praia do Fortim. No Pontal de Jaguaribe corresponde a um calcário maciço sem macrofósseis, com textura sacaroidal e pontos de minerais metálicos (LIRA, 2010). Na praia do Fortim apresenta-se como um calcário cinza, formando um morro de 200 metros de extensão, alongado aproximadamente na direção N-S, com duas direções de fraturas: 20° Az e 55° Az.

### **2.7.7 Formação Barreiras**

A Formação Barreiras é constituída por arenitos quartzosos subarcoseanos e sedimentos argilosos, pouco consolidados, de coloração variegada, com níveis laterizados e caulínicos, apresentando três fácies distintas: Fácies de leques aluviais, observadas desde o norte de Recife até o Alto Mamanguape; Fácies fluviais de canais entrelaçados, presentes em toda a faixa entre Recife e Natal; Fácies de planícies fluviolacustre ocorrendo na faixa litoral entre Recife e João Pessoa e na região de São José do Mipibu, Rio Grande do Norte (VALENÇA, 2017).

Sua geomorfologia é dominada por tabuleiros costeiros, de grande extensão, recortados por grandes vales e rios, na zona proximal da faixa costeira. Na zona de litoral ocorrem planícies costeiras e falésias. A formação se apresenta na parte próxima a borda da Bacia da Paraíba, como um corpo tabular, onde dominam depósitos de leques aluviais. Entre Recife e João Pessoa apresenta a menor espessura ou houve uma remoção do solo por conta das variações eustáticas neogênicas (BARBOSA et al., 2007).

Esta formação apresenta estratificações quase horizontais, constituídas por sedimentos de várias naturezas, desde areias até argilas de coloração variada, incluindo por vezes leitos de seixos rolados. Em camadas inferiores são encontradas argilas de coloração arroxeadada e cinzenta, e sob as camadas superiores, algumas vezes, verifica-se presença de concreções de ferro.

Suas características mais marcantes na Ilha de Itamaracá são as areias quartzo- feldspáticas claras, incoerentes, de granulação fina a média, intercaladas a argilas cinza- esverdeada. Da base para o topo, são encontrados: (a) arenito conglomerático com estratificação cruzada acanalada, cor amarela; (b) argila variegada esverdeada preenchendo fundo de canal; (c) arenito médio vermelho maciço. É comum, em alguns pontos, a presença de fraturas e falhas de pequeno rejeito. Em Itamaracá, há um afloramento deste tipo, na estrada que leva à Coroa do Avião (LIRA, 2010).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos adotados, com o propósito de atingir os objetivos descritos para o desenvolvimento da pesquisa.

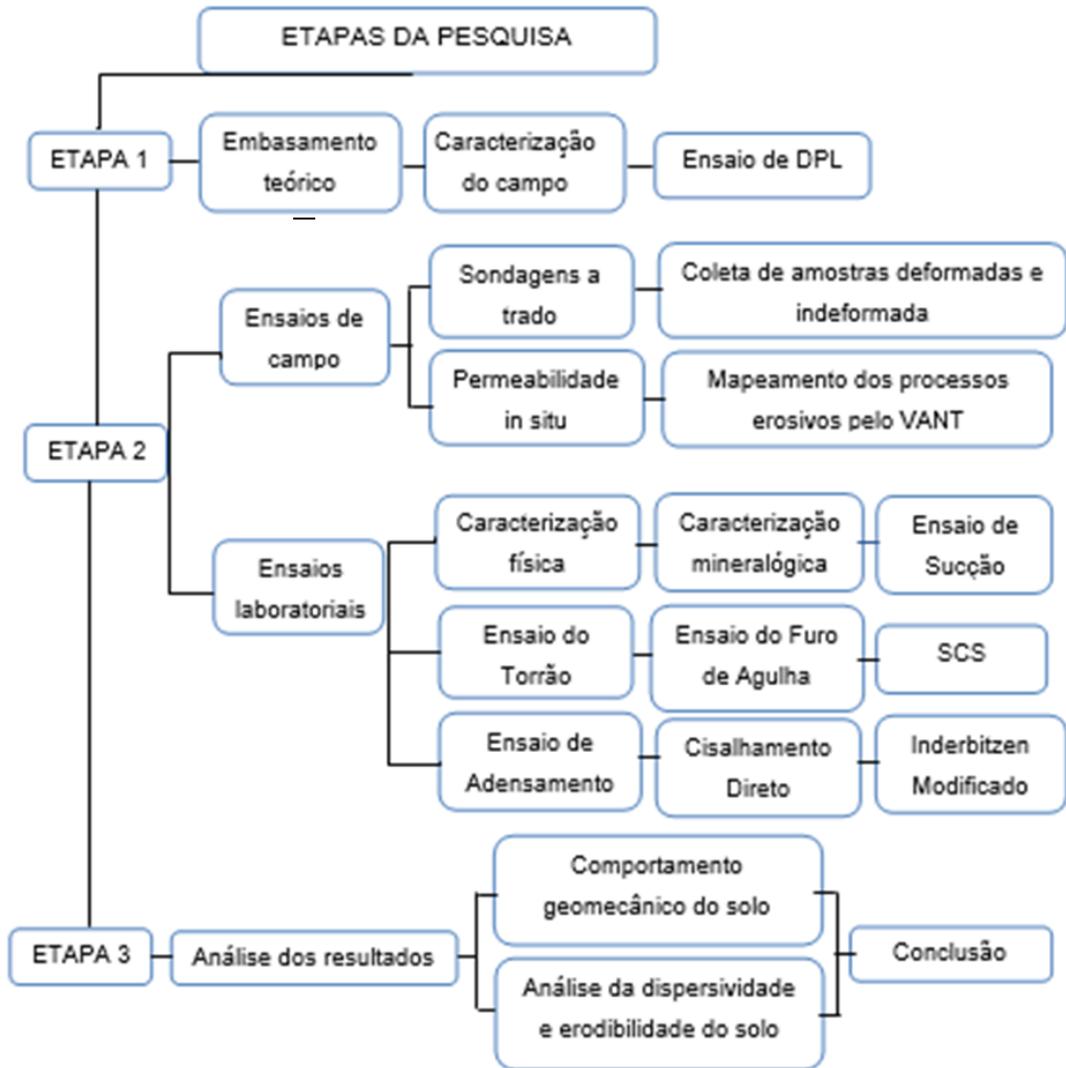
#### 3.1 INTRODUÇÃO

O planejamento metodológico da pesquisa está sintetizado em três etapas. Inicialmente, a pesquisa foi desenvolvida, com o delineamento do problema, a partir de análises qualitativas e quantitativas que melhor identificavam a erosão e seus processos. A segunda etapa foi realizada a aplicação da investigação de campo através da sondagem a trado, coleta de amostras deformadas e indeformadas, ensaio de Dynamic Light Penetrometer - DPL, mapeamento dos processos erosivos utilizando o Veículo Aéreo Não Tripulado - VANT e a classificação das fissuras. No laboratório foram realizados: caracterização física, química e mineralógica da fração argila (DRX) e da fração grossa (Microscopia ótica - MO), análises de dispersibilidade do solo (Ensaio do Torrão, comparativo de granulometria e Ensaio do Furo de Agulha), ensaios no inderbitzen modificado, curvas características, permeabilidade in situ, ensaios de compressibilidade e resistência ao cisalhamento do solo. Na terceira etapa foram analisados os resultados da campanha de investigação realizada. A Figura 21 apresenta as etapas adotadas.

#### 3.2 LOCAL DA INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO

Na visita de campo foram identificadas áreas com processo de erosão em desenvolvimento no município de Itamaracá. Foram identificadas quatro jazidas de extração de saibro, desativadas ou em funcionamento a fim de escolher o ponto mais adequado às análises e ao monitoramento de campo. Na Figura 22 estão identificadas as jazidas em Itamaracá (simbolizadas pelas letras A, B, C e D). Na escolha foram considerados o processo evolutivo das erosões, condições de acesso, dados do levantamento topográfico e segurança da equipe. Foi escolhida uma antiga área de extração de saibro (Jazida B) desativada há mais de 30 anos localizada no bairro do Bom Jesus. Na Jazida B foi determinado um trecho que apresenta processos erosivos avançados (Figura 23), composto por três cortes inclinados e duas plataformas.

Figura 21 – Fluxograma das etapas.



Fonte: O autor (2022).

A encosta, tem 15 metros de altura, passou por um retaludamento, onde foram inseridas duas bermas, além de um sistema de drenos constituídos de canaletas e escadas d'água para aumentar sua estabilidade. A localização da encosta no município é representada pelas coordenadas  $7^{\circ} 46'9''$  S e  $34^{\circ} 50' 28''$  W, em uma posição geográfica com a altura aproximada de 40 metros em relação ao nível do mar.

Figura 22 – Mapeamento das jazidas de extração do saibro.



Fonte: Adaptado do Google Earth (2018).

Figura 23 – Área de Estudo.



Fonte: A) Google Earth (2018); B) Autor (2018).

### 3.3 INVESTIGAÇÃO DE CAMPO

Foram realizadas sondagens para a investigação geológica da encosta, assim como coletas de amostras deformadas e indeformadas. Também foram avaliados a condutividade hidráulica in situ com o permeâmetro de Guelph e o comportamento mecânico com o ensaio dinâmico leve (DPL). A Tabela 2 apresenta o quantitativo de procedimentos em campo.

Tabela 2 – Quantitativo da campanha em campo

<b>Procedimento</b>	<b>Quantidade</b>
Investigação a trado	9
Coleta de amostras deformadas	36
Coleta de amostras indeformadas	9
Permeabilidade in situ	9
DPL	81
<b>Total</b>	<b>144</b>

Fonte: O autor (2022).

Foram realizadas sondagens a trado em nove pontos da encosta, sendo três furos por patamar (topo e nas duas bermas), Figura 24. Utilizou-se trado helicoidal com diâmetro de 10 cm com perfurações de 5 metros de profundidade. A vertical do furo a trado tinha continuidade a partir do topo da berma abaixo até atingir a parte mais inferior do talude. Os furos das sondagens foram feitos conforme a NBR 9603/15.

A encosta foi dividida em três terços cada um com aproximadamente 5 m. No primeiro terço superior (do topo da encosta a 5,0 m de profundidade) foram realizadas sondagens a trado P-01, P-02 e P-03, no segundo terço na meia encosta (de 5,0 m a 10 m) foram realizadas sondagens a trado P-04, P-05 e P-06 e no terceiro terço próximo ao sopé (10 m a 15 m) foram realizadas sondagens a trado P-07, P-08 e P-09. Nas sondagens a trado foram coletadas amostras deformadas em forma contínua. Três seções verticais foram consideradas S-01 (P-01, P-04 e P-07), S-02 (P-02, P-05 e P-08) e S-03 (P-03, P-06 e P-09). Nas análises dos resultados e perfis de solo das seções as amostras foram consideradas contínuas. A coleta das amostras em cada vertical foi realizada no topo de cada patamar.

Amostras deformadas foram coletadas em sacos de boa resistência, etiquetados com aproximadamente 15 kg de solo proveniente do material retirado na sondagem da encosta. As amostras foram transportadas para os Laboratórios de Solos e Instrumentação – LSI da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e da Universidade de Pernambuco (UPE), onde foi realizada a caracterização Física dos solos.

Figura 24 – Detalhamentos dos pontos de sondagem.



Fonte: O autor (2022).

Amostras indeformadas do tipo bloco (Figura 25) de formato cúbico com aresta de 50 cm foram coletadas nos nove pontos investigados. As coletas foram feitas nas camadas superficiais a 1 metro de profundidade do topo de cada patamar (Topo ou bermas). A coleta dos blocos segue a Norma NBR 9604 (2016).

Figura 25 – Coleta de amostra indeformada. a) Moldagem do bloco e b) Armazenamento do bloco.



Fonte: O autor (2022).

### 3.3.1 Ensaio de permeabilidade ‘in situ’

Para determinação da condutividade hidráulica, foi utilizado o permeâmetro de Guelph (Figura 26). Seu procedimento foi realizado de acordo com o manual do equipamento (SOILMOISTURE, 1991), onde foi feita a abertura de nove furos (três furos em cada terço da encosta) de diâmetro de cerca de 6,0 cm. Em seguida a base do furo foi nivelada com a utilização do trado nivelador. Na sequência o equipamento foi instalado depois de atingida a profundidade (1 metro em cada furo). Para o procedimento foi adotado duas cargas hidráulicas ( $H_1 = 5$  cm e  $H_2 = 10$  cm). As leituras foram realizadas até que se obtivesse a equalização no sistema. Neste ensaio foi possível determinar, diretamente, a permeabilidade saturada do solo ( $K_{fs}$ ) e o potencial mátrico de fluxo ( $\phi_m$ ).

Figura 26 - Permeâmetro de Guelph.



Fonte: O autor (2022).

### 3.3.2 Ensaio do penetrômetro dinâmico leve (DPL)

Ensaio de Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL) foram realizados nos nove locais da encosta e os resultados permitem obter a resistência do solo à penetração de uma haste (Figura 27a). Em cada local foram demarcados com piquetes os nove pontos com 10 cm de distância entre eles, criando assim uma malha (Figura 27b). Das nove determinações foi obtida a média e o desvio padrão. Na sequência foi instalado o equipamento em cada um dos pontos anteriormente demarcados para a execução do ensaio.

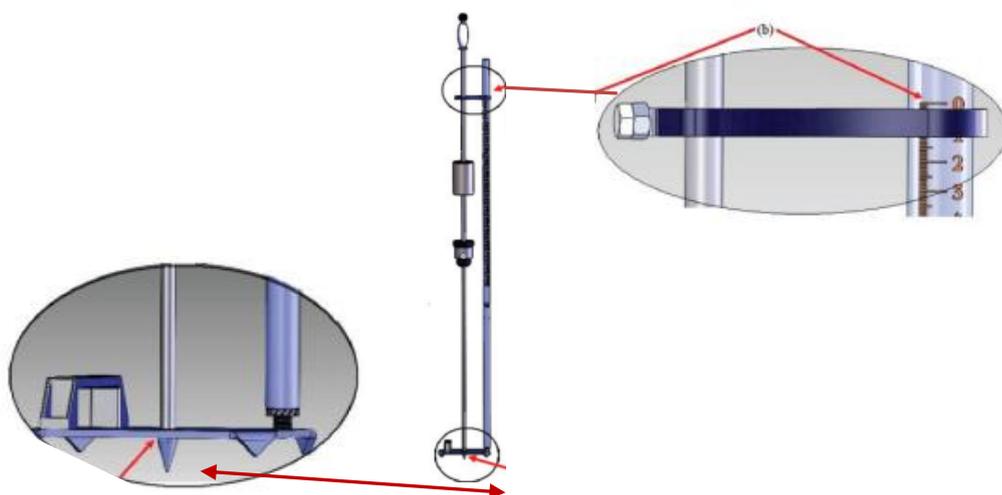
Figura 27 – Ensaio de DPL. a) Execução do DPL; b) Malha de penetrações.



Fonte: O autor (2022).

Pelo ensaio foi determinado o número de impactos aplicados sobre uma ponteira em intervalos de 50 cm de profundidade até alcançar 2,50 m. Os impactos foram proporcionados pela queda livre, de um peso de 3,992 kg, com uma altura de queda de 40 cm de uma haste com ponta cônica, que penetra no solo (Figura 28).

Figura 28 – DPL.



Fonte: Claus (2014).

A transformação dos valores da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração foi obtida pela fórmula dos “holandeses”, segundo Stolf (1991). A Equação 2 apresenta a determinação da resistência.

$$RP = \frac{Mg+mg+\left(\frac{M}{M+m}\right)\frac{Mgh}{x}}{A} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

RP – Resistência à penetração, em kgf/cm<sup>2</sup>;

M – Massa que provoca impacto (3,992 kg);

m – Massa dos demais componentes do penetrômetro, excluída a de impacto (2,444 kg para profundidades até 1,0 m, 3,064 kg para profundidades até 2,0 m e 3,374 kg para profundidades até 2,50 m);

g – Aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>);

h – Altura de queda da massa que provoca o impacto (40 cm);

x – Penetração unitária ocasionada por um impacto (cm/impacto);

A – Área do cone (129 mm<sup>2</sup>).

### 3.3.3 Mapeamento do processo erosivo

Para a obtenção das imagens e produção do mapeamento da encosta, foi utilizado um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), modelo PHANTOM 4-PRO (Figura 29). Este modelo de drone tem um sistema GNSS embarcado para gerenciamento das coordenadas na fototriangulação. A fotogrametria foi realizada em altitude média de 60 m, em aproximadamente 40 minutos.

Figura 29 - VANT modelo PHANTOM 4-PRO



Fonte: O autor (2022)

O levantamento de campo foi realizado inicialmente por meio de um reconhecimento prévio da área da encosta, identificando-se os possíveis obstáculos para o mapeamento além das principais vias de acesso. Através dessas informações foi definido o plano de voo, sendo utilizado o software Drone Deploy. As imagens

correspondentes foram definidas pelas coordenadas espaciais, que foram capturadas pelo sistema GPS da aeronave.

Durante a execução do voo foram inseridos 5 pontos de controle, que serviram para um processamento inicial das imagens aéreas. Como complemento foi implantado um marco topográfico, utilizando o método RTK, que é um sistema de GPS diferencial que melhora a precisão das imagens de metros para centímetros (DRONE DEPLOY, 2019).

O processamento das imagens foi realizado a partir do software Agisoft Matashape, onde as imagens foram carregadas e automaticamente o software localizou a posição e a orientação da câmera para cada foto. Foi realizado o processo de filtragem da nuvem de pontos, gerando inicialmente uma nuvem de pontos espaçados, e após a validação desses pontos, foi gerada uma nuvem mais densa. Com a finalização da nuvem foram delineados os modelos digitais de superfície e de elevação (MDS/MDE) e o ortomosaico.

Pelo método proposto por Batista et al. (2015) foram delimitadas, com base nas ortofotos e de parâmetros derivados do MDE, as erosões em entressulcos e sulcos, bem como foi determinado o volume erodido das mesmas. As superfícies de referência acima dos entressulcos e sulcos foram interpoladas por triangulação com base no relevo adjacente. Considerou-se que a diferença entre a superfície de referência e o MDE gerado, a partir da nuvem de pontos, representa o volume de solo erodido calculado pelo Agisoft Metashape.

### 3.3.3.1 Avaliação de perda de Solo

As perdas de solo da área de estudo foram estimadas para um período de 30 anos, tendo em vista as medições pluviométricas identificadas na região. O método utilizado para quantificar as perdas foi a Equação Universal de Perda de Solo (USLE), proposta por Wichmeier e Smith (1978), onde o modelo leva em conta a perda média de solo como resultado de fatores que influenciam os processos erosivos (Equação 3).

$$A = R.K.LS.C.P \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: A = Perda média anual do solo por unidade de área e de tempo, em t ha-1 ano-1; R = Fator de erosividade da precipitação, em MJ mm ha-1 h-1 ano-1; K =

Fator de erodibilidade do solo, em t. h MJ-1 mm-1; LS = Fator topográfico, considerando o comprimento e o declive da encosta; C = Fator de uso e manejo do solo; P = Fator de prática de conservação do solo.

Através do método proposto por Cantalice et al. (2009), a erosividade da chuva (Fator R) foi estimada, a partir de dados pluviométricos médios mensais e anuais obtidas pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC-PE), pela estação mais próxima da área de estudo. A série de dados utilizada compreendeu o período de 30 anos, onde o fator de erosividade (R) foi obtido por meio da Equação 4:

$$R = \sum_{i=1}^{12} EI_{30\text{ mm}} = 0,216 \cdot p_i^{1,547} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: R = fator de erosividade da chuva (Mj mm ha-1 h-1 ano-1); EI30mm = valor do EI30 médio mensal (MJ mm ha-1 h-1) média mensal do índice de erosão (MJ mm ha-1 h-1); pi = valor da precipitação média mensal em mm da região do litoral pernambucano.

O Fator de erodibilidade do solo (K) foi baseado na equação de Wischmeier e Smith (1978). Foram utilizadas as médias dos percentuais das frações de areia, silte e argila de nove amostras de solo coletadas nas camadas superficiais da encosta. Para a determinação da espessura da camada que coleta, foi realizada a classificação do solo de acordo com a EMBRAPA (2018). Vale ressaltar que para melhor ajuste dos resultados foi inserido um fator 0,1317 na Equação 5, referente a conversão da unidade original do fator K para o sistema métrico internacional, de acordo com Foster et al. (1981).

$$K = \{[2,1 \cdot (10^{-4})(12 - MO)M^{1,14} + 3,25(EST - 2) + 2,5(PER - 3)] / 100\}0,1317 \quad (\text{Equação 5})$$

O fator topográfico (LS) foi determinado pelo software Agisoft Metashape a partir do modelo digital de elevação (MDE) para a modelagem dos processos erosivos, além das determinações dos fatores de comprimento e declividade da encosta. Para a determinação do Fator de manejo e uso do solo (C) foram realizadas pesquisas que tratam da avaliação da perda de solos expostos e sem manejo, onde foi identificado o valor mais adequado à realidade da área de estudo.

Por fim, foi determinado o fator P, onde foi necessário identificar as práticas de controle de erosão sobre as fotografias aéreas e imagens de satélite no mapeamento. As informações encontradas foram classificadas de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Valores do fator P para tipos de práticas conservacionistas diferentes

Tipos de práticas conservacionistas	Valor de P	Referência
Plantio em nível	0,6 e 1,0	Lagrotti (2000)
Plantio morro abaixo	1,0	Bertoni e Lombardi Neto (2005)
Terraceamento	0,6 e 1,0	Lagrotti (2000)
Nenhuma prática conservacionista	1,0	Bertoni e Lombardi Neto (2005)
Açude	0	Gonçalves (2002)
Mata nativa e/ou ciliar	0,001	Gonçalves (2002)

Fonte: Adaptado de Demarchi (2019).

### 3.3.3.2 Taxa de perda do solo

Para determinar a taxa de perda de solo em cada sulco, foram identificadas as áreas dos sulcos; os volumes de solos que foram erodidos em cada sulco, e a densidade do solo em cada corte. As áreas e os volumes foram evidenciados através do software Agisoft Metashape. A densidade do solo foi encontrada através da coleta de amostras indeformadas em tubos com volume padrão conhecido. Foram coletadas 4 amostras por corte, totalizando 12 amostras. Na sequência foi determinada a densidade do solo ( $D_s$ ), conforme Klute (1996), pelo emprego da Equação 6:

$$D_s = \frac{M_s - T}{V} \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo  $D_s$  = densidade do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $M_s$  = somatória da massa do tubo e da amostra seca em estufa a  $105^\circ\text{C}$  (kg),  $T$  = massa do tubo (kg) e  $V$  = volume do tubo ( $\text{m}^3$ ).

As massas dos solos que erodiram em cada sulco ( $M$ ) foram determinadas utilizando os valores de volume dos solos que erodiram ( $V_e$ ), além da densidade do solo em cada corte ( $D_s$ ) expressa na Equação 7:

$$M = V_e \cdot D_s \quad (\text{Equação 7})$$

Em que: M= massa dos solos que erodiram (kg),  $V_e$  = volume dos solos que erodiram ( $m^3$ ) e  $D_s$  = densidade do solo em cada corte ( $Kg/m^3$ ).

As taxas de perda do solo por sulco, utilizando as informações da massa do solo que erodiu pela área do sulco, expresso na Equação 8.

$$T_p = M/A_s \quad (\text{Equação 8})$$

:  $T_p$  = Taxa de perda do solo por sulco ( $T/m^2$ ), M = massa do solo que erodiu (T),  $A_s$  = área do sulco ( $m^2$ ).

### 3.4 INVESTIGAÇÃO EM LABORATÓRIO

Foram realizados ensaios para se obter a caracterização física, química, mineralógica na fração grossa e na fração argila. A dispersibilidade foi avaliada por meio de ensaios comparativo de granulometria, Ensaio do Torrão, Ensaio do Furo de Agulha e químicos. Para avaliar a processo de erosão em laboratório foi construído Inderbitzen modificado (GONÇALVES E SILVA, 2019). A compressibilidade foi avaliada por meio de ensaio de compressão unidimensional e a resistência ao cisalhamento por meio de ensaio de cisalhamento direto. A Tabela 4 mostra o quantitativo de ensaios realizados.

Tabela 4 – Quantitativo da campanha de laboratório.

Ensaio	Quantidade
Granulometria	36
Ensaio SCS	36
Densidade real	36
Limite de liquidez	36
Limite de plasticidade	36

Análise química	18
Mineralogia (fração arenosa)	9
Mineralogia (fração argilosa)	27
Análise química	18
Curvas características	9
Compressibilidade	6
Cisalhamento	18
Inderbitzen modificado	720
<b>Total</b>	<b>1005</b>

Fonte: O Autor (2022).

### 3.4.1 Caracterização Física

A determinação das frações do solo foi realizada segundo a ABNT NBR 7181/17. Em todas as amostras coletadas dos furos de sondagem foram executados ensaios de sedimentação com os seguintes procedimentos: com defloculante e com dispersor; sem defloculante e com dispersor; sem defloculante e sem dispersor. O objetivo de realizar a sedimentação com e sem o defloculante foi para avaliar a dispersibilidade dos solos argilosos. Os limites de Atterberg foram identificados segundo a NBR 6459/16 (limite de liquidez) e o limite de plasticidade de acordo com a NBR 7180/16. Também foi obtida a densidade real dos grãos, onde foi utilizado os procedimentos descritos na NBR 6508/16. Com os dados obtidos do limite de liquidez e o índice de plasticidade bem como o percentual de solo passante na peneira # 200 encontrados na caracterização física, as amostras foram analisadas e classificadas pelo método proposto por Meirelles (1967). A Tabela 5 apresenta a classificação dos solos de Angola baseados na granulometria e plasticidade do solo.

Tabela 5 – Classificação pelo Método LNEC

<b>Classificação frente à erosão Meirelles (1967)</b>	<b>Crítérios de plasticidade (WL e IP) e granulometria</b>
Solos fortemente erodíveis	$wl \leq 21\%$ , $IP \leq 8\%$ e $\% \text{ passando na } \# 200 \leq 20\%$ ;
Solos passíveis de forte erosão	$20\% < \text{percentagem passando na } \# 200 < 40\%$ ;
Solos pouco erodíveis	$\% \text{ passando na peneira } \# 200 \geq 40\%$ .

Fonte: Adaptado de Meirelles (1967).

### 3.4.2 Caracterização Mineralógica

#### a) Fração arenosa

Com o objetivo de caracterizar a mineralogia da fração de areia (retida na peneira #200), foram realizados ensaios de microscopia ótica no Laboratório do Departamento de Geologia da UFPE. A fração areia foi obtida de forma qualitativa, através do exame visual direto, que ocorreu utilizando o Stereo Microscopio Discovery V8 com imagem feitas pela câmera Axio Cam MPC.

#### b) Fração argila

A caracterização da fração argilosa foi realizada nas amostras dos solos, com as seguintes etapas: separação da argila do silte; preparação das lâminas com magnésio glicol; preparação das lâminas com potássio na temperatura ambiente; preparação das lâminas com potássio a 550°C.

Para a separação da argila foram reservados, 10 g de solo de nove anos tras das camadas superficiais (profundidade até 1,0 m) da encosta. Esses materiais foram lavados na peneira nº # 400 no Laboratório de Geotecnia da Universidade Católica de Pernambuco com o objetivo de coletar a maior quantidade da fração argilosa da amostra. Por isso, todo o material que passava pela peneira no processo de lavagem foi coletado e secado ao ar livre.

Com as amostras secas, foi realizado o processo de sedimentação, conforme a NBR 7181 (2017). Em seguida foi retirado o material argiloso até a profundidade de 10 cm iniciais da massa líquida da proveta de 1000 ml em cada amostra. O material foi novamente secado ao ar livre para os tratamentos com magnésio e potássio.

No tratamento com magnésio foram utilizadas 3 gramas de cada uma das nove amostras. As mesmas passaram por processos de lavagens, com as soluções de cloreto de magnésio, acetato de magnésio, 50% e 95% de etanol. Cada amostra passou pelas etapas de inserção da solução, em seguida a composição era agitada e centrifugada por 5 minutos cada, e por fim a solução foi separada da amostra para uma nova lavagem.

Na sequência, foi verificado se a argila ainda apresentava cloreto das soluções anteriores. Para isto, foi colocado algumas gotas da solução de nitrato de prata a 1,0% na solução de lavagem anterior após a separação da argila. Ficando turvo;

confirmava a presença de cloreto pela formação do cloreto de prata (AgCl), e neste caso, foi repetido mais algumas lavagens com a solução de 95% de etanol, até que a solução permanecesse hialina.

Após a confirmação da ausência do cloreto, foi efetuada uma lavagem com solução de 10% de glicerol em etanol. As amostras foram novamente agitadas por 5 min, em seguida foi preparada uma lâmina tendo o cuidado de formar uma camada bem delgada na lâmina de vidro. Foram colocadas algumas gotas da suspensão na extremidade da lâmina para formar uma película da argila bem delgada. Deixando secar naturalmente dentro de dessecador com sílica gel cloreto de cálcio.

Para o tratamento com o Potássio, assim como no tratamento do magnésio, foram separados seis gramas do material passante na peneira de nº 400. As amostras passaram por processos de lavagens com cloreto de potássio (KCl), água destilada e metanol 99% com acetona, se houver problema de floculação. As amostras também foram agitadas, centrifugadas e separadas da solução em cada lavagem.

Foram preparadas três lâminas com suspensão da argila com água ou metanol, tendo o cuidado de formar uma camada bem delgada na lâmina de vidro. Em seguida foram colocadas algumas gotas da suspensão na extremidade da lâmina, onde foi efetuado um esfregaço com outra lâmina formando uma película da argila bem delgada. Foi colocada para secar naturalmente dentro de um dessecador com o cloreto de cálcio.

A primeira lâmina foi separada depois da secagem enquanto a outra foi inserida em uma mufla e aquecida, na temperatura de 550°C. Neste último processo os materiais ficavam expostos as temperaturas por duas horas e na sequência, deixou-se esfriar até a temperatura ambiente, colocada no dessecador com identificação. Foram preparadas 27 lâminas sendo 9 tratadas com potássio a temperatura ambiente, 9 de potássio aquecida na temperatura de 550°C e 9 lâminas tratadas com magnésio glicol a temperatura ambiente. As lâminas foram submetidas a difração de raio-X. O princípio da análise de difração permitiu identificar o mineral argílico e a composição mineralógica. A lei de Bragg permitiu encontrar o comprimento de onda através da Equação 9:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo  $n$  o número inteiro da difração do plano,  $\lambda$  o comprimento da onda do feixe de raios – X monocromático, empregado na radiação,  $d$  distância interplanar e  $\Theta$  o ângulo de Bragg ou de incidência do feixe de raio X.

Os dados foram obtidos, empregando-se um difratômetro da marca Rigaku (MiniFlex600) com radiação K-alfa do cobre, operando com tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, intervalo de 5 a 70 graus e velocidade de análise 2 graus/min, mostrado na Figura 30. A execução dos ensaios foi realizada no Laboratório da Universidade Federal de Pernambuco em Caruaru.

Figura 30 - Difratômetro



Fonte: Pedrosa (2021).

### 3.4.3 Ensaio de Dispersão

Os ensaios de dispersão foram realizados no Laboratório de Solos de Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco.

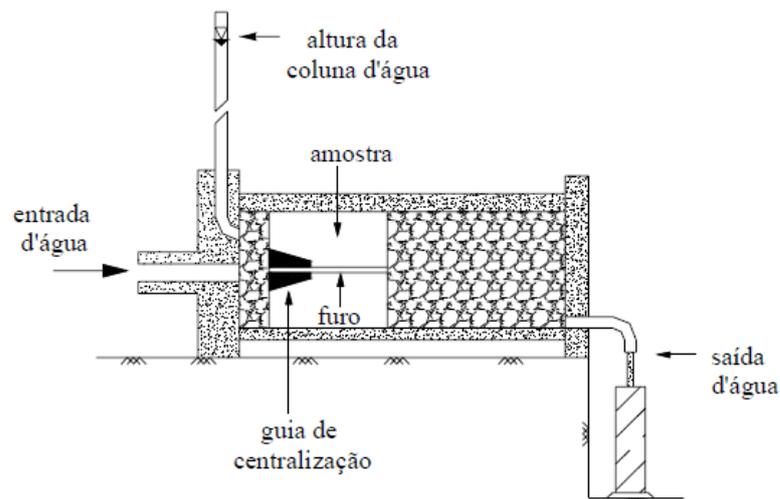
#### a) Ensaio do Torrão (Crumb Test)

O ensaio de dispersão rápida, normatizado no Brasil pela NBR 13601/20, foi desenvolvido para avaliar qualitativamente o comportamento de um agregado na umidade natural submerso em água destilada. O Ensaio de Torrão é um método rápido para identificação de solos dispersivos. Após o tempo de observação, o solo foi classificado de acordo com um dos graus de dispersividade.

#### b) Furo de Agulha (Pinhole Test)

Inicialmente as amostras foram moldadas no anel de cravação. Este anel possui as mesmas dimensões internas do equipamento, a fim de evitar que o fluxo corresse pelas paredes internas do aparelho. Depois a amostra foi moldada no interior do aparelho com o auxílio de um êmbolo cilíndrico. Na sequência foi cravado o guia de centralização e feito o furo a partir do seu interior. Depois, o cilindro é fixado e conectado a um reservatório com água com cargas hidráulicas variadas (2" (50 mm); 7" (178 mm); 15" (380 mm) e 40" (1020 mm)). Para cada carga hidráulica são medidas as diferentes vazões durante 5 minutos, anotando o valor de cada minuto. com (Figura 31). Durante o ensaio o volume de água apresentar algum tipo de turbidez o tempo para análise em cada carga hidráulica passou a ser de 10 minutos.

Figura 31 – Ilustração do Pinhole test.



Fonte: Sherard et al. (1976) Abud Lafayette (2006).

Um eventual alargamento do furo foi observado através de um aumento da vazão na fase de retorno, ou seja, para um mesmo gradiente hidráulico a vazão no processo de retorno seria maior, evidenciando a ocorrência do processo erosivo.

### c) Ensaio Sedimentométrico Comparativo (SCS)

O ensaio tem por objetivo a avaliação da dispersibilidade dos solos argilosos. É um ensaio semelhante ao de granulometria NBR 7181, porém não utiliza a agitação mecânica nem o agente dispersante (defloculante) no procedimento de sedimentação (ABNT 13602/96). A sedimentação dos solos finos foi realizada em três situações:

Com o uso do defloculante e com a aplicação do dispersor (DD);  
Com o uso do defloculante e sem a aplicação do dispersor (DS);  
Sem o uso do defloculante e sem a aplicação do dispersor (SS).

#### 3.4.4 Caracterização Química

Os ensaios químicos foram realizados no laboratório de análises químicas da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), seguindo a metodologia do Manual de Métodos de Análise de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA (1997). As análises foram realizadas nas camadas superficiais (0,0 a 1,0 m) nos nove pontos de coleta da encosta.

##### a) Determinação do pH do solo

Inicialmente foi determinado o potencial hidrogeniônico (pH) de acordo com a EMBRAPA (1997), com o objetivo de avaliar as concentrações de  $H^+$  e  $Al^{+++}$  em floccular. Podendo ser utilizado também para determinar o tipo de argilomineral constitui o solo. As medições do pH foram realizadas através do Potenciômetro com eletrodo combinado. Para a realização do ensaio, 10 ml de solo foram inseridos em um copo plástico onde, na sequência, foi adicionado 25 ml de água. A amostra foi agitada com o bastão e vidro e deixada em repouso por uma hora. Em seguida a amostra foi agitada novamente, onde foram mergulhados eletrodos para a leitura do pH.

##### b) Determinação das bases trocáveis

A CTC corresponde a quantidade de cátions necessárias para neutralizar as cargas negativas de uma quantidade unitária de solo em determinadas condições. A determinação do CTC foi realizada considerando a remoção, por uma solução salina de amônio, de cálcio, bário ou ácido diluído, sendo determinados por volumetria ou absorção atômica.

Foram analisadas as seguintes determinações em cada amostra: Alumínio extraível (meq  $Al^{+++}$ /100g solo), Cálcio trocável (cmol  $Ca^{++}$ /kg solo), Magnésio trocável (cmol  $Mg^{++}$ /kg solo), Potássio trocável (cmol  $K^+$ /kg solo), Sódio trocável (cmol  $Na^+$ /kg solo), Soma dos cátions (S), Capacidade de troca de cátions (CTC) (cmol/kg) e Percentagem de saturação das bases (V).

### c) Química da água intersticial do solo

Foram feitas análises químicas a fim de identificar o teor de sais dissolvidos na água intersticial do solo, sendo analisados os teores de sódio, cálcio, potássio e magnésio (Figura 32). A análise química do solo foi realizada no Laboratório de química da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), com método de análise executado de acordo com o Manual de Métodos de Análises de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017).

Figura 32 - Amostras sujeitas a análise.



Fonte: O autor (2022).

Inicialmente, foram separados 100g de nove amostras localizadas próximas da superfície dos nove pontos de coleta, sendo uma amostra por ponto. Na sequência, foi adicionada água deionizada em cada amostra, sendo misturada ao solo até o mesmo apresentar características de saturação, ou seja, quando a pasta (água + solo) deslizar suavemente dentro do recipiente que houve a mistura. A partir dessa identificação foi registrada a quantidade de água utilizada na amostra para a mesma alcançar tal característica.

Foi adicionado também 50 ml de água destilada em todas as amostras. As pastas saturadas foram transferidas, uma por vez, para um funil de Buckner contendo papel de filtro para facilitar a coleta do extrato de saturação. Além disso, foi aplicada

uma sucção com o uso de uma bomba de vácuo, reduzindo o tempo para a coleta do extrato.

Através dos extratos de saturação, foi verificada nas amostras, a princípio, a condutividade elétrica. A mesma foi determinada por meio do condutímetro de leitura direta, e o valor foi identificado em relação à quantidade de sais dissolvidos no extrato.

Em seguida foram identificados os teores de sais solúveis presente no extrato. Para a identificação do Cálcio, foram adicionados em 10 ml das amostras, 25 ml de água destilada e 1 ml de hidróxido de sódio a 10%. Na sequência, foram adicionados cristais de murexida para titular em uma solução de EDTA a 0,01 N até a amostra apresentar uma variação na sua coloração. Foi anotado o volume de EDTA gasto que corresponde ao cálcio existente (EMBRAPA, 2017). A determinação de cálcio foi apresentada a partir da Equação 10.

$$Ca^{+} = V_{EDTA} \cdot \frac{10}{V_{amostra}} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

$Ca^{+}$  - Teor de cálcio presente no extrato.

$V_{EDTA}$  - Volume de EDTA gasto.

$V_{amostra}$  - Volume do extrato.

Para identificar o teor de magnésio, no erlenmeyer foram adicionados 10 ml da amostra de extrato, 25 ml de água destilada e 1 ml de solução Tampão (pH =10). Foram inseridos também, cristais de eriocromo para titular em uma solução de EDTA a 0,01 N até a coloração da solução variar. A determinação de cálcio foi apresentada a partir da Equação 11.

$$Mg^{++} = V_{EDTA} \cdot \frac{10}{V_{amostra}} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

$Mg^{++}$  - Teor de magnésio presente no extrato.

$V_{EDTA}$  - Volume de EDTA gasto.

$V_{amostra}$  - Volume do extrato.

O sódio e o potássio foram determinados por espectrofotometria de chama. Foram feitas leituras das amostras através do fotômetro de chama (Figura 33). Em seguida os valores foram correlacionados aos dados obtidos em uma curva desenvolvida com soluções padrões de sódio e potássio.

Figura 33 – Fotômetro de chama



Fonte: O autor (2022).

Com os resultados foram calculados os seguintes parâmetros: total de sais dissolvidos (TSD), porcentagem de sódio presente (PS) e razão de absorção de sódio (RAS ou SAR). A Tabela 6 apresenta equações utilizadas para a determinação dos parâmetros.

Tabela 6 - Equações para determinação dos parâmetros de dispersividade de solos

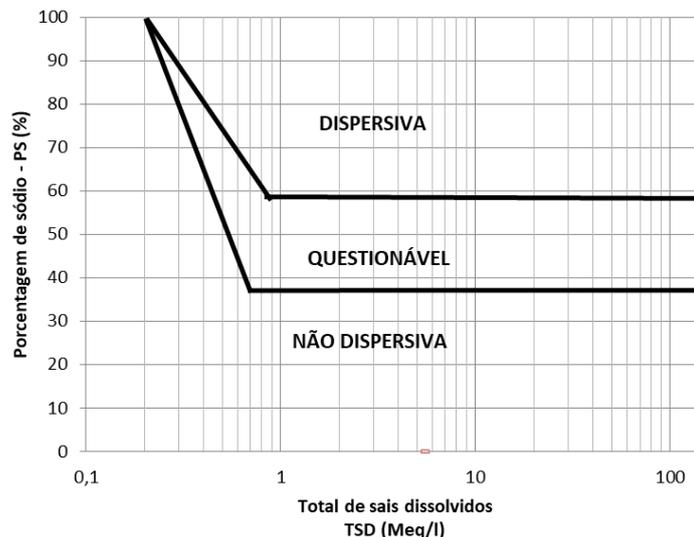
Parâmetro	Equações
TSD	$TSD = Ca^{++} + Mg^{++} + Na^{+} + K^{+}$
PS (%)	$PS (\%) = \left( \frac{Na^{+}}{TSD} \right) \cdot 100$

<b>RAS</b>	$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\left(\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}\right)}}$
------------	--

Fonte: Adaptado de Portela (2019).

Esses valores foram aplicados no ábaco proposto por Sherard, Dunningan e Decker (1976), a partir do qual é possível determinar a dispersividade do solo em três zonas: a dispersiva, a não-dispersiva e a questionável (Figura 34). Os solos enquadrados na classificação intermediária devem ser analisados em outros ensaios, a fim de obter uma conclusão mais específica.

Figura 34 – Ábaco de dispersividade baseado na química da água intersticial



Fonte: Sherard, Dunningan e Decker (1976)

### 3.4.5 Curva característica do solo

A técnica adotada para determinação das curvas características foi a do papel filtro, onde foi utilizado o papel filtro do tipo Whatman n°. 42, tipo 2. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação na UFPE. O corpo de prova foi obtido através da cravação de anéis, confeccionados em aço inoxidável com dimensões definidas. Em seguida, os corpos de prova foram umedecidos por capilaridade, onde os corpos de prova foram acomodados sobre uma pedra porosa, em uma bandeja com água no nível da pedra porosa. Após esse processo, os corpos de prova foram retirados de forma cuidadosa, para que não ocorresse desagregação.

As curvas são determinadas através dos diferentes níveis de umedecimentos e secagem identificados no papel filtro. A Figura 35 apresenta as balanças analíticas utilizadas nos ensaios cujos modelos são: modelo AY220 com precisão 0,001g (Figura 35a) e modelo ELECTRONIC SCALE com precisão 0,001g (Figura 35b).

Figura 35 – Pesagem do papel filtro e do solo



Fonte: O autor (2022).

### 3.4.6 Ensaio de Compressibilidade

O ensaio foi desenvolvido no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, utilizando os edômetros fabricados pela Ronald Top S/A (Figura 36), do tipo convencional com sistemas de cargas através de pesos em um pendural com relação de braço de 1:10, células edométricas do tipo anel fixo e as leituras das deformações foram realizadas pelos extensômetros com sensibilidade de 0,01.

Figura 36 – Prensa de adensamento



Fonte: O autor (2022).

Após a coleta, preparação e corte da amostra, a mesma foi colocada no edômetro e submetida a carregamentos progressivos. Cada carregamento foi mantido por um período de 24 horas, durante o qual foram feitas leituras de deformação vertical da amostra ao longo dos intervalos de tempo: 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30; 60; 120; 240; 480 e 1440 min. Foram realizados para cada amostra, 8 ciclos de carregamento nas tensões de 10 kPa, 20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa, 320 kPa, 640 kPa e 1280 kPa e 4 ciclos de descarregamentos nas tensões de 640 kPa, 160 kPa, 40 kPa e 10 kPa. Cada ciclo com o período de 24 horas. Para este ensaio foram utilizadas amostras retiradas de três pontos da encosta (P-03, P-05 e P-07) na profundidade de 1 metro, onde as amostras foram ensaiadas na condição natural e inundada.

#### **3.4.7 Ensaio de resistência ao cisalhamento direto**

Os ensaios de resistência têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais, quando se deseja verificar aspectos relativos sobre o comportamento mecânico dos solos. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE. Foi utilizada a prensa de cisalhamento direto produzida pela Ronald Top S/A, com sistemas de cargas através de pesos em pendural (carregamento vertical). A Figura 37 apresenta o equipamento utilizado.

Figura 37 – Prensa de cisalhamento analisando a amostra



Fonte: O autor (2022).

Os corpos de prova foram obtidos através da cravação do moldador com auxílio de um bloco de madeira. Foram realizados ensaios condição não saturada (natural) e saturada (inundada), sendo nove corpos de prova em cada condição. Nos ensaios saturados, os corpos de prova foram inundados previamente através do preenchimento de água circundando a caixa de cisalhamento. Já os corpos de prova sujeitos a condição de não saturada os procedimentos gerais seguiram as recomendações de Head (1980).

Foram aplicadas as tensões normais de: 50, 100, 150 e 200 kPa, sendo aplicadas e mantidas até a estabilização dos deslocamentos. O procedimento foi realizado considerando a velocidade constante de 0,483 mm/min. Vale salientar que o critério de ruptura foi baseado nos valores de pico da tensão cisalhante ou nos valores máximos, quando a curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal não apresenta picos bem definidos. Após o cisalhamento, o ensaio era desmontado e determinada à umidade final do corpo de prova.

### 3.4.8 Inderbitzen modificado

#### a) Construção e adaptação

O ensaio de Inderbitzen foi idealizado por Inderbitzen em 1961 (FACIO, 1991), que originalmente consiste em um aparelho cujo princípio de funcionamento se baseia

no escoamento de uma lâmina d'água sobre uma rampa, de maneira que uma amostra de solo indeformada, posicionada tangencialmente ao plano da rampa em sua extremidade inferior, seja atingida uniformemente por esta lâmina, ocasionando erosão superficial no solo por um tempo determinado. A inexistência de uma norma para o ensaio, bem como a limitação de estudos mais detalhados, tornou necessário fazer adaptações e planejamentos para a realização do ensaio. Diante disto, o ensaio de Inderbitzen adotado possui modificações de acordo com o equipamento proposto por Gonçalves e Silva (2019). A Figura 38 apresenta o Inderbitzen modificado.

Figura 38 – Modelo de nderbitzen proposto por Gonçalves e Silva (2019)



Fonte: O autor (2022).

O modelo em questão empregou um chuveiro circular para a simulação da precipitação, onde o diâmetro do chuveiro é superior ao diâmetro da amostra ensaiada, garantindo que a amostra fosse submetida ao impacto uniformemente, distribuído da água em toda a sua superfície. Foi adotada uma altura para o chuveiro de 20 cm, contribuindo para uma simulação mais adequada. A estrutura do equipamento foi em PVC e tem uma grelha fixada a ela, servindo como superfície de apoio da amostra e possibilitando os ajustes das inclinações. A Tabela 7 apresenta os materiais e respectivas quantidades utilizadas no equipamento.

Tabela 7 – Materiais utilizados no Inderbitzen modificado

Material	Quantidade
Tubo Soldável PVC de 32 mm	6 m
Tê soldável de 32 mm	8 unid.
Tê de redução galvanizado 1.1/4" x 1" x 1.1/4"	1 unid
Joelho 90° soldável de 32 mm	4 unid.
Adaptador soldável curto com bolsa e rosca de 25 x 3/4"	1 unid
Bucha de redução soldável curta de 32 x 25	1 unid.
Luva de redução soldável e com rosca 32 x 3/4"	1 unid.
Rosca 32 x 3/4"	1 unid.
Nípel roscável 3/4"	1 unid.
Abraçadeira de nylon 4,8 mm x 400 mm	2 unid.
Engate rápido para mangueira 1/2"	1 unid.
Conector macho para engate rápido 3/4"	1 unid.
Grelha	1 unid.
Mangueira	10 m
Forma de inox	1 unid

Fonte: Adaptado de Gonçalves e Silva (2019).

#### b) Procedimento do ensaio

O procedimento do ensaio se baseia no fluxo de água com vazões pré-estabelecidas, sendo transmitas na amostra através da simulação de chuva e a coleta do material erodido em intervalos de tempo determinados. O sistema de coleta do material erodido é feito por um conjunto de peneiras com malhas 2,0 mm (peneira # 10); 0,42 mm (peneira # 40); 0,15 mm (peneira # 100) e 0,074 mm (peneira # 200).

As variáveis adotadas para a realização dos ensaios foram:

Vazões: 1,8 l/min; 3,0 l/min e 3,6 l/min;

Inclinação da grelha: 0°, 35°, 38° e 40°;

Condições de umidade das amostras: naturais, seca ao ar e inundadas.

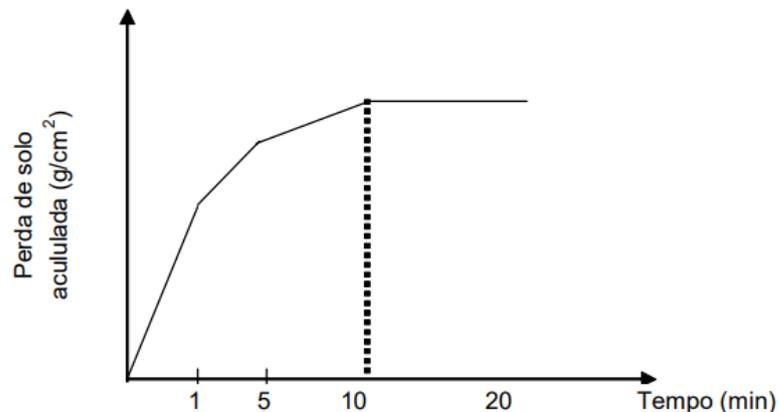
As vazões utilizadas foram estabelecidas levando em consideração as limitações do equipamento, tendo em vista que com vazões inferiores não permitem uma distribuição adequada para a amostra. Já as inclinações foram definidas de acordo com a topografia da encosta. As condições de umidade levaram em contas as variações sazonais em que a encosta está sujeita.

As amostras na condição de umidade seca ao ar ficaram exposta por no mínimo 72 horas. Amostras pré-umidecidas foram depositadas em um depósito sobre pedras porosas sendo inserido água até o nível correspondente a metade da espessura da pedra porosa. Este processo considera o umidecimento por ascensão capilar por no mínimo 24 horas.

Após estabelecer a condição de umidade, a amostra foi fixada no equipamento e o material erodido foi coletado nos tempos de 1 min, 5 min, 10 min, 15 min e 20 min. Em cada intervalo as amostras passaram pelas sequências de peneiras. O material retido em cada peneira foi levado para estufa e após 24 horas foi determinado o seu peso.

Os pesos dos solos secos foram relacionados com a área da amostra e com isso foi determinado a perda acumulada. A Figura 39 apresenta uma curva típica de perda acumulada ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) versus tempo de ensaio (min).

Figura 39 – Curva típica de perda de solo acumulada versus o tempo



Fonte: Lafayette (2006).

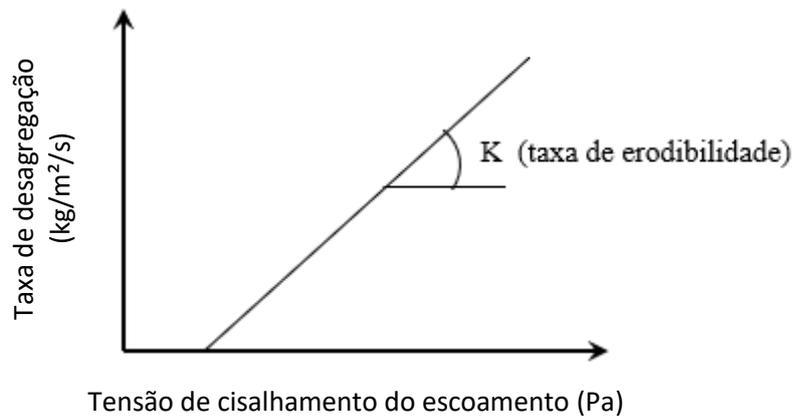
Em seguida a tensão cisalhante foi determinada considerando a rampa de coleta do material erodido. Esta rampa foi instalada abaixo da grelha e foi condicionada as mesmas inclinações. A Equação 12 apresenta a determinação da tensão cisalhante.

$$\tau_h = \gamma_w h d \quad (\text{Equação 12})$$

Onde  $\tau_h$  = tensão cisalhante hidráulica;  $\gamma_w$  = peso específico da água ( $\text{KN/m}^3$ );  
 $h$  = altura da lâmina de fluxo (m);  $d$  = declividade da rampa (m/m).

Por fim, a taxa de desagregação ( $\text{Kg/m}^2/\text{s}$ ) é relacionada com a tensão cisalhante hidráulica, linhas de tendências foram geradas a partir dos resultados encontrados e com elas são determinadas a tensão cisalhante hidráulica crítica ( $\tau_{\text{crít}}$ ) e a taxa de erodibilidade ( $K$ ), representando o gradiente da perda de solo em relação as tensões hidráulicas aplicadas. A Figura 40 apresenta o ajuste da reta na qual são estimadas a erodibilidade e a tensão cisalhante hidráulica crítica.

Figura 40 – Identificação da taxa de desagregação e a tensão de cisalhamento do escoamento.



Fonte: Adaptado de Bastos (1999)

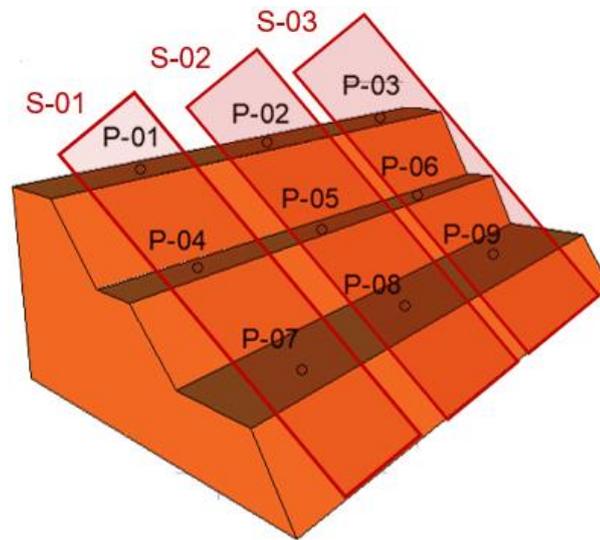
#### 4 COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DOS SOLOS

As análises e discussões dos resultados da encosta são divididas em três seções verticais S-01 (solos coletados em P-01, P-04 e P-07), S-02 (solos coletados P-02, P-05 e P-08) e S-03 (solos coletados P-03, P-06 e P-09), Figura 41a e Figura

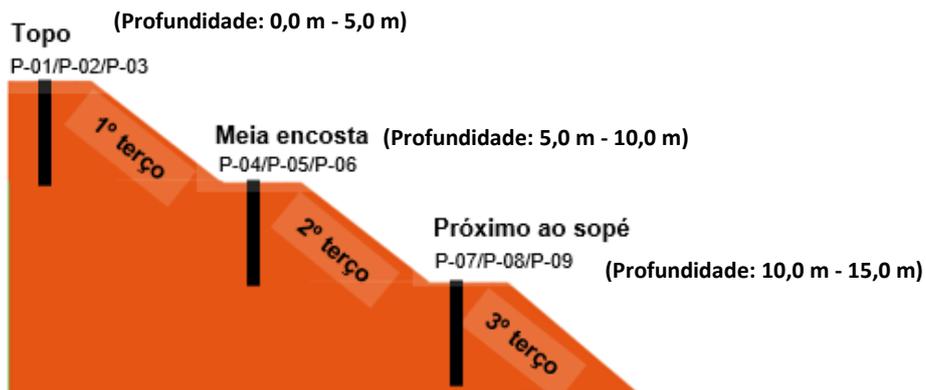
41c. Os resultados e perfis de solo das seções as amostras são consideradas contínuas em seção. A coleta das amostras na vertical foi realizada no topo de cada patamar. Do topo ao sopé as análises dos solos são divididas em três terços com aproximadamente 5 m. O primeiro terço, superior (do topo da encosta a 5,0 m de profundidade), o segundo na meia encosta (de 5,0 m a 10 m) e o terceiro próximo ao sopé (10 m a 15 m), Figura 41b.

Figura 41 – Detalhes da encosta: a) Seções da encosta. b) Esquema lateral. c) Perfil horizontal

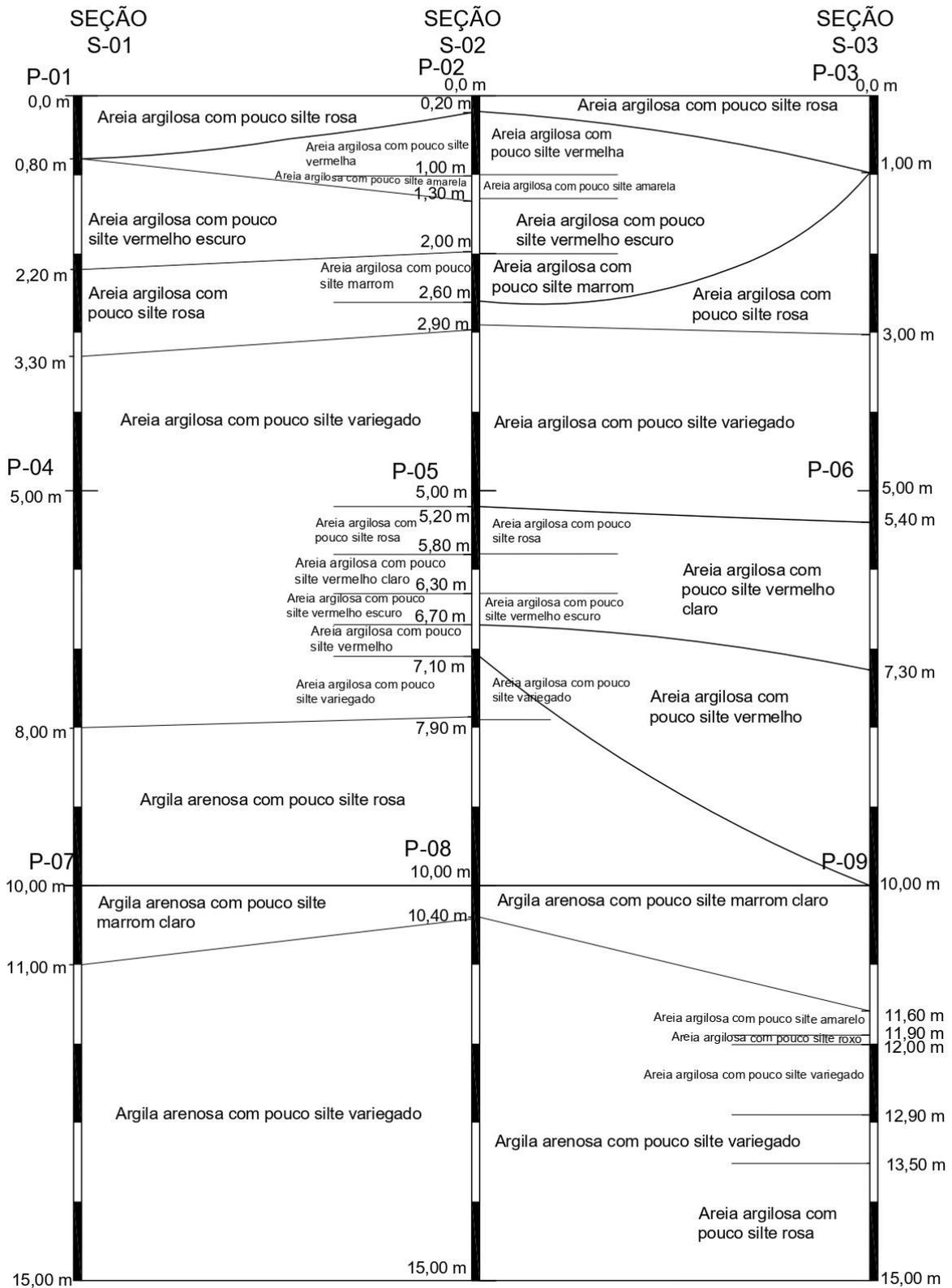
a)



b)



c)

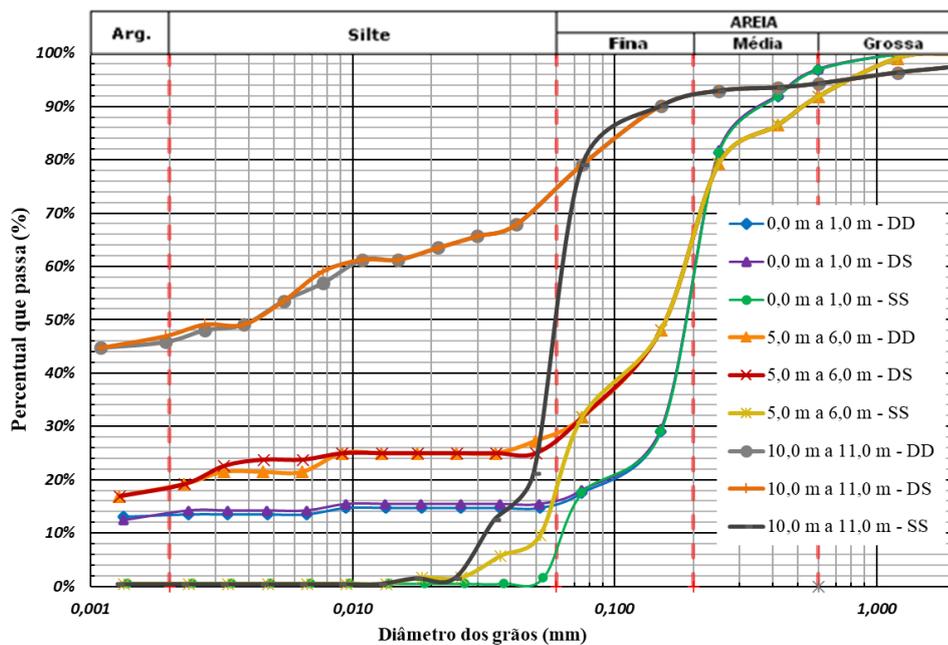


Fonte: O autor (2022).

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

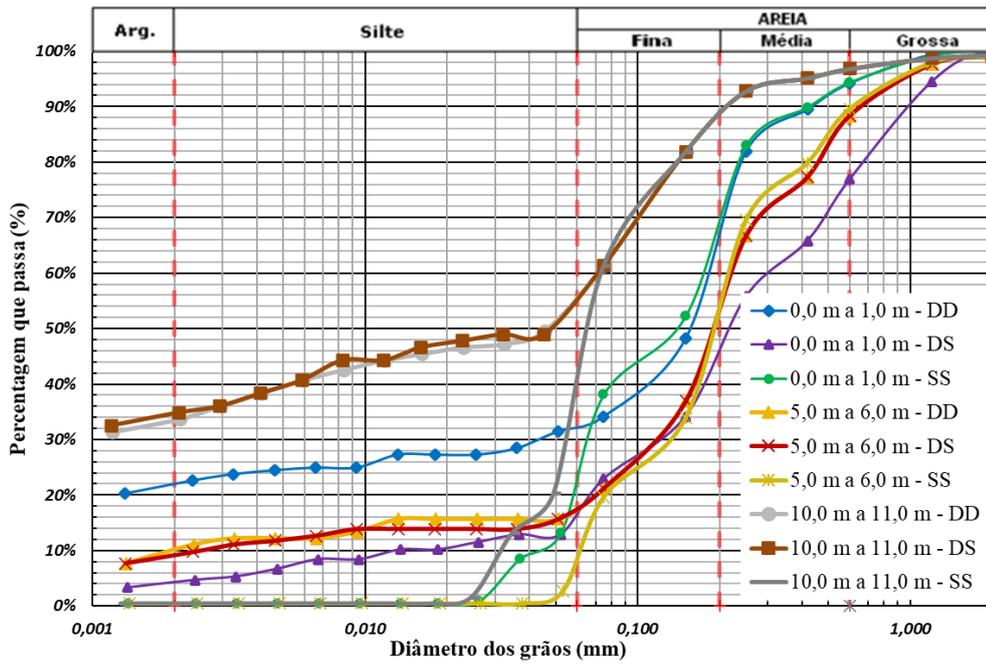
As curvas granulométricas dos solos de todas as profundidades coletadas das seções S-01 (P-01, P-04 e P-07), S-02 (P-02, P-05 e P-08) e S-03 (P-03, P-06 e P-09) utilizando defloculante e dispersor (DD); utilizando defloculante e sem dispersor (DS) e sem defloculante e sem dispersor (SS) são apresentadas no Apêndice A (Figura A1, Figura A2 e Figura A3). As Figuras 42, 43 e 44 apresentam as curvas granulométricas nas seções em S-01(P-01, P-04 e P-07), S-02 (P-02, P-05 e P-08) e S-03 (P-03, P-06 e P-09) das camadas iniciais do Topo (entre 0,0 m a 1,0 m, da Meia Encosta (entre 5,0 m a 6,0 m) e Próximo ao Sopé (entre 10,0 m a 11,0 m). As frações dos solos e os valores dos limites de consistência são apresentados no Apêndice B. A Figura 45 apresenta a carta de atividade/plasticidade das amostras dos solos.

Figura 42 – Curvas Granulométricas – Seções 01/ Profundidades



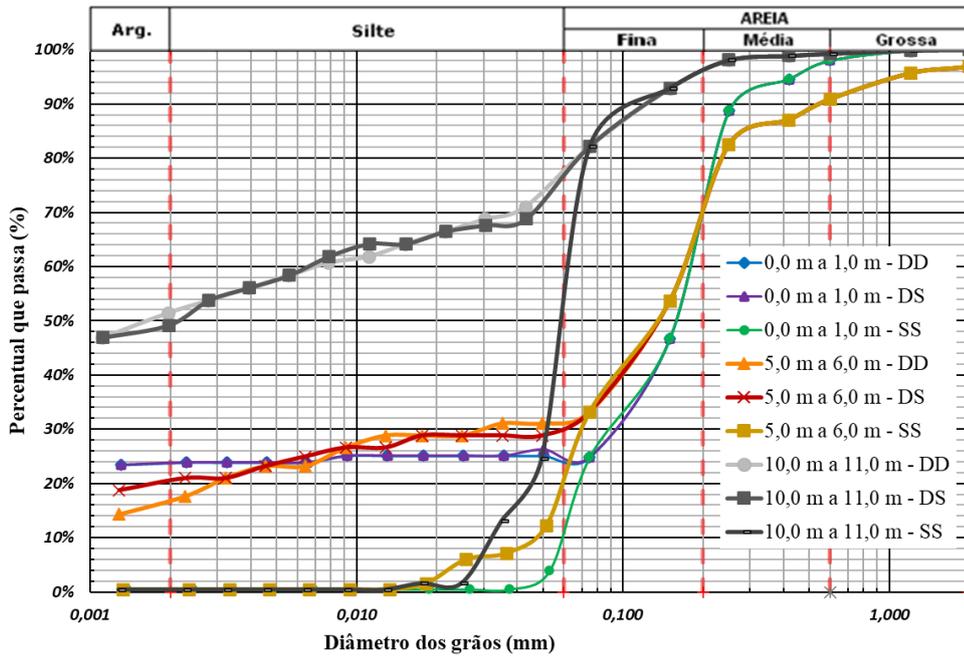
Fonte: O autor (2022).

Figura 43 – Curvas Granulométricas – Seções 02/ Profundidades



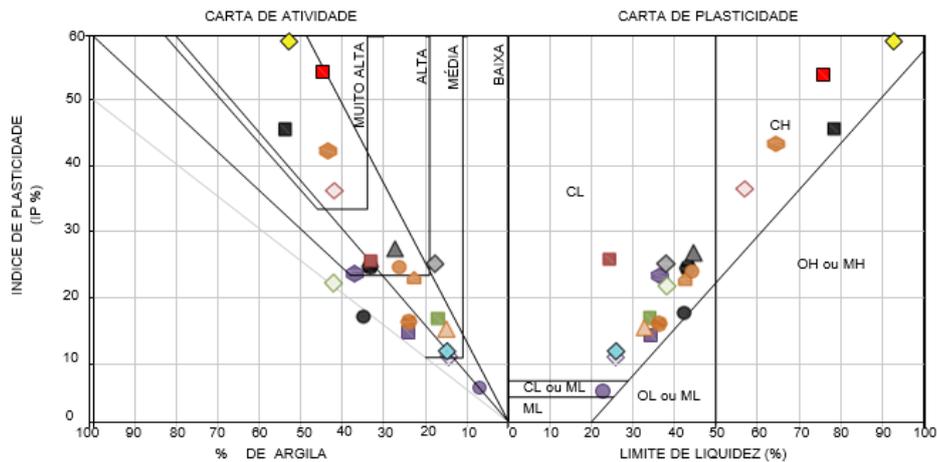
Fonte: O autor (2022).

Figura 44 – Curvas Granulométricas – Seções 03/ Profundidades



Fonte: O autor (2022).

Figura 45 – Carta de atividade/plasticidade das amostras.



Amostras / Profundidades (m)						
P-01 ◇ (0,80 - 2,20)	P-02 ■ (0,0 - 0,20) ◇ (0,20 - 1,00) ● (2,00 - 2,60) ● (2,90 - 5,00)	P-04 ■ (5,0 - 8,00) ◇ (8,00 - 10,0)	P-05 ▲ (5,80 - 6,30) ● (6,30 - 6,70) ● (6,70 - 7,10) ● (7,10 - 7,90) ● (7,90 - 10,00)	P-07 ■ (10,0 - 11,00) ◇ (11,0 - 15,00)	P-08 ■ (10,0 - 10,4) ◇ (10,4 - 15,0)	P-09 ■ (10,0 - 11,60) ◇ (11,60 - 11,9) ▲ (11,90 - 12,0) ● (12,0 - 12,90) ● (12,90 - 13,5)

Fonte: O Autor (2022).

É verificado um percentual de solo mais arenoso na região do Topo da Encosta (profundidade entre 0 m e 5,0 m) nas três Seções, demonstrando características de Formação Barreiras semelhantes às curvas apresentadas por Meira (2008). Na Meia Encosta (profundidade entre 5,0 m e 10,0 m), as curvas demonstram um aumento da fração argilosa, que por sua vez se torna mais presente nas regiões Próximo ao Sopé da encosta (profundidade ente 10,0 m e 15,0 m).

A influência da granulometria em termos dos coeficientes de uniformidade ( $C_u$ ) e de curvatura ( $C_c$ ), demonstram que as Seções S-01 e S-03 apresentam solos mais uniformes, sendo considerados como solos erodíveis devido a faixa demonstrar solos mais granulares, Hénensal (1987). A Seção S-02 identifica uma variação de solos desuniformes na Meia Encosta. Solos desuniformes também são considerados suscetíveis ao desencadeamento dos processos erosivos tendo em vista a variação de estruturas do solo, Couto (2015). A Tabela 8 apresenta as curvas de uniformidade e curvatura da encosta.

Tabela 8 – Coeficientes de Uniformidades e de Curvaturas.

Seção	Profundidade	Condição	Coefficiente de uniformidade (Cu)	Coefficiente de curvatura (Cc)
S-01	0,0 m a 1,0 m	DD	-	-
		DS	-	-
		SS	3,3	0,09
	5,0 m a 6,0 m	DD	-	-
		DS	-	-
		SS	2,2	0,01
	10,0 m a 11,0 m	DD	-	-
		DS	-	-
		SS	2	0,01
S-02	0,0 m a 1,0 m	DD	-	-
		DS	16,7	0,33
		SS	4,1	0,02
	5,0 m a 6,0 m	DD	100,0	1,69
		DS	104,8	1,51
		SS	3,5	0,07
	10,0 m a 11,0 m	DD	-	-
		DS	-	-
		SS	2,3	0,01
S-03	0,0 m a 1,0 m	DD	-	-
		DS	-	-
		SS	3,0	0,02
	5,0 m a 6,0 m	DD	-	-
		DS	-	-
		SS	2,8	0,01
	10,0 m a 11,0 m	DD	-	-
		DS	-	-
		SS	2,0	0,01

Fonte: O autor (2022).

Observa-se que, com o procedimento de não utilização do defloculante nos ensaios de granulometria, ocorre uma diferença nos percentuais de partículas do solo constituintes em cada ponto. Nas curvas que não se utilizou o hexametáfosfato de sódio, houve um aumento na porcentagem de areia e decréscimo na fração argilosa.

O defloculante tem a função de neutralizar as cargas elétricas nas partículas menores no solo. As partículas eletricamente carregadas produzem partículas artificialmente maiores devido à atração entre elas.

Em relação à plasticidade dos solos, a Seção S-01 apresenta em suas camadas uma variação entre areia argilosa (SC) e areia siltosa (SM) nas regiões do Topo e da Meia Encosta (até 10,0 m de profundidade), com menos de 50% passando na peneira # 200 (19% a 49%), exceto na camada inicial em P-01 (até 0,8 m de profundidade) que é não plástica (NP). Na região Próximo ao Sopé, as camadas entre 10 m e 15 m de profundidade de S-01 são classificadas como CH (argila com alta plasticidade) com percentual de argila entre 63% e 71%. Em S-02 as camadas se alternam na classificação entre camadas NP, SM e SC.

A Seção S-02 também apresenta alguns trechos classificados como CL (argila com baixa plasticidade) com percentuais de argila entre 20% e 50%, nas profundidades de 2,9 m a 5,0 m e 7,9 m a 10,4 m, e CH entre 10,4 e 15 metros de profundidade. Na Seção S-03 as regiões do Topo e da Meia Encosta (até 10 metros) apresentam camadas não plásticas, no entanto, na região Próximo ao Sopé da encosta as camadas variavam o grau de plasticidade, com trechos classificados como CH (entre 10,0 m e 11,6 m), CL (entre 11,6 m e 11,9 m) e SC (entre 11,9 m e 13,5 m). A última camada de S-03 (entre 13,5 m e 15,0 m) é considerada não plástica.

Os solos do Topo da Encosta e da Meia Encosta apresentam a classificação SC e/ou SM, que corrobora com os estudos apresentados na Tabela 9. Os solos da Formação Barreiras são classificados em sua maioria (85%), como solos grossos pertencentes aos Grupos SC (areia argilosa) e SM (areia siltosa); quando classificados como solos finos, encontram-se no Grupo CL (argilas arenosas), Gusmão Filho et al. (1986), Coutinho et al. (1999), Lafayette (2000), Lima (2002), Bandeira (2003), Coutinho e Silva (2005), Lafayette (2006), Silva (2007), Meira (2008), Magalhães (2013).

Local	Referência	Prof. (m)	Descrição do solo	IP (%)
Itamaracá	Este estudo	0,0 – 15,0	Areia argilosa *	10 – 18
Recife	Lima (2002)	1,3	Argila arenosa	16
	Coutinho et al. (2006)	0,0 -5,0	Areia argilosa e siltosa	10 – 16
	Santana (2006)	0,0 – 3,3	Areia argilosa	7 – 12
	Meira (2008)	0,15 – 1,0	Areia siltosa	7,9 – 9,2
	Lafayette (2000)	-	Areia argilosa	11 -18
Camaragibe	Bandeira (2003)	0,5 – 5,0	Areia argilosa	14 – 16
	Silva (2007)	1,5 -6,3	Areia argilosa	12 – 14
	Magalhães (2013)	0,0 – 2,0	Argilas Silto-arenosas	12 – 14
	Souza (2014)	0,0 – 1,5	Argilas arenosas	22 – 33
Cabo de Santo Agostinho	Lafayette (2006)	0,5 – 6,0	Areias argilosas e siltosas	4 -13
Abreu e Lima	Silva (2016)	0,0 -4,0	Areias siltosas e argilosas	8 – 17

Fonte: O autor (2022).

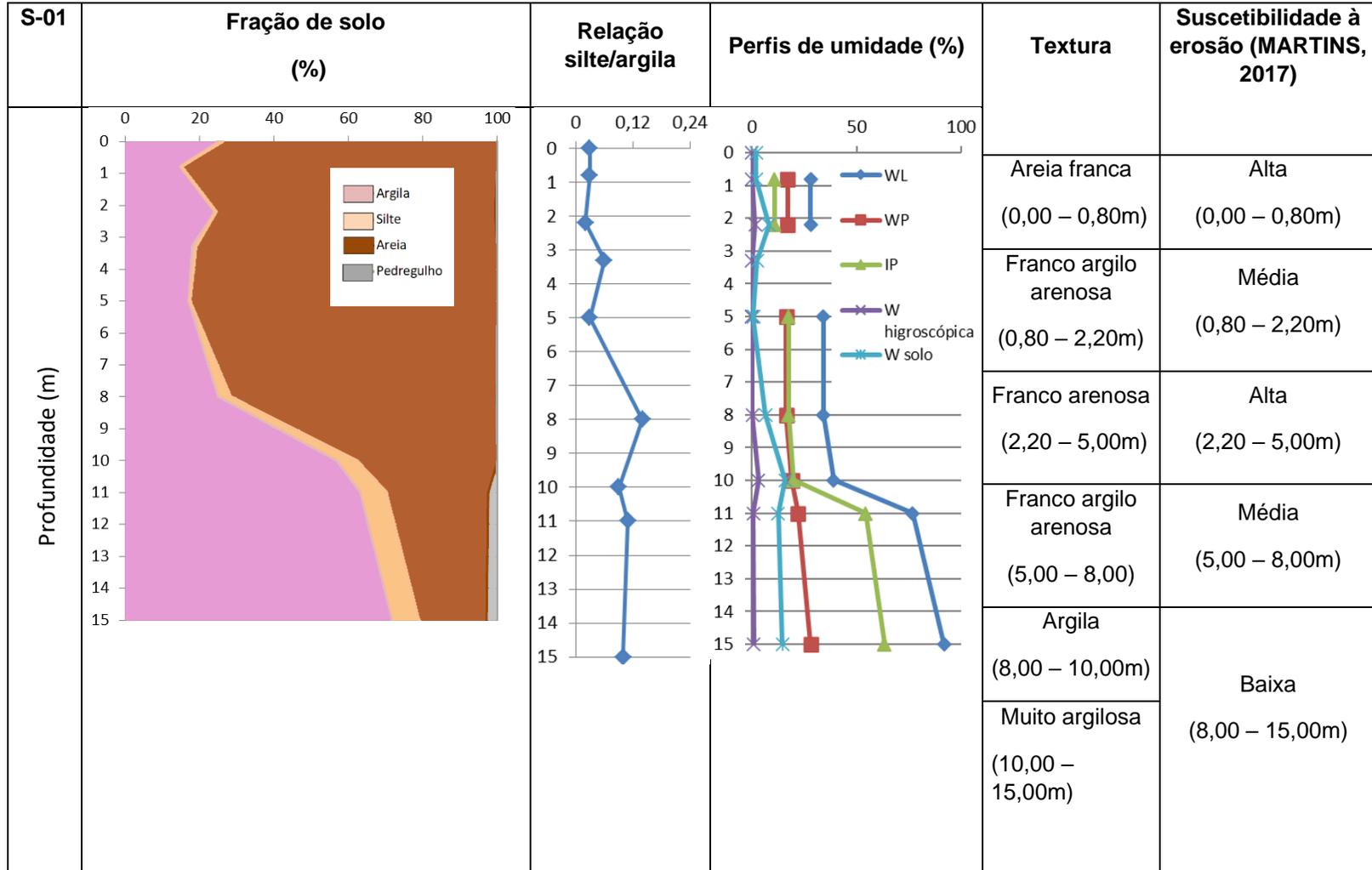
\*A maioria das camadas de solo apresenta esta classificação.

A Figura 46 apresenta o perfil de solo da Seção 01, que agrupa as informações dos solos coletados nas sondagens a trado P-01, P-04 e P-07 e contém informações da granulometria, relação silte/argila, umidade, limites de consistência, classificação da textura (Santos et al., 2013) e a suscetibilidade à erosão pelo critério de Martins (2017). O solo é predominantemente arenoso do topo até 8 m com um percentual acima de 70 %, com pouco silte (em torno de 5%) e uma fração arenosa inferior a 25%. Após 8,0 m a fração areia diminui atingindo 22% em 15 m de profundidade (limite da investigação) e as frações silte e argila crescem com a profundidade. O percentual da argila a 8,0 m é 25% e a 15 m corresponde a 60%. No Primeiro Terço da encosta (do topo a 5,0 m de profundidade) a relação silte/argila varia de 0,02 a 0,06, no Segundo Terço (5,0 m a 10 m varia de 0,03 a 0,14) e no Terceiro Terço (10 m a 15 m) varia de 0,09 a 0,11. A relação silte/argila cresce com a profundidade. As texturas dos solos são classificadas como sendo areia franca (de 0 m à 0,8 m), franco arenosa (2,20 m à 5,00 m), franco argilo arenosa (0,80 m à 2,20 m e 5,0 m à 8,00 m), argila (8,00 à 10,00) e muito argilosa (10,00 à 15,00). A suscetibilidade a erosão, segundo Martins (2017), mostra que as texturas apresentadas pelos solos da seção S-01

identificam suscetibilidade à erosão variando entre média e alta até os 8,00 m, e passa a ser baixa de 8,0 m até 15 metros.

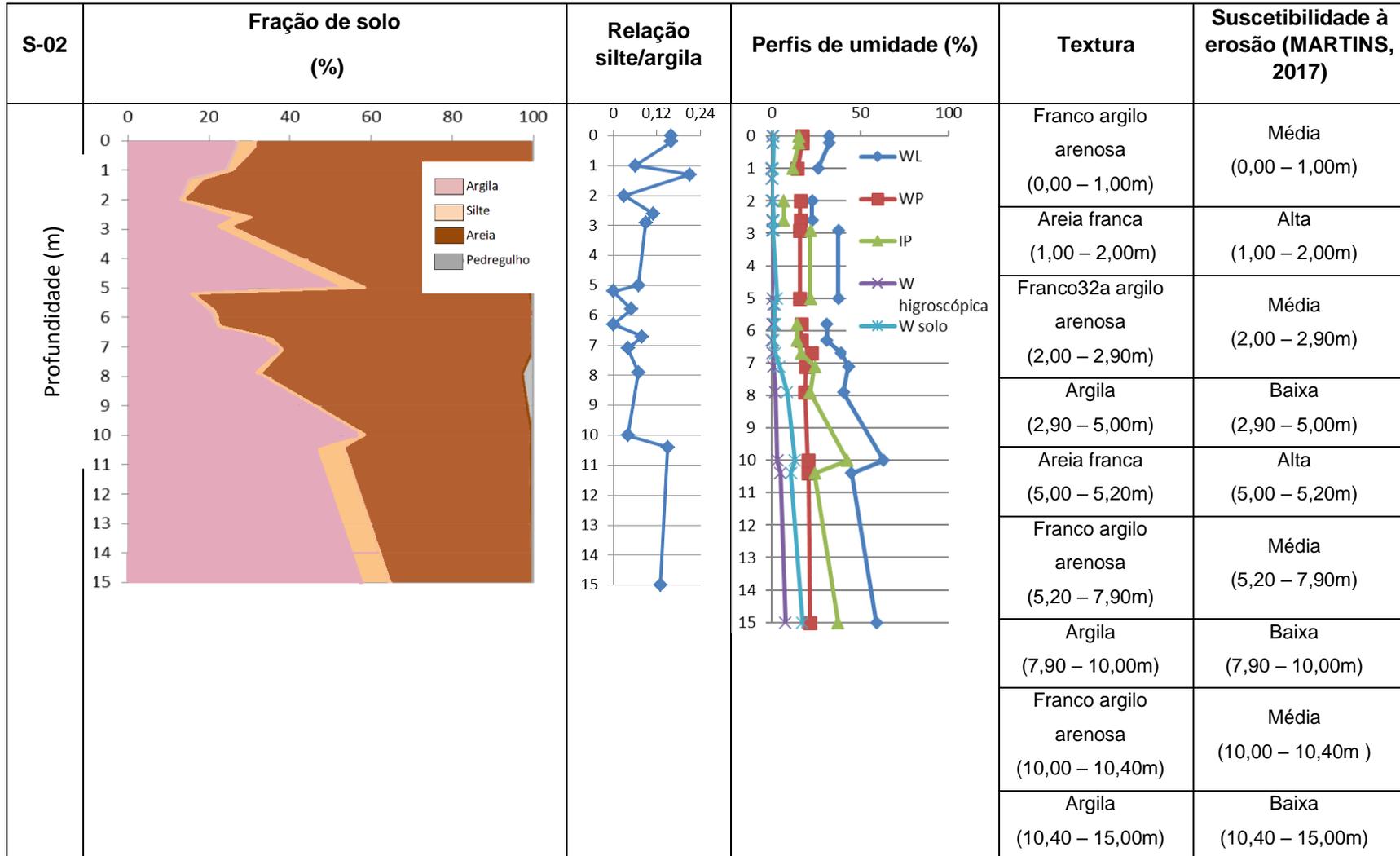
A Seção S-02 (Figura 47) apresenta uma tendência de frações maiores de areia partindo da superfície, e neste caso, chegando até cerca de 10 metros com percentuais em torno de 60%, apresentou pouco silte e a fração argila próxima a 40%. Entre 10 e 15 metros a fração areia diminuiu para valores próximos a 40%, variação menos expressiva que na seção S-01. As frações de silte e argila cresceram neste trecho, com valores em torno de 7% e 50%, respectivamente, sendo o mesmo percentual de silte encontrado em S-01. A relação silte/argila segue o comportamento de S-01, o que pode ser justificado tendo em vista que os valores do silte e da argila apresentam dados bem próximos. Na S-02 os valores variam em um intervalo de 0 e 0,21 de 0 à 10 m. Nos intervalos de 2,90 à 5,00 m; 7,90 à 10,00 m; e 10,40 à 15,00 m, os solos são classificados como argilosos, possuindo por isso baixa suscetibilidade à erosão. Nas duas faixas de profundidade (entre 1,00 m à 2,00 m e entre 5,00 m à 5,20 m) o solo é considerado uma areia franca, com suscetibilidade alta à erosão. A Figura 48 apresenta a caracterização em S-03.

Figura 46 – Caracterização física do solo e suscetibilidade à erosão em S-01.



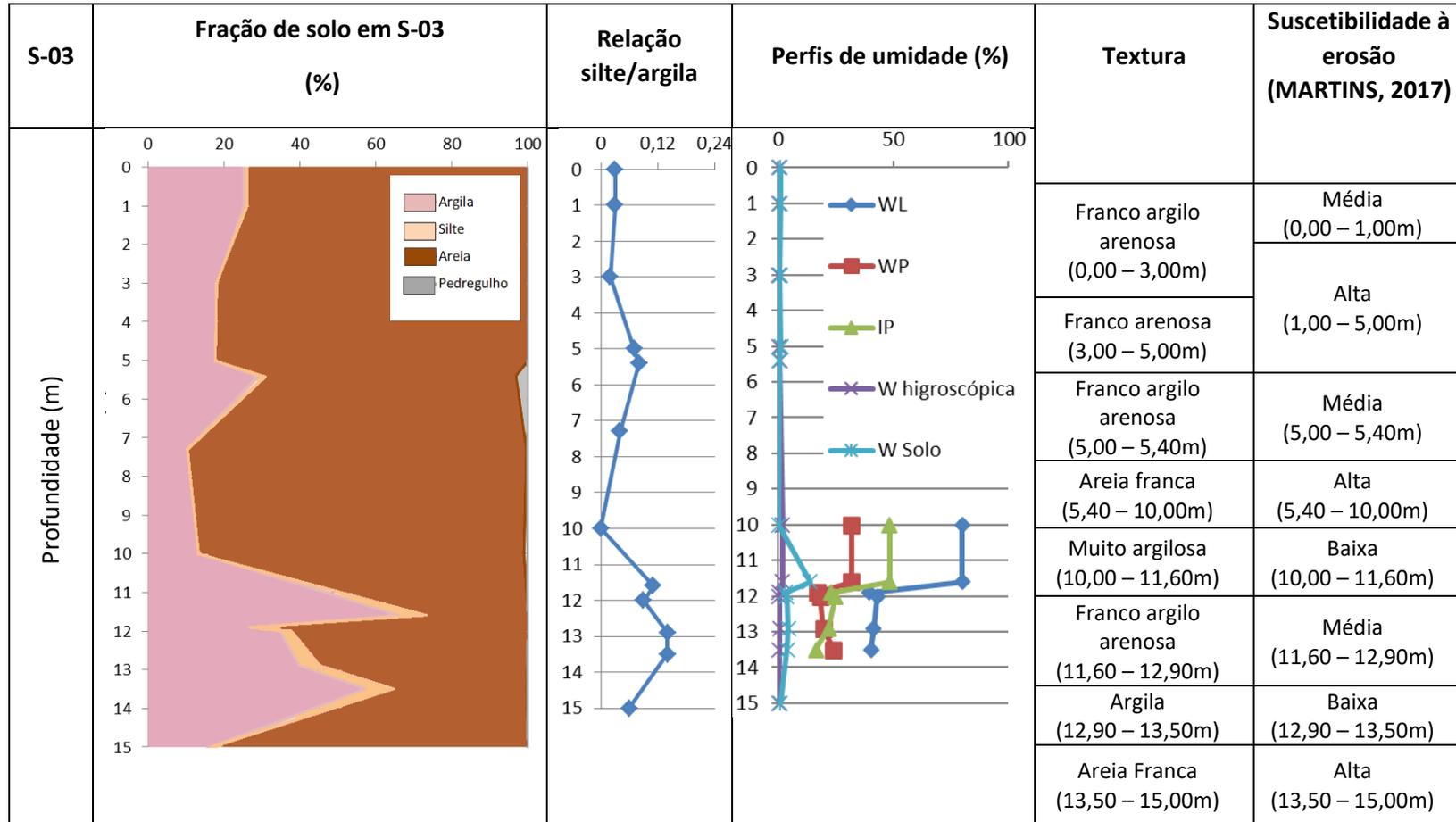
Fonte: O autor (2022).

Figura 47 – Caracterização física do solo e suscetibilidade à erosão em S-02.



Fonte: O autor (2022).

Figura 48 – Caracterização física do solo e suscetibilidade à erosão em S-03.



Fonte: O autor (2022).

Na Seção S-03 (Figura 48) apresenta frações arenosas da superfície até cerca de 10 metros com mais de 80% de areia, maior percentual entre as seções, mantendo valores baixos de silte e argila. Após 10,0 m a fração areia diminuiu quase a metade do seu valor (45% em 15 m) e cresceu a fração argila. A relação silte/argila mostra que de 0 à 10,00 m variam pouco, tendo um leve aumento entre 5,00 m e 5,40 m. Após 10 metros são apresentados solos com valores maiores (em torno de 0,14), sem grandes variações. As texturas apresentadas na seção S-03 possuíam classificações que se alternavam entre as camadas, predominando as susceptibilidades médias (0,0-1,0 m; 5,0 m – 5,4 m; 11,6 m -12,9 m) e altas (1,0 m – 5,0 m; 5,4 m – 10,0 m) à erosão (MARTINS, 2017)

As três seções apresentam na maioria das suas camadas, susceptibilidade alta à erosão tendo em vista que as amostras apresentam teores elevados de areia e baixos teores de argila (< 25%) (MARTINS, 2017). Também se observa que a susceptibilidade alta está posicionada nas camadas mais próximas à superfície, as últimas camadas apresentam baixa susceptibilidade à erosão, visto que os teores de argila são maiores de 40% em todas suas camadas.

No Primeiro e Segundo Terço da encosta, do topo até 9,0 m de profundidade, o solo é predominante arenoso (> 50%) exceto em S-02 entre 4,0 e 5,0 m. O talude nesta região possui tonalidades com coloração viva e que variam desde marrons, vermelhas, rosas até amarelas (IBGE, 2007). No Terceiro Terço há predominância de argila (> 50%) o que, segundo Meira (2008), indica uma área menos erodível exceto em S-03 entre 13,50 e 15, 0 m que há predominância areia.

A relação silte/argila é um indicador do grau de intemperismo do solo e de susceptibilidade à erosão (PORTELA et al., 2014). As relações de silte/argila dos solos de todos os locais variam entre 0 e 0,21, indicando alto grau de intemperismo de acordo com Marcatto (2017) por apresentarem valores inferiores a 0,7. Vale salientar que o processo de erosão do solo pode acontecer, através do transporte dos materiais produzidos pelo intemperismo.

Os solos da encosta são inativos ou de atividade normal segundo a classificação de Skempton (1953), exceto o solo entre as profundidades de 11,60 a 11,90 m da S-03 e P-09 que tem é ativo. Considerando a classificação de Van Der Merve (1964) quanto a susceptibilidade a expansão os solos do Primeiro Terço da encosta são de baixa expansividade com maiores indicações aos solos de P-05 entre as profundidades de 6,70 m a 10,00 m e os solos do Terceiro Terço da encosta

apresentam suscetibilidade à expansão média a muito alta. Os resultados evidenciam que a suscetibilidade à expansão cresce de baixo a muito alto com a profundidade segundo a classificação de Van Der Merve (1964) e passa de inativo a atividade normal a medida que se tornam mais profundo segundo a classificação de Skempton (1953).

Em suma, verifica-se que perfil de solo da encosta é constituído por camadas de areia, areia argiloso, argila arenosa e siltes. Nos primeiros dois terços da encosta (0-10 m) o solo é predominantemente arenoso e do terceiro terço predomina argila. A relação entre o LL e o IP está compreendida entre a Linha A [ $IP = 0,73 (LL - 20)$ ] e abaixo da Linha U [ $IP = 0,9(LL-80)$ ]. A suscetibilidade a expansão cresce do topo da encosta para o sopé segundo a classificação de Van Der Merve (1964) e passa de inativo a atividade normal segundo a classificação de Skempton (1953).

## 4.2 ANÁLISE MINERALÓGICA

A análise mineralógica qualitativa da fração granular foi realizada por microscopia ótica e mineralogia da fração argila realizada por difração de raio-X.

### a) Mineralógica qualitativa da fração granular

A Figura 49 apresenta micrografias da fração de areia das camadas superficiais. A análise qualitativa mostra que são mal selecionadas (grãos com várias dimensões) e com grau de arredondamento de angular a subangular, indicando que o material não se distanciou da sua rocha de origem. A mineralogia essencial é representada em todos os pontos por quartzos hialinos, sendo alguns revestidos por películas de óxido de ferro, com uma tonalidade avermelhada, decorrentes, provavelmente, da alteração dos minerais opacos.

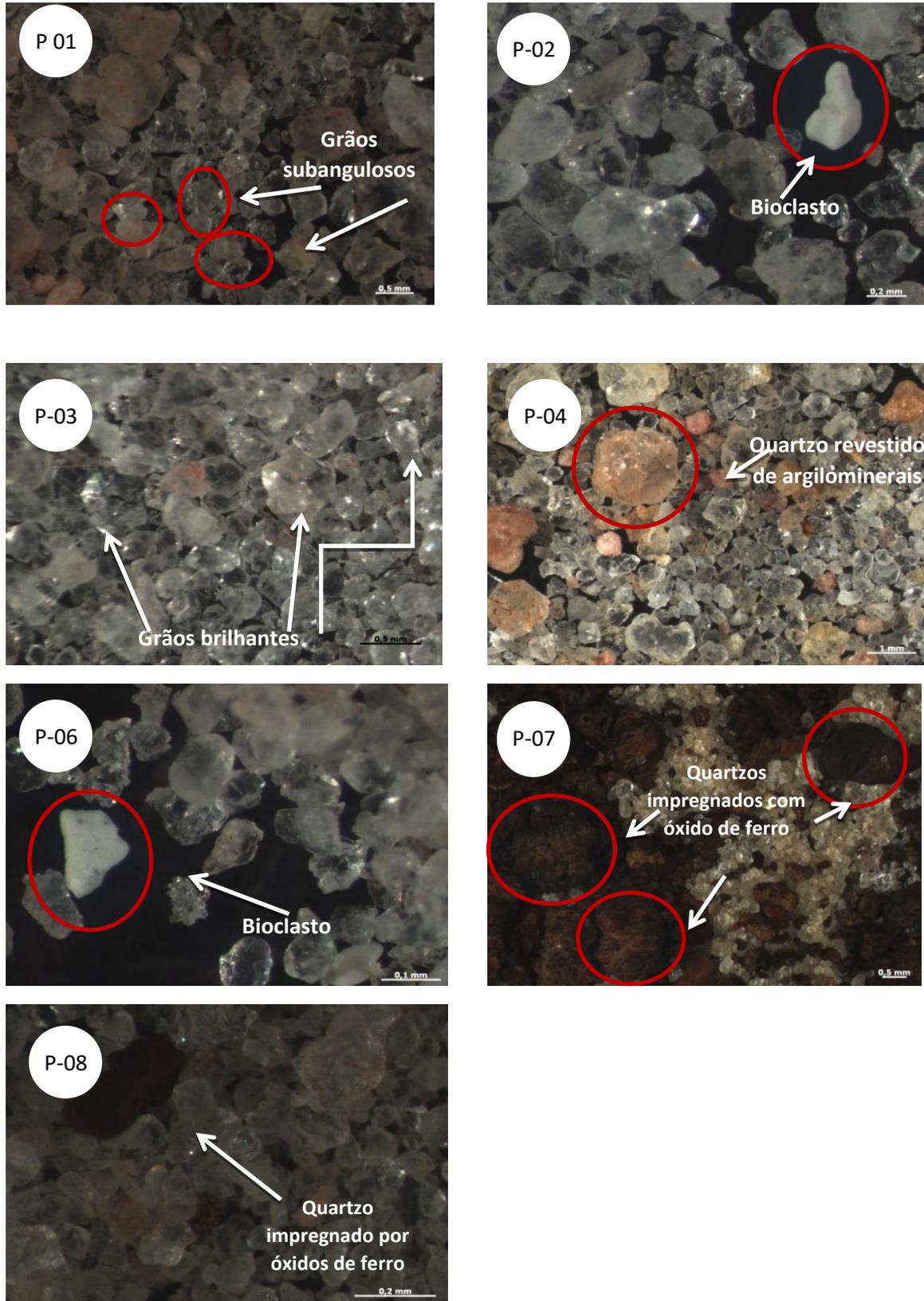
A presença de elementos como argilominerais, óxidos e hidróxidos de ferro fragmentados, podem desencadear processos erosivos superficiais. De acordo com AliAsghar et al. (2014), os argilominerais e os óxidos de ferro são dominantes em comparação com os solos que têm baixa taxa de erodibilidade, como é o caso do quartzo, tendo em vista que os argilominerais geralmente envolvem os grãos de quartzo. Grandes quantidades de óxido e hidróxido de ferro podem auxiliar na formação de encrostamento superficiais, aumentando a capacidade do sedimento em resistir ao escoamento, Maier et al. (2013).

#### b) Mineralógica da fração Argila

As Figuras 50 a 58 apresentam os Difratogramas de Raio-X das nove amostras. A varredura utilizada em todas as amostras compreende o intervalo de 3° a 45°, pois verifica-se que este intervalo de varredura é suficiente para a identificação dos minerais presentes no material analisado. As amostras iniciais saturadas com Mg/Glicerol e Potássio na temperatura ambiente (25°) apresentam um alto grau de cristalinidade, com picos bem definidos. Os picos presentes nesses difratogramas conferem com os principais picos do padrão do mineral argílico Caulinita, indicando que este mineral está presente em todas as amostras.

São encontrados também interestratificação irregulares de mica e clorita e há presença de quartzo na fração argila. Resultados semelhantes são encontrados por Gusmão Filho et al. (1986), Lafayette (2006), Silva (2007), Meira (2008), Magalhães (2013), que também encontraram em solos de Formação Barreiras minerais de caulinita e quartzo. A Tabela 10 apresenta os resultados da mineralogia da fração argilosa.

Figura 49 – Micrografias da fração areia realizada pelo microscópio óptico.



Fonte: O autor (2022).

Tabela 10 – Resultados da difratometria.

<b>Localização na Encosta</b>	<b>Tratamento K-25 °C</b>	<b>Tratamento Mg-gI</b>	<b>Tratamento K-550 °C</b>	<b>Mineral argílico</b>
S-01 P-01	7,1 Å; 3,6 Å; 3,2 Å; 2,4 Å	7,1 Å; 3,6 Å; 2,4 Å	10,2 Å	Caulinita e Ilita
S-01 P-04	7,2 Å; 3,6 Å; 3,2 Å; 2,4 Å	10,2 Å; 7,2 Å; 3,6 Å; 2,4 Å	Amorfo	Caulinita e Ilita
S-01 P-07	7,2 Å; 4,2 Å; 3,6 Å; 3,2 Å; 2,4 Å	7,2 Å; 4,2 Å; 3,6 Å; 2,4 Å	10,2 Å; 3,5 Å; 3,4 Å; 2,5 Å	Caulinita, Ilita e Quartzo
S-02 P-02	7,2 Å; 3,4 Å; 2,4 Å	7,1 Å; 3,6 Å; 2,4 Å	10,3 Å; 3,5 Å; 3,4 Å	Caulinita, Ilita e Quartzo
S-02 P-05	7,2 Å; 3,6 Å; 3,1 Å; 2,4 Å	7,2 Å; 3,6 Å; 3,1 Å; 2,4 Å	10,1 Å; 3,5 Å; 3,3 Å	Caulinita, Ilita e Quartzo
S-02 P-08	7,2 Å; 4,2 Å; 3,6 Å; 2,4 Å	7,2 Å; 4,2 Å; 3,6 Å; 2,4 Å	3,3 Å; 2,9 Å	Caulinita e Quartzo
S-03 P-03	10,1 Å; 7,2 Å; 5,0 Å; 4,2 Å; 3,6 Å; 3,3 Å; 2,5 Å; 2,4 Å	11,7 Å; 10,7 Å; 7,2 Å; 3,6 Å; 2,4 Å	10,0 Å; 5,0 Å; 4,3 Å; 3,3 Å	Caulinita e Quartzo
S-03 P-06	7,2 Å; 4,2 Å; 3,6 Å; 2,4 Å	11,7 Å; 10,7 Å; 7,2 Å; 4,2 Å; 3,6 Å	10,1 Å; 4,2 Å; 3,3 Å; 2,7 Å; 2,5 Å	Caulinita, Ilita e Quartzo
S-03 P-09	9,2 Å; 7,3 Å; 7,1 Å; 4,0 Å; 3,6 Å; 3,2 Å; 2,7 Å; 2,4 Å	7,2 Å; 4,2 Å; 3,6 Å; 2,4 Å	9,9 Å; 3,5 Å	Caulinita e Quartzo

Fonte: Autor (2022).

Figura 50 – Difratoformas de raio-X, da Seção S-01 (P-01).

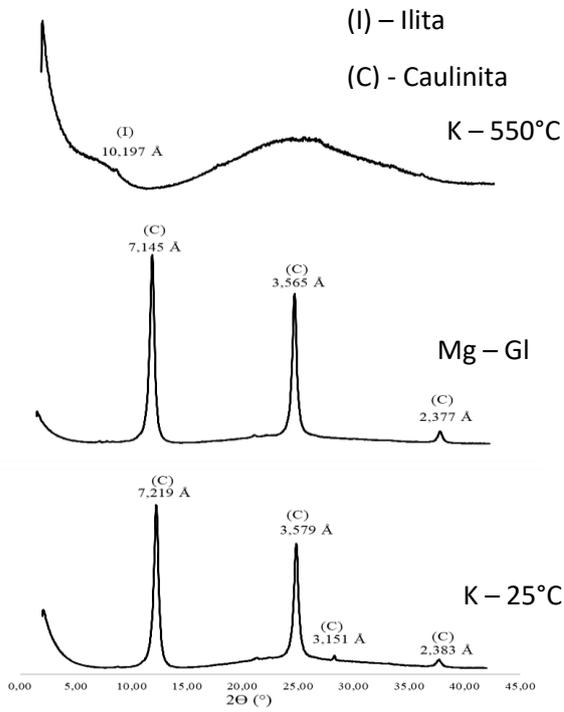


Figura 51 – Difratoformas de raio-X, da Seção S-01 (P-04).

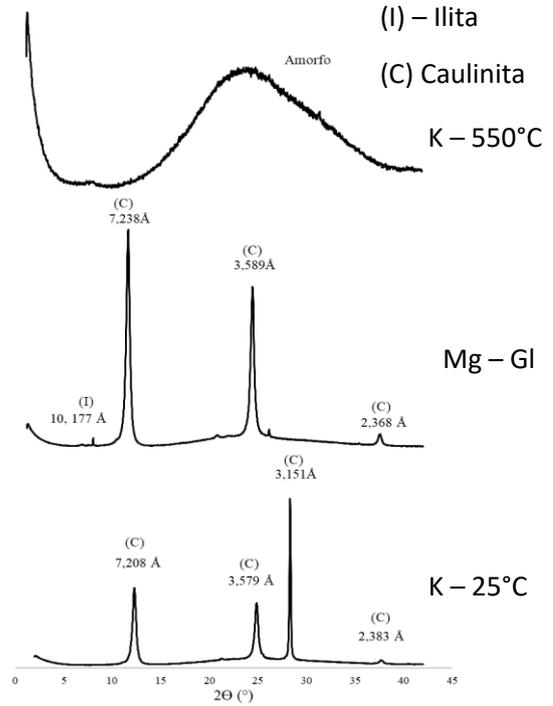


Figura 52 – Difratoformas de Raio-X, da Seção S-01 (P-07).

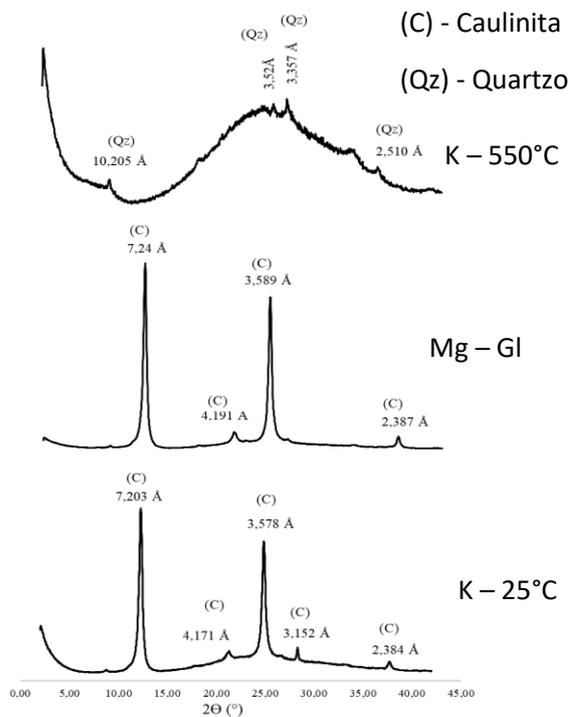


Figura 53 – Difratoformas de Raio-X, da Seção S-02 (P-02).

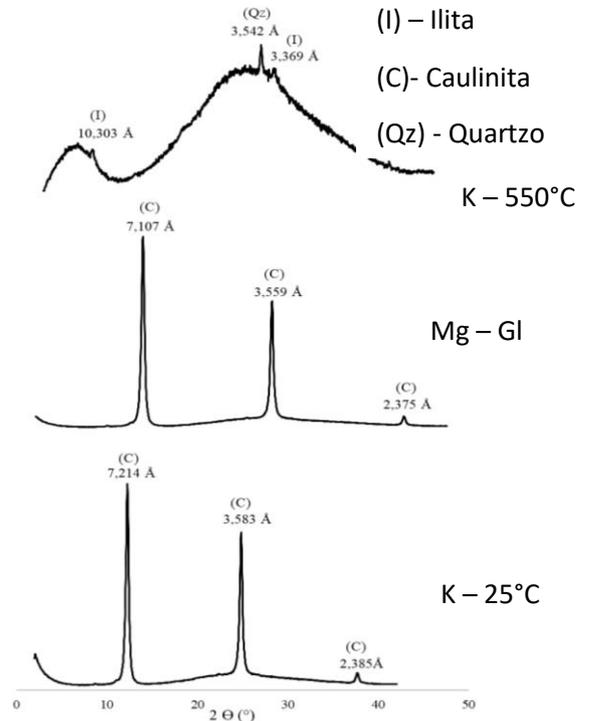


Figura 54– Difratomogramas de raio-X, da Seção S-02 (P-05).

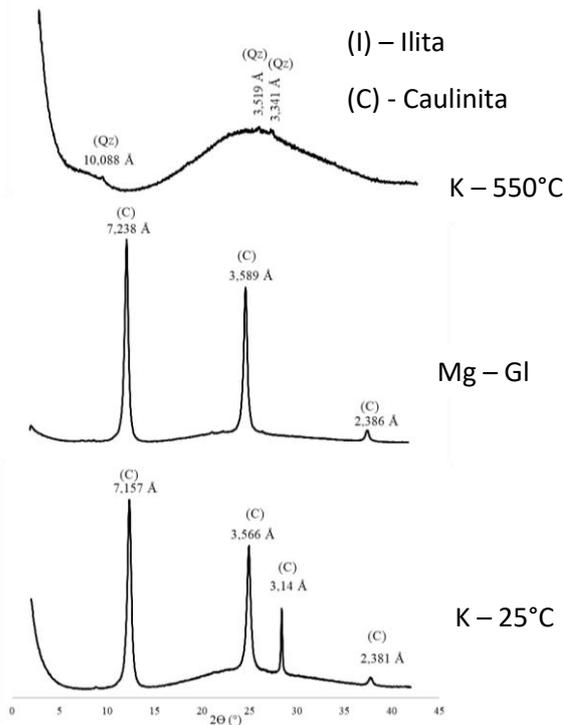


Figura 55 – Difratomogramas de raio-X, da Seção S-02 (P-08).

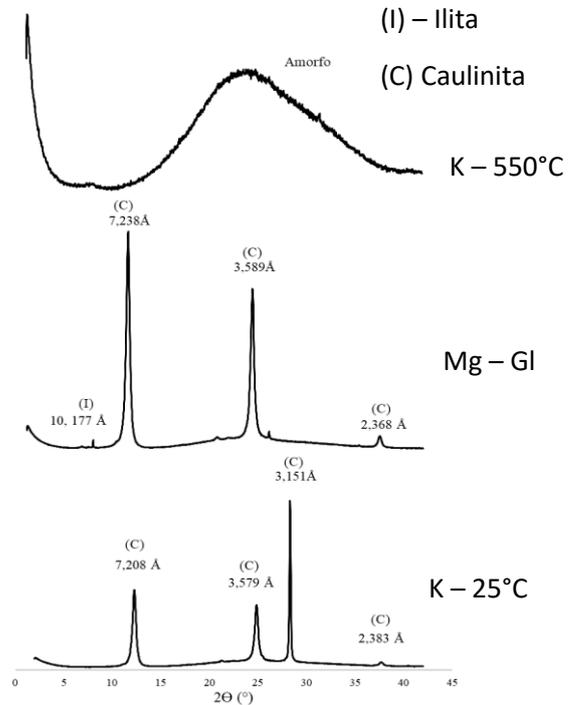


Figura 56 – Difratomogramas de Raio-X, da Seção S-03 (P-03).

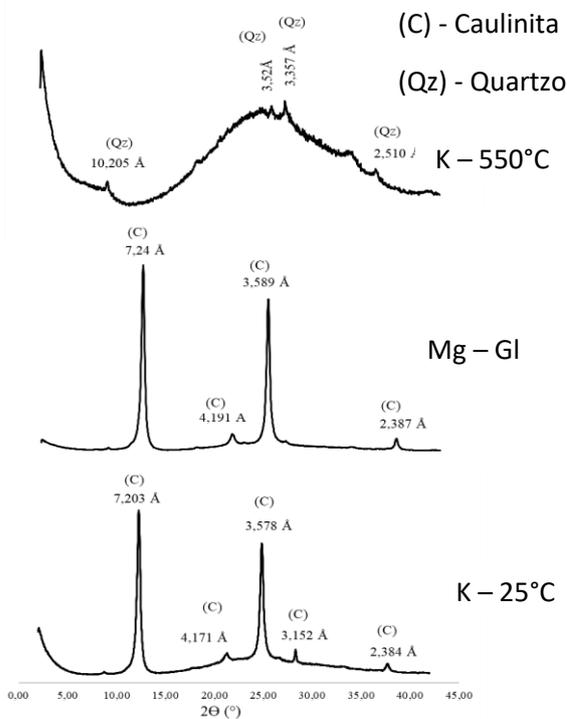


Figura 57 – Difratomogramas de Raio-X, da Seção S-03 (P-06).

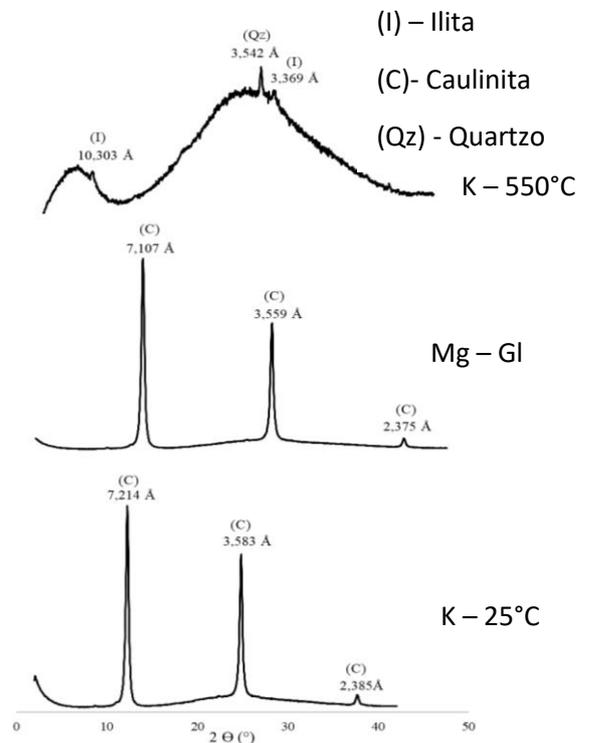
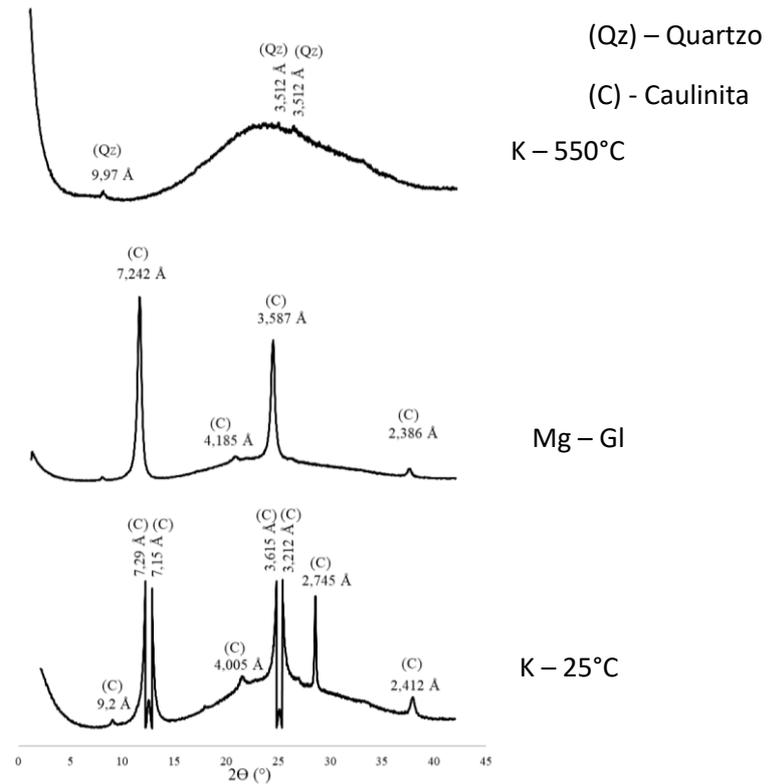


Figura 58 – Difratogramas de Raio-X, da Seção S-03 (P-09).



Fonte: Autor (2022).

### 4.3 ANÁLISE QUÍMICA

A composição química do solo é um importante fator para avaliar a dispersividade do solo, uma vez que este processo ocorre quando o solo possui um elevado teor de sódio dissolvido na água presente nos poros, tornando-o facilmente erodível (AITCHISON e WOOD, 1965). A Tabela 11 apresenta as propriedades químicas das amostras. Os solos apresentam pH em torno de 7,3, sendo considerado neutro levemente alcalino. Não houve variações nos valores do complexo sortido ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ). Os valores dos cátions trocáveis ( $S = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) apresentam baixos teores, inferiores a 18 cmol/kg (MEIRA, 2008).

A capacidade catiônica ( $\text{CTC} = S + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ) varia entre 1,26 e 2,12 cmol/kg de solo, típicos de argilas cauliníticas (LAFAYETTE, 2006). Os valores apresentados do CTC são baixos (inferiores a 27 cmol/kg), também indicam a presença de caulinita. De acordo com Camapum de Carvalho (2004), a capacidade de troca catiônica é baixa nos solos tropicais profundamente intemperizados (solos lateríticos). Observa-se na saturação de bases ( $V=S/\text{CTC}$ ), que todos os pontos apresentam valores acima de

50%, tratando-se de um solo eutrófico. Segundo EMBRAPA (2017), solos classificados como eutróficos apresentam uma alta taxa de fertilidade, possuindo uma ótima reserva de nutrientes para utilização em diversas culturas.

Tabela 11 – Propriedades químicas do solo.

Seção	Pontos	pH	Complexo sortido (cmol/kg)						Parâmetros		
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	S (cmol/kg)	CTC (cmol/kg)	V (%)
S-01	P-01	7,2	0,32	0,51	0,06	0,02	0,65	0,05	0,91	1,61	56
	P-04	7,4	0,46	0,32	0,05	0,04	0,43	0,05	0,87	1,35	64
	P-07	7,2	0,56	0,51	0,04	0,02	0,54	0,03	1,13	1,7	66
S-02	P-02	7,3	0,40	0,32	0,04	0,02	0,45	0,05	0,78	1,28	61
	P-05	7,3	0,69	0,51	0,14	0,01	0,73	0,04	1,35	2,12	64
	P-08	7,3	0,59	0,51	0,10	0,01	0,62	0,04	1,21	1,87	65
S-03	P-03	7,4	0,42	0,41	0,06	0,02	0,34	0,1	0,91	1,26	72
	P-06	7,2	0,61	0,41	0,02	0,02	0,63	0,02	1,06	1,71	62
	P-09	7,3	0,64	0,41	0,08	0,02	0,45	0,1	1,15	1,61	70

Legenda: S = Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup> + Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>; CTC = Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup> + Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + Al<sup>3+</sup> + H<sup>+</sup>; V =  $100 \cdot \frac{S}{CTC}$

Fonte: O autor (2022).

#### 4.4 ANÁLISE DA PERMEABILIDADE IN SITU

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade de campo realizado com o permeâmetro Guelph. Pode-se observar que o valor do coeficiente de permeabilidade diminui com a profundidade, indicando a presença de solos menos poroso, mais coeso a maiores profundidades (a partir de 6 metros). O Primeiro Terço da encosta apresenta melhores condições de permeabilidade pois mais de 70% do solo é composto por areia fina, média e grossa.

Todavia, no Terceiro Terço da encosta o equipamento demonstra incapacidade de avaliar a permeabilidade em dois pontos (P-08 e P-09). Isso pode ser explicado pela possibilidade de a permeabilidade nestas profundidades estar fora dos limites da validade do equipamento (SOUZA, 2004; XAVIER, 2018), os solos do Terceiro Terço (Próximo ao Sopé) apresentam frações de finos significativas (acima de 60%), corroborando na diminuição da permeabilidade.

Observando o fator de permeabilidade saturada ( $K_{fs}$ ) com a profundidade, percebe-se que na Seção -S01 (Figura 59) sugere que o solo possui uma permeabilidade alta a 1 metro de profundidade, característica de solos arenosos, a qual diminui na profundidade de 5 metros quando há um aumento no teor de argila. Na profundidade de 10 metros o resultado do ensaio foi negativo, demonstrando uma tendência e redução da permeabilidade, conforme o avanço de profundidade. As Seções S-02 e S03 (Figuras 60 e 61) também identificam uma redução da permeabilidade do Primeiro Terço para o Segundo Terço.

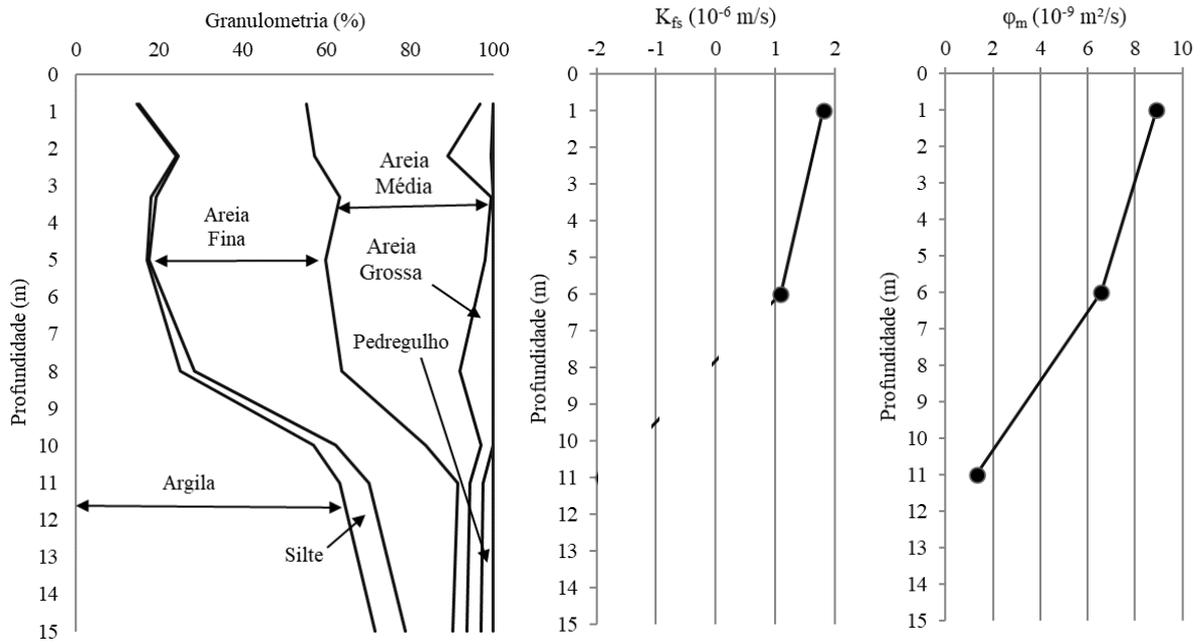
A Tabela 13 apresenta alguns resultados de permeabilidade para solos da Formação Barreiras. Os resultados se mostram coerentes aos obtidos na Região Metropolitana do Recife, tendo em vista que solos da Formação Barreiras em seu estado natural variam na ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-7}$  m/s (COUTINHO E SEVERO, 2009).

Tabela 12 – Resultados do ensaio de permeabilidade saturada ( $K_{fs}$ ), potencial mátrico do solo ( $\phi_m$ ) e granulometria.

Seção	Furo	Granulometria média (%)					$K_{fs}$ (m/s)	$\phi_m$ (m <sup>2</sup> /s)
		Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia Grossa		
S-01	P-01	14,72	0,44	39,98	41,73	3,06	$1,81 \times 10^{-6}$	$8,9 \times 10^{-9}$
	P-04	24,98	3,41	35,26	28,21	7,98	$1,09 \times 10^{-6}$	$6,57 \times 10^{-9}$
	P-07	63,10	7,15	21,29	2,78	3,19	-	$1,31 \times 10^{-6}$
S-02	P-02	24,10	1,48	49,09	23,04	2,22	$1,44 \times 10^{-6}$	$4,67 \times 10^{-9}$
	P-05	32,45	2,64	35,43	26,34	2,67	$1,12 \times 10^{-6}$	$5,29 \times 10^{-9}$
	P-08	57,29	7,27	31,74	2,51	0,81	-	-
S-03	P-03	18,17	0,00	45,99	32,35	3,42	$1,0 \times 10^{-6}$	$2,78 \times 10^{-9}$
	P-06	28,85	2,22	37,02	2,77	6,03	$3,8 \times 10^{-7}$	$4,23 \times 10^{-9}$
	P-09	65,96	7,33	22,24	3,77	0,70	-	-

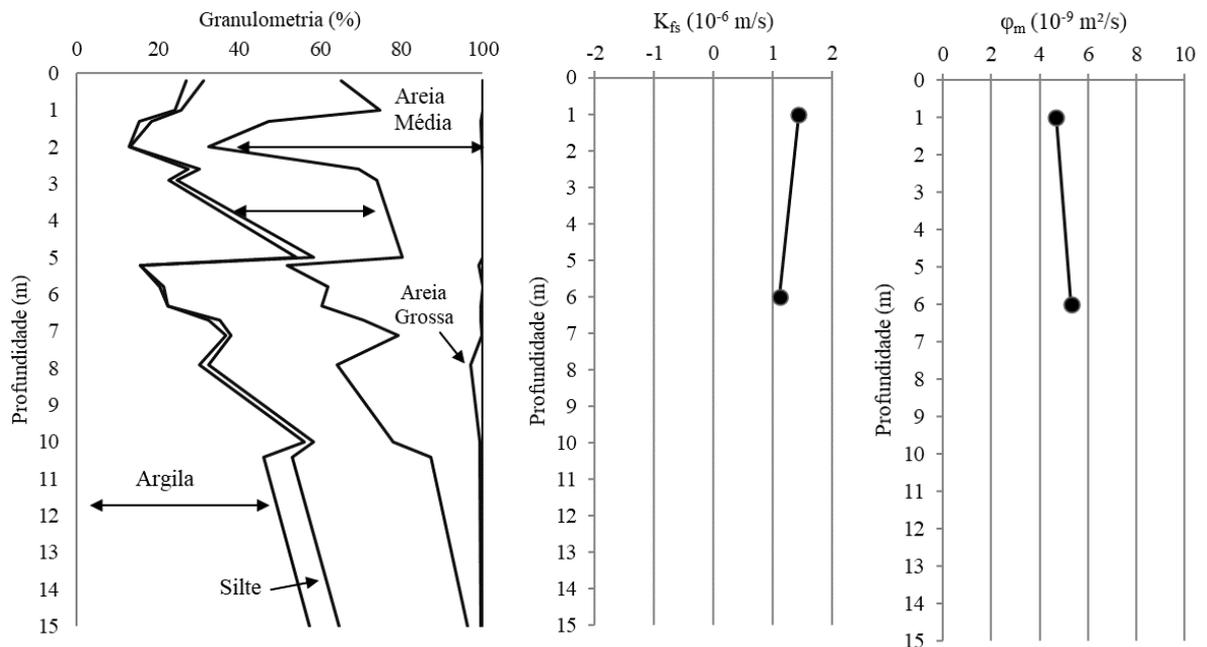
Fonte: O autor (2022).

Figura 59 – Resultados do ensaio de permeabilidade saturada ( $K_{fs}$ ) de campo com permeâmetro de Guelph, potencial mátrico de fluxo ( $\phi_m$ ) e granulometria da Seção S-01



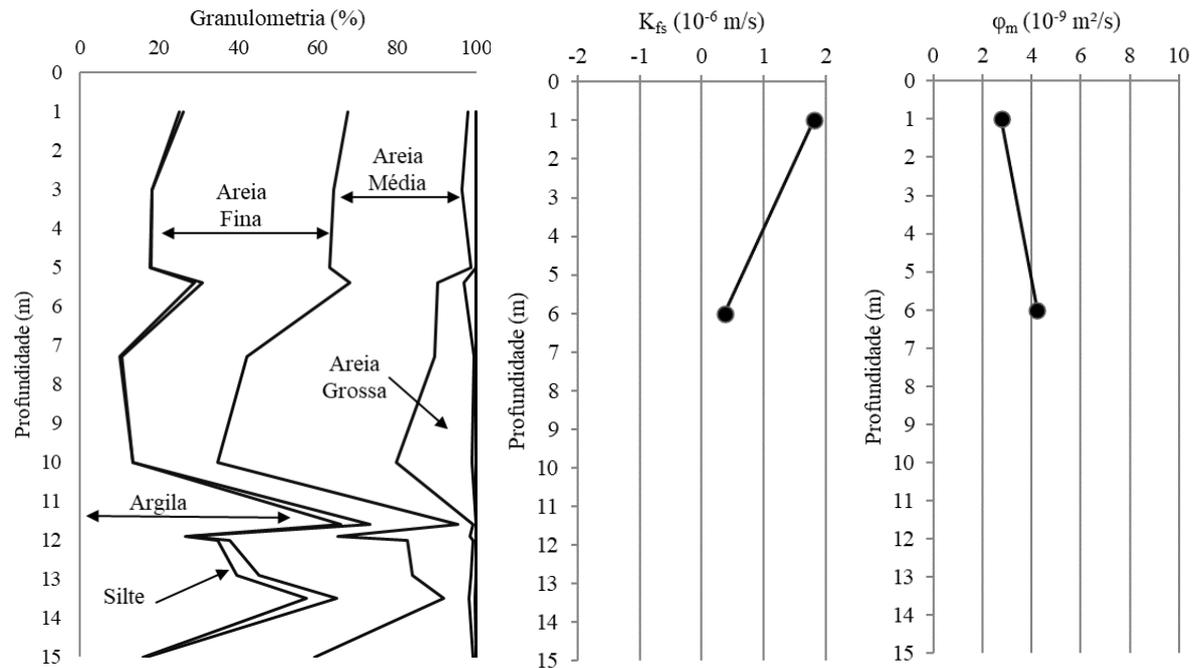
Fonte: O autor (2022)

Figura 60 – Resultados do ensaio de permeabilidade saturada ( $K_{fs}$ ) de campo com permeômetro de Guelph, potencial mátrico de fluxo ( $\phi_m$ ) e granulometria da Seção S-02



Fonte: O autor (2022).

Figura 61 – Resultados do ensaio de permeabilidade saturada ( $K_{fs}$ ) de campo com permeômetro de Guelph, potencial mátrico de fluxo ( $\phi_m$ ) e granulometria da Seção S-03



Fonte: O autor (2022).

Tabela 13 – Permeabilidade de solos da Formação Barreiras

Local	Referência	Permeabilidade saturada		Tipo de ensaio
		In situ (m/s)	Laboratório (m/s)	
Itamaracá	Estudo atual	$3,68 \times 10^{-7}$ a $1,8 \times 10^{-6}$	-	Guelph
RMR	Souza Neto (2016)	$8,5 \times 10^{-8}$ a $2,62 \times 10^{-6}$		Guelph
Camaragibe	Souza (2014)	$5,75 \times 10^{-7}$ a $1,62 \times 10^{-6}$	$3,32$ a $5,10 \times 10^{-6}$	Guelph e Triflex
	Magalhães (2013)	-	$5,37$ a $9,22 \times 10^{-7}$	Triflex
	Silva (2007)	$1,25$ a $7,3 \times 10^{-6}$	$1,22$ a $4,84 \times 10^{-6}$	Guelph e Triflex
	Silva et al. (2005)	$1,2 \times 10^{-6}$ a $6,6 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-6}$ a $4,8 \times 10^{-7}$	Guelph e Triflex
Recife	Meira (2008)	$1,3 \times 10^{-5}$ a $9,1 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-5}$ a $6,4 \times 10^{-7}$	Guelph e Triflex
	Lima (2002)	$2,26$ a $5,5 \times 10^{-6}$	-	Guelph
	Lafayette (2000)	$2,5 \times 10^{-5}$	$7,6 \times 10^{-5}$	Guelph e Triflex
	Coutinho et al. (1999)	$4,78 \times 10^{-5}$	-	Guelph
Cabo de Santo	Guedes (2013)	-	$6,45 \times 10^{-6}$	Triflex
Agostinho	Lafayette (2006)	$4,03$ a $8,94 \times 10^{-6}$	-	Guelph

Fonte: O autor (2022).

#### 4.5 ANÁLISE DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

As relações sucção-umidade desempenham um importante papel na caracterização do comportamento dos solos não saturados, o ensaio permite o acompanhamento da variação da sucção em função da variação do teor de umidade do solo através das curvas características. A curva característica ou curva de retenção está diretamente relacionada à estrutura e à composição granulométrica do solo. As Figuras 62, 63 e 64 apresentam as curvas características das Seções 01, 02 e 03 respectivamente das nove amostras mais superficiais de cada terço.

Os solos do Primeiro e Segundo Terços da encosta (até 10,0 m de profundidade), todos arenosos, apresentam curvas características com comportamento unimodal na relação umidade sucção, exceto o solo de S-02 e P-02 que tem curva bimodal. Os solos do Terceiro Terço (entre 10,0 m e 15,0 m de profundidade), todos argílicos apresentam curvas características com comportamento bimodal. As curvas características apresentam em seu trecho inicial uma grande variação de umidade para uma pequena variação de sucção, sendo o trecho seguinte o processo é inverso. Observa-se que as curvas apresentam duas classes de poros contrastantes, resultando em uma curva característica de comportamento bimodal (P-02, P-07, P-08 e P-09).

O comportamento bimodal é comum em solos de distribuição descontínua ou em solos compactados a baixa energia e no ramo seco, Gitirana Jr. Marinho e Soto (2015). As amostras em P-01, P-03, P-04, P-05 e P-06 apresentam um comportamento unimodal típico de solos arenosos (GITIRANA JÚNIOR E FREDLUND, 2004), o que corrobora com os percentuais arenosos apresentados nas curvas granulométricas. A relação entre curva granulométrica e curva característica tem um desempenho relativamente bom para materiais granulares (ARYA e PARIS, 1980)

Segundo Araújo et al (2017) solos tropicais são marcados principalmente pelo intemperismo avançado, que resulta em agregação das partículas, geralmente por cimentação. Portanto, em função dessa cimentação, as estruturas podem apresentar dois estágios de comportamento, um macro e um micro, o que pode caracterizar o solo como sendo de comportamento bimodal. Solos pedologicamente classificados como argissolos podem apresentar, de acordo com Feuerhamel (2007), colúvios oriundos dos processos de intemperismo e erosão da camada de arenito o que também identifica o solo como possuindo um comportamento bimodal.

A Tabela 14 apresenta as sucções dos solos no momento da coleta associado aos dados de umidade e granulometria. As frações granulométricas contribuem de forma relevante nas características de sucção que o solo apresenta. Solos arenosos tendem a apresentar uma perda brusca de umidade em função da existência de poros maiores, em contrapartida, solos argilosos tendem a apresentar um elevado teor de umidade para apresentar uma sucção significativa.

Tabela 14 – Umidade em campo, Sucção do solo e Granulometria média.

Seção	Ponto	Umidade em campo (%)	Sucção do solo (kPa)	Granulometria Média (%)				
				Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa
S-01	P-01	2,13	10000	14,72	0,44	39,98	41,73	3,06
	P-04	2,72	6000	24,98	3,41	35,26	28,21	7,98
	P-07	12,74	3000	63,10	7,15	21,29	2,78	3,19
S-02	P-02	1,01	30000	24,10	1,48	49,09	23,04	2,22
	P-05	1,79	10000	32,45	2,64	35,43	26,34	2,67
	P-08	10,93	5000	57,29	7,27	31,74	2,51	0,81
S-03	P-03	0,83	18000	18,17	0,00	45,99	32,35	3,42
	P-06	1,09	14900	28,85	2,22	37,02	2,77	6,03
	P-09	13,9	2000	65,96	7,33	22,24	3,77	0,70

Fonte: O autor (2022).

No momento da coleta do solo as umidades dos solos do Primeiro e Segundo Terço eram baixas ( $W = 0,83\%$  a  $2,72\%$ ) e os solos são arenosos o que conferem sucções elevadas ( $U_a - U_w = 10$  MPa em S-01 e P-03 e  $8,0$  MPa em S-01 e P-03). No Terceiro Terço em se tratando de solo argiloso a capacidade de ter água é maior ( $W = 10,93\%$  a  $13,90\%$ ) com sucções entre 2 e 5 MPa. Assim, a sucção dos solos no Primeiro e Segundo Terço da encosta (até  $10,0$  m de profundidade) é cerca de 5 a 7 vezes maior do que nos solos do Terceiro Terço da encosta.

Os ajustes das curvas características utilizam as equações propostas por Durner (1994), Van Genuchten (1980) e Seki (2007), Equações 13, 14 e 15, respectivamente, tendo em vista que foram os ajustes que melhor representam os dados dos ensaios para os solos.

$$S_e = w_1 \cdot \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_1 h)^{n_1}} \right]^{m_1} + (1 - w_1) \cdot \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_2 h)^{n_2}} \right]^{m_2} \quad (\text{Equação 13})$$

$$S_e = \left[ \frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m \quad (\text{Equação 14})$$

$$S_e = w_1 Q \left[ \frac{\ln(h/h_{m1})}{\sigma_1} \right] + (1 - w_1) Q \left[ \frac{\ln(h/h_{m2})}{\sigma_2} \right] \quad (\text{Equação 15})$$

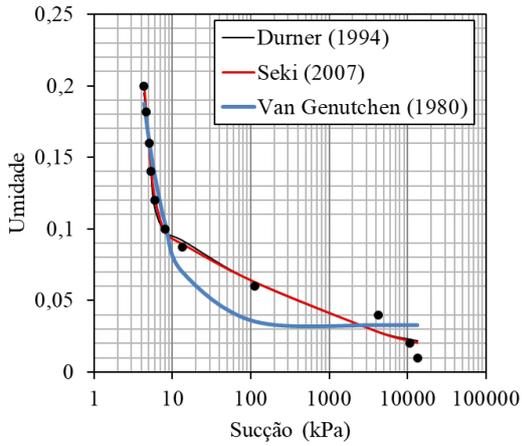
As Tabelas 15, 16 e 17 apresentam os índices de ajuste dos modelos Durner (1994), Van Genutchen (1980) e Seki (2007). Os ajustes de Durner (1994) e Seki (2007) apresentam uma ótima correlação com coeficientes de determinação, sendo superior a 0,98 em todas as amostras. Isto significa que os pontos gerados pelos modelos, foram coerentes com os pontos da curva experimental. O Ajuste Van Genutchen (1980) apresenta coeficientes de determinação mais baixos no Topo da Encosta (P-02) e na Próximo ao Sopé (P-07, P-08 e P-09) com valores entre 0,84 e 0,89, isto se deve em virtude do ajuste não indicado para solos bimodais.

Figura 62 - Curvas características e granulométricas dos solos da Seção 01 (P 01, P 04, P 07)

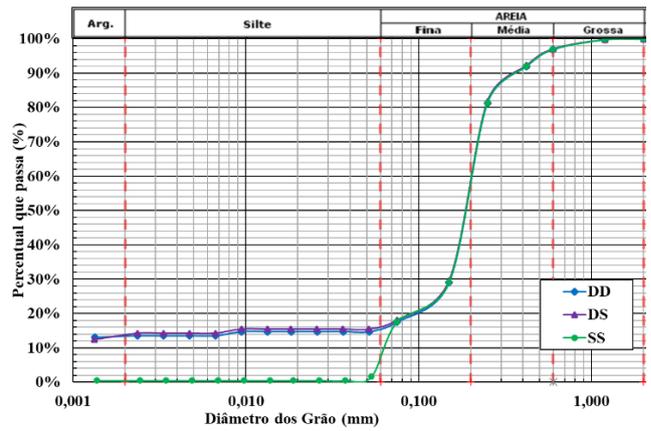
Curvas características

Curvas granulométricas.

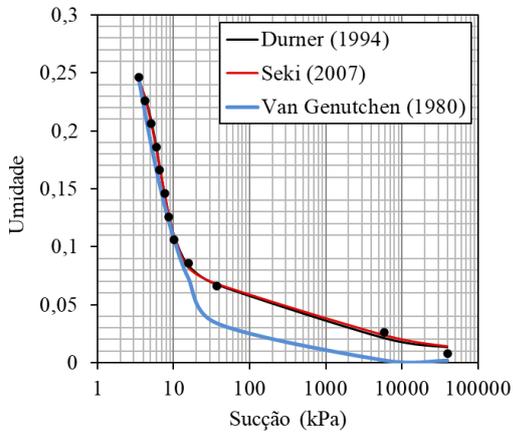
P 01 – Topo



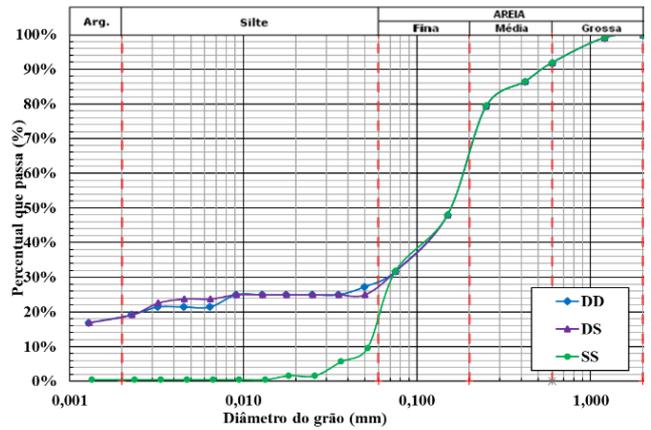
P 01 – Topo



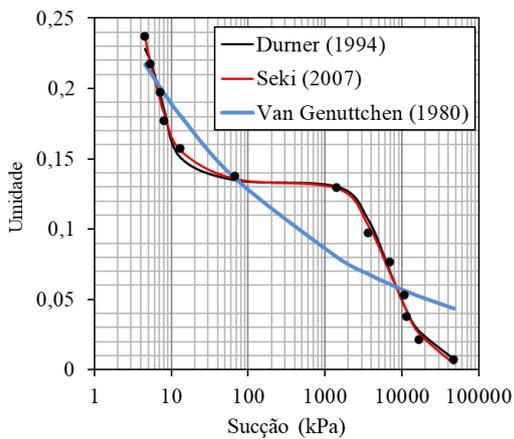
P 04 – Meia Encosta



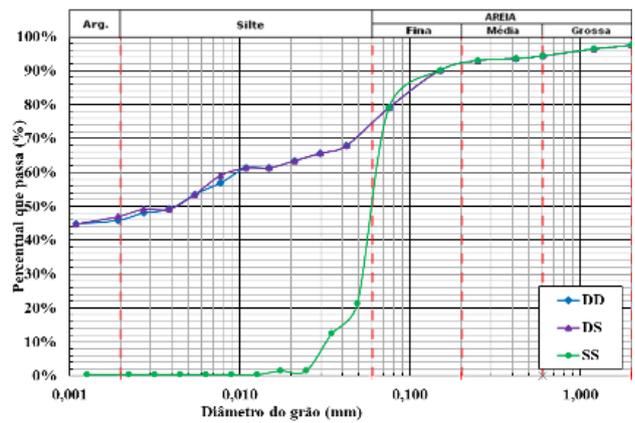
P 04 – Meia Encosta



P 07 - Próximo ao Sopé



P 07 - Próximo ao Sopé



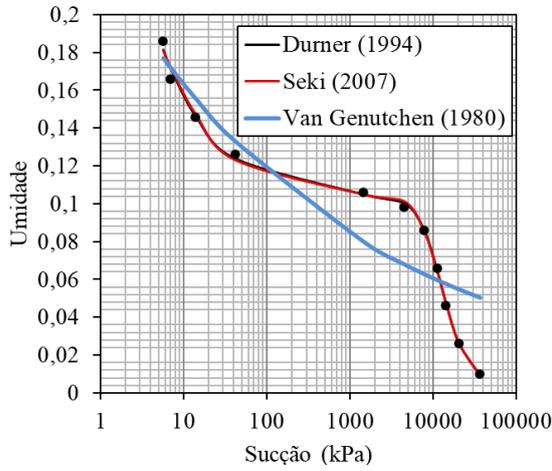
Fonte: O autor (2022).

Figura 63 - Curvas características e granulométricas dos solos da Seção 02 (P02, P-05, P-08)

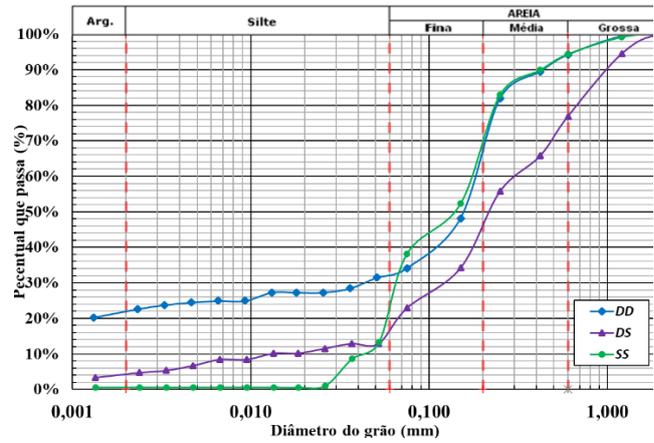
Curvas características

Curvas granulométricas

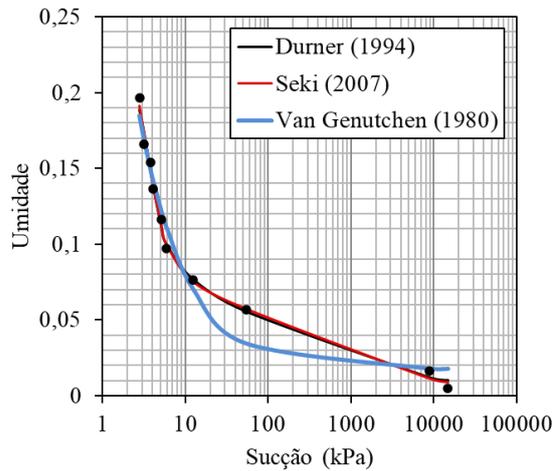
P 02 - Topo



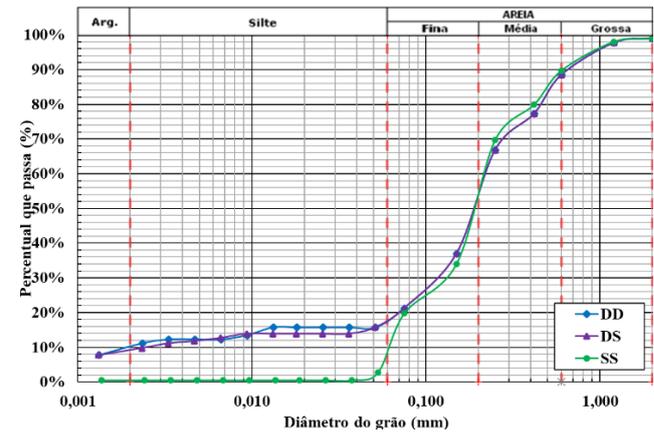
P 02 - Topo



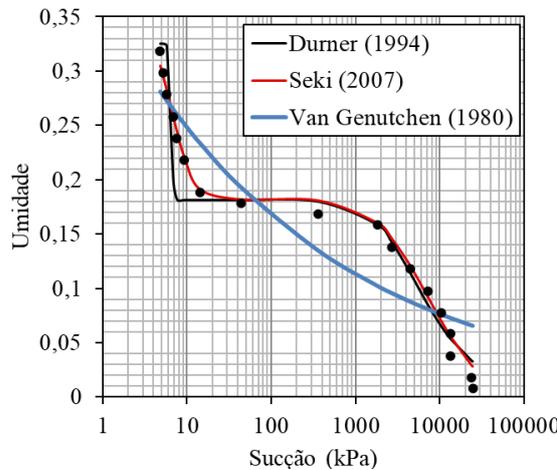
P 05 – Meia Encosta



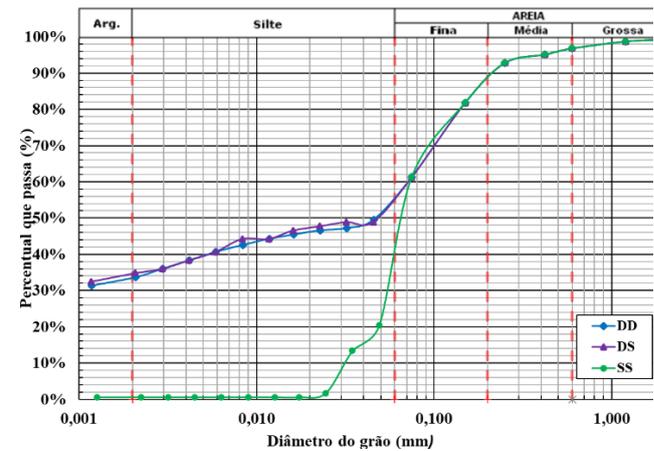
P 05 – Meia Encosta



P - 08 Próximo ao Sopé



P - 08 Próximo ao Sopé

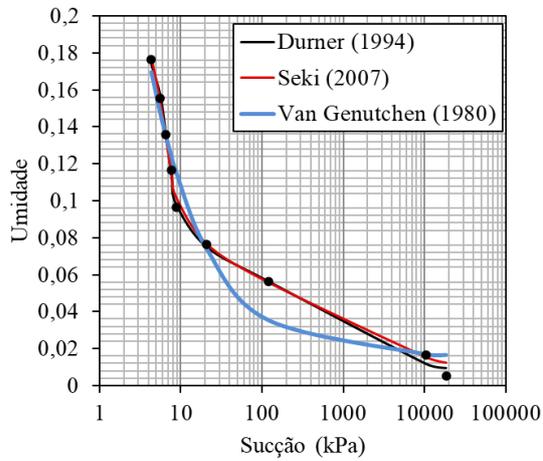


Fonte: O autor (2022).

Figura 64 - Curvas características e granulométricas dos solos da Seção 03 (P03, P06, P09)

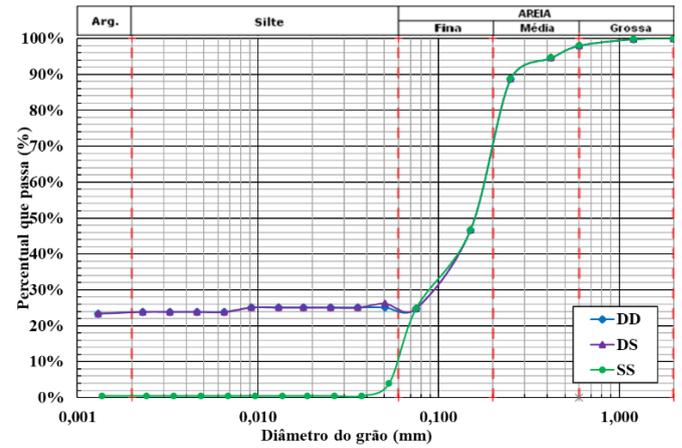
Curvas características

P - 03 Topo

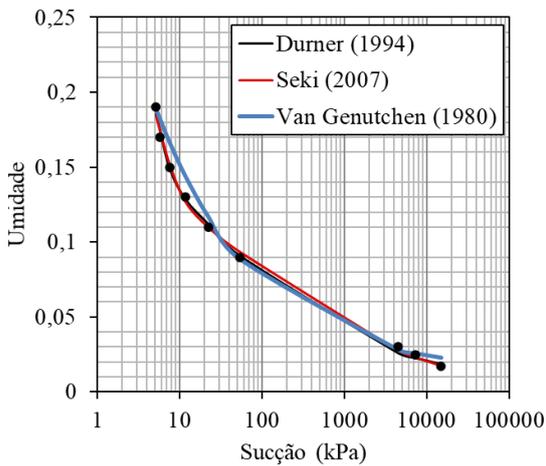


Curvas granulométricas

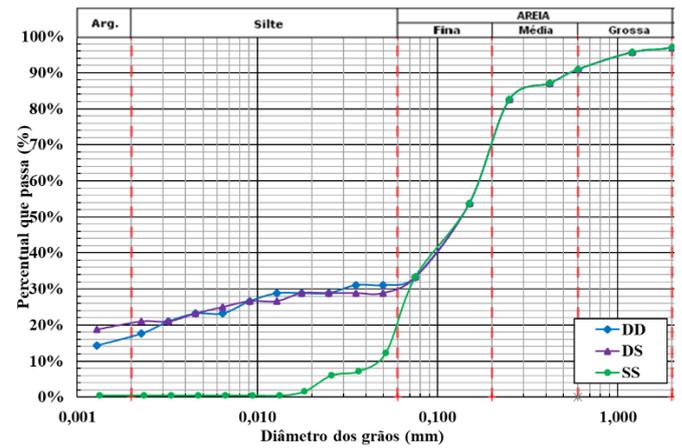
P 03 - Topo



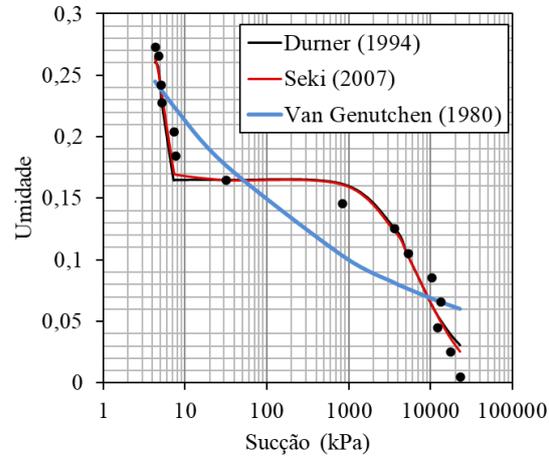
P 06 – Meia Encosta



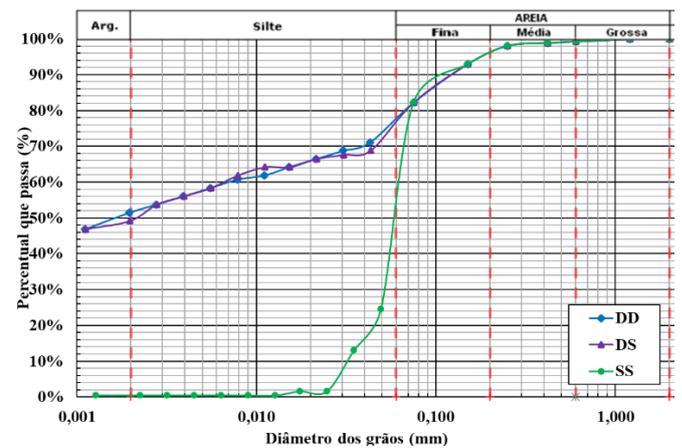
P 06 – Meia Encosta



P - 09 Próximo ao Sopé



P - 09 Próximo ao Sopé



Fonte: O autor (2022).

Tabela 15 – Índices de ajuste do modelo Durner (1994).

Parâmetro (Durner, 1994)	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	P-09
$\Theta_s$	0,211	0,388	0,179	0,2548	0,2184	0,2236	0,2415	0,3249	0,2613
$\Theta_r$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	0,0023	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$
$W_1$	0,492	0,7389	0,5606	0,6721	0,6005	0,3279	0,4418	0,442	0,3687
$\alpha_1$	0,196	1,1726	0,1504	0,1643	0,2842	0,1831	0,1452	0,1552	0,188
$n_1$	12,751	1,6748	6,2118	4,13	4,6125	5,4028	3,8517	4,5379	25,381
$\alpha_2$	0,0937	$9,03 \cdot 10^{-5}$	0,0161	0,0504	0,0702	0,0993	0,0002	0,0003	0,0002
$n_2$	1,224	3,2235	1,3678	1,2395	1,3055	1,2879	2,2616	1,8398	1,9864
$R^2$	0,99103	0,99799	0,9978	0,9977	0,9942	0,9937	0,9939	0,9824	0,9802
<b>AIC</b>	99,063	118,43	92,977	121,53	93,566	71,557	120,13	143,8	92,994

Fonte: O autor (2022)

Onde:  $\Theta_s$  – Teor de água saturada;  $\Theta_r$  – Teor de água residual;  $W_1$  - Fator de ponderação para subcurvas;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $n_1$  e  $n_2$  – Parâmetros de retenção de água;  $R^2$  - Coeficiente de determinação; AIC – Critério de Akaike.

Tabela 16 – Índices de ajuste do modelo Seki (2007).

Parâmetro (Seki, 2007)	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	P-09
$\Theta_s$	0,3871	0,671	0,2305	0,3582	0,2813	0,29853	0,5281	0,3545	0,2723
$\Theta_r$	$7,2 \cdot 10^{-7}$	0,0064	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	0,0014	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
$W_1$	0,4714	0,8526	0,4099	0,5487	0,5604	0,30573	0,7456	0,4867	0,3940
$h_{m1}$	4,4125	0,2831	6,3917	2,7586	3,3045	5,3678	2,2010	6,3425	5,6066
$\sigma_1$	0,24617	2,714	0,3231	6,5704	0,4748	0,50504	1,0980	0,4999	0,1812
$h_{m2}$	5,0459	12730,6	43,088	6,5353	37,743	31,011	6982,7	7384,1	7612,1
$\sigma_2$	6,1798	0,5654	4,5391	0,4501	4,1398	4,5051	0,9550	1,1822	1,0965
$R^2$	0,99268	0,9973	0,9965	0,9980	0,9953	0,99340	0,9966	0,9862	0,9873
<b>AIC</b>	101,29	115,42	88,791	123,59	95,891	71,182	127,76	148,1	94,600

Fonte: O autor (2022)

Onde:  $\Theta_s$  – Teor de água saturada;  $\Theta_r$  – Teor de água residual;  $W_1$  - Fator de ponderação para subcurvas;  $h_{m1}$ ,  $h_{m2}$ ,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  – Parâmetros da função subretenção;  $R^2$  - Coeficiente de determinação; AIC – Critério de Akaike.

Tabela 17 – Índices de ajuste do modelo Van Genuchten (1980).

Parâmetro (Van Genutchen, 1980)	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	P-09
$\Theta_s$	182,94	0,57135	22,277	0,4352	60,709	4,8832	1,1395	1,511	1,1849
$\Theta_r$	0,0327	$1,212 \cdot 10^{-32}$	0,0157	0,0195	0,0177	0,0128	$3,118 \cdot 10^{-29}$	$4,318 \cdot 10^{-34}$	$1,356 \cdot 10^{-33}$
A	61,555	616,42	700,28	0,4447	749,0	1960,6	3178,0	4149,4	3599,3
N	2,2661	1,1436	1,62	1,9258	1,7709	1,3662	1,1733	1,1705	1,1634
R <sup>2</sup>	0,9443	0,8441	0,962	0,9870	0,9696	0,9912	0,8935	0,8745	0,8777
AIC	84,98	76,58	73,26	106,69	83,06	84,79	88,99	114,39	97,48

Fonte: O autor (2022)

Onde:  $\Theta_s$  – Teor de água saturada;  $\Theta_r$  – Teor de água residual;  $W_1$  - Fator de ponderação para subcurvas;  $\alpha$ ,  $n$  – Parâmetros de retenção de água; R<sup>2</sup> - Coeficiente de determinação; AIC – Critério de Akaike.

#### 4.6 ANÁLISE DA COMPRESSIBILIDADE

Resultados da compressibilidade dos solos localizados nos três terços P-03 (Topo), P-05 (Meia Encosta) e P-07 (Próximo ao Sopé) através dos ensaios edométricos nas condições de umidade natural (EDN) e inundada previamente (EDI) encontram-se na Figura 65. Condições dos corpos de prova nos ensaios edométricos são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 -Condições dos corpos de prova no ensaio edométrico.

Amostra	Ensaio	CONDIÇÃO INICIAL DOS CORPOS DE PROVA				CONDIÇÕES FINAL DOS CORPOS DE PROVA		
		W <sub>o</sub> (%)	$\gamma_{so}$ (KN/m <sup>3</sup> )	e <sub>o</sub>	S <sub>o</sub> (%)	W <sub>f</sub> (%)	e <sub>f</sub>	S <sub>f</sub> (%)
Topo	EDN	0,95	15,55	0,72	3,52	0,86	0,59	3,87
P-03	EDI	2,13	15,82	0,68	8,26	17,20	0,50	92,41
MeiaEncosta	EDN	1,22	16,95	0,59	5,56	1,27	0,47	7,30
P-05	EDI	1,79	16,33	0,66	7,38	14,46	0,48	82,11
Próximo ao Sopé P-07	EDN	12,74	14,08	0,98	36,23	12,57	0,64	54,75
	EDI	12,10	13,25	1,11	30,51	21,16	0,66	89,40

Fonte: O autor (2022).

\*Onde: W<sub>o</sub> = Umidade inicial da amostra (%);  $\gamma_{so}$  = peso específico do solo; e<sub>o</sub> = Índice de vazios inicial; S<sub>o</sub> = Grau de saturação inicial; W<sub>f</sub> = Umidade final da amostra; e<sub>f</sub> = Índice de vazios final; S<sub>f</sub> = Índice de vazios final.

A Tabela 19 apresenta as condições iniciais e finais dos corpos de prova para o ensaio edométrico. Observa-se que os maiores índices de vazios tanto para a condição de realização de ensaio natural como no inundado, encontra-se na amostra Próximo ao Sopé, sendo estas características também encontradas nos solos de Formação Barreiras apresentados nos estudos de Magalhães (2013) e Souza (2014).

Tabela 19 -Condições dos corpos de prova no ensaio edométrico Próximo ao Sopé.

Amostra Próximo Sopé	Ensaio	CONDIÇÃO INICIAL DOS CORPOS DE PROVA			CONDIÇÕES FINAL DOS CORPOS DE PROVA		
		$W_o$ (%)	$e_o$	$S_o$ (%)	$W_f$ (%)	$e_f$	$S_f$ (%)
Estudo Atual	EDN	12,74	0,98	36,23	12,57	0,64	54,75
	EDI	12,10	1,11	30,51	21,16	0,66	89,40
Magalhães (2013)	EDN	13,20	0,83	42,02	1,27/	0,47	7,30
	EDI	13,20	0,83	42,04	14,46	0,48	82,11
Souza (2014)	EDN	12,74	0,98	36,23	12,57	0,64	54,75
	EDI	12,10	1,11	30,51	21,16	0,66	89,40

Fonte: O autor (2022).

\*Onde:  $W_o$  = Umidade inicial da amostra (%);  $e_o$  = Índice de vazios inicial;  $S_o$  = Grau de saturação inicial;  $W_f$  = Umidade final da amostra;  $e_f$  = Índice de vazios final;  $S_f$  = Índice de vazios final.

De acordo com Silva (2007), as diferenças de comportamento entre ensaios inundados e na umidade natural na Formação Barreiras podem ser atribuídas ao efeito de sucção, que provoca um enrijecimento dos solos através do aumento da resistência dos aglutinados de partículas e das ligações cimentantes. Nos ensaios inundados, estas ligações se encontram fragilizadas pela redução da sucção. Como consequência, as deformações são maiores no estado inundado em relação ao mesmo solo na umidade natural.

As curvas de Deformações Volumétrica Específicas e de Índice de Vazios com Tensão Vertical Aplicada dos solos do Topo (P-03) e da Meia Encosta (P-05) são típicas de solos não saturados arenosos e do solo Próximo ao Sopé (P-07) solos não saturados argilosos. O índice de compressibilidade ( $C_c$ ) do solo Próximo ao Sopé (P-07) é em média cerca de quatro vezes maior do que dos solos Topo (P-03) e da Meia Encosta (P-05), enquanto o Índice de Expansão ( $C_s$ ) é em média cerca de quatro vezes maior. Os solos da Topo e da Meia Encosta, encontram-se em umidade próxima

da umidade higróscópica (1,52%) e são arenosos, enquanto o solo de Próximo ao Sôpe tem umidade média de 12,42% e, é argiloso. Estas características físicas explica a compressibilidade devido ao acréscimo de tensão e à expansão devido ao alívio de tensão serem maiores do solo Próximo ao Sopé do que no Topo e Meia Encosta, fundamentados pelos estudos de Magalhães (2013) e Souza (2014). Os solos são classificados com condicionados ao colapso pelo critério Reginatto e Ferrero (1973), conforme Tabela 20.

Tabela 20– Resumo dos ensaios/ EDN e EDI.

Amostra	Ensaio	Parâmetros de Compressibilidade				Critério de Reginatto e Ferrero (1973)		
		Cc	Cs	$\sigma_{vpn}$ kPa	$\sigma_{vps}$ kPa	$\sigma_{vo}$ kPa	C	Classificação
Topo P-03	EDN	0,07	0,025	52		15,69	1,06	Condicionado ao colapso
	EDI	0,137	0,027		54			
Meia Encosta P- 05	EDN	0,079	0,014	80		16,64	0,38	Condicionado ao colapso
	EDI	0,094	0,03		41			
Próximo ao Sopé P-07	EDN	0,299	0,035	140		13,67	0,04	Condicionado ao colapso
	EDI	0,316	0,039		19			

Fonte: O autor (2022).

\*Onde:  $C_c$  = Índice de compressão;  $C_s$  = Índice de descompressão;  $\sigma_{vpn}$  = Tensão de pré-consolidação do solo na umidade natural;  $\sigma_{vps}$  = Tensão de pré-consolidação do solo inundado;  $\sigma_{vo}$  = Tensão vertical devido ao próprio do solo; C = Coeficiente de colapsibilidade.

A Tabela 21 mostra uma comparação entre os resultados obtidos para a classificação de Reginatto e Ferrero com os estudos de Magalhães (2013) e Souza (2014).

Tabela 21 – Resultados da classificação de Reginatto e Ferrero (1973) com os estudos de Magalhães (2013) e Souza (2014).

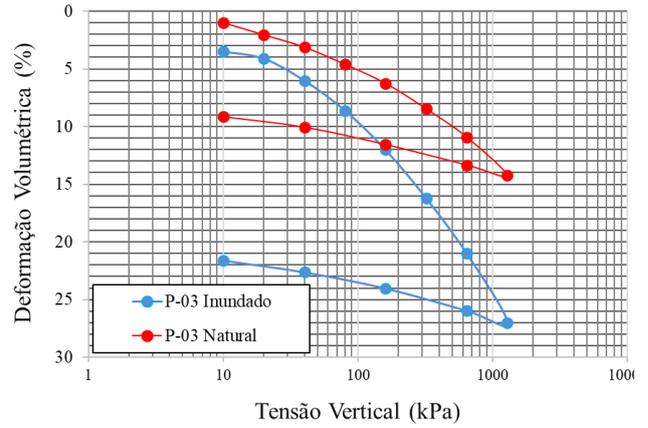
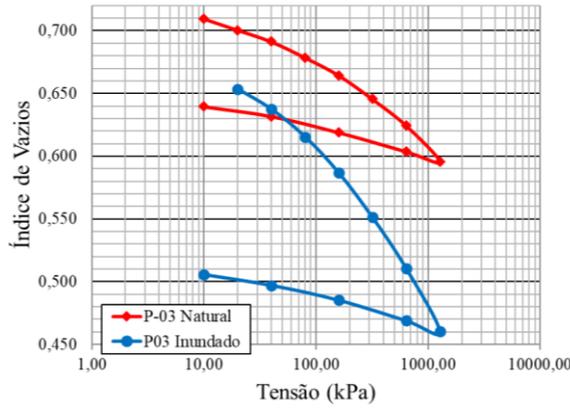
Amostra – Próximo ao Sopé	Ensaio	Parâmetros de Compressibilidade				Critério de Reginatto e Ferrero (1973)		
		Cc	Cs	$\sigma_{vpn}$ kPa	$\sigma_{vps}$ kPa	$\sigma_{vo}$ kPa	C	Classificação
Estudo Atual	EDN	0,299	0,035	140		13,67	0,04	Condicionado ao colapso
	EDI	0,316	0,039		19			
Magalhães (2013)	EDN	0,25	0,017	180		38,08	-0,05	Verdadeiramente Colapsível
	EDI	0,228	0,025		30			
Souza (2014)	EDN	0,15	0,016	2,1		0,26	0,10	Condicionado ao colapso
	EDI	0,16	0,018		0,45			

Fonte: O Autor (2022).

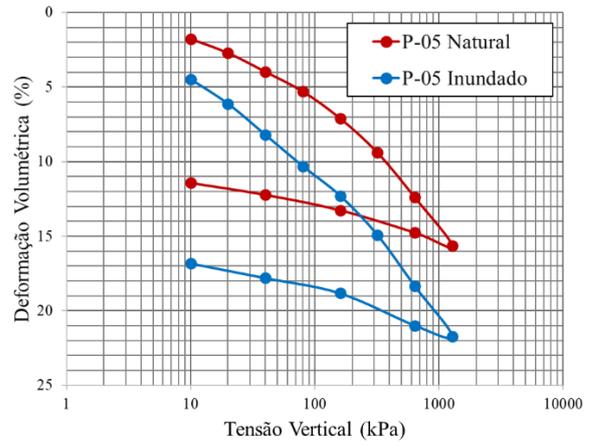
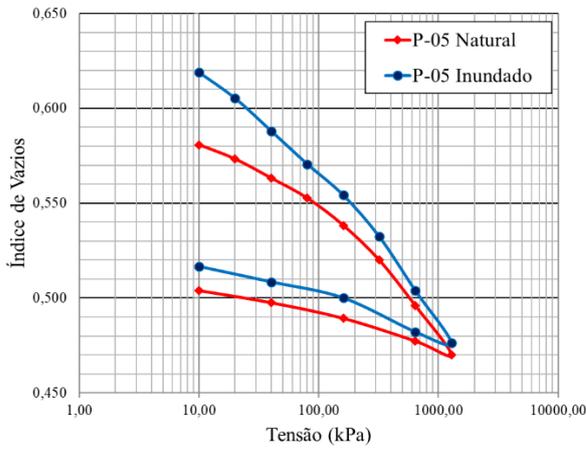
\*Onde:  $C_c$  = Índice de compressão;  $C_s$  = Índice de descompressão;  $\sigma_{vpn}$  = Tensão de pré-consolidação virtual do solo na umidade natural;  $\sigma_{vps}$  = Tensão de pré-consolidação virtual do solo inundado;  $\sigma_{vo}$  = Tensão vertical devido ao próprio do solo; C = Coeficiente de colapsibilidade.

Figura 65 – Tensão Vertical versus Índices de vazios e Tensão Vertical versus Deformação Volumétrica.

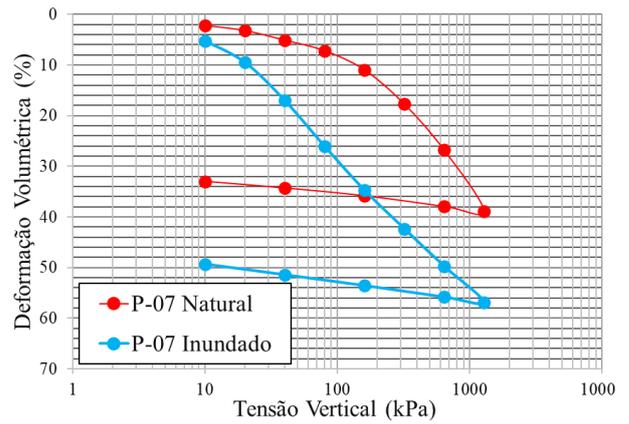
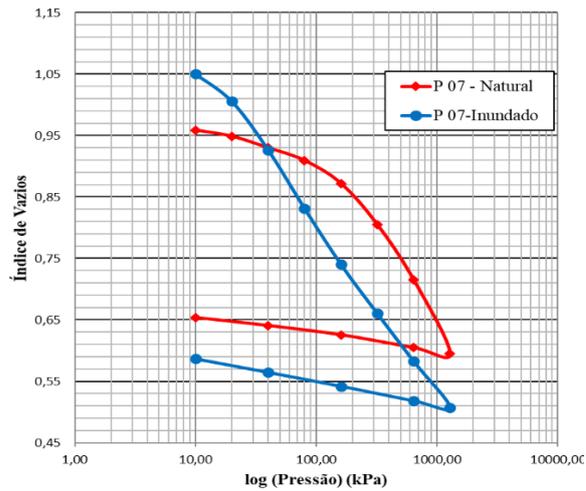
a) Topo da Encosta (P-03)



b) Meia Encosta (P-05)



c) Próximo ao Sopé (P-07)



Fonte: O autor (2022).

## 4.7 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO

A apresentação dos resultados e discussões da resistência ao cisalhamento é realizada por seção da encosta.

a) Seção S-01

A Figura 66 apresenta as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento vertical versus Deslocamento Horizontal da Seção S-01/P-01 para o solo do Primeiro Terço da encosta na umidade natural e previamente inundado. Na umidade natural, no Primeiro Terço (Topo), as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material friável e picos bem definidos nas tensões 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa, para deslocamentos de 3 a 5%. Apenas na tensão de 50 kPa demonstra-se um comportamento plástico.

A resistência de pico nas amostras pode ser relacionada, além do processo de consolidação da superfície, à presença de raízes. Segundo Leung et al.; 2018, Meijer et al., 2019 e Rocha et al, 2021, quando os solos estão sujeitos a efeitos de cisalhamento, as raízes reforçam sua resistência agindo como âncoras, então as tensões de cisalhamento na matriz do solo são reforçadas pelas raízes, aumentando a resistência mecânica do solo. As curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam dilatância para as tensões de 50 kPa e 100kPa, para as demais é de compressão.

Quando o solo é inundado previamente as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material plástico e plástico com pequeno endurecimento e as curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam apenas compressão. A inundação causa uma redução de 92% da coesão do solo (34 kPa para 3kPa) e uma pequena variação no ângulo de atrito de 3° (29° para 32°), Figura 67.

A Figura 68 apresenta as curvas Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal da Seção S-01 / P-04 para o solo do Segundo terço na umidade natural e previamente inundado. Na umidade natural, no Segundo Terço, as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material friável com picos bem definidos para todas as tensões. As curvas Deslocamento Vertical versus Descolamento Horizontal apresentam dilatância para as tensões. Quando o solo é inundado previamente, as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam

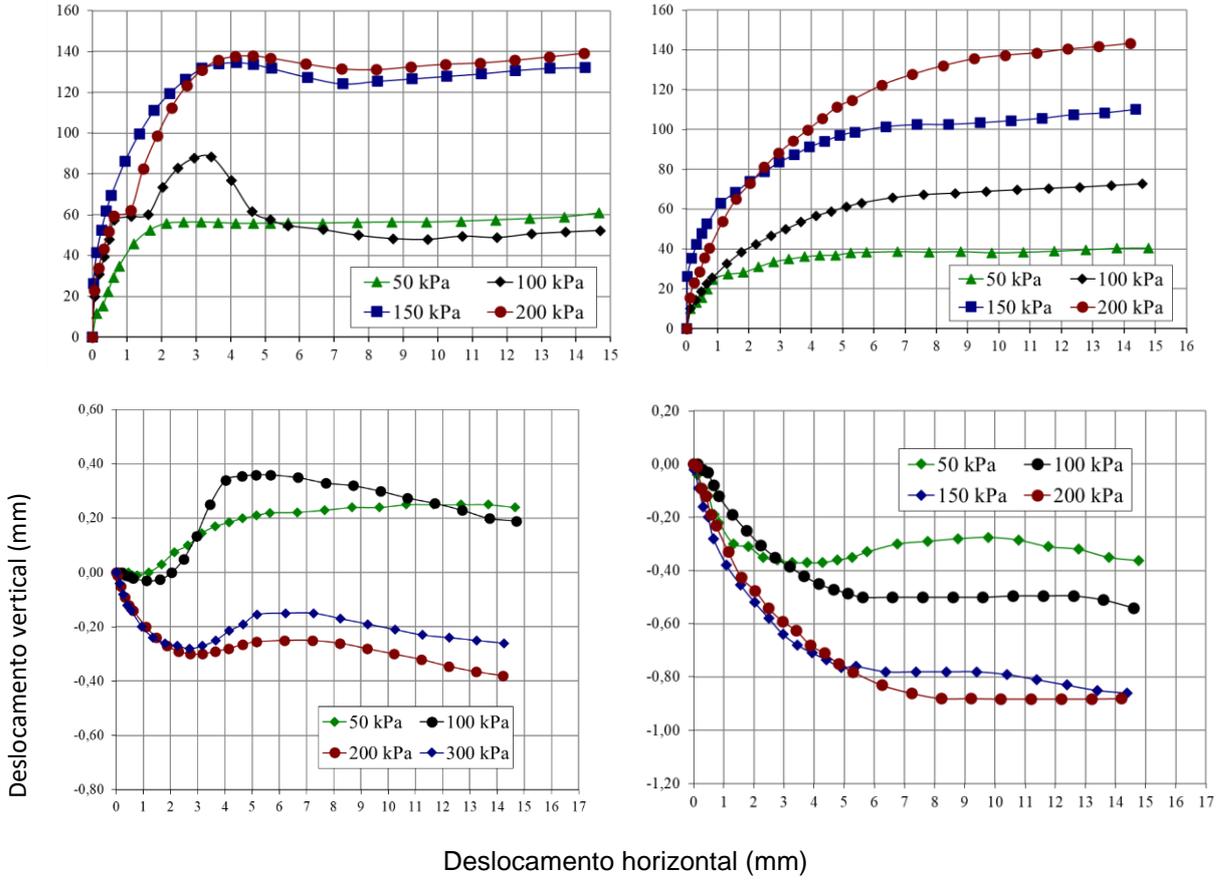
comportamento de material plástico e as curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam apenas compressão. A inundação causa uma redução de 77% da coesão do solo (31 kPa para 7 kPa) e uma variação no ângulo de atrito de 4° (26° para 30°), Figura 69

A Figura 70 apresenta as curvas Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal da Seção S-01 / P-07 para o solo do Terceiro Terço da encosta na umidade natural e previamente inundado. Na umidade natural, no Terceiro Terço, as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material plástico e com endurecimento para a tensão de 200 kPa. As curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam compressão para as tensões. Quando o solo é inundado previamente as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material plástico com endurecimento e as curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam apenas compressão. A inundação causa um acréscimo na coesão de cerca de 2 vezes (de 6 kPa para 11 kPa) e uma redução do ângulo de atrito de 8° (de 36° para 28°), Figura 71.

Figura 66 – Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – Primeiro Terço S-01/ P-01 (Topo)

Natural

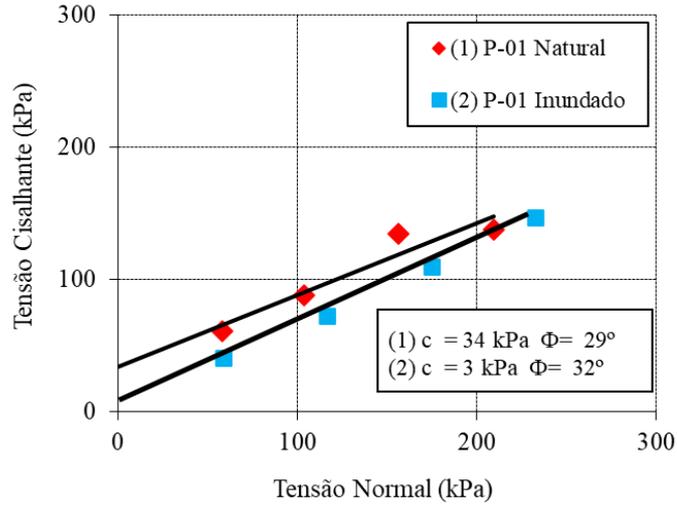
Inundado



Deslocamento horizontal (mm)

Fonte: O autor (2022)

Figura 67 – Envolvórias de resistência em P-01



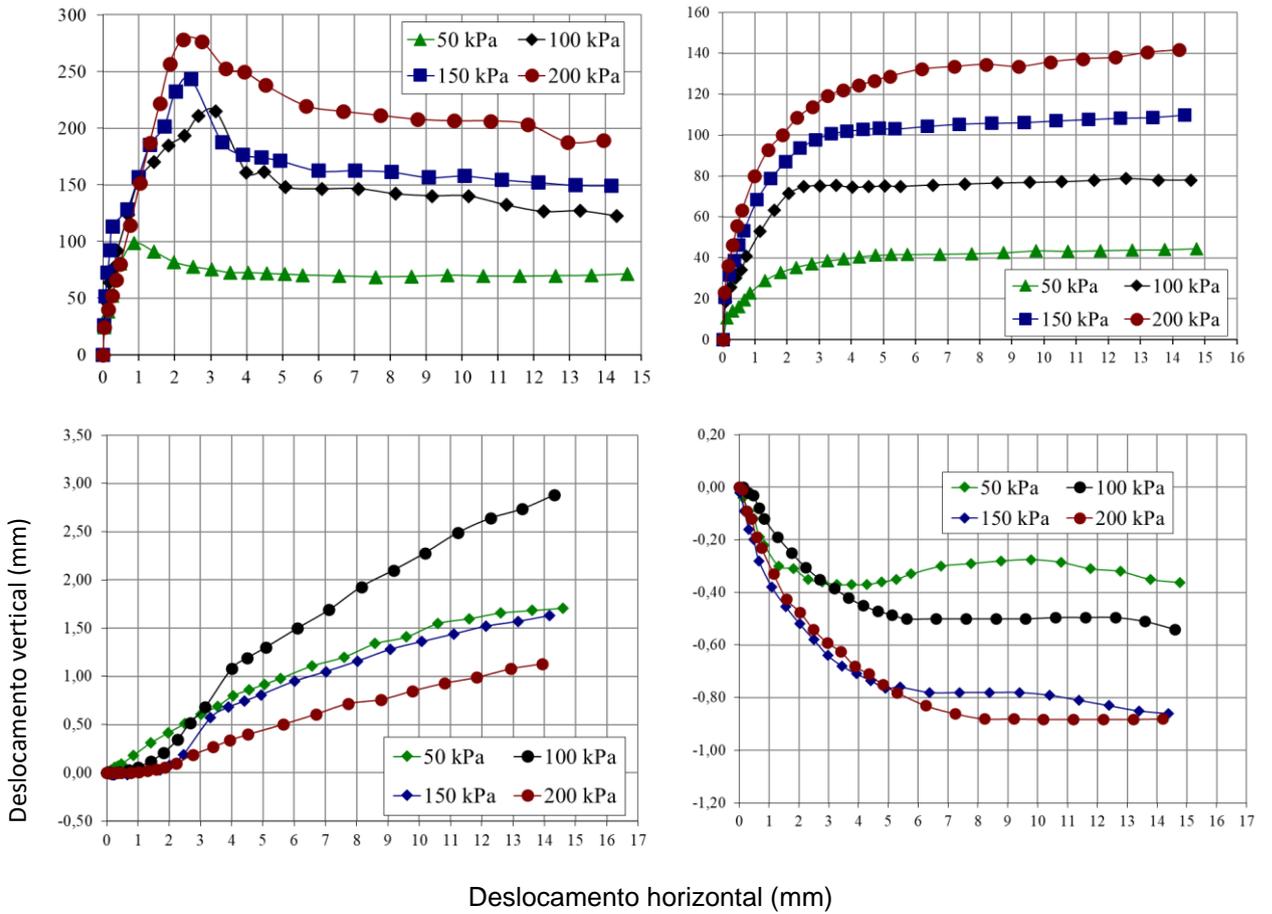
Fonte: O autor (2022).

Figura 68 – Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – Segundo Terço S-01/ P-04 (Meia Encosta)

Natural

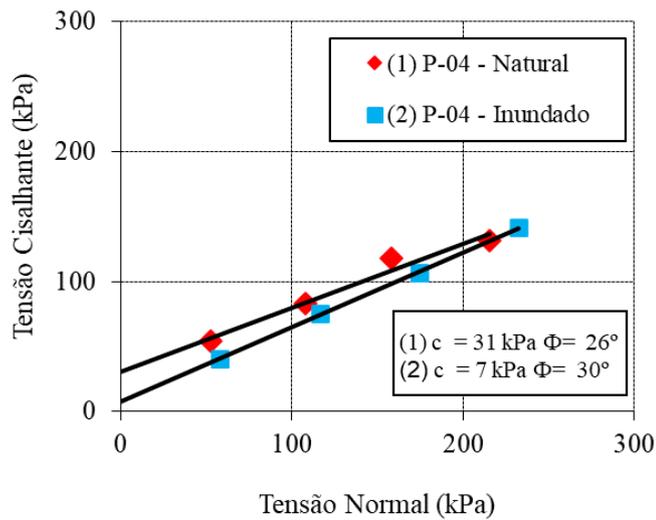
Inundado

isalhante (kPa)



Fonte: O autor (2022).

Figura 69 – Envoltórias de resistência em P-04

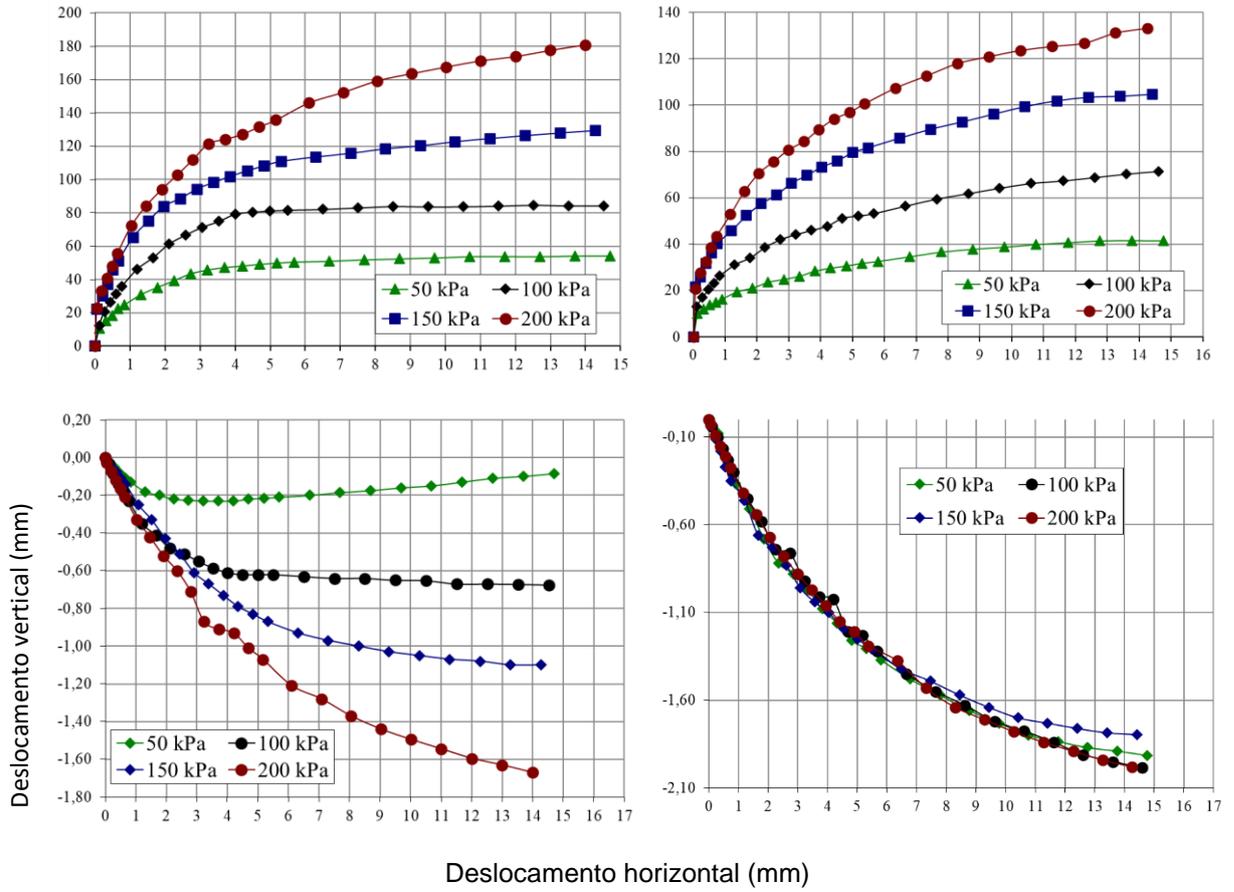


Fonte: O autor (2022).

Figura 70 – Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – Terceiro Terço S-01/ P-07 (Próximo ao Sopé)

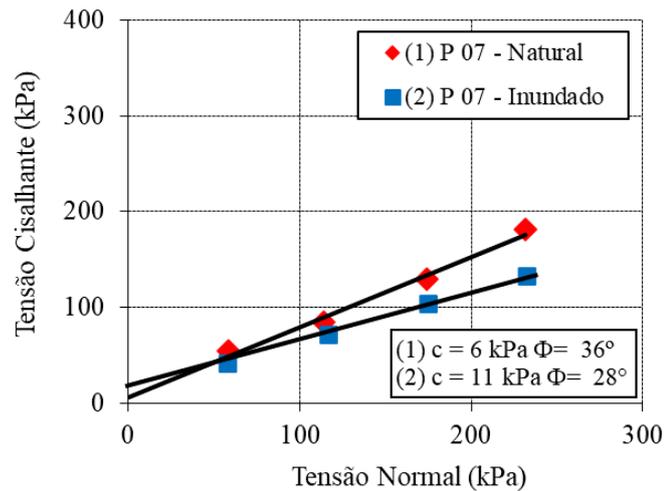
Natural

Inundado



Fonte: O autor (2022).

Figura 71 – Envoltórias de resistência em P-07



Fonte: O autor (2022).

b) Seção S-02

A Figura 72 apresenta as curvas Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal da Seção S-02 /

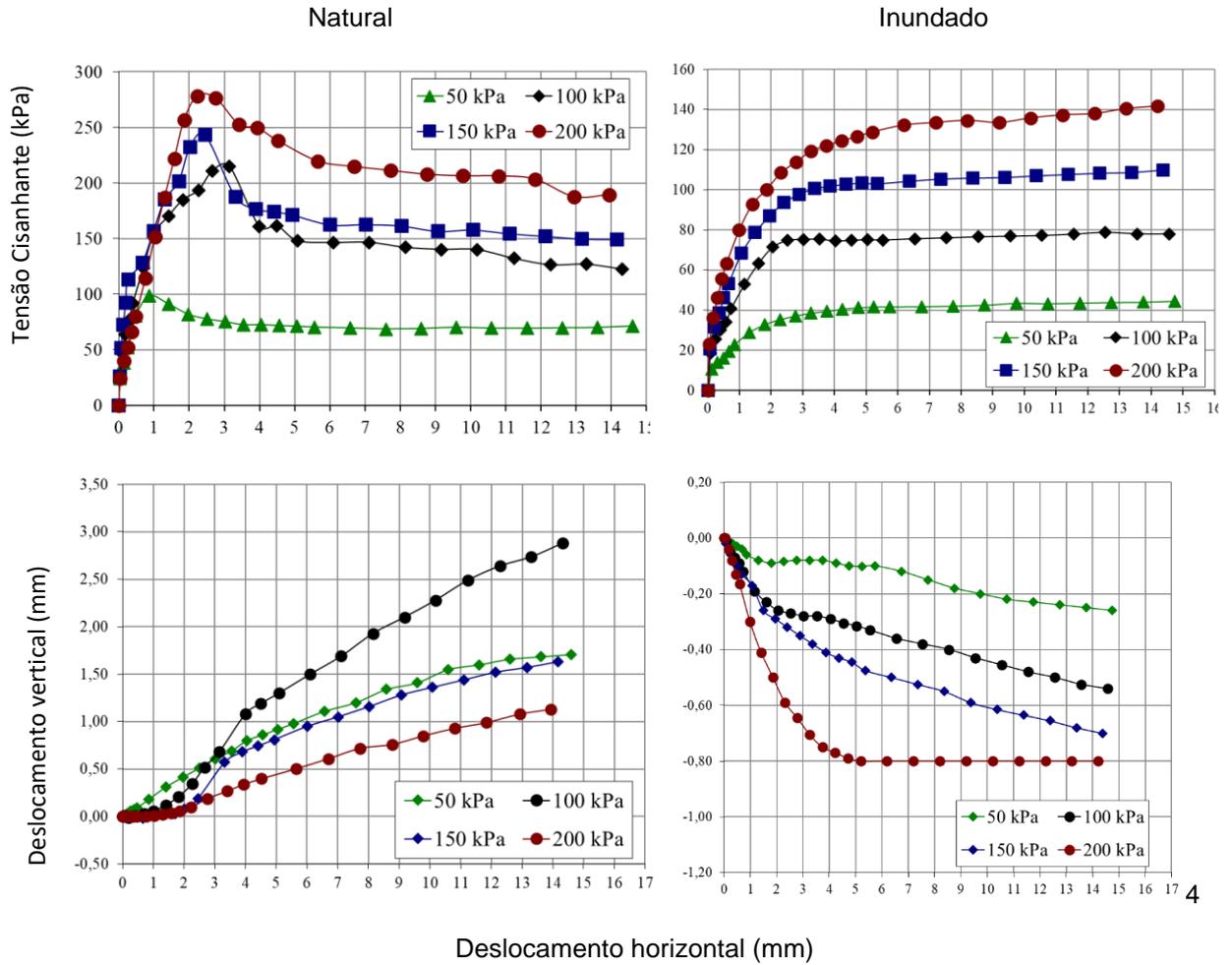
P-02 para o solo do Primeiro Terço da encosta na umidade natural e previamente inundado. Na umidade natural, no Primeiro terço (Topo), as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material friável com picos bem definidos em todas as tensões verticais aplicadas, para deslocamentos de 1 a 3%. Quando o solo é inundado previamente as curvas de Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal apresentam comportamento de material plástico e as curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam apenas compressão. A inundação causa uma redução de 82% da coesão do solo (67kPa para 12kPa) e uma variação no ângulo de atrito de 19  (48  para 29 ), Figura 73.

A Figura 74 apresenta as curvas Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal da Seção S-02 / P-05 para o solo do Segundo Terço da encosta na umidade natural e previamente inundado. Na umidade natural, no Segundo Terço, as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material friável com picos bem definidos nas tensões 100 kPa, 150 kPa e 200kPa, para deslocamentos de 3 a 5%, apenas a tensão de 50 kPa demonstra um comportamento plástico. As curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam dilatância para todas as tensões. Quando o solo   inundado previamente as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material plástico e curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam dilatância para as tensões aplicadas de 50 kPa e 100kPa e para as demais, compressão. Com a inundação a coesão do solo varia (8 kPa para 19 kPa) e o ângulo de atrito varia (42  para 30 ), Figura 75.

A Figura 76 apresentam as curvas Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal da Seção S-02 / P-08 para o solo Terceiro Terço da encosta na umidade natural e previamente inundado. Na umidade natural as curvas tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material plástico para todas as tensões. As curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam compressão para as tensões. Quando o solo   inundado previamente as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material plástico com endurecimento e curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam apenas compressão. A inundação causa uma

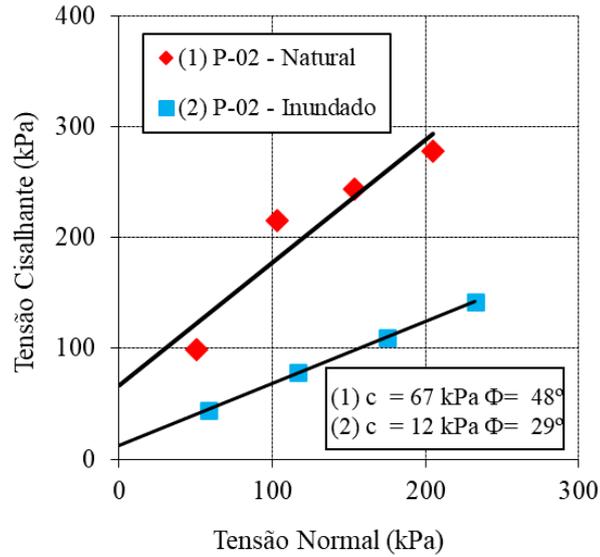
variação na coesão (14 kPa para 16 kPa) e uma redução do ângulo de atrito (36° para 25°), Figura 77.

Figura 72 – Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – Primeiro Terço S-02/ P-02 (Topo)



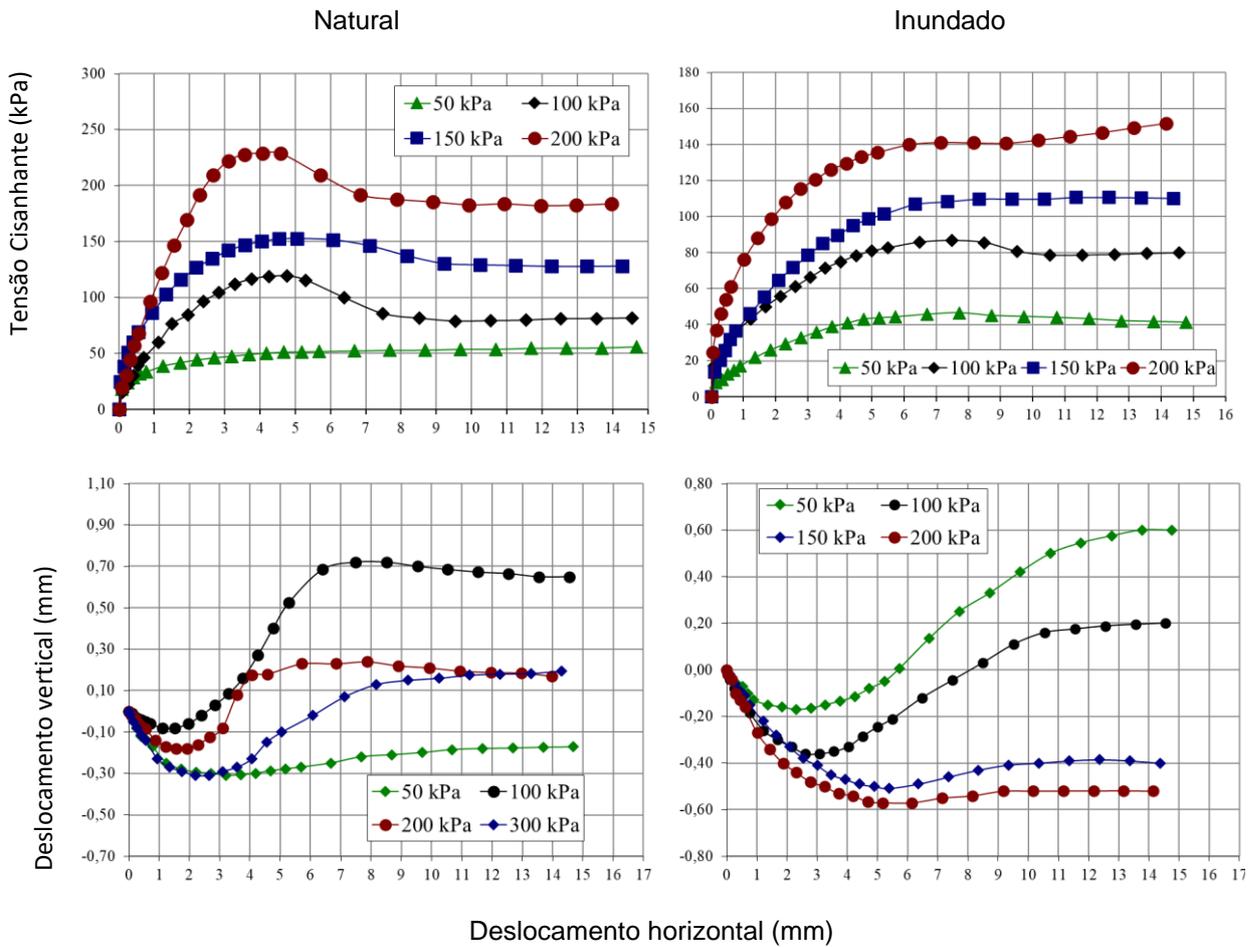
Fonte: O autor (2022)

Figura 73 – Envoltórias de resistência em P-02



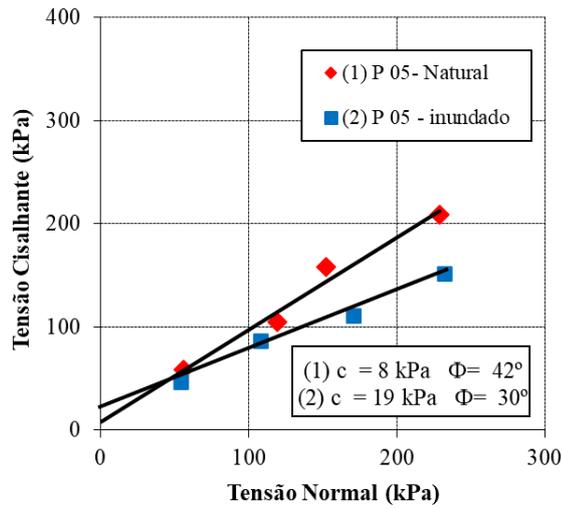
Fonte: O autor (2022)

Figura 74 – Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – Segundo Terço S-02/ P-05 (Meia Encosta)



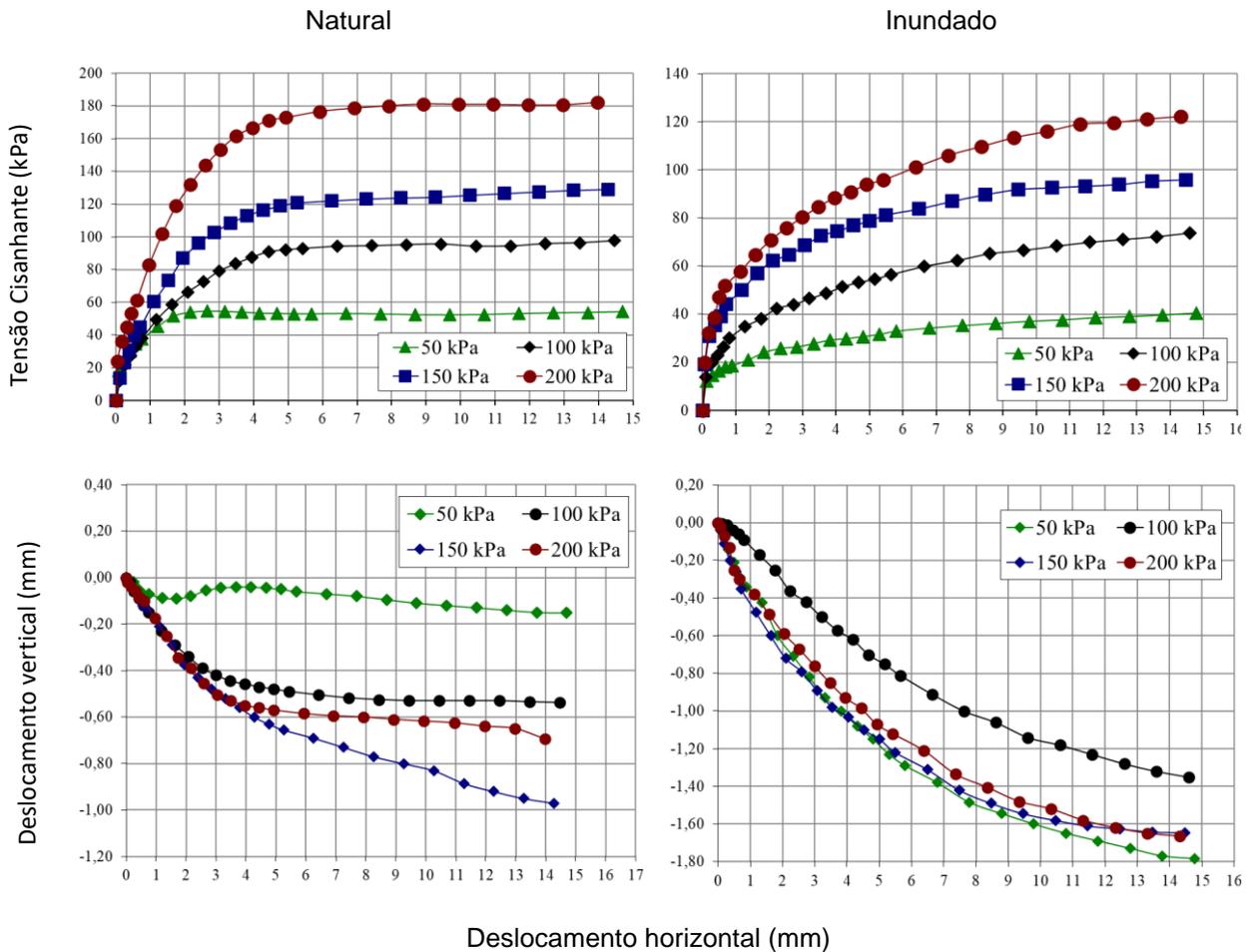
Fonte: O autor (2022).

Figura 75 – Envoltórias de resistência em P-05



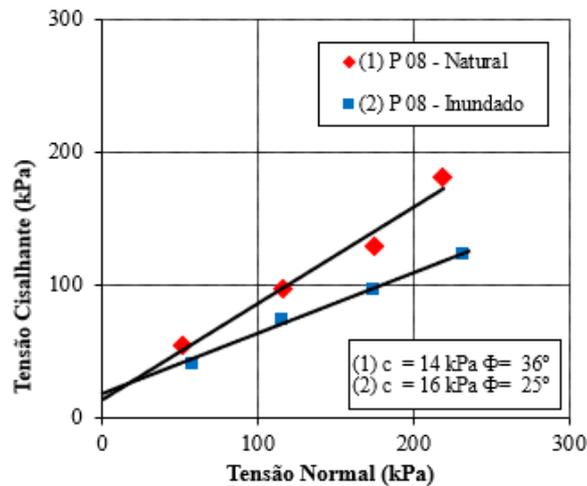
Fonte: O autor (2022).

Figura 76 – Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal –Terceiro Terço S-02/ P-08 (Próximo ao Sopé)



Fonte: O autor (2022).

Figura 77 – Envoltórias de resistência em P-08



Fonte: O autor (2022)

### c) Seção S-03

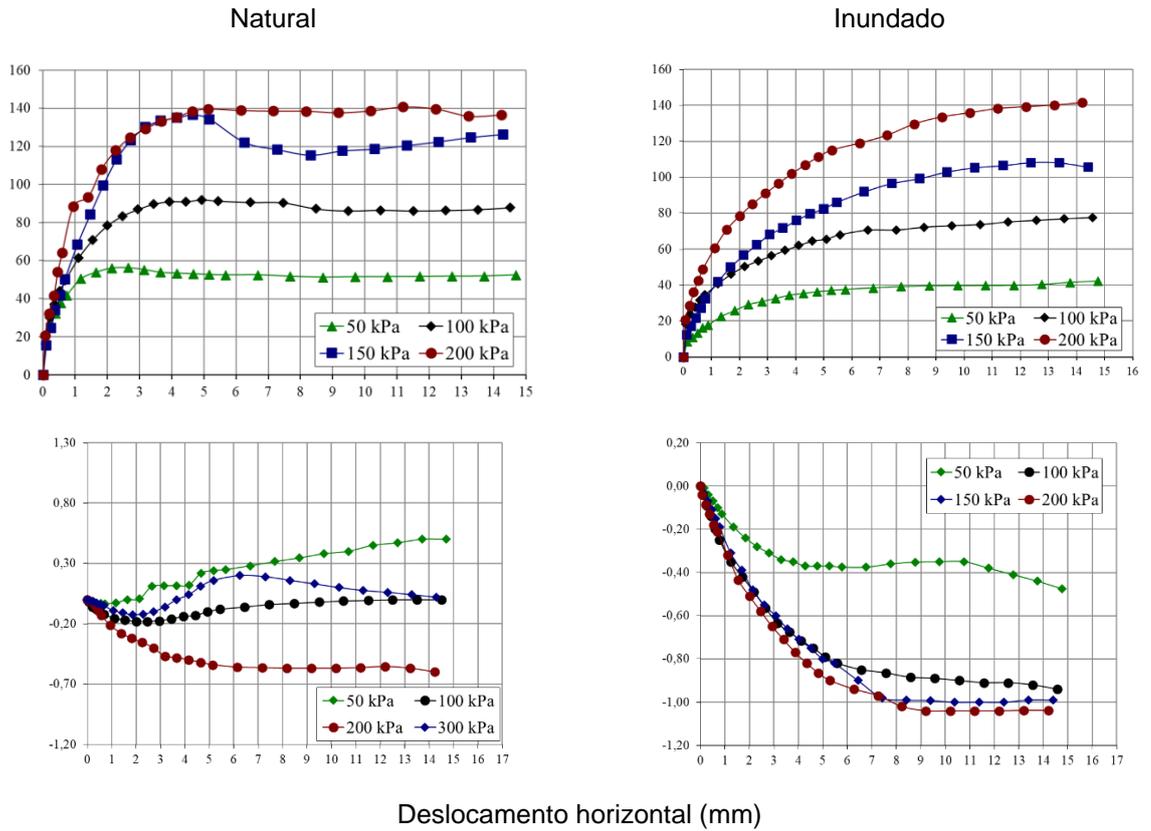
A Figura 78 apresenta as curvas Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal da Seção S-03 / P-03 para o solo do Primeiro Terço da encosta na umidade natural e previamente inundado. Na umidade natural, no Primeiro Terço (Topo), as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento plástico exceto para a tensão de 150 kPa que é de material friável. As curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal são de compressão exceto para a tensão de 200 kPa. Quando o solo é inundado previamente as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material plástico e curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam apenas compressão. Na inundação a coesão reduziu (de 33 kPa para 10 kPa) e o ângulo de atrito varia de 29  a 30 , Figura 79.

A Figura 80 apresenta as curvas Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal da Seção S-03 /P-06 para o solo do Segundo Terço da encosta na umidade natural e previamente inundado. Na umidade natural as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento plástico exceto para a tensão de 100 kPa que é de material friável. As curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal são de compressão exceto para a tensão de 50 kPa. Quando o solo é inundado previamente as curvas Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal apresentam comportamento de material plástico exceto para a tensão de 200 kPa e

curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentem compressão. Na inundação a coesão reduziu de 31 kPa para 17 kPa e o ângulo de atrito é de 30° nas duas situações, Figura 81.

A Figura 82 apresenta as curvas Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal da Seção S-03 / P-09 para o solo do Terceiro Terço da encosta na umidade natural e previamente inundado. Na umidade natural, no as curvas Tensão Cisalhante versus Deslocamento Horizontal apresentam comportamento de pico nas tensões de 50 kPa e 200 kPa e nas demais comportamento plástico. As curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam dilatância nas tensões de 50 kPa e 150 kPa e compressão nas tensões de 100 kPa e 200 kPa. Quando o solo é inundado previamente as curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal apresentam comportamento de material plástico com endurecimento e curvas Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal apresentam compressão exceto a de 200 kPa. Com a inundação a coesão reduziu de 30 kPa para 10 kPa e o ângulo de atrito passou de 37° para 28°, Figura 83.

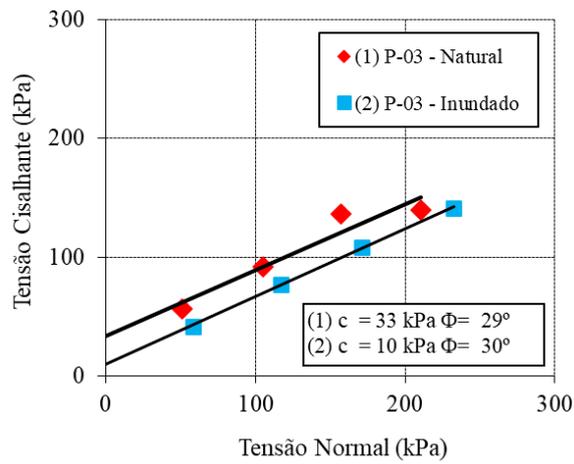
Figura 78 – Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – Primeiro Terço S-03/ P-03 (Topo)



Deslocamento horizontal (mm)

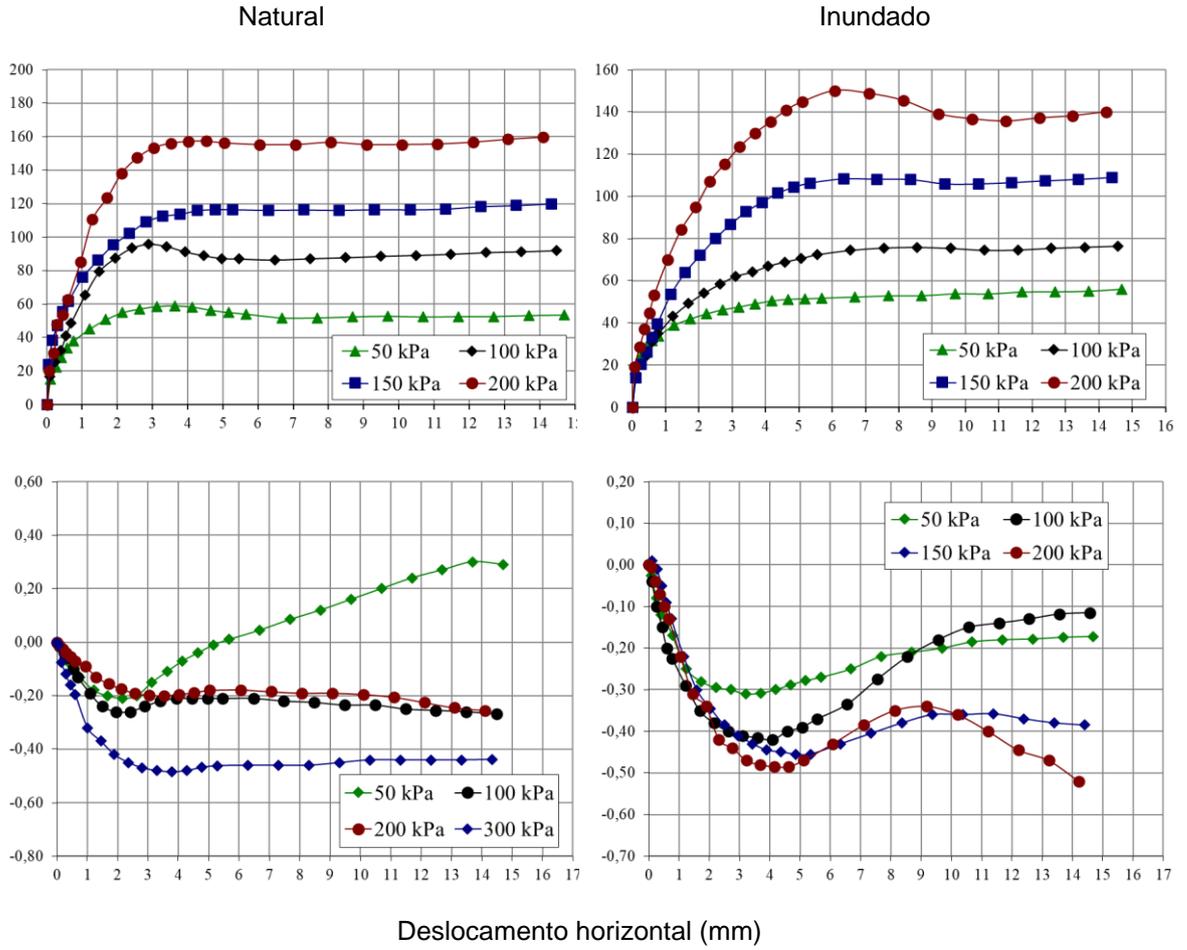
Fonte: O autor (2022)

Figura 79 – Envoltórias de resistência em P-03



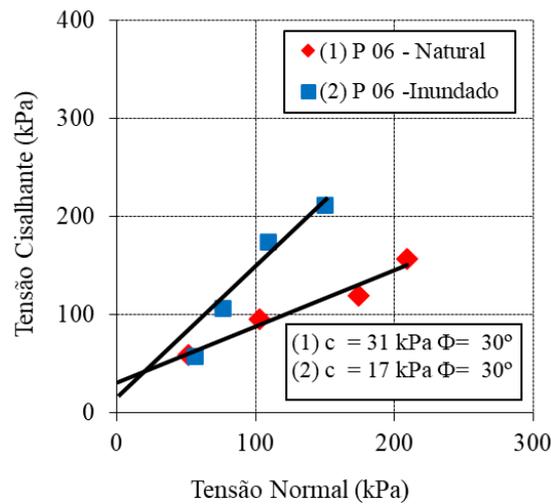
Fonte: O autor (2022)

Figura 80 – Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – Segundo Terço S-03/ P-06 (Meia Encosta)



Fonte: O autor (2022)

Figura 81 – Envoltórias de resistência em P-06

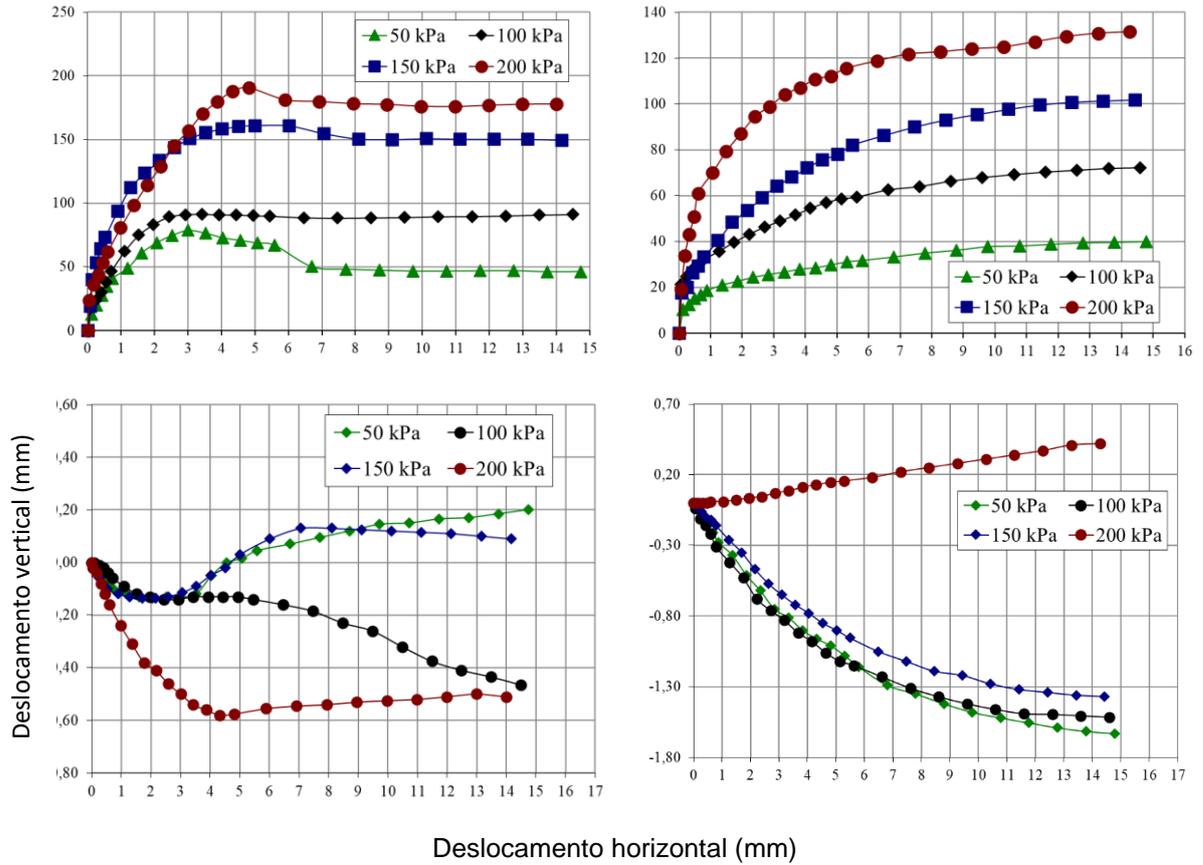


Fonte: O autor (2022)

Figura 82 – Curvas Tensão Cisalhante versus Deformação Horizontal e Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal – Terceiro Terço S-03/ P-09 (Próximo ao Sopé)

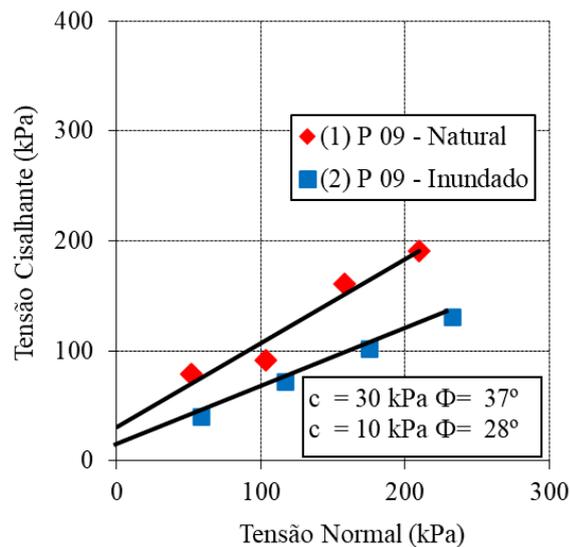
Natural

Inundado



Fonte: O autor (022)

Figura 83 – Envoltórias de resistência em P-09



Fonte: O autor (2022).

A Tabela 22 apresenta os valores de coesão e ângulo de atrito dos solos. A Figura 84 mostra os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo na umidade natural e inundado previamente nos três terços da encosta e a Tabela 23

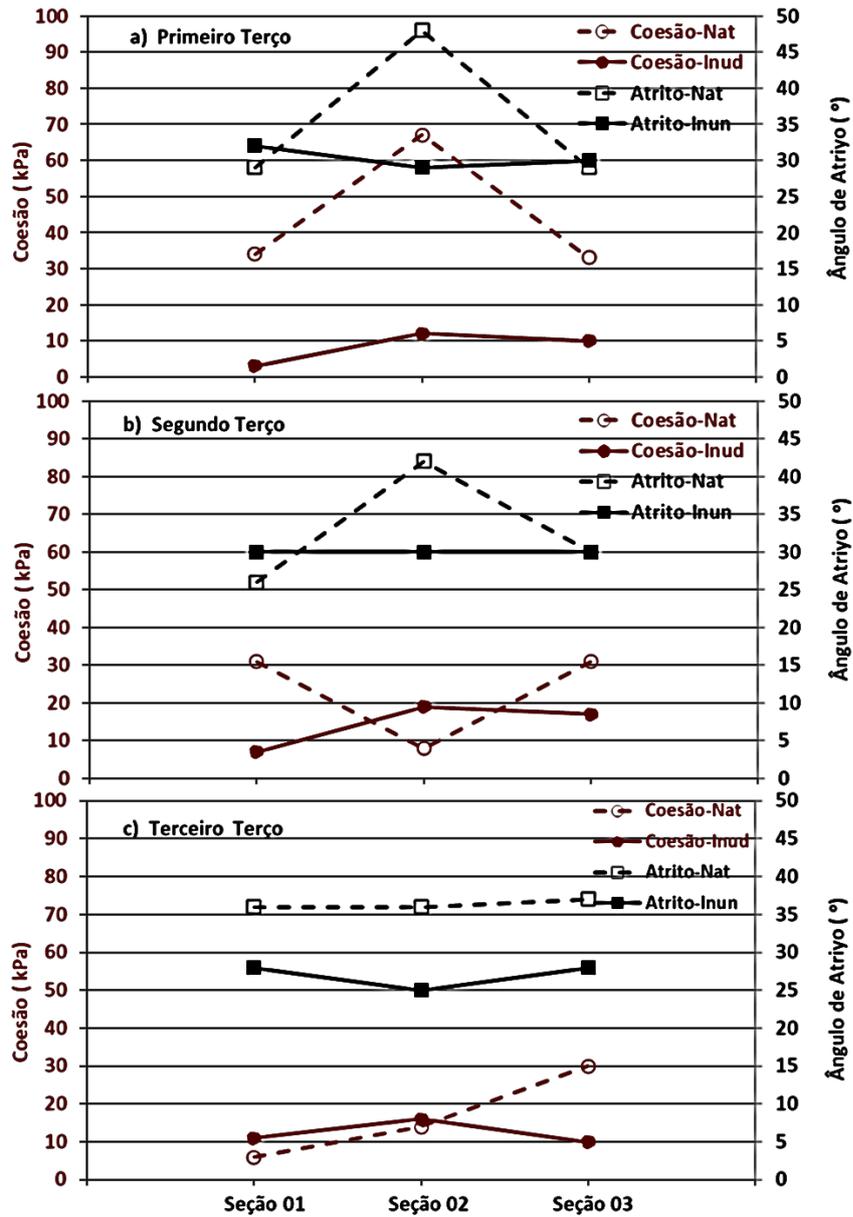
apresenta os valores médios da coesão, ângulo de atrito e percentual de perdas da coesão e ângulo de atrito para cada terço da encosta. A influência da inundação nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da encosta é expressiva, Figura 85. A inundação prévia causa uma redução na coesão do solo que varia de 81,34% no Primeiro Terço da encosta a 26,00% no solo do Terceiro Terço. No ângulo de atrito a redução é menor, variando de 25,69% no Terceiro Terço a 8,16% no Segundo Terço. A envoltória considerando os valores médios de resistência ao cisalhamento indica que o solo do Primeiro Terço é mais resistente do que nos demais terços. Quando inundado as envoltórias, os valores médios de resistência ao cisalhamento apresentam pequenas variações.

Tabela 22 – Dados da envoltória de resistência

Seção	Amostra	Ensaio	Coesão (kPa)	Ângulo (°)
S-01	P-01	CDN	34	29
		CDI	3	32
	P-04	CDN	31	26
		CDI	7	30
	P-07	CDN	6	36
		CDI	11	28
S-02	P-02	CDN	67	48
		CDI	12	29
	P-05	CDN	8	42
		CDI	19	30
	P-08	CDN	14	36
		CDI	16	25
S-03	P-03	CDN	33	29
		CDI	10	30
	P-06	CDN	31	30
		CDI	17	30
	P-09	CDN	30	37
		CDI	10	28

Fonte: O autor (2022).

Figura 84 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo na umidade natural e inundado previamente: a) Primeiro Terço da encosta, a) Segundo Terço da encosta, a) Terceiro Terço da encosta.



Fonte: O autor (2022).

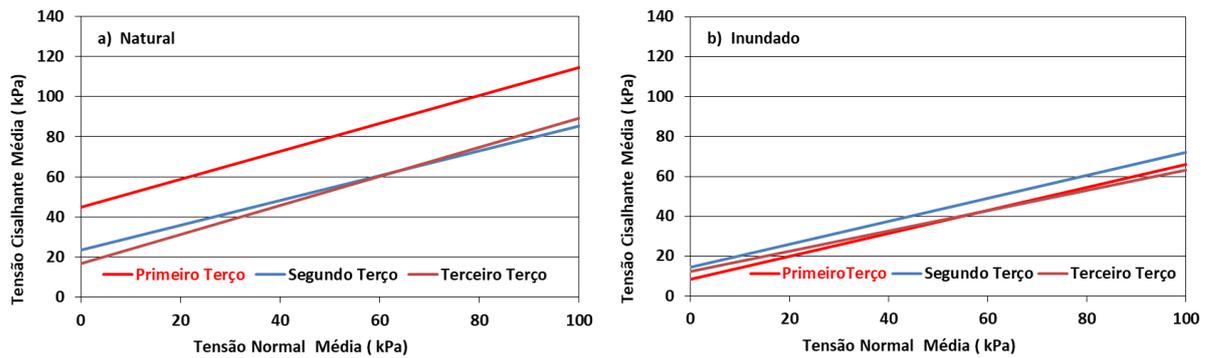
Tabela 23 - Valores médios da coesão, ângulo de atrito e percentual de perdas da coesão e ângulo de atrito para cada terço da encosta

Localização	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	% de perda devido à inundação
-------------	--------------	----------------------	-------------------------------

	Natural	Inundado	Natural	Inundado	Coesão	Atrito
Primeiro Terço	44,67	8,33	35	30	81,34	14,15
Segundo Terço	23,33	14,33	32	30	38,57	8,16
Terceiro Terço	16,67	12,33	36	27	26,00	25,69

Fonte: O autor (2022).

Figura 85 – Envoltórias média da resistência ao cisalhamento do solo: a) umidade natural e b) inundado previamente



Fonte: O autor (2022).

Outras pesquisas foram também realizadas com amostras de solo de Formação Barreiras na Região Metropolitana do Recife. A Tabela 24 apresenta uma síntese dos parâmetros de resistência de alguns desses locais. A construção deste banco de dados de ensaios realizados na RMR permite um melhor entendimento do solo local.

Tabela 24 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos provenientes da Formação Barreiras da RMR.

Local	Referência	Condição do corpo de prova	c (kPa)	$\Phi$ (°)
-------	------------	----------------------------	---------	------------

Recife	Coutinho et al. (1999)	Natural	13	31
		Inundado	0	30
	Lafayette (2000)	Inundado	7 – 13	24 – 26
	Santos (2001)	Natural	13	31
		Inundado	0	30
	Lima (2002)	Natural	28	31
		Inundado	10	32
	Meira (2008)	Natural	1,0 – 4,2	28 – 34
Inundado		0,4 – 3,5	23 – 26	
Camaragibe	Bandeira et al. (2004)	Inundado	12	29
	Silva (2005)	Natural	43 – 46	31 – 45
		Inundado	0 – 3,7	31 – 35
	Silva (2007)	Natural	45 – 47	31 – 44
		Inundado	0 – 3,7	31 – 34
	Magalhães (2013)	Natural	13 – 27	28 – 36
		Inundado	3,3 – 8,7	30 – 35
	Souza (2014)	Natural	7 – 28	32 – 35
Inundado		1 – 6	30 – 32	
Cabo de Santo Agostinho	Lafayette (2006)	Natural	33 – 56	33 – 36
		Inundado	1,5 -1,8	33 – 35

Fonte: Adaptado de Coutinho e Severo (2009)

#### 4.8 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 4

Os solos da camada superficial da encosta apresentam classificações diferentes, no entanto dentro do esperado para a unidade geológica Formação Barreiras. No Topo e na Meia Encosta os solos são classificados como areia argilosa (SC) ou areia siltosa (SM), já Próximo ao Sopé a fração de finos aumenta e os solos são classificados como argilas de alta plasticidade (CH) ou argilas de baixa plasticidade CL.

O perfil de solo da encosta é constituído por camadas de areia, areia argilosa, argila arenosa e siltes. Nos primeiros dois terços da encosta (0 – 10 m) o solo é predominantemente arenoso e do terceiro terço predomina argila. A relação entre o LL e o IP está compreendida entre a Linha A [IP = 0,73 (LL -20)] e abaixo da Linha U [IP = 0,9 (LL – 8)]. A suscetibilidade a expansão cresce do topo da encosta para o

sopé segundo a classificação Van Der Merve (1964) e passa de inativo a atividade normal segundo classificação de Skempton (1953).

Os picos presentes nesses difratogramas conferem com os principais picos de mineral argílico caulinita, indicando que este material está presente em todas as amostras. São encontrados também interestratificação irregulares de mica e presença de quartzo na fração argila.

Os solos são considerados neutro a levemente alcalino. Os valores dos cátions trocáveis apresentam baixos teores, inferiores a 18 cmol/kg (MEIRA, 2008). Os valores apresentados do CTC são baixos (inferiores a 27 cmol/kg), indicam a presença de mineral intemperizado. Os valores da saturação de base são superiores a 50% tratando-se de eutrófico.

Os solos do Primeiro e Segundo Terços da encosta, todos arenosos, apresentam curvas características com comportamento unimodal na relação umidade-sucção, exceto o solo de S-02 e P-02 que tem curva bimodal. A sucção dos solos no Primeiro e Segundo Terço da encosta é cerca de 5 a 7 vezes maior do que nos solos do Terceiro Terço da encosta.

A permeabilidade demonstra que os solos do Primeiro terço da encosta (Topo) apresentam melhores condições de permeabilidade, com percentuais da fração arenosa acima de 70%. Todavia no Terceiro terço (Próximo ao Sopé), o aumento no percentual da fração argilosa do solo torna o equipamento incapaz de identificar os padrões de permeabilidade.

A compressibilidade do solo do Terceiro Terço (Próximo ao Sopé, P-07) é em média cerca de quatro vezes maior do que dos solos do Primeiro Terço (Topo, P-03) e do Segundo Terço (Meia Encosta, P-05), enquanto o Índice de Expansão ( $C_s$ ) é em média cerca de quatro vezes maior (Tabela 11). Os solos do Topo e da Meia Encosta, encontram-se em umidade próxima da umidade higroscópica (1,52%) e são arenosos, enquanto o solo de Próximo ao Sopé tem umidade média de 12,42% é argiloso.

As tensões de pré-consolidação são menores no Primeiro Terço (52,00 kPa), crescem com a profundidade e no Terceiro Terço atinge o valor de (140 kPa). Os solos são classificados segundo o critério de Reginatto e Ferreo (1973) como condicionados ao colapso.

O comportamento das curvas tensão versus deslocamento é típico de material friável, plástico e plástico com endurecimento, na condição de umidade natural e predominantemente plástico quando o solo é inundado. A inundação influencia de

forma expressiva os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da encosta. A inundação prévia causa uma redução na coesão do solo que varia de 81,34% a 26,00%. No ângulo de atrito a redução é menor, variando de 25,69% a 8,16%. A envoltória de resistência ao cisalhamento indica que o solo do Primeiro Terço é mais resistente do que nos demais terços. Quando inundado as envoltórias, considerando os valores médios de resistência ao cisalhamento, são próximas nos três terços, com pequenas variações.

## **5 ANÁLISE DA DISPERSIVIDADE E ERODIBILIDADE DO SOLO**

São apresentados os resultados relativos à avaliação da dispersão na encosta, bem como a análise da erodibilidade de forma a se classificar e quantifica a suscetibilidade dos solos à erosão.

## 5.1 AVALIAÇÃO DA DISPERSIVIDADE

### 5.1.1 Avaliação da dispersividade através do ensaio do torrão (Crumb Test)

O solo da Meia Encosta na Seção S-02, após uma hora de observação, apresenta coloração no fundo do becker (Figura 86), tendo indicação de Grau de Dispersão 2 (levemente ou pouco dispersivo). Nas demais amostras, embora os torrões tenham desagregado ao serem colocados na água destilada, não foi visto a presença de coloração considerável até 1 hora (Figura 86), indicando que os solos possuem desagregação dos torrões, não apresentando nuvens colóidais. Desta maneira, são, portanto, classificados como solos Não Dispersivos (ND) segundo a classificação da Norma NBR 13601/20.

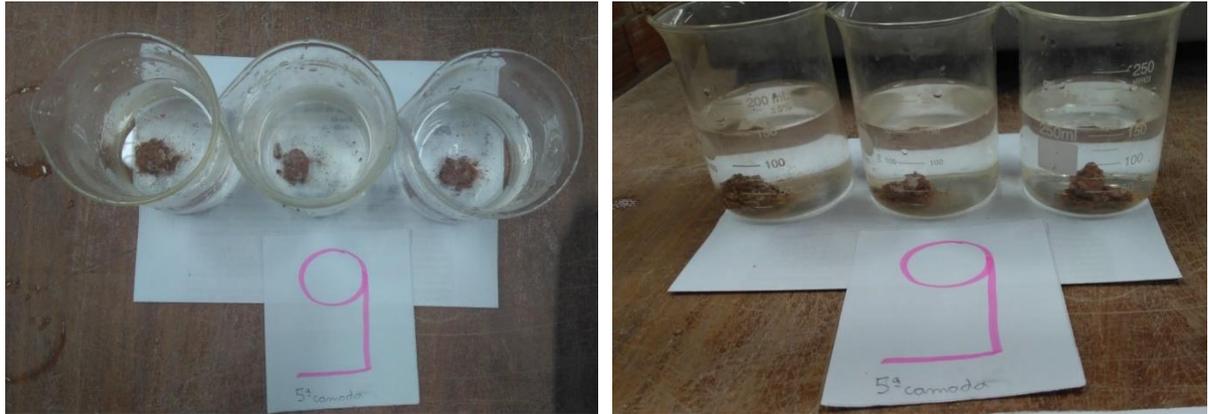
O Ensaio do Torrão mostra bons resultados qualitativos no que diz respeito à identificação do potencial de dispersão, podendo ser utilizado em campo para amostras de solo com umidade natural (TURKOZ et al., 2014).

Figura 86 – Ensaio do Torrão em P-05.



Fonte: O autor (2022).

Figura 87 – Ensaio do Torrão em P-09.



Fonte: O autor (2022).

### 5.1.2 Avaliação da dispersividade por meio de ensaio sedimentométrico comparativo (SCS)

Os resultados dos ensaios de granulometria com e sem uso do defloculante apresentados nas Figuras 41 a 43 evidenciam que a porcentagem de areia fina é maior, enquanto a fração argilosa é quase inexistente, com valores médios abaixo de 2% do solo na curva SS. Este comportamento é verificado por Ferreira (1995), Fucale (2000) e Freitas (2017), significando que a argila não dispersou.

De acordo com os critérios da norma MSL 12 (CESP, 1983), a maioria dos solos analisados são considerados não dispersivos, tendo em vista que o Percentual de Dispersão (PD) é menor que 20%, exceto em P-02 de 2,0 a 2,60 m e 2,9 a 5,0 m onde os solos são considerados. Quanto à proposta de avaliação da erodibilidade apresentada por Araújo (2000), nenhuma das amostras se enquadra dentro desta classificação. Embora este critério avalie a erodibilidade pela dispersividade, não é considerado um índice de dispersão propriamente dito. Logo, sendo os solos classificados como erodíveis, não implica em serem considerados dispersivos. A Tabela 25 apresenta o percentual de dispersividade.

Tabela 25 – Porcentagem de Dispersividade (PD)

Seção	Furos de Sondagem	Prof. (m)	Fração de Argila - < 0,005mm (%) DD (1)	Fração de Argila - < 0,005mm (%) SS (3)	Classificação		
					PD (%)	Dispersão (CESP, 1983)	Erodibilidade (ARAÚJO, 2000)
S-01	P-01	0,00 - 0,80	14,72	0,44	3,0	Não Dispersivo	Não Erodível
		0,80 - 2,20	24,09	0,44	1,8		
		2,20 - 3,30	17,96	0,44	2,4		
		3,30 - 5,0	17,04	0,44	2,6		
	P-04	0,00 - 3,00	24,98	1,58	6,3		
		3,00 - 5,0	56,89	4,66	8,2		
	P-07	0,00 - 1,00	63,10	1,52	2,4		
1,00 - 5,0		71,70	1,51	2,1			
S-02		0,00 - 0,20	26,85	0,70	2,6	Moderadamente Dispersivo	Erodibilidade alta
		0,20 - 1,00	24,10	0,64	2,7		
		1,00 - 1,30	15,29	0,44	2,9		
		1,30 - 2,00	12,82	0,54	4,2		
	P-02	2,00 - 2,60	27,32	8,82	32,3	Não Dispersivo	Não Erodível
		2,60 - 2,90	22,62	1,16	5,1	Moderadamente Dispersivo	Erodibilidade alta
		2,90 - 5,00	54,18	15,65	28,9		
	P-05	0,00 - 0,20	15,68	0,43	2,7	Não Dispersivo	Não Erodível
		0,20 - 0,80	20,28	0,44	2,2		
		0,80 - 1,30	22,45	0,43	1,9		
		1,30 - 1,70	32,45	0,71	2,2		
		1,70 - 2,10	36,67	0,80	2,2		
		2,10 - 2,90	30,17	0,75	2,5		
2,90 - 5,00		56,08	0,78	1,4			
P-08	0,00 - 0,40	46,13	0,87	1,9			
	0,40 - 5,0	57,29	0,90	1,6			
S-03	P-03	0,00 - 1,00	25,10	0,44	1,8	Não Dispersivo	Não Erodível
		1,00 - 3,00	18,17	0,44	2,4		
		3,0 - 5,00	17,71	0,44	2,5		
	P-06	0,00 - 0,40	28,85	2,58	8,9		
		0,40 - 2,30	10,08	0,44	4,4		
		2,30 - 5,00	13,38	0,43	3,2		
	P-09	0,00 - 1,60	65,96	1,59	2,4		
		1,60 - 1,90	26,57	1,58	5,9		
		1,90 - 2,00	34,78	1,59	4,6		
		2,00 - 2,90	39,62	1,57	4,0		
		2,90 - 3,50	57,11	3,13	5,5		
3,50 - 5,00	15,87	2,19	13,8				

Fonte: Autor (2022).

### 5.1.3 Avaliação da dispersibilidade por meio do Ensaio do Furo de Agulha (Pinhole Test)

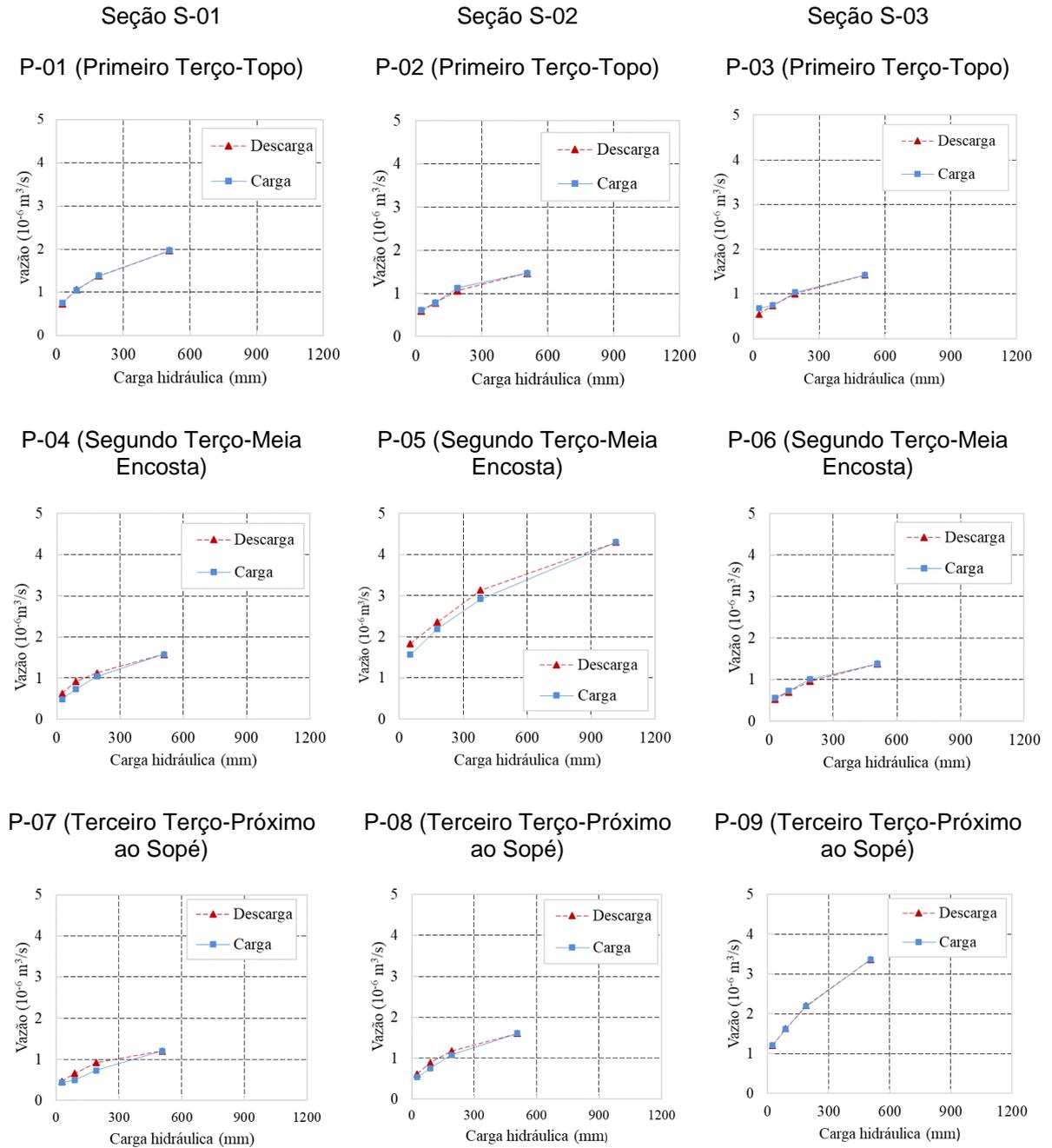
Os resultados do Ensaio do Furo de Agulha realizados em todas as amostras nas camadas superficiais de P-01 a P-09 são apresentados na Figura 88. A carga hidráulica inicial utilizada foi de 25,4 mm, atuante sobre as amostras de solo, gerando

vazões médias entre 0,43 e 1,57 ml/s. Nos primeiros 5 minutos de ensaio os oitos pontos (exceto P-05) apresentaram coloração completamente clara. Em todos os ensaios os furos permaneceram abertos, sem ter sido observado carreamento de sedimentos (Figura 89).

Com a aplicação das cargas de 88,9 mm, 190,5 mm e 508 mm, os pontos apresentam vazões médias entre 0,5 e 4,30 ml/s, com tempo total de duração de 35 minutos. Na fase de alívio de carga do ensaio até o retorno à carga inicial o tempo de duração é de 15 minutos, algumas amostras (P-04, P-07 e P-08) apresentam um leve acréscimo na vazão de descarga (aumento da vazão entre 9 e 30%), no entanto, não é observada nenhuma anormalidade. Em P-09 embora não tenha havido a mudança na coloração da água coletada para todas as cargas hidráulicas aplicadas, observa-se que a vazão do solo cresce com taxas superiores a dos demais seções, exceto para o solo da Seção S-02 no Segundo Terço (P-05).

Na Seção S-02, entretanto, o solo do Segundo Terço (Meia Encosta P-05) apresenta comportamento diferente dos demais, com turbidez no início do procedimento. Por isso, o tempo entre as cargas é aumentado para 10 minutos, com a aplicação da carga de 50,8 mm. A turbidez é mantida até o final da aplicação das cargas de 177,8 mm, 381 mm e 1016 mm. A amostra de solo de P-05 é classificada como dispersiva (D2).

Os resultados demonstram que os solos superficiais dos oitos furos (com exceção de P-05) não possuem dispersão, o que não significa que os mesmos não possam passar por processos erosivos, pois segundo Asakereh (2017) a dispersão é um fenômeno físico-químico, que leva à perda de adesão de partículas de argila. No entanto, a erosão do solo pode ocorrer por processos apenas físicos, que promovem o transporte do grão de uma região para outra.



Fonte: O autor (2022).

Solos dispersivos possuem estrutura instável, especialmente em contato com água, onde as partículas de argila perdem adesão. A dispersão do solo pode potencializar as características erodibilidade, tendo em vista a baixa resistência à erosão. A amostra de P-05 mostrou que, segundo Fattah (2014), a erodibilidade do solo pode ser evidenciada com base no aumento da taxa e turbidez do fluxo de saída.

Figura 89 – Ensaio do Furo de Agulha.



Fonte: O autor (2022).

#### 5.1.4 Análise da química da água intersticial

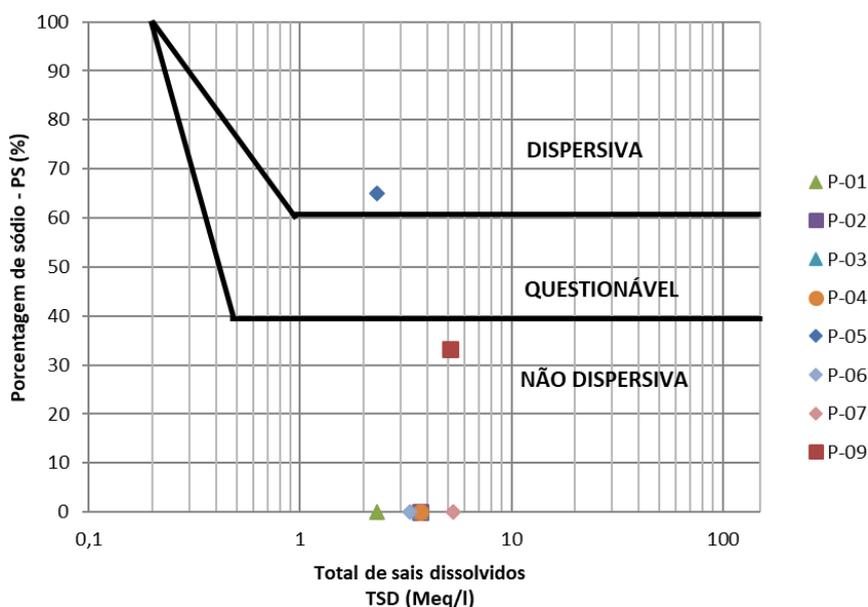
A Tabela 26 apresenta os teores de cálcio, magnésio, sódio e potássio dissolvidos em água intersticial, totais de sais dissolvidos (TSD), porcentagem de sódio (PS) presente e a razão de absorção de sódio (RAS). A Figura 90 apresenta a relação entre o percentual de sódio e o total de sais dissolvidos do solo. O teor de sódio ( $\text{Na}^+$ ) no ponto P-05 é significativo em relação aos outros elementos, apresentando um percentual (PS) de 64,95%. Com base nesta informação associado TSD e utilizando a metodologia proposta por Sherard, Dunningan e Decker (1976), o solo se enquadra na classificação de zona dispersiva, corroborando com os resultados verificados nos ensaios de torrão e furo de agulha. O solo encontrado em P-09 também apresenta um percentual de sódio (33,33%), no entanto de enquadra como sendo não dispersivo. Apenas as amostras dos pontos P-05 e P-09 apresentam valores de RAS. Segundo Mazllom et al. (2016) um percentual significativo da RAS pode comprometer a estrutura do solo promovendo degradação. De acordo com Lafayette (2006), Schossler et al. (2012) e Ferreira (2015), a suscetibilidade de ocorrer erosão interna por dispersão está associada principalmente com relação à quantidade de cátions de sódio e a quantidade total de sais dissolvidos.

Tabela 26– Propriedades químicas da água intersticial do solo.

Amostra (prof. até 1 m)	Teores de sais na água intersticial				Parâmetros		
	Ca <sup>++</sup> (meq/l)	Mg <sup>++</sup> (meq/l)	Na <sup>+</sup> (meq/l)	K <sup>+</sup> (meq/l)	TSD (meq/l)	PS (%) (meq/l)	RAS
P-01	2	0	0	0,3	2,3	0	0
P-02	2	1	0	0,7	3,7	0	0
P-03	3	0	0	0,7	3,7	0	0
P-04	3	0	0	0,7	3,7	0	0
P-05	5	0	12,6	1,8	19,4	64,95	7,97
P-06	2	1	0	0,3	3,3	0	0
P-07	3	2	0	0,3	5,3	0	0
P-08	2	2	0	0,9	4,9	0	0
P-09	2	1	1,7	0,4	5,1	33,33	1,39

Fonte: O autor (2022)

Figura 90 – Relação entre o percentual de sódio e o total de sais dissolvidos.



Fonte: Adaptado de Sherard, Dunningan e Decker (1976)

A Tabela 27 apresenta os principais pontos da análise de dispersividade do solo. De maneira geral, os ensaios demonstram que as Seções S-01 e S-03 não apresentam dispersão, enquanto em S-02, a Meia Encosta (P-05) identifica dispersão na camada superficial (0,0 m a 1,0 m), além de uma moderada dispersividade no Topo da encosta (P-02) nas profundidades de 2,0 m a 2,60 m e 2,9 m a 5,0 m.

Tabela 27– Resumo das análises de dispersividade.

Seção	Amostra	Classificação / Profundidade de dispersão
-------	---------	---

		Ensaio de Torrão (Crumb Test)	SCS	Ensaio de Furo de Agulha (Pinhole Test)	Análise química (água intersticial)
S-01	P-01	Não Dispersivo	Não Dispersivo	Não Dispersivo	Não Dispersivo
	P-04				
	P-07				
S-02	P-02	Levemente a pouco dispersivo (0,0 m a 1,0 m)	Moderadamente dispersivo (2,0 m a 2,6 m/ 2,9 m a 5,0 m)	Não Dispersivo	Não Dispersivo
	P-05				
	P-08	Não Dispersivo	Não Dispersivo	Dispersivo – D2 (0,0 m a 1,0 m)	Dispersivo (0,0 m a 1,0 m)
P-03					
P-06					
S-03	P-09	Não Dispersivo	Não Dispersivo	Não Dispersivo	Não Dispersivo

Onde: SCS – Ensaio sedimentométrico comparativo.

Fonte: O autor (2022)

## 5.2 ANÁLISE DA ERODIBILIDADE E TAXA DE PERDA DO SOLO

A análise da erodibilidade considera as relações granulométricas e de plasticidade, bem como o condicionamento de amostras a situações similares às encontradas em campo.

### 5.2.1 Avaliação do processo erodível

Através da caracterização geotécnica dos pontos de amostragem, é apresentada a aplicação de critérios (baseados na granulometria e plasticidade) elaborados por Meirelles (1967). São destacados nos resultados teores de finos entre 5,48 e 14,64 % em algumas camadas nos furos P-01, P-02, P-03, P-06 e P-09, caracterizando um solo como sendo de forte erosão, associados a uma inatividade da argila e uma expansividade baixa (Tabela 28). Os pontos P-07 e P-08 apresentaram teores de finos entre 33 e 54%, sendo por isso, considerados com atividade da argila normal, com expansividade variando de alta a muito alta e poucos erodíveis.

Os pontos (P-07, P-08 e P-09) nas três seções verticais apresentam erodibilidade baixa. Vale salientar que, em P-09 existe um faixa de profundidade (entre 1,60 m e 1,90 m) passível de forte erosão. Os pontos intermediários P-04, P-05 apresentaram solos com potenciais erosivos de pouco a passíveis de forte erosão. Já

os pontos P-01, P-02, P-03 e P-06, as classificações são de passíveis de forte erosão a erodibilidade alta.

Tabela 28 – Suscetibilidade à erosão pela classificação de Meirelles (1967).

Pontos da Sondagem	Prof. (m)	Fração de Argila < 0,002mm (%)	IP (%)*	IA (%)**	Atividade da Argila	Expansividade	Classificação erodibilidade Meirelles (1967)
					Skempton (1953)	Van Der Merwe (1964)	
P-01	0,00 – 0,80	13,50	NP		Inativa	Baixa	Forte erosão
	0,80 – 2,20	22,85	10,94	47,87			Passíveis de forte erosão
	2,20 – 3,30	8,96	NP				Forte erosão
	3,30 – 5,0	14,64					
P-04	0,00 – 3,00	19,19	17,66	92,03	Normal	Média	Passíveis de forte erosão
	3,00 – 5,0	40,84	22,95	56,19	Inativa	Baixa	Poucos erodíveis
P-07	0,00 – 1,00	45,87	54,40	118,59	Normal	Muito Alta	Poucos erodíveis
	1,00 – 5,0	53,21	63,39	119,13			
P-02	0,00 – 0,20	22,26	15,46	69,45	Inativa	Média	Passíveis de forte erosão
	0,20 – 1,00	22,27	11,76	52,81		Baixa	Forte erosão
	1,00 – 1,30	11,86	NP				Passíveis de forte erosão
	1,30 – 2,00	10,30		6,89			30,93
	2,00 – 2,60	22,27	NP			Alta	Poucos erodíveis
	2,60 – 2,90	14,16	21,97	60,51			
	2,90 – 5,00	36,31					
P-05	0,00 – 0,20	11,09	NP		Inativa	Baixa	Passíveis de forte erosão
	0,20 – 0,80	14,54					
	0,80 – 1,30	15,60	14,51	93,01	Normal	Média	
	1,30 – 1,70	23,53	16,65	70,76	Inativa	Média	Poucos erodíveis
	1,70 – 2,10	25,62	24,14	94,22			
	2,10 – 2,90	20,92	21,75	103,97	Normal	Alta	Passíveis de forte erosão
	2,90 – 5,00	42,07	42,74	101,60			Muito Alta
P-08	0,00 – 0,40	33,69	24,38	72,36	Inativa	Alta	Poucos erodíveis
	0,40 – 5,0	41,95	37,37	89,08	Normal	Muito Alta	
P-03	0,00 – 1,00	23,87	NP		Inativa	Baixa	Passíveis de forte erosão
	1,00 – 3,00	14,66					Forte erosão
	3,00 – 5,00	12,38					
P-06	0,00 – 0,40	17,63	NP		Inativa	Baixa	Passíveis de forte erosão
	0,40 – 2,30	5,48					Forte erosão
	2,30 – 5,00	9,93					
P-09	0,00 – 1,60	51,48	45,25	87,90	Normal	Muito Alta	Poucos erodíveis
	1,60 – 1,90	19,27	22,86	118,63		Média	Passíveis de forte erosão
	1,90 – 2,00	27,37	24,91	91,01		Inativa	Alta
	2,00 – 2,90	30,48	21,95	72,01			
	2,90 – 3,50	36,96	16,23	43,91	Baixa		
	3,50 – 5,00	6,67	NP			Baixa	Forte erosão

Fonte: O autor (2022).

\*IP – Índice de Plasticidade;

\*\* IA – Índice de Atividade da Argila.

## 5.2.2 Análise da erodibilidade obtidos com o Inderbitzen modificado

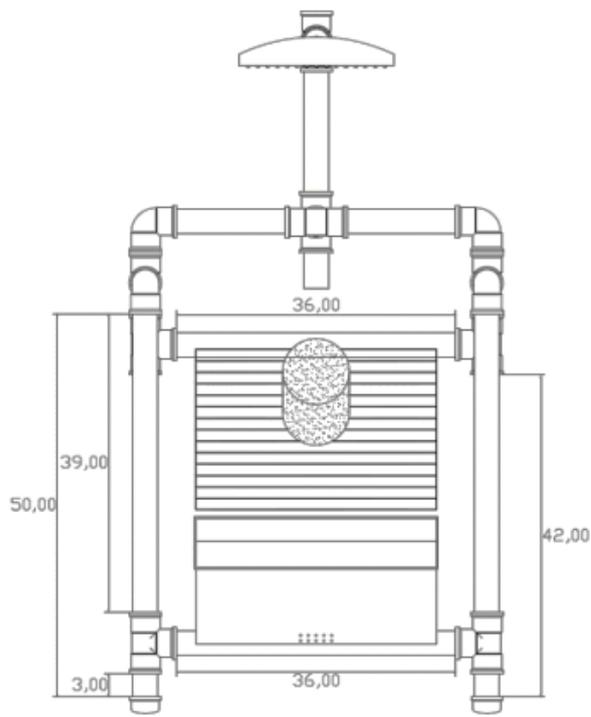
a) Desenvolvimento do equipamento

O desenvolvimento do protótipo foi devido a simplicidade de confecção do equipamento, execução do ensaio e ainda, baixo custo. Assim como o projeto de Gonçalves e Silva (2019), optou-se por utilizar o PVC como elemento básico do equipamento. A utilização deste produto facilita seu manuseio durante o processo construtivo.

As dimensões do equipamento são definidas de forma a manter a versatilidade e praticidade de transporte e instalação e, ao mesmo tempo, prezando-se pela estabilidade estrutural. O diâmetro do chuveiro é superior ao diâmetro da amostra ensaiada, que garante o impacto uniformemente distribuído da água em toda a sua superfície.

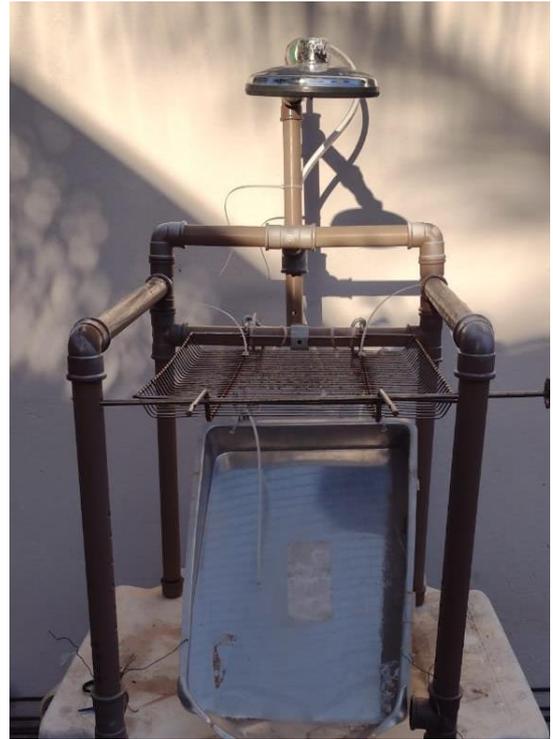
Foi realizada uma adaptação que permite o ajuste da altura do chuveiro em relação à face da amostra. Esses dois aspectos cooperam para a simulação mais adequada de uma situação de maciço de solo submetido à precipitação. A variação da altura de chuveiramento é realizada através da adaptação de um “Tê” de redução galvanizado, com hastes metálicas para fixação.

Outra importante adaptação foi a incorporação de mecanismo que permite a inclinação da superfície de apoio da amostra (grelha). Para isto, em uma extremidade foi fixada a grelha e na outra extremidade, os pinos são apoiados sobre uma barra de aço que é encaixada nos furos que correspondem à inclinação desejada. O mecanismo é simples, requerendo apenas a mudança de lugar da barra de aço e apoio da grelha na inclinação requerida. As Figuras 91 e 92 apresentam detalhes do projeto.



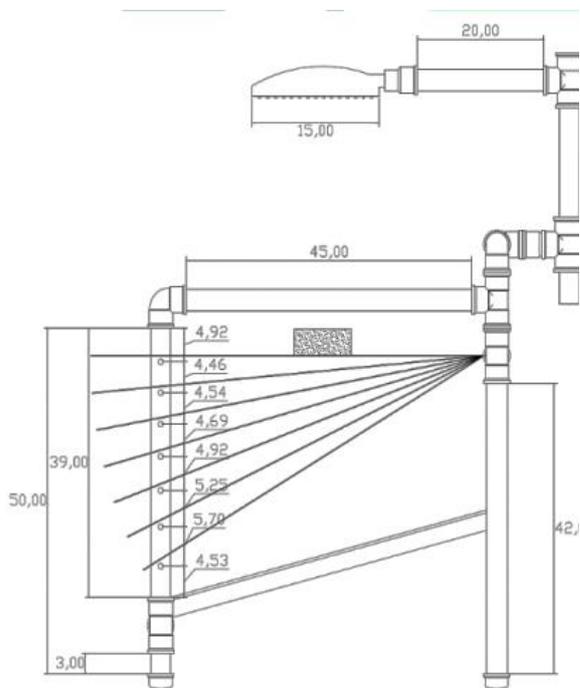
(medidas em cm)

Fonte: Gonçalves e Silva (2019)



Fonte: O autor (2022)

Figura 92 – Vista lateral do Inderbitzen



(medidas em cm)

Fonte: Gonçalves e Silva (2019).



Fonte: O autor (2022)

b) Avaliação da erodibilidade

A avaliação da suscetibilidade erosiva do solo com a incidência direta da chuva (água) ao escoamento superficial utiliza o equipamento de Inderbitzen Modificado. Foram realizados trinta e seis ensaios do Topo da Encosta (P-01), sendo doze na umidade seca ao ar, doze na umidade natural e doze na condição de pré-umidecido.

A Tabela 29 apresenta os valores da Tensão de cisalhamento do escoamento ( $T_h$ ), Tensão Cisalhante Crítica ( $\tau_{crit}$ ) e Taxa de Erodibilidade (K) considerando três condições de umidade, três vazões (1,8 l/min, 3,0 l/min e 3,6 l/min) e quatro inclinações da grelha (0°, 35°, 38° e 40°). Vale ressaltar que os ensaios considerando as amostras na inclinação de 0° não apresentaram valores representativos, por isso não foram considerados.

Tabela 29– Obtenção da Tensão Cisalhante Crítica ( $\tau_{crit}$ ) e Taxa de Erodibilidade (K).

Vazão									Condição	$\tau_{crit}$ (Pa)	K (10 <sup>-9</sup> Kg/m <sup>2</sup> /s/Pa)
1,8 l/min			3,0 l/min			3,6 l/min					
Inclinação (i)									W natural	1,04	0,1305
35°	38°	40°	35°	38°	40°	35°	38°	40°			
$T_h$ (Pa)									Seco ao ar	0,46	0,132
1,83	2,14	2,57	2,32	2,79	3,18	3,07	3,49	3,84	Pré-umidecida	0,86	0,075

Fonte: O autor (2022)

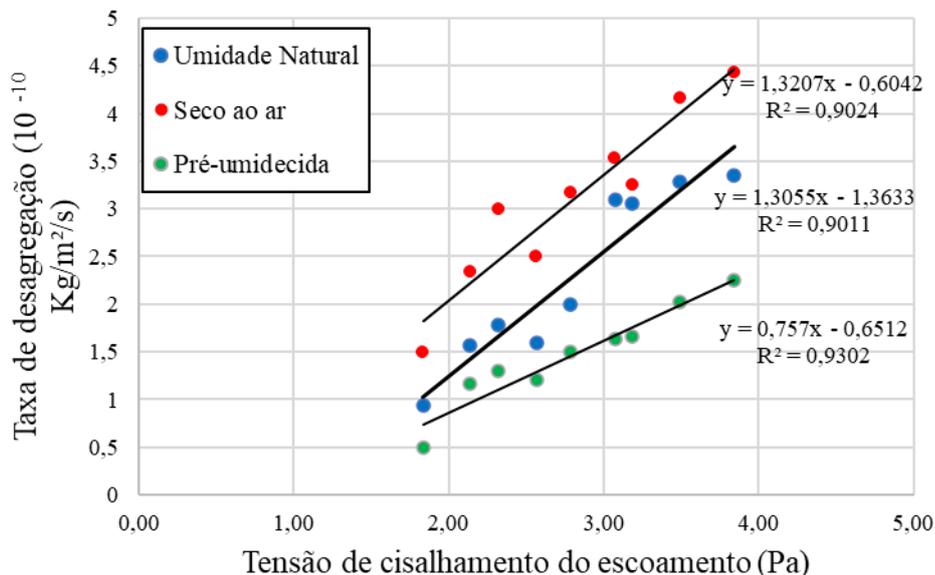
Onde:  $T_h$  - Tensão de cisalhamento do escoamento;  $\tau_{crit}$  - Tensão cisalhante hidráulica crítica; K - Taxa de erodibilidade.

Considerando o critério de erodibilidade proposto por Bastos (1999) as amostras são classificadas de mediana erodibilidade. A condição de umidade seca ao ar, apresenta o valor de K levemente acima das outras condições, mesmo estando na mesma classificação. Conforme Soares et al. (2018) argissolos apresentam como medianamente erodíveis em taludes de corte, por isso suas faces não devem ficar expostas.

Conforme Dyonisio (2010), quando o solo está sem cobertura vegetal, sua atividade biológica é afetada pelos raios solares, causando elevação da temperatura superficial, eliminando boa parte da microfauna e flora, deixando-o o solo mais susceptível à erosão.

Os valores da Tensão Cisalhante Hidráulica estão apresentados na Figura 93. Observa-se um aumento nos valores de perda de solo na condição seca ao ar, pois quanto mais seco, maior o risco das pressões ultrapassarem a coesão do solo durante o umedecimento (ALMEIDA, 2014; CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015; COUTO, 2020). Os valores também corroboram com os resultados encontrados por Lafayette (2006) e Meira (2008) para solos da Formação Barreiras. Segundo Lafayette (2006) solos desta unidade geológica podem apresentar erosões na forma de agregados milimétricos, resistentes a desagregação em água, devido ao possível efeito da cimentação e da sucção intra-agregados.

Figura 93 – Taxa de desagregação versus tensão de cisalhamento do escoamento.



Fonte: Autor (2022).

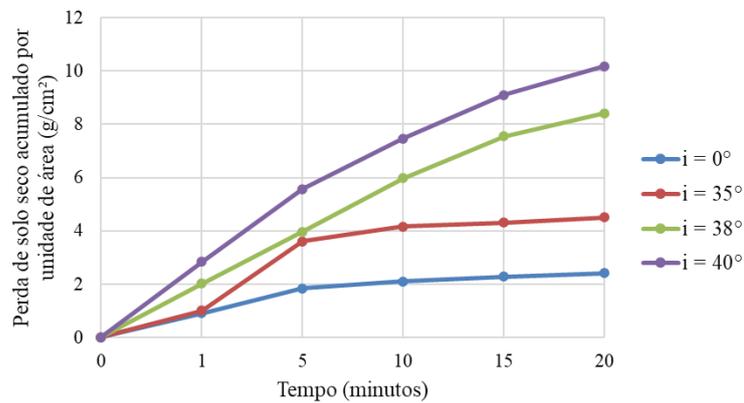
É possível evidenciar que a dispersão dos dados é pequena, o que é indicado pelos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) que são superiores a 90%. Isto demonstra que os dados de erodibilidade e de tensão cisalhante crítica são confiáveis tendo em vista que os valores observados no Inderbitzen estão próximos às linhas de tendência correspondentes (ENRIQUEZ et al., 2015).

Para melhor conhecimento das condições de suscetibilidade do solo à erosão, as perdas de solo também são apresentadas destacando as condições de inclinação da rampa ( $0^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $38^\circ$  e  $40^\circ$ ), mostradas na Figura 94. Observa-se nas três condições

de umidade que a declividade e a perda de solo estão interligadas entre si. Quanto maior a declividade maior a velocidade de escoamento, consequentemente, é provável transporte de sedimentos.

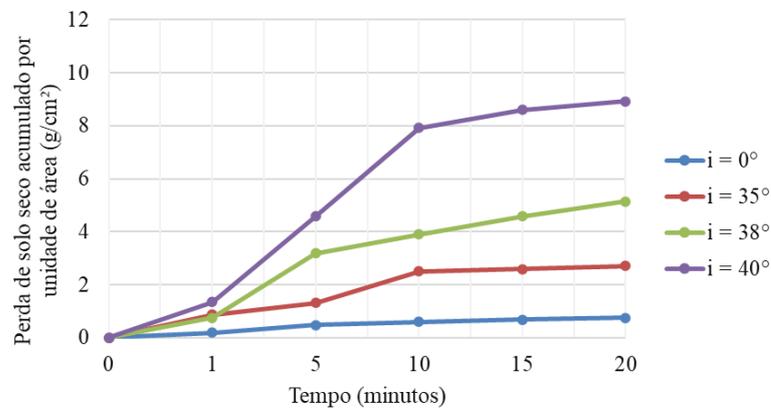
Figura 94 – Perda de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) versus tempo (minutos) para vazão de 1,81 l/min. a) Seco ao ar, b) Umidade Natural, c) Pré-umidecido.

a) Seco ao ar



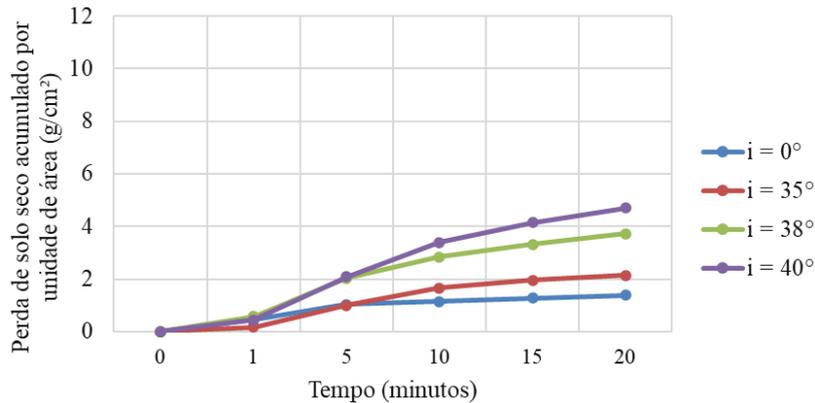
Fonte: O autor (2022).

b) Umidade natural



Fonte: O autor (2022).

c) Pré-umidecida



Fonte: Autor (2022).

Percebe-se também que há um crescimento da perda de solo ao longo do tempo em todas as condições de umidade, sendo as amostras secas ao ar as que apresentam maior perda. Estes resultados são similares as curvas típicas de perda de solo apresentadas por Fácio (1991), bem como aos dados encontrados por Meira (2008) no bairro do Ibura (Recife) e Silva (2016) em Abreu e Lima. Segundo Carvalho et al. (2001) antes da precipitação e do fluxo superficial, o solo se encontra normalmente no estado não saturado e, portanto, submetido a forças capilares e/ou de sucção. Neste caso o modo como se dá a saturação pode propiciar o desprendimento e a desagregação das partículas de solo, aumentando assim nesta fase a perda de solo.

### 5.3 ANÁLISE DO PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE - DPL

O ensaio DPL se mostra relevante como método de avaliação do comportamento mecânico dos solos. Este método mostra uma correlação satisfatória quando comparado com ensaios clássicos como o SPT e o CPT (CARVALHO, 2017; SACRAMENTO NETO et al., 2018). A Tabela 30 apresenta os deslocamentos iniciais produzidos pelo posicionamento do equipamento sobre a superfície. Foi observado que os deslocamentos iniciais foram bem discretos Próximo ao Sopé, o que pode ser justificado pelo processo de consolidação natural do solo na superfície.

Na Meia Encosta, observa-se que neste cenário há um acréscimo maior que 100% do descolamento no patamar, salientando que não houve aplicação dos golpes, apenas a instalação do equipamento. São identificadas uma diminuição na resistência

superficial, tendo em vista que em três sequências foram deferidos dois impactos do equipamento sobre o solo e houve uma descida média de 40 cm.

Próximo ao Sopé apresentam deslocamentos provocados pelo peso próprio do equipamento maiores que as camadas acima, além da baixa resistência superficial (inferior a 1 MPa) na camada de 10 centímetros. Isto pode ser um indicativo da evolução processos erosivos nesta região, decorrentes ausências de resistência superficial.

As amostras além de sofrerem deslocamentos iniciais, também apresentam pouca resistência nas camadas seguintes, em P-07 com o primeiro golpe deferido houve uma descida de 9 cm. No solo de P-08 em uma sequência de dois golpes, houve uma descida de 40 cm, demonstrando a fragilidade destas camadas. Já em P-09 a situação foi ainda mais evidente, pois com um golpe o equipamento desceu 36 cm.

Tabela 30 – Deslocamentos iniciais pelo peso próprio

	<b>Seção S-01</b>	<b>Seção S-02</b>	<b>Seção S-03</b>
<b>Topo da Encosta</b>	P-01	P-02	P-03
<b>Deslocamento pelo peso próprio (cm)</b>	2,5	3,0	0,4
<b>Meia Encosta</b>	P-04	P-05	P-06
<b>Deslocamento pelo peso próprio (cm)</b>	6,8	10,0	4,8
<b>Próximo ao Sopé</b>	P-07	P-08	P-09
<b>Deslocamento pelo peso próprio (cm)</b>	10,5	16,5	10,0

Fonte: O autor (2022).

A Figura 95 apresenta as resistências a penetração necessárias para a cravação do cone do DPL ao longo da profundidade. É observado no Topo da Encosta uma resistência do solo já nas camadas superficiais, apresentando valores entre 1,2 MPa e 5,0 MPa para descida dos 10 cm iniciais. Isto pode ser justificado pelo processo de consolidação natural promovido pela ação de cimentação do óxido de ferro presente no solo, favorecendo o aumento da resistência dos solos e inibindo processos erosivos superficiais. Conforme Schlogel (2020) camadas superficiais com boa resistência mecânica conseguem resistir também a processos erosivos de maneira satisfatória.

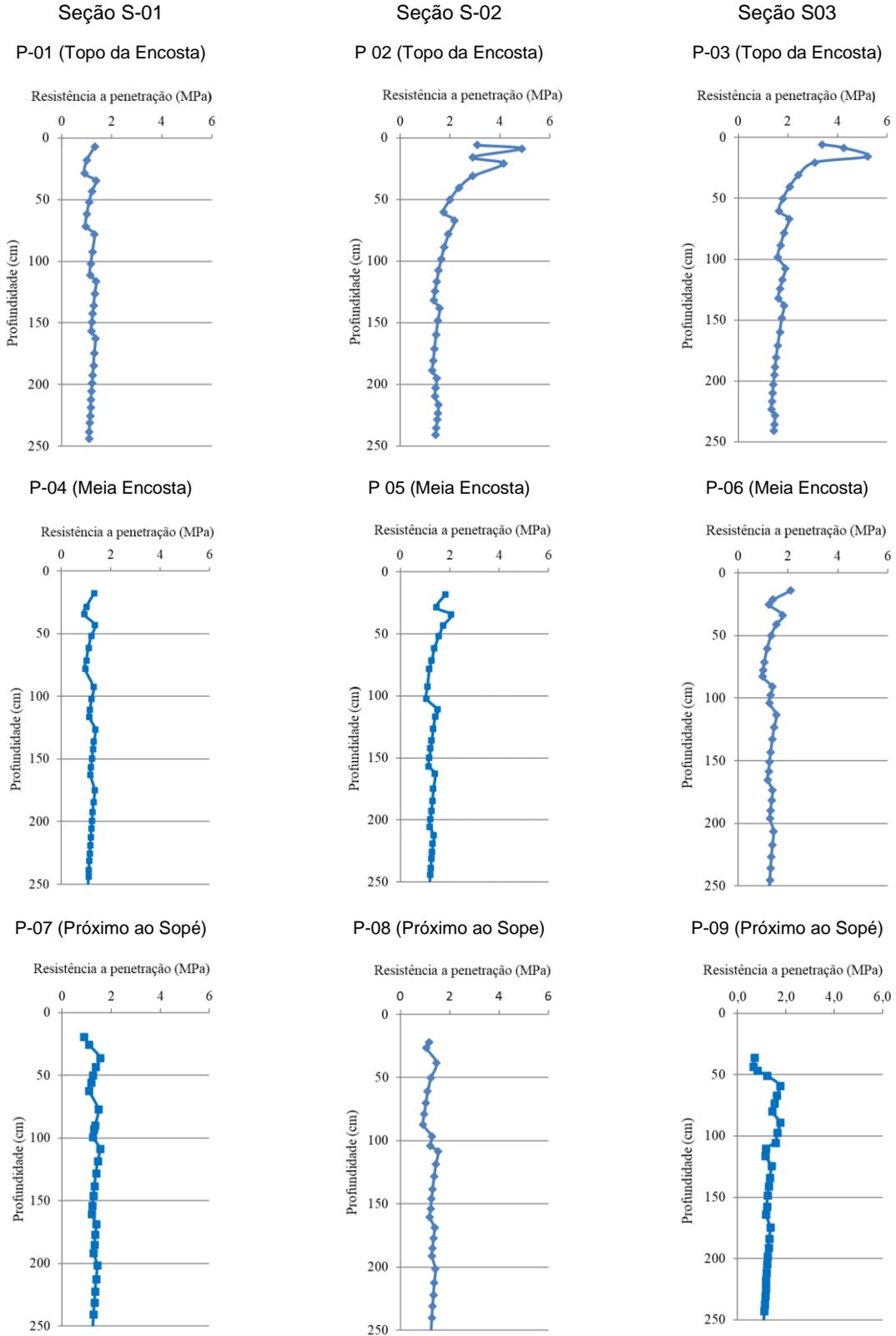
Além disso, esta proteção superficial evita a migração de frações de solo. Segundo Silva (2014) a ocorrência de fragmentos rochosos ou processos de cimentação aumenta os impactos durante o DPL. Ao longo da profundidade (até os 2,5 m), a resistência à penetração apresenta um leve decréscimo passando a apresentar resistências inferiores a 2 MPa nos três pontos (P-01, P-02 e P-03), podendo favorecer processos erosivos caso a camada superficial seja removida.

Na Meia Encosta a resistência a penetração diminuiu em função do deslocamento com o peso do equipamento além da redução de mais de 50% da resistência em P-05 e P-06. Neste caso, uma das hipóteses se deve ao fato de que parte da área está desprotegida da camada mais consolidada, presente no Topo da encosta, expondo o solo arenoso e favorecendo os processos erosivos além da redução da resistência.

O trecho Próximo ao Sopé apresenta resistências à penetração nas camadas superficiais inferiores aos cortes acima (inferiores a 1,5 MPa). Vale enfatizar que na profundidade até 50 cm, a camada em P-09 apresenta uma redução da resistência sendo uma exceção, já que em todos os outros pontos com o avanço da profundidade houve o acréscimo na resistência do solo.

De maneira geral, todos os resultados do DPL demonstraram que as variações de resistência à penetração ocorrem nas camadas superficiais (de 0 até 50cm). Conforme o ensaio se aprofundava até seu encerramento as camadas apresentam solos com resistência em torno de 1 MPa.

Figura 95 – Resistência à penetração relacionado a profundidade para os pontos



Fonte: O Autor (2022).

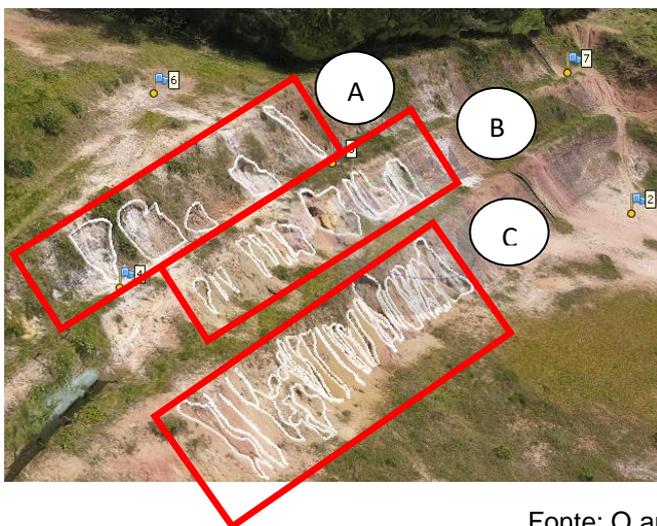
#### 5.4 MAPEAMENTO DAS EROSÕES ENCOSTA

A caracterização das feições dos sulcos mapeado pelo Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) é apresentada na Figura 96. O ortomosaico apresenta as dimensões dos processos erosivos. As erosões em sulco se encontram em processo ativo, visto que os cortes não apresentam regularidade característica de uma superfície que passou por uma intervenção recente, como um processo de retaludamento.

De acordo com o Nguyen e Chen (2020), Modelos Digitais de Elevação (MDE), são muito utilizados para a análise dos processos erosivos tendo em vista que se pode verificar a rede de fluxo existente na área avaliada (Figura 97). São identificados quarenta e sete sulcos, sendo cinco no Corte A (1º terço da encosta), doze no Corte B (2º terço da encosta) e trinta no Corte C (3º terço da amostra).

Segundo Ou et al. (2021), a erosão em sulcos é constituída pelo escoamento superficial em depressões da superfície do terreno, podendo evoluir para um ravinamento. Observa-se a ausência de cobertura vegetal em boa parte da encosta (Cerca de 80%). Conforme Kou et al. (2021), as erosões dos sulcos são formas generalizadas de erosão do solo em superfícies de taludes, por isso a formação de sulcos, o mecanismo evolutivo e a expressão quantitativa das mudanças dinâmicas de erosão devem ser considerados.

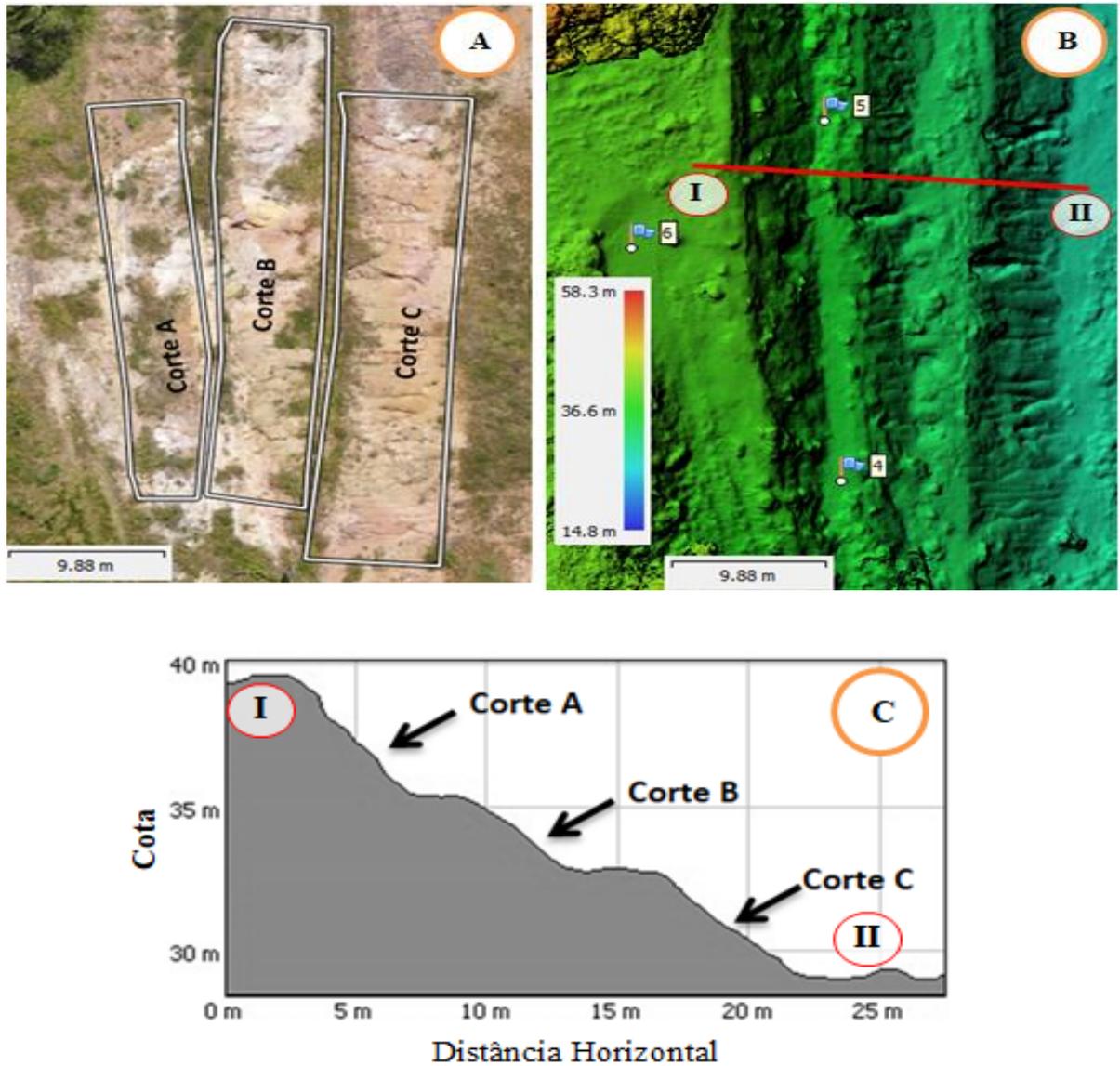
Figura 96 – Sulcos delimitados na Encosta.



Corte	Quantidade de sulcos
A	5
B	12
C	30
Total	<b>47</b>

Fonte: O autor (2022).

Figura 97 - Mapeamento da encosta - A) Ortomosaico com a delimitação dos cortes da encosta; B) Modelo digital de Elevação; C) Perfil de elevação.



Fonte: O autor (2022).

Através da delimitação apresentada na Figura 97 é possível identificar os sulcos em cada corte conforme apresentado na Figura 98. Segundo Carneiro et al (2017), o uso de imagens de alta resolução direciona estratégias que podem ser utilizadas pelo poder público ou privado na tentativa de elaborar medidas de controle das erosões assim como processos de instabilidade da encosta.

Figura 98 – Identificação dos sulcos por corte

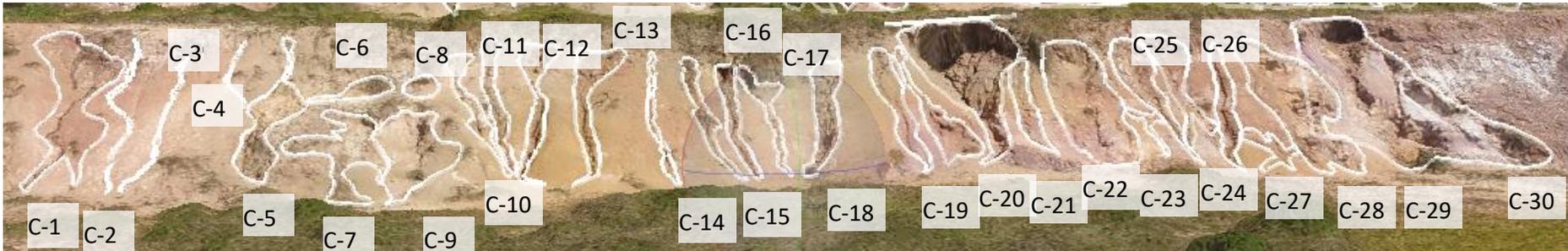
a) Corte A (1º terço da encosta)



b) Corte B (2º terço da encosta)



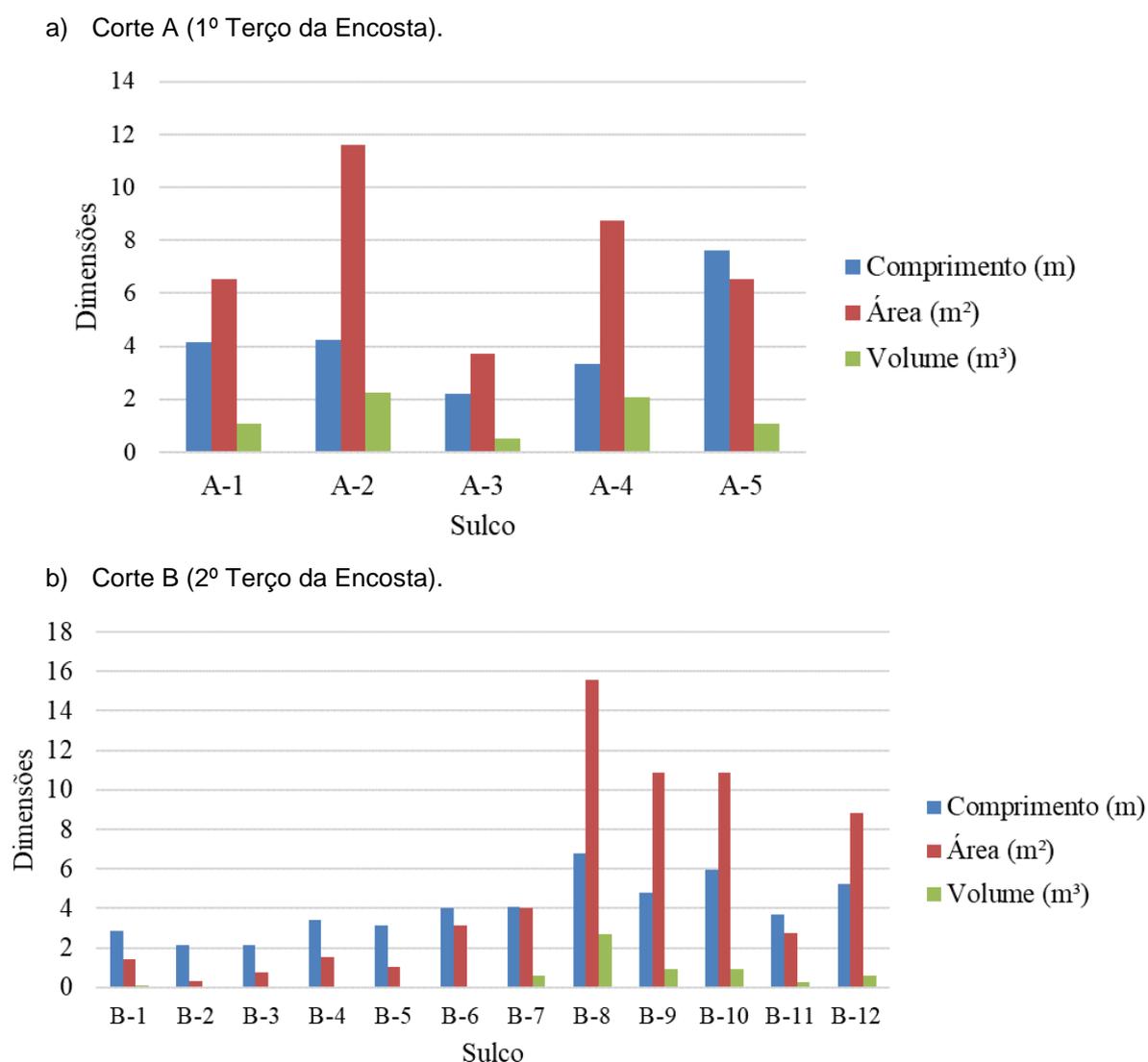
c) Corte C (3º terço da encosta)

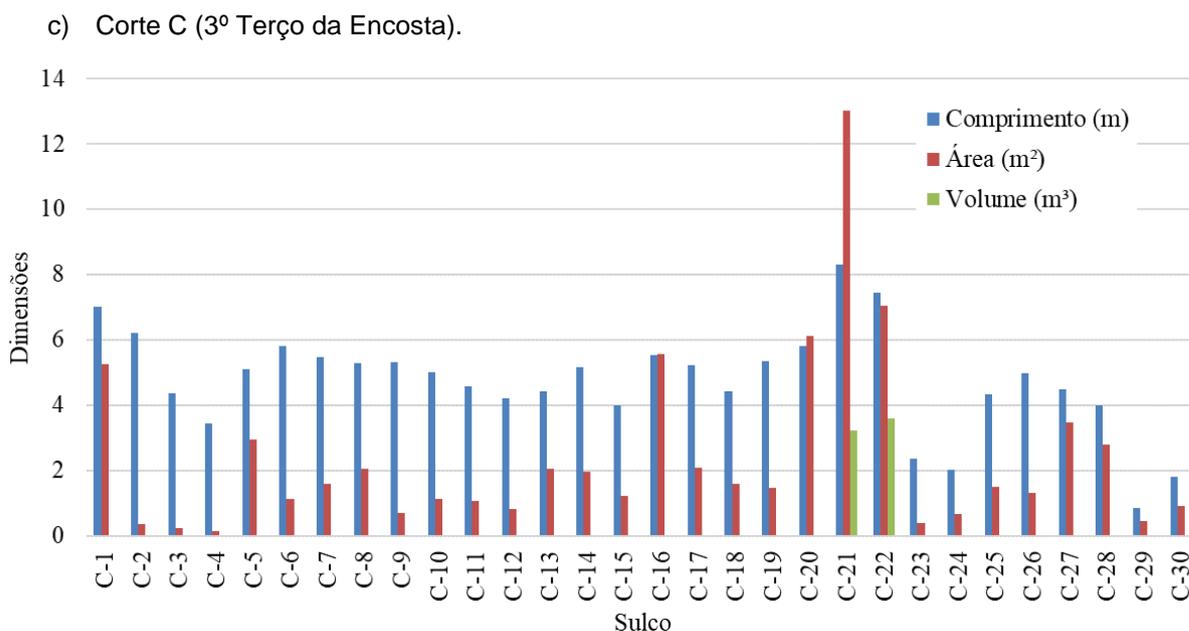


Fonte: O autor (2022).

Percebe-se pela Figura 98 que a cobertura vegetal corresponde a 20,5% da encosta, estando mais concentrada nos platôs e em algumas regiões do Corte A. Costa e Rodrigues (2015), Kubota et al. (2019) e Zambon et al. (2021), afirmam que a vegetação funciona como um elemento de proteção da superfície do terreno frente à ação das gotas de chuva, tendo em vista que o vegetal consegue interceptar a água por meio da sua estrutura, reduzindo com isso a intensidade do efeito splash. Muddarisna et al. (2021) afirma que a perda de potencial do solo é afetada pela morfologia da planta. Outro aspecto necessário é o seu dimensionamento das erosões, a Figura 99 identifica as dimensões dos sulcos em cada corte.

Figura 99 – Dimensões dos sulcos nos Cortes.





Fonte: O autor (2022).

No Corte A (Figura 99a) os cinco sulcos apresentam uma média de 4,16 metros do comprimento principal em uma área em torno de 6,55 m<sup>2</sup> e uma profundidade média de 0,15 m. Esta área apresenta uma camada mais consolidada na superfície além da cobertura vegetal natural em alguns trechos, o que pode ter colaborado na diminuição de sulcos. Yan et al. (2021), relata a importância da cobertura vegetal no controle de processos erosivos, quando afirma que uma vegetação adaptada ao clima local consegue resistir melhor as intempéries, além de diminuir indícios de erosões de sulcos. A Figura 100 apresenta detalhes sobre o sulco A-2.

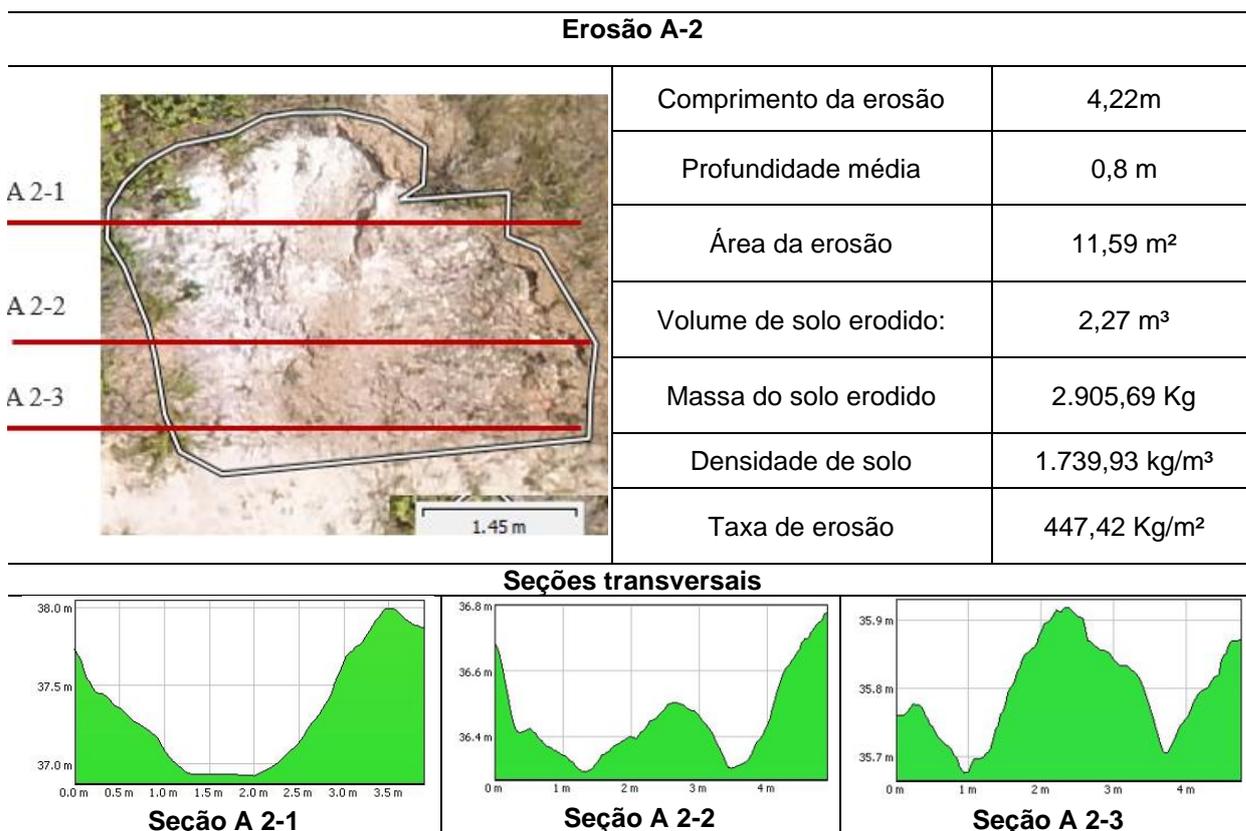
Nos Cortes B e C são identificados um número de processos erosivos maior do que no corte A, sendo o corte C o que apresenta maior número de sulcos. Outro fato importante foi que a maior parte dos sulcos nesses dois cortes possuem larguras menores, em torno de 20 centímetros em 64% dos sulcos. Segundo Liu et al. (2018) erosões nesta categoria possuem larguras inferiores ao seu comprimento. No Corte B os sulcos apresentaram comprimentos em torno de 3,85 metros, área média de 2,95 m<sup>2</sup> e o volume abaixo de 0,9 m<sup>3</sup> em 75% dos sulcos. As Figuras 101 e 102 apresentam detalhes sobre os sulcos B- 9 e C-4.

Os sulcos encontrados no Corte C demonstram aparentemente uma erosão mais frequentes. No entanto, os volumes de solo erodidos foram muito baixo, onde 63% dos sulcos apresentaram volume abaixo de 0,05 m<sup>3</sup>. O comprimento médio dos

sulcos é de  $4,95 \text{ m}^3$ , o que indica que além da quantidade de sulcos estes são mais extensos. A área média foi de  $1,48 \text{ m}^2$ .

Através do mapeamento bem como o dimensionamento das fissuras foi observado que a encosta ainda não possui erosões do tipo voçoroca, que conforme Rubira (2016) e Wen et al. (2021) é o tipo de erosão linear mais grave, com associação de fluxos hídricos (superficial e subsuperficial) que potencializam o escoamento.

Figura 100 – Seções transversais da erosão A-2



Fonte: O autor (2022)

Figura 101 – Seções transversais da erosão B-9

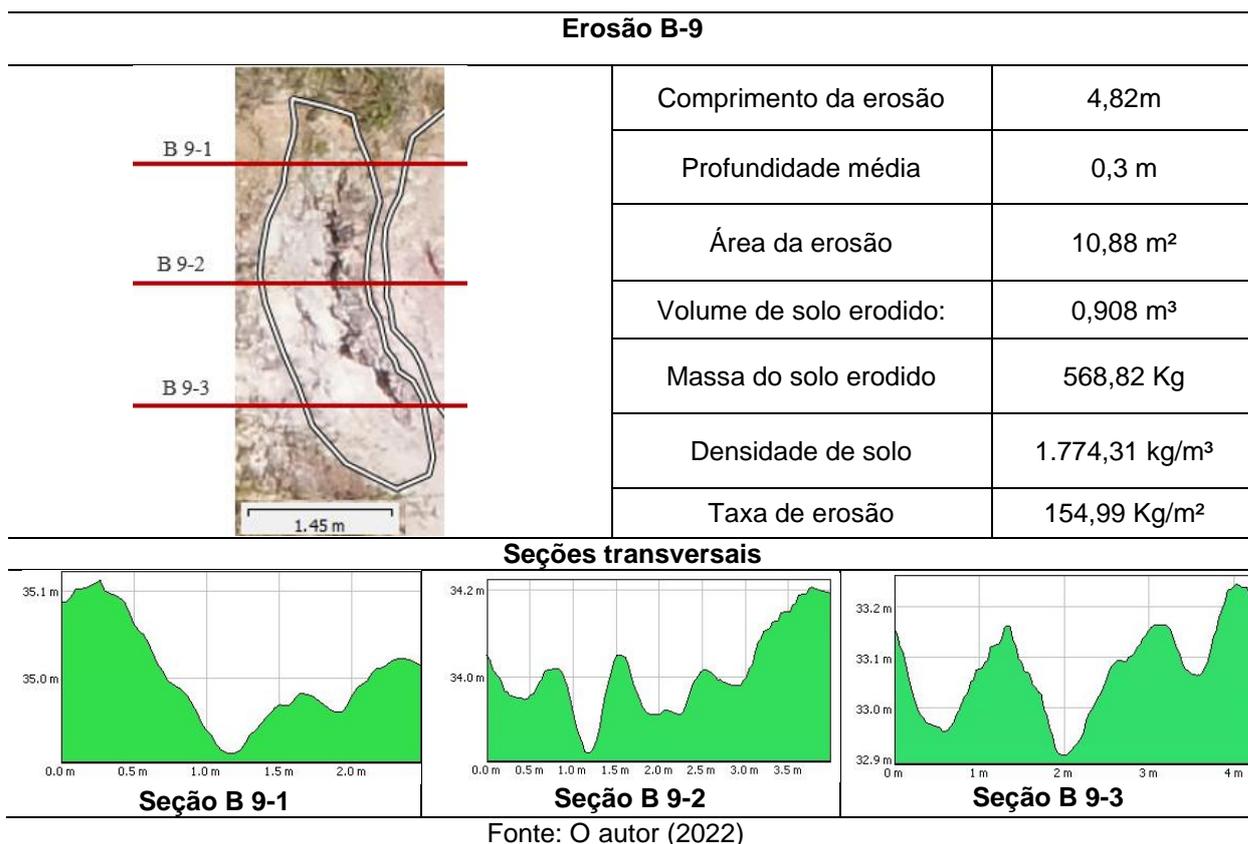
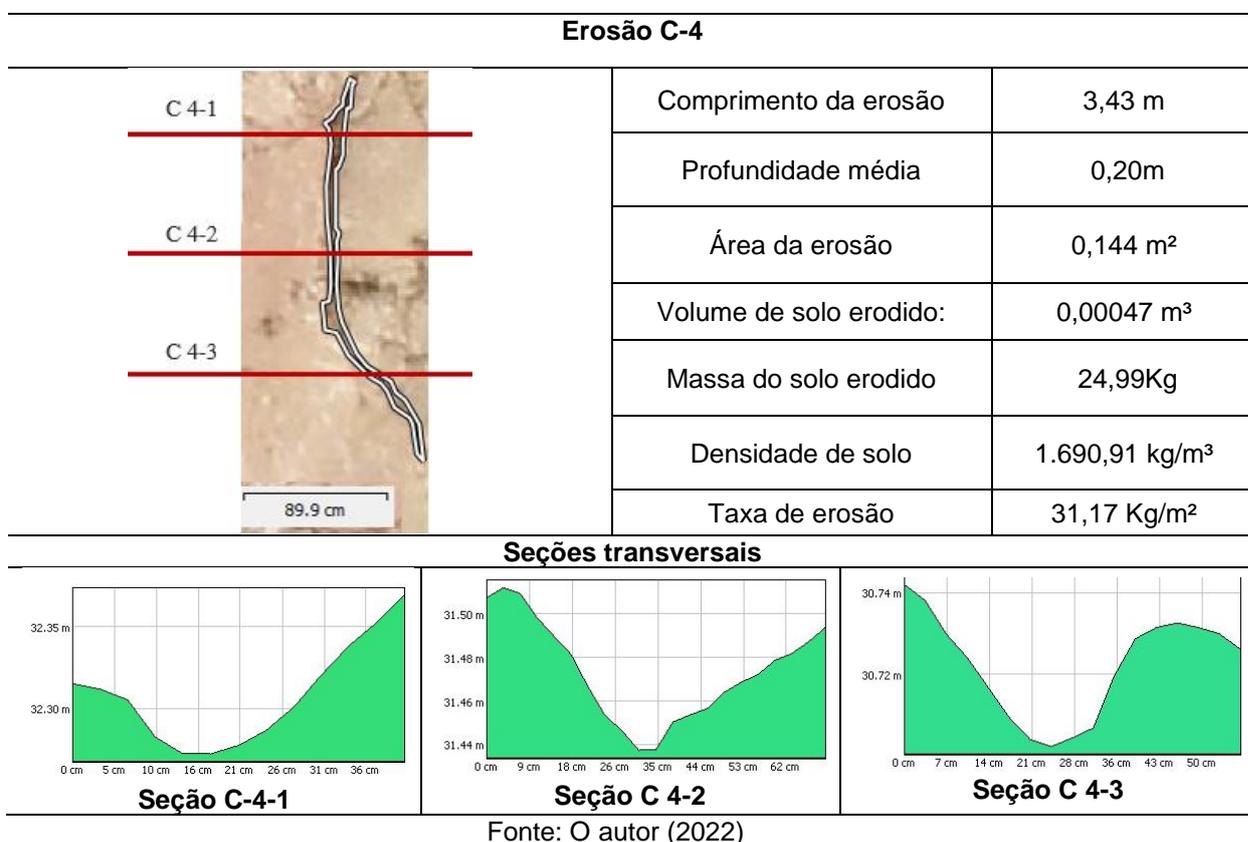


Figura 102– Seções transversais da erosão C-4



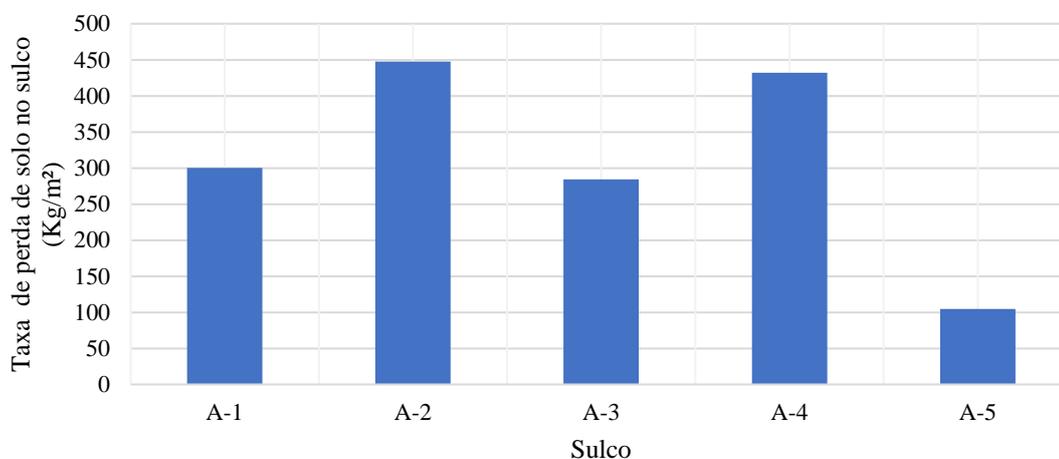
#### 5.4.1 Determinação das taxas de perdas do solo no sulco

Para avaliar o impacto da erosão nos sulcos na encosta foi necessário relacionar o quanto de solo foi perdido em uma determinada área. A Figura 102 apresenta os valores encontrados no Corte A.

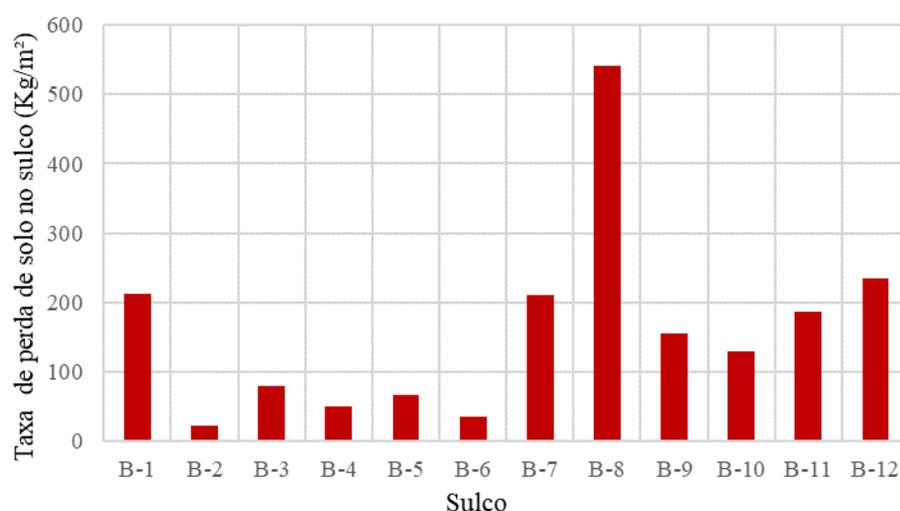
No Corte A (1º Terço da Encosta), observa-se que os sulcos apresentam uma perda acima 250 Kg/m<sup>2</sup>, com exceção do sulco A-5 que possuiu uma taxa de 100 Kg/m<sup>2</sup>. Uma das possíveis justificativas para estes valores de taxa, deve-se ao fato de as incisões dos sulcos presentes no corte ultrapassarem a camada de solo superficial consolidada. Como a textura depois desta proteção é mais arenosa, aumenta o carreamento do solo. Segundo Elther et al. (2015), os sulcos são mais aprofundados do que alargados, porque a profundidade do sulco aumenta em 100%, enquanto a largura aumenta apenas em 35%.

Figura 103 – Taxa de perda de solo

a) Corte A (1º Terço da Encosta)



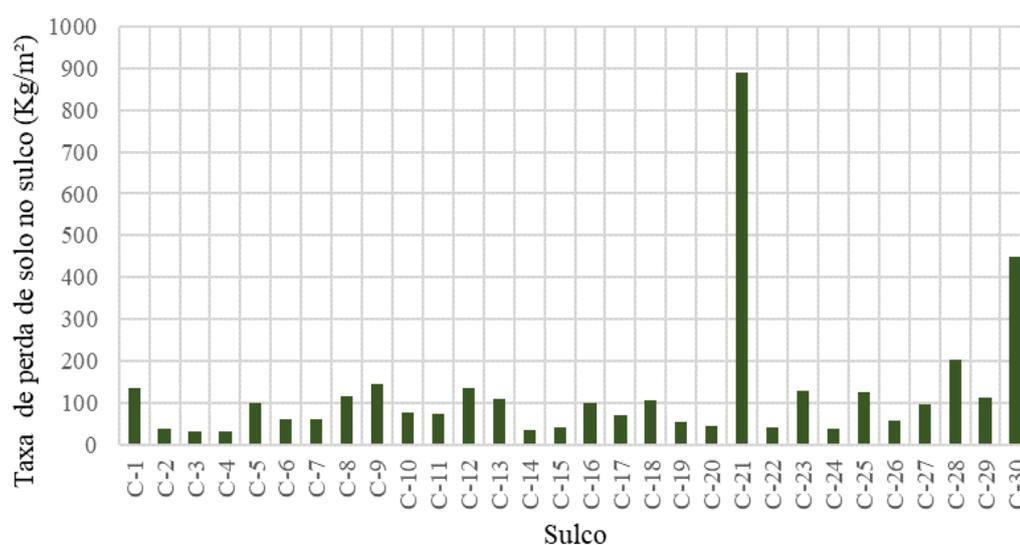
b) Corte B (2º Terço da Encosta)



Fonte: O autor (2022).

No Corte B (2º Terço da Encosta) apresenta os sulcos uma taxa que varia entre 50 Kg/m<sup>2</sup> e 250 Kg/m<sup>2</sup>. No sulco B-8 foi identificado o maior valor da taxa de perda de solo no sulco (540 Kg/m<sup>2</sup>). Isto pode ser compreendido tendo em vista que os sulcos a partir de B-7 possuem camadas poucos consolidadas e sem vegetação, deixando o solo arenoso mais exposto as variações sazonais. Li et al. (2015) indicaram que as propriedades de solo e vegetação afetam significativamente a erodibilidade dos sulcos. A Figura 104 apresenta a taxa de perda de solo para os sulcos do corte C.

Figura 104 – Taxa de perda de solo para os sulcos do corte C.



Fonte: O autor (2022).

No Corte C (3º Terço da Encosta) os valores encontrados apresentam uma taxa abaixo de 200 Kg/m<sup>2</sup> em 93% dos sulcos, podendo indicar que o aumento da fração

argilosa nesta região diminuiu a suscetibilidade à erosão. Apenas nos sulcos C-21 e C-30 foram identificados valores muito acima de 200 Kg/m<sup>2</sup>, sendo o C-21 o sulco que apresenta a maior taxa de perda de solo em relação a todos os cortes. De acordo com Ou et al. (2021), solos que apresentam frações de argila relevantes geralmente requerem forças erosivas mais altas para serem erodidos.

#### 5.4.2 Avaliação de perdas pelo método de Equação Universal de Perdas de Solo - USLE

Para determinar a equação universal de perda de solo houve a necessidade de integrar valores de precipitação, comprimentos e declividade da encosta, cobertura vegetal, erodibilidade e práticas de controle de erosão, conforme apresentado na Tabela 31.

Tabela 31 – Dados para determinação da perda pelo método da USLE.

Erosividade – R (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Erodibilidade – K (t h MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )	Fator topográfico – LS	Fator de manejo e conservação do solo -CP
5713,82	0,16	9,94	1

Fonte: O autor (2022).

A avaliação baseada na USLE mostra que a perda potencial de solo estimada foi de cerca de 930 Kg/m<sup>2</sup>. Esta perda de solo é favorecida pelas condições de relevo e de uso do solo. Segundo Santos e Silva (2020) os principais fatores por trás da erosão do solo são: riscos geomorfológicos (superfícies heterogêneas, encostas íngremes), o risco climático (Erosividade das chuvas, o aumento do número de dias secos combinados com chuvas intensas) e intervenções humanas (mudança de uso da terra). A Tabela 32 relaciona os dados encontrados na USLE com as informações do Inderbitzen e do mapeamento dos sulcos.

Tabela 32 – Relação das taxas de perda de solo em função do método abordado

Método	Inderbitzen	Mapeamento do sulco	USLE
Taxa de perda (Kg/m <sup>2</sup> )	88	199,14	930

Fonte: Autor (2022)

Os Métodos do Inderbitzen e o mapeamento dos sulcos também colaboram com informações de perda, no entanto, em fases distintas e específicas, tendo em vista que o Inderbitzen considera as perdas avaliando uma erosão nos entressulcos por isso o valor é o mais baixo. Já o mapeamento delimita os sulcos existentes, para avaliar perdas mais concentradas.

Dentre os métodos de avaliação da erodibilidade do solo, a USLE é uma das mais utilizadas, visto que permite a previsão das perdas de solo causadas pela erosão e indica quais os fatores que exercem os maiores efeitos sobre as mesmas. Isto faz com que a referida equação aborde de maneira ampla a perda ocorrida na região analisada. Isto demonstra que os métodos são importantes para entender o processo erosivo nas suas fases evolutivas e os fatores que corroboram neste desenvolvimento.

De acordo com Olivares et al. (2011) e Singh e Panda (2017), o modelo USLE é usado para estimar valores em escalas de tempo maiores do que aquelas obtidas em observações de campo, já que o modelo é capaz de estabelecer tendências. As diferenças entre as previsões do modelo e as medições de campo podem ser muitas vezes atribuídas a baixos valores de perda de solo e portanto, erros de medição relativamente mais alto, mas também são devidas ao uso de equações mensais de Erosividade da chuva, podendo inibir o efeito erosivo de alta precipitação diária de intensidade. Outra fonte de possíveis diferenças também podem ser atribuída ao fato de que o fator K de erodibilidade do solo USLE não considera a umidade do solo, embora a umidade antecedente tenha um significativo efeito sobre a erosão.

## 5.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 5

A análise da dispersividade do solo mostra, através do Ensaio de Torrão (Crumb test) e do Ensaio do Furo de Agulha (Pinhole test), que apenas o solo encontrado na parte central da Meia encosta apresenta uma leve dispersão, podendo com isso desencadear ou potencializar processos erosivos. Nas outras áreas não foi

identificado indícios de dispersão, demonstrando que as erosões nestas áreas ocorrem influenciadas por outros fatores.

Já, o ensaio sedimentométrico comparativo (SCS) não evidencia dispersões na maioria das camadas ao longo dos 15 metros de profundidade. Os critérios da CESP (1983) e de Araújo (2000) classificam os solos como sendo não dispersivos e não erodíveis, respectivamente. No entanto, na região central do Topo da encosta algumas camadas (entre 2,0m e 2,6 m e entre 2,9 m e 5,0 m) indicam uma moderada dispersão além de uma alta erodibilidade, conforme CESP (1983) e Araújo (2000).

A análise química da água intersticial corrobora com o Ensaio de Torrão (Crumb test) e o Furo de Agulha (Pinhole Test), identificando o alto percentual de sódio na amostra P-05 (Meia Encosta), tornando o solo um material dispersivo. O ensaio também mostra que mesmo a amostra de P-09 (Próximo ao Sopé) seja considerada não dispersiva, o percentual de sódio encontrado é significativo.

Em relação a suscetibilidade à erosão pelo método de Meirelles (1967) a encosta demonstra nas Seções S-01 (P-01, P-04 e P-07) e S-02 (P-02, P-05 e P-08) solos que variavam de “Passível de forte erosão” à “Forte erosão” até os 10 metros de profundidade. Os solos abaixo dos 10 metros são considerados “Pouco erodíveis”. Na Seção S-03 (P-03, P-06 e P-09) as camadas de solo não seguem as características das seções anteriores, apresentando camadas consideradas como de “Forte erosão” próximo aos 15 metros de profundidade.

O ensaio de Inderbitzen modificado é bastante promissor e mostrou-se mais vantajoso que o inderbitzen tradicional, referente à inclusão da desagregação proveniente do impacto das chuvas. O Inderbitzen também auxilia no entendimento sobre como ocorrem as perdas de solo nas erosões laminares e em entressulcos.

O Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL) demonstra ser um dos ensaios de maior relevância a pesquisa, visto que o mesmo identifica que a quantidade de processos erosivos é maior nas regiões com baixa resistência à penetração da superfície. Isto é evidenciado no corte Próximo ao Sopé. Já o corte próximo ao Topo da encosta como possui uma camada superficial consolidada, sua resistência a penetração é alta, diminuindo o escoamento do solo e as erosões consequentes.

A delimitação de processos erosivos através do uso do VANT facilita o levantamento do relevo da encosta e auxiliam no estudo da erosão em sulcos. A

técnica permite detalhar a perda de solo através do dimensionamento de cada sulco, fornecendo dados mais próximos da realidade da encosta.

O tratamento dos dados em ambiente georreferenciado é útil na visualização do uso do solo, bem como possibilita a integração de dados para obtenção dos fatores utilizados para o método USLE. O método utilizado mostra-se adequado para este tipo de estudo, pois é de fácil aplicabilidade e entendimento, podendo ser utilizado em outras encostas com as mesmas características de erosão.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os perfis são constituídos de camadas de areia argilosa na região do Topo da Encosta e na Meia Encosta e concentrações de argila arenosa Próximo ao Sopé. As frações do solo, a textura e o método LNEC, demonstram que o Topo da Encosta (P-01, P-02 e P-03) apresenta alta erodibilidade na maioria das suas camadas. Na Meia Encosta, as classificações variavam até que Próximo ao Sopé (P-07 e P-08) a erodibilidade do solo passa a ser baixa. A relação silte/argila demonstrada nas Seções (S-01, S-02 e S-03) indicam um alto grau de intemperismo, fator que auxilia no desenvolvimento de processos erosivos.

A análise mineralógica na fração arenosa identifica a predominância do quartzo hialino, com grau de arredondamento de angular a subangular, sendo alguns revestidos de óxido de ferro, confirmando a imaturidade do sedimento e conseqüentemente o potencial erodível dos solos. Os resultados de difratometria de Raio X identificam que os solos são essencialmente caulíníticos com frações de mica, clorita e quartzo, não possuindo mineralogia que expressa condição de expansão.

Expansão que também não é identificada na química dos solos, partindo do fato que os valores de cátions trocáveis (entre 0,78 cmol/kg e 1,35 cmol/kg) e troca catiônica (entre 1,26 cmol/kg e 2,12 cmol/kg) estão bem abaixo dos valores característicos de minerais argílicos expansivos. Nos ensaios da química das águas intersticiais do solo é observado que apenas na região central da Meia Encosta (P-05) as amostras apresentam dispersividade. Os ensaios de Torrão e Furo de Agulha corroboram com a análise química e também demonstraram dispersão no mesmo ponto.

A análise da compressibilidade do solo identifica trechos de reta virgem bem definidos, principalmente na condição de inundado, também evidencia solos condicionados ao colapso. Os valores do índice de compressão ( $C_c$ ) nos ensaios naturais são inferiores aos obtidos nos ensaios inundados. Já o  $C_s$  não apresenta variações significativas nas condições naturais e inundadas. Observa-se que em geral, a erodibilidade do solo na encosta pode estar relacionada a algum tipo de solo especial, com indicações de expansão e dispersão em regiões centrais da encosta (P-02 e P-05), além de camadas de solos condicionadas ao colapso evidenciadas no Topo, Meio e Próximo ao Sopé (P-03, P-05 e P-07, respectivamente).

A condutividade hidráulica da superfície indica duas características distintas de permeabilidade do solo. O Topo da Encosta e a Meia Encosta apresentam permeabilidades variando entre  $3,8 \cdot 10^{-7}$  m/s e  $1,81 \cdot 10^{-6}$  m/s, características às

frações com percentual arenoso maior, enquanto Próximo ao Sopé o equipamento mostra impedimento devido a concentração de finos o que impossibilita a identificação da permeabilidade.

As curvas características demonstram que o primeiro e o segundo terço (exceto em P-02) da encosta apresentam curvas de com comportamento unimodal, onde a sucção está entre 5 a 7 vezes maior que o terceiro terço da encosta. A descontinuidade granulométrica presente Próximo ao Sopé da encosta (terceiro terço), destacados principalmente no ajuste de Van Genutchen (1980), indica comportamento típico de argissolos com processos de intemperização. Com isso, o solo apresenta dois tipos de estrutura: uma macro (intemperização) e uma micro.

O comportamento mecânico do solo analisado em campo (DPL) e no laboratório (cisalhamento direto), apresentam uma análise semelhante da encosta. A caracterização mecânica evidencia que a camada inicial (primeiros 50 cm) do Topo da Encosta apresenta uma resistência 100% acima das outras áreas, justificando o fato do Corte A apresentar um menor número de erosões mesmo sendo formado por solos arenosos. A intemperização atrelado a presença do óxido de ferro (indicada na análise mineralógica) garantiu que a região do Corte A apresentasse uma camada superficial mais consolidada, favorecendo sua resistência.

O ensaio do Inderbitzen modificado identifica de forma satisfatória as taxas de desagregação de erosões em entressulcos ( $88 \text{ Kg/m}^2$ ), indicando as camadas mais susceptíveis a erosão por fluxo superficial. O protótipo se mostra bastante adequado ao propósito do ensaio e ao mesmo tempo, de utilização simplificada e com mecanismos acessíveis para seu aperfeiçoamento (chuveiramento e inclinação variável). As condições de umidade também se assemelham aos parâmetros encontrados na literatura, onde os solos condicionados a umidade seca ao ar apresentam os maiores valores de perda, enquanto os solos pré-umidificados evidenciaram os menores valores. Na relação entre perda acumulada versus tempo é indicado que o processo de remoção do solo é mais intenso nos primeiros dez minutos e com a inclinação de  $40^\circ$ .

A utilização do VANT como plataforma para estudos em áreas degradadas contribui no diagnóstico preciso em curto período de tempo, reduzindo gastos e promovendo dados mais fiés a realidade de campo. Através do mapeamento com o drone associado a técnicas de topografia e geoprocessamento de dados, foi possível

a geração de ortomosaicos e modelos digitais de elevação e superfície. Com isso, a técnica possibilita informações de alta precisão para o dimensionamento de erosões em sulcos.

O mapeamento apresenta uma taxa de perda de solo média de 199,14 Kg/m<sup>2</sup>, com número de sulcos e volume de solos erodidos distintos em cada corte. O Corte A exhibe 11% dos sulcos evidenciados na encosta com volumes de solo erodidos bem significativos (acima de 1 m<sup>3</sup>). Já o Corte C identifica 64% dos processos erosivos, no entanto, com volumes abaixo de 0,09 m<sup>3</sup> na maioria dos sulcos. O padrão erosivo encontrado no mapeamento reforça as informações do comportamento mecânico, onde as áreas que apresentam menor resistência superficial evidenciam um maior número de processos e conforme o melhoramento do comportamento mecânico menor é o número de sulcos existentes.

A avaliação pela USLE indica ser uma ferramenta altamente apropriada na identificação dos fatores que influenciam as erosões em uma encosta, principalmente se esta já apresenta vulnerabilidade a perda de solo. A equação apresenta uma taxa de erodibilidade global de 930 Kg/m<sup>2</sup>, sendo a Erosividade (R), Erodibilidade (K) e Topografia (LS), os fatores que mais influenciam no potencial erosivo.

Diante disso, fica evidente que as análises fornecem informações relevantes, não apenas para a encosta avaliada, mas para as degradações existentes no município e que possuem esta formação geológica. Através das análises, as soluções podem ser realizadas de maneiras mais assertivas, inibindo assim o quadro de erosões presentes no município.

## 6.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Estudos que abordam a erosão solo como temática precisam ser bem complexos e envolver diversas áreas de estudos e quantidades de variáveis a serem abordados. Como recomendação sugere-se o avanço dos tópicos a seguir como futuras pesquisas:

- Instalação em campo de parcelas experimentais para monitorar a taxa de desagregação dos sedimentos provocados pelas precipitações naturais;
- Continuidade dos ensaios de indebitzen modificados, contemplando uma área amostral mais representativa;

- Aplicação e monitoramento de coberturas vegetais em trechos com maior grau de degradação, contemplando várias espécies de plantas;
- Realização de pesquisas que tratem do melhoramento do solo degradado a fim da utilização como camada de proteção em encostas.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. APAC. **Monitoramento pluviométrico**. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em 12/01/2022.
- AITCHISON, G. D. Discussion In: 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1965, Montreal. Proceedings... Montreal, v. 3, p. 318–321. 1965.
- AKSOY, H.; GEDIKLI, A.; YILMAZ, M.; ERIS, E.; UNAL, N.; YOON, J.; KAVVAS, M.; TAYFUR, G. **Soil erosion model tested on experimental data of a laboratory flume with a pre-existing rill**. J. Hydrol. v. 581, p. 5609 – 5624. 2020.
- ALENCAR, N. M.; SANTOS, A. C.; PAULA NETO, J. J.; RODRIGUES, M. O. D.; OLIVEIRA, L. B. T. **Variability of soil loss in Typic Quartzipsamment in different covers in the Cerrado-Amazon ecotone**. Revista Agrarian, v. 12, n. 43, p. 473 – 480, Dourados, 2019.
- ALIASGHAR, J.; GAROSI, U.; OUSTAN, S.; AHMADI, A. **The effect of clay minerals on soils interrill erodibility factor and management in Dast- e Tabriz**. Asia Pacific Journal of Sustainable Agriculture Food and Energy – APJSAFE, vol.2 (2). Pp. 23-31, 2014.
- ALMEIDA, R. O. **Estudo geotécnico e análise de estabilidade da Encosta Bela Vista no município de Ipojuca – PE**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2016.
- ALMEIDA, J. D. M.; ROCHA, A. C. P.; SILVA, O. G. **Riscos geomorfológicos e sensibilidade da paisagem na Bacia Hidrográfica do Rio Paratibe (BHRP) - Região Metropolitana do Recife**. Revista Cerrados (Unimontes), v.16, n. 1, 2018.
- ALMEIDA, W. S.; CARVALHO, D. F.; PANACHUKI, E.; VALIM, W. C.; RODRIGUES, S. A.; VARELLA, C. A. A. **Erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo**. Pesq. Agropec. Bras. V. 51, n. 9, 2016.
- ANESEYEE, A. B.; ELIAS, E.; SOROMESSA, T.; FEYISA, G. L. **Effect of land use/land cover change on soil erosion and sediment delivery in Winike watershed, Omo Gibe Basin, Ethiopia**. Science of the total environment. v. 728. 2020.
- ARAÚJO, R. C. **Estudo da erodibilidade de solos da Formação Barreiras**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 148p. Rio de Janeiro, 2000.
- ARAÚJO, R. N.; HOLANDA, F. S. R.; PEDROTTI, A.; SANTOS, T. O.; LINO, J. B.; ROCHA, I. P. **Influência dos atributos físicos-mecânicos do solo na estabilidade do talude do Baixo São Francisco**. Revista Scientia Agraria. v.18, n. 4. 2017.

ARYA, L. M.; PARIS, J. F. **A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data.** Journal / Soil Science Society of América, Madison, v. 45, p. 1023-1030, 1980.

ASAKEREH, A.; AVAZEH, A. **The Effects of Nano Clay on Dispersive Soils Behavior (Case Study of Minab City).** Amirkabir J. 49 (3), pp. 153 – 156, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 6457. **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro. 2016.

\_\_\_\_\_ - NBR 6459. Solo – **Determinação do limite de liquidez – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro. 2016.

\_\_\_\_\_ - NBR 6508/1984 – **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro. 1984.

\_\_\_\_\_ - NBR 7180. Solo – **Determinação do limite de plasticidade – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro. 2016.

\_\_\_\_\_ - NBR 7181. **Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro. 2017.

\_\_\_\_\_ - NBR 9603. **Sondagem a trado – Procedimento.** 2015.

\_\_\_\_\_ - NBR 9604. **Condições exigíveis para abertura de poço de inspeção, de trincheira e para retirada de amostras.** 2016.

\_\_\_\_\_ - NBR 13601. **Solo – Avaliação de dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test) – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro. 1996.

\_\_\_\_\_ - NBR 13602. **Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro. 1996.

\_\_\_\_\_ - NBR 14114. **Solo – Solos argilosos dispersivos – Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (pinhole test).** Rio de Janeiro. 1998.

BANDEIRA, A. P. N. **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas ocupadas do Município de Camaragibe-PE.** Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

BANDEIRA, A. P. N.; COUTINHO, R. Q.; GUSMÃO, A. D.; ALHEIROS, M. M. . **Plano de redução de risco de erosão / escorregamento em área do município de Camaragibe-PE.** In: COBRAMSEG, Curitiba. ABMS, 2006. v. 3. p. 1797-1802, 2006.

BARBOSA, J. A., NEUMANN, V.H., LIMA FILHO, M. F., SOUZA, E.M., MORAES, M.A. 2007. - **A deposição carbonática na faixa costeira Recife-Natal: aspectos estratigráficos, geoquímicos e paleontológicos.** Estudos, 17:3-30.

BASTOS, C.A.B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 303 p. 1999.

BATISTA, P. V. G.; SILVA, M. L. N.; AVALOS, F. A. P.; SIQUEIRA JÚNIOR, P.; SILVA, L. B. N.; OLIVEIRA, M. S. **Estimativa do volume de erosões do tipo sulcos e deslocamento de massa utilizando imagens 3D, obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado**. XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Natal. 2015.

BELLOCCHI, G.; DIODATO, N. **Rainfall Erosivity in Soil Erosion Processes**. Water, Vol.12(3), p.722, March 2020.

BERENDSE, F.; RUIJVEN, J. V.; JONGEJANS, E.; KEESSTRA, S. **Loss of Plant Species Diversity Reduces Soil Erosion Resistance**. Ecosystems. v.18, pp. 881 – 888. 2015.

BERNATEK-JAKIEL, A.; VANNOPPEN, W.; POESEN, J. **Assessment of grass root effects on soil piping in sandy soils using the pinhole test**. Geomorphology, vol. 295, pp. 563 – 571, 2017.

BOGUNOVIC, I.; TELAK, L. J.; PEREIRA, P. **Experimental Comparison of Runoff Generation and Initial Soil Erosion Between Vineyards and Croplands of Eastern Croatia: A Case Study**. Air, Soil and Water Research, vol.13, pp. 1 - 9, 2020.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados**. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 5. São Carlos, SP. p.597-616. 2004.

CANTALICE, J. R. B.; BEZERRA, S. A.; FIGUEIRA, S. B.; INÁCIO, E. S. B.; SILVA, M. D. R.O. **Linhas isoerosivas do estado de Pernambuco- 1ª Aproximação**. Revista Caatinga, v. 22, n.2, p. 75-80, 2009.

CARVALHO, D. F.; CRUZ, E. S.; PINTO, M. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M. **Rainfall characteristics and erosion losses for different soil management practices**. Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient. V.13 n.1 Campina Grande. 2009.

CARVALHO, E. M.; LEITE, E. F. **Erosividade e erodibilidade na bacia hidrográfica do córrego João Dias, Aquidauana/MS**. Revista Geografar. Curitiba, v.10, n.2, p.88-111, 2016.

CARVALHO, S. **Prova dinâmica superpesada – DPSH: uma proposta de correlação com a sondagem de simples reconhecimento SPT**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CERDÀ, A.; LUCAS-BORJA, M. E.; FRANCH-PARDO, I.; ÚBEDA, X.; NOVARA, A.; LÓPEZ-VICENTE, M.; POPOVÍČ, Z.; PULIDO, M. **The role of plant species on runoff and soil erosion in a Mediterranean shrubland**. Science of the Total Environment. v. 799, 2021.

CHEN, J.; ZHONGWU, L.; XIAO, H.; NING, K.; TANG, C. **Effects of land use and land cover on soil erosion control in southern China: Implications from a systematic quantitative review**. Journal of environmental management. v. 282, 2021.

CLAUS R. P. **Uma proposta para avaliar o grau de compactação e a homogeneidade de uma camada compactada utilizando o DPL**. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 79p. 2014.

COMPANHIA HIDRELÉTRICA DE SÃO PAULO (CESP). Métodos de ensaios de erodibilidade em solos: pinhole test, porcentagem de dispersão e ensaios de turbidez. Ilha Solteira, SP: Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP, 1983.

COUTINHO, R. Q., OLIVEIRA, J. R., LIMA FILHO, M. F., COELHO, F. A. A., SANTOS, L. M. (1999). **Estudo da Erosão da Encosta do Horto de Dois Irmãos – PE**. 9o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia (CD-ROM). ABGE, Novembro, São Paulo - SP. 1999.

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

COUTINHO, R. Q.; SEVERO, R. N. F.: **Investigação Geotécnica para Projeto de Estabilidade de Encostas**. Conferência. V COBRAE – Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, São Paulo, 2009. Brasil.

COUTO, B. O.C. **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia. Ouro Preto, 2015.

COUTO, B. O. C.; GOMES, R.C.; FERREIRA, L.D. **Análise de erodibilidade de dois diferentes solos no município de Itaíba-MG**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Belo Horizonte, 2016.

DEMARCHI, J. C. **Modelagem das transformações no uso da terra, de processos erosivos e de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Ribeirão São Domingos, município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP**. 2019. 536 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2019.

DRONE DEPLOY. **Drone Mapping for Forestry and Conservation**. Disponível em: <https://www.dronedeploy.com/resources/webinars/drone-mapping-for-forestry-and-conservation/>. Acesso em: 28/01/2018.

DUAN, X.; BAI, Z.; RONG, L.; LI, Y.; DING, J.; TAO, Y.; LI, J.; LI, J.; WANG, W. **Research Method for Regional Soil Erosion Based on the Chinese Soil Loss Equation and High Resolution Spatial Data: Case Study in Mountainous Yunnan Province, China**. Catena. v. 14. 2020.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R. **Distribuição espacial da erosão potencial e atual do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, MG.** Eng. Saint. Ambiente. Vol. 21. n.4. 2016.

DURNER, W. **Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure.** Water Resour. Res., 30(2): 211-223.1994.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5 ed. rev. e ampl. – Brasília, 2018.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos, In: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Embrapa Serviço de Produção de Informação, Brasília, 212 p. 1997.

ENRIQUEZ, A.G.; SILVA, D.P.; PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; CECON, P. R. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento no canal de drenagem de estrada rural não pavimentada. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v. 19, n. 2, 2015.

FÁCIO, J.A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 107 p. 1991.

FARIAS, R.; RIBEIRO, R. M. N.; PARANHOS, H. **Análise e proposta de recuperação para um processo erosivo localizado no município de Planaltina/GO.** XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Belo Horizonte, 2016.

FATTAH, M. Y.; OMRAN, H. A.; ABDULATIF, M. **Modification of Pinhole apparatus for identification and classification of dispersive clay Soils** Journal of Engineering and Development, v. 18, n. 6, 2014.

FATTET, M.; FU, Y.; GHESTEM, M.; MA, W.; FOULONNEAU, M.; NESPOULOUS, J.; LE BISSONNAIS, Y.; STOKES, A. **Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength.** Catena. ed. 1, pp. 60 – 69, 2011.

FERNÁNDEZ-RAGA, M.; GARCÍA-DIEZ, I.; CAMPO, J.; VIEJO, J. PALENCIA, C. **Effectiveness of a new drainage System for decreasing erosion in road hillslopes.** Air, Soil and Water Research, 10.1177/1178622120988722, 14, (117862212098872), 2021.

FRAGASSI, P.F.M., Marques, E.A.G. **Desenvolvimento de uma nova versão do Aparelho de Inderbitzen.** Anais do VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia. 2001.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e Expansão em Solos Naturais não Saturados Devidos à Inundação.** Tese de Doutorado. Rio de Janeiro. 1995.

FERREIRA, J. T. P. **Desenvolvimento de planossolos em distintas condições geoambientais e o efeito do pousio em áreas sob processo de desertificação.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

FEUERHARMEL, C. **Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação Serra Geral.** Tese de Doutorado. Porto Alegre: UFRGS, 332p. 2007.

FOSTER, H. S.; BEATTIE, B. R. **On the Specification of Price in Studies of Consumer Demand under Block Price Scheduling.** Land Economics. Vol. 57, No. 4, pp. 624-629. 1981.

FRANCO, M. R. S. **Formação de ravinas: significância para a perda de solo por erosão hídrica.** Dissertação de Mestrado em Gestão dos Recursos Florestas, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2015.

FREIRE, F. C. **Avaliação de uma camada compactada de solo para pavimento em asfalto.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

FREITAS, R. R. L. **Mapeamento de risco a movimentos de massa e inundação em áreas urbanas do município de Moreno-PE.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016 .

FREITAS, M. L. R. A. **Comportamento Geomecânico de um Solo Colapsível de Petrolina- PE avaliado por meio de Ensaio de Campo e Laboratório.** Tese de Doutorado, Recife: UFPE, 143p. 2017.

FUCALE, S. P. **Comportamento de Variação de Volume Devido à Inundação em Alguns Solos Colapsíveis do Estado de Pernambuco.** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, tese de mestrado. 2000.

GENG, R.; ZHANG, G.; HONG, D.; MA, Q.; JIN, Q.; SHI, Y. **Response of soil detachment capacity to landscape positions in hilly and gully regions of the Loess Plateau.** Catena. v. 196, p. 104852. 2021.

GENG, R.; ZHANG, G.; MA, Q. WANG, H. **Effects of landscape positions on soil resistance to rill erosion in a small catchment on the Loess Plateau.** Biosystems Engineering. v. 160, pp. 95 - 108. 2017.

GHOLAMI, V.; SAHOUR, H.; AMRI, M. A. H. **Soil erosion modeling using erosion pins and artificial neural networks.** Catena. v. 196, p. 104902. 2021.

GITIRANA Jr., G.F.N.; FREDLUND, D.G. **Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties.** In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2004.

GITIRANA JR., G. F. N.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. A curva de retenção de água de materiais porosos. In: CAMAPUM, J. DE C.; GITIRANA, G. DE F. N.; MACHADO, S. L. (Ed.). Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico. 1. ed. São

Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), 2015.

GONÇALVES, L. G.; SILVA, P. B. **Proposta de desenvolvimento e execução de equipamento Inderbitzen Modificado para avaliação de erodibilidade do solo.** Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia. 2019.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <http://earth.google.com>. Acesso em: 21/01/2018.

GUEDES, F. M. **Lentibulariaceae na Mata Atlântica do Nordeste Brasileiro** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

GUO, M.; YANG, B.; WANG, W.; CHEN, Z.; WANG, W.; ZHAO, M.; KANG, H. **Distribution, morphology and influencing factors of rills under extreme rainfall conditions in main land uses on the Loess Plateau of China.** Geomorphology. v. 345. 2019.

GUSMÃO FILHO, J. A., JUSTINO da SILVA, J. M, JUCÁ, J. F. T. e FERREIRA, S. R. M. **Parâmetros Geomecânicos dos Solos dos Morros de Olinda.** In 378VIII Congresso 150 Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações - COBRAMSEF, Vol. 1, pp 199- 210. Porto Alegre-RS. 1986.

HAN, Z.; ZHONG, S.; NI, J.; SHI, Z.; WEI, C. **Estimation of Soil Erosion to Define the Slope Length of Newly Reconstructed Gentle-Slope Lands in Hilly Mountainous Regions.** Cientific Reports, v. 9, pp. 4676, 2019.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing: effective stress tests.** Second edition, Volume 3, Jonh Wiley& Sons.1998.

HÉNENSAL, P. **Le rique d'érosion hidrique des sols. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chassées.** Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. France. 117 – 129p. 1987.

HENRIQUE, H. M. **Mapa de risco a deslizamento e erosão do bairro de Rurópolis, município do Ipojuca – PE.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2014.

HESHMATI, M.; MAJID, N. M.; JUSOP, S.; GHEITURY, M.; ABDU, A. **Effects of Soil and Rock Mineralogy on Soil Erosion Features in the Merek Watershed, Iran.** Journal of Geographic Information System, pp. 248-247, 2013.

HU, X. **Development of soil crusts under simulated rainfall and crust formation on a loess soil as influenced by polyacrylamide.** Pedosphere, Amsterdam, v. 22, p. 415 – 424, June 2012.

HYSLOP, K.; GALDINO, S.; TÔSTO, S. G.; QUARTAROLI, C. F. **Estimativa do fator topográfico da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) utilizando o Invest, na Bacia Pírim, Amapá.** 13º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica. Capinas, São Paulo. 2019

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Manual técnico de pedologia**. ed.2, n.4. Rio de Janeiro, 2007.

JARDIM, A. M. DA R. F., ARAÚJO JÚNIOR, G. DO N., SILVA, M. J. DA, MORAIS, J. E. F. DE, & SILVA, T. G. F. DA. (2017). **Estimativas de perda de solo por erosão hídrica para o município de Serra Talhada, PE**. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 2(3), 186–193. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1416.186-193>. 2017.

JAZOULI, E. A.; BARAKAT, A.; GHAFIRI, A.; MOUTAKI, S. E.; ETTAQY, A.; KHELLOUK, R. **Soil erosion modeled with USLE, GIS, and remote sensing: a case study of Ikkour watershed in Middle Atlas (Morocco)**. *Geoscience letters*. v. 4, n. 25. 2017.

JIANG, Y.; SHI, H.; WEN, Z.; GUO, M.; ZHAO, J.; CAO, X.; FAN, Y.; ZHENG, C. **The dynamic process of slope rill erosion analyzed with a digital close range photogrammetry observation system under laboratory conditions**. *Geomorphology*. v. 350. 2020.

JOUQUET, P.; HENRY-DES-TUREUX, T.; BOUET, C.; LABIADH, M.; CAQUINEAU, S.; BOUKBIDA, H. A.; IBARRA, F. G.; HERVÉ, V.; BULTELE, A.; PODWOJEWSKI, P. **Bioturbation and soil resistance to wind erosion in Southern Tunisia**. *Geoderma*. v. 403. 2021.

KINNELL, P. I. A. **Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review**. *Hidrol. Process*. v. 19, pp. 2815 – 2844. 2005.

KOU, P.; XU, Q.; YUNUS, A.; DONG, X.; ZHONG, Y.; CHEN, L.; FANG, S.; LUO, X.; JIN, Z. **Rill development and its change rate: a field experiment under constant rainfall intensity**. *Catena*. v. 199, p. 105112. 2021.

KUBOTA, N.; PRATA, T.; LIMA, I.; LIMA, A. **Hydrogeomorphology and erosion susceptibility of the Gurupi river basin (PA-MA)**. *Rev. Geogr. Acadêmica*, v. 13, n 2, p. 67 – 89, 2019.

LACERDA, F. F. **Tendência de temperatura e precipitação e cenários de mudanças climáticas de longo prazo no nordeste do Brasil e em ilhas oceânicas**. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

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. UFPE. CTG. Engenharia Civil, Recife-PE. 2000.

LAFAYETTE, K. P. V. **Estudo geológico-geotécnico para o entendimento do processo erosivo no parque metropolitano Armando de Holanda Cavalcante no Cabo de Santo Agostinho / PE**. Tese de Doutorado. UFPE. CTG. Engenharia Civil, Recife, 2006.

- LEUNG, F. T. Y.; YAN, W. M.; HAU, B. C. H.; THAM, L. G. **Mechanical pull-out capacity and root reinforcement of four native tree and shrub species on ecological rehabilitation of roadside slopes in Hong Kong.** *Journal of Tropical Forest Science.* P.25 – 38. 2018.
- LI, P.; XU, G.; LU, K.; ZHANG, X.; SHI, P.; BAI, L.; REN, Z.; PANG, G.; XIAO, L.; GAO, H. **Runoff change and sediment source during rainstorms in an ecologically constructed watershed on the Loess Plateau, China.** *Sci. Total Environ.* vol. 649, pp. 968 – 974, 101016. 2019.
- LI, J.; MA, X.; ZHANG, C. **Predicting the spatiotemporal variation in soil wind erosion across Central Asia in response to climate change in the 21st century.** *Sci. Total Environ.* vol. 709, 136060. 2020.
- LI, L. LAN H. PENG, J. **Loess erosion patterns on a cut-slope revealed by LiDAR scanning.** *Engineering geology*, vol. 268, abril 2020.
- LI, Q.; JUNCHENG, Y.; JIAQIONG, Z.; FUREN, K.; YUN, G.; ZHANG, Z. **Research Progress on the Anti-erosion Indexes and Models of Plant Roots.** *Journal of Agricultural Resources and Environment.* 2020.
- LI, Z.; ZHANG, G.; GENG, R.; WANG, H. **Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau.** *China. Biosyst. Eng.* v. 129, pp. 248 – 257. 2015.
- LIMA, A. F. **Comportamento geomecânico e análise de estabilidade de uma encosta da Formação Barreiras na área urbana na cidade do Recife** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.
- LIRA, J. N. **Estudo sedimentológico e evolutivo da Coroa do Avião, Itamaracá-PE.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- LISBÔA, F. M.; DONAGEMMA, G. K.; BURAK, D. L.; PASSOS, R. R.; MENDONÇA, E. S. **Indicadores de qualidade de Latossolo relacionados à degradação de pastagens.** *Pesq. Agropec. Bras.* v.51, n.9, 2016.
- LIU, J. E.; ZHOU, Z.; ZHANG, X. J. **Impacts of sediment load and size on rill Odetachment under low flow discharges.** *J. Hydrol.* v. 570, pp. 719 – 725. 2019.
- LIU, K.; DING, H.; TANG, G.; NA, J.; HUANG, X.; XUE, Z.; YANG, X.; LI, F.; LEVY, J.; KAINZ, W. **Detection of Catchment-Scale Gully-Affected Areas Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on the Chinese Loess Plateau.** *J. Geo-inf.* v. 5, p. 238. 2019.
- LOPES, J. W. B.; DE ARAÚJO, J. C.; CONRADO, F. C. **Characterization of the check dams for the control of desertification in the region of Gilbués, Northeast of Brazil.** *Cuad. Soc. Esp. Cienc.* 45(1), 2019.

LUETZENBURG, G.; BITTNER, M. J.; CALSAMIGLIA, A.; RENSCHLER, C. S.; ESTRANY, J.; POEPPL, R. **Climate and land use change effects on soil erosion in two small agricultural catchment systems Fugnitz-Austria**. *Can Revull-Spain. Sci. Total Environ.* v. 704, p. 135389. 2020.

MAGALHÃES, J. S. L. A. **Estudo de estabilidade da encosta Alto do Padre Cícero no Município de Camaragibe-PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.

MAHARAJ, A. **The Use of the Crumb Test as a Preliminary Indicator of Dispersive Soils**. *Proceedings of the 15th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. South Africa, 2011.

MARINHESKI, V. **Aspects about erosion rain in agricultural uses**. *Espacios*. Vol.37 (N<sup>o</sup>05), p. 8. 2016.

MARCATTO, F. S.; SILVEIRA, H. **Relação entre as propriedades físicas e hídricas e os tipos de uso da terra em Neossolos Regolíticos da bacia hidrográfica do rio Pirapó-PR**. *Caderno de Geografia*, v. 27, n. 50, 2017.

MARQUES, S. M.; CAMPOS, F. S.; DAVID, J.; CABRAL, P. **Modelling Sediment Retention Services and Soil Erosion Changes in Portugal: A Spatio-Temporal Approach**. *International journal of Geo-Information*. v. 10. 2021.

MARTINS, C.; FERNANDES, R. **Processos de degradação do solo – medidas de prevenção**. *Vida Rural*. pp. 36-39. 2017.

MAIER, C.; KAUFMANN, V.; MERTEN, G. H.; CASTRO, N. M. R.; OLIVEIRA, F. P. **Efeito da costra superficial na erosão entressulcos de um neossolo litólico submetido a diferentes usos e manejos**. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 18, n. 1, Jan/Mar. 149 – 163. 2013.

MAZLLÓN, U.; EMAMI, H.; HAGHNIA, G. H. **Prediction the soil erodibility and sediments load using soil atributes**. *Eurasian J.*, v. 5, pp.201-208, 2016.

MEDEIROS, S. R. M.; SOUZA NETO, L. T.; CARVALHO, R. G.; GRIGIO, A. **Diretrizes para o planejamento urbano e ambiental: uma proposta de zoneamento para Portalegre/RN**. *Revista Geonorte, Edição Especial 5*, v.7, n.26, p.122-143, 2016.

MEIRA, F. F. D. A. **Estudo do processo erosivo em encostas ocupadas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2008.

MEIRELLES, J. M. F. **Erosão de taludes de estradas**. In: *Jornadas luso-brasileiras de Engenharia Civil*, 2., Rio de Janeiro/RJ – São Paulo/SP, Anais.p.204-211. 1967.

MEIJER, G. J.; WOOD, D. M.; KNAPPETT, J. A.; BENGOUGH, A. G.; LIANG, T. **Root branching affects the mobilisation of root-reinforcement in direct shear**. *E3S Web of Conferences*, 92,12010. 2019.

MEYER, L. D. **How rain intensity affects interrill erosion.** Trans.ASAE. v. 24, pp. 1472 – 1475. 1981.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. **How row-sideslope length and steepness affect sideslope erosion.** Trans.ASAE. v. 32, pp. 639 – 644. 1989.

MOHAMMED, S.; ALSAFADI, K.; TALUKDAR, S.; KIWAN, S.; HENNAWI, S.; ALSHIHABI, O.; SHARAF, M.; HARSANYIE, E. **Estimation of soil erosion risk in southern part of Syria by using RUSLE integrating geo informatics approach.** Remote Sensing Applications: Society and Environment. v. 20. 2020.

MUDDARISNA, N.; YUNIWATTI, E. D.; MASRUROH, H.; OKTAVIANSYAH, A. R. **The effectiveness of cover crops on soil loss control in Gede catchment of Malang Regency, Indonesia.** Journal of degraded and Mining Lands Management. v. 8, n. 2, p. 2502 – 2458. 2021.

NEGESE, A.; FEKADU, E.; GETNET, H. **Estimation of potential soil loss and prioritization of erosion-prone areas using RUSLE, GIS and remote sensing in the Chereti catchment, northeastern Ethiopia.** Air, Soil and Water Research. v. 14, 1-17. DOI: 10.1177/1178622120985814. 2021

NEVES, S. R. A. **Análise prognóstica de processos erosivos na bacia hidrográfica do rio Mateus Nunes (Paraty, RJ).** Dissertação de Mestrado em Geografia – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

NGUYEN, K. A.; CHEN, W.; LIN, B.-S.; SEEBOONRUANG, U. **Using Machine Learning-based algorithms to analyse erosion rates of a watershed in Northern Taiwan.** Sustainability, v. 12, 2022, 16p. 2020.

NIU, X.; NAN, Z. **Roots of Cleistogenes songorica Improved Soil Aggregate Cohesion and Enhance Soil Water Erosion Resistance in Rainfall Simulation Experiments.** Water, Air & Soil Pollution. v. 228, n.109. 2017.

OU, X.; HU, Y. LI, X.; GUO, S.; LIU, B. **Advancements and challenges in rill formation, morphology, measurement and modeling.** Catena. v. 196, p. 104932. 2021.

PANACHUKI, E.; SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D. F.; URCHEI, M. A. **Physical parameters of soil and erosion under simulated rainfall, in pasture-agriculture integration system.** Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient. v.10, n..2 Campina Grande Apr./June 2006

PASQUATTO, M. C.; TOMAZON, J. C. **Estudo do processo erosivo laminar na bacia de captação do rio Barro Preto, em Coronel Vivida – PR.** Revista Brasileira de Geografia Física, v.9, n.2, p. 555-570, 2016.

PEDROSA, A. A. **Comportamento geomecânico de solo reforçado com resíduo da construção civil e fibras de polietileno tereftalato (PET).** Dissertação de Mestrado. Universidade de Pernambuco. 2021.

PEI, Y.; HUANG, L.; LI, D.; SHAO, M. **Characteristics and controls of solute transport under different conditions of soil texture and vegetation type in the water–wind erosion crisscross region of China’s Loess Plateau**. *Chemosphere*. v.273, p. 129651. 2021.

PORTELA, J. C.; CINTRA, F. L. D.; CARVALHO, H. W. L.; ANJOS, J. L.; MELO, P. O. **Atributos físico-hídricos e químicos de solos sob cultivo de milho na região agreste de Sergipe**. *Agropecuária Científica no Semiárido – ACSA*, v. 10, n. 1, p. 51-58, 2014.

PORTELA, M. F. A. **Avaliação da dispersividade e resistência à compressão de compósitos de um solo da formação barreiras com RCD e cal**. Dissertação de mestrado. Universidade de Pernambuco. 2019.

QUEIROZ, H. A. A.; GONÇALVES, R. M. (2017). **Distribuição espacial dos valores de NDVI na faixa litorânea da Ilha de Itamaracá, PE, Brasil**. ResearchGate. Disponível em <<<https://www.researchgate.net/publication/312033974>. Acesso em: 04/01/2017.

RABELO, D. R.; ARAÚJO, J. C. **Estimation and Mapping of Gross Erosion in the Seridó River Watershed, Brazil**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.61, n.2, (Abr-Jun) p.361-372, 2019.

RAMOS, M. C. L. S. **Estudo Geológico-geotécnico e análise da estabilidade de uma encosta localizada no bairro do Curado II no município de Jaboatão de Guararapes - PE**. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2019.

RANGEL, L. A.; GUERRA, A. J. T. **Microtopografia e compactação do solo em trilhas geoturísticas no litoral do parque nacional da Serra da Bocaina – estado do Rio de Janeiro**. *Revista brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 02, p. 391-405, 2016.

RAZAVI-TERMEH, S. V.; SADEGHI-NIARAKI, A.; CHOI, S. **Gully erosion susceptibility mapping using artificial intelligence and statistical models**. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. v. 11, p. 821-844, 2020.

REGINATTO, A. R. e FERRERO, J. C. **Colapse Potential of Soils and Soil-Water Chemistry**. *Proceedings. Anais...VIII Int. Conf. on Soil*. 1973.

RENARD, K. G.; SPAROVEK, G.; SOUZA, M. P. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)**. Washington: USDA, Agriculture Handbook, 1997.

RIBEIRO, A.S.; MINCATO, R. L.; CURI, N.; KAWAKUBO, F. S. **Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico**. *Revista brasileira de geografia física*, v.09, n. 01, p. 016-031, 2016.

ROSA, A.G.; SOUSA, A. M. L.; COSTA, J. A.; SOUZA, E. B. **Erosividade da chuva em Rondon do Pará, PA, Brasil de 1999 a 2015 e projetada para 2035.** Ambiente e Água, v.11, n. 04, p. 1006-1021, 2016.

ROCHA, I. P.; HOLANDA, F. S. R.; ROLIM, M. M.; PEDROTTI, A.; MOURA, M. M.; SANTOS, L. D. V. **Direct Shear Strength on the São Francisco River Bank, Northeastern Brazil, With or Without Roots of Different Native Species.** Journal of Agricultural Studies. v. 9, n. 1. 2021.

ROSS, J. L. S. **O relevo brasileiro no contexto da América do Sul.** Revista Brasileira de Geografia, v.61, n.1, p.21-58, 2016.

RUBIRA, F. G. **Monitoramento das feições do parque municipal do cinquentenário e de suas áreas limítrofes.** Revista brasileira de geografia física, v.09, n. 02, p. 470-497, 2016.

SAADON, A.; ABDULLAH, J.; MUHAMMAD, N. S.; ARIFFIN, J.; JULIEN, P. Y. **Predictive models for the estimation of riverbank erosion rates.** Catena. v. 196, p. 104917. 2021.

SABZEVARI, T.; TALEBI, A. **Effect of hillslope topography on soil erosion and sediment yield using USLE model.** Acta Geophysica, v.67, pp.1587-1597, 2019.

SACRAMENTO NETO, W. S.; AGUIAR, M. F. P.; MARQUES, L. M.; VERÍSSIMO, S. V. **Estudo da Viabilidade da Prospecção do Subsolo com Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL) para Projetos de Fundações de Edificações de Pequeno Porte.** XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Bahia, 2018.

SANTANA, B. C. L. **Estudo comparativo entre técnicas de impermeabilização em talude do município de Jaboatão dos Guararapes/ PE: lona plástica x gel polímero.2021.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2021.

SANTOS, R. F.; LUZ, M. P.; OLIVEIRA, S. A. **Estudo de técnicas alternativas na estabilização de processos erosivos em áreas urbanas – método da estabilização utilizando Solo-Cal.** XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Belo Horizonte, 2016.

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 3ed. Ver. Ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

SANTOS, S. V. O.; SILVA, A. S. **Erosão de solos em áreas de expansão urbana no litoral norte do Município de Maceio-AL.** Espaço e Geografia, v. 23, n. 2, 2020.

SANTOS, R. C.; GUERRA, A. J. T. **Avaliação da erosão dos solos na bacia hidrográfica do Rio Pequeno, Paraty-RJ.** GEOSABERES: Revista de Estudos Geoeducacionais, v. 12, n. 1, pp. 23-43,2021.

- SCHOLTEN, T.; SEITZ, S. **Soil Erosion and Land Degradation**. Soil Systems, v.3, 68. 2019.
- SCHOSSLER, T. R.; MACHADO, D. M.; ZUFFO, A. M.; ANDRADE, F. R.; PIAULINO, A. C. **Salinidade: Efeitos na fisiologia e na nutrição mineral de plantas**. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 8, n.15; p.1563, 2012.
- SEGEDI, G. C. **Estimativa de erosão pela equação universal de perda do solo (usle) para a bacia de São Marcos**. Monografia de especialização. Universidade de Brasília. Brasília. 2019.
- SERIO, M. A.; CAROLLO, F. G.; FERRO, V. **Raindrop size distribution and terminal velocity for rainfall erosivity studies**. Journal of hydrology. v.:576 p.:210 - 228, 2019.
- SETYAWAN, C.; LEE, C.; PRAWITASARI, M. **Investigating spatial contribution of land use types and land slope classes on soil erosion distribution under tropical environment**. Natural Hazards, v.98, pp.697-718, 2019.
- SEKI, K. **SWRC Fit - A nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure**. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 4: 407-437. 2007.
- SHERARD, J. L.; DUNNIGAN, L. P.; DECKER, R. S. **Identification and nature of dispersive soils**. ASCE, Divisão Geotécnica, Vol. 102, GT4, 1976.
- SHI, Z. H.; FANG, N. F.; WU, F. Z.; WANG, L.; YUE, B. J. WU, G. L. **Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes**. Journal of hydrology, v.:454 p.:123 -130, 2012.
- SHIN, S. S.; PARK, S. D.; PIERSON, F. B.; WILLIAMS, C. J. **Evaluation of physical erosivity factor for interrill erosion on steep vegetated hillslopes**. Journal of hydrology, v.:571 p.:559 -572, 2019.
- SILVA, A. C. A.; RIBEIRO, H. J.; SANTOS, G. R.; KOPP, K. A. **Análise temporal da suscetibilidade do entorno do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros – Goiás**. Geoambiente On-line, Goiânia, n. 37, p. 261–281, 2020.
- SILVA, D. B.; ALVES, N. M. **Avaliação da erodibilidade de Argissolos no município de Cristinápolis, Sergipe**. REGNE, v.2, n. especial, 2016.
- SILVA, D. J. **Mapa de risco de deslizamento e erosão em encostas com ocupações desordenadas no município de Abreu e Lima – pe**. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2016.
- SILVA, L. A. **Sedimentologia do canal de santa cruz – Ilha de Itamaracá**. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.

- SILVA, M. M. **Estudo Geológico-Geotécnico de uma encosta com problemas de instabilidade no Município de Camaragibe-PE.** Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2007.
- SILVA, R. R. **Proposta para estabilização de uma encosta ocupada em Camaragibe-PE** Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2010.
- SILVA NETO, J. C. A. **Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno.** Geografia (Londrina), v. 22, n.1, p.05-25, 2013.
- SINGH, G.; PANDA, R. K. **Grid-cell based assessment of soil erosion potential for identification of critical erosion prone areas using USLE, GIS and remote sensing: A case study in the Kapgari watershed, India.** International Soil and Water Conservation Research, v. 5, p.202-211, 2017.
- SKEMPTON, A. W. **Soil-mechanics in relation to geology.** In: . [S.l.: s.n.], 1953.
- SMETANOVÁ, A.; FOLLAIN, S.; DAVID, M.; CIAMPALINI, R.; RACLOT, D.; CRABIT, A.; LE BISSONNAIS, Y. **Landscaping compromises for land degradation neutrality: The case of soil erosion in a Mediterranean agricultural landscape.** Journal of Environmental Management, V.235, pp.282-29201, april 2019.
- SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. **Guelph Permeameter. Operating – Instructions,** Soilmoisture manual. Estados Unidos: Soilmoisture Equipment Corp., 1991.
- SOUSA, F. R. C.; PAULA, D. P. **Analysis Of Soil Loss by Erosion in Coreaú River Basin (Ceará-Brazil).** Revista Brasileira de Geomorfologia, v.20, nº 3, 2019.
- SOUZA, A. D. O.; PAIVA, C. F. E. **Avaliação da Erodibilidade de um Solo Saprólítico Micáceo com o Emprego da Classificação Geotécnica MCT – Miniatura, Compactado, Tropical: Comparação de Diferentes Propostas de Redução do Tempo de Realização dos Ensaios.** XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Belo Horizonte, 2016.
- 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. Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2014.
- SOMBROEK, W.G. **Introduction to the subject. Assessment of soil surfasse sealing and crusting.** In: SYMPOSIUM FLANDERS RESEARCH CENTER FOR SOIL EROSION AND SOIL CONSERVATION, Ghent, Belgium, 1985.
- STOLF, R. **Teoria e Teste Experimental de Fórmulas de Transformação dos Dados de Penetrômetro de Impacto em Resistência do Solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, n. 15, p. 229-235, 1991.

TESSEMA, Y. M.; JASINSKA, J.; YADETA, L.T.; SWITONIAK, M.; PUCHALKA, R.; GEBREGEORGIS, E. G. **Soil Loss Estimation for Conservation Planning in the Welmel Watershed of the Genale Dawa Basin, Ethiopia**. *Agronomy*, v.10. 2020.

TEIXEIRA, J. C.; ANTONIALLI, L. M.; NASCIMENTO, M. C.R. **Perfil de Estudos em Administração que utilizaram triangulação metodológica: uma análise dos anais do Enanpad de 2007 a 2009**. XIII Semead. 2010.

TEIXEIRA, D. B. S. **Erosividade da chuva no estado de são paulo com base em Séries sintéticas de dados pluviográficos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2019.

TEIXEIRA GUERRA, A. J.; FULLEN, M. A.; OLIVEIRA JORGE, M. D. C.; RODRIGUES BEZERRA, J. F.; SHOKR, M. S. **Slope processes, mass movement and soil erosion: a review**. *Pedosphere*. v. 27, pp. 27 – 41. 2017.

TIAN, K.; WU, Y.; ZHANG, H.; LI, D.; NIE, K.; ZHANG, S. **Increasing wind erosion resistance of aeolian sandy soil by microbially induced calcium carbonate precipitation**. *Research Article*. v. 29, p. 4271 – 4281. 2018.

TORRES, F. S. M.; COUTINHO, R. Q.; DUARTE, C. C.; MENEZES, J. B.; FONSECA, N. D; PFALTSGRAFF, P. A. **Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e erosão do município de Ipojuca-PE**. *GEOTECNIA (LISBOA)*, v. 11, p. 67-88, 2015.

TURKOZ, M.; SAVAS, H.; ACAZ, A.; TOSUN, H. **The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics**. *Applied clay Science*. Turkey, n. 101, p. 1 – 9, 2014.

VALLE, I. C.; FRANCELINO, M. R.; PINHEIRO, H. S. K. **Mapeamento da Fragilidade Ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ**. *Floresta e Ambiente*, 23(2), p.295-308, 2016.

VALENÇA, L. M. M. **Geologia e recursos minerais da Folha Itamaracá, SB.25-Y-C-VI**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2017

VAN.DER.MERWE, D. H. **The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils**. *trans. s. afr. inst. of civ. engrs*. vol 6, nº 6. In. [S.l.: s.n.], 1964.

VAN GENUCHTEN, M. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898. 1980.

VIEIRA, M. M. F.; ZOUAIN, D. M. **Pesquisa Qualitativa em Administração**. Rio de janeiro: FGV, 2006.

VILLA VERDE, V. G. R. **Diagnóstico da erosão urbana da cidade de Recife, Pernambuco**. Tese de Doutorado. UFPE. CTG. Engenharia Civil, Recife, 2019.

WANG, B.; ZHANG, G. H. **Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau.** Soil Sci. Soc. Am. J. v. 81, pp. 1567 – 1576. 2017.

WANG, J.; ZHANG, W.; ZHANG, Z. **Impacts of Land-Use Changes on Soil Erosion in Water–Wind Crisscross Erosion Region of China.** Remote Sensing, v.11, 2019.

WANG, Z.; JIAO, J.; RAYBURG, S.; WANG, Q.; SU, Y. **Soil erosion resistance of “Grain for Green” vegetation types under extreme rainfall conditions on the Loess Plateau, China.** Catena. v.141, pp. 109 – 116. 2016.

WATANABE, M.; OLIVEIRA, F. A.; NUNES, D. D.; CHECCHIA, E. **Análise geossistêmica e quantificação de perda de solo da bacia do Rio Mutum-Paraná (RO).** Revista Franco-brasileira de Geografia. n. 29. 2016.

WEN, Y.; KASIELKE, T.; LI, H.; ZHANG, B.; ZEPP, H. **May agricultural terraces induce gully erosion? A case study from the Black Soil Region of Northeast China.** Science of The Total Environment. v. 7, p. 141715. 2021.

WIJAYANTI, F.; KURNIAWAN, S.; SUPRAYOGO, D. **Impact of maize conservation agricultural system on nitrogen losses through surface runoff and soil erosion in dryland.** Journal of Degraded and Mining Lands Management, p. 2502 – 2458, v. 7, n. 1, 2019.

WISCHMEIER, W. H. SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses.** A guide to conservation planning. Agriculture Handbook. n. 537, 1978.

WU, G.; LUI, Y.; CUI, Z.; LIU, Y.; SHI, Z.; YIN, R.; KARDOL, P. **Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: a meta-analysis.** Journal of Applied Ecology. v. 57, ed. 5, p. 875 – 885. 2020.

XAVIER, J. P. S. **Erosão pluvial e escorregamento do estado de Pernambuco.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

XAVIER, J. M. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo colapsível voltado para fundações superficiais.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

YAN, Y.; ZHEN, H.; ZHAI, X.; LI J.; HU, W.; DING, C.; QI, Z.; QIAO, B.; LI, H.; LIU, X.; ZHANG, X. **The role of vegetation on earth bunds in mitigating soil erosion in Mollisols region of Northeast China.** Catena. v. 196, p. 104927. 2021.

YE, C.; GUO, Z.; LI Z.; CAI, C. **The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquults in subtropical China.** Geomorphology. v. 285, pp. 82 - 93. 2017.

YU, H.; LI, Y.; OSHUNSANYA, S. O.; ARE, K. S.; GENG, Y.; SAGGAR, S.; LIU, W. **Re-introduction of light grazing reduces soil erosion and soil respiration**

**converted grassland on the loess plateau, China.** *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 280, 43 – 52, 2019.

YU, W.; ZHAO, L.; FANG, Q.; HOU, R. **Contributions of runoff from paved farm roads to soil erosion in karst uplands under simulated rainfall conditions.** *Catena*. v. 196. 2021.

ZAMBOM, N.; JOHANNSEN, L. L.; STRAUSS, P.; DOSTAL, T.; ZUMR, D.; COCHRANE, T. A.; KLIK, A. **Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall.** *Catena*. v. 196, p. 104827. 2021.

ZHANG, B.; ZHANG, G.; YANG, H.; ZHU, P. **Temporal variation in soil erosion resistance of steep slopes restored with different vegetation communities on the Chinese Loess Plateau.** *Catena*, v.182, 2019.

ZHANG, C.; ZHOU, A.; ZHANG, H.; ZHANG, Q.; ZHANG, X.; SUN, H.; ZHAO, C. **Soil erosion in relation to climate change and vegetation cover over the past 2000 years as inferred from the Tianchi lake in the Chinese Loess Plateau.** *Journal of Asian Earth Sciences*, v.180, 2019.

ZHANG, F.; WANG, MIN.; YANG, M. **Successful application of the Taguchi method to simulated soil erosion experiments at the slope scale under various conditions.** *Catena*. v. 196, p. 104835. 2021.

ZHAO, Y.; LIU, L.; KANG, S.; AO, Y.; HAN, L.; MA, CHAOQUN. **Quantitative Analysis of Factors Influencing Spatial Distribution of Soil Erosion Based on Geo-Detector Model under Diverse Geomorphological Types.** *Land*. 10, 604. 2021.

ZHUANG, Y.; DU, C.; ZHANG, L.; DU, Y.; LI, S. **Research trends and hotspots in soil erosion from 1932 to 2013: a literature review.** *Scientometrics*. v. 105, pp. 743 – 758. 2015.

## APÊNDICE A – CURVAS GRANULOMÉTRICAS

Figura A.1 - Curva granulométrica de P-01 (S-01) entre 0,00 m e 0,80 m.

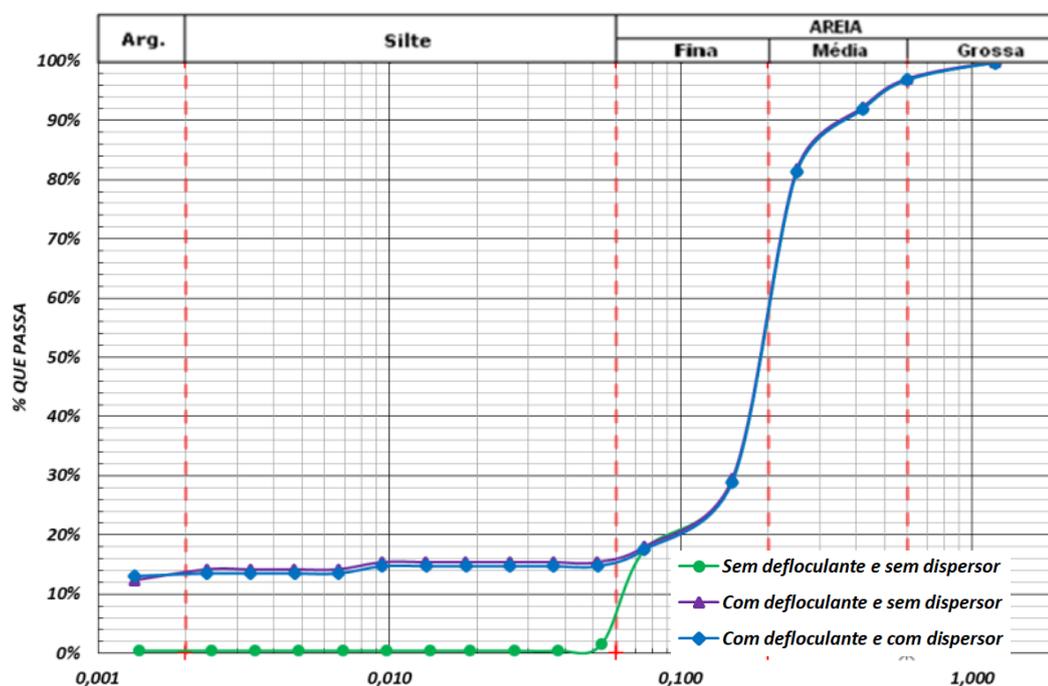


Figura A.2 - Curva granulométrica de P-01 (S-01) entre 0,80 m e 2,20 m.

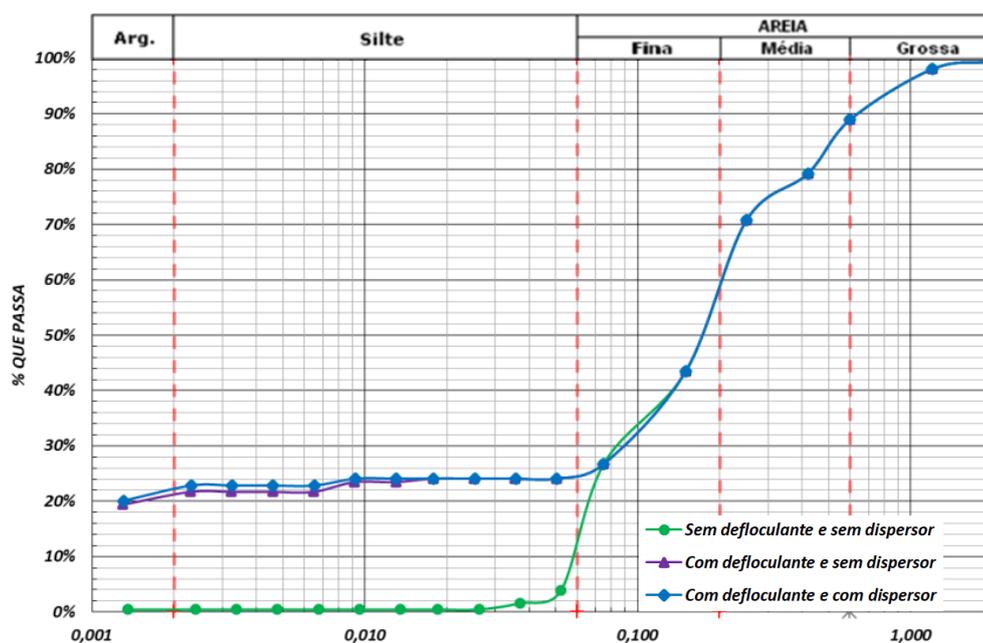


Figura A.3 - Curva granulométrica de P-01 (S-01) entre 2,20 m e 3,30 m.

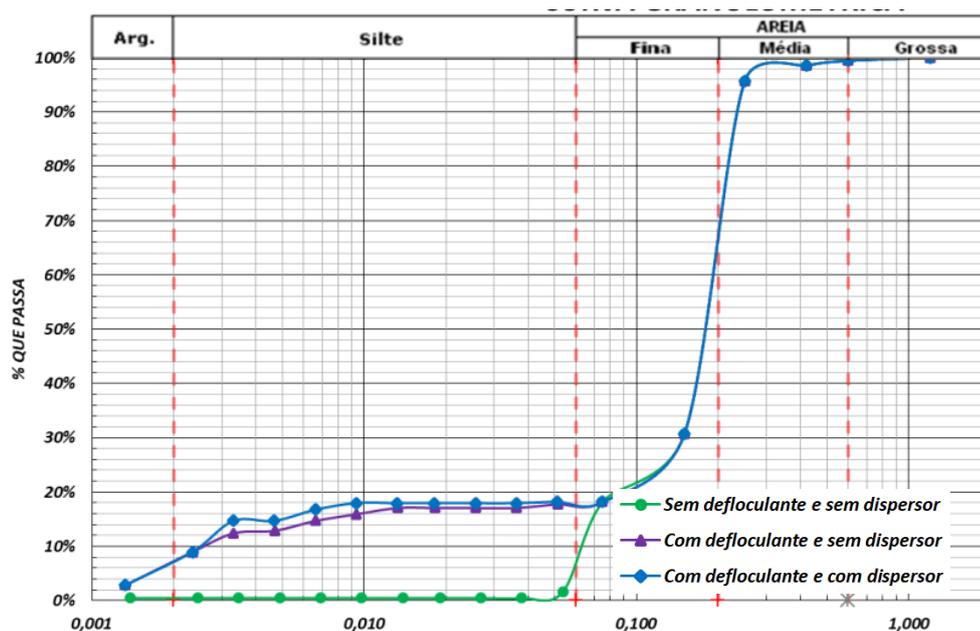


Figura A.4 - Curva granulométrica de P-01 (S-01) entre 3,30 m e 5,00 m.

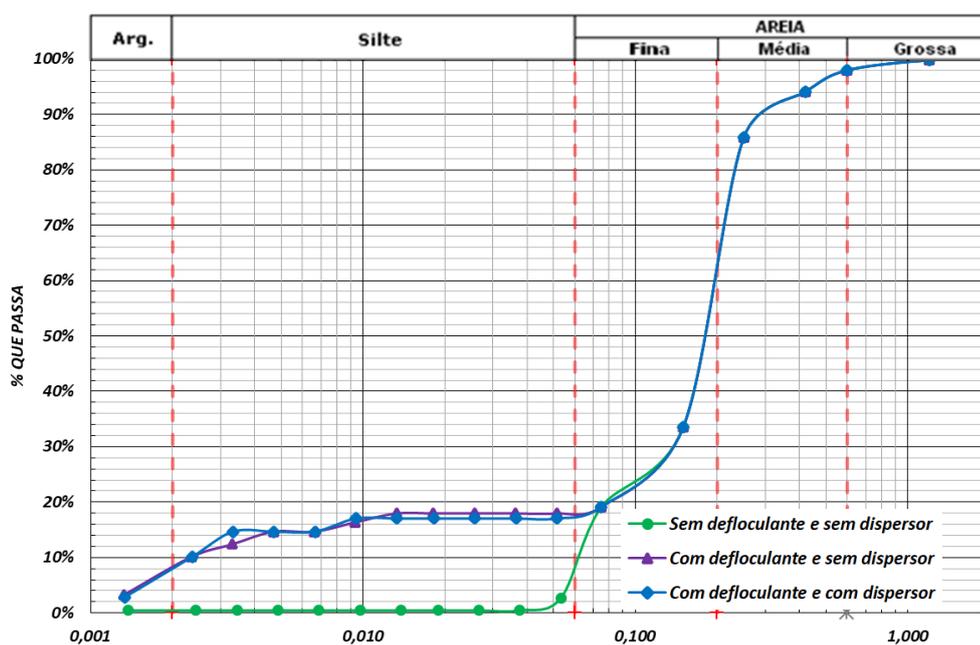


Figura A.5 - Curva granulométrica de P-04 (S-01) entre 0,00 m e 3,00 m.

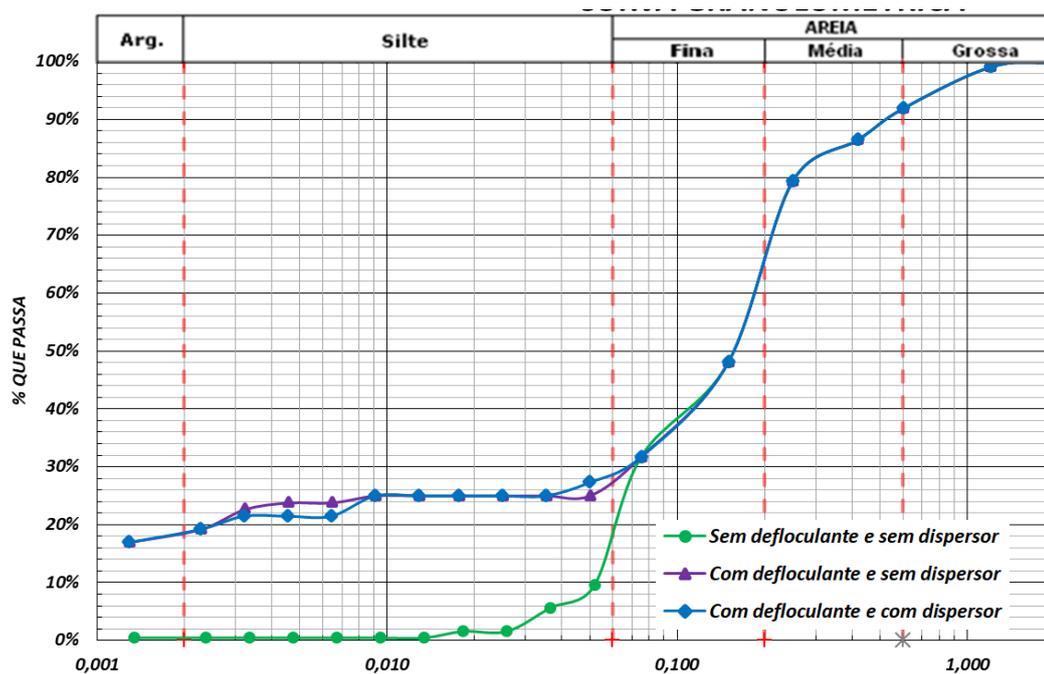


Figura A.6 - Curva granulométrica de P-04 (S-01) entre 3,00 m e 5,00 m.

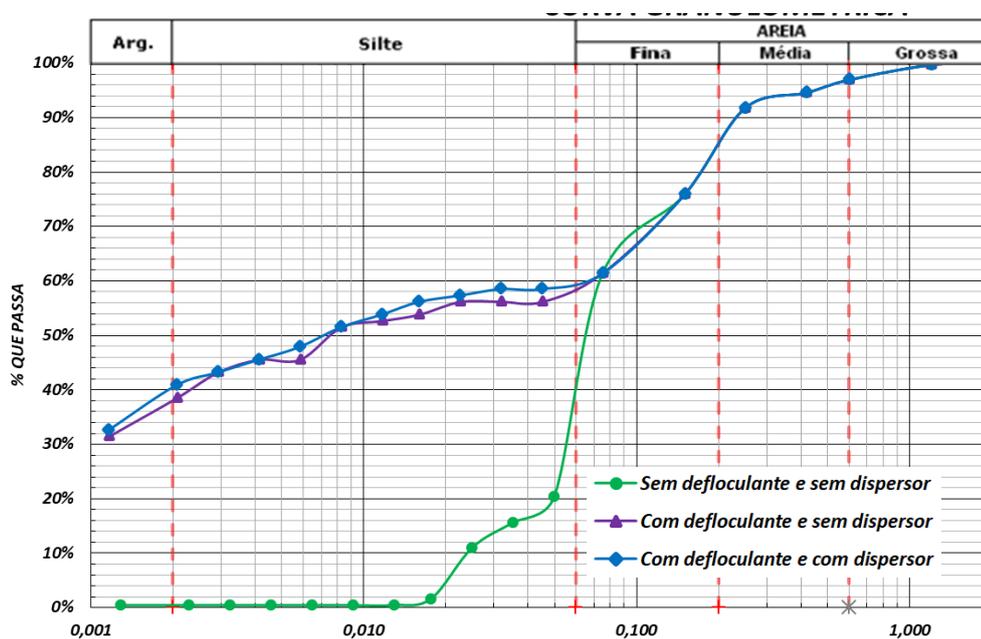


Figura A.7 - Curva granulométrica de P-07 (S-01) entre 0,00 m e 1,00 m.

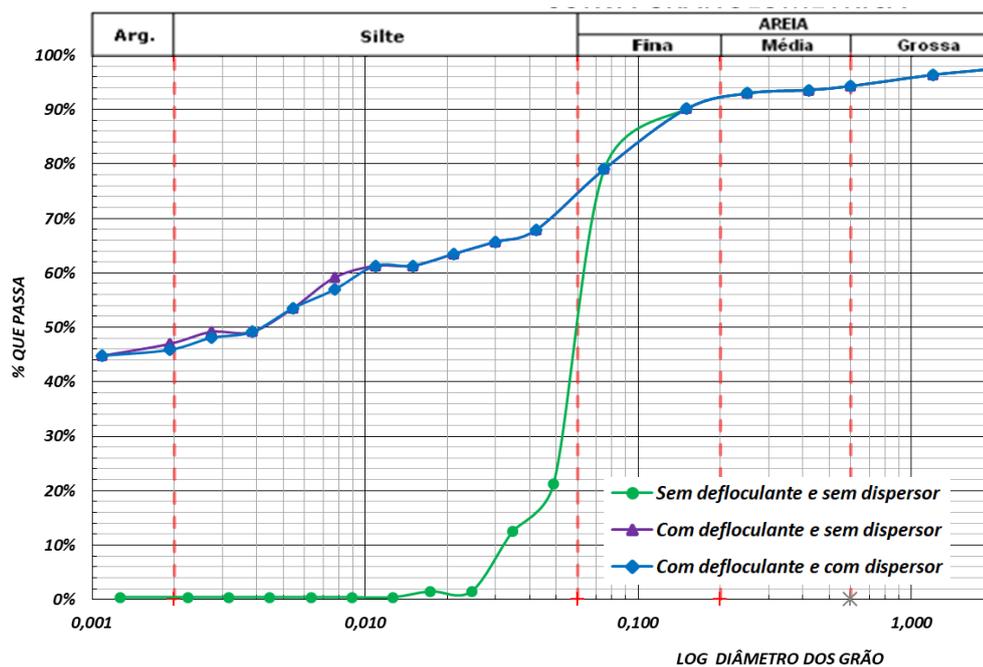


Figura A.8 - Curva granulométrica de P-07 (S-01) entre 1,00 m e 5,00 m.

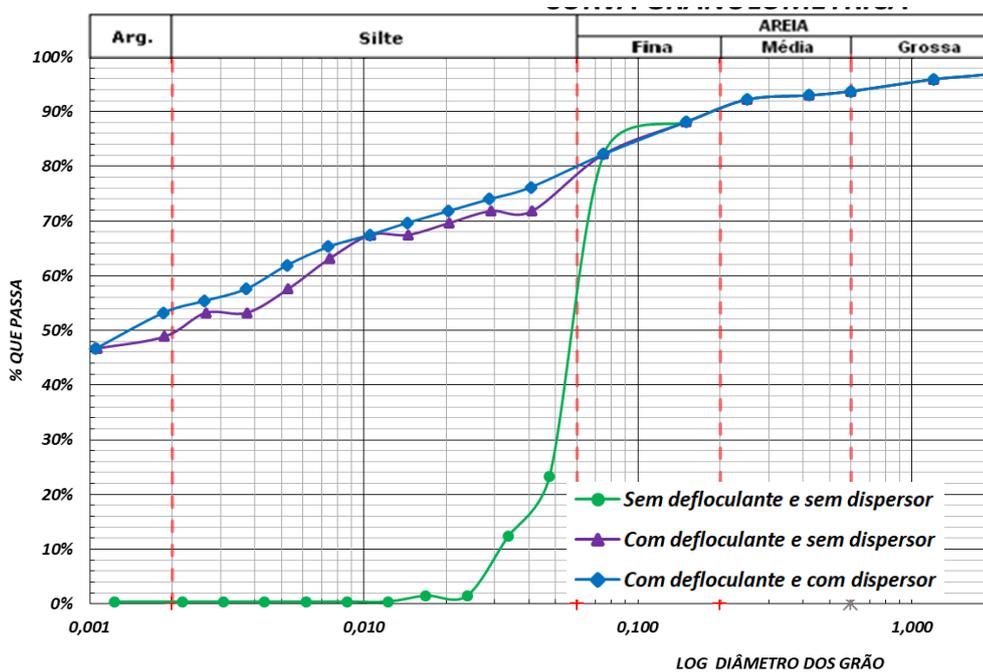


Figura A.9 - Curva granulométrica de P-02 (S-02) entre 0,00 m e 0,20 m.

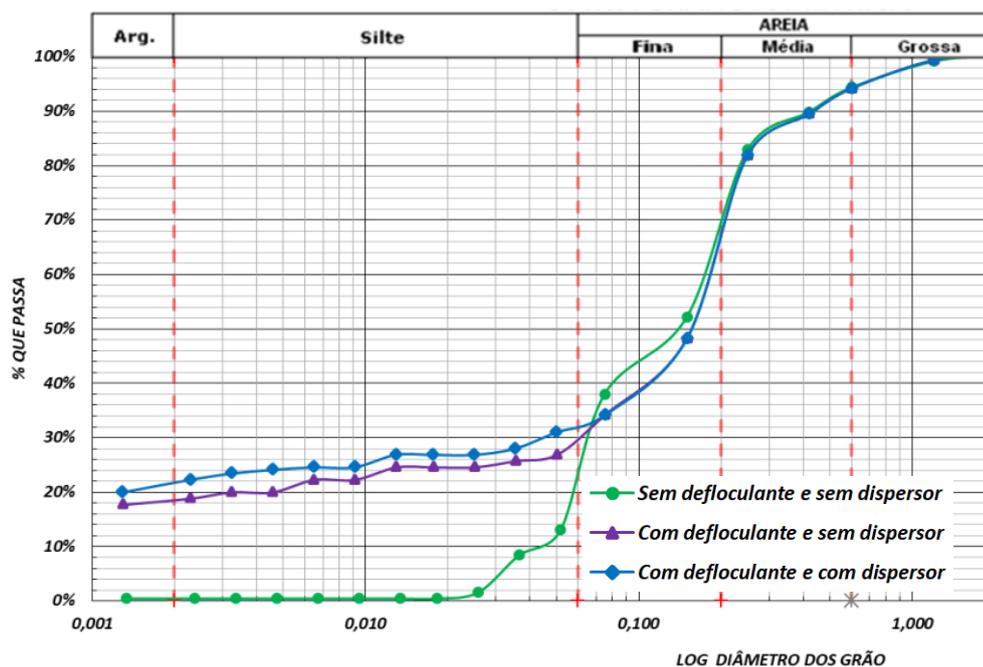


Figura A.10 - Curva granulométrica de P-02 (S-02) entre 0,20 m e 1,00 m.

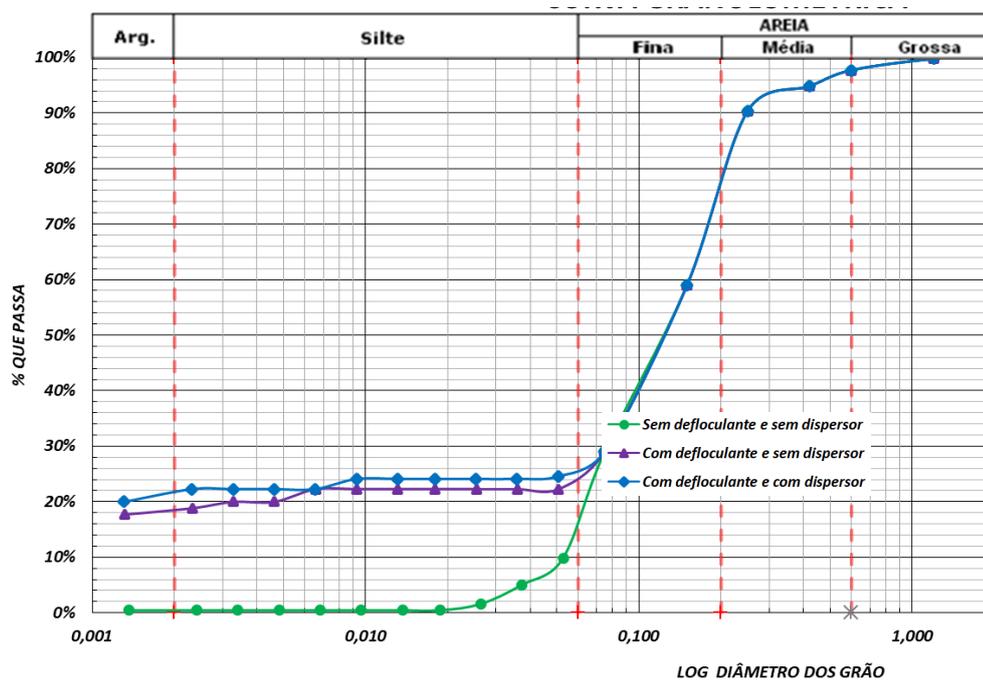


Figura A.11 - Curva granulométrica de P-02 (S-02) entre 1,00 m e 1,30 m.

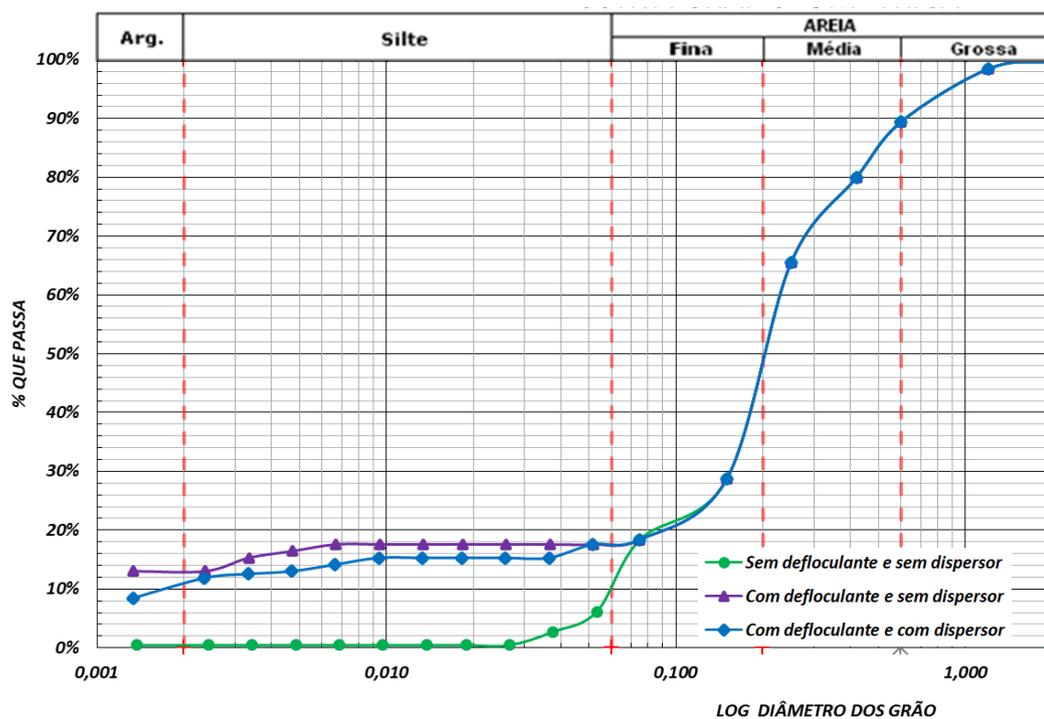


Figura A.12 - Curva granulométrica de P-02 (S-02) entre 1,30 m e 2,00m.

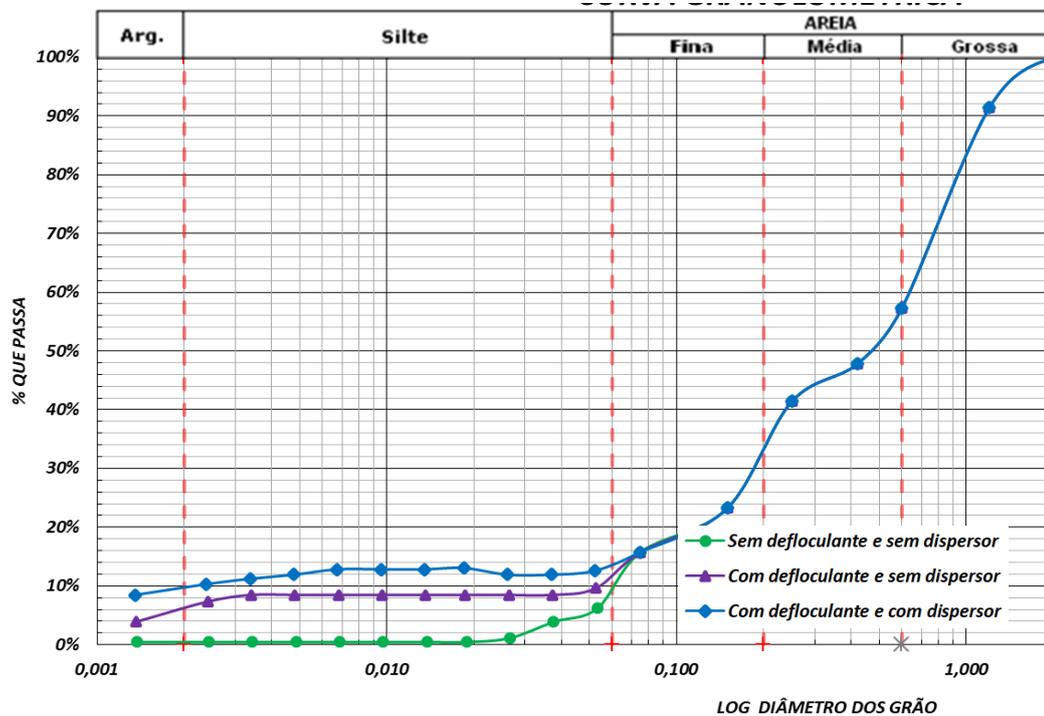


Figura A.13 - Curva granulométrica de P-02 (S-02) entre 2,00 m e 2,60 m.

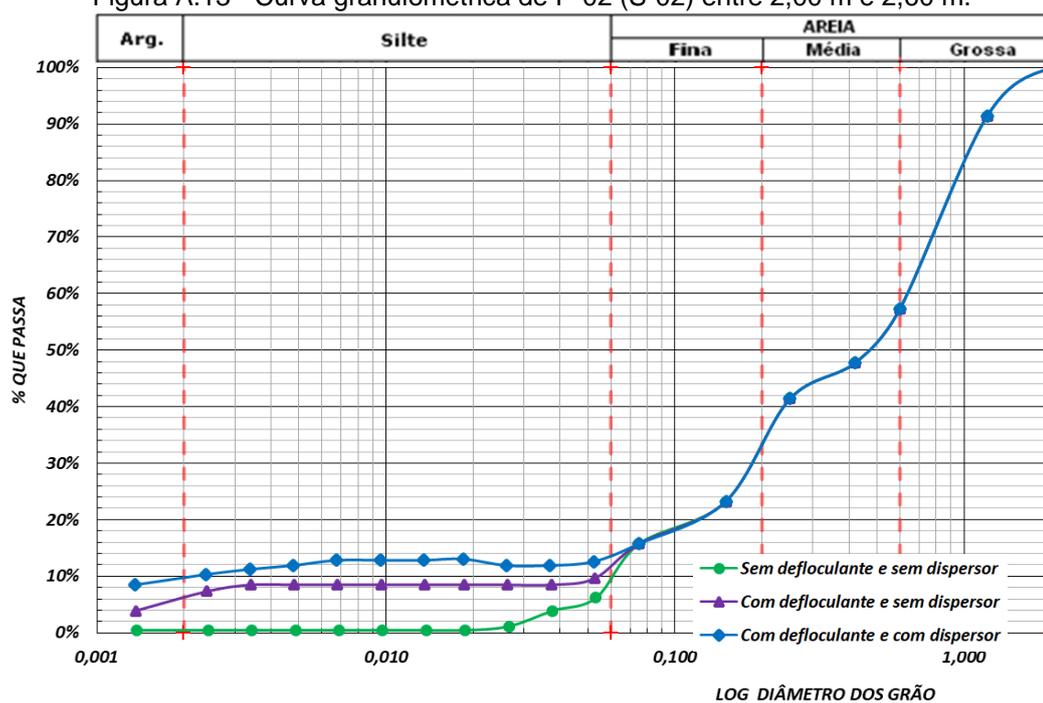


Figura A.14 - Curva granulométrica de P-02 (S-02) entre 2,60 m e 2,90 m.

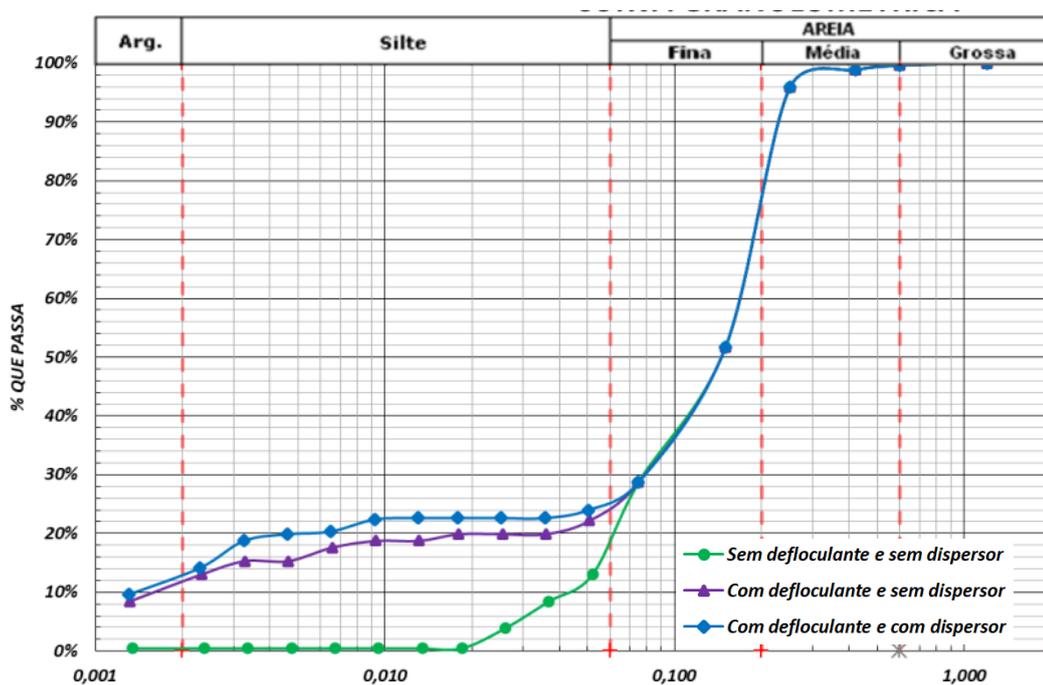


Figura A.15 - Curva granulométrica de P-02 (S-02) entre 2,90 m e 5,00 m.

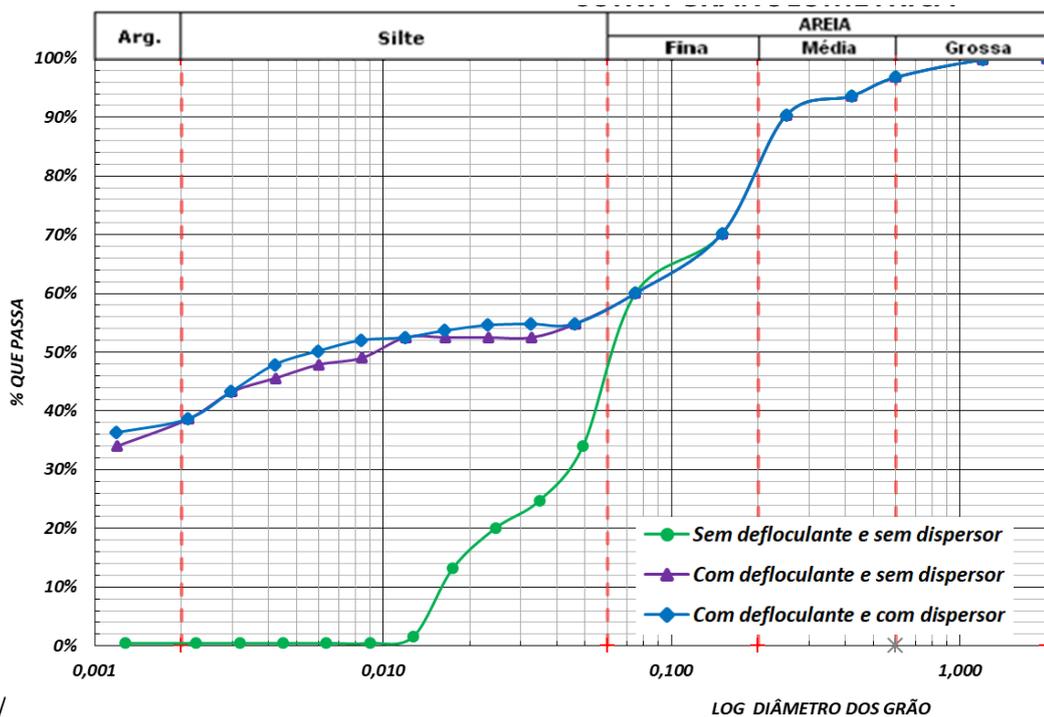


Figura A.16 - Curva granulométrica de P-05 (S-02) entre 0,00 m e 0,20 m.

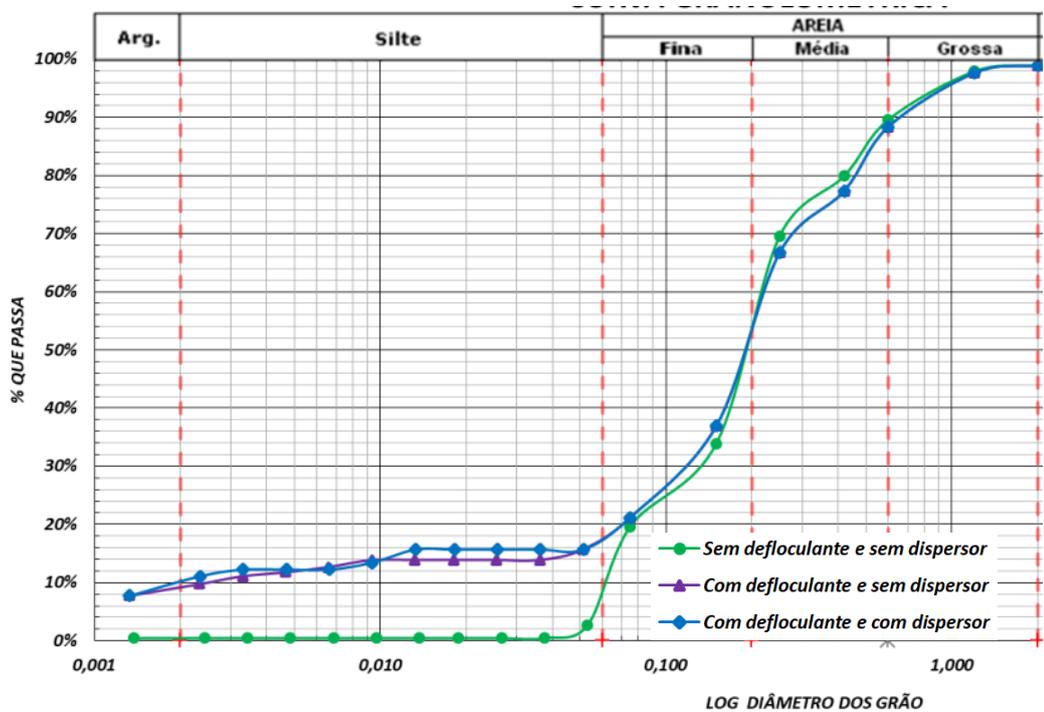


Figura A.17 - Curva granulométrica de P-05 (S-02) entre 0,20 m e 0,80 m.

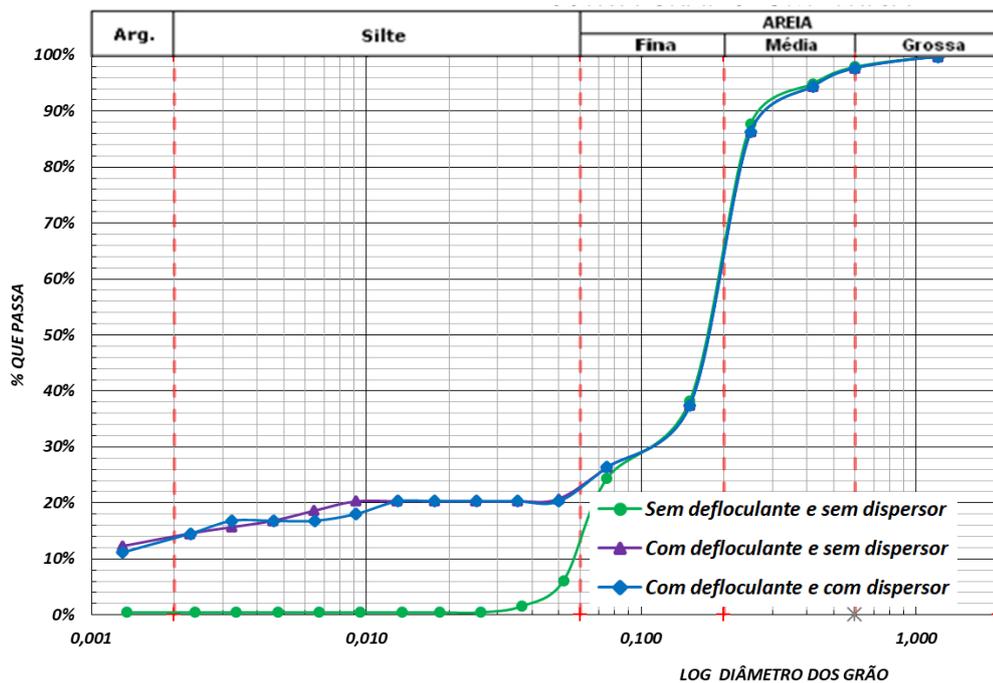


Figura A.18 - Curva granulométrica de P-05 (S-02) entre 0,80 m e 1,30 m.

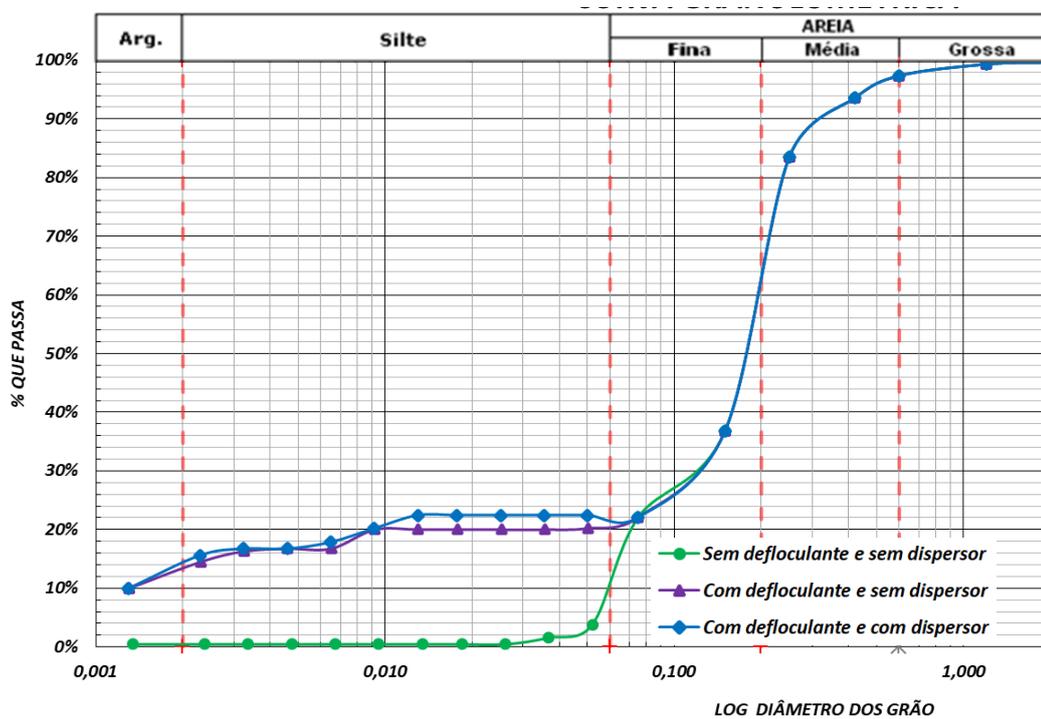


Figura A.19 - Curva granulométrica de P-05(S-02) entre 1,30 m e 1,70 m.

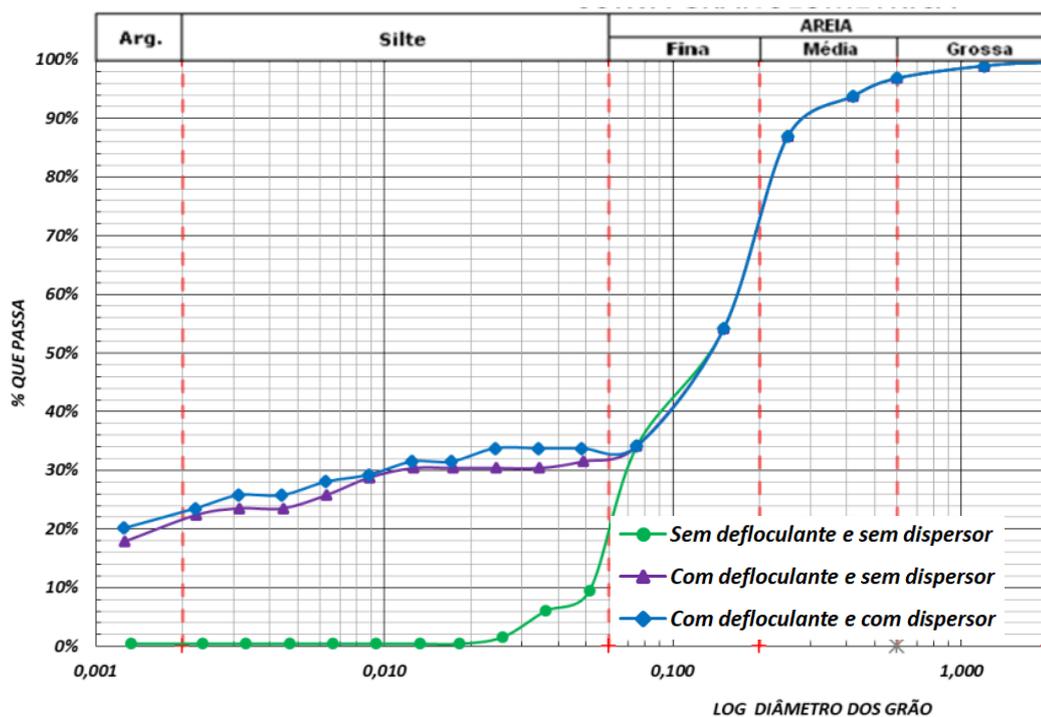


Figura A.20 - Curva granulométrica de P-05 (S-02) entre 1,70 m e 2,10 m.

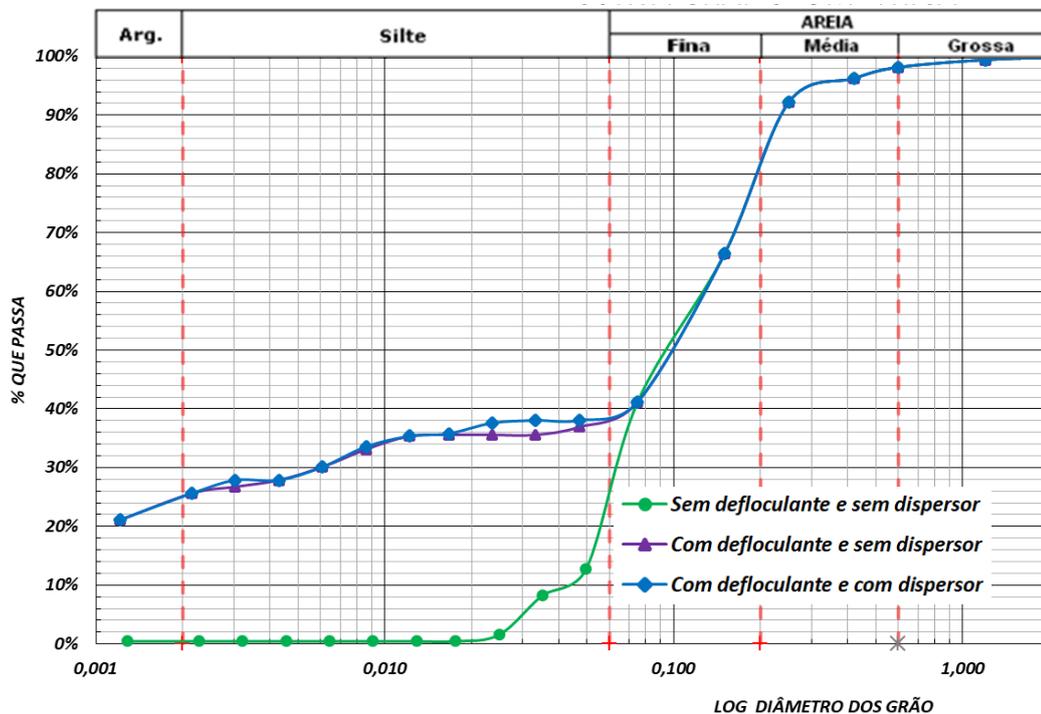


Figura A.21 - Curva granulométrica de P-05 (S-02) entre 2,10 m e 2,90 m.

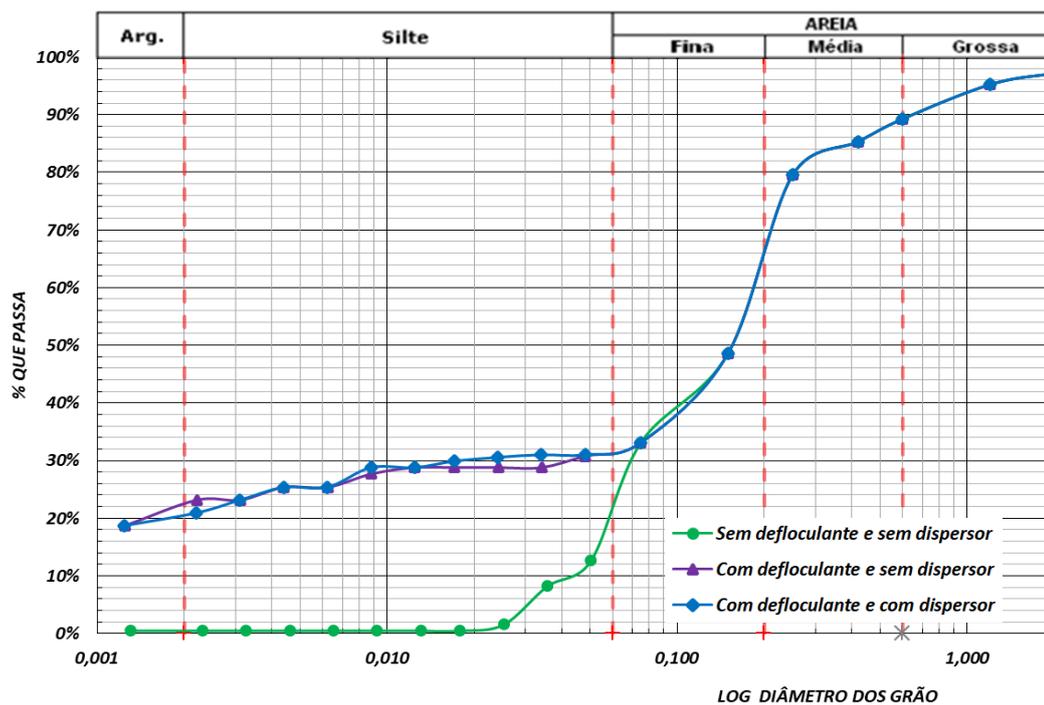


Figura A.22 - Curva granulométrica de P-05 (S-02) entre 2,90 m e 5,00 m.

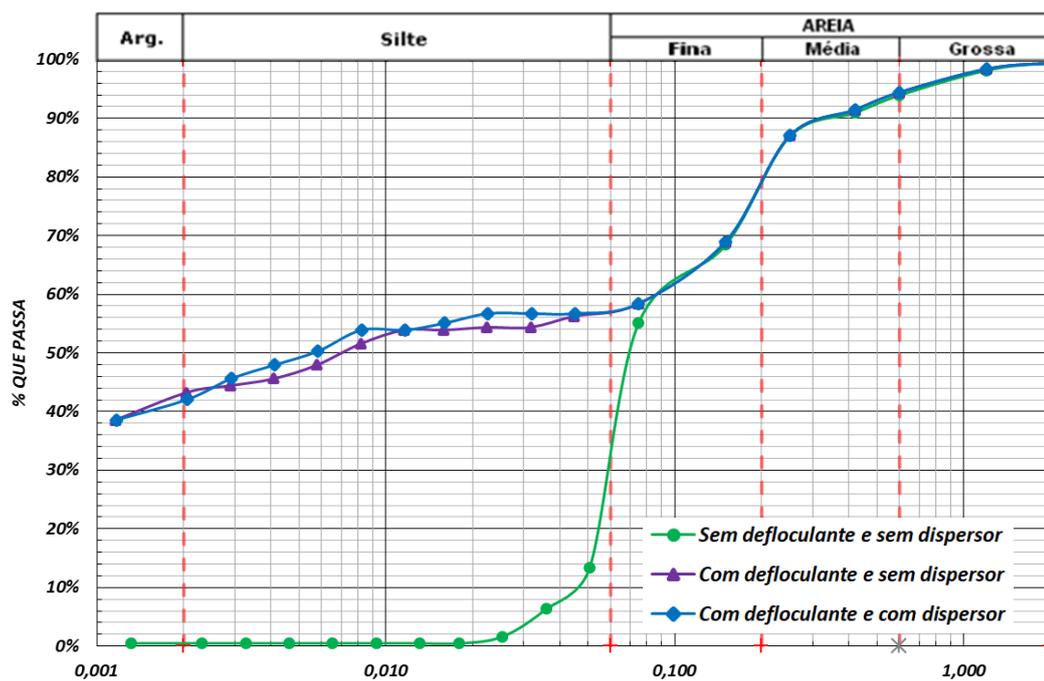


Figura A.23 - Curva granulométrica de P-08 (S-02) entre 0,00 m e 0,40 m.

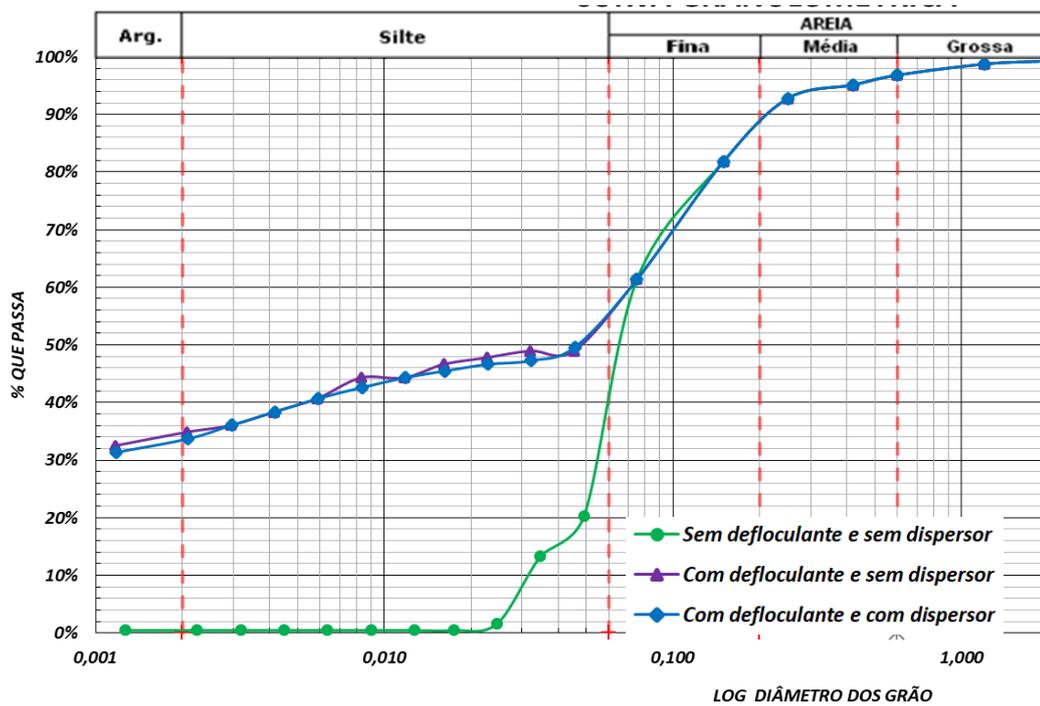


Figura A.24 - Curva granulométrica de P-08 (S-02) entre 0,40 m e 5,00 m.

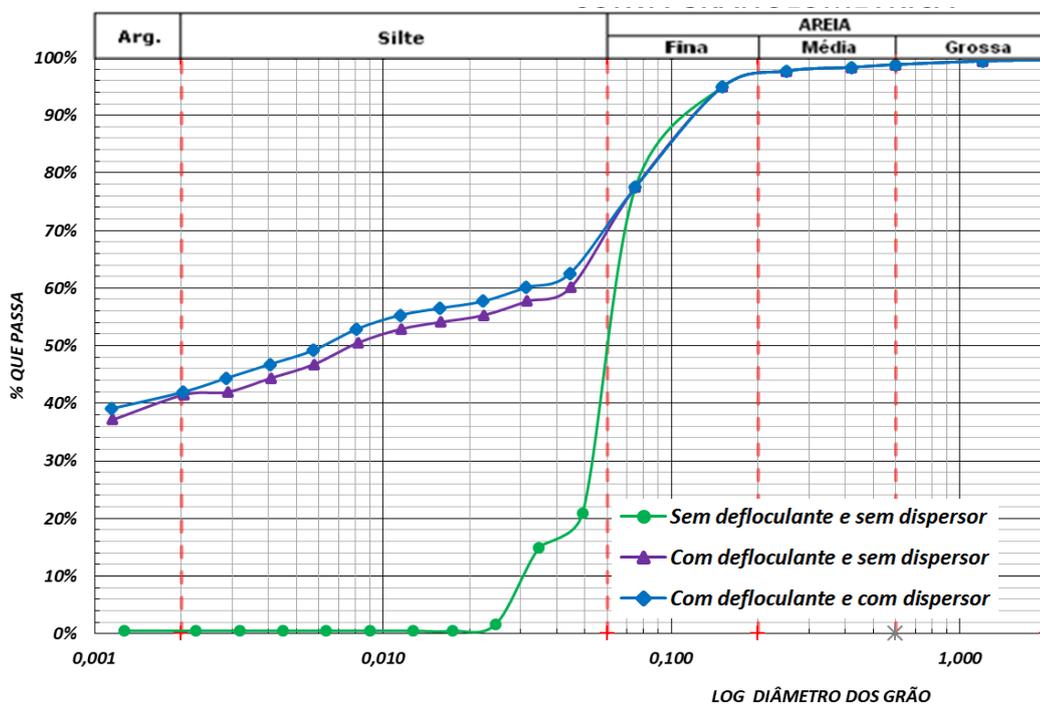


Figura A.25 - Curva granulométrica de P-03 (S-03) entre 0,00 m e 1,00 m.

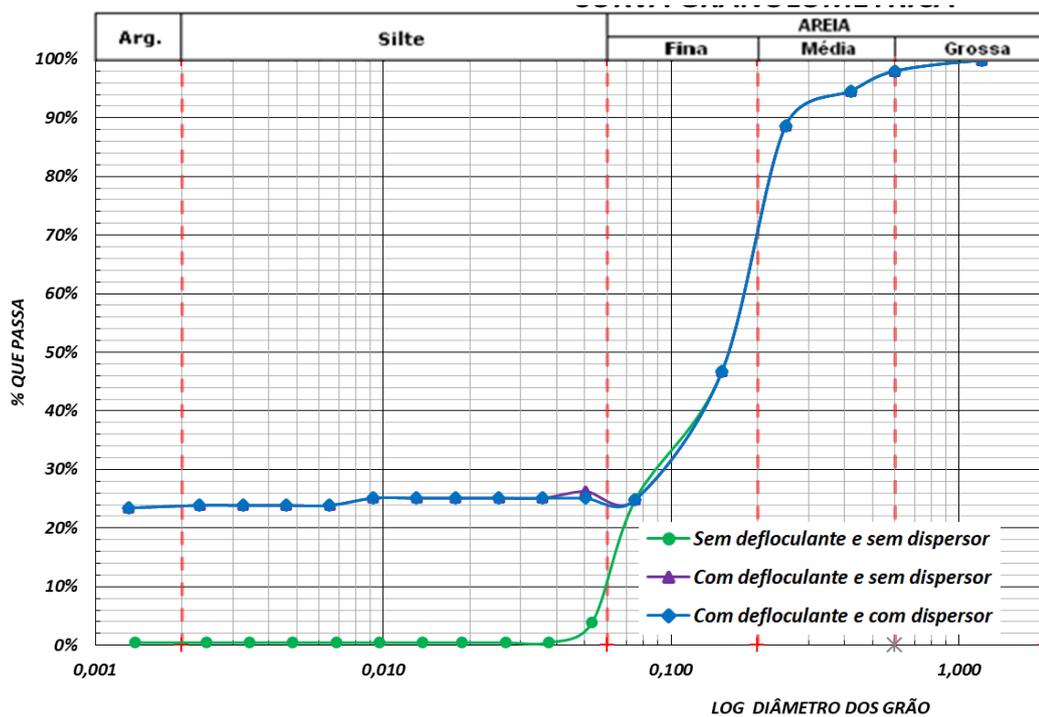


Figura A.27 - Curva granulométrica de P-03 (S-03) entre .3,00 m e 5,00 m.

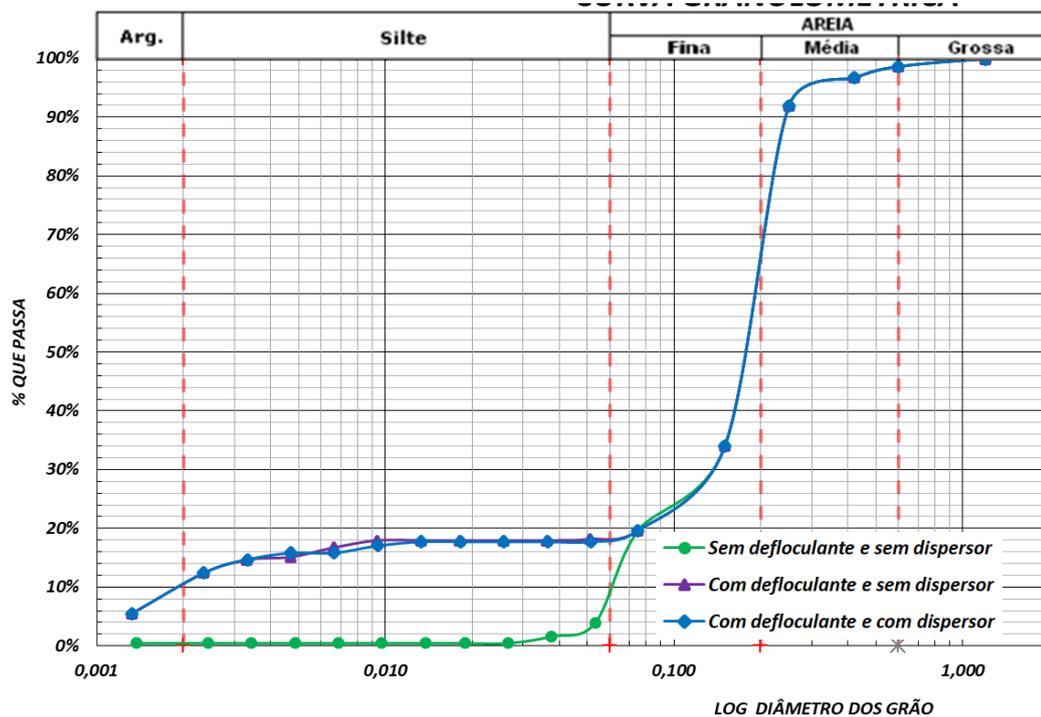


Figura A.28 - Curva granulométrica de P-06 (S-03) entre 0,00 m e 0,40 m.

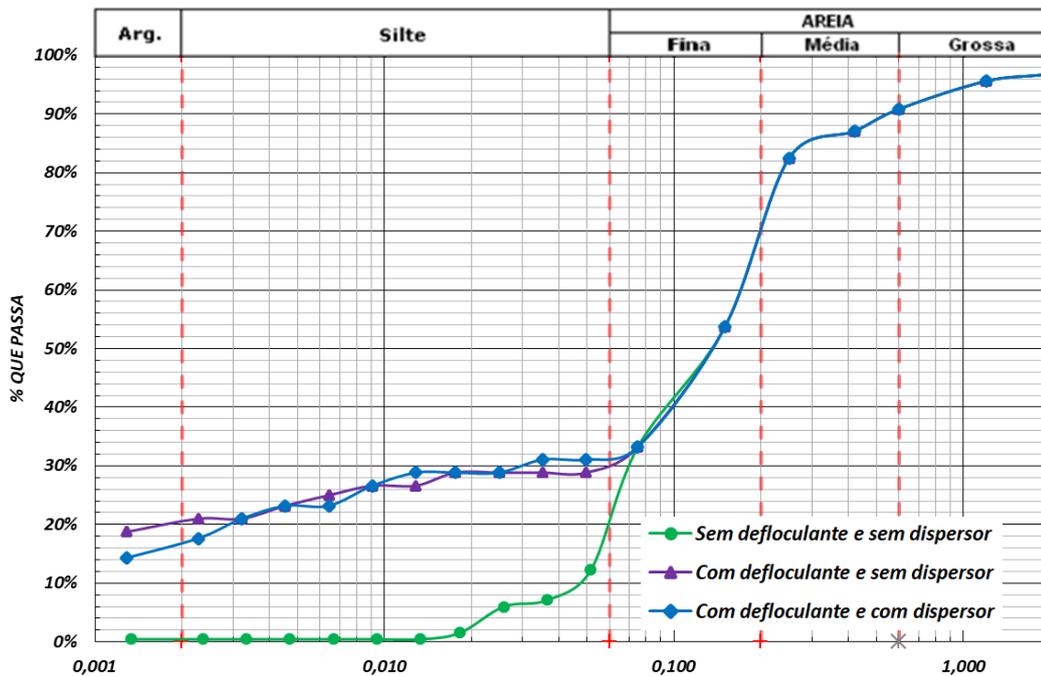


Figura A.29 - Curva granulométrica de P-06 (S-03) entre 0,40 m e 2,30 m.

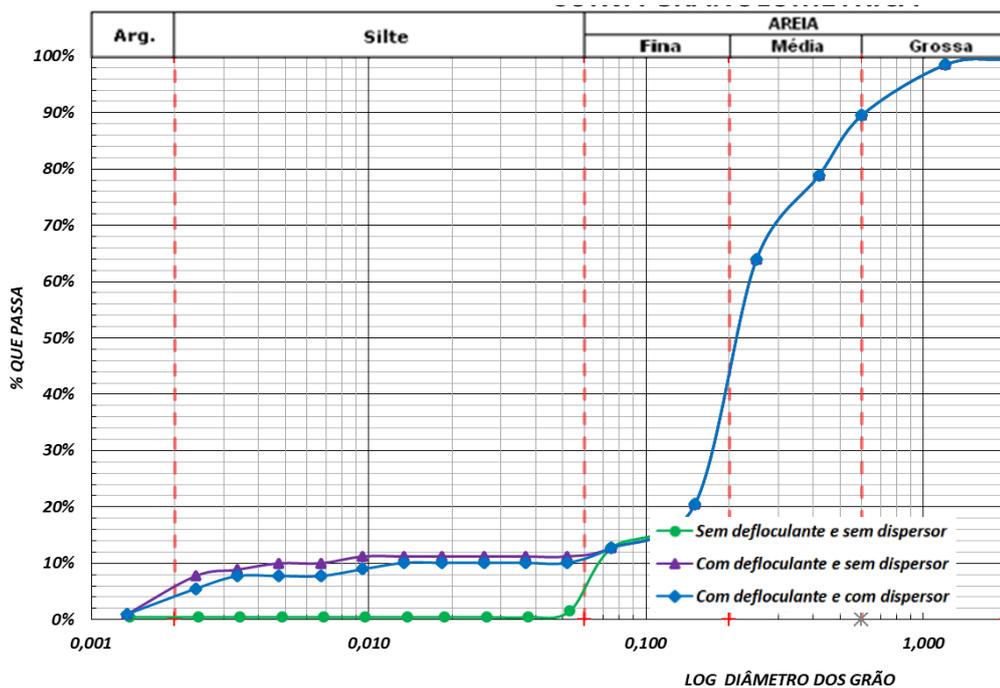


Figura A.30 - Curva granulométrica de P-06 (S-03) entre 2,30 m e 5,00 m.

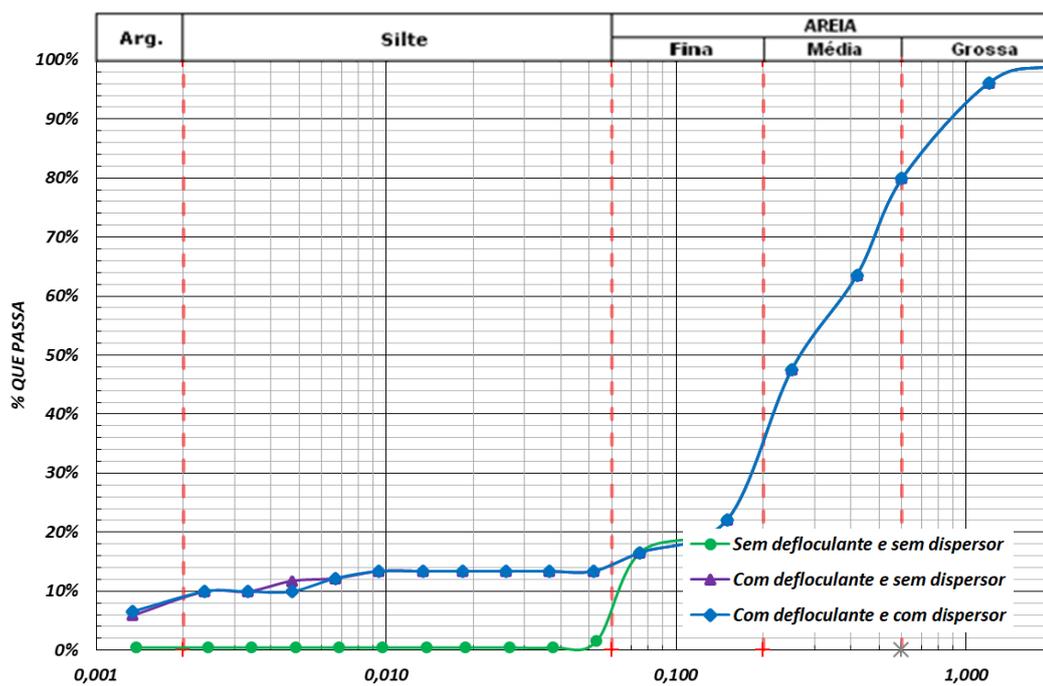


Figura A.31 - Curva granulométrica de P-09 (S-03) entre 0,00 m e 1,60 m.

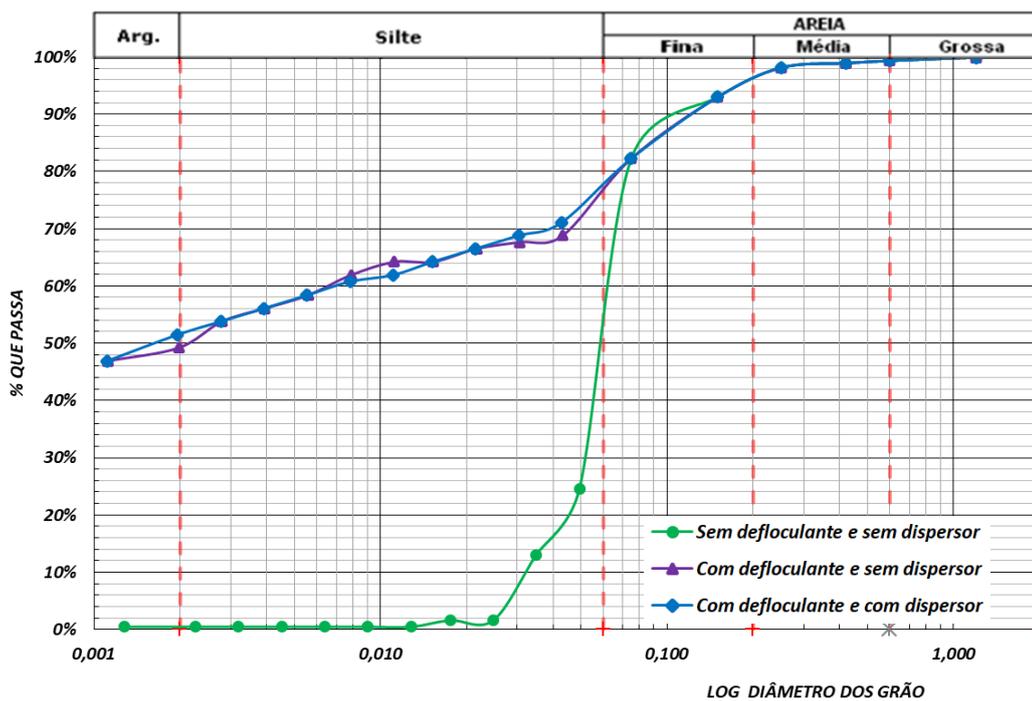


Figura A.32 - Curva granulométrica de P-09 (S-03) entre 1,60 m e 1,90 m.

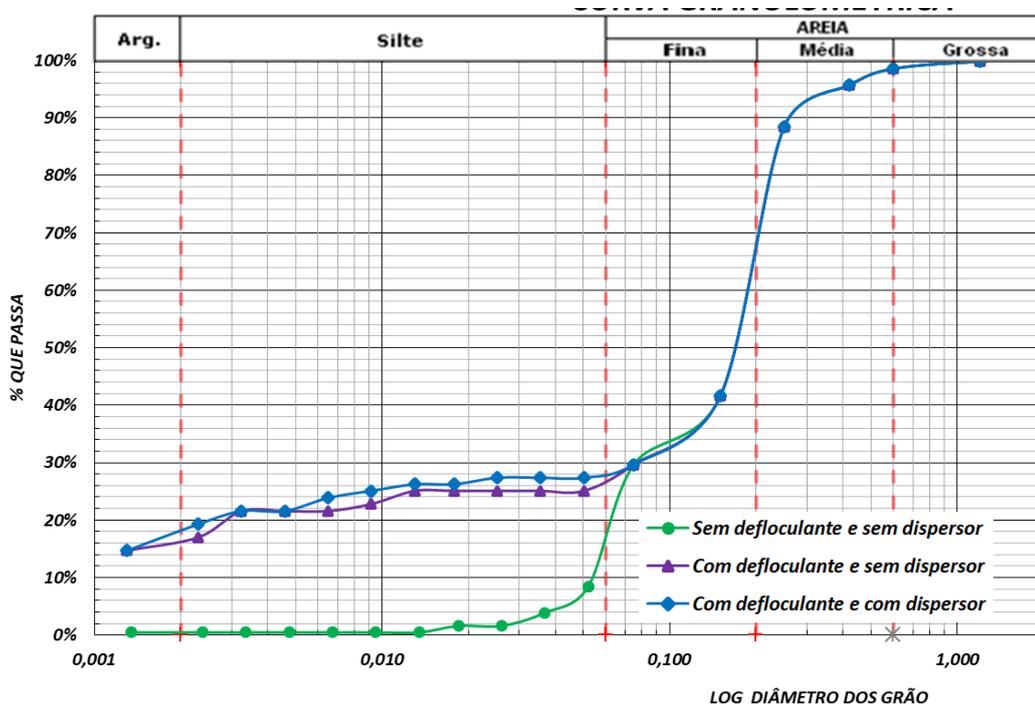


Figura A.33 - Curva granulométrica de P-09 (S-03) entre 1,90 m e 2,00 m.

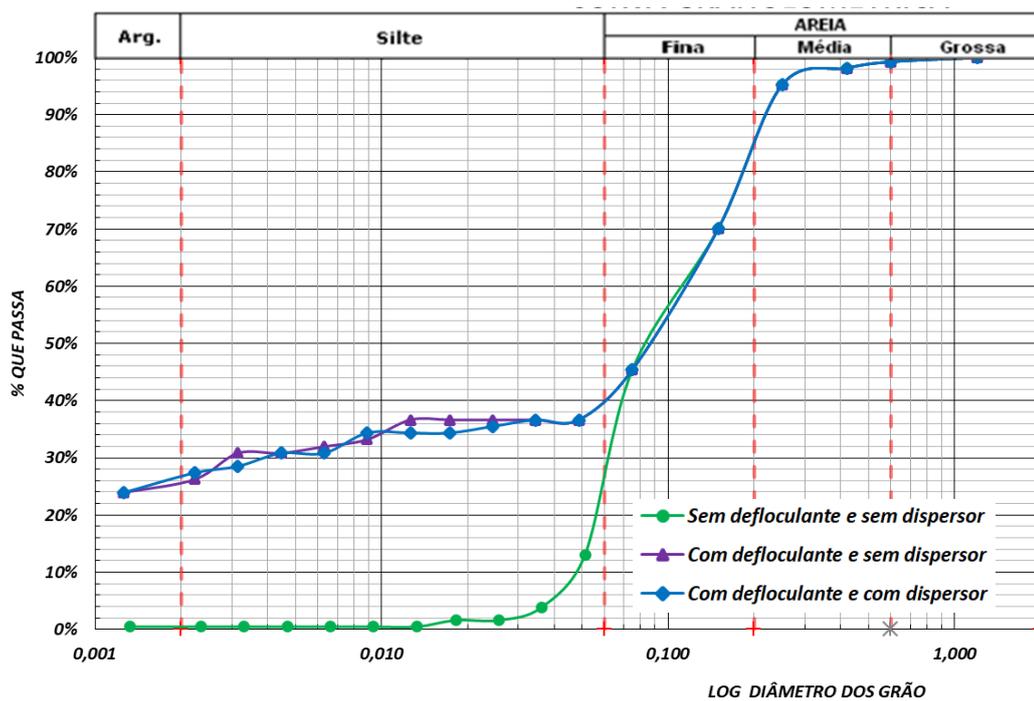


Figura A.34- Curva granulométrica de P-09 (S-03) entre 2,00 m e 2,90 m.

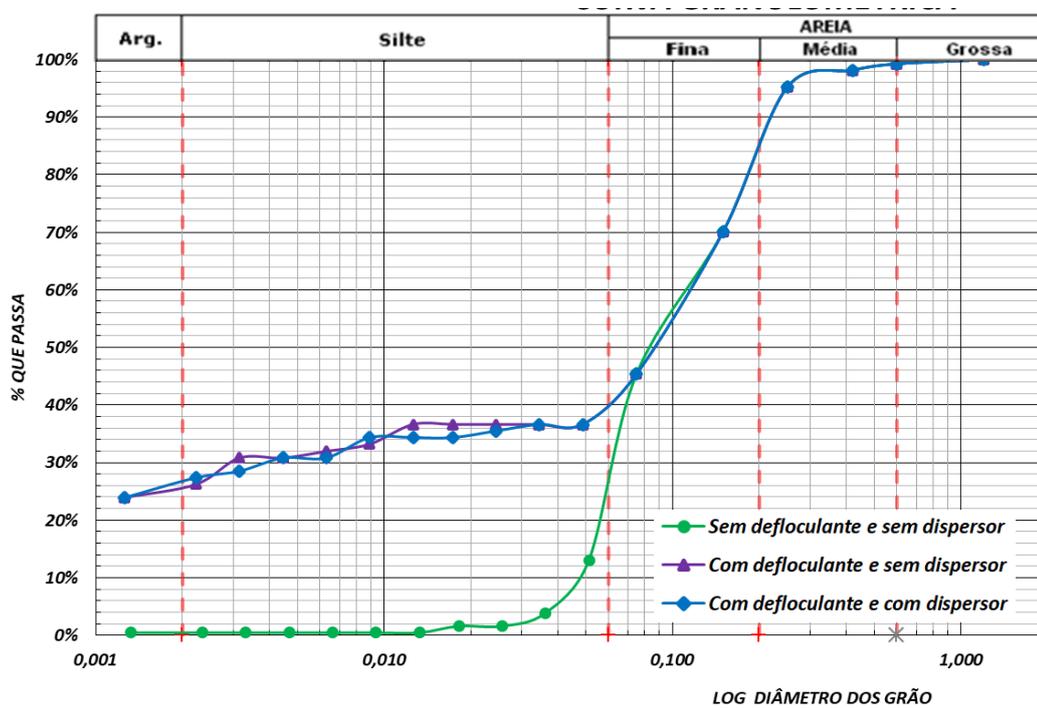


Figura A.35 - Curva granulométrica de P-09 (S-03) entre 2,90 m e 3,50 m.

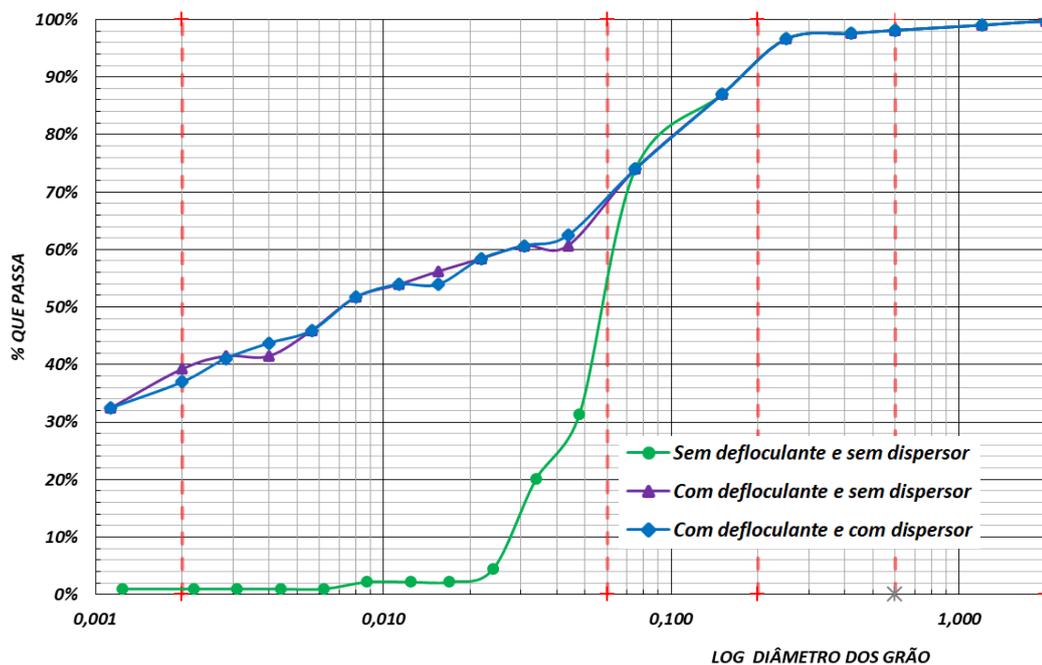
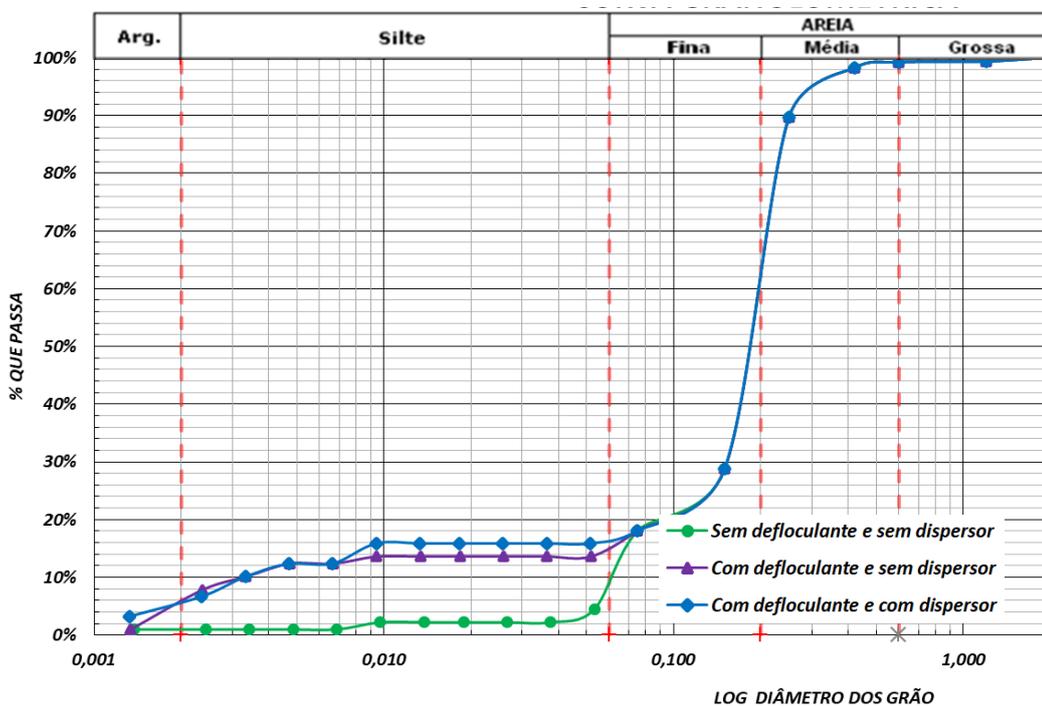


Figura A.36 - Curva granulométrica de P-09 (S-03) entre 3,50 m e 5,00 m.



## APÊNDICE B – COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Tabela B.1 – Composição granulométrica – P-01.

Furo	Prof. (m)	Método de sedimentação	Composição Granulométrica (%)						Consistência (%)		Class.  Unificada
			Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedreg.	WL	IP	
P-01	0,00 - 0,80	DD	14,72	0,44	39,98	41,73	3,06	0,07	NL	NP	-
		DS	15,41	0,63	39,58	41,46	2,86	0,06			
		SS	0,44	1,14	53,57	41,73	3,06	0,07			
	0,80 - 2,20	DD	24,09	0,52	32,51	31,83	10,41	0,63	28,24	10,94	SC
		DS	24,09	1,63	31,40	31,83	10,41	0,63			
		SS	0,44	5,91	50,77	31,83	10,41	0,63			
	2,20 - 3,30	DD	17,96	1,18	44,,08	36,23	0,54	0,02	NL	NP	SM
		DS	17,04	1,33	44,84	36,23	0,54	0,02			
		SS	0,44	1,14	61,63	36,23	0,54	0,02			
	3,30 - 5,0	DD	17,04	0,45	42,22	38,27	1,96	0,05	NL	NP	SM
		DS	17,96	0,84	40,92	38,27	1,96	0,05			
		SS	0,44	2,63	56,65	38,27	1,96	0,05			

D D – Com defloculante e dispersor; DS – Com defloculante e sem dispersor; SS – Sem defloculante e sem dispersor.

NL – Não líquido; NP – Não plástico

Tabela B.2 – Composição granulométrica – P-04.

Furo	Prof. (m)	Método de sedimentação	Composição Granulométrica (%)						Consistência (%)		Class.  Unificada
			Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedreg.	WL	IP	
P-04	0,00 - 3,00	DD	24,98	3,41	35,26	28,21	7,98	0,16	34,19	17,66	SC
		DS	24,98	1,09	37,58	28,21	7,98	0,16			
		SS	1,58	9,27	52,81	28,21	7,98	0,16			
	3,00 - 5,00	DD	56,89	5,39	21,55	13,11	3,03	0,05	39,23	22,95	SM
		DS	55,22	4,60	24,00	13,11	3,03	0,05			
		SS	4,66%	19,16	60,00	13,11	3,03	0,05			

DD – Com defloculante e dispersor; DS – Com defloculante e sem dispersor; SS – Sem defloculante e sem dispersor.

Tabela B.3 – Composição granulométrica – P-07.

Furo	Prof. (m)	Método de sedimentação	Composição Granulométrica (%)						Consistência (%)		Class.  Unificada
			Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedreg.	WL	IP	
P-07	0,00 - 1,00	DD	63,10	7,15	21,29	2,78	3,19	2,49	76,61	54,40	CH
		DS	63,10	7,15	21,29	2,78	3,19	2,49			
		SS	1,52	20,92	69,10	2,78	3,19	2,49			
	1,00 - 5,0	DD	71,70	7,21	11,26	3,57	3,26	3,00	91,60	63,39	CH
		DS	69,45	7,43	13,28	3,57	3,26	3,00			
		SS	1,51	27,27	61,38	3,57	3,26	3,00			

DD – Com defloculante e dispersor; DS – Com defloculante e sem dispersor; SS – Sem defloculante e sem dispersor.

Tabela B.4 – Composição granulométrica – Ponto P-02.

Furo	Prof. (m)	Método de sedimentação	Composição Granulométrica (%)						Consistência (%)		Class. Unificada
			Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedreg.	WL	IP	
P-02	0,00 - 0,20	DD	26,85	4,36	33,83	29,14	5,76	0,06	32,71	15,46	SC
		DS	24,55	3,37	37,11	29,14	5,76	0,06			
		SS	0,70	14,13	52,73	26,80	5,57	0,06			
	0,20 - 1,0	DD	24,10	1,48	49,09	23,04	2,22	0,06	26,29	11,76	SC
		DS	22,27	1,50	50,91	23,04	2,22	0,06			
		SS	0,64	9,52	64,52	23,04	2,22	0,06			
	1,00 - 1,30	DD	15,29	3,20	28,67	42,29	10,20	0,17	NL	NP	-
		DS	17,58	0,00	29,59	42,29	10,20	0,17			
		SS	0,44	5,71	41,01	42,29	10,20	0,17			
	1,30 - 2,00	DD	12,82	0,35	19,16	24,99	42,54	0,13	NL	NP	-
		DS	8,47	1,53	22,34	24,99	42,54	0,13			
		SS	0,54	5,63	26,16	24,99	42,54	0,13			
	2,00 - 2,60	DD	27,32	2,96	42,00	22,67	5,04		22,95	6,89	SC
		DS	22,27	4,59	45,42	22,67	5,04				
		SS	8,82	7,44	56,03	22,67	5,04				
	2,60 - 2,90	DD	22,62	2,11	49,08	25,81	0,37	0,01	NL	NP	-
		DS	19,87	2,29	51,65	25,81	0,37	0,01			
		SS	1,16	11,86	60,80	25,81	0,37	0,01			
2,90 - 5,0	DD	54,18	4,06	22,06	16,51	3,18	0,01	37,65	21,97	CL	
	DS	52,51	3,97	23,82	16,51	3,18	0,01				
	SS	15,65	19,56	45,09	16,51	3,18	0,01				

DD – Com defloculante e dispersor; DS – Com defloculante e sem dispersor; SS – Sem defloculante e sem dispersor.

Tabela B.5 – Composição granulométrica – P-05.

Furo	Prof. (m)	Método de sedimentação	Composição Granulométrica (%)						Consistência (%)		Class. Unificada
			Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedreg.	WL	IP	
P-05	0,00 - 0,20	DD	15,68	0,00	36,18	36,53	10,53	0,94	NL	NP	-
		DS	13,88	2,75	35,23	36,53	10,53	0,94			
		SS	0,43	1,90	49,44	37,82	9,32	0,94			
	0,20 - 0,80	DD	20,28	1,07	40,53	35,84	2,21	0,07	NL	NP	-
		DS	20,28	1,87	39,73	35,84	2,21	0,07			
		SS	0,44	6,07	56,46	34,94	2,02	0,07			
	0,80 - 1,30	DD	22,45	0,00	37,77	37,16	2,28	0,34	31,12	14,51	SM – SC
		DS	19,97	0,28	39,97	37,16	2,28	0,34			
		SS	0,43	4,62	55,17	37,16	2,28	0,34			
	1,30 - 1,70	DD	32,45	2,64	35,43	26,34	2,67	0,41	39,23	16,65	SC
		DS	30,39	1,75	38,38	26,34	2,67	0,41			
		SS	0,71	10,13	59,69	26,34	2,67	0,41			
	1,70 - 2,10	DD	36,67	1,37	41,25	18,88	1,60	0,24	43,35	24,14	SM – SC
		DS	35,57	2,09	41,62	18,88	1,60	0,24			
		SS	0,80	14,19	64,29	18,88	1,60	0,24			
	2,10 - 2,90	DD	30,17	2,15	31,74	25,20	7,88	2,33	40,47	21,75	SM – SC
		DS	28,78	2,78	32,50	25,20	7,88	2,33			
		SS	0,75	12,89	50,42	25,20	7,88	2,33			
	2,90 - 5,00	DD	56,08	2,13	19,79	16,45	4,94	0,61	63,25	42,74	CL
		DS	54,19	5,90	17,90	16,45	4,94	0,61			
		SS	0,78	13,62	63,26	16,27	5,46	0,61			

DD – Com defloculante e dispersor; DS – Com defloculante e sem dispersor; SS – Sem defloculante e sem dispersor.

NL – Não líquido; NP – Não plástico

Tabela B.6 – Composição granulométrica – P-08.

Furo	Prof. (m)	Método de sedimentação	Composição Granulométrica (%)						Consistência (%)		Class.  Unificada
			Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedreg.	WL	IP	
P-08	0,00 - 0,4	DD	46,13	6,99	34,22	9,48	2,45	0,73	24,38	24,38	CL
		DS	47,32	7,09	32,92	9,48	2,45	0,73			
		SS	0,87	23,15	63,31	9,48	2,45	0,73			
	0,40 - 5,0	DD	57,29	7,27	31,74	2,51	0,81	0,39	59,10	37,37	CH
		DS	54,85	7,23	34,21	2,51	0,81	0,39			
		SS	0,90	23,86	71,53	2,51	0,81	0,39			

DD – Com defloculante e dispersor; DS – Com defloculante e sem dispersor; SS – Sem defloculante e sem dispersor.

Tabela B.7 – Composição granulométrica – Ponto P-03.

Furo	Prof. (m)	Método de sedimentação	Composição Granulométrica (%)						Consistência (%)		Class.  Unificada
			Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedreg.	WL	IP	
P 03	0,00 - 1,0	DD	25,10	1,06	41,54	30,32	1,98	0,00	NL	NP	-
		DS	25,10	1,15	41,46	30,32	1,98	0,00			
		SS	0,44	4,15	63,11	30,32	1,98	0,00			
	1,00 - 3,0	DD	18,17	0,00	45,99	32,35	3,42	0,06	NL	NP	-
		DS	18,17	1,14	44,85	32,35	3,42	0,06			
		SS	0,44	3,42	60,30	32,35	3,42	0,06			
	3,00 - 5,0	DD	17,71	0,18	45,06	35,66	1,37	0,01	NL	NP	-
		DS	17,94	0,70	44,32	35,66	1,37	0,01			
		SS	0,44	3,42	59,09	35,66	1,37	0,01			

DD – Com defloculante e dispersor; DS – Com defloculante e sem dispersor; SS – Sem defloculante e sem dispersor.

NL – Não líquido; NP – Não plástico

Tabela B.8 – Composição granulométrica – P-06.

Furo	Prof. (m)	Método de sedimentação	Composição Granulométrica (%)						Consistência (%)		Class.  Unificada
			Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedreg.	WL	IP	
P-06	0,00 -0,40	DD	28,85	2,22	37,02	22,77	6,03	3,11	NL	NP	-
		DS	28,85	1,11	38,14	22,77	6,03	3,11			
		SS	2,58	11,57	53,94	22,77	6,03	3,11			
	0,40 -2,30	DD	10,08	0,42	31,69	47,35	9,95	0,51	NL	NP	-
		DS	11,21	0,00	30,97	47,35	9,95	0,51			
		SS	0,44	1,13	40,62	47,35	9,95	0,51			
	2,30 -5,00	DD	13,38	0,00	21,43	45,07	19,04	1,07	NL	NP	-
		DS	13,38	0,00	21,43	47,35	19,04	1,07			
		SS	0,43	1,12	33,26	47,35	19,04	1,07			

DD – Com defloculante e dispersor; DS – Com defloculante e sem dispersor; SS – Sem defloculante e sem dispersor.

NL – Não líquido; NP – Não plástico

Tabela B.9 – Composição granulométrica – P-09.

Furo	Prof. (m)	Método de sedimentação	Composição Granulométrica (%)						Consistência (%)		Class. Unificada
			Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedreg.	WL	IP	
P 09	0,00 - 1,60	DD	65,96	7,33	22,24	3,77	0,70		79,96	45,25	CH
		DS	65,90	5,03	24,60	3,77	0,70				
		SS	1,59	24,14	69,80	3,77	0,70				
	1,60 - 1,90	DD	26,57	0,80	37,64	33,54	1,38	0,07	39,71	22,86	CL
		DS	25,08	1,07	38,85	33,54	1,38	0,07			
		SS	1,58	8,54	54,88	33,54	1,38	0,07			
	1,90 - 2,00	DD	34,78	3,13	44,78	16,56	0,75		43,04	24,91	SC
		DS	36,64	1,27	44,78	16,56	0,75				
		SS	1,59	14,30	66,80	16,56	0,75				
	2,00 - 2,90	DD	39,62	5,72	38,65	14,77	1,15	0,10	41,47	21,95	SC
		DS	41,93	4,22	37,83	14,77	1,15	0,10			
		SS	1,57	21,59	60,82	14,77	1,15	0,10			
	2,90 - 3,50	DD	57,11	7,79	26,89	6,33	1,56	0,32	40,28	16,23	SC
		DS	57,77	6,95	27,07	6,33	1,56	0,32			
		SS	3,13	31,00	57,65	6,33	1,56	0,32			
3,50 - 5,00	DD	15,87	0,92	42,47	39,98	0,71	0,05	NL	NP	-	
	DS	13,59	0,88	42,47	39,98	0,71	0,05				
	SS	2,19	2,28	54,78	39,98	0,71	0,05				

DD – Com defloculante e dispersor; DS – Com defloculante e sem dispersor; SS – Sem defloculante e sem dispersor.

NL – Não líquido; NP – Não plástico

Tabela B.10 – Relação Silte/argila nos furos coletados

Sondagem	Profundidade	Argila	Silte	Silte/Argila
P-01	0,00 - 0,80	14,72	0,44	0,03
	0,80 - 2,20	24,09	0,52	0,02
	2,20 - 3,30	17,96	1,18	0,06
	3,30 - 5,0	17,04	0,45	0,03
P-04	0,00 - 3,00	24,98	3,41	0,14
	3,00 - 5,0	56,89	5,39	0,09
P-07	0,00 - 1,00	63,10	7,15	0,11
	1,00 - 5,0	71,70	7,21	0,10
P-02	0,00 - 0,20	26,85	4,36	0,16
	0,20 - 1,00	24,10	1,48	0,06
	1,00 - 1,30	15,29	3,20	0,21
	1,30 - 2,00	12,82	0,35	0,03
	2,00 - 2,60	27,32	2,96	0,11
	2,60 - 2,90	22,62	2,11	0,09
	2,90 - 5,00	54,18	4,06	0,07
P-05	0,00 - 0,20	15,68	0,00	0,00
	0,20 - 0,80	20,28	1,07	0,05
	0,80 - 1,30	22,45	0,00	0,00
	1,30 - 1,70	32,45	2,64	0,08
	1,70 - 2,10	36,67	1,37	0,04
	2,10 - 2,90	30,17	2,15	0,07
	2,90 - 5,00	56,08	2,13	0,04
P-08	0,00 - 0,40	46,13	6,99	0,15
	0,40 - 5,0	57,29	7,27	0,13
P-03	0,00 - 1,00	14,72	0,44	0,03
	1,00 - 3,00	24,09	0,52	0,02
	3,00 - 5,00	17,96	1,18	0,07
P-06	0,00 - 0,40	28,85	2,22	0,08
	0,40 - 2,30	10,08	0,42	0,04
	2,30 - 5,00	13,38	0,00	0,00
P-09	0,00 - 1,60	65,96	7,33	0,11
	1,60 - 1,90	26,57	0,80	0,03
	1,90 - 2,00	34,78	3,13	0,09
	2,00 - 2,90	39,62	5,72	0,14
	2,90 - 3,50	57,11	7,79	0,14
	3,50 - 5,00	15,87	0,92	0,06

Fonte: O autor (2021)

**APÊNDICE C - CARTAS DE ATIVIDADE/PLASTICIDADE DO SOLO**

Figura C.1 – Carta de atividade de Van Der Merwe modificada e Plasticidade de Casa Grande para a Seção vertical 1 (P-01 / P-04 / P-07).

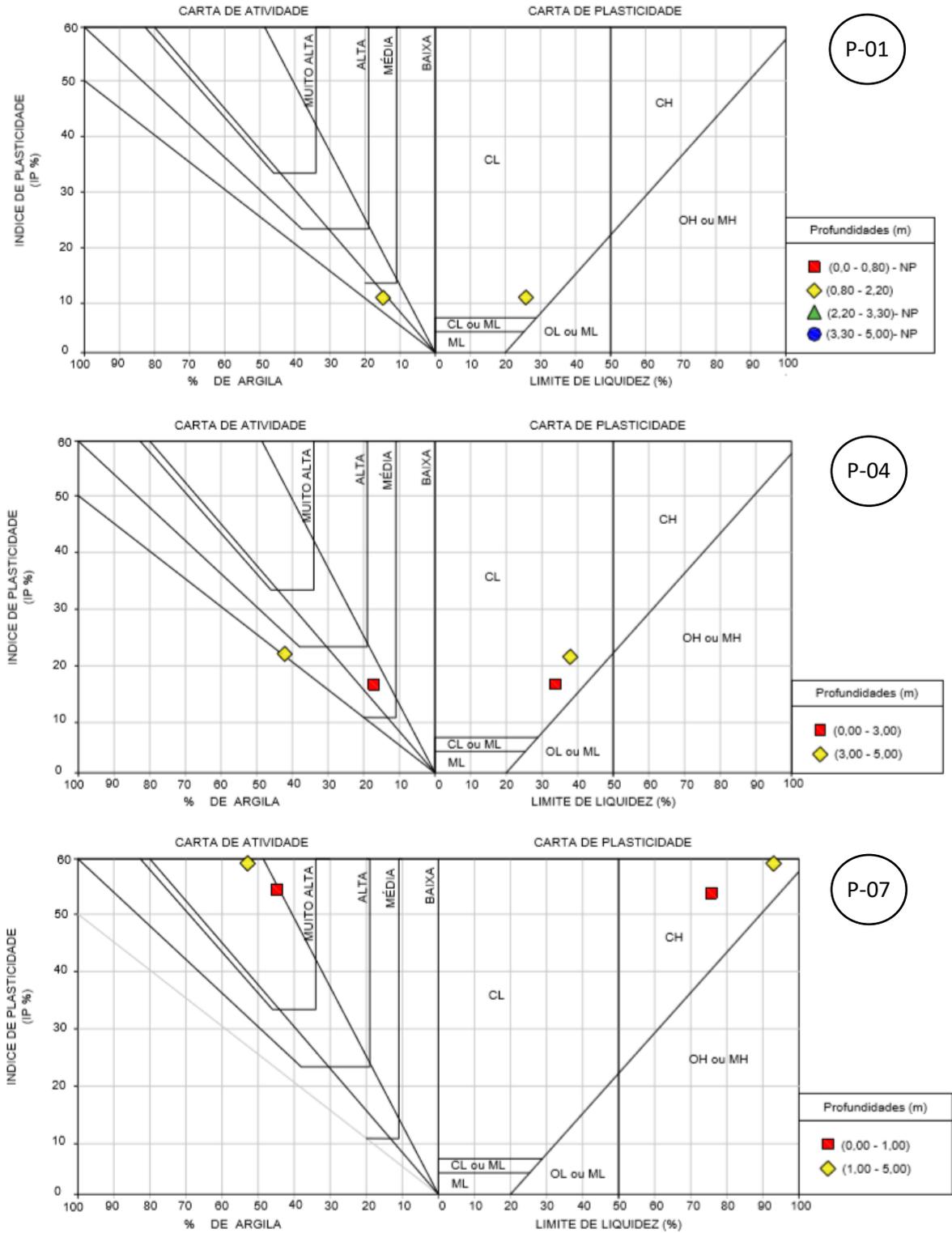


Figura C.2 – Carta de atividade de Van Der Merwe modificada e Plasticidade de Casa Grande para a Seção vertical 2 (P-02 / P-05 / P-08).

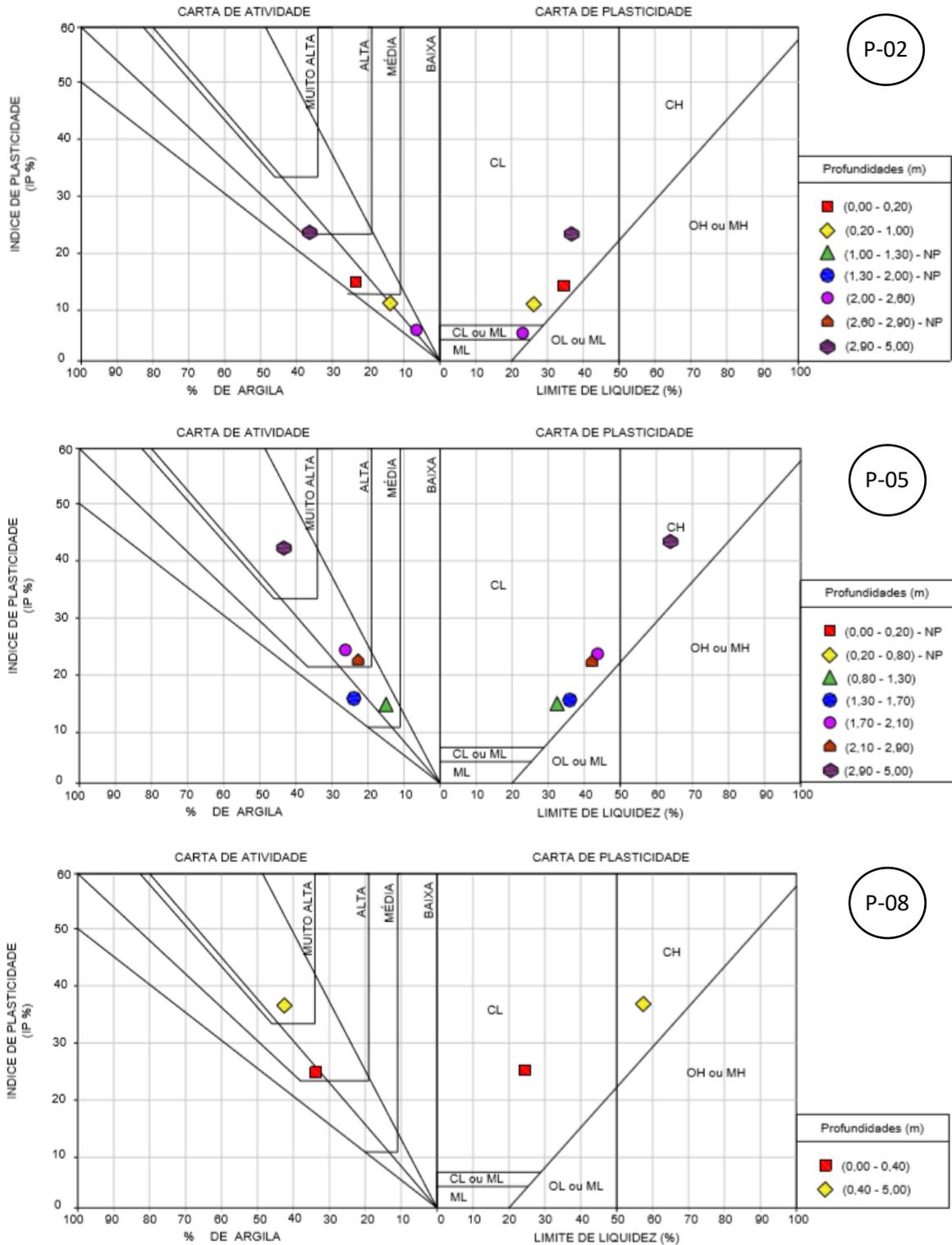
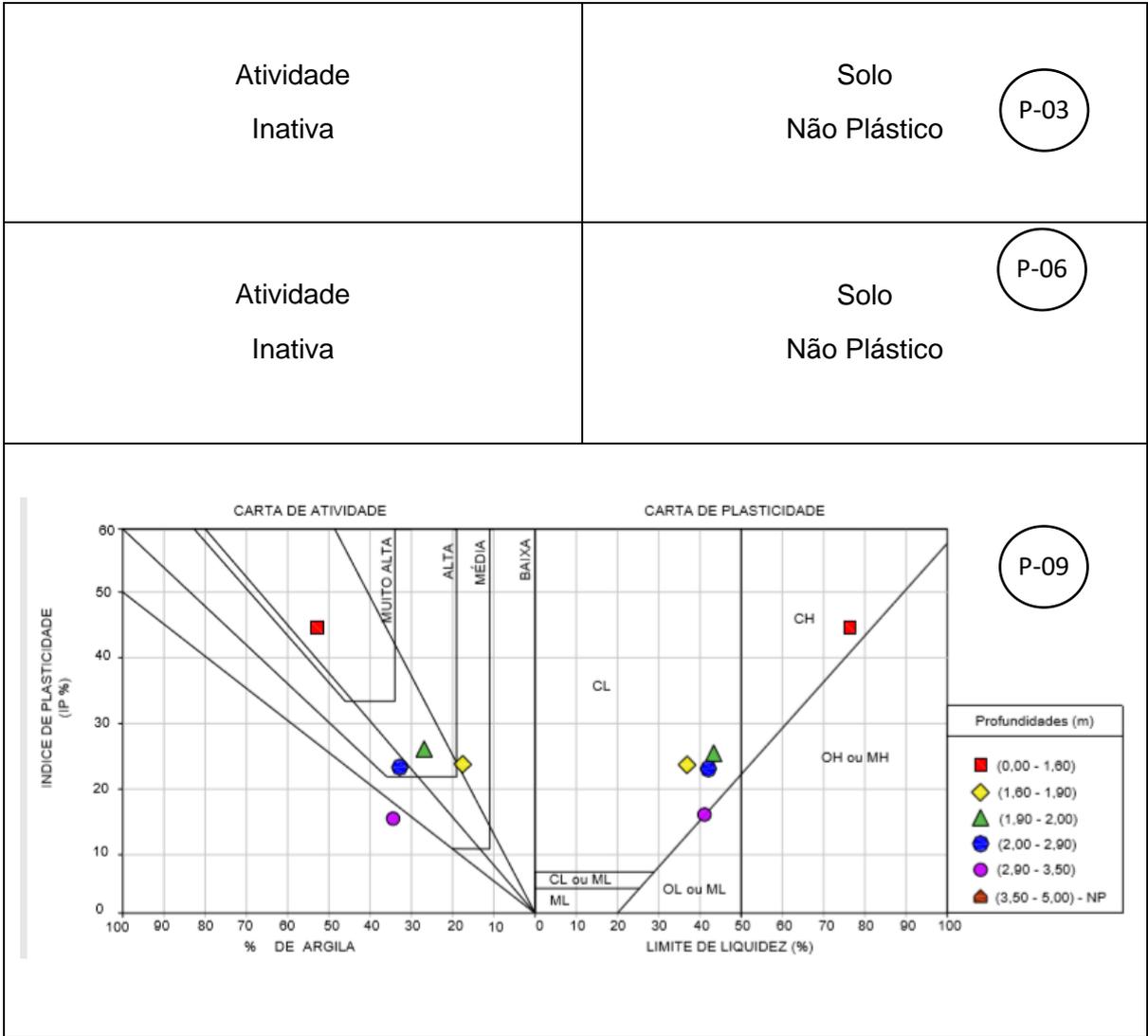
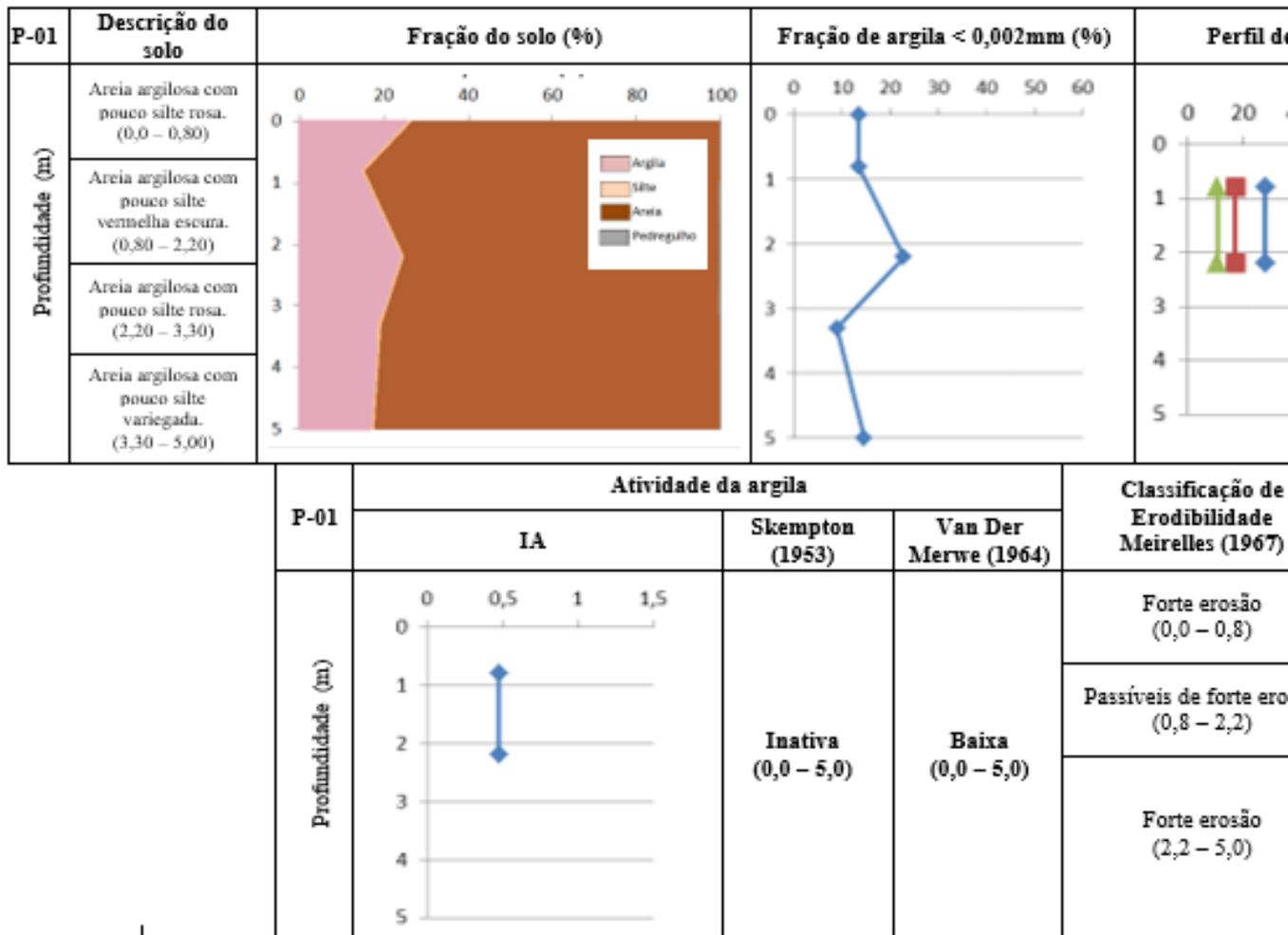


Figura C.3 – Carta de atividade de Van Der Merwe modificada e Plasticidade de Casa Grande para a Seção vertical 3 (P-03 / P-06 / P-09).



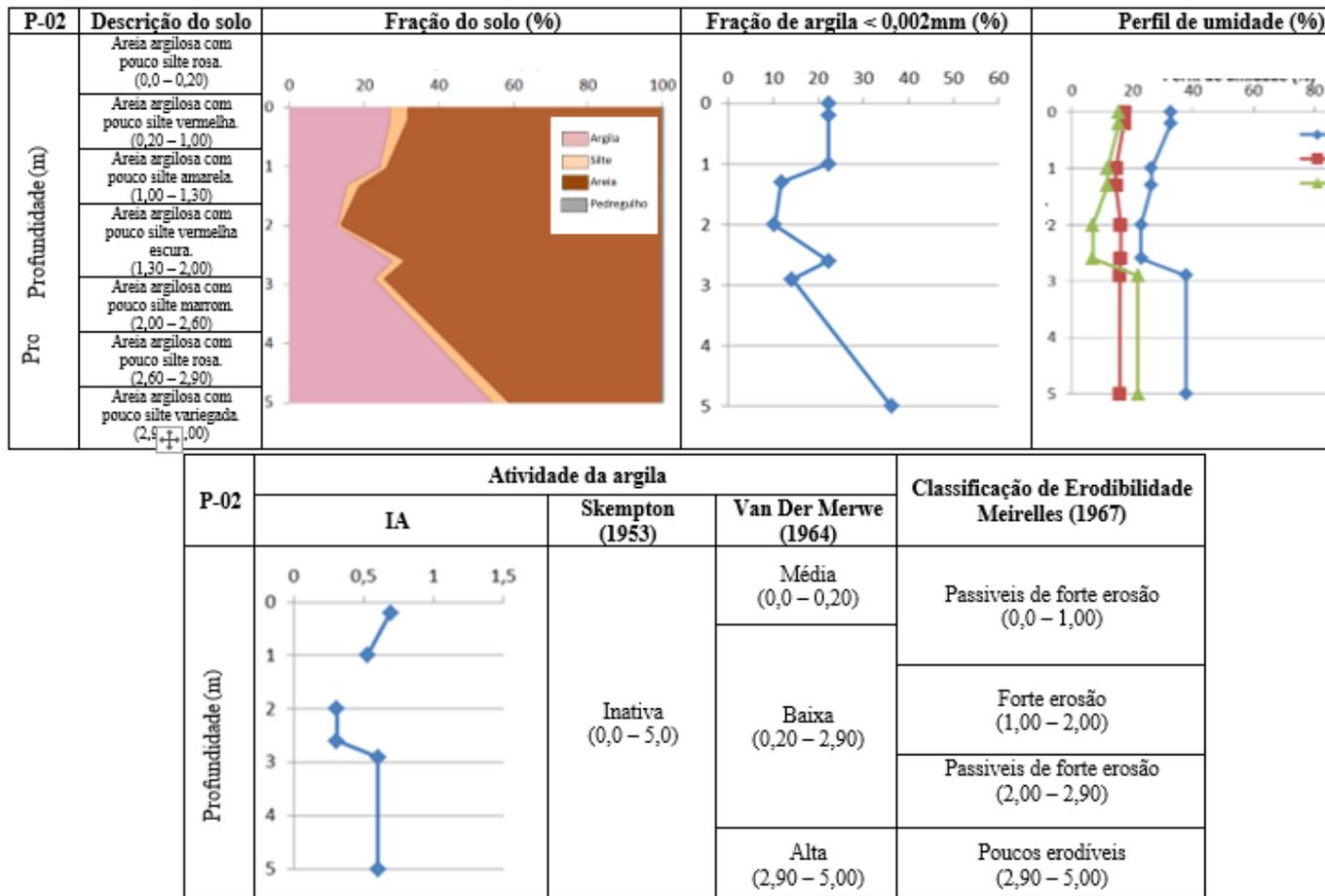
### APÊNDICE D – SUSCETIBILIDADE À EROÇÃO

Figura D.1 – Caracterização física do solo e suscetibilidade à erosão em P-01.



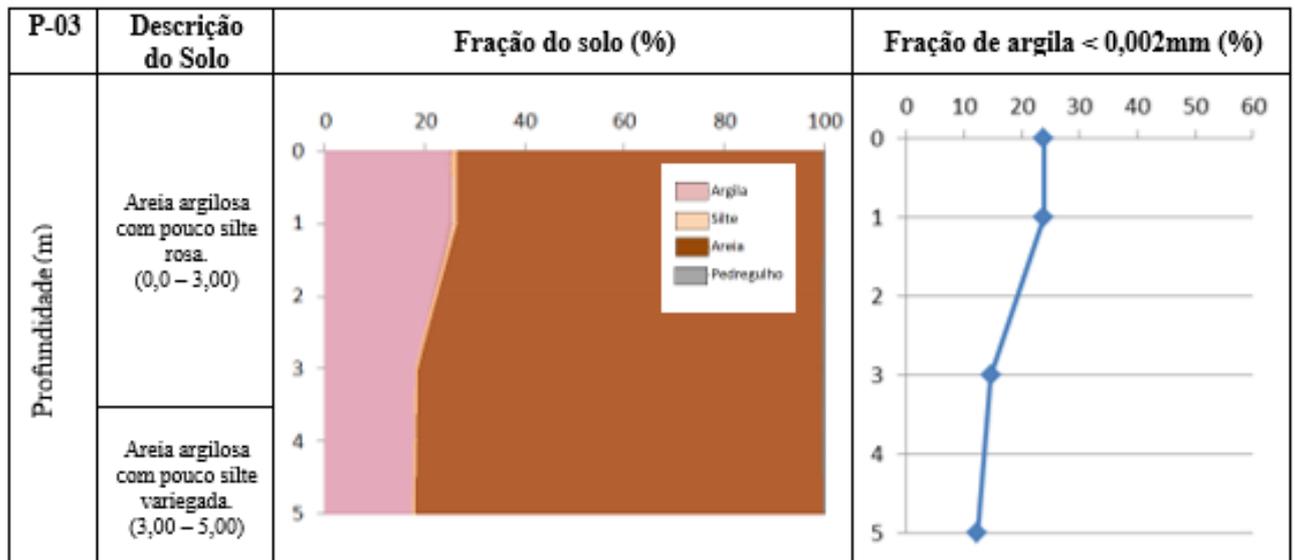
Fonte: O autor (2022).

Figura D.2 – Caracterização física do solo e suscetibilidade a erosão em P-02.



Fonte: O autor (2022).

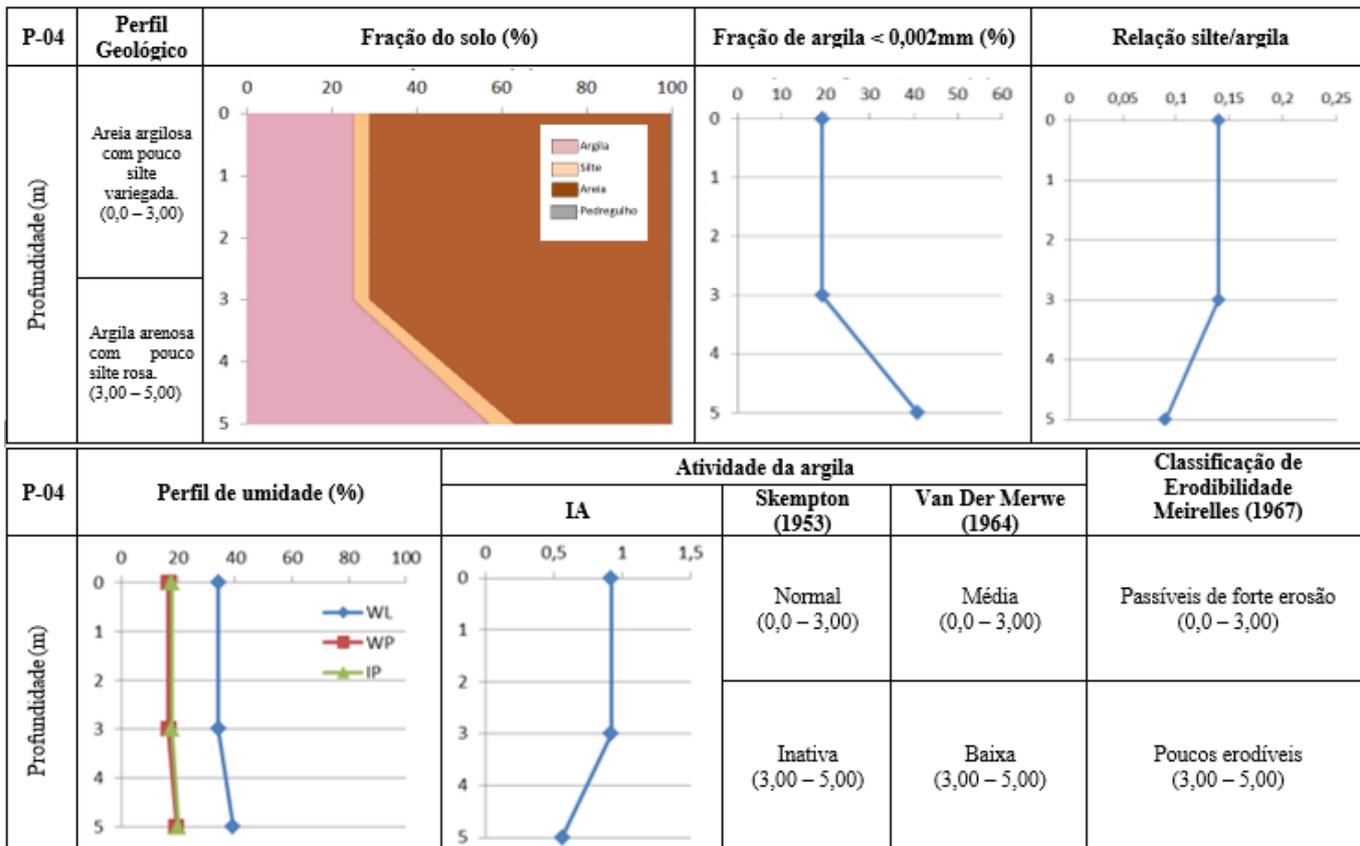
Figura D.3 – Caracterização física do solo e suscetibilidade a erosão em P-03.



P-03	Perfil de umidade (%)	Atividade da argila		Classificação de Erodibilidade Meirelles (1967)
		Skempton (1953)	Van Der Merwe (1964)	
Prof. (m)	Camadas não plásticas	Inativa	Baixa	Passíveis de forte erosão (0,0 – 3,00)
				Forte erosão (3,00 – 5,00)

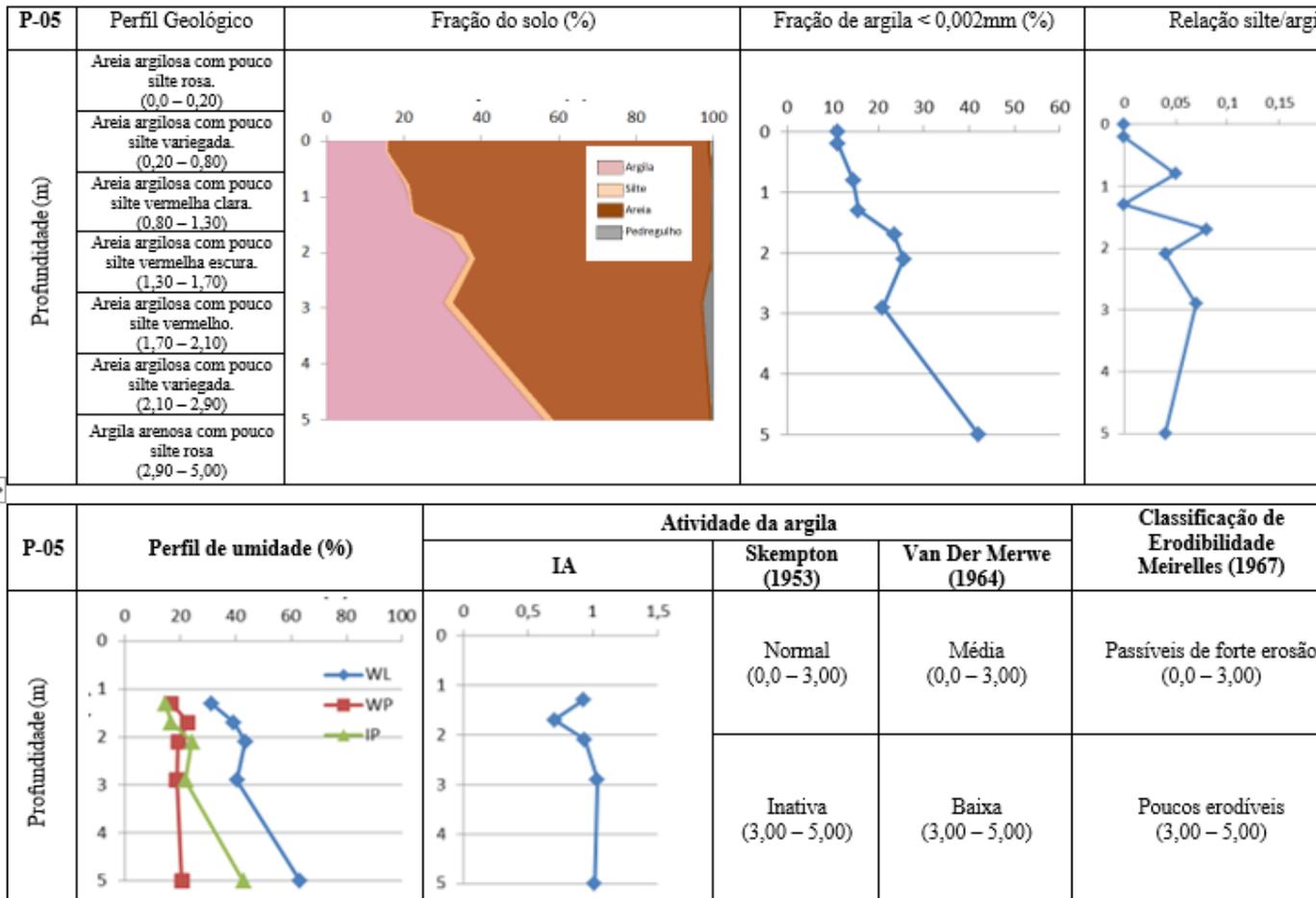
Fonte: O autor (2022).

Figura D.4 – Caracterização física do solo e suscetibilidade a erosão em P-04.



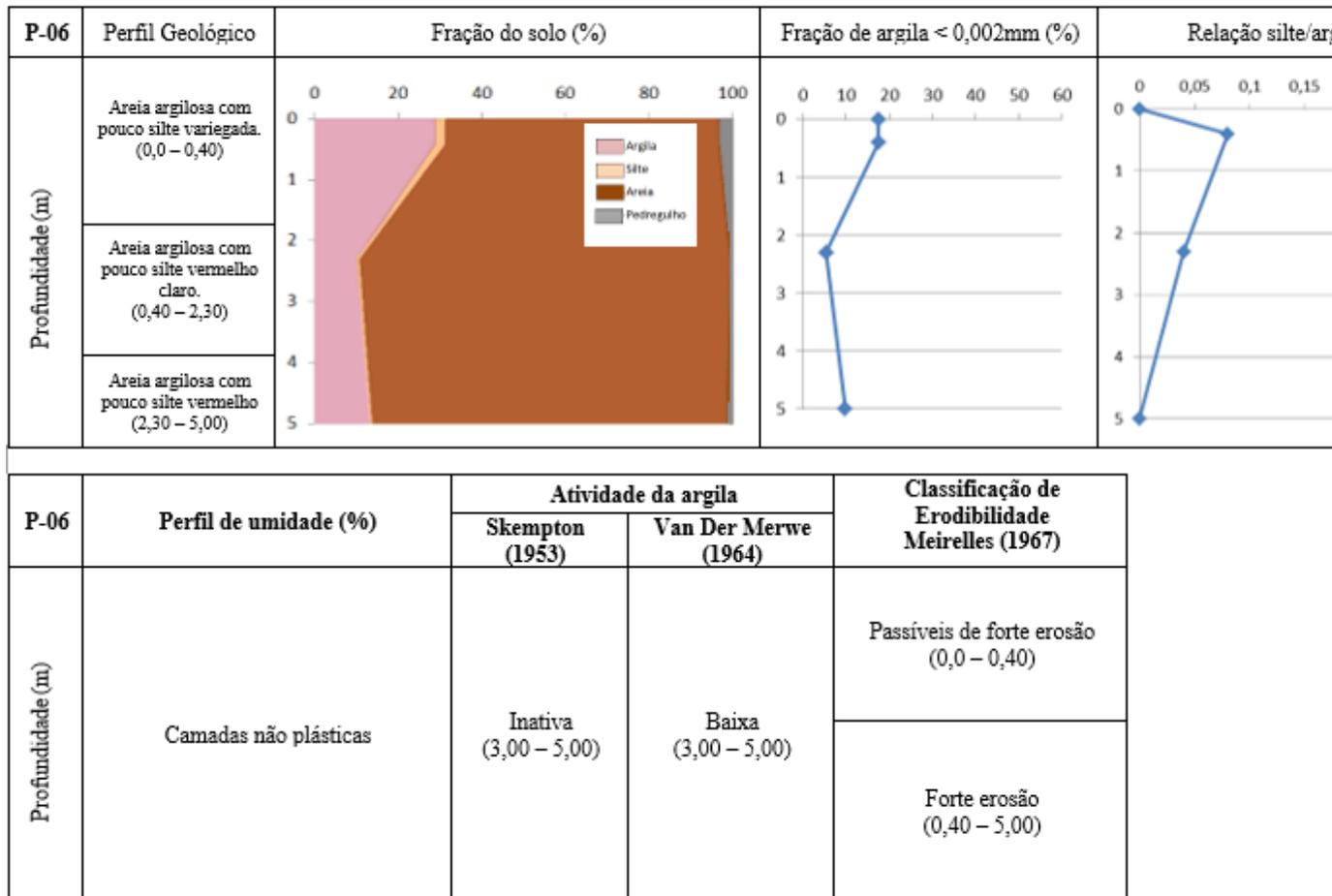
Fonte: O autor (2022).

Figura D.5 – Caracterização física do solo e suscetibilidade à erosão em P-05.



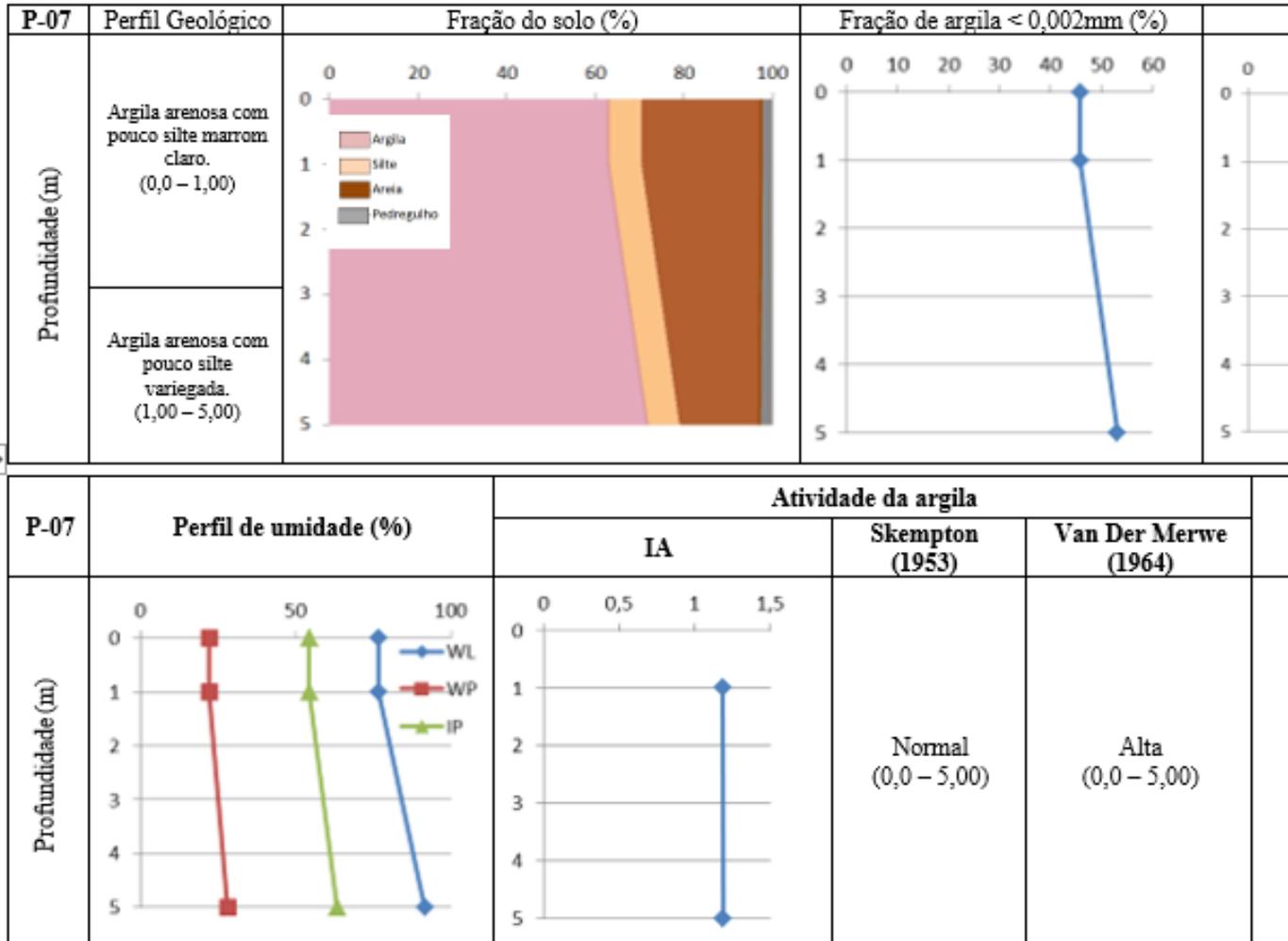
Fonte; O autor (2022).

Figura D.6 – Caracterização física do solo e suscetibilidade a erosão em P-06.



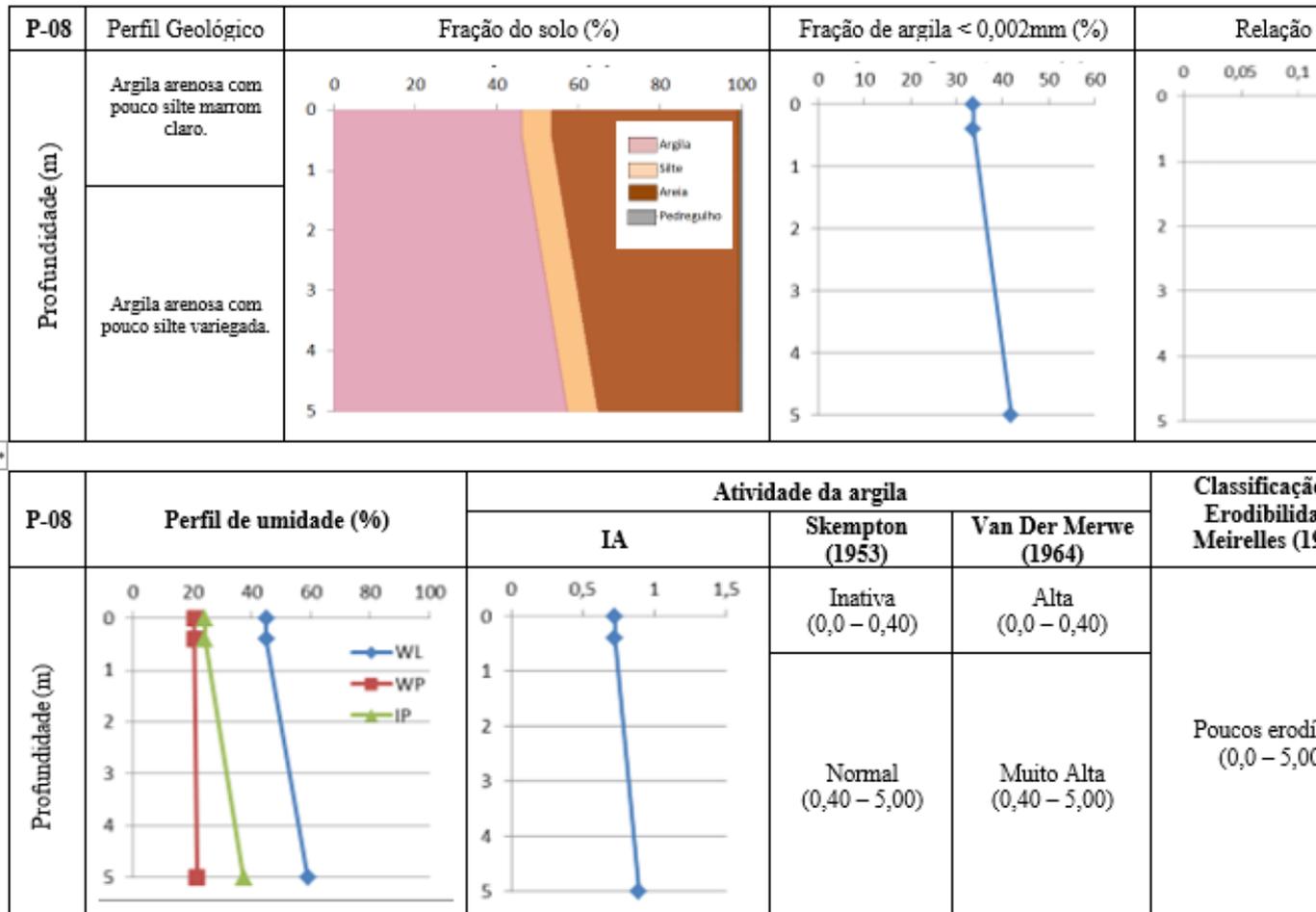
Fonte: O autor (2022)

Figura D.7 – Caracterização física do solo e suscetibilidade a erosão em P-07.



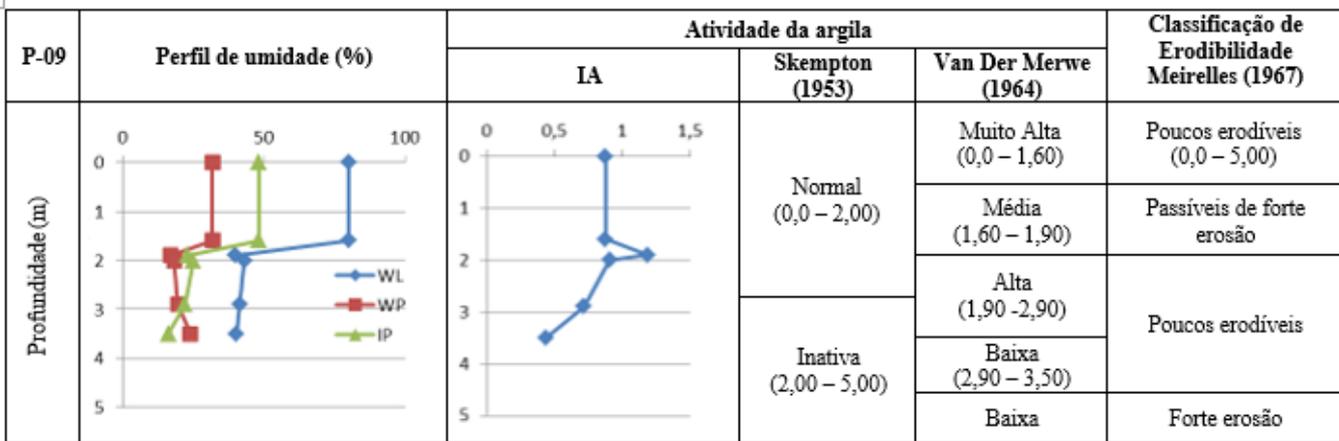
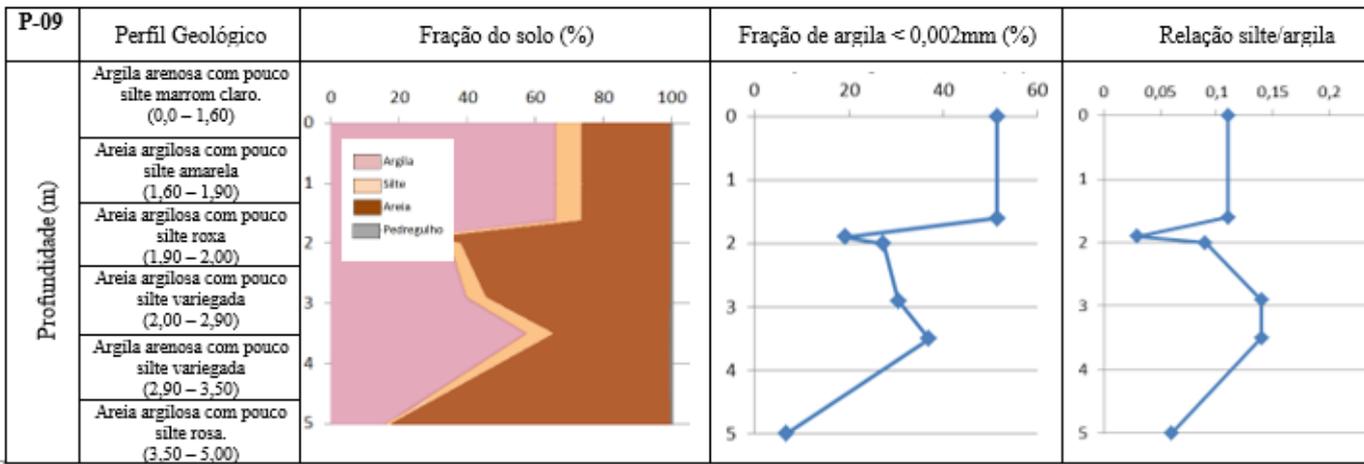
Fonte: Autor (2021).

Figura D.8 – Caracterização física do solo e suscetibilidade a erosão em P-08.



Fonte: O autor (2021).

Figura D.9 – Caracterização física do solo e suscetibilidade a erosão em P-09.



## APÊNDICE E - CURVAS DE CISALHAMENTO

Figura E.1 – Curvas de cisalhamento para P-01.

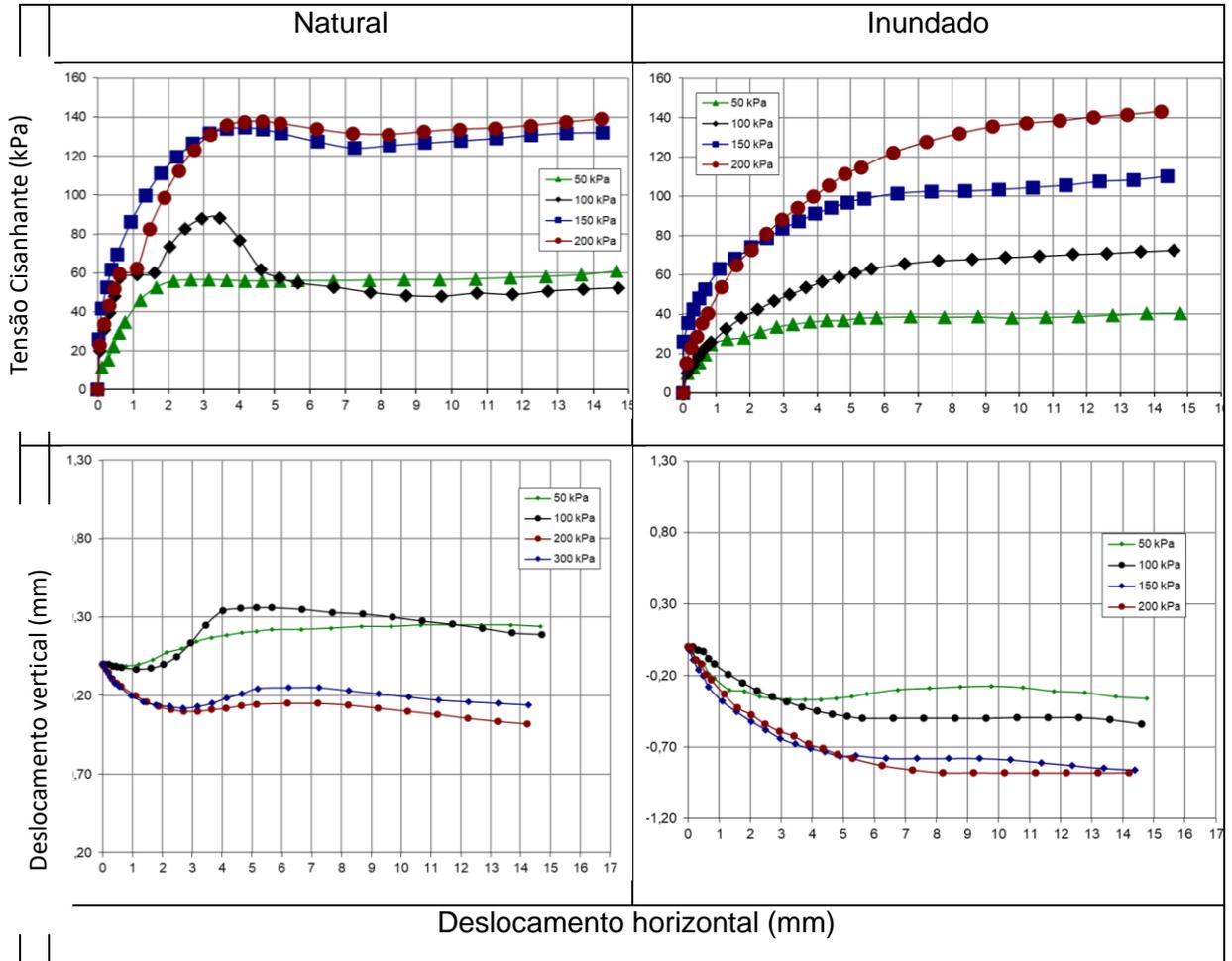


Figura E.2 – Curvas de cisalhamento para P-02.

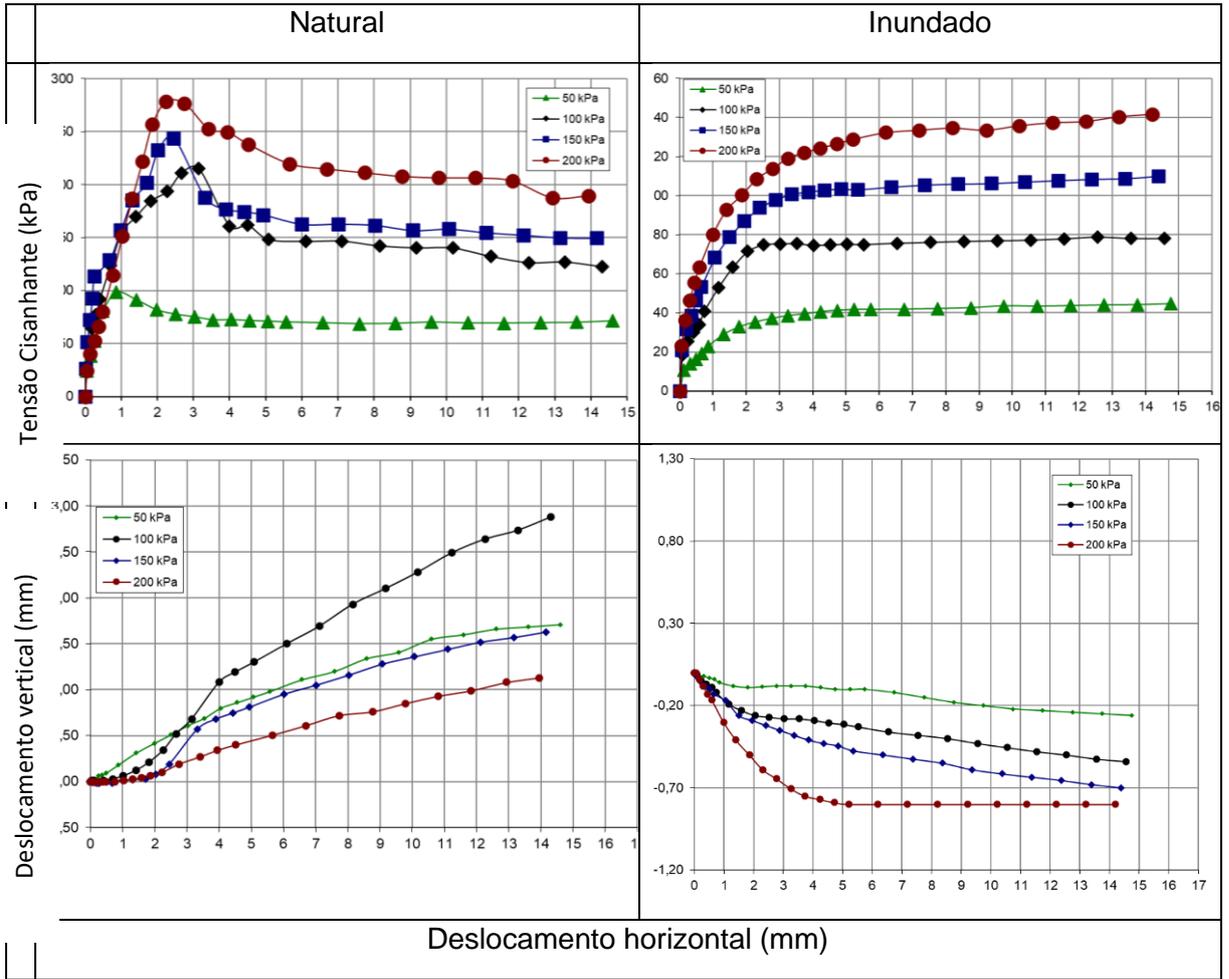


Figura E.3 – Curvas de cisalhamento para P-03.

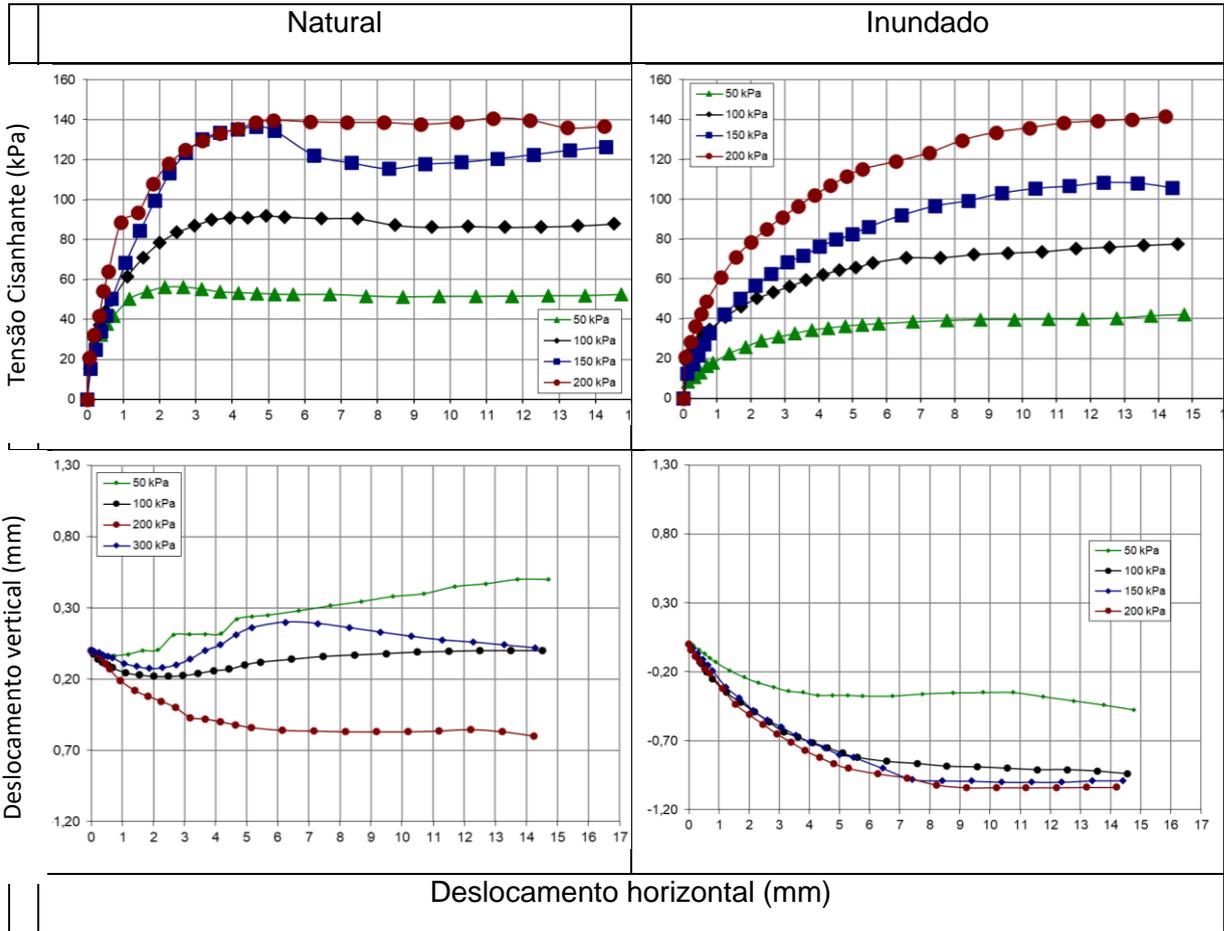


Figura E.4 – Curvas de cisalhamento para P-04.

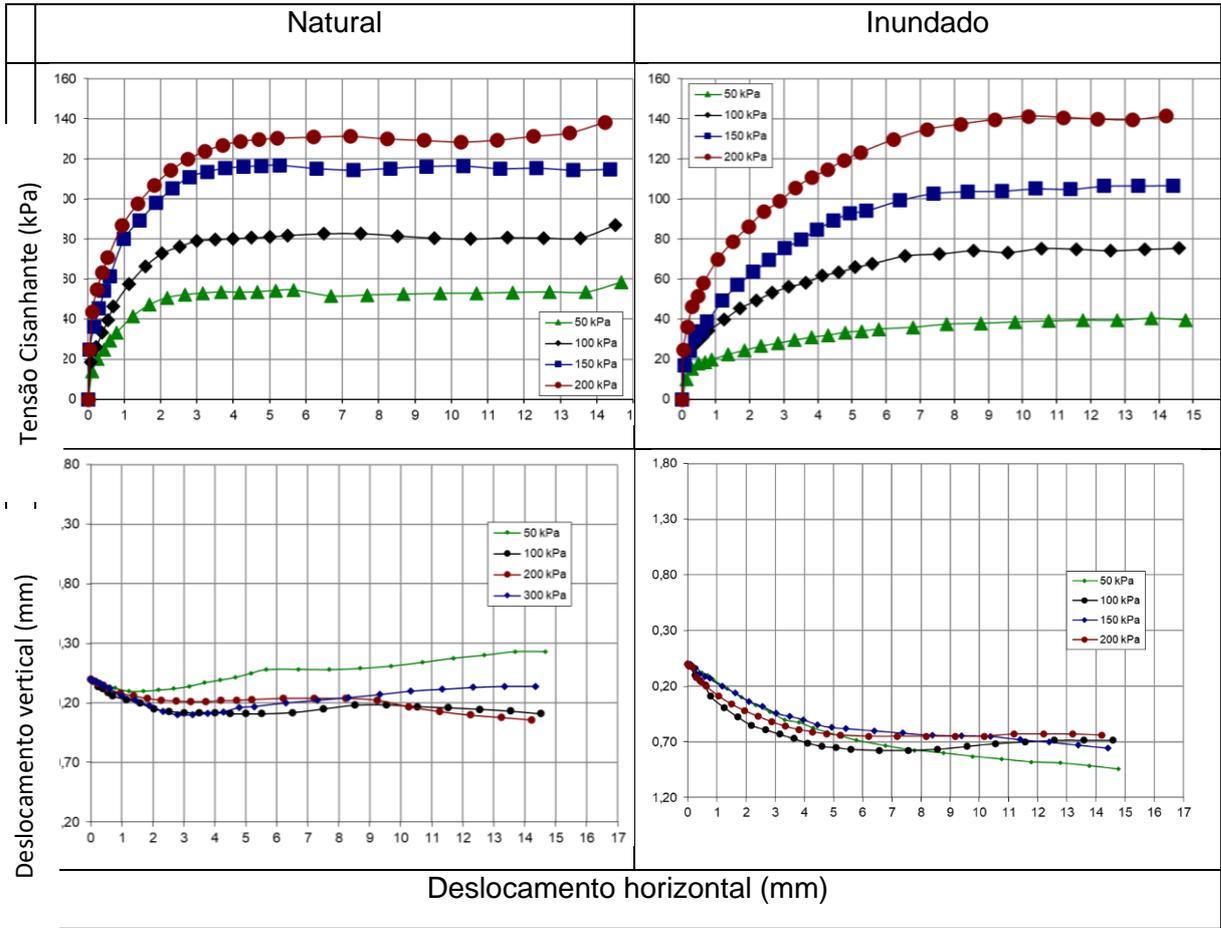


Figura E.5 – Curvas de cisalhamento para P-05.

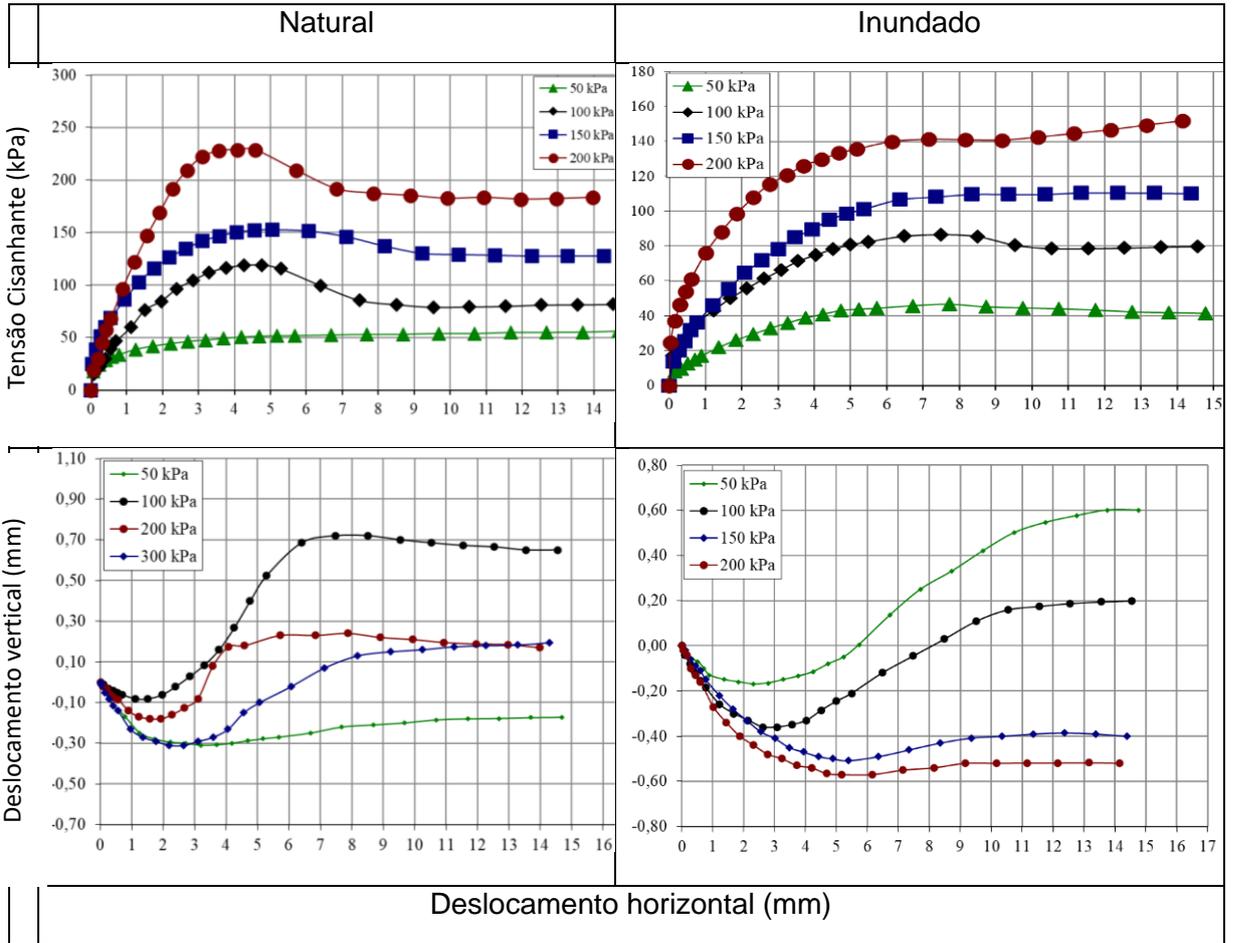


Figura E.6 – Curvas de cisalhamento para P-06.

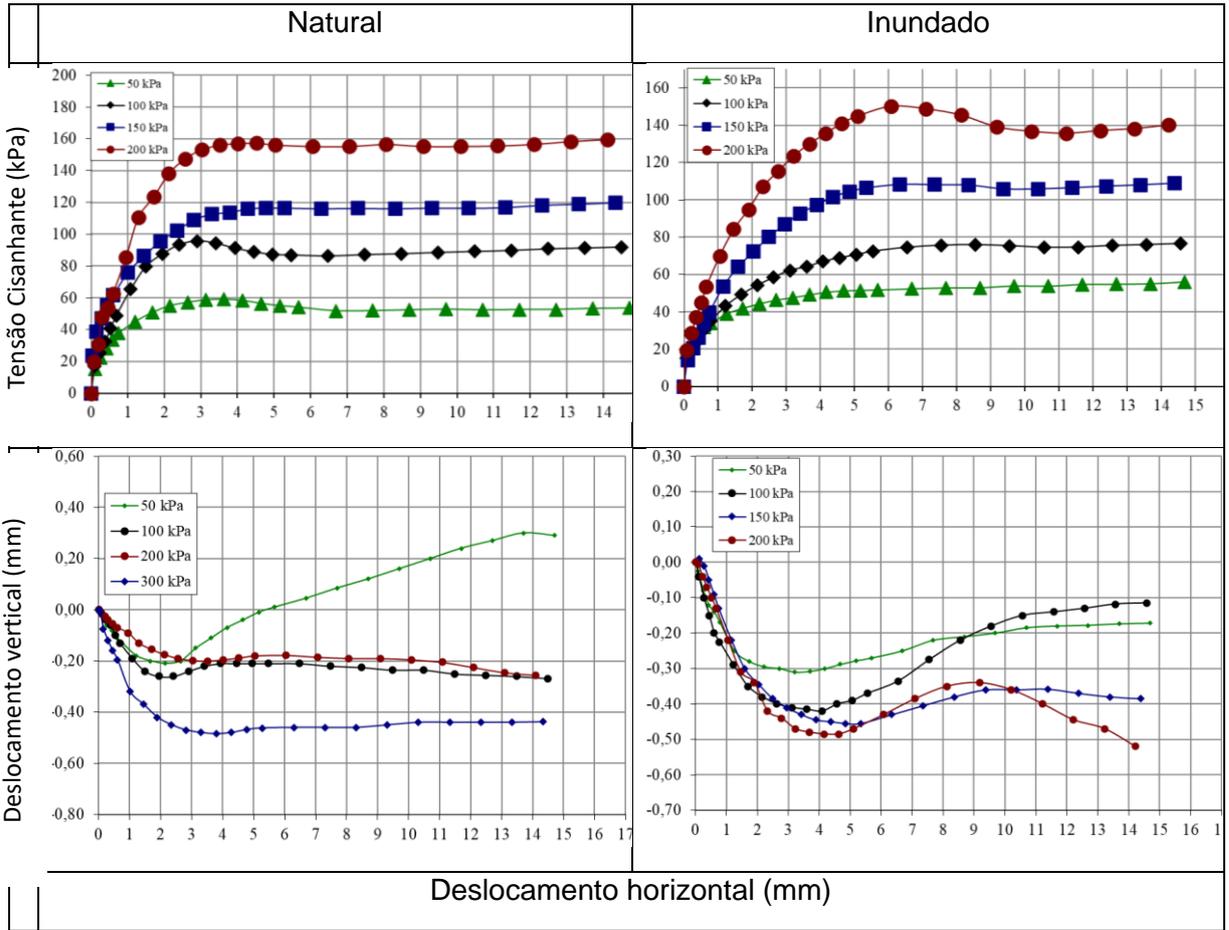


Figura E.7 – Curvas e envoltória de cisalhamento para P-07

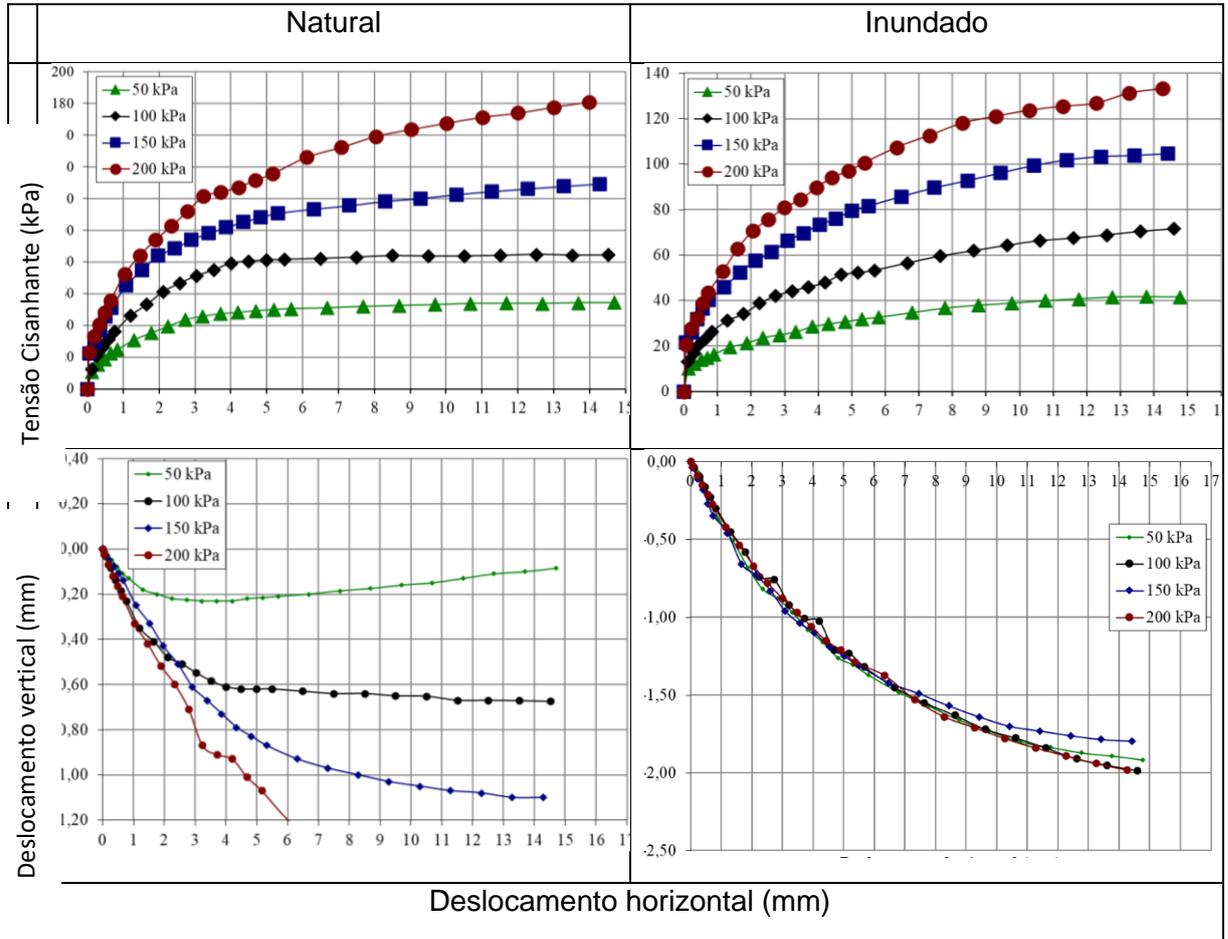


Figura E.8 – Curvas de cisalhamento para P-08

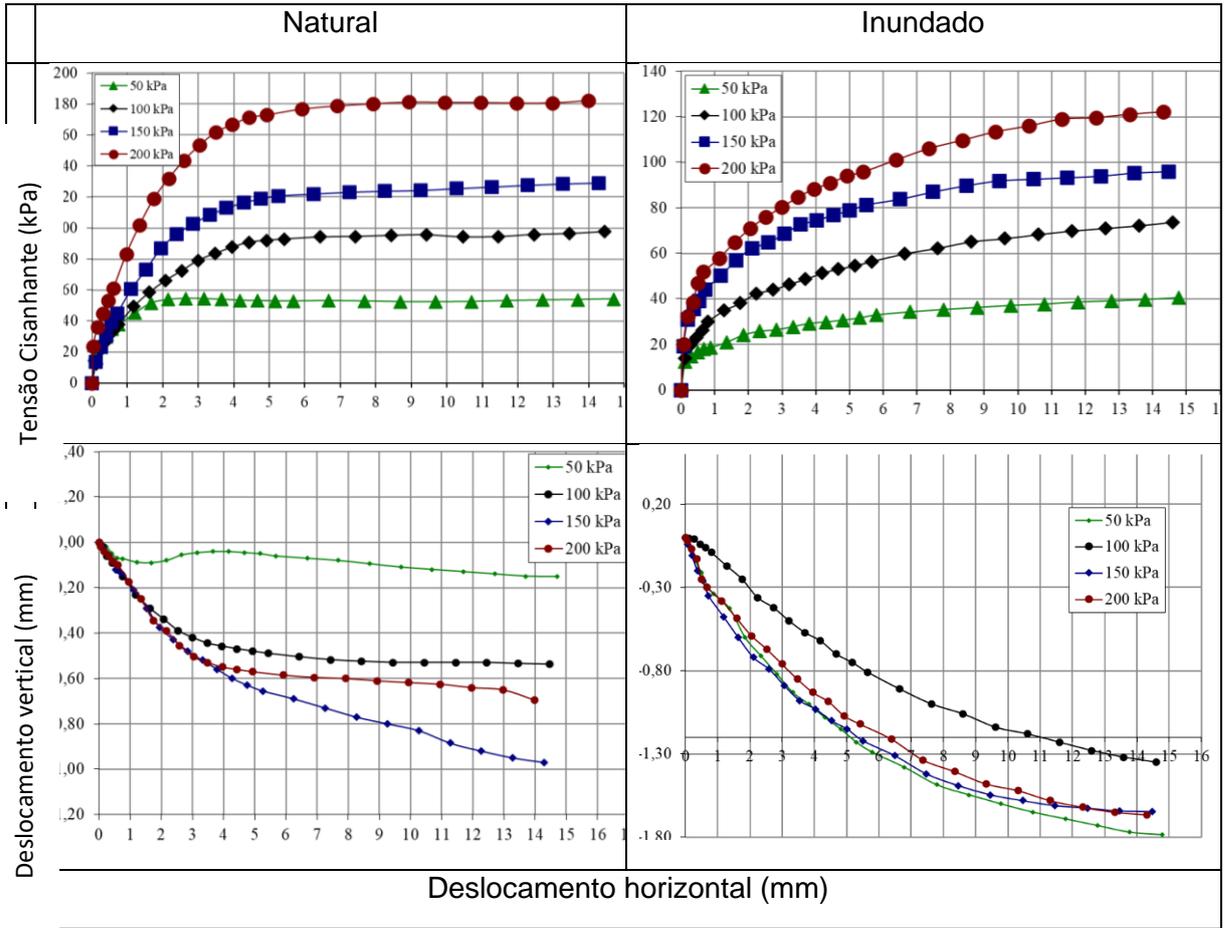
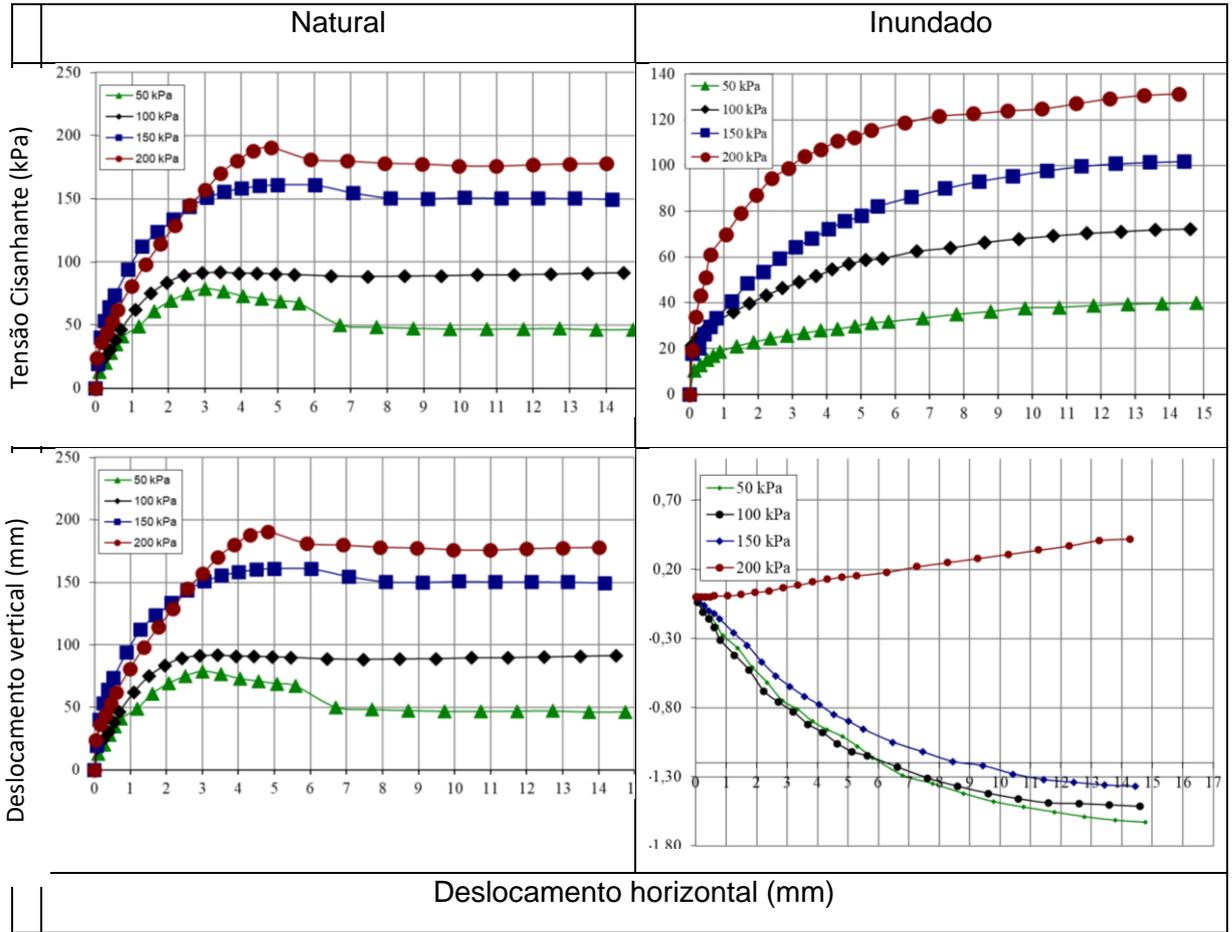


Figura E.9 – Curvas de cisalhamento para P-09.



## APÊNDICE F- MAPEAMENTO DOS SULCOS

Figura F.1 – Detalhes do sulco A-1

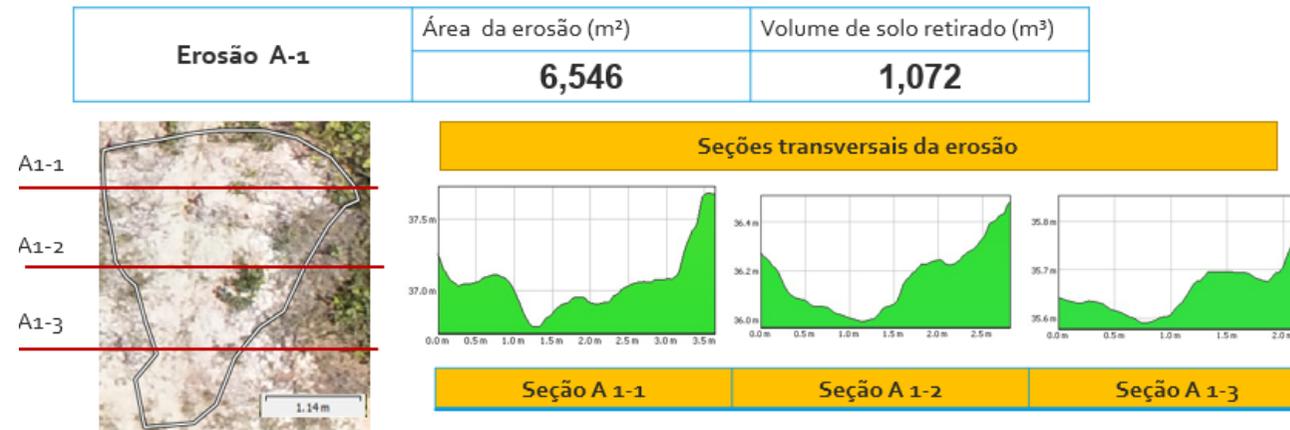


Figura F.2 – Detalhes do sulco A-2



Figura F.3 – Detalhes do sulco A-3



Figura F.4 – Detalhes do sulco A-4

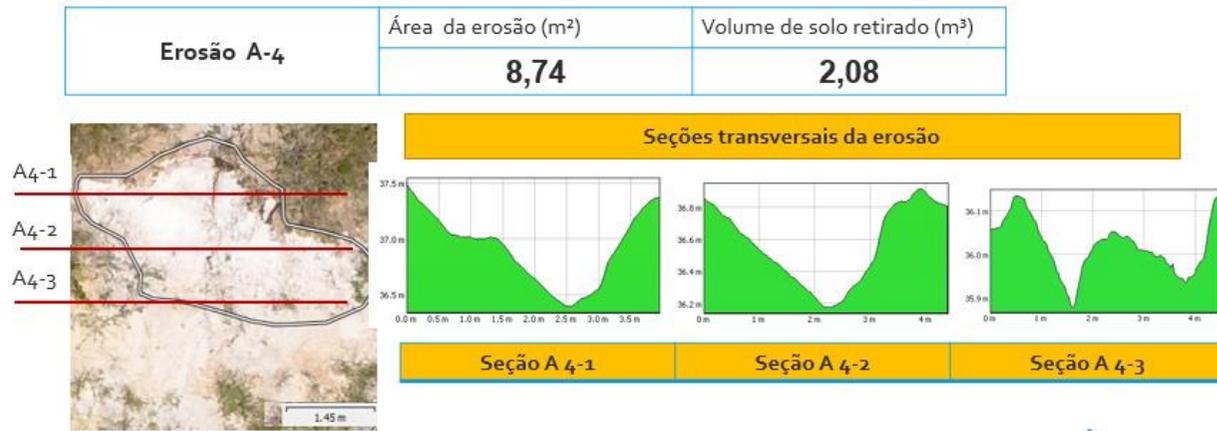


Figura F.5 – Detalhes do sulco A-5



Figura F.6 – Detalhes do sulco B-1

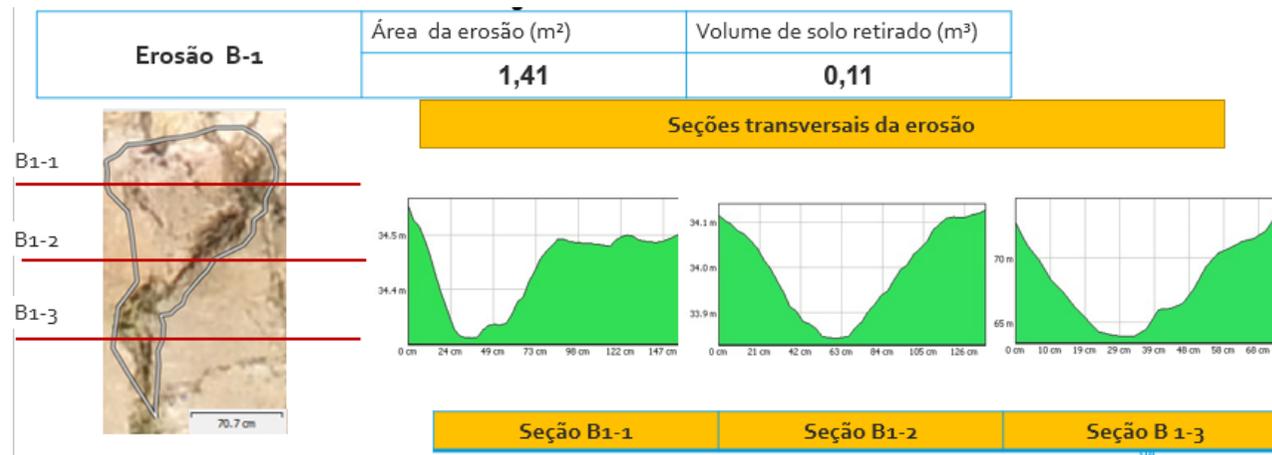


Figura F.7 – Detalhes do sulco B-2

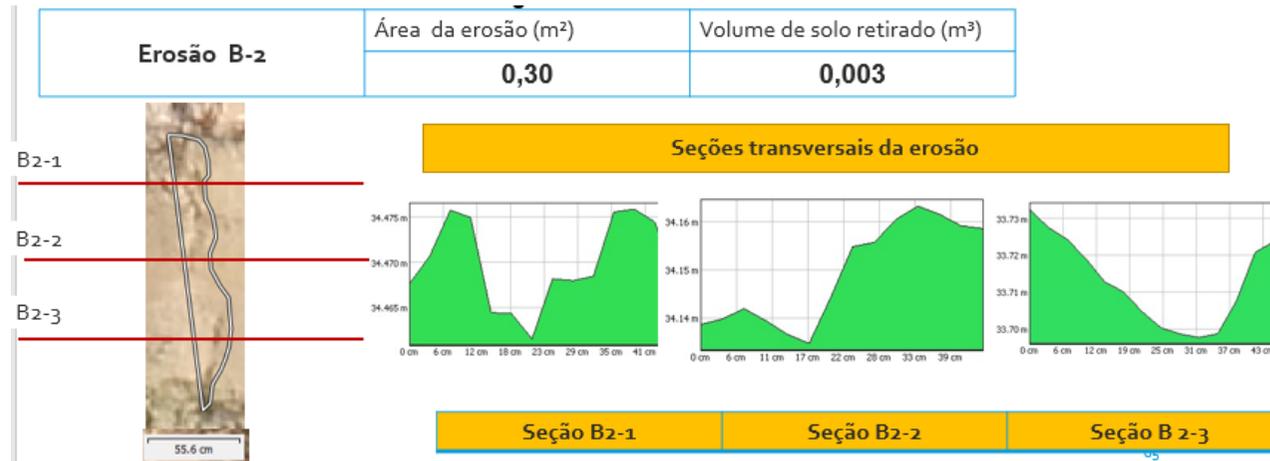


Figura F.8 – Detalhes do sulco B-3



Figura F.9 – Detalhes do sulco B- 4

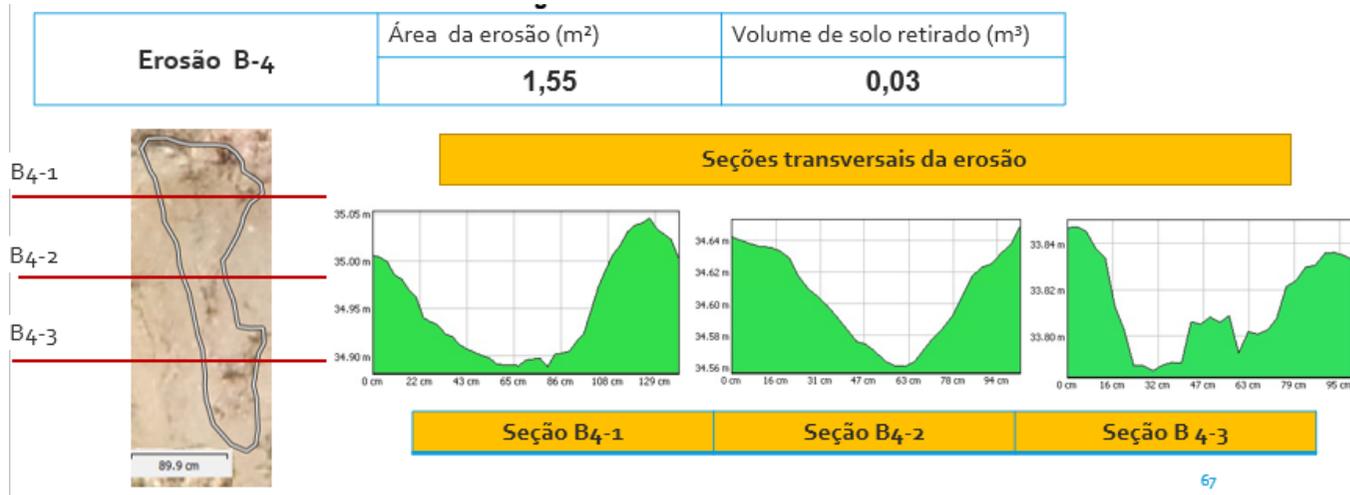


Figura F.10 – Detalhes do sulco B- 5



Figura F.11 – Detalhes do sulco B- 6

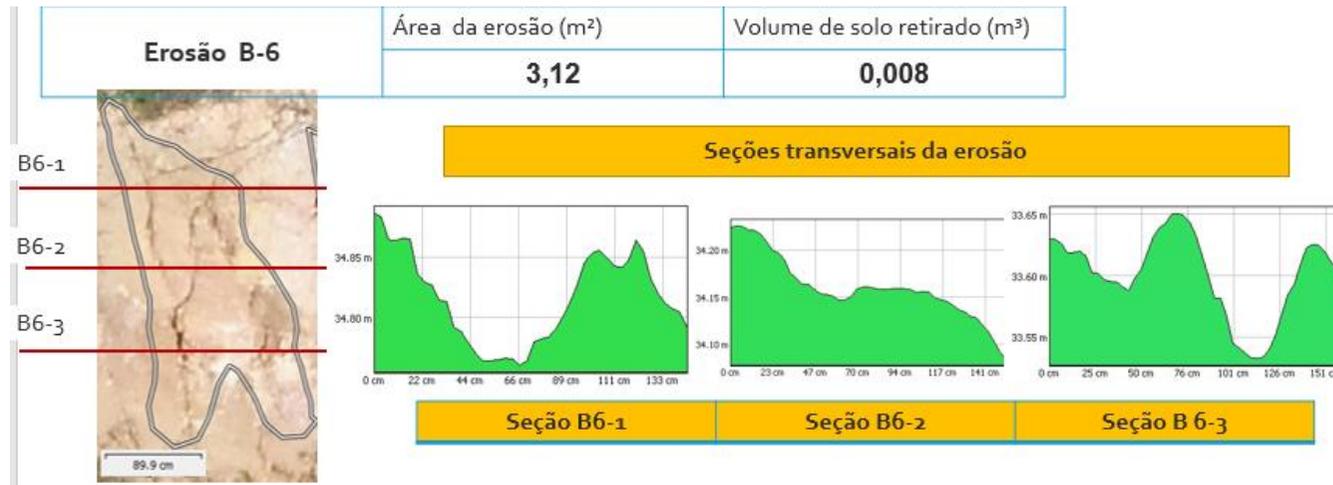


Figura F.12 – Detalhes do sulco B- 7

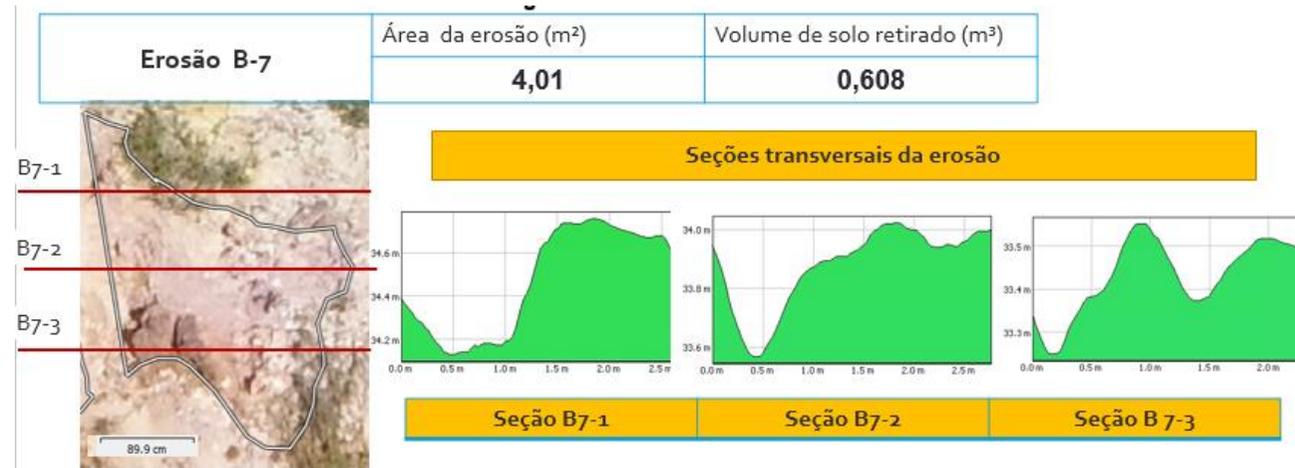


Figura F.13 – Detalhes do sulco B- 8



Figura F.14 – Detalhes do sulco B- 9

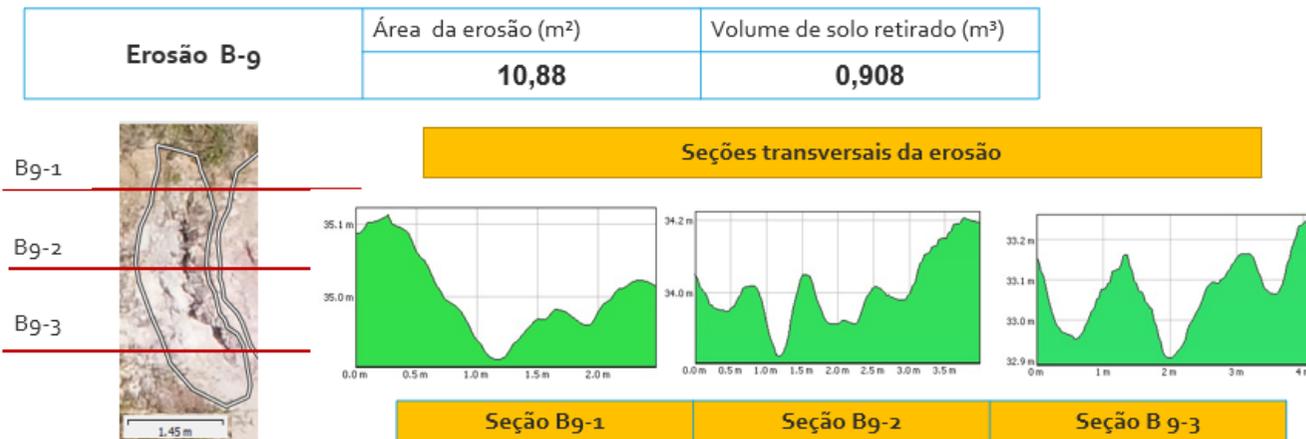


Figura F.15 – Detalhes do sulco B- 10

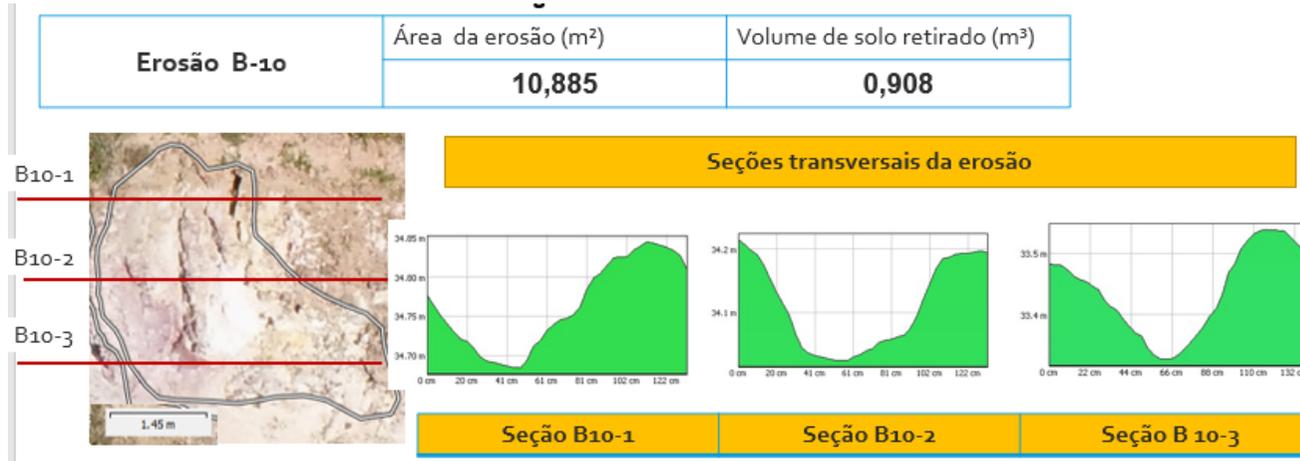


Figura F.16 – Detalhes do sulco B- 11

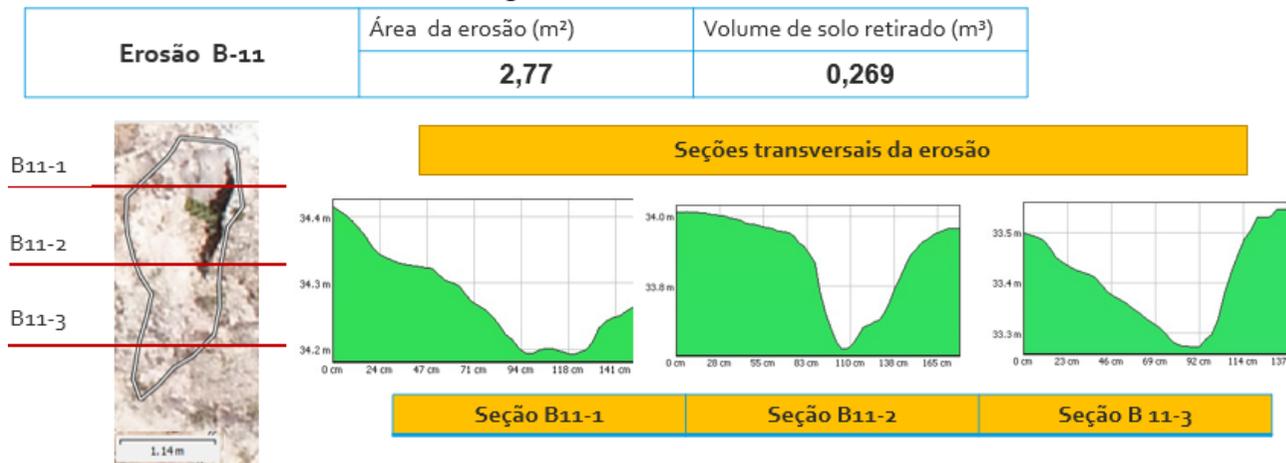


Figura F.17 – Detalhes do sulco B- 12



Figura F.18 – Detalhes do sulco C-1

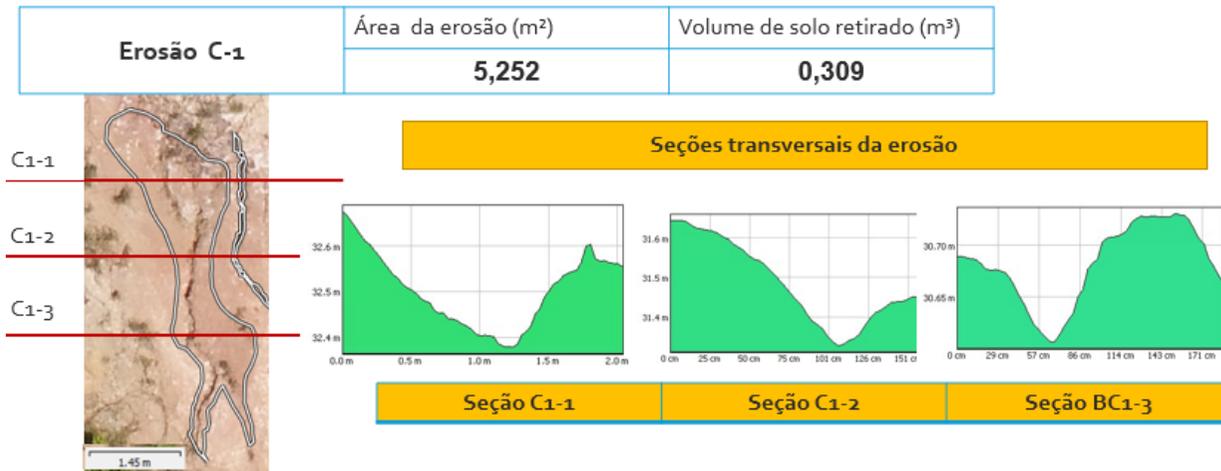


Figura F.19 – Detalhes do sulco C-2

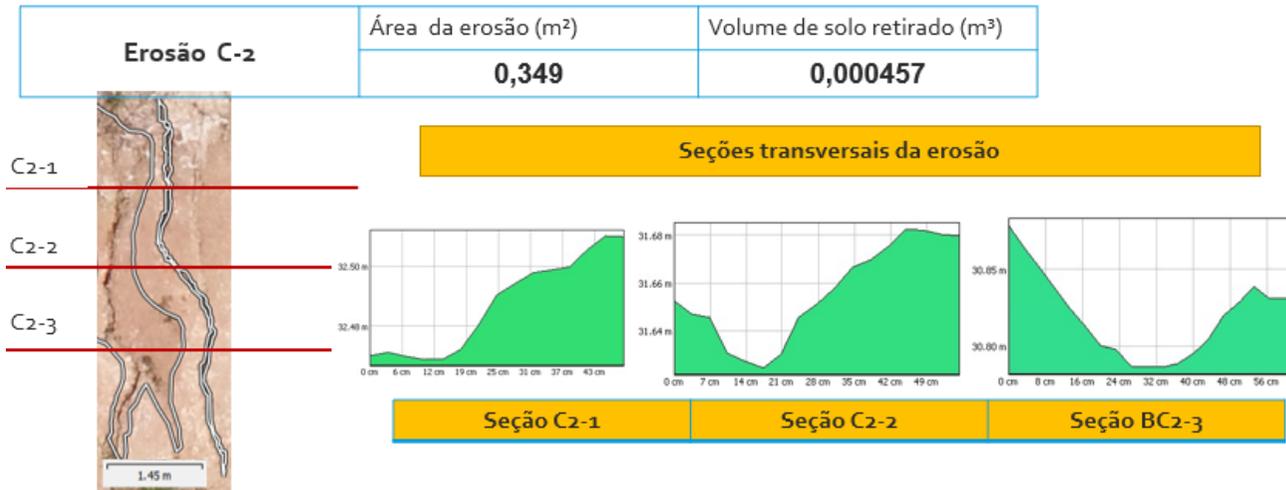


Figura F.20 – Detalhes do sulco C-3

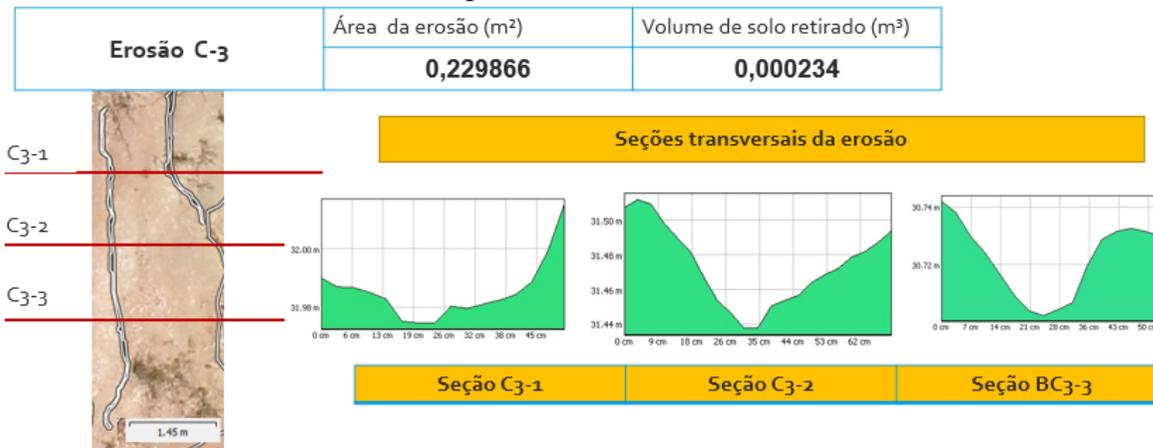


Figura F.21 – Detalhes do sulco C-4

Erosão C-4	Área da erosão (m <sup>2</sup> )	Volume de solo retirado (m <sup>3</sup> )
		<b>0,144115</b>

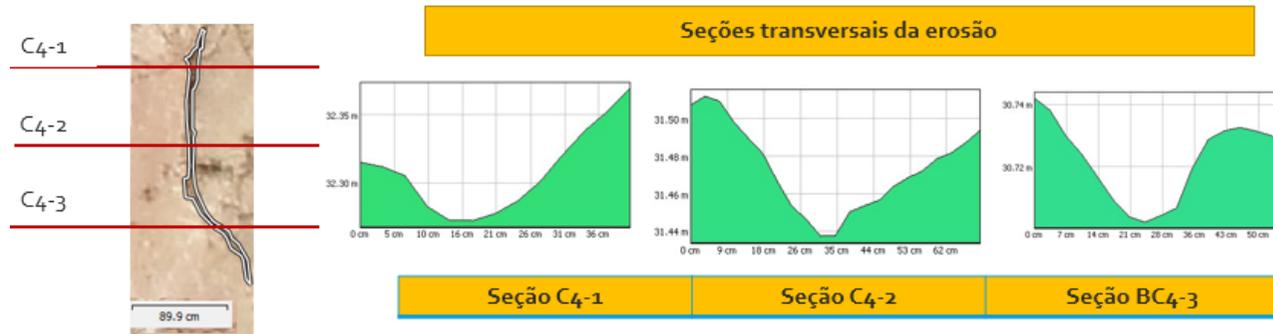


Figura F.22 – Detalhes do sulco C-5

Erosão C-5	Área da erosão (m <sup>2</sup> )	Volume de solo retirado (m <sup>3</sup> )
		<b>2,935</b>

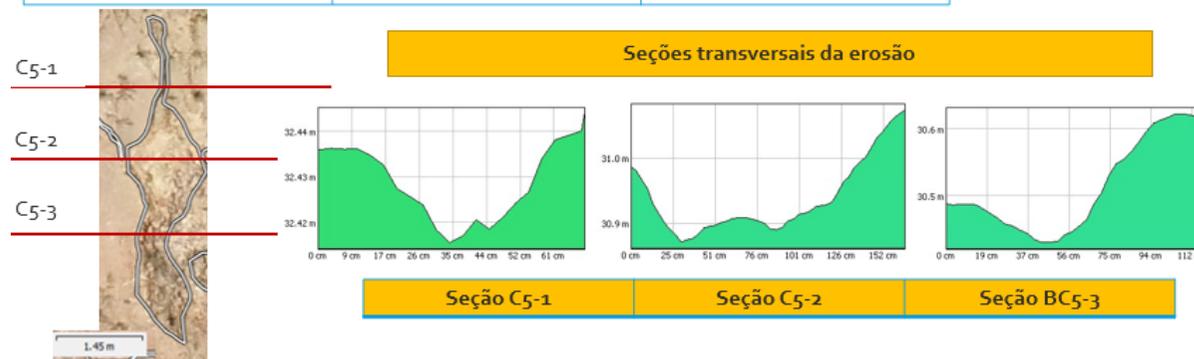
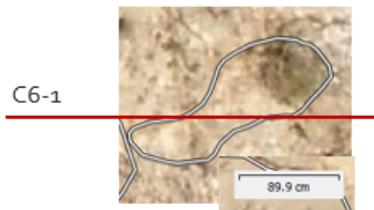


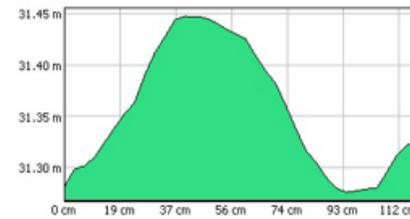
Figura F.23 – Detalhes do sulco C-6

<b>Erosão C-6</b>	Área da erosão (m <sup>2</sup> )	Volume de solo retirado (m <sup>3</sup> )
	<b>0,922723</b>	<b>0,008661</b>



C6-1

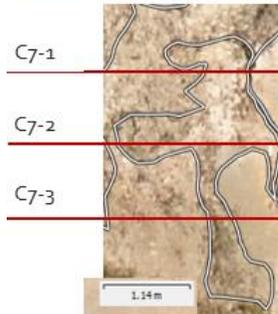
Seções transversais da erosão



Seção C6-1

Figura F.24 – Detalhes do sulco C-7

<b>Erosão C-7</b>	Área da erosão (m <sup>2</sup> )	Volume de solo retirado (m <sup>3</sup> )
	<b>2,791</b>	<b>0,010765</b>



C7-1

C7-2

C7-3

Seções transversais da erosão



Seção C7-1

Seção C7-2

Seção BC7-3

Figura F.25 – Detalhes do sulco C-8

Erosão C-8	Área da erosão (m <sup>2</sup> )	Volume de solo retirado (m <sup>3</sup> )
		<b>0,452637</b>

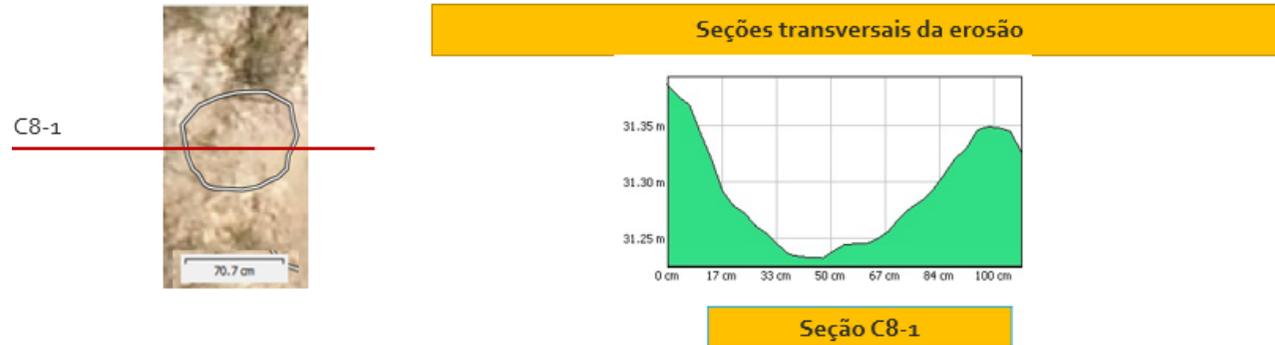


Figura F.26 – Detalhes do sulco C-9

Erosão C-g	Área da erosão (m <sup>2</sup> )	Volume de solo retirado (m <sup>3</sup> )
		<b>3,472</b>

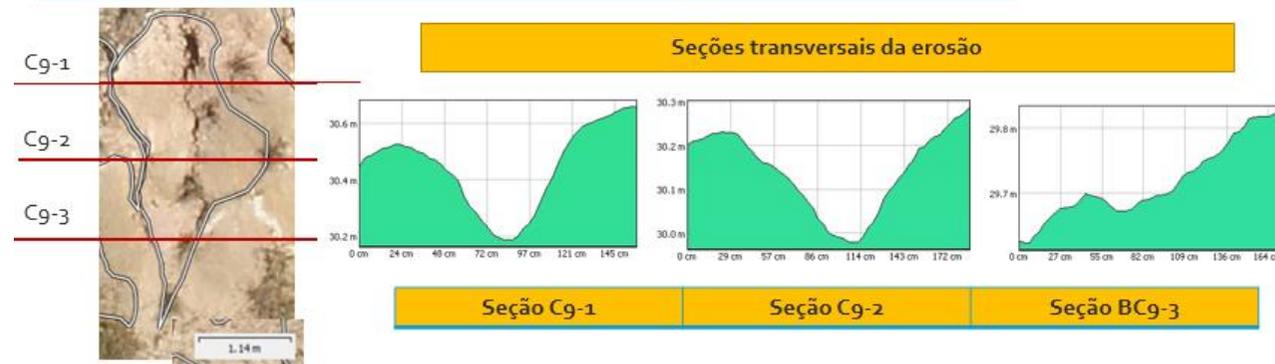


Figura F.27 – Detalhes do sulco C-10

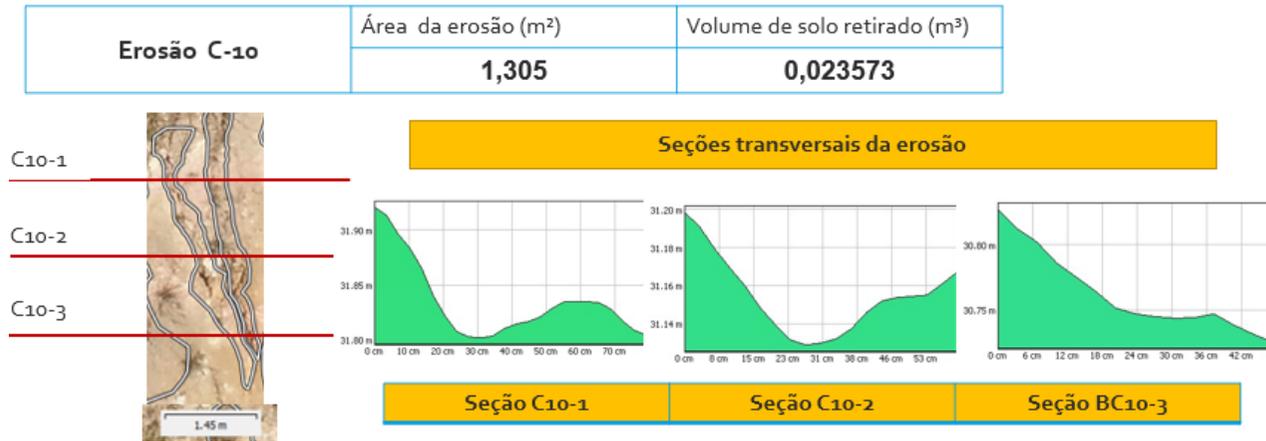


Figura F.28 – Detalhes do sulco C-11

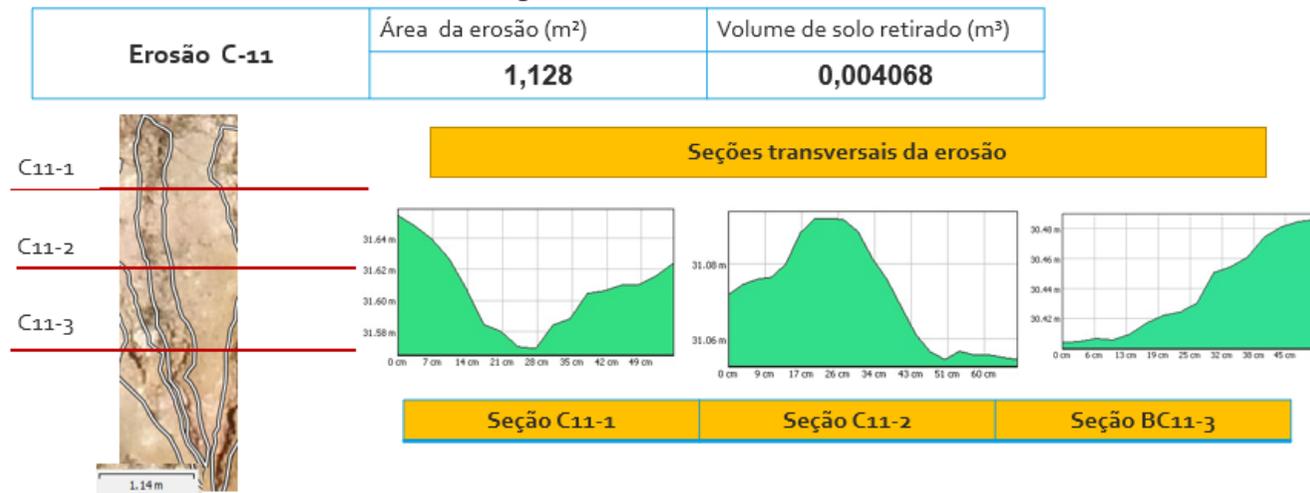


Figura F.29 – Detalhes do sulco C-12

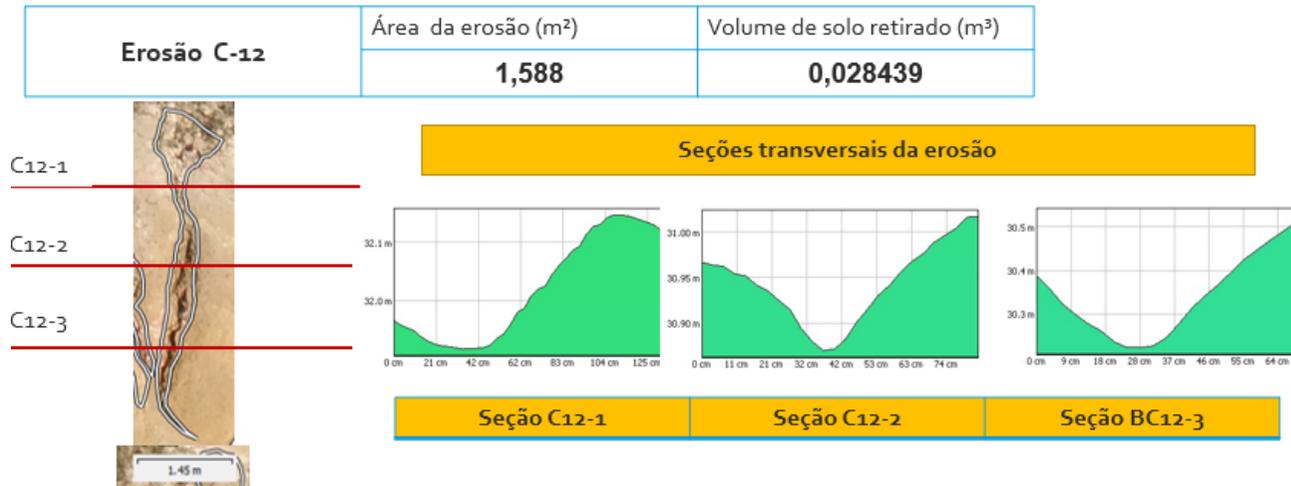


Figura F.30 – Detalhes do sulco C-13

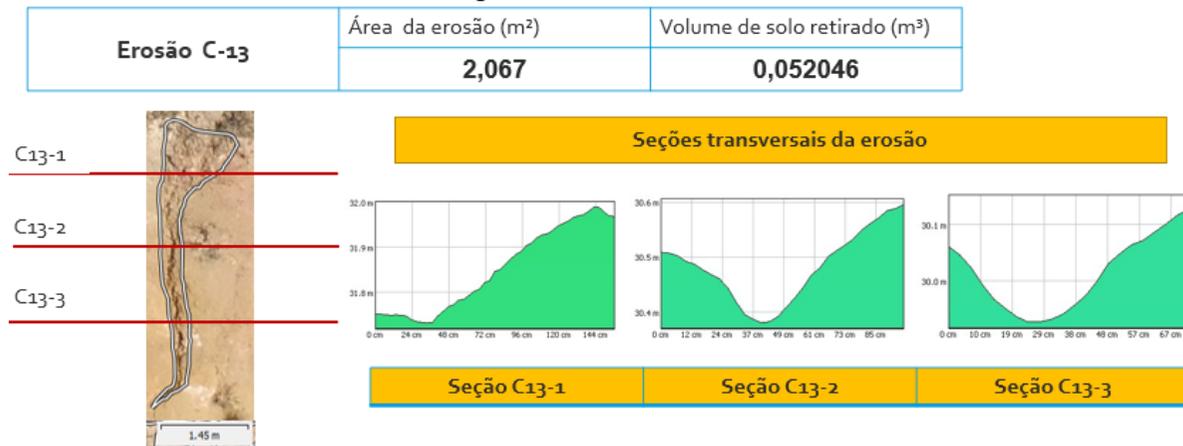


Figura F.31 – Detalhes do sulco C-14

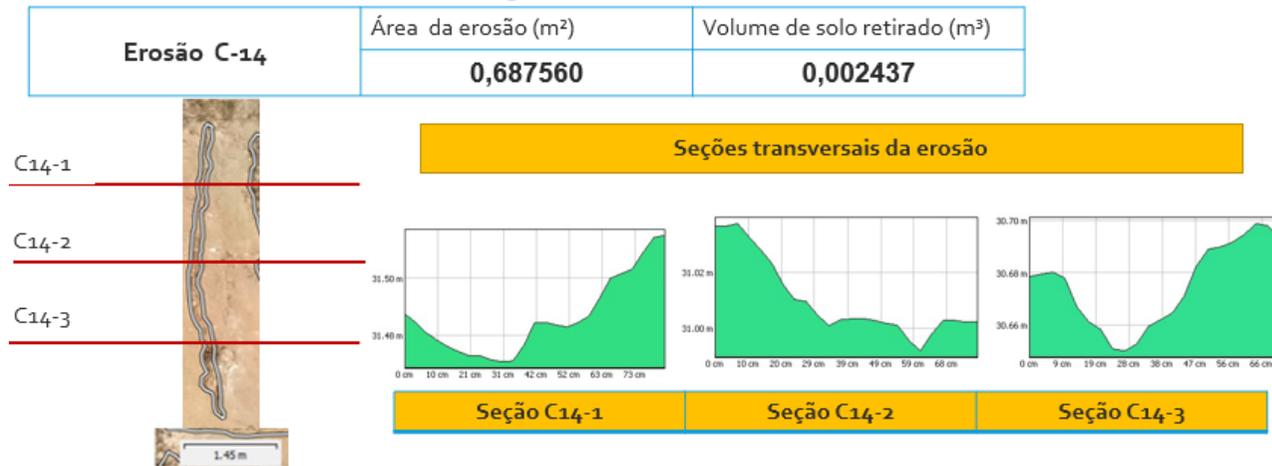


Figura F.32 – Detalhes do sulco C-15

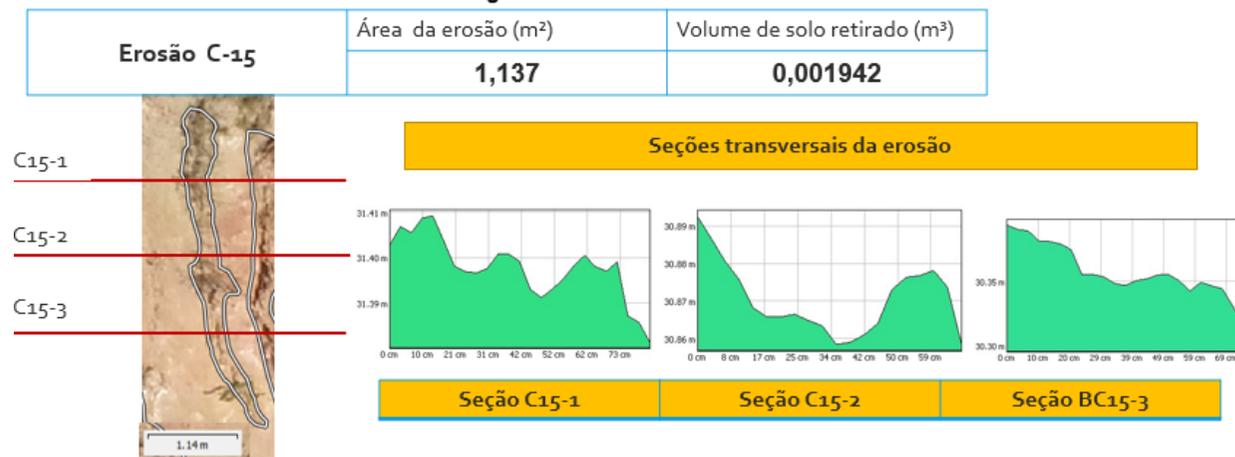


Figura F.33 – Detalhes do sulco C-16

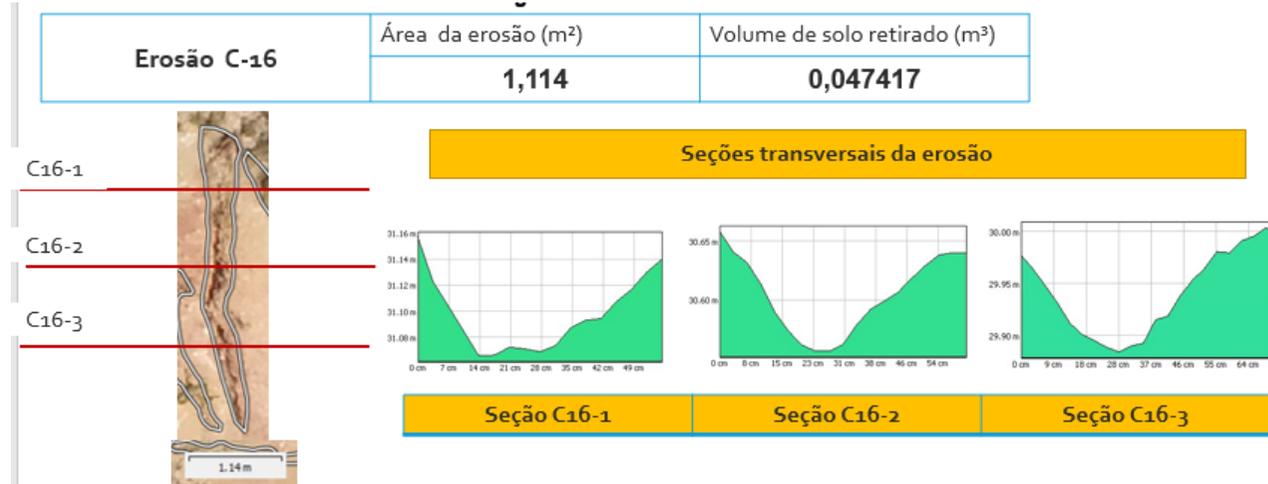


Figura F.34 – Detalhes do sulco C-17

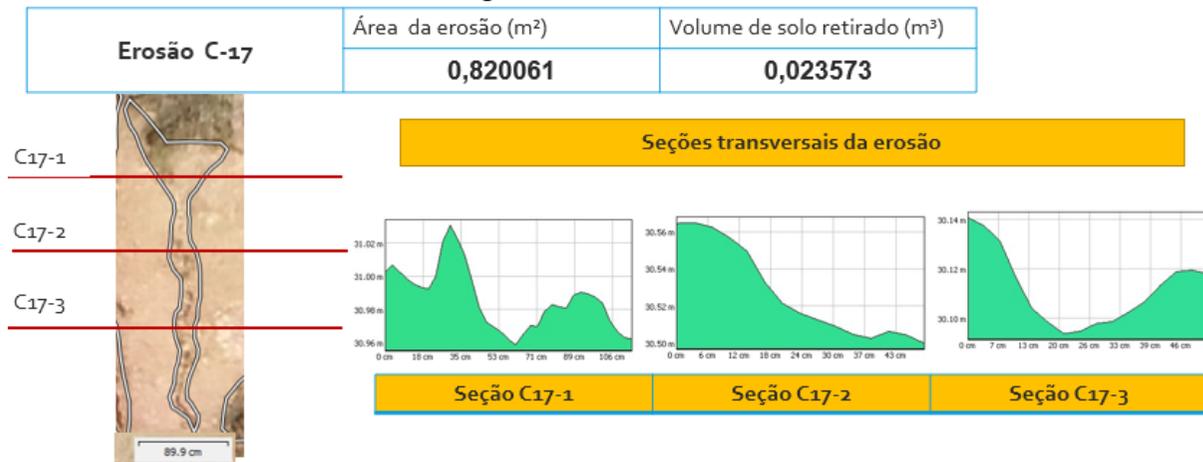


Figura F.35 – Detalhes do sulco C-18

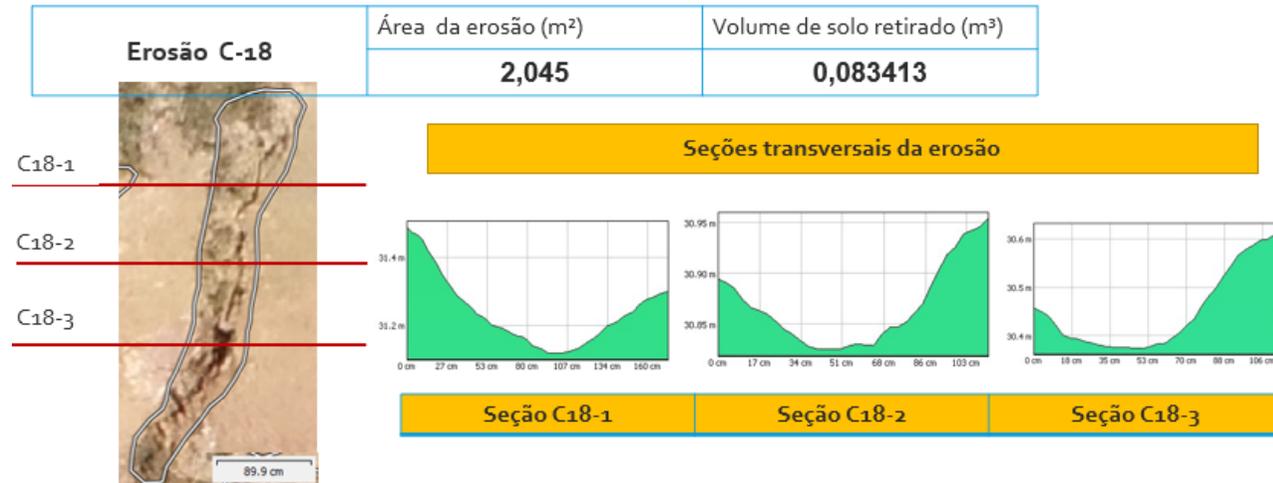


Figura F.36 – Detalhes do sulco C-19

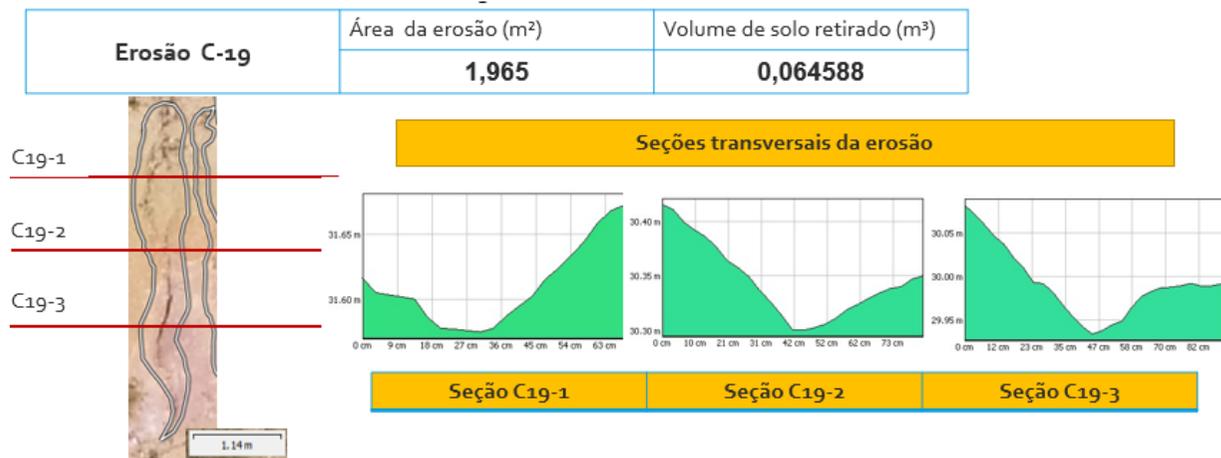


Figura F.37 – Detalhes do sulco C-20

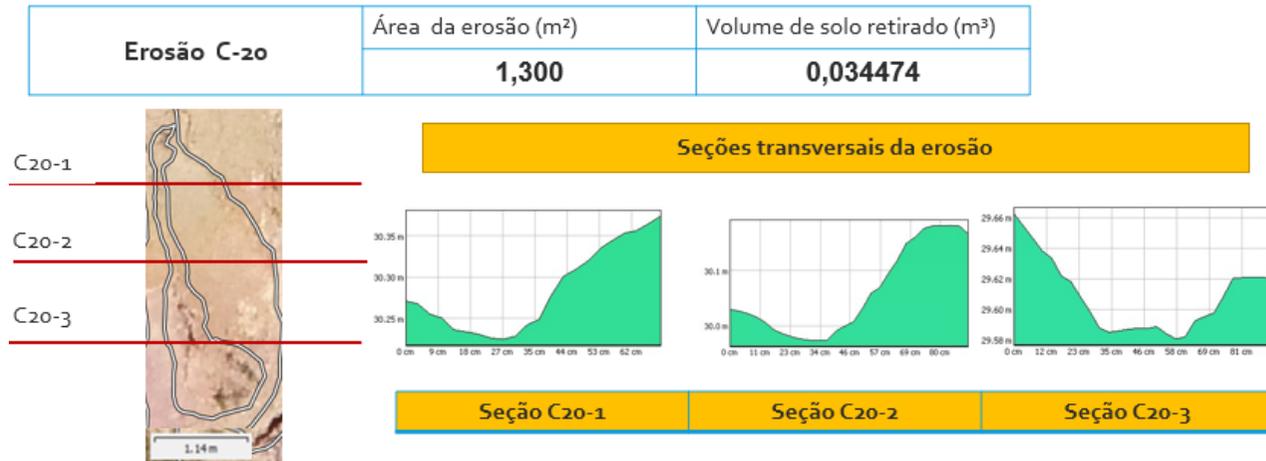


Figura F.38 – Detalhes do sulco C-21

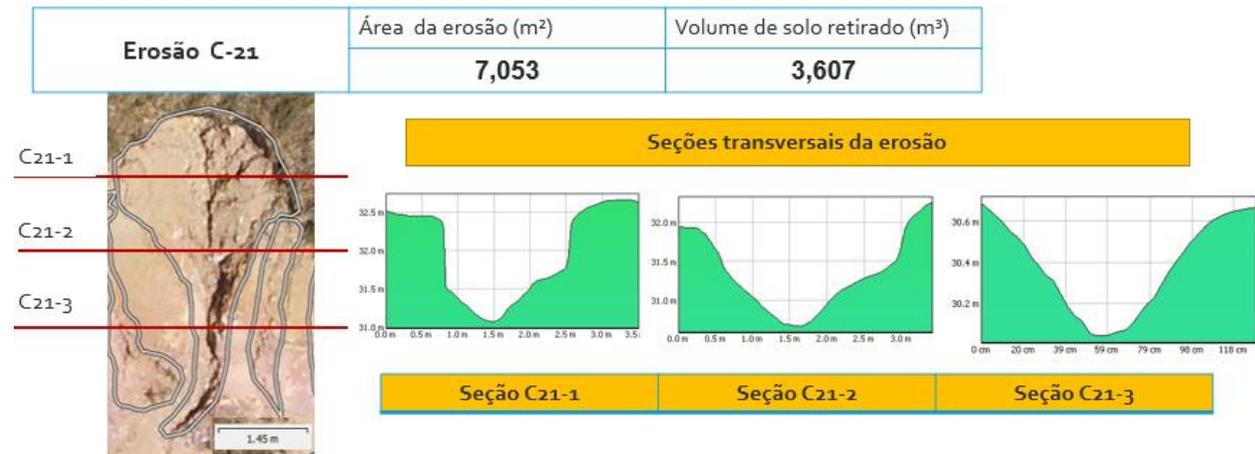


Figura F.39 – Detalhes do sulco C-22

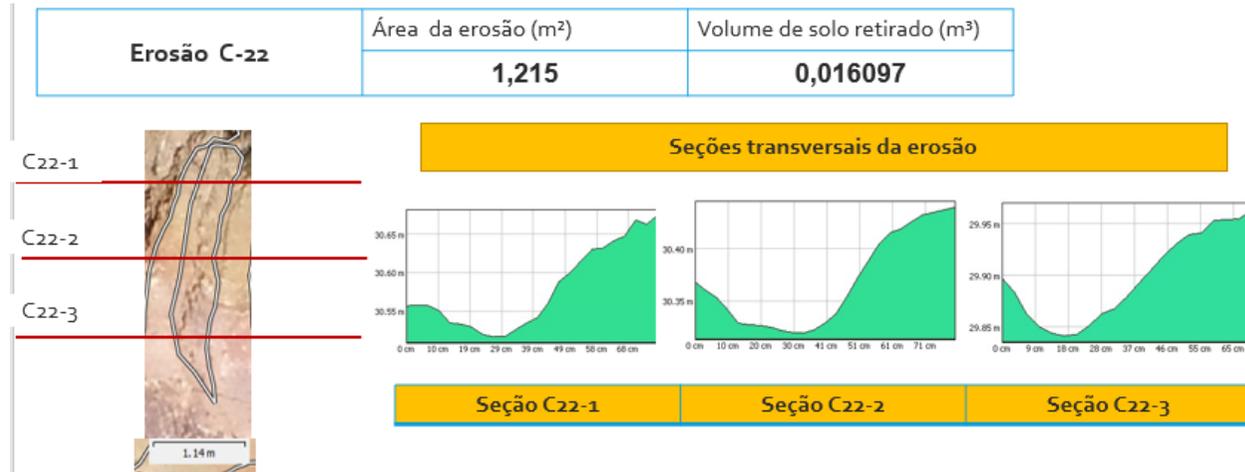


Figura F.40 – Detalhes do sulco C-23

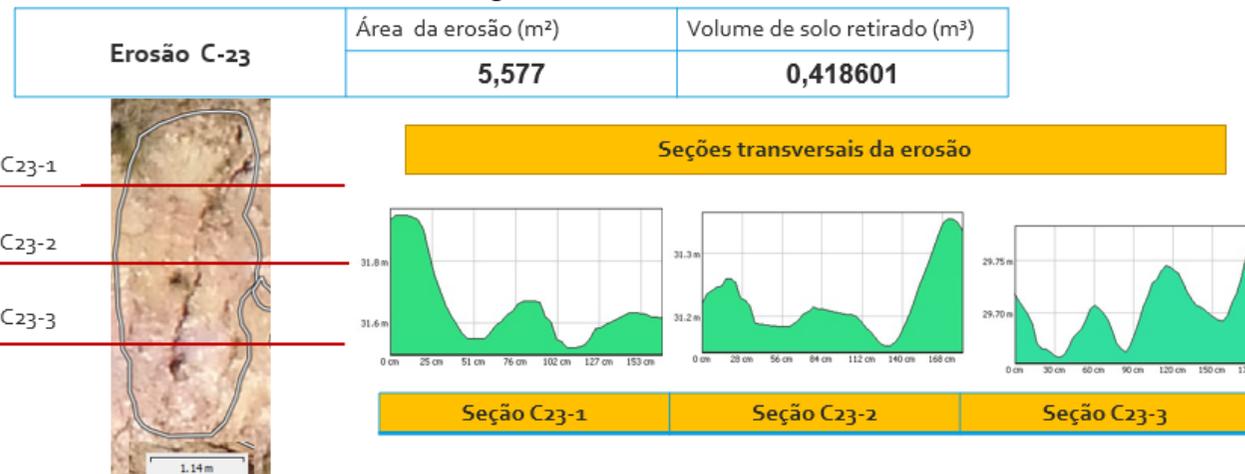


Figura F.41 – Detalhes do sulco C-24

<b>Erosão C-24</b>	Área da erosão (m <sup>2</sup> )	Volume de solo retirado (m <sup>3</sup> )
	<b>0,387437</b>	<b>0,003795</b>

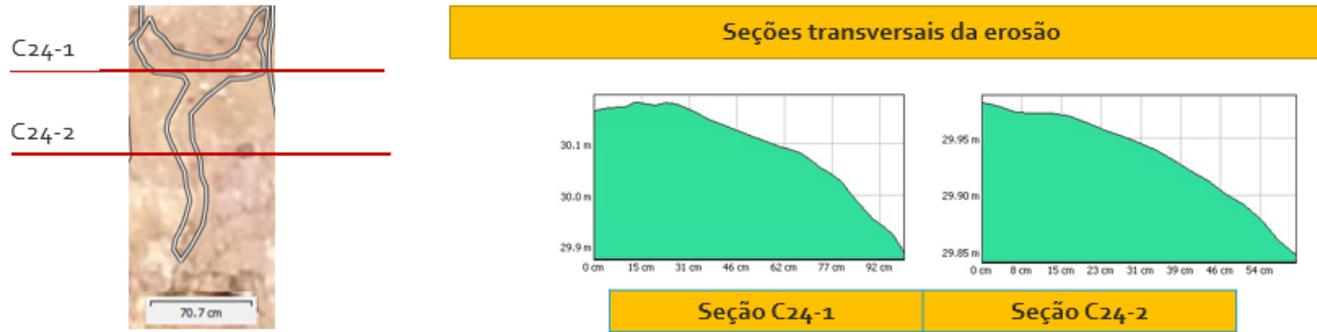


Figura F.42 – Detalhes do sulco C-25

<b>Erosão C-25</b>	Área da erosão (m <sup>2</sup> )	Volume de solo retirado (m <sup>3</sup> )
	<b>2,084</b>	<b>0,113997</b>



Figura F.43 – Detalhes do sulco C-26

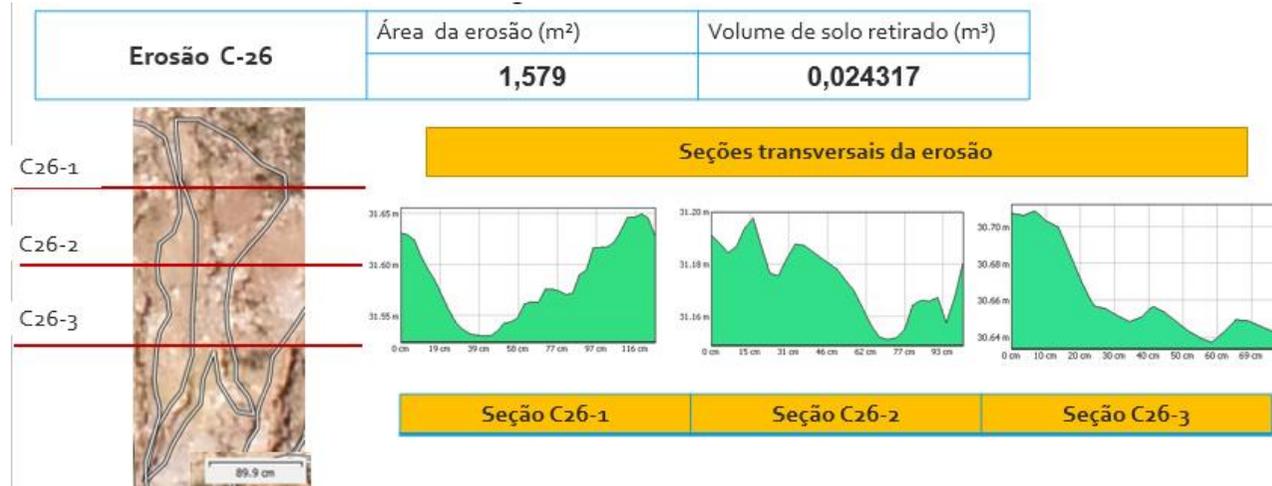


Figura F.44 – Detalhes do sulco C-27

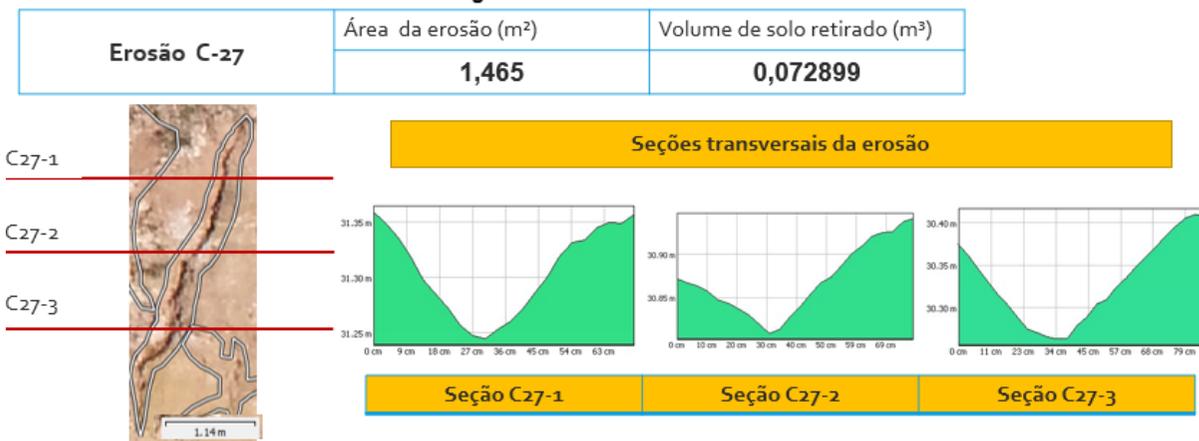


Figura F.45 – Detalhes do sulco C-28



Figura F.46 – Detalhes do sulco C-29



Figura F.47 – Detalhes do sulco C-30



## APÊNDICE G - TAXAS DE PERDA DO SOLO NOS SULCOS

Tabela G.1 – Taxa de perda de solo nos sulcos do corte A.

Sulco	Massa do solo erodido (kg)	Área do sulco (m <sup>2</sup> )	Taxa de perda de solo no sulco (t/m <sup>2</sup> )
A-1	1873,84	6,24	0,30
A-2	2905,69	6,49	0,45
A-3	890,85	3,135	0,28
A-4	2147,08	4,967	0,43
A-5	483,14	4,621	0,10

Tabela G. 2 - Taxa de perda de solo nos sulcos do corte B.

Sulco	Massa do solo erodido (kg)	Área do sulco (m <sup>2</sup> )	Taxa de perda de solo no sulco (t/m <sup>2</sup> )
B-1	277,34	0,277	0,21
B-2	8,92	0,009	0,02
B-3	74,24	0,074	0,08
B-4	88,57	0,089	0,05
B-5	74,98	0,075	0,07
B-6	81,98	0,082	0,04
B-7	750,94	0,751	0,21
B-8	4870,49	4,870	0,54
B-9	568,82	0,569	0,15
B-10	1103,47	1,103	0,13
B-11	575,15	0,575	0,19
B-12	1429,48	1,429	0,24

Tabela G.3 – Taxa de perda de solo nos sulcos do corte C.

Sulco	Massa do solo erodido (kg)	Área do sulco (m <sup>2</sup> )	Taxa de perda de solo no sulco (t/m <sup>2</sup> )
C-1	622,29	0,622	0,13
C-2	51,36	0,051	0,04
C-3	66,42	0,066	0,03
C-4	24,99	0,025	0,03
C-5	382,89	0,383	0,10
C-6	54,98	0,055	0,06
C-7	170,14	0,170	0,06
C-8	52,80	0,053	0,12
C-9	607,29	0,607	0,14
C-10	124,20	0,124	0,08
C-11	103,54	0,104	0,07
C-12	283,72	0,284	0,13
C-13	224,63	0,225	0,11
C-14	61,47	0,061	0,03
C-15	61,62	0,062	0,04
C-16	155,95	0,156	0,10
C-17	90,67	0,091	0,07
C-18	292,41	0,292	0,10
C-19	93,31	0,093	0,05
C-20	54,48	0,054	0,05
C-21	6271,59	6,272	0,89
C-22	37,40	0,037	0,04
C-23	522,81	0,523	0,13
C-24	21,01	0,021	0,04
C-25	269,13	0,269	0,12
C-26	89,69	0,090	0,06
C-27	140,84	0,141	0,10
C-28	133,38	0,133	0,20
C-29	657,05	0,657	0,11
C-30	5850,56	5,851	0,45

Tabela G.3 – Taxa de perda de solo nos sulcos do corte C.

Sulco	Massa do solo erodido (kg)	Área do sulco (m <sup>2</sup> )	Taxa de perda de solo no sulco (t/m <sup>2</sup> )
C-1	622,29	0,622	0,13
C-2	51,36	0,051	0,04
C-3	66,42	0,066	0,03
C-4	24,99	0,025	0,03
C-5	382,89	0,383	0,10
C-6	54,98	0,055	0,06
C-7	170,14	0,170	0,06
C-8	52,80	0,053	0,12
C-9	607,29	0,607	0,14
C-10	124,20	0,124	0,08
C-11	103,54	0,104	0,07
C-12	283,72	0,284	0,13
C-13	224,63	0,225	0,11
C-14	61,47	0,061	0,03
C-15	61,62	0,062	0,04
C-16	155,95	0,156	0,10
C-17	90,67	0,091	0,07
C-18	292,41	0,292	0,10
C-19	93,31	0,093	0,05
C-20	54,48	0,054	0,05
C-21	6271,59	6,272	0,89
C-22	37,40	0,037	0,04
C-23	522,81	0,523	0,13
C-24	21,01	0,021	0,04
C-25	269,13	0,269	0,12
C-26	89,69	0,090	0,06
C-27	140,84	0,141	0,10
C-28	133,38	0,133	0,20
C-29	657,05	0,657	0,11
C-30	5850,56	5,851	0,45