

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

JUCIELA CRISTINA DOS SANTOS

**MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA FORMAÇÃO
BARREIRAS NO MUNICÍPIO DE MACEIÓ, ALAGOAS**



Recife

2022

JUCIELA CRISTINA DOS SANTOS

**MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA FORMAÇÃO
BARREIRAS NO MUNICÍPIO DE MACEIÓ, ALAGOAS**

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

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves da Luz, CRB-4 / 1361

S237m Santos, Juciela Cristina dos
Mapeamento e caracterização Geotécnica da formação barreiras no município de Maceió, Alagoas / Juciela Cristina dos Santos. – 2022.
262 f.: il., figs., tabs. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2022.
Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Caracterização Geotécnica. 3. Banco de dados SPT. 4. Análise Geoestatística. I. Coutinho, Roberto Quental (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2022-419

JUCIELA CRISTINA DOS SANTOS

**MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA FORMAÇÃO
BARREIRAS NO MUNICÍPIO DE MACEIÓ, ALAGOAS**

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

Aprovada em 09/11/2022

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Bernadete Ragoni Danziger (examinadora externa)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Juliane Andréia Figueiredo Marques (examinadora externa)
Universidade Federal de Alagoas

participação por videoconferência
Dr. Rodolfo Moreda Mendes (examinador externo)
Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastre Naturais

participação por videoconferência
Prof. Dr. Robson Ribeiro Lima (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu avô, José Antônio dos Santos (in memoria), um sertanejo analfabeto, porém, sábio, que trilhou aqui na terra um caminho semeando amor, e deixou meu pai, José Ilto dos Santos, que com suas atitudes refletem meu avô.

Dedico ainda a toda a população que vive em áreas de risco, nas Grotas de Maceió, que arriscam suas vidas, que perderam e perdem familiares e amigos nos desastres ocorridos pelas fortes chuvas e que ainda assim amam seu lugar, esperando ansiosamente pelas ações do poder público.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida, saúde, discernimento e pelos tantos livramentos nas viagens Maceió-Recife durante o período de aulas e ensaios, me trazendo de volta segura para casa. Obrigada Senhor por iluminar minha mente e guiar cada palavra desse trabalho.

Agradeço aos meus filhos, Yasmim Martins, que acredito ser a pequena que mais sofreu com minha ausência nos últimos anos, e Lucca Martins, que viajou no meu ventre e esteve comigo até chegar a este mundo. Por vocês são meus esforços diários de tornar esse mundo melhor.

Ao meu esposo, Julian de Sousa, por todo apoio, amor, compreensão, companheirismo, por ter o melhor coração de todos que conheço, por ser meu maior incentivador e sonhar todos os sonhos comigo, te amo!

A meu pai e mãe, José Ilto e Maria Zélia, por serem meus maiores exemplos, por cultivarem tanto amor em meu coração, gratidão!

Aos meus irmãos, Jucileia, Juscelino, Alexsandra e Fábio, que são partes de mim, de tudo que sou, cada um com seu jeitinho, me tornam alguém melhor a cada dia. Ao meu irmão Júlio, que segue os mesmos caminhos da ciência que eu, por quem tenho um amor maternal, pela ajuda na construção e análise do banco de dados construído para esta tese e pelas tantas dicas de formatação e *design* dos mapas.

A minha sogra, Maria Lucia, que é uma mãe para mim, ao meu sobrinho Wendel (meu sobrinho/filho mais velho), que junto com meu esposo me deram todo o suporte com meus filhos para que este trabalho fosse possível. Aos meus sobrinhos Wagner, Walber e Julia, as minhas afilhadas e sobrinhas, a pequena e delicada Antonella e a sapeca e inteligente Sofia, e a minha menininha Wise, dona de um espaço especial no meu coração, todo o amor de mãe que tenho compartilho com vocês.

Aos meus companheiros de viagens semanais para Recife, meus amigos Jhonathan, Igor, Leonardo e Ayrton. A minha amiga, comadre e *roomate*, Caroline Leite. Obrigada pela jornada e companheirismo de vocês, tornando esse percurso menos cansativo e solitário.

A Arqmensura em nome dos meus amigos Valmir Araújo e Fernando Barros, pelo auxílio no levantamento aéreo, coleta e transporte de amostras e pontos de controle, eles que sempre torceram e torcem por mim e que me enchem de orgulho pelas pessoas e profissionais que são, agradeço a parceria, amizade, irmandade e companheirismo de sempre.

Eu sou alguém que não acredita em meritocracia plena. Como acreditar, se em cada passo que dou, me rodeio com tantas pessoas, que compartilham seus conhecimentos, suas experiências de vida e que me ajudam a subir cada degrau neste universo tão imenso da ciência? Por isso sou muito grata!

À universidade Federal de Alagoas, em especial a direção do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA e ao Colegiado do curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, pela liberação e apoio nas atividades do meu doutorado.

Ao Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres, pelo apoio a pesquisa. Ao meu orientador, professor Roberto Quental Coutinho, sou grata por compartilhar tanto conhecimento, por sua liderança, respeito, educação e gentileza, pela orientação a cada reunião e confiança desde a primeira conversa. O senhor tem minha admiração, respeito e carinho. À sua esposa Dóris, que indiretamente faz parte da vida de todos no GEGEP.

Aos membros da banca de qualificação, professor Ricardo Severo, Rodolfo Mendes e Juliane Marques, pelas contribuições para melhoramento da pesquisa.

A AGM Geotécnica pela liberação dos boletins de Sondagens de Maceió para construção do banco de dados desta pesquisa.

Aos amigos que o GEGEP me deu, que me auxiliaram, me ensinaram e deram apoio em vários momentos, compartilhando suas experiências e dia a dia, em especial aos queridos, Amabili Santos, Monalyssa Ramos, Bruno Morais, Carla Andrade, Sérgio Ricardo, Tahyara Barbalho, Felipe Brandão, Amanda Coutinho e Iran Everton. Ao meu amigo Danisete Neto, pelo conhecimento compartilhado, pela paciência, dedicação, doçura e simplicidade, sou muito grata.

A minha amiga de longa data, Betânia Queiroz, uma verdadeira mulher guerreira. Sou grata a Deus por poder compartilhar mais esses anos com você, por sua amizade, conselhos na tese e na vida.

A minha querida amiga Mayssa, por quem tenho respeito, admiração e amor. Agradeço o seu jeitinho todo especial de ser, de olhar o mundo e todos ao seu redor. Torço por cada conquista sua minha amiga, você foi um presente de Deus nessa jornada.

A todos os funcionários do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE, em especial ao Carlos Francisco, por compartilhar tanta experiência, me acompanhar nos ensaios e por partilhar um pouco de sua vida. Agradeço a Gutemberg por toda ajuda e gentileza de sempre e as funcionárias da secretaria da Pós-Graduação, Andréa, Claudiana e Cleide, pela atenção e suporte.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento geotécnico dos sedimentos da Formação Barreiras na cidade de Maceió – Alagoas, a partir de um mapeamento geomorfológico, geológico e geotécnico, embasado em ensaios SPT e ensaios de laboratório. Foram espacializados 1.592 registros SPT, realizando uma identificação de perfis típicos e interpolação através do método de krigagem ordinária, de forma a compreender a resistência a penetração dos solos na região estudada. Com o apoio das compartimentações geomorfológicas definidas, foi associada a morfologia dos Tabuleiros Costeiros à Unidade Geológica de Formação Barreiras, realizando uma melhoria na escala cartográfica de representação dessa unidade, em escala 1:10.000. Um estudo de detalhe geotécnico foi realizado em quatro locais da cidade: UFAL, HCOR, Grota da Moenda e Encosta do Mutange, pertencentes ao domínio geológico estudado. As sondagens apontaram uma maior ocorrência de perfis predominantemente argilosos (entre 65% - 85%) dos SPT analisados, com características que apontam para a ocorrência da fácies Leque Distal/Planície Aluvial. Através da análise geoestatística se observou um aumento de resistência N_{spt} e um efeito de sazonalidade decorrente do período chuvoso. Os mapas gerados complementaram a investigação geotécnica realizada, que envolveu a execução de sondagens, coleta de amostras indeformadas no topo, meio e base da encosta, além de ensaios de laboratório como caracterização física, erodibilidade, permeabilidade (Tri-flex), estudo de sucção, ensaio edométrico duplo, estudos de colapsividade, cisalhamento direto e triaxial CID. Os solos estudados apresentaram plasticidade média, classificados como siltes e argilas de baixa compressibilidade (CL e ML). Os parâmetros obtidos para compressibilidade, resistência e os relacionados com a sucção, encontram-se próximos entre si, apresentando-se coerentes quando comparados com a literatura existente, com as encostas apresentando menores coesões, destacando a base da encosta da Moenda, estando diretamente relacionado com a composição granulométrica. Os parâmetros geotécnicos obtidos juntamente com os mapas probabilísticos se apresentam de grande importância no conhecimento do comportamento dos solos no local investigado, possibilitando parâmetros iniciais para projetos de fundações, cálculo da estabilidade de encostas, planejamento urbano, entre outros projetos de engenharia.

Palavras-chave: caracterização geotécnica; banco de dados SPT; análise geoestatística.

ABSTRACT

This work presents a study on the geotechnical behavior of sediments from the Barreiras Formation in the city of Maceio - Alagoas, from a geomorphological, geological and geotechnical mapping, based on SPT tests and laboratory tests. 1,592 SPT records were spatialized, identifying typical profiles and interpolation through the ordinary kriging method, in order to understand the resistance to penetration of soils in the studied region. With the support of the defined geomorphological compartments, the morphology of the Coastal Tablelands was associated with the Barreiras Formation Geological Unit, improving the cartographic scale of representation of this unit, at a scale of 1:10,000. A geotechnical detailed study was carried out at four locations in the city: UFAL, HCOR, Grota of Moenda and Slope of Mutange, belonging to the geological domain studied. The surveys showed a predominance of clayey profiles (between 65% - 85%) of the analyzed SPT, with characteristics that point to the occurrence of the Distal Fan/Alluvial Plain facie. Through geostatistical analysis, an increase in N_{spt} resistance and a seasonality effect resulting from the rainy season were observed. The generated maps complemented the geotechnical investigation carried out, which involved the execution of soundings, collection of undisturbed samples at the top, middle and bottom of the slope, in addition to laboratory tests such as physical characterization, erodibility, permeability (Tri-flex), suction study, double edometric assay, collapsivity studies, direct shear and triaxial CID. The studied soils presented medium plasticity, classified as silts and clays of low compressibility (CL and ML). The parameters obtained for compressibility, resistance and those related to suction, are close to each other, presenting themselves coherent when compared to the existing literature, with the slopes showing less cohesion, highlighting the base of the slope of Moenda, being directly related with the granulometric composition. The geotechnical parameters obtained together with the probabilistic maps are of great importance in the knowledge of the behavior of the soils in the investigated area, allowing initial parameters for foundation projects, slope stability calculation, urban planning, among other engineering projects.

Keywords: geotechnical characterization; SPT database; geostatistical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de Localização do Município de Maceió	30
Figura 2 - Média da Precipitação e Temperatura na cidade de Maceió.....	31
Figura 3 - Carta Estratigráfica da Bacia Alagoas	34
Figura 4 - Coluna estratigráfica do mapa geológico do estado de Alagoas	35
Figura 5 - Mapa Geológico do Estado de Alagoas	36
Figura 6 - Ocorrência da Formação Barreiras ao longo da margem continental do Brasil com suas respectivas altitudes.	38
Figura 7 - Mapa Litológico da Cidade de Maceió.....	40
Figura 8 - Perfil de formações geológicas em profundidade na seção dos bairros Pinheiro e Mutange.	41
Figura 9 - Mapa de padrões de relevo do município de Maceió.	42
Figura 10 - (a) Fotografia da ocupação de encosta nas proximidades do Instituto Federal de Alagoas e (b) Grota no baixo curso do Riacho do Reginaldo.....	43
Figura 11 - Localização das grotas do Município de Maceió.	45
Figura 12 - Difratograma de raios X da amostra 0,70-0,90 m de profundidade.	46
Figura 13 - Fluxograma das etapas que compõe o capítulo de Mapeamento Geológico-Geotécnico.	49
Figura 14 - Esquema de codificação das Sondagens	59
Figura 15 - Visualização do banco de dados Postgresql através do pgAdmin.....	61
Figura 16 - Ocorrência dos grupos de solo por camada.....	64
Figura 17 - Ocorrência de variação de cor do solo por camada.	65
Figura 18 - Exemplo de perfis representativos exclusivamente argilosos	66
Figura 19 - Localização dos furos de sondagem.	67
Figura 20 -Mapa Hipsométrico da área urbana da cidade de Maceió.....	72
Figura 21 - Mapa de declividade da área urbana da cidade de Maceió	73
Figura 22 - Índices de dissecação do Relevo para a área urbana de Maceió.	74
Figura 23 - Mapa Geomorfológico da área urbana da cidade de Maceió.	77
Figura 24 - Mapa Geomorfológico da área urbana da cidade de Maceió.	77
Figura 25 - Mapa Geológico de unidades geológicas com destaque para a Formação Barreiras	82
Figura 26 - Seção Colunar esquemática – Leque Distal / Planície Aluvial.	84

Figura 27 - Áreas de influência dos mapas geoestatísticos.	86
Figura 28 – Exemplo de um dos mapas de Cluster para o universo amostral estudado (profundidade de 2,00m no período seco).	88
Figura 29 - Exemplo de um dos mapas de Cluster para a subárea 01 (profundidade de 2,00m no período seco).	89
Figura 30 - Exemplo de um dos mapas de Cluster para a subárea 02 (profundidade de 2,00m no período seco).	90
Figura 31 - Histograma para a variável N _{spt} na profundidade de 2,00m – estação seca.	91
Figura 32 - Gráfico Normal Q-Q para a variável N _{spt} na profundidade de 2,00m – estação seca.	91
Figura 33 - Histograma dos valores N _{spt} para a área Domínio nas profundidades de 2m no período seco (a) e chuvoso (b), 4m no período seco (c) e chuvoso (d), 6m no período seco (e) e chuvoso (f), 9m no período seco (g) e chuvoso (h) e 12m no período seco (i) e chuvoso (j).	94
Figura 34 - Mapa de resistência a profundidade de 2,00m no período seco.	96
Figura 35 - Mapa de resistência a profundidade de 2,00m no período chuvoso.	97
Figura 36 - Mapa de resistência a profundidade de 4,00m no período seco.	98
Figura 37 - Mapa de resistência a profundidade de 4,00m no período chuvoso.	99
Figura 38 - Mapa de resistência a profundidade de 6,00m no período seco.	100
Figura 39 - Mapa de resistência a profundidade de 6,00m no período chuvoso.	101
Figura 40 - Mapa de resistência a profundidade de 9,00m no período seco.	102
Figura 41 - Mapa de resistência a profundidade de 9,00m no período chuvoso.	103
Figura 42 - Mapa de resistência a profundidade de 12,00m no período seco.	104
Figura 43 - Mapa de resistência a profundidade de 12,00m no período chuvoso.	105
Figura 44 - Histograma dos valores N _{spt} para a subárea 01 nas profundidades de 2m no período seco (a) e chuvoso (b), 4m no período seco (c) e chuvoso (d), 6m no período seco (e) e chuvoso (f), 9m no período seco (g) e chuvoso (h) e 12m no período seco (i) e chuvoso (j).	108
Figura 45 - Mapa de resistência N _{spt} a profundidade de 2,00m no período seco.	110
Figura 46 - Mapa de resistência N _{spt} a profundidade de 2,00m no período chuvoso.	111
Figura 47 - Mapa de resistência N _{spt} a profundidade de 4,00m no período seco.	112
Figura 48 - Mapa de resistência N _{spt} a profundidade de 4,00m no período chuvoso.	113
Figura 49 - Mapa de resistência N _{spt} a profundidade de 6,00m no período seco.	114

Figura 50 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 6,00m no período chuvoso.....	115
Figura 51 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 9,00m no período seco.....	116
Figura 52 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 9,00m no período chuvoso.....	117
Figura 53 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 12,00m no período seco.....	118
Figura 54 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 12,00m no período chuvoso.....	119
Figura 55 - Histograma dos valores Nspt para a subárea 02 nas profundidades de 2m no período seco (a) e chuvoso (b), 4m no período seco (c) e chuvoso (d), 6m no período seco (e) e chuvoso (f), 9m no período seco (g) e chuvoso (h) e 12m no período seco (i) e chuvoso (j).....	122
Figura 56 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 2,00m no período seco.....	124
Figura 57 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 2,00m no período chuvoso.....	125
Figura 58 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 4,00m no período seco.....	126
Figura 59 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 4,00m no período chuvoso.....	127
Figura 60 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 6,00m no período seco.....	128
Figura 61 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 6,00m no período chuvoso.....	129
Figura 62 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 9,00m no período seco.....	130
Figura 63 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 9,00m no período chuvoso.....	131
Figura 64 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 12,00m no período seco.....	132
Figura 65 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 12,00m no período chuvoso.....	133
Figura 66 - Fluxograma das etapas de investigação geológica-geotécnica.....	136
Figura 67 - Locais investigados.....	139
Figura 68 - Planejamento de Voo para a Grota da Moenda.....	142
Figura 69 - Planejamento de Voo para a encosta do Mutange.....	143
Figura 70 - Marcação e rastreio dos pontos de controle.....	144
Figura 71 - Ortofoto da Grota da Moenda.....	146
Figura 72 - Ortofoto da Encosta do Mutange.....	147
Figura 73 - Boletim de Sondagem realizada no Campus A. C. Simões – UFAL.....	149
Figura 74 - Boletim de Sondagem realizada no Hospital do Coração.....	150
Figura 75 - Amostras coletadas a cada metro para a sondagem do Hospital do Coração.	151
Figura 76 - Boletim de Sondagem realizado na Grota da Moenda.....	152
Figura 77 - Amostras coletadas a cada metro para a sondagem da Grota da Moenda.....	153
Figura 78 - Boletim de Sondagem da Encosta do Mutange.....	154
Figura 79 - Amostras coletadas a cada metro para a sondagem da Encosta do Mutange.....	155

Figura 80 - Croqui de localização da coleta de amostra da UFAL.....	156
Figura 81 - Esquema da extração de amostras - UFAL.	157
Figura 82 - Procedimento de coleta de amostras indeformadas no campus da UFAL.	158
Figura 83 - Croqui de localização da coleta de amostra do Hospital do Coração.....	158
Figura 84 - Localização da coleta da amostra do Hospital do Coração.....	159
Figura 85 - Localização da coleta da amostra do hospital do Coração.....	159
Figura 86 - Transporte e armazenamento da amostra.....	160
Figura 87 - Croqui de Localização do Local de Coleta das amostras – Grota da Moenda. ...	160
Figura 88 - Coleta de amostra na Grota da Moenda.	161
Figura 89 - Esquema de extração das amostras da Grota da Moenda.	161
Figura 90 - Croqui de Localização do Local de Coleta das amostras – Encosta do Mutange	162
Figura 91 - Coleta de amostra na Encosta do Mutange.	163
Figura 92 - Esquema de extração das amostras do Mutange.	163
Figura 93 - Exemplos de procedimentos de sedimentação com e sem defloculante das amostras estudadas.	165
Figura 94 - Exemplo de procedimento de peneiramento sem defloculante.	165
Figura 95 - Exemplo de procedimento de peneiramento com defloculante.....	166
Figura 96- Procedimento do ensaio de Limite de Liquidez.	166
Figura 97 - Procedimento do ensaio de Limite de Plasticidade.	167
Figura 98 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) -amostra da UFAL – Prof. 3,00m	167
Figura 99 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) - amostra da UFAL – Prof. 5,35m.	167
Figura 100 - Curva granulométrica Hospital (com e sem defloculante) da amostra do Coração – 1,50m.....	169
Figura 101 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) Grota da Moenda – Topo da Encosta.....	170
Figura 102 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) Grota da Moenda –Meio da Encosta.....	171
Figura 103 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) Grota da Moenda – Base da Encosta.....	171
Figura 104 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) Encosta do Mutange – Topo	172
Figura 105 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) Encosta do Mutange – Meio.	173

Figura 106 - Moldagem do corpo de prova para ensaio de Permeabilidade Tri-Flex.	174
Figura 107 - Procedimento de ensaio de permeabilidade utilizando Tri-Flex.	175
Figura 108 - Passo a passo do procedimento adotado em laboratório.	178
Figura 109 - Secagem e pesagem dos corpos de prova após saturação	179
Figura 110 - Curva de retenção para as amostras da UFAL	181
Figura 111 - Realização do ensaio Crumb Test (a) preenchimento dos beckers e (b) torrões do solo.	183
Figura 112 - Resultado do ensaio <i>Crumb Test</i> para as amostras da UFAL (a) na profundidade de 3,00m e (b) na profundidade de 5,35m.	184
Figura 113 - Resultado do ensaio Crumb Test para as amostras do HCOR.	185
Figura 114 - Resultado do ensaio <i>Crumb Test</i> para as amostras da Grota da Moenda (a) Topo da encosta, (b) meio da encosta e (c) base da encosta.	185
Figura 115 - Resultado do ensaio Crumb Test para as amostras da Encosta do Mutange (a) topo da encosta e (b) meio da encosta.	185
Figura 116 - Modelo esquemático do equipamento para o ensaio de Pinhole.	186
Figura 117 - Etapas da moldagem do corpo de prova	187
Figura 118 - Etapas do procedimento do ensaio de Pinhole.	187
Figura 119 - Detalhamento dos resultados do ensaio de Pinhole.	188
Figura 120 - Gráfico de vazão vs. tempo para as amostras da UFAL prof. 3,00m (a), prof. 5,35m (b), HCOR prof. 1,50m (c), Moenda topo da encosta (d), Moenda meio da encosta (e), Moenda base da encosta (f), Mutange topo da encosta (g) e Moenda meio da Encosta (h).	191
Figura 121 - Gráfico de vazão vs. carga hidráulica para as amostras da UFAL prof. 3,00m (a), prof. 5,35m (b), HCOR prof. 1,50m (c), Moenda topo da encosta (d), Moenda meio da encosta (e), Moenda base da encosta (f), Mutange topo da encosta (g) e Moenda meio da Encosta (h).	191
Figura 122 - Cravação e montagem do ensaio de Adensamento.	194
Figura 123 - Gráfico índices de vazios versus a tensão vertical (e versus $\sigma_v \log$) (a) para as amostras da UFAL na profundidade de 3,00m, (c) na profundidade de 5,35m e (e) para a amostra do HCOR (1,50), e gráfico de deformações volumétricas versus tensão vertical (ϵ_v versus $\sigma_v \log$) para a amostra da UFAL na profundidade de 3,00m (b) e na profundidade de 5,35m (d) e (f) para a amostra do HCOR.	196

Figura 124 - Gráfico índices de vazios versus a tensão vertical (e versus σ_v log) para as amostras da Grota da Moenda (a) Topo da encosta, (c) meio da encosta e (e) base da encosta, e gráfico de deformações volumétricas versus tensão vertical (ε_v versus σ_v log) para (b) o topo da encosta, (d) o meio da encosta e (f) a base da encosta.	197
Figura 125 - Gráfico índices de vazios versus a tensão vertical (e versus σ_v log) para as amostras do Mutange (a) Topo da encosta, (c) meio da encosta, e gráfico de deformações volumétricas versus tensão vertical (ε_v versus σ_v log) para (b) o topo da encosta, (d) o meio da encosta.....	197
Figura 126 - Gráfico tensão vertical efetiva vs índice de vazios para as amostras da UFAL na profundidade de (a) 3,00m, (b) 5,35m, (c) para o HCOR, para as amostras da Grota da Moenda (d) topo da encosta, (e) meio da encosta, (f) base da encosta, para as amostras do Mutange (g) topo da encosta e (h) meio da encosta.	202
Figura 127 - Potencial de Colapso em função da tensão vertical efetiva.....	205
Figura 128 - Moldagem do Corpo de prova.	206
Figura 129 - (a) Moldagem do Corpo de prova e (b) execução do ensaio.....	207
Figura 130 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra da UFAL - profundidade de 3,00m.	210
Figura 131 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra da UFAL - profundidade de 5,35mm.	211
Figura 132 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra do HCOR - profundidade de 1,50mm.....	212
Figura 133 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra do Topo da Grota da Moenda.....	213
Figura 134 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal	

vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra do Meio da Grota da Moenda.....	214
Figura 135 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra da base da Grota da Moenda.	215
Figura 136 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra do Mutange – Topo da Encosta.....	216
Figura 137 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra do Mutange – Meio da Encosta.....	217
Figura 138 - Envoltória de Resistência para a amostra da UFAL -Prof. 3,00m.....	222
Figura 139 - Envoltória de Resistência para a amostra da UFAL -Prof. 5,35m.....	223
Figura 140 - Envoltória de Resistência para a amostra do HCOR – Prof. 1,50m.	223
Figura 141 - Envoltória de Resistência para a Grota da Moenda – Topo da Encosta	223
Figura 142 - Envoltória de Resistência para a Grota da Moenda – Meio da Encosta	224
Figura 143 - Envoltória de Resistência para a Grota da Moenda – Base da Encosta.....	224
Figura 144 - Envoltória de Resistência para o Mutange – Topo da Encosta	224
Figura 145 - Envoltória de Resistência para o Mutange – Meio da Encosta	225
Figura 146- Moldagem do Corpo de prova e célula para o ensaio triaxial.	226
Figura 147 - Tensão cisalhante vs deformação horizontal e deformação vertical vs. deformação horizontal para as amostras da UFAL na profundidade de 3,00m (a) e 5,35m (b) e para a amostra do HCOR – prof. 1,50m (c).....	228
Figura 148 - Tensão cisalhante vs deformação horizontal e deformação vertical vs. deformação horizontal para as amostras do Topo (a) e Meio (b) e Base (c) da Grota da Moenda.	229
Figura 149- Tensão cisalhante vs deformação horizontal e Deformação vertical vs. Deformação horizontal para as amostras do Topo (a) e Meio (b) da encosta do Mutange. ...	230
Figura 150- Envoltórias de resistência para (a) amostra UFAL 3,00m, (b) amostra UFAL 5,35m, (c) amostra HCOR, (d) Topo da Encosta – Moenda, (e) meio da encosta – Moenda,	

(f) base da encosta – Moenda, (g) topo da encosta – Mutange e (h) meio da encosta – Mutange.	231
Figura 151 - Exemplos de sondagens SPT próximas espacialmente: (a) e (b) possível efeito da sazonalidade nos primeiros metros e possível variabilidade geotécnica lateral nas profundidades seguintes; (c) possível efeito da variabilidade geotécnica lateral.	235
Figura 152 - Carta de plasticidade das amostras analisadas.....	239
Figura 153 - Curvas características dos solos estudados.	240

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios de precipitação e temperatura para a cidade de Maceió.	31
Tabela 2 - Percentual de sondagens por camada	62
Tabela 3 - Características mais frequentes dos perfis de solo estudados e exemplo de perfil típico	63
Tabela 4 - Matriz de índices de dissecação do Relevo segundo Ross (1994).....	70
Tabela 5 - Índice de resistência a Penetração N para argilas	92
Tabela 6 - Índice de resistência a Penetração N para areias e siltes	92
Tabela 7 - Parâmetros estatísticos obtidos na análise exploratória para a área Domínio.	93
Tabela 8 - Parâmetros obtidos na estimativa dos valores por krigagem ordinária para a área Domínio.....	95
Tabela 9 - Percentual de área correspondente ao intervalo de resistência N _{spt} para área Domínio.....	106
Tabela 10 - Parâmetros estatísticos obtidos na análise exploratória para a subárea 01.	107
Tabela 11 - Parâmetros obtidos na estimativa dos valores por krigagem ordinária para a subárea 01.	109
Tabela 12 - Percentual de área correspondente ao intervalo de resistência N _{spt} para subárea 01.	120
Tabela 13 - Parâmetros estatísticos obtidos na análise exploratória para a subárea 01.	121
Tabela 14 - Parâmetros obtidos na estimativa dos valores por krigagem ordinária para a subárea 01.	121
Tabela 15 - Percentual de área correspondente ao intervalo de resistência SPT nas profundidades estudadas.	123
Tabela 16 - Quantificação das coletas, levantamentos e ensaios realizados.	137
Tabela 17 - Coordenadas dos pontos de controle.	145
Tabela 18 - Síntese do ensaio de granulometria e índices de consistência para as amostras da UFAL.	168
Tabela 19 - Síntese do ensaio de granulometria e índices de consistência para o Hospital do Coração.	170
Tabela 20 - Síntese do ensaio de granulometria e índices de consistência para a Grota da Moenda.....	172

Tabela 21 - Síntese do ensaio de granulometria e índices de consistência para a encosta do Mutange.....	173
Tabela 22 - Parâmetros obtidos para o ensaio de Permeabilidade Tri-Flex.....	176
Tabela 23 - Resultados do ensaio de Permeabilidade com Tri-Flex.....	176
Tabela 24 - Parâmetros de ajuste para as curvas características por Gitirana Jr. e Fredlund (2004).....	182
Tabela 25 - Resultados das leituras realizadas no ensaio de Pinhole para as amostras da UFAL Prof. 3,00m e 5,35m e HCOR prof. 1,50m	189
Tabela 26 - Resultados das leituras realizadas no ensaio de Pinhole para as amostras a Grota da Moenda e Encosta do Mutange.	190
Tabela 27 - Condições iniciais e finais dos corpos de prova para as amostras ensaiadas.	195
Tabela 28 - Resultados dos ensaios EDI e EDN para as amostras da UFAL.....	199
Tabela 29 - Critério de Classificação de Jennings e Knigth (1975) e Vargas (1978).....	203
Tabela 30 - Critério de Classificação de Reginatto e Ferrero (1973),	203
Tabela 31 - Potencial de colapso nas tensões aplicadas.....	204
Tabela 32 - Condições iniciais dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto das amostras da Grota da Moenda e Encosta do Mutange.....	208
Tabela 33 - Condições iniciais dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto UFAL e HCOR.....	209
Tabela 34 - Valores máximos na condição de ruptura e parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para as amostras da UFAL e HCOR.....	219
Tabela 35 - Valores máximos na condição de ruptura e parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para as amostras da UFAL.....	220
Tabela 36 - Valores máximos na condição de ruptura e parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para as amostras da UFAL.....	221
Tabela 37 - Parâmetros de resistência obtidos através do ensaio Triaxial.....	232
Tabela 38 - Resumo dos valores N_{spt} predominantes encontrados nas áreas estudadas.....	236
Tabela 39 - Síntese da análise granulométrica	238
Tabela 40 - Síntese dos resultados de compressibilidade e resistência das amostras analisadas.	242
Tabela 41 - Classificação das UGE nos solos investigados	243
Tabela 42 - Parâmetros Geológicos-geotécnicos das UGE estudadas.....	244

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AL	Alagoas
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Chuvoso
CDI	Cisalhamento Direto Inundado
CDN	Cisalhamento Direto Natural
CDR	Cisalhamento Direto Residual
CEPA	Centro Educacional de Pesquisas Aplicadas
CID	Consolidado Isotropicamente Drenado
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências / UFPE
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
E	Coordenada Este
EDI	Ensaio Edométrico Inundado
EDI	Edométrico na condição inundada
EDN	Ensaio Edométrico Natural
EDN	Edométrico na condição natural
GEGEP	Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
GRS	Sistema de Referência Geodésico
HCOR	Hospital do Coração
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverso da Distância Ponderada
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IP	Índice de Plasticidade

IPT	Instituto de Pesquisas de Tecnológicas
Km	Quilômetros
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LTDA	Limitada
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
N	Coordenada Norte
NA	Nível d'Água
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ND	Não Dispersivo
NE	Nordeste
NPT	Núcleo de Pesquisas Tecnológico
NW	Noroeste
OCR	<i>Over Consolidation Ratio</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PC	Potencial de Colapso do Solo
PMRR	Plano Municipal de Redução de Risco
PPP	Processamento por Ponto Preciso
RPA	Aeronave Remotamente Pilotada
RTK	Cinemática em Tempo Real
S	Seco
SE	Sudeste
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
SW	Sudoeste
TIN	Rede Irregular Triangular
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UGE	Unidade Geológica de Engenharia
UNESP	Universidade do Estado de São Paulo
UTM	Universal Transverso de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em graus Celsius
ML	Silte de Baixa Compressibilidade
CL	Argila de Baixa Compressibilidade
ψ_{res}	Sucção correspondente a umidade volumétrica residual
$C(\psi)$	Fator de correção da sucção
w_{papel}	Umidade do papel filtro
Ψ_{a2}	segundo ponto de entrada de ar
Ψ_{a1}	primeiro ponto de entrada de ar
W_0	umidade inicial
γ_d	massa específica
e_0	índice de vazios inicial
S_0	saturação inicial
W_f	umidade final
e_f	índice de vazios final
S_f	Saturação Final
σ'_v	tensão vertical efetiva
σ_{vm}	Tensão de pré-adensamento
C_c	Índice de Compressão
C_s	Índice de Recompressão
σ_{v0}	tensão vertical
σ_{vpn}	tensão de pré-consolidação do solo inundado
σ_{vps}	tensão de pré-consolidação do solo na umidade natural
e_{200}	Índice de vazios na tensão de 200kPa
dh	deslocamento horizontal
dv	deslocamento vertical
τ_r	Tensão Cisalhante
σ_r	Tensão normal
c'	Intercepto de Coesão
ϕ'	ângulo de atrito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	26
1.2	ESTRUTURA DA TESE.....	27
2	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	29
2.1	A CIDADE DE MACEIÓ COMO DOMÍNIO DE ESTUDO.....	29
2.2	ASPECTOS CLIMÁTICOS DA CIDADE DE MACEIÓ.....	31
2.3	GEOLOGIA REGIONAL: ESTADO DE ALAGOAS	32
2.4	ASPECTOS GERAIS SOBRE A FORMAÇÃO GEOLÓGICA BARREIRAS	37
2.5	ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS DA CIDADE DE MACEIÓ	39
2.6	OCUPAÇÃO EM ÁREAS DE RISCO GEOLÓGICO.....	43
2.7	PARÂMETROS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS DE ESTUDOS ANTERIORES	46
3	MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO, GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO ..	48
3.1	EMBASAMENTO TEÓRICO-CONCEITUAL.....	49
3.1.1	Cartografia Geotécnica	49
3.1.2	Banco de Dados e Sistemas de informações Geográficas	51
3.1.3	Geoestatística	54
3.1.4	Aplicações com associação do Banco de Dados, Geoestatística e SIG.	57
3.2	SISTEMATIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO BANCO DE DADOS DE SONDAGENS SPT.....	58
3.2.1	Bando de Dados SPT	58
3.2.2	Criação de Perfis Representativos de Solos de Formação Barreiras.....	61
3.3	MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO.....	68
3.3.1	Proposições Metodológicas.....	68
3.3.2	Apresentação e Análise dos Resultados do Mapeamento Geomorfológico.....	71
3.4	MAPEAMENTO GEOLÓGICO	80
3.4.1	Delimitação da Formação Barreiras na área Urbana de Maceió	80
3.4.2	Identificação das Fácies Existentes no Domínio	83
3.5	ANÁLISE GEOESTATÍSTICA PARA GERAÇÃO DE MAPAS DE RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO.....	85
3.5.1	Mapas geoestatísticos da Subárea Domínio.....	93
3.5.2	Mapas Geoestatísticos da Subárea 01	107

3.5.3	Mapas Geoestatísticos da Subárea 02	121
3.6	SÍNTESE DO CAPÍTULO	134
4	INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA	135
4.1	PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO	135
4.2	CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO DE CAMPO.....	140
4.2.1	Investigação de Superfície - Levantamento com Aeronave Remotamente Pilotada	140
4.1.1.1	Ortofotos geradas para a Grota da Moenda e Encosta do Mutange	145
4.2.2	Investigação de Subsuperfície – Sondagens à Percussão (Standard Penetration Test - SPT)	148
4.2.3	Amostragem indeformadas	155
4.3	CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO DE LABORATÓRIO.....	164
4.3.1	Ensaio de Caracterização física	164
4.3.1.1	Resultados da análise granulométrica e índices de consistência para as amostras da UFAL.	167
4.3.1.2	Resultados da análise granulométrica e índices de consistência para as amostras do HCOR.	169
4.3.1.3	Resultados da análise granulométrica e índices de consistência para as amostras da Grota da Moenda.	170
4.3.1.4	Resultados da análise granulométrica e índices de consistência para as amostras da Encosta do Mutange	172
4.3.2	Ensaio de Permeabilidade (Tri-flex)	174
4.3.2.1	Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade Tri-Flex	175
4.3.3	Determinação da Curva característica através do ensaio do papel filtro	177
4.3.3.1	Resultados obtidos no ensaio do papel filtro	180
4.3.4	Ensaio de Dispersão rápida - <i>Crumb Test</i>	183
4.3.4.1	Apresentação e análise dos resultados obtidos no ensaio Crumb Test.....	184
4.3.5	Pinhole Test	186
4.3.5.1	Apresentação e análise dos resultados obtidos no Pinhole Test	188
4.3.6	Ensaio Edométrico Duplo	193
4.3.6.1	Resultados obtidos nos ensaios Edométricos Duplo para as amostras da UFAL	194
4.3.6.2	Avaliação do potencial de colapso dos solos nos locais investigados.....	200
4.3.7	Ensaio de Cisalhamento Direto	206

4.3.7.1 Resultados obtidos nos ensaios de Cisalhamento Direto.....	207
4.3.8 Ensaio de Triaxial CID.....	225
4.3.8.1 Resultados obtidos nos ensaios Triaxiais CID para as amostras da UFAL.....	227
4.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA.....	232
5 ANÁLISE DETALHADA E INTEGRADA DOS RESULTADOS OBTIDOS..	234
5.1 SOBRE A VARIABILIDADE DOS VALORES NSPT ENCONTRADOS NAS ANÁLISES GEOESTATÍSTICA.....	234
5.2 SOBRE AS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DOS SOLOS NOS LOCAIS INVESTIGADOS	237
5.3 SOBRE A CORRELAÇÃO ENTRE A CLASSIFICAÇÃO DAS UGE E OS RESULTADOS DOS ENSAIOS E ANÁLISES GEOESTATÍSTICA.....	243
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	245
6.1 QUANTO AO MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO E GEOLÓGICO	245
6.2 QUANTO AO MAPEAMENTO GEOTÉCNICO A PARTIR DE ANÁLISES GEOESTATÍSTICAS	247
6.3 QUANTO A CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA.....	247
6.4 SUGESTÕES DE ESTUDOS/PESQUISAS FUTURAS.....	249
REFERÊNCIAS.....	251

1 INTRODUÇÃO

A Formação Barreiras representa uma das unidades geológicas mais extensas observadas ao longo do litoral brasileiro, porém ainda com insuficientes estudos quanto aos aspectos sedimentológicos e estratigráficos. Esta Formação também é responsável pelo recobrimento de mais de 72% da área urbana do município de Maceió, se estendendo sobre sua área rural, comportando atualmente importantes obras de engenharia, de expansão urbana e disponibilidade territorial.

É comum em obras de engenharia, a prática de sondagens de simples reconhecimento com realização de ensaio SPT, como instrumento de investigação geotécnica, uma vez que permitem a obtenção de parâmetros essenciais que podem embasar diversos tipos de projetos e estudos. Desde o ano de 2007 se observa na cidade de Maceió um crescimento da verticalização na região dos Tabuleiros, e com isso se intensificaram também as investigações geotécnicas sob os sedimentos de Formação Barreiras, a partir da realização de sondagens SPT.

Estas investigações possibilitaram diante do escopo desta pesquisa, a construção de um banco de dados espacial, ferramenta importante que pode auxiliar as atividades de planejamento territorial e como parâmetros iniciais que subsidiem o planejamento e investigação para execução de obras de engenharia. Este banco de dados foi construído através da utilização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que analisadas e aliadas a parâmetros geotécnicos advindos das investigações de campo e laboratório, auxiliam na compreensão do comportamento do solo na região estudada.

Os SIG estão intrinsecamente relacionados aos bancos de dados espacialmente referenciados. Estes, por sua vez, tornam-se responsáveis por armazenar grande volume de informações, tanto alfanuméricas quanto vetoriais. Suas particularidades as tornam indispensável para quantificação, qualificação e localização de problemas ambientais de determinada região. Diante disto, os SIG também possibilitaram a construção, visualização e manipulação de mapeamentos geológicos-geotécnicos no domínio estudado, não somente utilizando dados de sondagem SPT, como também através de geração de modelos digitais, que possibilitaram a melhoria nas escalas e limitações da Formação Barreiras na área estudada.

O Mapeamento Geológico de superfície foi realizado através da caracterização do meio físico que pode ser obtido através da cartografia geotécnica, que constitui uma representação gráfica da descrição, potencialidade e limitações do meio, em face de determinados tipos de intervenções e obras concernentes a urbanização, auxiliando também como instrumento para o

planejamento e direcionamento da ação humana sobre o meio ambiente (COUTINHO; MONTEIRO e OLIVEIRA, 1996).

Os dados obtidos nesse mapeamento podem ser utilizados como parâmetros iniciais para projetos de fundação, para planejamento urbano, direcionando os planos de uso e ocupação do solo, além da estimativa e avaliação dos riscos em diferentes cenários.

Apesar de alguns estudos realizados anteriormente na cidade de Maceió, tais como os trabalhos realizados por Gomes e Toujaguez (2016), Marques (2006), Nobre (2006), Anjos e Queiroz de Carvalho, (1993), Anjos (1992) e Anjos (1991), as informações existentes ainda são insuficientes para compor uma adequada caracterização sobre o aspecto geotécnico/geológico dos sedimentos de Formação Barreiras.

Diante do exposto, este trabalho contribui não somente para o estado da arte, a partir da obtenção e disponibilização de informações geotécnicas sobre a Formação Barreiras na cidade de Maceió, como também para um melhor entendimento sob os aspectos geológicos-geotécnicos, fazendo uso de geotecnologias aplicadas à análise e interpretação de dados.

A obtenção e disponibilização de informações acerca do comportamento geotécnico dos sedimentos de Formação Barreiras na cidade de Maceió representa ganhos significativos para a comunidade geotécnica, tendo em vista a heterogeneidade no comportamento e características geológicas-geotécnicas desta formação geológica na costa brasileira.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta pesquisa teve como objetivo principal realizar um mapeamento geomorfológico-geológico-geotécnico da Formação Barreiras na área urbana do município de Maceió – Alagoas, fazendo uso de dados altimétricos advindos da Base Cartográfica Municipal, da construção de um banco de dados de sondagens SPT, análises geoestatística e ensaios de campo e laboratório, de forma a fornecer subsídios para a compreensão desses sedimentos para Planejamento Urbano, escolha de tipos de fundações entre outras aplicações. Para que este objetivo fosse alcançado, alguns objetivos específicos foram determinados:

1. Mapear e construir um banco de dados espacial a partir das sondagens SPT localizadas sob os sedimentos de Formação Barreiras na cidade de Maceió, Alagoas;
2. Delimitar a extensão da Formação Barreiras na área urbana de Maceió, estudos altimétricos, geológicos e geomorfológicos.

3. Realizar avaliação geoestatística da resistência a penetração do solo (Nspt) na área estudada;
4. Realizar a caracterização geotécnica do solo em locais definidos, através de investigações em campo e laboratório.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

A estrutura da tese está distribuída em 06 capítulos. O capítulo 01 apresenta a introdução geral, contendo uma breve contextualização e abordagem da pesquisa, bem como a importância e contribuição para o campo científico, incluindo os objetivos gerais e específicos.

O capítulo 02 traz as características gerais da área de Estudo, destacando aspectos da geologia regional do estado de Alagoas, com ênfase nos aspectos geológicos, geomorfológicos e climáticos do domínio estudado, uma abordagem geral sobre a ocupação em áreas de risco na cidade, além de trazer o estado da arte com relação a estudos realizados anteriormente na cidade de Maceió, que contribuíram para a compreensão da Formação Barreiras.

O mapeamento geomorfológico, geológico e geotécnico é apresentado no capítulo 03, que traz um breve embasamento teórico conceitual sobre aspectos das tecnologias da geoinformação e de suas contribuições para a geotecnia. O mapeamento apresentado nesse capítulo traz quanto ao aspecto geomorfológico, o mapeamento o relevo da área urbana de Maceió a partir de dados morfométricos. Quanto ao aspecto geológico, a delimitação da Formação Barreiras no município de Maceió, baseou-se em dados altimétricos, geomorfológicos e mapas geológicos pré-existentes. Quanto ao aspecto geotécnico, o capítulo se baseou na construção de um banco de dados de sondagens SPT, que foram espacializadas e geoprocessadas na escala de 1:10.000, de forma a obter perfis representativos de solo para a área estudada, a identificação das fácies geológicas existentes além da geração de mapas de resistência à penetração a partir de análises geoestatísticas na área de estudo.

O capítulo 04 apresenta, uma caracterização geotécnica baseada em ensaios de campo e de laboratório de 04 locais amostrados, dois em encostas ocupadas e dois nos platôs de Formação Barreiras. A caracterização de campo contou com o levantamento com aeronave remotamente pilotada (RPA) para identificação das melhores condições para a realização da coleta de amostras indeformadas, bem como da execução de sondagens a percussão. A metodologia utilizada para a caracterização de laboratório também foi apresentada neste capítulo, contando com uma campanha de ensaios geotécnicos para determinação de parâmetros físicos e de resistência, como granulometria, erodibilidade, permeabilidade e

sucção, complementando e adicionando os conhecimentos adquiridos no mapeamento geotécnico, além de fornecer dados inéditos para as encostas estudadas, e ao fim, construindo uma síntese dos resultados obtidos no capítulo. O capítulo 05 realiza uma análise integrada dos dados obtidos conjuntamente para a cidade de Maceió, realizando uma discussão quanto à variabilidade dos valores N_{spt} a partir das análises geoestatísticas, relacionando-as com perfis existentes na área de estudo, sobre as características geotécnicas dos solos investigados, correlacionando-os entre si e com a literatura e realizando uma estimativa de parâmetros geotécnicos por Unidades Geológicas de Engenharia (UGE) identificadas.

No capítulo 06 faz-se as considerações finais do trabalho, apresentando as principais conclusões e recomendações para embasar pesquisas posteriores.

Ao fim, são apresentadas as referências bibliográficas que serviram de base à presente pesquisa.

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo tem por objetivo, apresentar as principais características da área estudada, a cidade de Maceió – Alagoas. Foram abordadas informações territoriais existentes relacionadas aos aspectos climáticos, pedológicos, geomorfológicos e geológicos.

Em relação ao aspecto geológico, foram brevemente abordadas questões no que tange a geologia da bacia sedimentar Sergipe-Alagoas, com ênfase na geologia local, detalhando particularidades quanto ao comportamento geológico-geotécnico advindo de estudos anteriores e trazendo informações gerais sob a pedogênese da Formação Barreiras e de sua importância para a engenharia geotécnica, com ênfase no contexto regional, por ser encontrada em proporções significativas na área de estudo, onde se debruçam os principais aspectos científicos discutidos nesta pesquisa.

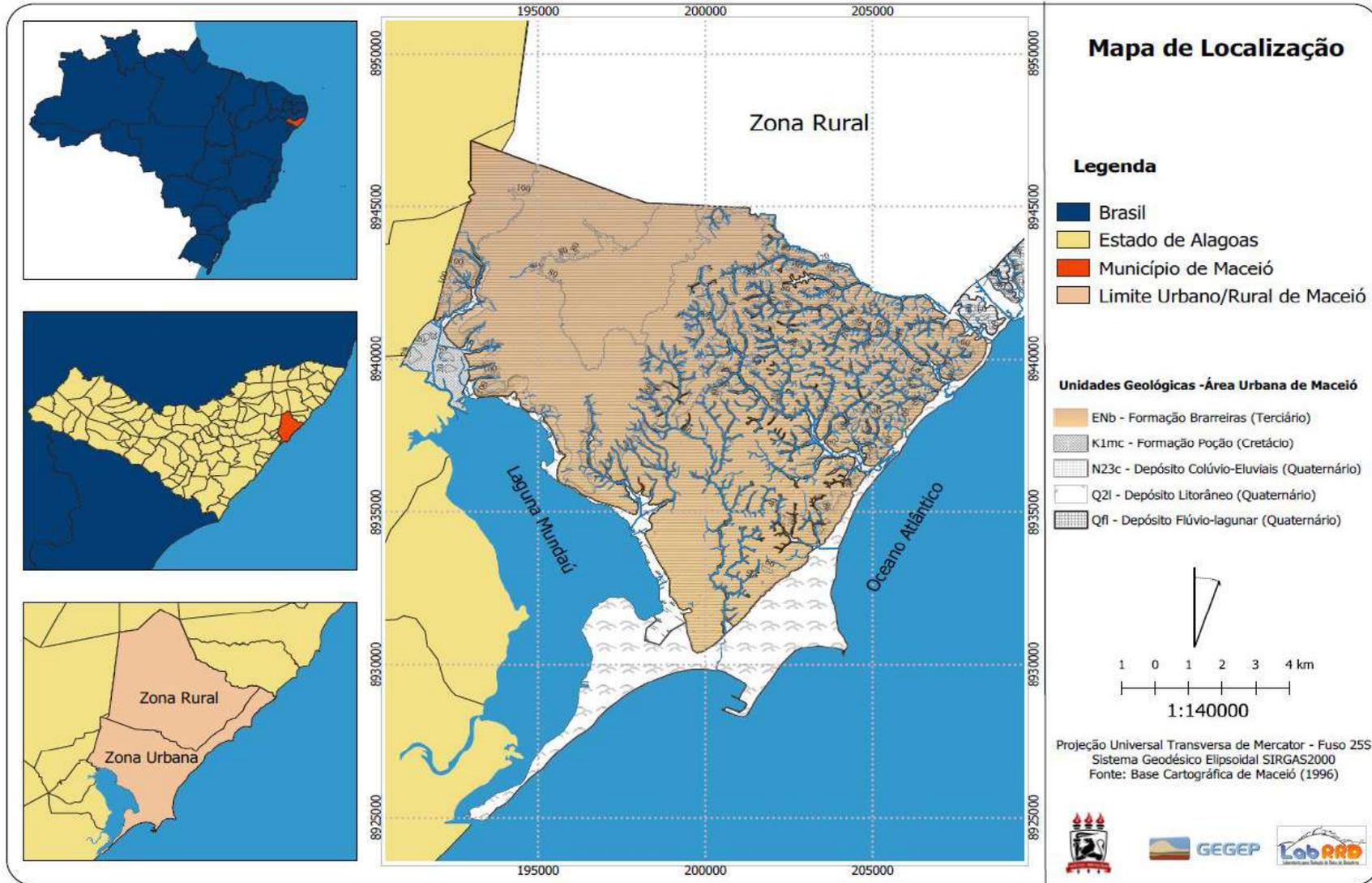
2.1 A CIDADE DE MACEIÓ COMO DOMÍNIO DE ESTUDO

A cidade de Maceió possui uma área territorial de aproximadamente 511km² e uma população de 1.025.60 habitantes (IBGE, 2020). Está localizada no litoral do Estado de Alagoas, Nordeste do Brasil, banhada pelo Oceano Atlântico na sua porção leste e por uma das lagunas que denominaram o estado, a laguna Mundaú, na porção oeste. Territorialmente, Maceió possui uma divisão administrativa composta atualmente por 50 bairros, com destaque para uma região costeira densamente ocupada e construída, uma região lagunar, onde se encontra parte do sítio histórico da cidade, e a região dos Tabuleiros, cortado por vales ocupados.

A região do litoral Norte da cidade se difere das características das demais áreas, por possuir grande potencial turístico, porém com baixa densidade populacional e disponibilidade territorial. Essa região possuía restrições quanto ao uso e ocupação do solo previstas na legislação municipal, porém, nos últimos anos, tem sido objeto de grandes investimentos em infraestrutura e incentivo a ocupação controlada.

A Figura 1 apresenta um mapa de localização da cidade de Maceió, com destaque para a geologia local.

Figura 1 - Mapa de Localização do Município de Maceió



Fonte: A autora (2022)

2.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS DA CIDADE DE MACEIÓ.

Maceió possui um clima quente e úmido, classificado como tipo As', segundo a classificação Köppen. Existem duas estações bem definidas, a chuvosa, que vai de março a agosto, com a quadra chuvosa se estendendo entre os meses de abril a julho, onde ocorrem as maiores precipitações, e a estação seca, que se estende entre os meses de setembro a fevereiro.

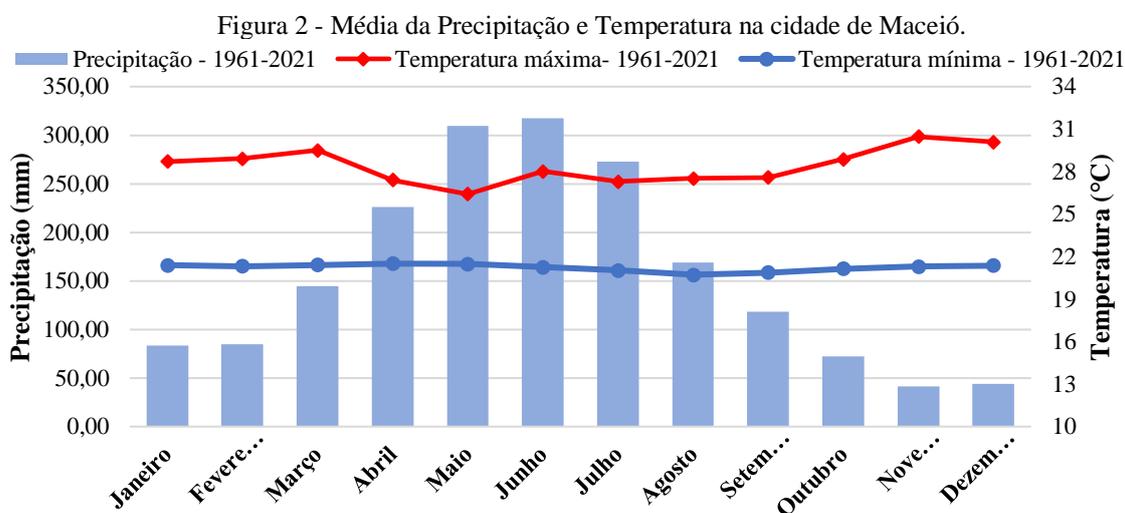
Os dados de precipitação e temperatura média anual da cidade de Maceió foram extraídos da estação OMM 82994, que possui Latitude $-9,66^\circ$ e longitude de $-35,7$. Estes dados encontram-se digitados no Banco de Dados Meteorológico para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A Tabela 1 apresenta os valores médios de precipitação média mensal e temperatura média mensal máxima e mínima para a cidade de Maceió, entre os períodos de 1961 e 2021, podendo ser observado, a precipitação média acumulada foi de 1883,81mm e a temperatura máxima anual média foi de $28,40^\circ\text{C}$ e a temperatura mínima anual média foi de $21,23^\circ\text{C}$.

Tabela 1 - Valores médios de precipitação e temperatura para a cidade de Maceió.

	Meses (1961-2021)											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Precipitação (mm)	83,53	84,74	144,78	226,22	309,41	317,67	272,55	168,70	118,38	72,12	41,39	44,31
Temperatura máxima ($^\circ\text{C}$)	28,71	28,91	29,50	27,42	26,41	28,02	27,29	27,53	27,58	28,88	30,46	30,09
Temperatura mínima ($^\circ\text{C}$)	21,40	21,32	21,42	21,50	21,49	21,26	21,03	20,72	20,86	21,14	21,31	21,37

Fonte: INMET, 2022.

A Figura 2 apresenta o gráfico contendo os valores de temperatura e precipitação elaborado a partir das normais climatológicas.



Fonte: A autora (2022)

2.3 GEOLOGIA REGIONAL: ESTADO DE ALAGOAS

A bacia sedimentar Sergipe-Alagoas ocorre ao longo do litoral e a Formação Barreiras recobre discordantemente as formações mais antigas da Bacia Alagoas especificamente, assim como o embasamento cristalino, de idade pré-cambriana, situado a noroeste. Esta unidade ainda não foi datada nesta área, mas estudos de depósitos correlacionáveis no norte do Brasil indicaram uma idade Miocena (aprox. 24 milhões de anos) para esses depósitos (ARAI *et al.* 1988; ARAI, 1997). Os sedimentos desta bacia assentam-se sobre rochas ígneas e metamórficas, que formam o embasamento a mais de 6.000m de profundidade.

Tectonicamente, a bacia Sergipe-Alagoas é separada do embasamento cristalino através de um sistema de falhas de gravidade de direção preferencial nordeste que reflete à fase de “rift” (quebramento) ocorridos durante a separação dos continentes americano e africano, a partir do Cretáceo Inferior (idade 100,5-145 Ma), resultante na Formação de “granbens” (depressão de origem tectônica, geralmente em forma de um vale), que mostram escalonamento no sentido do oceano (sul/sudeste) (SANTOS; LIMA, FERREIRA, 2004).

Feijó e Vieira (1990) individualizaram a bacia sedimentar Sergipe-Alagoas considerando as importantes diferenças estruturais e estratigráficas. Esta bacia é limitada a oeste pela linha de falha principal no contato com o cristalino que aflora no interior do continente (LIMA, 1990) com extensão de aproximadamente 350km e largura média de 30km em terra, possuindo ainda uma área emersa de 13.000km² e a porção submersa alcança 20.000km² (FEIJÓ, 1994).

Ainda no Cretáceo Inferior, ocorreu a primeira transgressão marinha na bacia, com a deposição de clásticos grossos, evaporitos e carbonatos constituintes do Grupo Sergipe (Form. Riachuelo e Cotinguiba). Sobrejacentes a estes, tem-se o Grupo Piaçabuçu (Form. Calumbi, Mosqueiro e Marituba), constituído por clásticos grossos e carbonatos marinhos Neocretácio e Terciários, que em Alagoas não são encontrados na superfície (SANTOS, 1998).

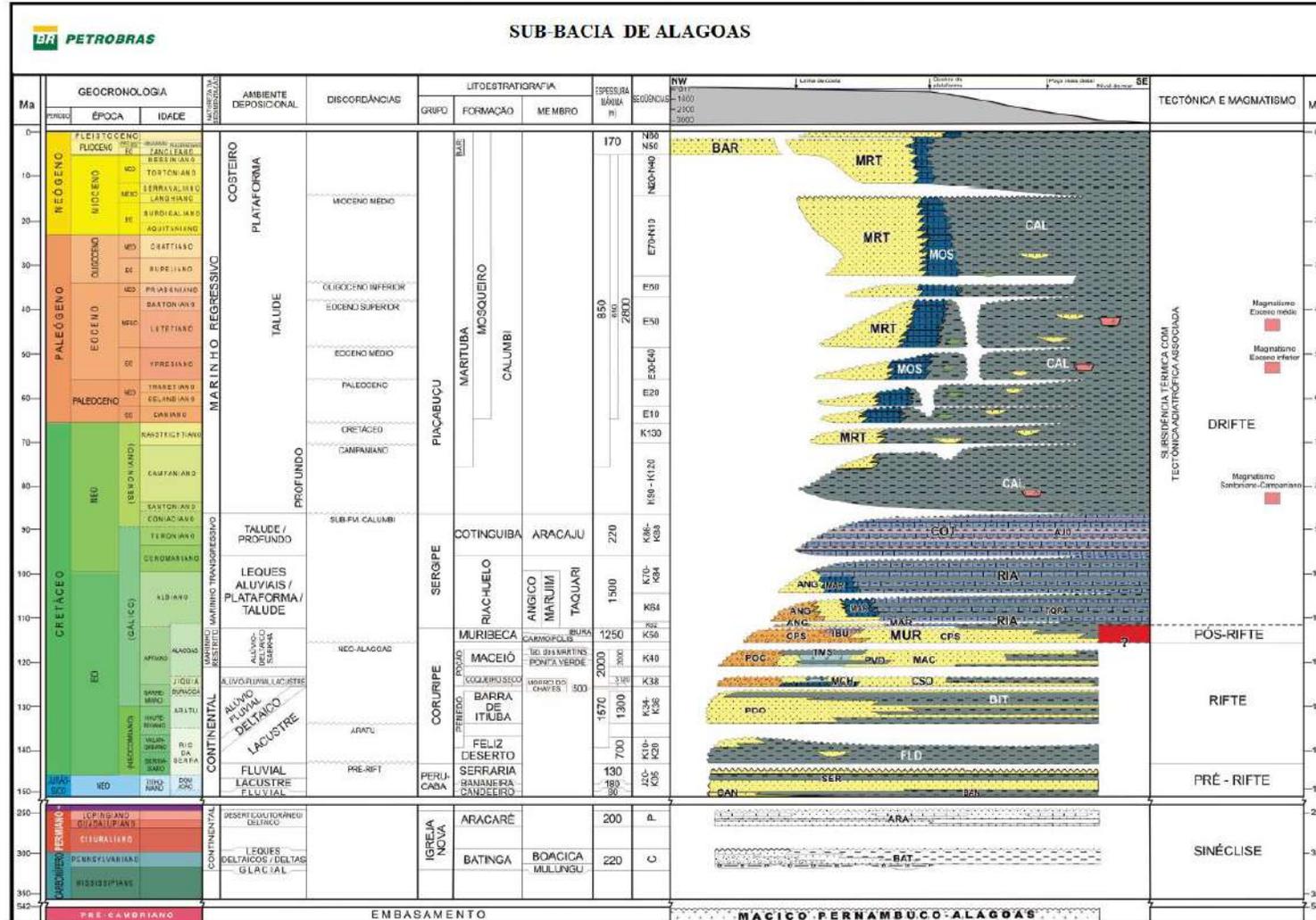
Especificamente a Bacia Alagoas tem sua história deposicional no início no Paleozoico Superior, com a deposição dos clásticos do Grupo Igreja Nova (Formação Batinga e Aracaré). Sobrejacente a estas, depositam-se os clásticos Fúlvio-lacustres do grupo Perucaba (Formação Candeeiro, Bananeira e Serraria) e acima estão sedimentos clásticos e evaporitos do Grupo Coruripe (Formação Itiúba, Penedo, Coqueiro Seco, Poção, Ponta Verde e Maceió (SANTOS, 1998). Esta bacia ocupa uma faixa costeira alongada com cerca de 220km de extensão e aproximadamente 40km de largura, tendo como limite norte a Bacia Pernambuco-Paraíba e ao Sul a Bacia Sergipe.

A Bacia Alagoas é caracterizada por subdividir-se em blocos ou compartimentos tectônicos limitados por grandes falhas. Mendes *et al.* (2017) identificaram duas principais direções de falhamentos nesta entidade: a direção NE-SW mostra-se controlada da deposição dos sedimentos dos andares Jequiá e Alagoas e é responsável também pela extensão Sudoeste da bacia. A segunda, dada pela direção NW-SE, constitui possível zona de acomodação de esforços representando parcialmente falhas de transferência.

No Terciário, época Mioceno, já em ambiente continental, foram depositados os clásticos da Formação Barreiras, que serviram de cobertura e para registro sedimentar. Por fim, culminando o processo de deposição, a variação do nível do mar e os agentes de erosão propiciaram e propiciam até hoje o acúmulo de sedimentos marinhos, fluviais, eólicos e fluvio-lacustres que compõem a planície costeira quaternária.

O início do processo de sedimentação deu-se quando as placas ainda formavam um só continente, no período Paleozóico, desenvolveu-se sobre rochas graníticas do Batólito Alagoas-Pernambuco (LANA, 1990). Sua evolução continua até os dias atuais com a deposição dos sedimentos quaternários. A Figura 3 apresenta a carta estratigráfica da bacia Alagoas proposta por Campos Neto e Sousa Lima (2007).

Figura 3 - Carta Estratigráfica da Bacia Alagoas



Fonte: Campos Neto e Sousa Lima (2007)

O mapeamento geológico do estado de Alagoas possui diversos registros, em escalas pequenas. Um desses registros foi elaborado pela Petrobras e DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral – Atual Agência Nacional de Mineração – ANM) para a bacia Sergipe-Alagoas no ano de 1975, na escala de 1:50.000, com o objetivo de investigar a existência de Petróleo na região. O segundo mapa geológico foi elaborado pelo governo do estado em parceria com o DNPM no ano de 1984, em escala de 1:250.000, apresentando-se apenas em uma versão impressa.

A Figura 4 apresenta uma parte da coluna estratigráfica do mapa geológico do estado de Alagoas, mostrando de forma clara a extensão dos sedimentos de Formação Barreiras aflorando por todo o litoral alagoano, comum nas falésias erodidas ao longo das praias e nas vertentes íngremes dos vales, recobrimdo em muitas situações quase a totalidade de alguns municípios.

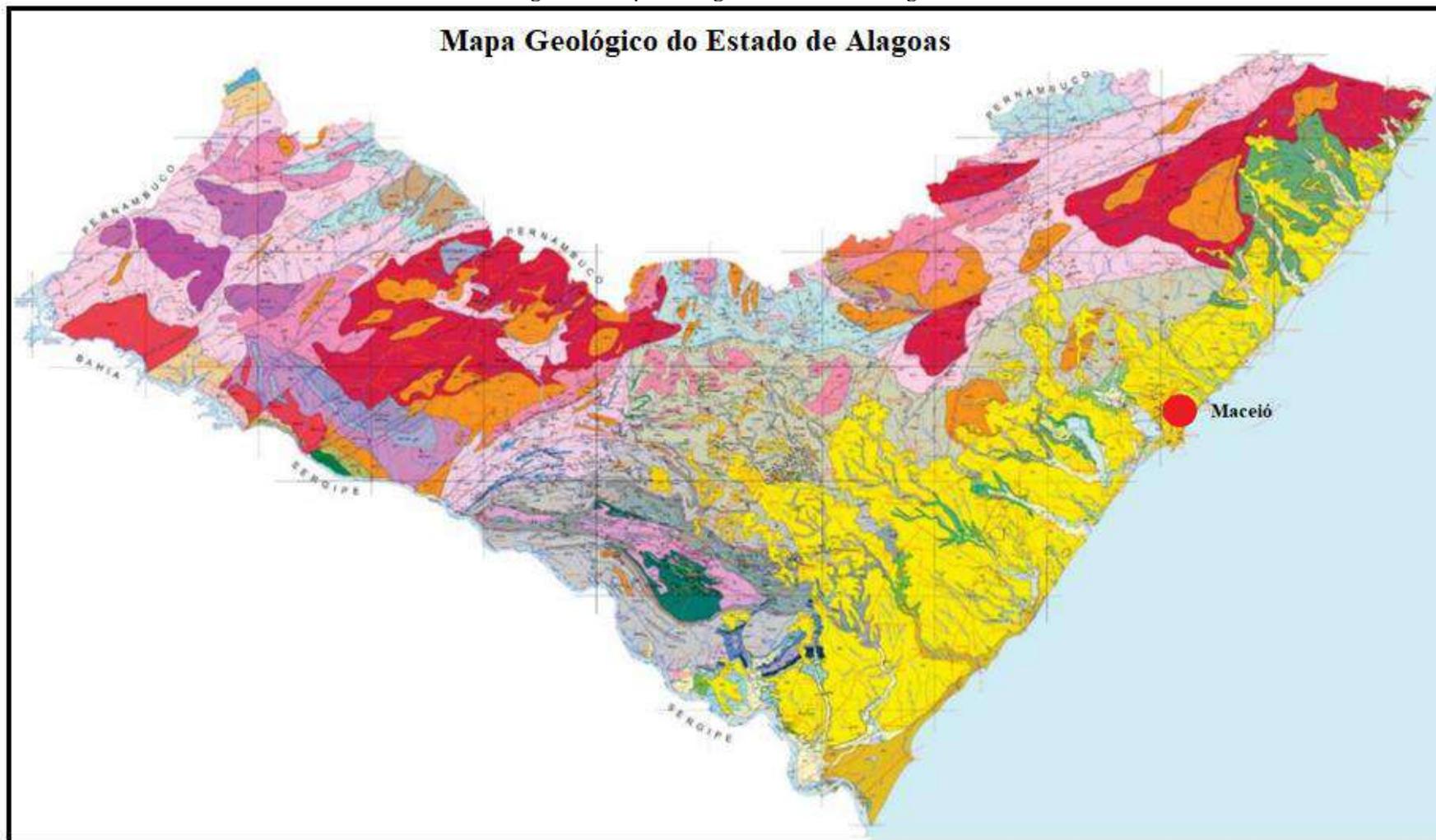
Figura 4 - Coluna estratigráfica do mapa geológico do estado de Alagoas

Q2a	Depósitos Aluvionares : areia com intercalações de argila e cascalho de materia orgânica
Q2l	Depósitos Litorâneos: areias e dunas móveis.
Q2pm	Depósitos de Pântanos e Mangues : areias, siltes e argilas e matéria orgânica
Q2b	Depósitos Litorâneos Indiferenciados: areias e siltes argilosos ricos em matéria orgânica.
Q2fl	Depósitos Flúvio-Lagunares: lamas arenosas e carbonosas
N23c	Depósitos Colúvio-Eluviais: areias argilosas e argilas
GRUPO BARREIRAS	
ENb	Arenitos argilosos a conglomeráticos, argilitos puros a arenosos e conglomerados

Fonte: Mendes (2017).

O mapa geológico mais atual do estado está apresentado na Figura 5 e foi elaborado pela Superintendência Regional do Recife da CPRM (Serviço Geológico do Brasil), através do projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado de Alagoas, na escala de 1:250.000, e utilizou base planimétrica digital, mosaico Geocover 2.000 e imagem ETM + Landsat 7.

Figura 5 - Mapa Geológico do Estado de Alagoas



Fonte: Adaptado de Mendes (2017).

2.4 ASPECTOS GERAIS SOBRE A FORMAÇÃO GEOLÓGICA BARREIRAS

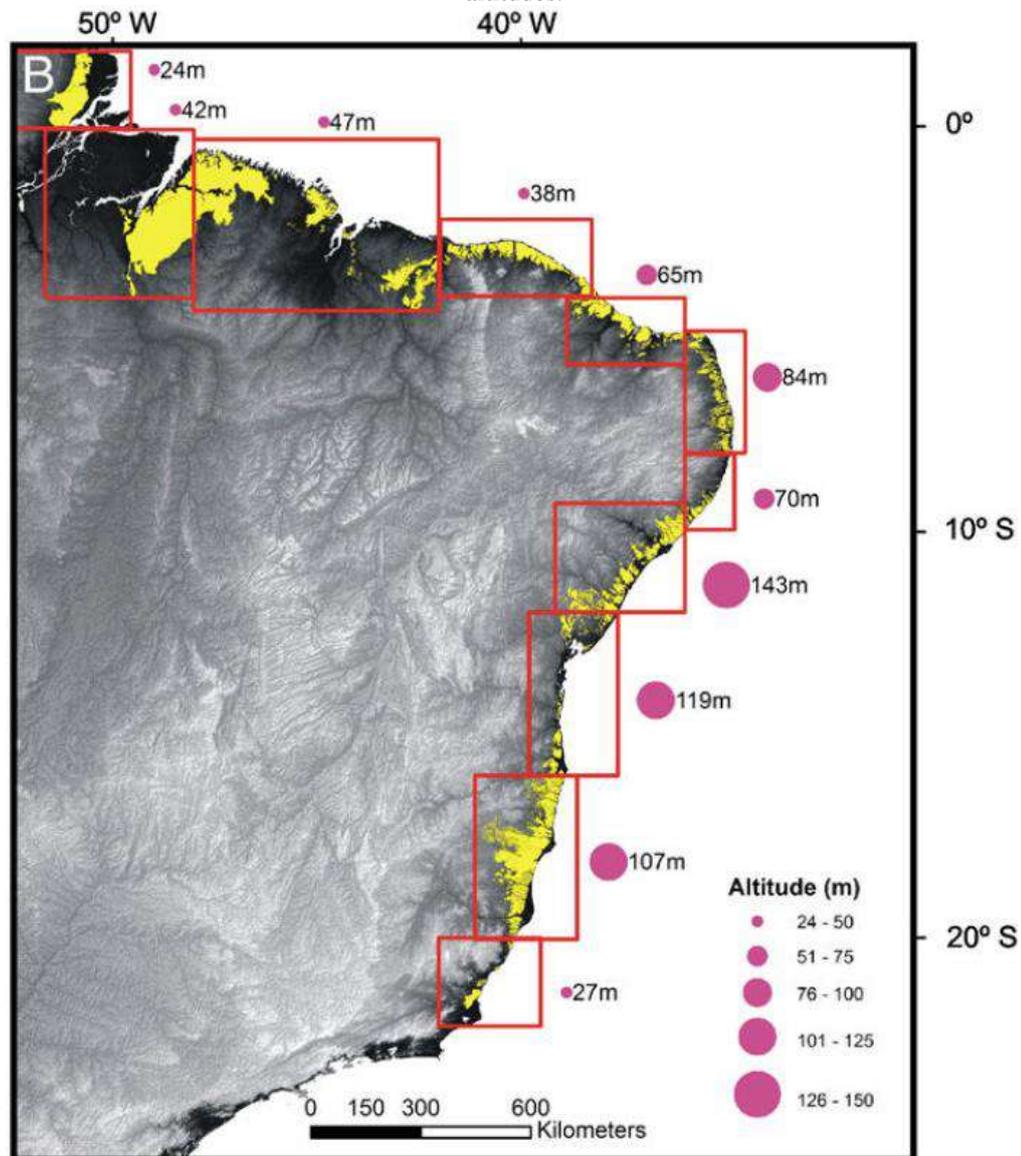
Segundo Moura-Fé (2014) os estudos científicos sobre a Formação Barreiras, tiveram início com Branner no ano de 1902, que mencionou pela primeira vez o nome “Barreiras” para denominar os depósitos situados ao longo da costa nordestina, associando as feições morfológicas aos sedimentos localizados na cidade de Paulista, pertencente a Região Metropolitana de Recife – Pernambuco (ALHEIROS et al. 1998, MAIA, 1998, SAADI e TORQUATO, 1992).

A litologia dessa Formação é composta por sedimentos clásticos de origem continental, que tiveram sua deposição associada aos eventos cenozoicos de natureza climática e/ou tectônica, com idade Miocênico (Terciário). São considerados sedimentos mal consolidados caracterizado por camadas sub-horizontais de granulometria diferente, associada a processos fluviais, sendo considerada a unidade geológica de ocorrência mais expressiva da costa brasileira, aflorando desde o Estado do Rio de Janeiro até o Amapá, sendo particularmente bem representada ao longo de inúmeras falésias costeiras descontínuas.

Como pode ser observado na Figura 6, do norte ao sul da costa brasileira, esses depósitos estão localizados na extensão oeste de várias bacias, tais como Cumuruxatiba, Jequitinhonha, Camamu-Almada, Recôncavo-Tucano, Sergipe-Alagoas, Bacias da Paraíba e Potiguar (ROSSETTI, BEZERRA, DOMINGUEZ, 2013; ALHEIROS, *et al.* 1988; COUTINHO & SEVERO, 2009).

Os sedimentos da Formação Barreiras apresentam-se com coloração viva, variando de alaranjado, vermelho, roxo, amarelo até branco. Essa variação de coloração se dá em função dos diferentes estágios de oxidação do ferro que as colorem, ou ainda decorrente da argilização dos grãos de feldspato. Esses sedimentos podem ser areias quartzosas, de diversos tamanhos, podendo apresentar grande porcentagem de pseudo-matriz argilosa, ou ainda intercalação de argilas cauliníticas, argilas maciças e siltes, sob a forma de camadas com espessura decimétrica (ALHEIROS, FERREIRA, 1991; LIMA, 1990). Possuem como argilomineral preponderante a caulinita, sendo comum ainda, o desenvolvimento de níveis de endurecimento com a presença de óxido de ferro, atribuindo maior resistência a estas camadas, bem como a ocorrência de camadas de diamictitos (rochas conglomeráticas).

Figura 6 - Ocorrência da Formação Barreiras ao longo da margem continental do Brasil com suas respectivas altitudes.



Fonte: Rossetti *et al.* (2013).

Uma característica importante da Formação Barreiras é a identificação de suas Fácies Sedimentares, que transmitem informações da Formação, tais como seus processos de transporte, deposição e/ou diagênese. De acordo com Christofolletti (1981), os sedimentos que vão sendo depositados através de uma dada bacia, terão características e aspectos gerais diferentes, os quais são correlacionáveis com os ambientes locais de deposição. Essas variações laterais, dentro da bacia de sedimentação, são chamadas de fácies sedimentares. Alheiros *et al.* (1998) através de estudo das fácies ambientais desses sedimentos, verificaram que estes constituem um sistema deposicional fluvial do tipo entrelaçado, interagindo com fácies de leques aluviais, mostrando pelo menos três fácies distintas, sendo estas consideradas:

- a) Leque Aluvial proximal: granulação grossa e má seleção granulométrica, com conteúdo de argila disseminado pelo sedimento, podendo apresentar areias grossas e conglomeráticas;
- b) Canal Fluvial: é disseminado pelo sedimento em decorrência principalmente da argilização dos feldspatos que constituem na grande parte dos grãos de areia, sendo caracterizada por ser de base arenosa e mais suscetível a processos erosivos;
- c) Leque Distal/planície aluvial: nesta facie os sedimentos mostram estratificação horizontal com intercalação de camadas arenosas e argilosas, possuindo conteúdo argiloso mais significativo de granulometria fina a média.

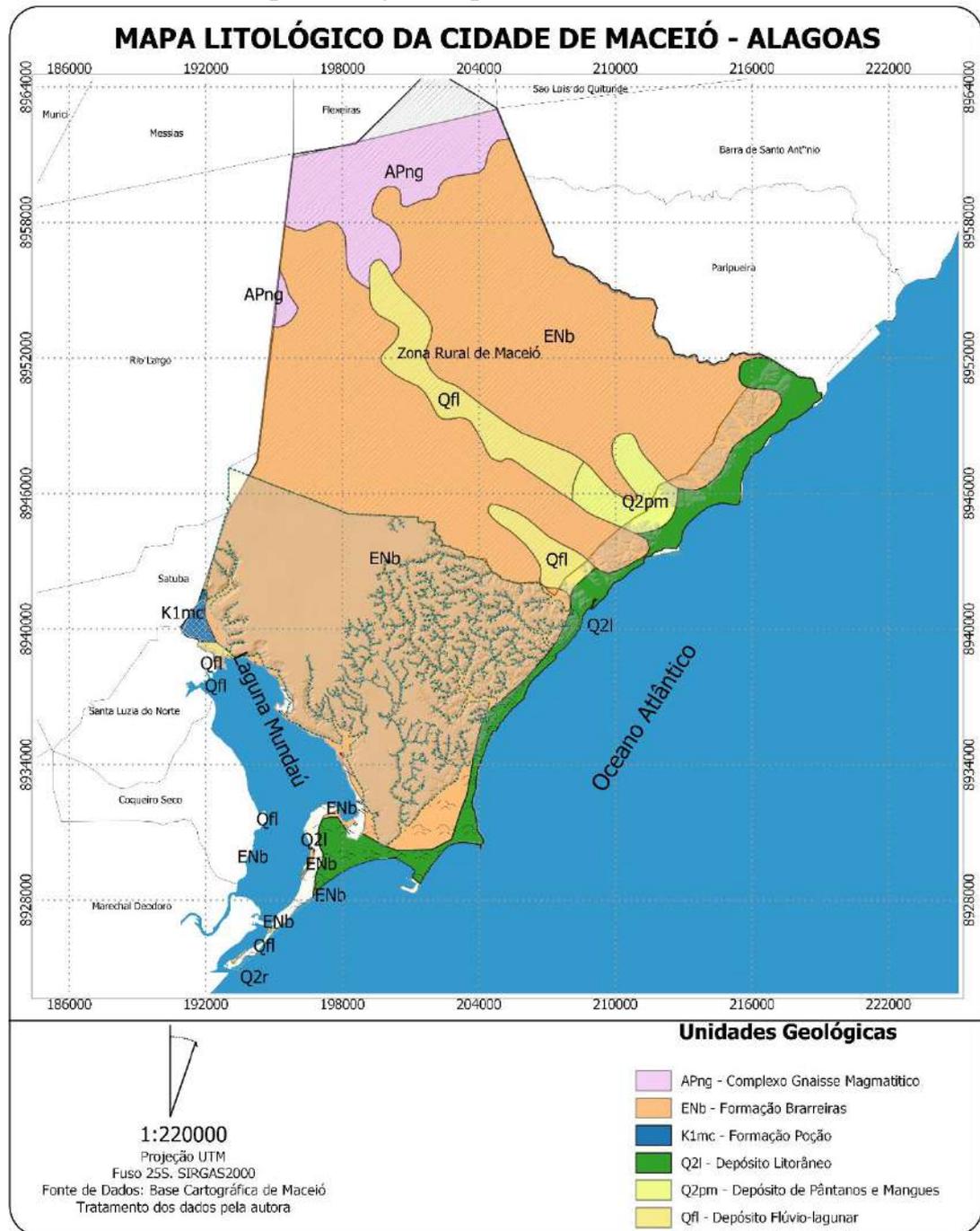
2.5 ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS DA CIDADE DE MACEIÓ

Aproximadamente 72% da área urbana cidade de Maceió está localizada sobre terrenos sedimentares correspondente a Formação Barreiras, esta considerada a última deposição da Bacia Sedimentar Alagoas, ocorre em Maceió com uma largura média de 20km, formando um pacote entre 60 a 130m (SANTOS, LIMA e NETO, 2004).

Os quaternários resultam da ação marinha, fluvial e eólica, que originou uma planície litorânea e lagunar com terraços marinhos e lacustres, cordões arenosos e antigos estuários afogados que dão origem às lagoas. A Figura 7 apresenta o mapa Litológico da cidade de Maceió.

Ainda segundo Santos, Lima e Neto (2004), uma característica importante da Formação Barreiras na cidade de Maceió é seu imenso potencial hídrico subterrâneo, sendo aproveitado através da perfuração de inúmeros poços que abastecem a população e as indústrias da cidade. Segundo Nobre (2006) as Formações Barreiras e Marituba são as mais superficiais, com espessuras superiores a 200m, caracterizados pelo sistema aquífero Barreiras e Barreiras/Marituba.

Figura 7 - Mapa Litológico da Cidade de Maceió

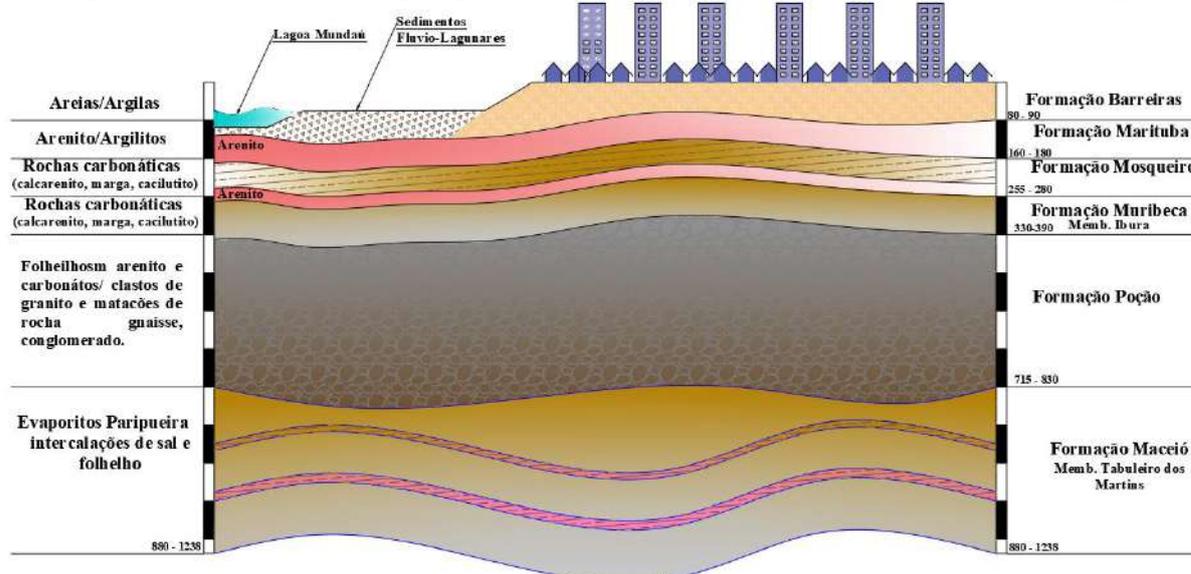


Fonte: adaptado de Mendes (2017).

Para compreender melhor a geologia local e os depósitos das diversas formações geológicas que compõe o solo e subsolo da região, foi construído um perfil geológico demonstrativo (Figura 8), adaptado do relatório de Investigações de Mecânica das Rochas da Formação Salina e da Camada Sobrejacente do Campo de Cavernas da Braskem em Maceió

(INSTITUT FÜR GEBIRGSMECHANIK, 2022), que disponibilizou dados advindo do poço estratigráfico perfurado nas proximidades da laguna Mundaú.

Figura 8 - Perfil de formações geológicas em profundidade na seção dos bairros Pinheiro e Mutange.



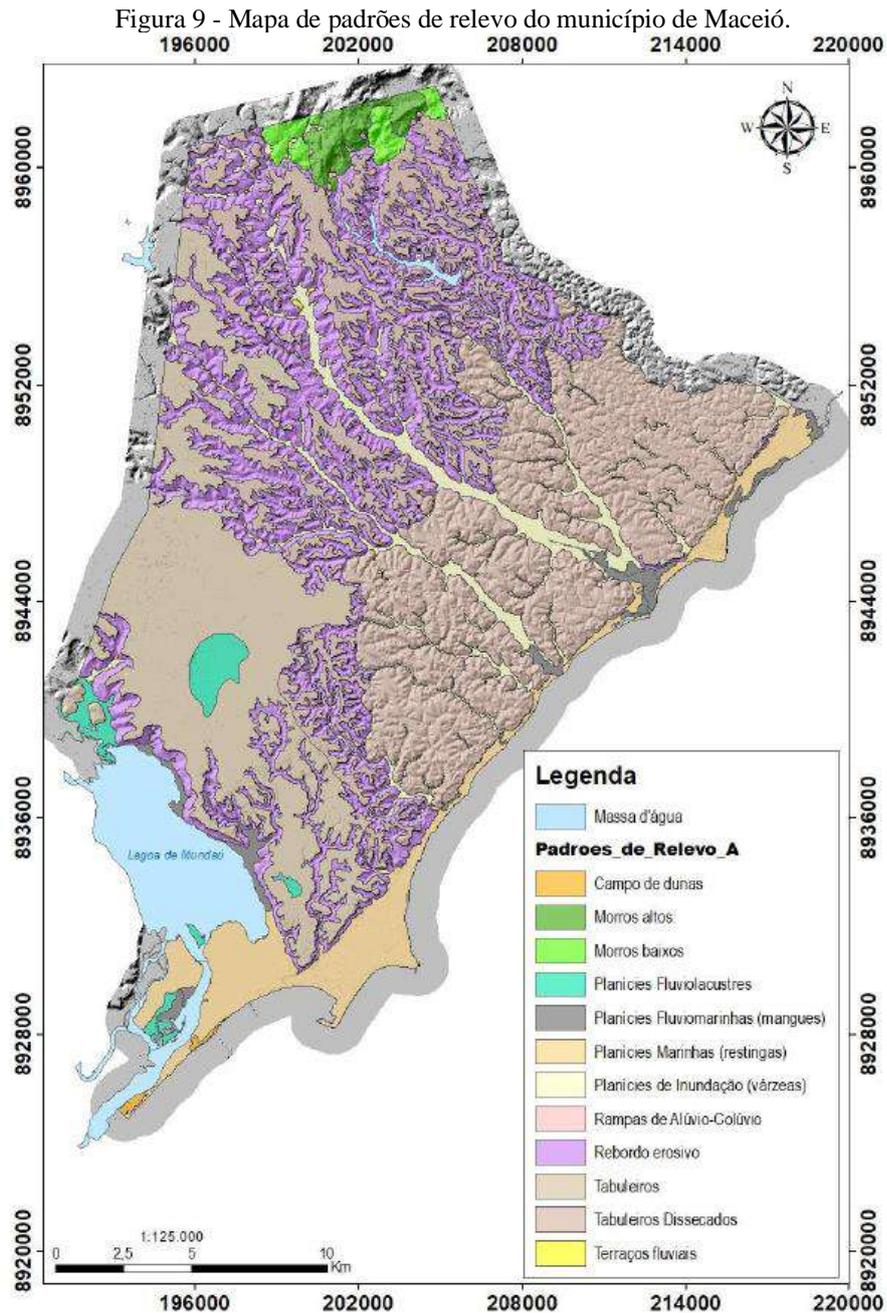
Fonte: Adaptado de Institut Für Gebirgsmechanik (2022).

Os estudos geológicos/geotécnicos de solos de Formação Barreiras na cidade de Maceió são de fundamental importância, levando em consideração a proporção de sua cobertura sob o município, grande parte das principais obras de engenharia são realizadas sob estes sedimentos, que possui grandes deficiências quanto ao aprofundamento de estudos, contando com a experiência de geotécnicos locais na execução das obras.

Quanto ao relevo, Maceió caracteriza-se por três tipos distintos: os tabuleiros costeiros, a planície litorânea e a planície lagunar. Os Tabuleiros formam um corpo alongado acompanhando toda a extensão do litoral. Seu relevo é ligeiramente plano com declividade suave, oscilando entre 0 e 5%, composto basicamente por sedimentos do Terciário da Formação Barreiras e eventualmente na parte inferior, ocorrem sedimentos cretáceos que bordejam a planície costeira, normalmente com extensos corpos sub-horizontais, terminando abruptamente na forma de falésias ao longo da costa (BRASIL, 1983).

Na Planície Litorânea, encontram-se unidades estuarinas, praias, dunas e cordões litorâneos, marcada em toda costa a leste por recifes de arenitos e corais. A planície lagunar, possui relevo plano, com uma faixa estreita e cotas inferiores a 10m, constituída de sedimentos quaternários recebendo ainda sedimentos dos rios afluentes do Mundaú, sofre ação antrópica de aterramento dos canais fluviais para a construção de habitações.

O CPRM (2019) elaborou um mapa de padrão de Relevo em Maceió (Figura 9), em que é apresentado claramente rebordos erosivos por toda a extensão do município e tabuleiros dissecados na extensão do litoral Norte. Segundo Barbosa (1985), a dissecação dos sedimentos da Formação Barreiras faz aflorarem rochas mesozoicas da Bacia Alagoas ou do embasamento pré-cambriano, impondo relevo de formas mais acidentadas.



2.6 OCUPAÇÃO EM ÁREAS DE RISCO GEOLÓGICO.

As escarpas compostas por sedimentos de Formação Barreiras são facilmente identificadas nas vertentes dos vales fluviais que percorrem o Tabuleiro Costeiro na cidade de Maceió, marcando uma transição clara no contato com a planície litorânea, lagunar e de inundação.

As falésias da Formação Barreiras podem ser encontradas no contato com a planície litorânea e os Tabuleiros, mais evidentes ao norte (na direção da Rodovia AL-101, sentido Litoral Pernambucano) onde a faixa é mais estreita e a ocupação menos densa. Também podem ser vistas nas proximidades da laguna Mundaú, marcando uma transição entre a Planície Fúlvio-lagunar e os sedimentos de Formação Barreiras, e nas vertentes dos vales fluviais que percorrem o Tabuleiro Costeiro.

A geomorfologia de Maceió apresenta vales fluviais com vertentes íngremes, e quando ocupadas irregularmente, são conhecidas popularmente como “Grotas”, que formam vales encaixados, recortando os tabuleiros, que são inicialmente estreitos, formando perfis transversais em “V” nos altos e médios cursos e alargam-se nas planícies marinhas e lagunar, no baixo curso do rio, quando abrem-se em “U” (ANJOS, 1992). Nos cursos fluviais e nos corpos lagunares são identificados indícios, tais como inflexões ou cursos retilíneos no padrão de drenagem, direcionamento das lagoas, e paredões retilíneos que refletem influências de caráter estrutural (BRASIL, 1983). A Figura 10 (a) apresenta uma área de ocupação no topo dos Tabuleiros e na base da encosta, transição entre os sedimentos litorâneos e a Formação Barreiras, nas proximidades do Instituto Federal de Educação, mostrando ainda a Laguna Mundaú ao fundo. Já a Figura 10 (b) apresenta uma fotografia da grota no complexo do Vale do Reginaldo, baixo curso do Riacho do Reginaldo.

Figura 10 - (a) Fotografia da ocupação de encosta nas proximidades do Instituto Federal de Alagoas e (b) Grota no baixo curso do Riacho do Reginaldo.



Fonte: A autora (2022)

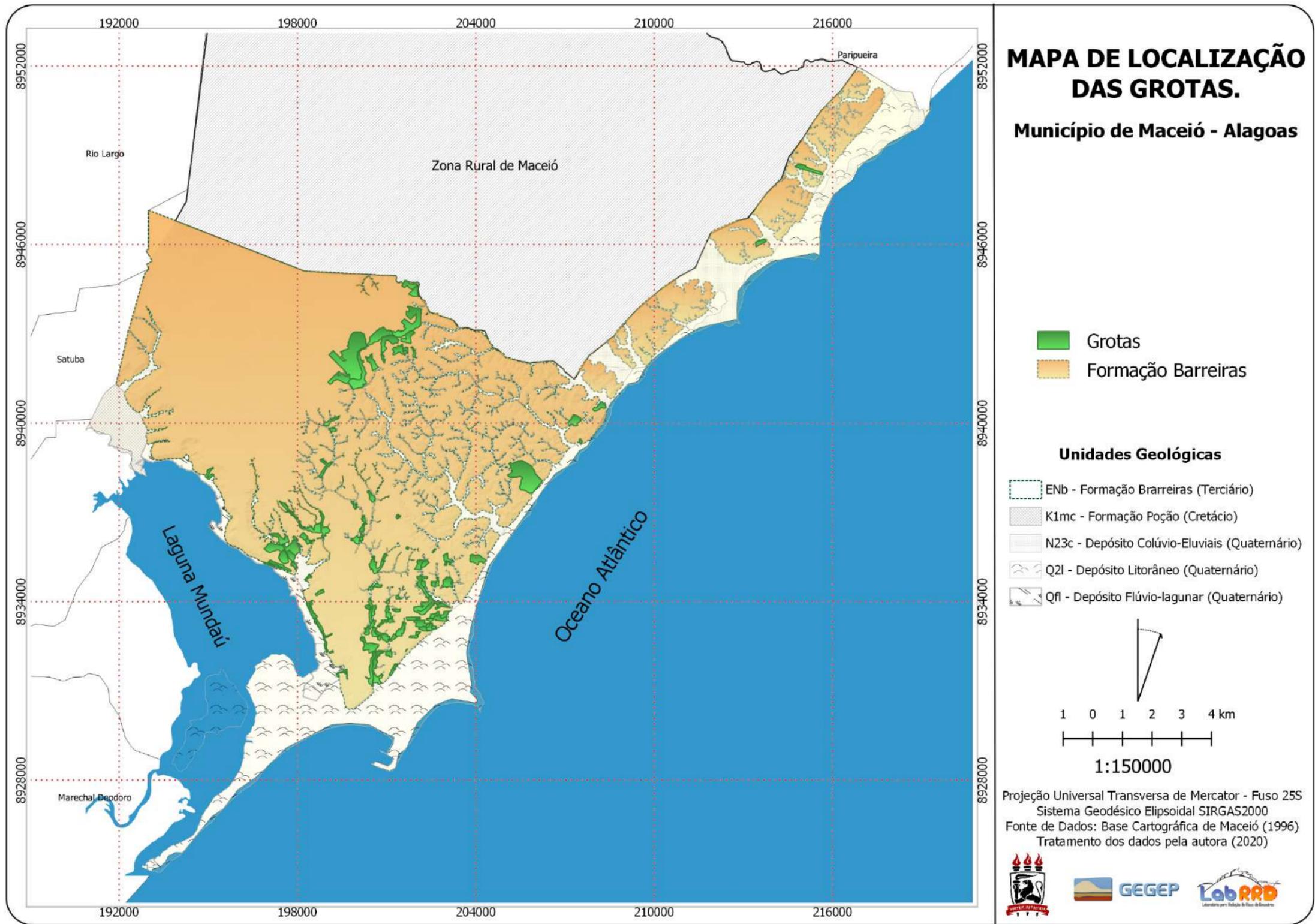
As grotas, de uma maneira geral, são caracterizadas como áreas impróprias para ocupação devido as altas declividades (20° a 35°) e exposição de sedimentos inconsolidados de Formação Barreiras, chegando a atingir amplitudes de relevo entre 30 e 70 metros de altura (FERRASSOLI; ALVES; MENDES, 2019).

Para auxiliar na gestão das áreas de risco, foi criado o Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR), que setorizou e classificou no ano de 2007 as regiões de risco da cidade nas chamadas “Grotas”, sendo estas distribuídas em 7 (sete) complexos. Segundo o PMRR do município, a ocupação irregular aliada a precipitação são os principais fatores que contribuem para a ocorrência de movimentação de massa e de processos erosivos. Os resultados do Plano Municipal de Redução de Risco – PMRR (PREFEITURA MUNICIPAL DE MACEIÓ, 2007) constata a erosão, com destaque para os tipos sulcos e ravinas, como o principal processo destrutivo do solo, seguidos dos escorregamentos (ou deslizamentos) e solapamentos de margem, em menor proporção.

Algumas dessas encostas foram mapeadas pela CPRM em 2019, destacando que podem ocorrer variações verticais e laterais entre as camadas da Formação Barreiras, devido a mudanças ambientais durante o ciclo deposicional, além de serem comuns horizontes laterizados. Podem ocorrer ainda estruturas sedimentares comuns nos afloramentos, que segundo a CPRM (2019), parecem não influenciar na estabilidade das encostas mapeadas, devido a serem geralmente sub-horizontais, no entanto podem ocorrer estratificação cruzada de baixo ângulo.

A ocupação nessas áreas continua crescente e um estudo realizado pelo Governo do Estado de Alagoas no ano de 2020 em parceria com o programa da Organização das Nações Unidas para Assentamentos Humanos (ONU-Habitat) que objetivou a identificação do número de grotas da cidade de Maceió, tendo em vista o programa “Vida Nova nas Grotas”, estimou a existência de 100 grotas na cidade, possuindo 180.333 pessoas em 51.131 domicílios. Esses números indicam que aproximadamente 17% da população de Maceió vive nas grotas, classificadas em sua grande maioria como áreas de risco alto e muito alto, evidenciando a necessidade de ações voltadas ao uso e ocupação nessas áreas. A Figura 11 apresenta a localização espacial das grotas da cidade de Maceió, onde podem ser observadas que as ocupações são distribuídas por toda a área urbana.

Figura 11 - Localização das grotas do Município de Maceió.



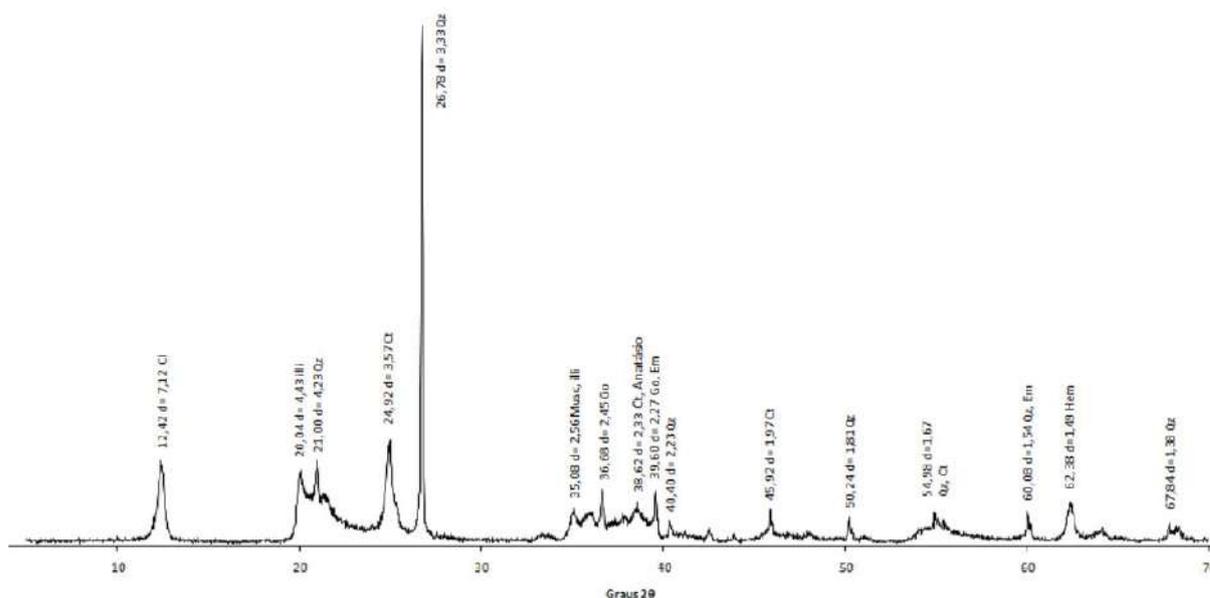
Fonte: A autora (2022).

2.7 PARÂMETROS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS DE ESTUDOS ANTERIORES

Os primeiros estudos geotécnicos em encostas ocupadas em Maceió sugeriram através de pesquisas realizadas pelo professor Carlos Alberto Marques dos Anjos, com trabalhos publicados entre os anos de 1987 a 1999, com destaque para Anjos; Wanderley e Carvalho Filho, (1993), Anjos e Queiroz de Carvalho (1993), Anjos (1992) e Anjos (1991), considerando os sedimentos das encostas existentes em Maceió predominantemente arenosos finos e arenosos grossos com pedregulho, estando os siltes e as argilas presentes em menores porcentagens nas áreas estudadas pelo autor.

Ainda merecem destaque os trabalhos recentes realizados em taludes de encosta da cidade de Maceió, especificamente no bairro do Mutange, conduzido por Gomes e Toujaguez (2016) que realizaram a caracterização física e mineralógica de 05 amostras em diferentes profundidades (variando de 0,55 a 6,00m) na mesma encosta. Os resultados da caracterização pela classificação SUCS foram Siltes de baixa plasticidade (ML). A caracterização Mineralógica foi realizada através de difratograma de raios x, não apresentando argilominerais expansivos, com a Caulinita em quantidade mais expressiva. A Figura 12 apresenta o gráfico com resultados do ensaio para a amostra entre 0,70m e 0,90m de profundidade.

Figura 12 - Difratograma de raios X da amostra 0,70-0,90 m de profundidade.



Fonte: Gomes e Toujaguez (2016).

Anjos (1992) caracterizou 05 encostas na cidade de Maceió, realizando ensaios de caracterização física, cisalhamento direto na condição natural e Triaxial UU, para obtenção do ângulo de atrito e coesão e dessa forma a avaliação do fator de segurança. Na Encosta do Bolão

e Mutange, foram coletadas duas amostras indeformadas em diferentes alturas, no Bebedouro, Chã da Jaqueira e Reginaldo, somente uma amostra foi coletada. Carvalho filho, Wanderley e Anjos, (1987) realizaram ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas em 06 taludes, definiram os sedimentos como argila-arenosa e areno-siltosa e descreveram ainda que as fraturas de alívio de tensão são observadas em grande frequência nas encostas estudadas.

Marques (2006) realizou estudos para avaliar o comportamento geotécnico da Formação Barreiras nos solos localizados no campus experimental da Universidade Federal de Alagoas, em que foram classificados como Siltes de baixa plasticidade e entre as profundidades de 7,00m a 8,50m como areia argilosa, com ocorrência de concreções ferruginosas. Além dos ensaios de caracterização, foram realizados ensaios de cisalhamento direto nas condições natural e inundado e ensaio Edométrico duplo, realizado na condição natural (EDN) e na condição inundada (EDI).

3 MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO, GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO

A concepção de dados sendo como matéria prima para a geração de informação, desde que seja processado e tenha objetivos, é consolidada no meio das tecnologias da geoinformação. Neste capítulo foi objetivada a transformação de dados geotécnicos advindos de sondagens de simples reconhecimento (SPT) e cartográficos, para geração de informações geológicas e geotécnicas sobre a Formação Barreiras na cidade de Maceió – AL.

Inicialmente, foi realizado um breve embasamento teórico-conceitual, de forma a introduzir questões específicas desse tipo de mapeamento, com o objetivo de facilitar a compreensão dos resultados obtidos, justificar as metodologias utilizadas e trazer exemplos de aplicações já realizados nesse segmento.

É tratada ainda da aquisição de dados cartográficos utilizados como base no mapeamento, bem como dos dados de sondagem SPT realizados na cidade de Maceió.

O mapeamento geotécnico foi realizado inicialmente através da estruturação de um banco de dados de sondagens SPT, sua localização espacial e posterior conexão a um sistema de informações geográficas (SIG). A partir desse banco de dados, foi possível realizar a criação de perfis representativos de solo, mostrando o comportamento predominante em termos de classificação tátil-visual, compacidade e consistência.

Com a utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e conceitos da geomorfologia, este capítulo também propõe uma melhor compreensão dos limites da Formação Barreiras através de um mapeamento mais detalhado, tendo em vista que a produção do mapeamento geológico da bacia sedimentar Sergipe-Alagoas está representada em pequena escala, sendo incompatível para uma análise em escala local/cadastral. Este mapeamento aliado a localização das sondagens possibilitou a identificação preliminar da principal fácies sedimentar existente em Maceió, contribuindo assim para uma melhor caracterização do processo deposicional dentre outros aspectos.

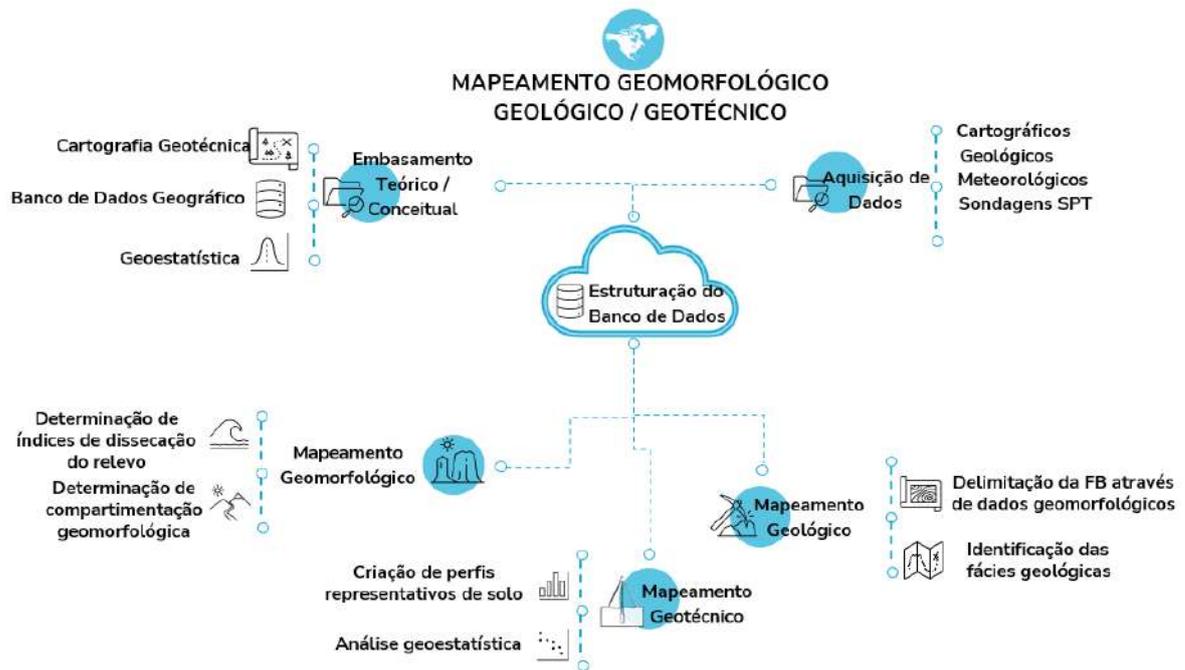
O mapeamento geotécnico realizado neste capítulo contribui não só para o conhecimento geral do comportamento da principal formação geológica da cidade, como permitiu o planejamento de locais de interesse para coleta de amostras e caracterização geotécnica (Cap. 04), de forma a validar o mapeamento realizado e fornecer parâmetros de diferentes áreas.

Foi realizada ainda, através da utilização de técnicas geoestatísticas, a construção de mapas de resistência a penetração N_{spt} em 5 profundidades distintas para três regiões definidas sob sedimentos de Formação Barreiras.

Este capítulo traz uma contribuição para o campo científico e para a comunidade geotécnica local sob a perspectiva geral do comportamento geotécnico dos solos da cidade de Maceió, trazendo utilização das geotecnologias e da geoestatística como aliadas, mostrando resultados inéditos para a área estudada.

Para uma melhor compreensão das etapas que percorrem este capítulo, é apresentado um fluxograma por meio da Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma das etapas que compõe o capítulo de Mapeamento Geológico-Geotécnico.



Fonte: A autora (2022)

3.1 EMBASAMENTO TEÓRICO-CONCEITUAL

Nos itens 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3 serão apresentados uma breve revisão de literatura, composta por temas aderentes a pesquisa desenvolvida e que possuem relação com outras ciências, de forma a pontuar os trabalhos já desenvolvidos em pesquisas anteriores, mostrando a contribuição para o campo científico. Dessa forma, serão abordados estudos sobre a Cartografia Geotécnica, Os Bancos de Dados e Sistemas de Informações Geográficas voltados a sondagens SPT e análises geoestatísticas realizadas a partir de bancos de dados de sondagens.

3.1.1 Cartografia Geotécnica

A cartografia geotécnica é produto do mapeamento geotécnico, que realiza integração de dados e informações básicas sobre as características geotécnicas dos terrenos em uma

determinada área e suas possíveis interações com as intervenções humanas relacionadas ao processo de uso e ocupação do solo.

Registros indicam o aparecimento de cartas geotécnicas no século XVIII, em que os dados e informações reunidos tinham por objetivo subsidiar a construção de obras de engenharia. No Brasil, a primeira carta geotécnica de áreas urbanas publicada foi elaborada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) em 1980 e desde então, muitas outras cartas geotécnicas de interesse municipal foram realizadas no País, abrangendo áreas urbanas e rurais, em pequenas, médias e grandes cidades.

Considerando os altos registros de desastres de escorregamento causados em períodos de maior precipitação, que provocavam muitas vítimas, foi impulsionada a criação de importantes grupos de pesquisa, tendo como pioneiro o IPT/DIGEO (São Paulo), produzindo e irradiando conhecimentos técnicos de avaliação e gestão de risco, seguido por grupos no Rio de Janeiro (GeoRio), Recife (UFPE), Rio Claro (UNESP), Instituto Geológico de São Paulo (IG), entre outros (BANDEIRA, ALHEIROS e COUTINHO, 2005).

As pesquisas desenvolvidas por estes grupos correspondem às principais metodologias de ações de gerenciamento existentes ou passíveis de serem implantadas em uma determinada área, de forma a minimizar ou até eliminar a perda de materiais e de vidas nos períodos de maior precipitação.

O Serviço Geológico do Brasil - CPRM também realiza mapeamentos em áreas de risco geológico, classificadas como baixo, médio, alto e muito alto, relacionados principalmente com movimentos de massa e inundações em mais de 1000 municípios brasileiros.

Atualmente, as Cartas Geotécnicas possuem as mais diferentes finalidades, de forma a resumir-se em sete principais tipos e aplicações (ABGE, 2018)

- a) Aplicada a Obras Civis;
- b) Convencionais
- c) De Planejamento Territorial;
- d) De Suscetibilidade;
- e) De aptidão a urbanização;
- f) De Risco;
- g) Geoambientais.

Cada uma das aplicações e tipos de Cartas apresentadas, possuem relevância significativa no meio técnico, porém, as discussões que concernem a esta pesquisa, voltam-se para as Cartas Geotécnicas com objetivo de aplicações em Obras Civis, uma vez que se fará

uso de informações advindas de sondagens SPT para espacialização e disponibilização de informações.

As cartas Geotécnicas aplicadas a obras de engenharia, são também conhecidas como Cartas Geotécnicas de Parâmetros, uma vez que são fundamentadas no mapeamento de parâmetros geológicos-geotécnicos, apresentando valores referentes às propriedades físicas, superficiais e de subsuperfície, do solo, rochas e água (ABGE, 2018).

Segundo Franco et. al. (2010), a cartografia geotécnica tem se tornado uma ferramenta importante na avaliação de limitações e potencialidades do meio físico, permitindo manipulação de grande volume de dados através das tecnologias de geoprocessamento.

Segundo Zuquette (1993) os atributos a serem mapeados e as respectivas classificações depende da finalidade do trabalho a ser realizado, e a escolha adequada desses atributos influenciará diretamente na eficiência, qualidade e possibilidade de os usuários utilizarem as informações. Trabalhos relacionados ao mapeamento geotécnico para planejamento de obras podem ser encontrados em Almeida (2000); Borges (2007); Caetano (2006); Gomes e Teixeira (2007); Miranda (2007); Silva (2006) dentre outros.

A preparação de cartografia geotécnica implica na utilização de grande volume de dados, e as geotecnologias aplicadas a Cartografia Geotécnica possibilitam a manipulação de dados e informações espaciais sob feições e/ou fenômenos, cujo armazenamento, atualização, consulta e tratamento justifica a utilização de bases de dados adequadas, por meio de armazenamento, manipulação de informações e da integração de dados em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) (ABGE (2018); ALMEIDA e ALMEIDA (2002); MOURA (2003))

3.1.2 Banco de Dados e Sistemas de informações Geográficas

Os bancos de dados podem ser entendidos como uma coleção de informações relacionadas a um tema implícito, sem possuir uma complexidade específica, nem tampouco tamanho, podendo ser representado por uma simples lista ou possuir registros e dados organizados por classes e categorias diferentes. Trata-se de método de armazenamento e organização de informações referentes a uma determinada área de aplicação, que pode ser realizada através de um sistema computadorizado que guarda registros e os torna disponíveis aos diversos usos (DATE, 2004).

Young (1990) define Banco de Dados como uma reunião de arquivos de dados de toda a organização em algum tipo de armazenamento magnético, sendo manipulado por um conjunto

de programas. Tais programas efetuam operações de manutenção, como adições, exclusões e atualizações de dados, além de operações de pesquisas de informações mais complexas.

Os primeiros Bancos de Dados se desenvolveram a partir de sistemas de gerenciamento de arquivos, que evoluíram primeiramente para Bancos de Dados de Rede ou Bancos de Dados Hierárquicos e, posteriormente, para Bancos de Dados Relacionais (KORTH, SILBERSCHATZ e SUDARSHAN, 2005). Independente da sua estrutura e complexidade, um instrumento valioso para armazenamento de informação é o Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD), que permite ao usuário a criação, manipulação e controle das informações a serem obtidas (ELMASRI e NAVATHE, 2005).

Segundo Date (2000), “o Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) é o *software* que manipula todos os acessos ao banco de dados”, dessa forma, visa auxiliar no processo de construção e compartilhamento dos dados com inúmeros aplicativos e usuários, tornando o acesso e manipulação dos dados mais acessível e automática (ELMASRI e NAVATHE, 2005).

Para Dias, Câmara e Davis (2005), o SGBD deve seguir alguns requisitos que promovam e garantam a facilidade de uso, refletir a realidade modelada, possuir fácil manutenção, confiabilidade, segurança e desempenho.

As principais estruturas dos bancos de dados modernos são do tipo hierárquica, relacional e em rede. O SGBD abrange um conjunto de módulos de programas que respondem pela organização, armazenamento, acesso, segurança e integridade das informações, atuando como interface entre os usuários, os programas de aplicação e os sistemas operacionais (BASTOS, 2005).

Com o avanço das tecnologias da geoinformação, os sistemas de informações geográficos (SIG) intrinsecamente relacionado aos bancos de dados espacialmente referenciados, são cada vez mais usuais em trabalhos que tratem fenômenos espaciais, uma vez que o produto principal é um mapa, sendo responsáveis por armazenar grande volume de informações, tanto alfanuméricas quanto vetoriais.

O SIG é um sistema de informação que trabalha fundamentalmente com dados espaciais de forma dual, ao interpretar separadamente a parte espacial (gráfica) e não espacial (alfanumérica), que permite as relações topológicas - relações espaciais entre os elementos geográficos a partir da união entre as feições geométricas e suas estruturas de armazenamento, permitindo ainda a integração de informações distintas, propiciando a interoperabilidade entre bases de dados de diversas fontes, permitindo que se faça operações entre estes dados, gerando novas informações (CÂMARA, MONTEIRO e MEDEIROS, 2004).

Chacón, Irigaray e Fernández, (2006) afirmam que durante o final da década de 80, o uso de SIG foi intensificado por um número crescente de pesquisadores interessados em planejamento e avaliação do uso da terra, citando ainda exemplos no que diz respeito ao uso de mapas geológicos na prática de engenharia civil (GRIFFITH, 2002).

É interessante notar que em muitos países esses ainda não são amplamente utilizados e que embora haja disponibilidade de muitos artigos sobre o assunto disponíveis em periódicos, anais e livros publicados desde o final dos anos 80 e existirem vários bons exemplos de uso por serviços governamentais na avaliação de riscos naturais, ainda há questões importantes relacionadas ao grande número de métodos de avaliação e a falta de regulamentação do uso desses mapas em muitos países.

Os SIG são utilizados para armazenar, gerenciar e manipular dados e apesar da diversidade, possuem estrutura geral composta por um banco de dados espacial e de atributos; sistema de representação cartográfica, sistema de digitalização de mapas, sistema de gerenciamento de dados, sistema de análise geográfica, sistema de processamento de imagens, sistema de análises estatísticas que produzem imagens, mapas, base de dados e relatórios estatísticos.

Os SIG possuem muitas aplicações no campo da Geologia de Engenharia e na Geotecnia, com muitos trabalhos que relacionam bancos de dados espaciais e informações geotécnicas. Os mapeamentos temáticos, as cartas geotécnicas, a modelagem numérica de terrenos, automação de cartas de declividade, análise de processos do meio físico, gerenciamento de bancos de dados, cartas de risco, integração de temas para zoneamento dentre outros (CELESTINO e DINIZ, 1998).

No que diz respeito aos bancos de dados geotécnicos, estes se consolidam no Brasil e no mundo, como ferramenta importante e de finalidades distintas para engenharia, tratando de armazenamento e produção de informações úteis para planejamento territorial e obras de engenharia.

Bastos (2005) menciona o desenvolvimento de banco de dados a partir de sondagem em diversos países da Europa, como Itália e Inglaterra, podendo ser citado o banco de dados de sondagem desenvolvido por Nathanail e Rosenbaum (1998), além de países como França, Escócia dentre outros. O serviço Geológico Britânico (BGS) também realiza a construção de mapas geológicos através de um visualizador de Geologia da Grã-Bretanha, com a utilização de um *sigweg*, apresentando uma ferramenta simples, direcionada ao público em geral, que possui um banco de dados com a varredura de poço, linha do tempo de terremotos e Modelos de visualização em 3D (BGS, 2019). Chacón, Irigaray e Fernández (2006) citam a participação

de cientistas de 17 países na produção de mapas de geologia de engenharia através de bancos de dados de deslizamentos de terras utilizando os sistemas de informações geográficos.

No Brasil, podem ser destacados os bancos de dados geotécnicos estruturados por Bastos *et al.* (2007), Miranda, (2007) no Rio Grande do Sul, Augusto Filho (2005) em Minas Gerais, dentre outros.

Um dos trabalhos bastante consolidado para o Nordeste, diz respeito à elaboração do banco de dados das argilas moles, médias e orgânicas da cidade de Recife, realizado por Coutinho, Monteiro e Oliveira (1996). As informações contidas incluíam parâmetros de ensaios realizados em campo e laboratório, além de sondagens SPT. Atualmente, este banco de dados continua em atualização, sendo objeto de pesquisas e análises através do Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres (GEGEP) da Universidade Federal de Pernambuco.

Destaca-se ainda como exemplo para o Nordeste, o banco de dados realizado para a cidade de João Pessoa – Paraíba (SOARES, 2011), em que foram utilizadas 705 sondagens, localizadas em 3 subáreas da cidade, que possuíam duas unidades geológicas distintas (Sedimentos Marinhos e Formação Barreiras). Através de métodos geostatísticos, foram gerados mapas de N_{spt} médio para duas subáreas sob sedimentos de Formação Barreiras e uma subárea da unidade geológica composta por sedimentos marinhos, que por sua vez também recebeu estudos referentes a profundidade da superfície freática, no período de chuvas e no período seco.

3.1.3 Geoestatística

A geoestatística é composta por um conjunto de processos de validação de variáveis distribuídas e de observação espacial. Para lograr valores de regiões sem amostras, são utilizados algoritmos inferenciais de plataformas SIG, apoiados no grupamento amostral disponível (PRADO, 2004).

As aplicações da geoestatística são amplas, consolidada na lavra e prospecção mineira, é utilizada em Agricultura de Precisão, Cartografia, Climatologia, Geologia de Petróleo e Ambiental, Engenharia Florestal, Hidrogeologia, além da Geotecnia, abordagem desta pesquisa (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

De acordo com Burrough e McDonnell (1998) em situações de dados abundantes, os métodos de interpolação funcionam de forma semelhante, em geral, oferecendo valores próximos. Porém, em casos de dados dispersos, a grande maioria apresenta limitações de

variabilidade espacial, pois alguns métodos desconsideram que os dados podem se comportar de maneira diferente em relação à direção.

Existem alguns modelos de conceitos geoestatísticos, como a krigagem, IDW (*Inverse Distance Weighted* – Ponderação do Inverso da Distância), *spline*, vizinho mais próximo, entre outros. Cada modelo possui uma característica específica, dependendo do fenômeno a ser modelado e o tipo de aplicação. O uso de parâmetros inadequados e/ou modelo adotado equivocadamente pode ocasionar uma distorção na distribuição espacial, acarretando decisões possivelmente imprecisas e com base em informações espaciais enganosas (MITAS e MITASOVA, 1999).

Folle (2002) afirma que poucos trabalhos fazem uso da geoestatística para aplicações em informações de sondagens SPT, sendo considerada uma área promissora de investigação geotécnica.

Basarir et al. (2010) expõem que em muitos projetos, as propriedades do solo são assumidas como variáveis homogêneas, quando na verdade têm características heterogêneas, por esse motivo, um estudo geoestatístico eficiente, pode apresentar informações confiáveis, que norteiem o uso do solo para diversos fins. Neste estudo, avalia-se a correlação espacial entre os dados N_{spt} e gera-se uma simulação gaussiana, na qual os valores obtidos em um determinado local são relacionados a valores próximos.

Os modelos geoestatísticos utilizados em geotecnia, possuem aplicações para a caracterização da variabilidade espacial dos parâmetros geotécnicos “in-situ”. Dentre os métodos mais comumente utilizados, observados na literatura, a Krigagem ordinária tem se destacado como o principal. Seu uso em informações de sondagem pode citar trabalhos desenvolvidos por Carvalho e Carvalheiro (2001), Folle, Costa e Koppe (2001) e Sturaro, Landim e Riedel (2000).

Os métodos geoestatísticos baseiam-se em estimativas de variáveis regionalizadas e determinação de suas incertezas, com a avaliação da continuidade espacial a partir da dependência entre duas variáveis e sua distância, descrita através do semivariograma (Equação 1) (JOURNEL, A., 1989).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (1)$$

Onde $\gamma(h)$ é o semivariograma experimental; $N(h)$ é o número de pares separados por um vetor (h) ; $Z(x+h)$ e $Z(x)$ são valores observados em diferentes posições.

Para a realização da estimativa geoestatística, é necessário a construção de um modelo matemático global ajustado para representar da melhor forma o comportamento espacial das variáveis estudadas. Para efeitos desta pesquisa, foi utilizado o modelo esférico (Equações 2 e 3), que apresentou melhores resultados para as amostras analisadas.

$$\gamma(h) = c \left[\frac{3h}{2a} \right] - \left[\frac{h^3}{2a^3} \right] \text{ para } h \leq a \quad (2)$$

$$\gamma(h) = c \text{ para } h > a \quad (3)$$

Onde “c” é o patamar, que corresponde a variância a priori finita, “a” é a amplitude, ou seja, a faixa de influência, e “h” é a distância.

Segundo Mendes e Lorandi (2008), após a construção de uma série de variogramas experimentais, um modelo matemático global deve ser ajustado ou montado para melhor representar o comportamento espacial da variável em estudo. É importante que tal modelo matemático possa expressar qualquer tendência predominante do variograma $\gamma(h)$ em relação à distância de $\log h$.

Diversos são os processos para estimativas geoestatística, para a Krigagem a classificação dos seus diferentes tipos está associada aos métodos de determinação dos fatores de ponderação (MURAKAMI *et al.*, 2006), conhecidas como krigagem simples, krigagem da média, krigagem universal e krigagem ordinária, esta última utilizada como método geoestatístico para fins desta tese, estimando valores de resistência de solo, uma vez que este método apresenta estimativas não tendenciosas e a mínima variância associada aos valores estimados (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A estimativa obtida por Krigagem ordinária (Equação 4) é dada por Journel (1989).

$$Z_{(x_0)}^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{com} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (4)$$

Onde $Z_{(x_0)}^*$ é o valor estimado em um ponto x_0 , $Z(x_i)$ é o valor medido no ponto x_i , λ_i é o fator de ponderação para $x (Z_i)$ e n é o número de medições reais.

O Coeficiente de ponderação (λ_i) para a observação i^{a} observações pode ser determinado pela Equação 5:

$$\lambda^T_i = 1, i = \{1 \ 1 \dots 1\}^T, \lambda = \{\lambda_1 \ \lambda_2 \dots \lambda_N\}^T, \text{onde } \lambda_i \geq 0 \quad (5)$$

Os métodos geoestatísticos tem seu embasamento teórico consolidado e pode ser melhor explorado através das publicações de Journel e Huijbregts (1978) e Journel (1989).

3.1.4 Aplicações com associação do Banco de Dados, Geoestatística e SIG.

A aplicação de dados SPT associados aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para a construção de mapas geotécnicos tem sido bastante utilizada para diversas aplicações e por diversos autores em todo o mundo. Essa técnica, já bastante difundida em algumas áreas, ganha cada vez mais espaço na geotecnia.

Segundo Zuquette, Pejon e Collares (2004) os mapas geológicos-geotécnicos têm o objetivo de fornecer informações sobre as características do ambiente natural para o planejamento do uso da terra e estruturas de engenharia de todos os tipos.

Os dados obtidos nesse mapeamento podem ser utilizados como parâmetros iniciais para projetos de fundação, para planejamento urbano direcionando os planos de uso e ocupação do solo, além da estimativa e avaliação dos riscos em diferentes cenários.

Raspa *et al.* (2008) utilizaram as análises geoestatística a partir de um banco de dados com 283 sondagens para realizar a caracterização geotécnica de depósitos aluvionais onde encontram-se monumentos históricos, bairros e áreas arqueológicas na cidade de Roma (Itália). Basarir *et al.* (2010), utilizaram da simulação geoestatística para avaliar as incertezas associadas a variabilidade espacial de N_{spt} de 122 furos de sondagem realizados com o objetivo de construir um depósito para exportação de bórax, nas proximidades do porto de Bandirma, na Turquia.

Na cidade e Teerã, no Iran, Razmyar e Eslami (2018) utilizaram os sistemas de informação geográficas para realizar um zoneamento de parâmetros geotécnicos possibilitando um direcionamento para uso e ocupação do solo.

El May, Dlala e Chenini (2010) fizeram uso do SIG para combinar mapas que possuíssem os principais fatores restritivos ao desenvolvimento urbano, como litologia, topografia, sismotectônico, mapa de profundidade do lençol freático, mapas de suscetibilidade a inundação e induzida por sísmica entre outros, para elaboração de mapeamento voltado a planejamento de uso e ocupação do solo urbano na cidade de Tunis na Tunisia.

Folle *et al.*(2008) fizeram uso do método geoestatísticos de krigagem para a geração de mapas de estimativa de valores N_{spt} utilizando 141 furos de sondagem, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade da qualidade das informações para planejamento urbano, gestão ambiental, estabilidade de taludes e projetos de fundações.

Na cidade de Guwahati, na Índia, Sharma e Rahman (2016) realizaram estudos baseados em SIG para a construção de mapas de valores de N_{spt} e de profundidade do lençol freático, a partir de 200 furos de sondagem.

Zou *et al.* (2017) fizeram uso da geoestatística através do método de krigagem simples para avaliar a distribuição espacial da resistência de ponta do cone de duas argilas moles em uma rodovia localizada na província de Jiangsu, no norte da China.

No Brasil, pode-se citar alguns estudos realizados, tais como Luiz e Gutierrez (2020), que realizaram uma avaliação geoestatística através do método de krigagem ordinária a partir de 109 poços de água para a cidade de Maringá, Paraná, identificando correlações entre valores de N_{spt} e a geomorfologia da região estudada.

Soares (2011) realizou a construção de um banco de dados com base em sondagens SPT e uso de SIG para análise da profundidade do lençol freático no período seco e chuvoso para sedimentos aluvionares e de Formação Barreiras cidade de João Pessoa – Paraíba, fornecendo parâmetros iniciais voltados a obras de fundações.

Mendes e Lorandi (2008), realizaram estudos geoestatísticos a partir de sondagem SPT para a cidade de São José do Rio Preto, São Paulo, determinando variação do lençol freático nos períodos seco e chuvoso, correlacionando com a existência de solos colapsíveis.

Nobre (2006), realizou estudos geoestatísticos a partir de krigagem para elaboração de mapas quantitativos de profundidade de Nível Estático (NE) e condutividade hidráulica para realizar a avaliação de risco para uso e proteção de recarga de aquíferos na cidade de Maceió – Alagoas.

3.2 SISTEMATIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO BANCO DE DADOS DE SONDAGENS SPT

Neste item será abordado a metodologia adotada para a construção do banco de dados de sondagens SPT e os resultados obtidos, através da construção e identificação de perfis representativos de solo, sob sedimentos de Formação Barreiras na cidade de Maceió.

3.2.1 Banco de Dados SPT

O banco de dados a que se refere esta pesquisa, trata-se da espacialização e digitalização das informações contidas em boletins de sondagem a percussão (SPT). As informações foram cedidas pela empresa AGM Geotécnica LTDA, referente aos anos de 2007 a 2017, contendo os relatórios de execução de sondagens, perfis e croquis de localização.

As sondagens cedidas não possuíam localização espacial, ou seja, os pontos de localização dos furos não se encontravam georreferenciados, com a inexistência de coordenadas para as suas localizações. Assim, houve inicialmente a necessidade de separação das sondagens por bairro, levando em consideração o conhecimento prévio da geologia na cidade.

Para a localização espacial, foram identificados os lotes e em seguida os furos de sondagem, tomando como base os croquis de localização e o endereço da obra, usando o Google Earth Pro como ferramenta de auxílio.

Cada furo identificado, recebeu uma coordenada E (este) e N (Norte), sendo localizada nos Sistema de Projeção Transverso de Mercator (UTM) em metros, no sistema Geodésico de Referência utilizado pelo Google Earth, ou seja, WGS 84. Esse sistema, apesar de não oficial para o Brasil, apresenta similaridade com o SIRGAS2000, pois é geocêntrico (possui como referência o centro de massa da terra) e utiliza o mesmo elipsoide (GRS-80 - *Geodetic Reference System 1980*) para o cálculo dos parâmetros geodésicos, podendo ser facilmente identificado através de softwares de SIG e atendendo satisfatoriamente aos fins desta pesquisa.

Após a localização, um código de identificação foi gerado para cada registro SPT, contendo o ano de realização da sondagem, o tipo, a sequência de localização e o número do furo por lote, conforme esquema apresentado na Figura 14. Esse tipo de identificação poderá incorporar dados de outros tipos de sondagem ao banco de dados ao longo dos anos, bem como ser usado como chave única, de forma inequívoca para cada furo localizado, uma vez que o código não se repete, facilitando a conexões e interoperabilidade entre bancos de dados.



Fonte: A autora (2022)

Em virtude da extensão temporal, não foi possível a localização de algumas sondagens, sendo estes registros excluídos da codificação e inserção no banco de dados. Os bairros do litoral norte foram os mais prejudicados, uma vez que possuem maior inconsistência na base cartográfica do município em função da baixa ocupação na época da realização das sondagens.

O banco de dados utilizado como parâmetro foi baseado no modelo produzido e consolidado pelo Grupo Geotécnico de Encostas, Planícies e Desastres (GEGEP/UFPE), que produz conhecimento na área de informações e bancos de dados geotécnicos há mais de 20 anos.

As informações que compõem o banco de dados foram: Id do furo, coordenadas E (este) e N (Norte), Obra, endereço da Obra, Bairro, Tipo de perfil, Profundidade da perfuração, Espessura de cada Camada, Nspt máximo, Nspt médio e Nspt mínimo para cada camada, classificação tátil visual, cor, consistência e ocorrência (concreção, pedregulho, resíduo da construção, nódulos de argila, etc.)

Existem diversos bancos de dados com suporte a dados espaciais, porém, o utilizado nessa pesquisa foi o PostgreSQL, levando em consideração os critérios de utilização por uma ferramenta *opensource*, que possui bons parâmetros de segurança da informação e boa resposta para quantidade de consultas a serem realizadas simultaneamente. A utilização de um banco de dados mais robusto facilita a consulta e integração de dados, conecta-se automaticamente ao sistema de SIG, possibilita a visualização simultânea das análises realizadas em banco, que é consultado através de uma requisição feita por um *script* escrito na plataforma PHP. A Figura 15 apresenta a visualização do pgAdmin, ferramenta utilizada para administração do PostgreSQL, que permitiu o gerenciamento das tarefas necessárias de administração do banco de dados.

Figura 15 - Visualização do banco de dados Postgresql através do pgAdmin

The screenshot shows the pgAdmin interface with a PostgreSQL database selected. The 'Editor de consulta' (Query Editor) contains the following SQL query:

```
1 SELECT * FROM public."Base0_sonlagens"
2 ORDER BY Id_0 ASC
```

The 'Saída de dados' (Query Results) pane displays a table with 12 rows and 7 columns. The columns are: id_0, geom, id_lagrim, caractere variando (254), id_furo, caractere variando (254), and count_0. The data is as follows:

id_0	geom	id_lagrim	caractere variando (254)	id_furo	caractere variando (254)	count_0
1	0101000020F17C00	7	06/06/2019 15:28:29 GMT-3	20019PT2104	2001195.554	8932196.746
2	0101000020F17C00	483	2019/09/21 1:18:37 PM GMT-3	20119PT115	198771.83	8943211.69
3	0101000020F17C00	258	19/06/2019 10:31:40 GMT-3	20119PT1307	203840.35	8934777.24
4	0101000020F17C00	308	19/06/2019 11:08:21 GMT-3	20119PT1335	203840.37	8934747.23
5	0101000020F17C00	574	2019/09/25 3:54:46 PM GMT-3	20119PT1004	199514.41	8942517.24
6	0101000020F17C00	863	07/07/2019 11:07:25 GMT-3	20019PT2110	2011175.94	8932194.45
7	0101000020F17C00	101	2019/06/12 8:30:31 PM GMT-3	20099PT1715	2009176.76	893252.68
8	0101000020F17C00	1687	2019/07/05 12:43:54 PM GMT-3	20109PT2305	204014.95	8932629.89
9	0101000020F17C00	84	2019/06/12 10:04:55 GMT-3	20099PT1910	200967.67	893704.23
10	0101000020F17C00	548	2019/06/25 1:52:24 PM GMT-3	20099PT1909	200911.73	893704.23
11	0101000020F17C00	211	17/2019 11:28:40 GMT-3	20099PT2307	199967.85	8942274.55
12	0101000020F17C00	533	2019/06/25 1:04:41 PM GMT-3	20099PT1501	199734.30	8933194.68

Fonte: A autora (2022)

3.2.2 Criação de Perfis Representativos de Solos de Formação Barreiras

Com o objetivo de sintetizar as informações advindas do banco de dados de sondagens criado para a Formação Barreiras da Cidade de Maceió e buscando a interpretação do comportamento geotécnico, foram construídos perfis típicos de solo, com as características mais frequentes e representativas de acordo com o percentual de ocorrência encontrado.

Sabe-se que a Formação Barreiras se apresenta tão distinta, que as especificidades regionais e locais devem ser levadas em consideração. Na área objeto de estudo, existem muitos dados distribuídos ao longo de anos de experiência das empresas locais no que diz respeito a sondagens de simples reconhecimento e à perfuração de poços para exploração de águas subterrâneas. Esses dados podem ser transformados em informações, de forma a compreender melhor o comportamento desses sedimentos, que compreendem percentual significativo da área urbana ocupada do município de Maceió.

Assim, a criação de perfis típicos que representem as principais características e ocorrência da Formação Barreiras, pode auxiliar na estimativa de parâmetros geotécnicos úteis ao planejamento ou até elaboração de anteprojetos, obviamente, não substituindo as investigações geotécnicas adequadas para cada tipo de obra, mas fornecendo algum conhecimento prévio da área.

Após a adequada sistematização dos dados SPT através da criação do banco de dados, foi realizada a identificação das características mais frequentes e representativas de acordo com o percentual de ocorrência encontrado em cada camadas de solo. Quatro Unidades Geológicas

de Engenharia (UGE) foram criadas, levando em consideração a classificação granulométrica do solo, assim descritos:

- a) **UGE-BF-01**: solos compostos das areias, areias siltosas e siltes arenosos.
- b) **UGE-BF-02**: solos identificados como argilas, argilas siltosas e siltes argilosos.
- c) **UGE-BF-03**: solos identificados com predominância arenosa, compostos por argila e silte, como as areias argilosas, areias argilo-siltosas, areias silto-argilosa e siltes areno-argilosos;
- d) **UGE-BF-04**: solos identificados com predominância argilosa composta por areia e silte, onde encontram-se as argilas arenosas, argilas areno-siltosas, argilas silto arenosas e siltes argilo arenosos.

No total, 1592 registros de sondagens foram avaliados, correspondentes a 11 anos de perfurações (2007-2017) e suas características se distribuíram através de 13 camadas com profundidades que variam entre 1,00m e 37,00m. Os perfis típicos analisados foram representados até a 6ª camada, pelo grau de representatividade (Tabela 2).

Tabela 2 - Percentual de sondagens por camada

Camada	Percentual	Camada	Percentual
Camada 01	100%	Camada 07	7 %
Camada 02	95%	Camada 08	3 %
Camada 03	78%	Camada 09	< 1 %
Camada 04	51%	Camada 10	< 1 %
Camada 05	29%	Camada 11	< 1 %
Camada 06	14%	Camada 12	< 1 %
		Camada 13	< 1 %

Fonte: A autora (2022)

A Tabela 3 apresenta as características mais frequentes encontradas no grupo de sondagens estudado, considerando a classificação granulométrica dos materiais.

Tabela 3 - Características mais frequentes dos perfis de solo estudados e exemplo de perfil típico

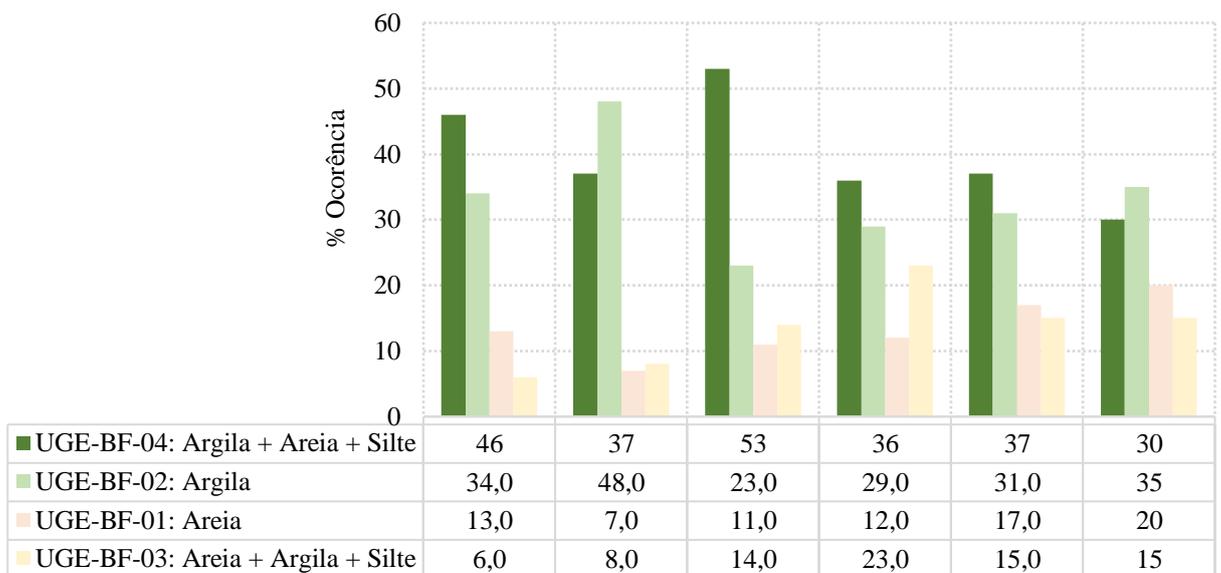
Cam	Grupo	Ocorr. (%)	Nspt	Classificação do material		
				Cores	Consist.	Ocorrência
1°	BF-04	46%	2 - 5		muito mole a mole	concreções (8%), pedregulho (12%), raiz (5%), res. da construção (4%)
	BF-02	34%	4 - 9	amarelo, cinza, creme, ferrugem, marrom, preto e variegada.	mole a média	pedregulho (8%), raiz (15%), res. da construção (20%)
	BF-01	13%	2 - 8		fofa a pouco compacta	nódulos de argila (4%), pedregulho (9%), raiz (7%), res. da construção (3%)
	BF-03	6%	2 - 8		fofa a pouco compacta	concreções (12%), pedregulho (12%), raiz (10%), res. da construção (9%)
2°	BF-02	48%	13 - ≥ 30		amarelo, cinza, creme, ferrugem, marrom e variegada.	rija a dura
	BF-04	37%	3 - 8	mole a média		pedregulho e concreções (30%)
	BF-03	8%	7 - 26	Pouco a mediamente compacta		pedregulho (25%) concreções (6%)
	BF-01	7%	9 - ≥ 30	Compacta a muito compacta		nódulo de argila (32) e concreções (7%)
3°	BF-04	53%	8 - ≥ 30	amarelo, cinza, creme, ferrugem, marrom e variegada.	média a dura	concreções (30%), nódulos de argila (5%), pedregulho (47%)
	BF-02	23%	17 - ≥ 30		rija a dura	pedregulho (9%)
	BF-03	14%	17 - ≥ 30		med. compacta a compacta	pedregulho (40%) concreções (9%)
	BF-01	11%	15 - ≥ 30		med. compacta a compacta	nódulos de argila (20%) pedregulho (15%)
4°	BF-04	36%	18 - ≥ 30	amarelo, cinza, creme, ferrugem, marrom e variegada.	rija a dura	pedregulho (23%), concreções (16%)
	BF-02	29%	15 - ≥ 30		rija a dura	pedregulho (8%), concreções (7%)
	BF-03	23%	18 - ≥ 30		med. compacta a muito compacta	pedregulho (28%), concreções (6%)
	BF-01	12%	15 - ≥ 30		med. compacta a muito compacta	nódulos de argila (33%) pedregulho (27%)
5°	BF-04	37%	16 - ≥ 30	amarelo, cinza, creme, ferrugem, marrom e variegada.	rija a dura	concreções (8%), pedregulho (2%)
	BF-02	31%	19 - ≥ 30		rija a dura	pedregulho e concreções (1%)
	BF-01	17%	22 - ≥ 30		compacta a muito compacta	nódulos de argila (22%), pedregulho (26%)
	BF-03	15%	20 - ≥ 30		compacta a muito compacta	pedregulho (4%), concreções (1%)
6°	BF-02	35%	18 - ≥ 30	amarelo, cinza, creme, ferrugem, marrom e variegada.	rija a dura	pedregulho (3%)
	BF-04	30%	19 - ≥ 30		rija a dura	pedregulho e concreções (2%)
	BF-01	20%	22 - ≥ 30		compacta a muito compacta	pedregulho e nódulos de argila (3%)
	BF-03	15%	25 - ≥ 30		Compacta a muito compacta	pedregulho (3%)

Fonte: A autora (2022)

As análises mostraram que a maior incidência de ocorrência está nas Unidades Geológicas de Engenharia (UGE) com predominância argilosa (BF-02 e BF04), ou seja, solos com granulometria mais fina, que somados representam entre 65% e 85% em todas as camadas, com maior incidência para as argilas compostas com areia e silte (BF-04). Nestas camadas também são frequentes a descrição da presença de laterização e de pedregulhos (seixos). Apesar de menos frequentes, camadas mais arenosas (UGE-BF-01 e UGE-BF-03) intercalam as camadas argilosas em profundidade, com maior ocorrência das areias compostas com silte e argila que representam entre 15% e 35%. Nessas camadas também são frequentes a ocorrência de laterização, de pedregulhos (seixos) e nódulos de argila.

Através do Gráfico de barras empilhadas (Figura 16), pode ser observada a proporção de ocorrência das Unidades Geológicas de Engenharia (UGE), considerando as 06 camadas analisadas.

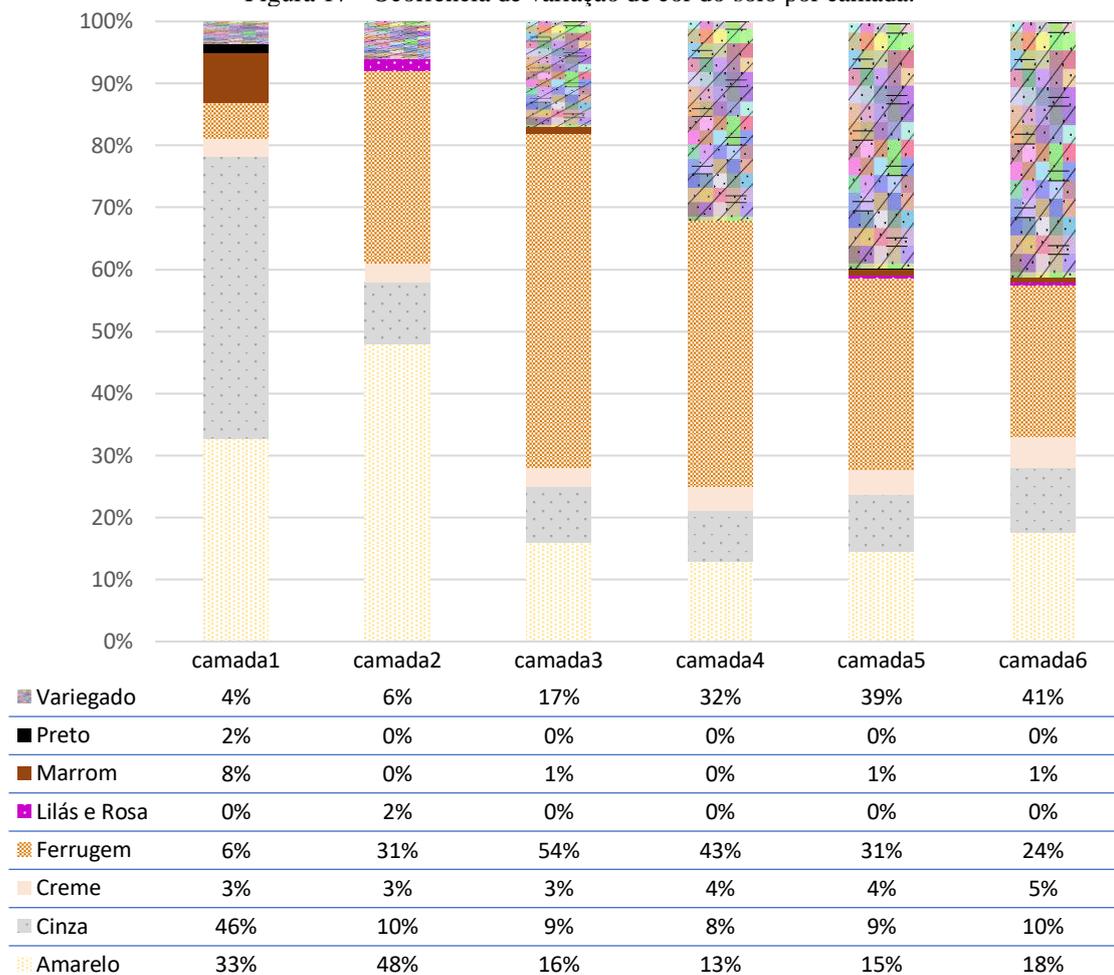
Figura 16 - Ocorrência dos grupos de solo por camada.



Fonte: A autora (2022)

A coloração dos sedimentos nas camadas tem descrição com predominância amarela e ferrugem (um vermelho-alaranjado), ocorrendo descrição de cores variegada principalmente nas camadas mais profundas. A Figura 16 apresenta a variação de ocorrência de cores por camada.

Figura 17 - Ocorrência de variação de cor do solo por camada.

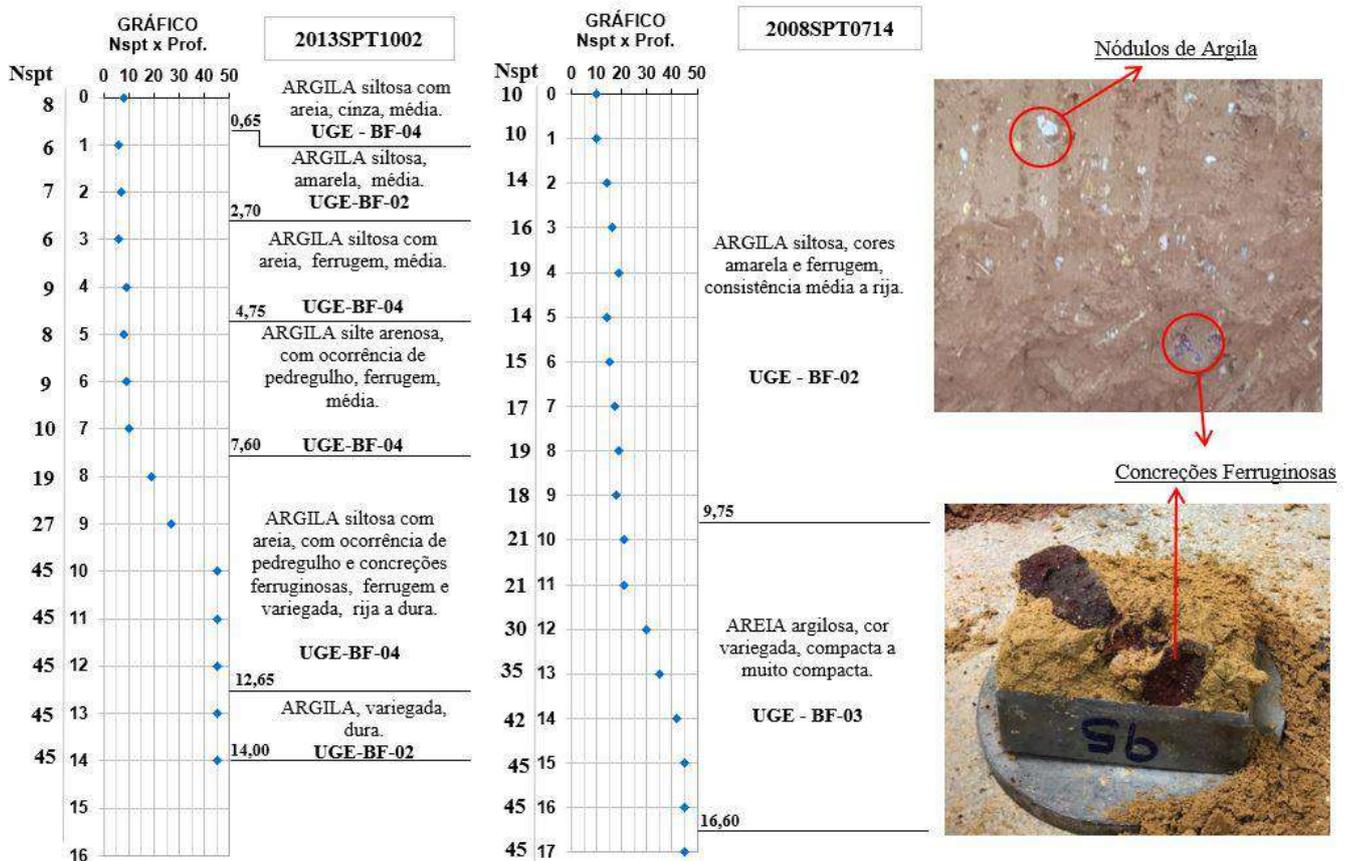


Fonte: A autora (2022)

Nos registros SPT analisados, não foram encontrados níveis de água subterrânea apesar da existência de aquífero na Formação Barreiras, possivelmente por sua profundidade ser superior a alcançada pelas sondagens estudadas. Segundo Nobre *et al.* (2007), as águas subterrâneas da cidade de Maceió variam de 30 a 500m de espessura, passando por diversas formações geológicas, indicando assim que as águas subterrâneas existentes na Formação Barreiras estão em profundidades superiores a 30m.

Exemplos de perfis representativos de sondagens SPT inseridas na área estudada estão apresentados através da Figura 18, com coordenadas E = 199784,83 e N = 8935291,18 (2013SPT1002) e E = 199392,35 e N=8940548,76 (2008SPT0714) (Sirgas 2000, UTM-25S). Nestes perfis podem ser identificadas camadas de solo pertencentes as UGE identificadas, com um perfil exclusivamente argiloso e um outro perfil contendo intercalação entre argilas e areias, destacando nas imagens ao lado o surgimento de nódulos de argila e concreções ferruginosas.

Figura 18 - Exemplo de perfis representativos exclusivamente argilosos

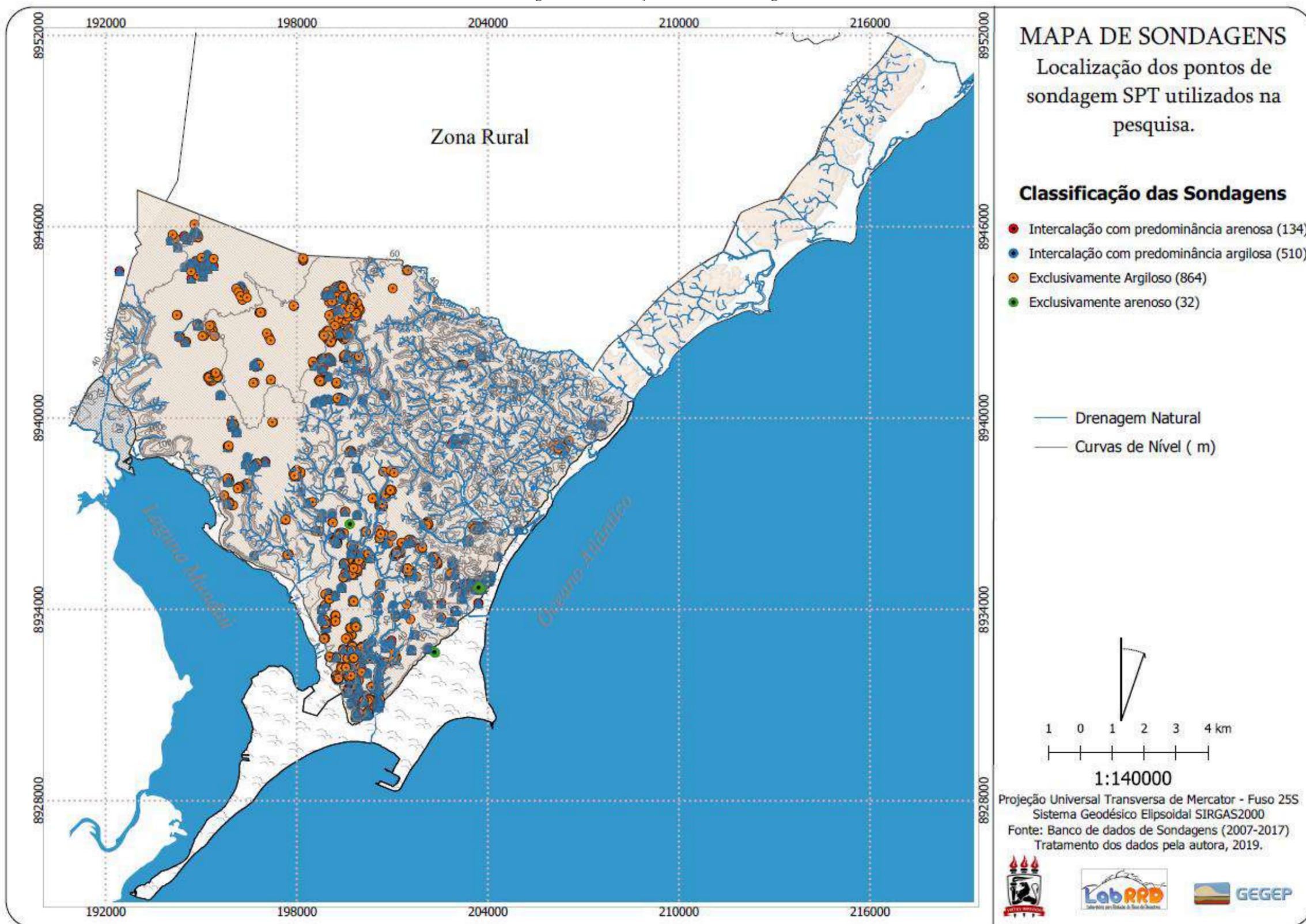


Fonte: A autora (2022)

Observando os perfis de sondagens estudados, foi verificado que o subsolo possui camadas com predominância argilosa, com 55% dos perfis apresentando camadas exclusivamente argilosas e 43% dos perfis apresentam camadas com intercalações entre areias e argilas. Apesar de menos frequente, camadas exclusivamente arenosas podem ocorrer (2%). As repetições entre camadas arenosas e argilosas ocorrem em sua maioria com predominância argilosa (81%), com apenas 19% possuindo predominância arenosa.

Um total de 1.497 registros SPT foram utilizados, correspondendo a aproximadamente 11 sondagens SPT por km² na área de estudo. A Figura 19 apresenta a distribuição espacial dessas sondagens na área estudada.

Figura 19 - Localização dos furos de sondagem.



Fonte: A autora (2022)

3.3 MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO

O estudo das formas de relevo associado ao conhecimento das bases litológicas permitem a compreensão das relações entre os agentes internos e externos do relevo, dando origem às variadas feições morfológicas (GUERRA E GUERRA, 2008). Segundo Ross (1992, 1994), os aspectos morfométricos do relevo podem oferecer um conjunto de parâmetros qualitativos que auxiliam no esclarecimento dos processos e podem servir de base para o planejamento do espaço territorial, utilizando como indicadores as geoformas.

Dessa forma, a geomorfologia como ciência que estuda o relevo e versa com a descrição e classificação das formas que se opõem e interagem com a paisagem (CORRÊA *et al.* 2010), tornou-se instrumento essencial para a pesquisa desenvolvida, trazendo informações úteis sobre o terreno e o relevo da área urbana de Maceió, fundamentais também na compreensão das fisionomias atuais quanto a processos geológicos, importantíssimos para a área de estudo.

O objetivo principal do mapeamento geomorfológico para a presente Tese foi o de realizar através da associação da morfologia de Tabuleiros Costeiros em contraste com padrões morfológicos das unidades adjacentes, a melhoria em escala da representação cartográfica dos limites de Formação Barreiras.

3.3.1 Proposições Metodológicas

Para realizar o mapeamento geomorfológico foram utilizados dados da Base Cartográfica de Maceió (BCM), obtida através de um levantamento aerofotogramétrico realizado no ano de 1999 com produto entregue no ano de 2000, executado pela empresa Maplan - Aerolevantamento S/A.

A ortorretificação das fotografias foi apoiada em uma rede de marcos planialtimétricos distribuídos sob a área urbana do município, que possibilitou curvas de nível com equidistância de 2,00 metros. Mais detalhes sobre a metodologia de aquisição e distribuição espacial da rede planialtimétrica de Maceió podem ser encontrados em Cerqueira (2006).

A partir de técnicas fotogramétricas, utilizando a estereoscopia, foi realizada a restituição da Base Cartográfica, com produtos apresentados através das escalas 1:2000, 1:10.000 e 1:35.000. Apesar do produto cartográfico possuir mais de 20 anos de execução, entende-se que não houve alterações significativas quanto aos aspectos geomorfológicos, sendo possível a utilização desses dados para geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE).

Inicialmente, as curvas de nível foram estruturadas em ambiente SIG, compiladas através do software QGis 3.10.7 com Grass versão 7.8.3. Através da caixa de ferramentas de

processamento do Grass, foi realizada a conversão das curvas de nível (formato vetorial) em arquivos raster (formato matricial), através da extensão *v.to.rast*, chamado de raster de contorno. A partir do raster de contorno foi gerado o Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizando a ferramenta *r.surf.contour*, utilizando uma grade triangular TIN (do inglês “*Triangular Irregular Network*”), com resolução espacial de 1,00 metros.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi gerado para obtenção dos elementos acerca da distribuição espacial dos diferentes níveis topográficos, permitindo correlações entre características geológicas do local, além de revelar possíveis rupturas tectônicas e estruturais, e análises acerca dos fenômenos de erosão. O mapa hipsométrico foi utilizado com propósito de associar as feições geomorfológicas às cotas altimétricas, auxiliando no reconhecimento de unidades homologas e associando-as aos diferentes níveis topográficos.

Para a imagem gerada cada pixel possuiu um valor de altitude atribuído (valor de *z*), em que foi realizada a classificação categorizada em 10 intermitências, com intervalos de 10,00 metros, considerando os valores máximos e mínimos. A cobertura aerofotogramétrica foi realizada apenas na área urbana do município, o que limitou o produto do MDE ao limite da restituição aerofotogramétrica onde existiam as curvas de nível, porém, atendendo os objetivos da pesquisa.

Após a geração do MDE, foi realizado um procedimento de sombreamento do relevo (efeito *hilshades*). Esse sombreamento simula a posição do sol ao iluminar o relevo, atribuindo um fator de exagero vertical, de forma a aumentar o realce do sombreamento, muito útil para visualizar com mais detalhes principalmente estruturas geológicas. Para o mapa gerado, o fator de exagero vertical (fator *z*) considerado foi 10 (dez), considerando os desníveis existentes, com azimute de insolação em 315° e altitude de 45°.

A partir do MDE foram produzidos os mapas de declividade e hipsométrico com base em uma malha de 10m de largura na discretização do formato matricial na escala de 1:10.000. O mapa de declividade foi classificado conforme sugerido por EMBRAPA (1999), sendo elas: 0 – 3m plano, 3 – 8m suave ondulado, 8 – 20m ondulado, 20 – 45m forte ondulado, 45 – 75m montanhoso e >75m escarpado. Para o mapa hipsométrico, foi realizada uma classificação a cada 10m, observando as variações das curvas hipsométricas na caracterização do relevo.

A dissecação do relevo pode ser entendida como uma característica que reflete a energia que perpassa determinado sistema geomorfológico ao longo de sua esculturação recente (BERTOLINI; DEODORO, 2018), baseadas nas relações de densidade de drenagem/dimensão interfluvial média, que possui correlação direta com o conceito de dissecação propriamente

dito, uma vez que mensura o afastamento horizontal médio de diferentes interflúvios de uma mesma unidade morfológica, e o grau de Entalhamento que se refere à amplitude e na dimensão vertical (CREPANI, 1998; ROSS, 1994).

Para a compartimentação geomorfológica, foi realizada a classificação dos valores de dissecação do relevo segundo a metodologia proposta por Ross (1994), determinando o índice de dissecação em função de uma escala que varia de muito fraca a muito forte (Tabela 4).

Tabela 4 - Matriz de índices de dissecação do Relevo segundo Ross (1994)

Grau de Entalhamento dos Vales	Dimensão Interfluvial Média				
	Muito Baixa (>3750m)	Baixa (1750 a 3750m)	Média (75 a 1750m)	Alta (250 - 750m)	Muito Alta (<250m)
Muito Fraco (< de 20m)	11	12	13	14	15
Fraco (20 a 40m)	21	22	23	24	25
Médio (40 a 80m)	31	32	33	34	35
Forte (80 a 160m)	41	42	43	44	45
Muito Forte (>160m)	51	52	53	54	55

Fonte: A autora (2022)

A determinação do grau de entalhamento dos vales e Dimensão interfluvial média foi obtida a partir da metodologia automatizada proposta Guimarães et. al (2017), fazendo uso do MDE em ambiente SIG, utilizando o QGis 3.10.7.

A compartimentação geomorfológica se deu a partir da metodologia proposta pelo Radambrasil (BARBOSA *et al.*, 1984) e aprimorada por Ross (1992, 1994) adotando a 3º e 4º classificação taxionômica do relevo, considerando a escala de representação cartográfica trabalhada. O 3º táxon representou as unidades morfológicas com padrões homogêneas que estão sendo ou foram moldadas por processos que podem ser: (D) denudacionais, resultante da dissecação física e química, ou (A) agradacionais, formadas por acumulação de materiais. O 4º táxon por sua vez refere-se às formas semelhantes, que possuem características fisionômicas similares, em sua representação são codificadas através da gênese e do processo de geração da forma.

Foram realizadas ainda a fotointerpretações para auxiliar na identificação de unidades de relevo homologas através das imagens de satélite do Google Earth e de imagens aéreas levantadas através de voos realizados com RPA (Aeronave remotamente pilotada), auxiliando na validação das unidades geomorfológicas definidas. O levantamento aéreo foi realizado com um RPA modelo Phantom 4 Pro de fabricação da DJI, certificado pela ANAC (Agência

Nacional de Aviação Civil) através do cadastro n° PP-988032490. Os planos de voo foram executados através do aplicativo DroneDeploy, utilizando 75% de recobrimento lateral e longitudinal, com velocidade de voo de 12m/s e altura de 120m, permitida por lei. Para ortorretificação das fotografias foi necessário a coleta de pontos de controle em campo, executados com receptor de duas frequências RTK (*Real Time Kinematic*), de marca CHC, modelo i80 com precisão posicional horizontal de 2,5mm + 0,1 ppm e vertical de 3,5mm + 0,4 ppm, levantado no modo estático e processado pelo IBGE por PPP (Processamento por Ponto Preciso). O Processamento das Ortofotos foi realizado através do software Agisoft PhotoScan.

Conjuntamente com os levantamentos aéreos foi realizada uma campanha de validação em campo para reconhecimento e verificação das informações espaciais representadas, no ano de 2019, tais como: refinamento dos limites representados, verificação das unidades de relevo, avaliação de desníveis topográficos das encostas; tipos de forma, observação de processos geomorfológicos e geológicos (erosão e sedimentação), atuantes na área de estudo.

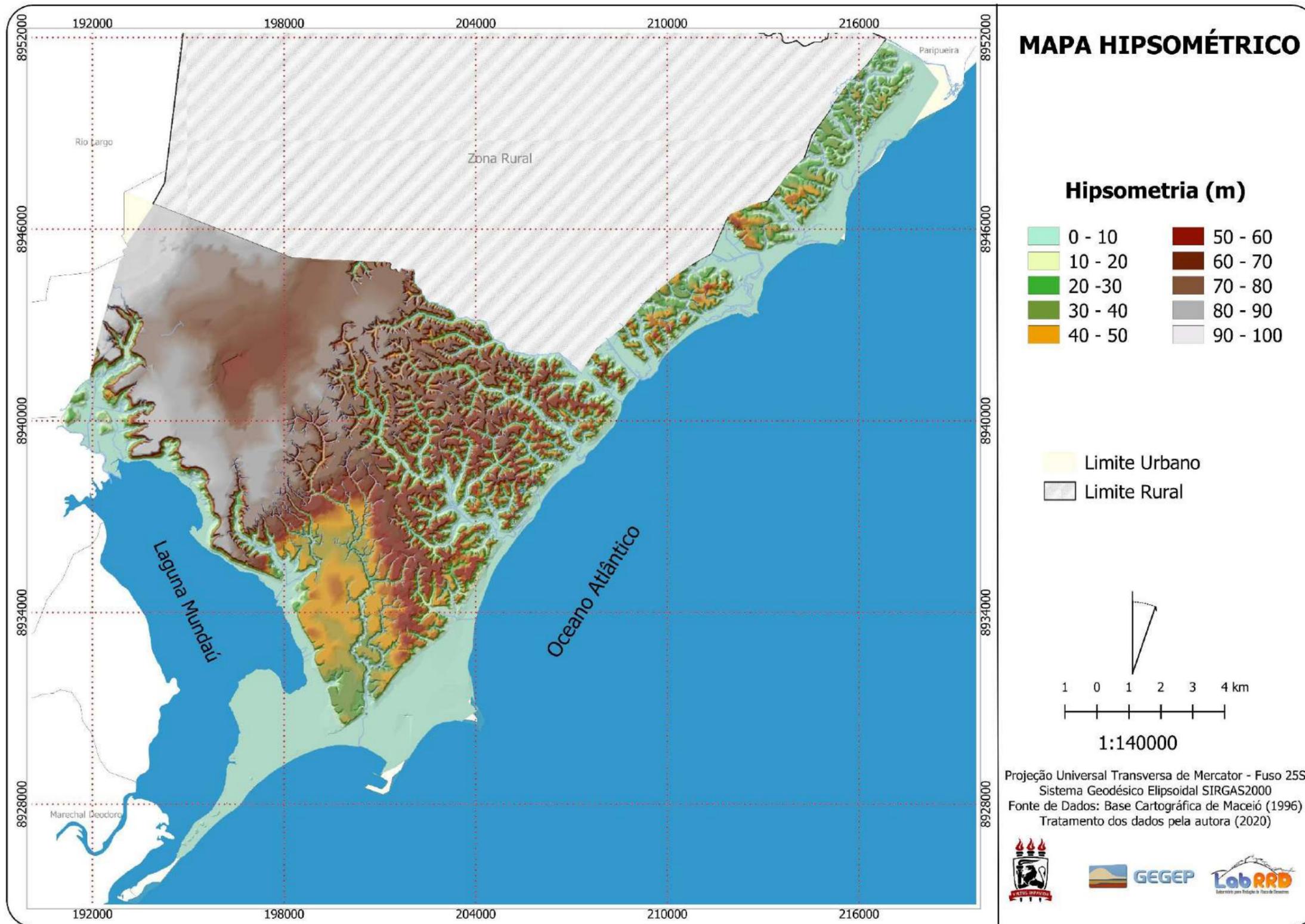
3.3.2 Apresentação e Análise dos Resultados do Mapeamento Geomorfológico.

A partir dos procedimentos descritos na metodologia, foram elaborados os mapas Hipsométrico (Figura 20), declividade (Figura 21) e de dissecação do relevo (Figura 22). O mapa hipsométrico evidencia altitudes crescentes no sentido sul-norte, com menores valores identificados na região de praia, onde encontram-se depósitos Litorâneos e Flúviomarinhos, chegando a 10m de altura. As maiores cotas foram encontradas na região dos Tabuleiros, atingindo até 100m.

Através do mapa de declividade pode ser verificado que a maior parte da área estudada está inserido em região de baixa declividade (0 - 3%), com rugosidade plana e pequenos desníveis que se estendem nos topos dos tabuleiros e na faixa litorânea da cidade. Áreas com altas declividades são identificadas, localizadas nas encostas e vales, penetrando em toda a área estudada, podendo atingir rugosidade considerada montanhosa e escarpado.

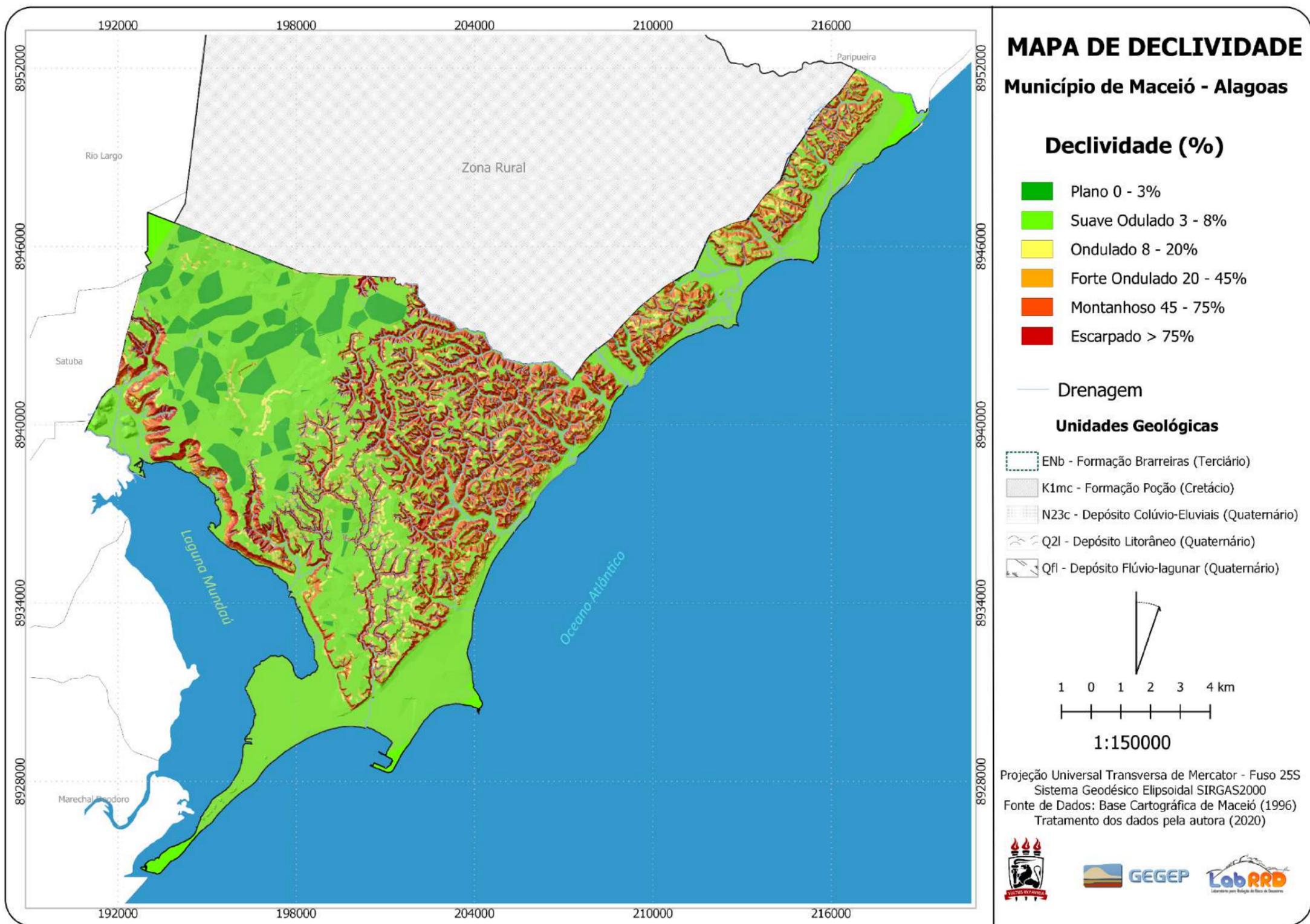
Na determinação do índice de dissecação do relevo, se observou dimensão interfluvial média classificada como muito pequena (< 250m). Já para o grau de entalhamento dos vales, foram observadas variações entre < 20m a < 160m, classificado como muito fraco e fraco no topo dos Tabuleiros e na planície litorânea e lagunar, e entre média a muito forte nas escarpas e vales encaixados cortados pela rede fluvial.

Figura 20 -Mapa Hipsométrico da área urbana da cidade de Maceió



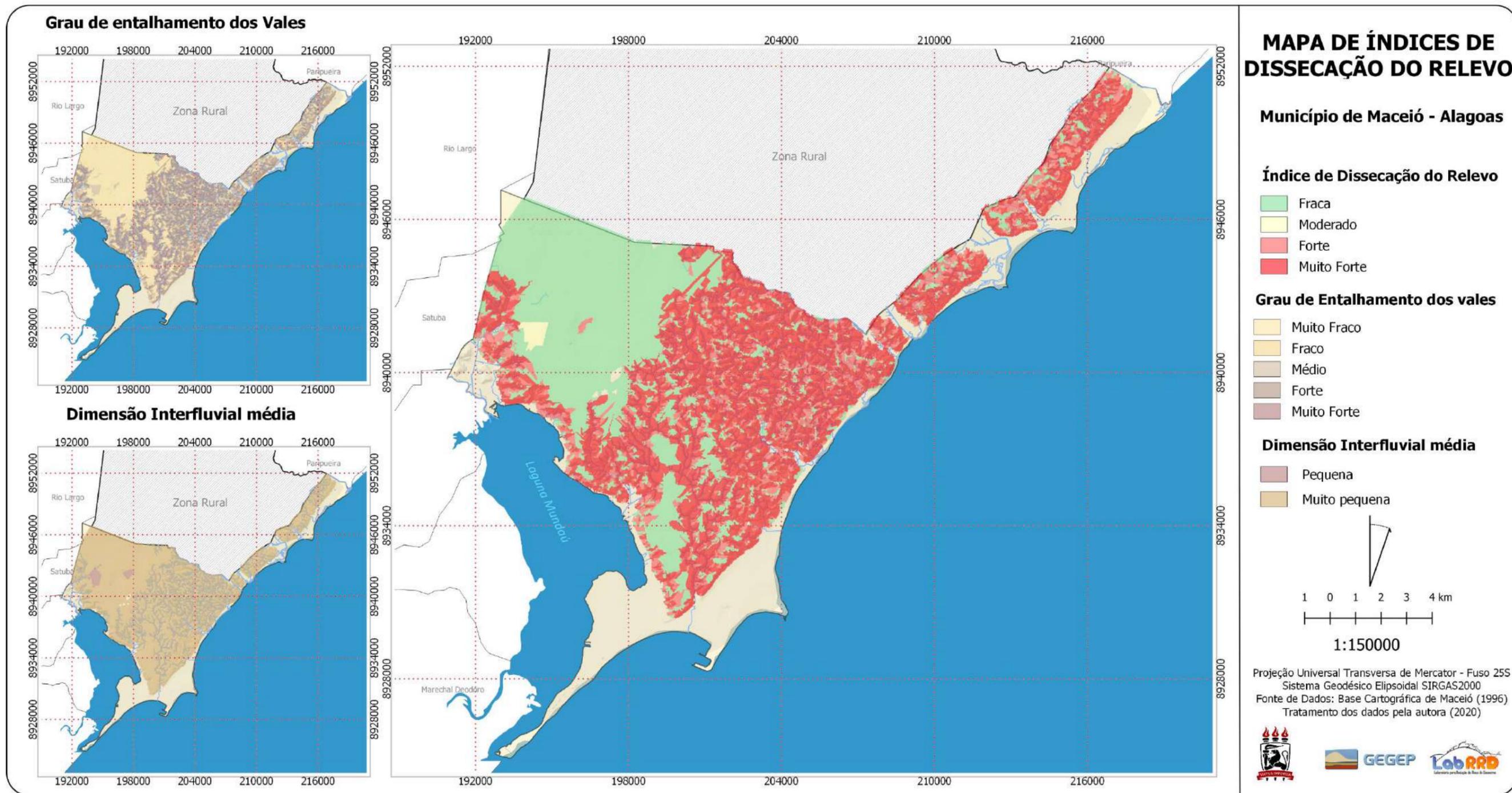
Fonte: A autora (2022)

Figura 21 - Mapa de declividade da área urbana da cidade de Maceió



Fonte: A autora (2022)

Figura 22 - Índices de dissecação do Relevo para a área urbana de Maceió.



Fonte: A autora (2022)

Como pode ser observado através da Figura 22, a dissecação do relevo ocorre com maior intensidade na região nordeste da área urbana, o que pode ser justificado em função da densidade de drenagem existente nessa área, que possibilita relevos mais dissecados desenvolvidos sobre litofácies mais friáveis.

A partir dos dados hipsométricos e de declividade, observando ainda o índice de dissecação do relevo determinado, foi realizada uma compartimentação geomorfológica, onde foram definidas três formas de denudação (D) e cinco formas de acumulação (A) dos 3° e 4° táxon, classificadas como:

- **Dtc 15:** são os tabuleiros conservados caracterizados por relevo suavemente dissecado com extensas superfícies de gradientes extremamente suaves, possuindo dimensão interfluvial média muito pequena (< 250m) e grau de entalhamento muito fraco (< 20m), onde se encontra uma malha urbana densamente ocupada.
- **Dt 45:** são os tabuleiros dissecados com entalhamento forte do vale (80-160m), com dimensão interfluvial média classificada como muito pequena (< 250 m). A dissecação é resultado da ação de um conjunto de processos erosivos que modelam ou esculpem uma determinada paisagem (DANTAS; MEDINA, 2000). Na região ao norte de Maceió, a densidade de drenagem é bem maior que na região sul (SANTOS, 2006), o que impacta diretamente no grau de dissecação impresso. Este tipo de forma está localizado a noroeste do município, demarcados entre as bacias do rio Jacarecica e rio Pratygy.
- **Ded 15:** são as escarpas degradadas, com relevo acidentado constituído por vertentes erosivas e encostas naturais. Formam vales fluviais que funcionam como uma rede de drenagem natural e estão associados aos tabuleiros conservados e dissecados. Esse padrão também é identificado ao longo das vertentes da laguna Mundaú, onde se desenvolvem encostas declivosas, geralmente ocupadas, englobando os bairros do Mutange e Bebedouro.
- **Api:** a planície de inundação, situadas nos fundos dos vales, que apresentam uma inclinação das vertentes entre 0° e 3°, mais alargados no litoral norte, quando associados aos tabuleiros dissecados.
- **Apfl:** são as planícies fluviolacustre, caracterizadas por Dantas (2017) como superfícies planas e de interface com sistemas deposicionais fluviais e lacustre, constituídas de depósitos argilo-arenosos a argilosos, onde ocorrem abaciamentos (ou suaves depressões em solos arenosos) em áreas planas ou em baixos interflúvios, denominados Áreas de Acumulação Inundáveis. Esse embaciamento destaca-se por ocorrer no topo dos

Tabuleiros Conservados, identificados na região do bairro do Pinheiro e do Distrito Industrial no bairro Tabuleiro dos Martins.

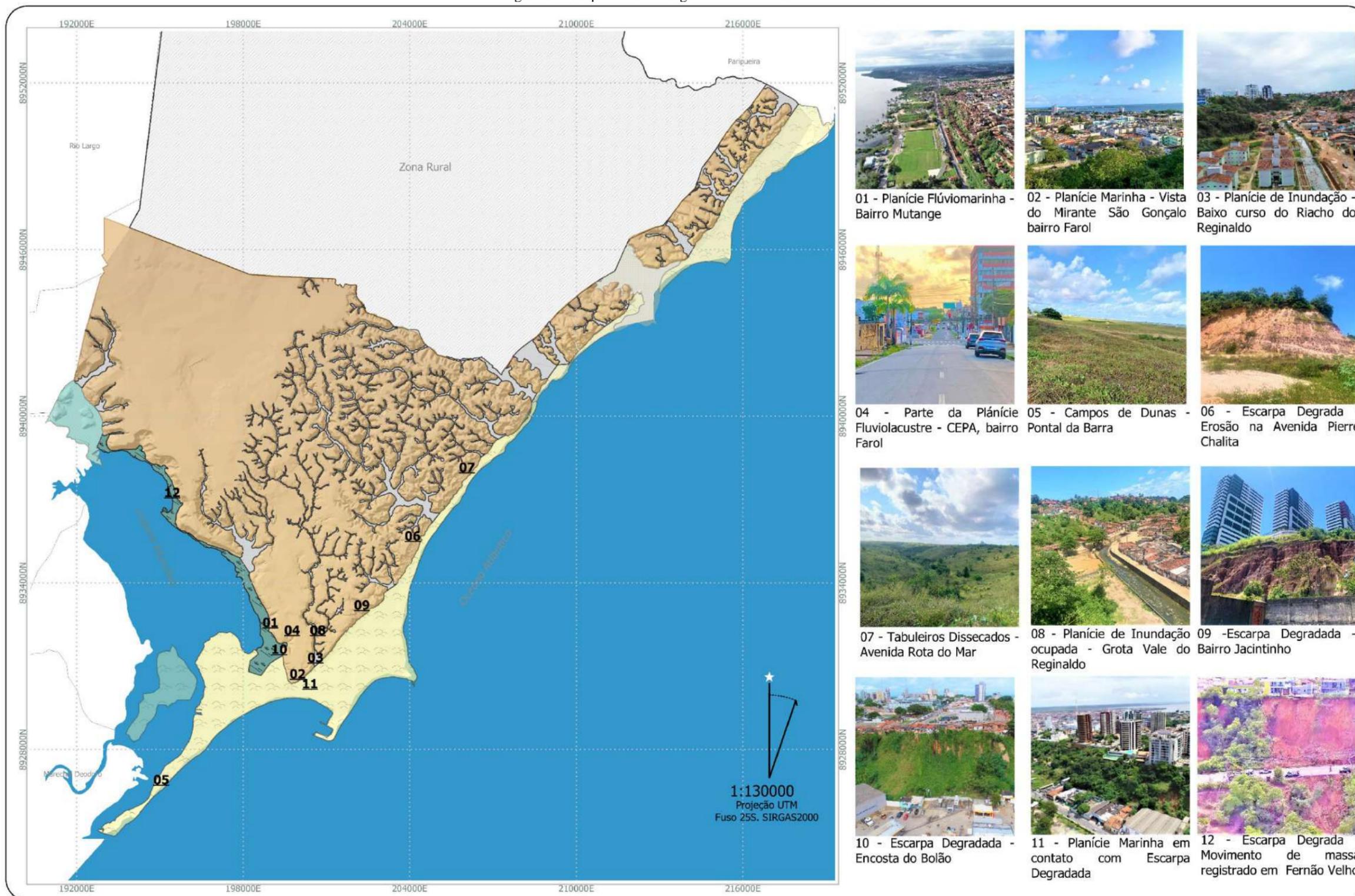
- **Apm:** são as planícies fluviomarinhas, que estão associadas a canais de maré, rios e lagunas estuarinas, revestidas originalmente por manguezais ricos em matéria orgânica, podendo ser resultantes de processos de colmatação de paleolagunas, como nas bordas da laguna Mundaú, localizados ainda na desembocadura do rio Mundaú.

- **Apm:** são áreas constituídas de depósitos arenosos gerados por processos de sedimentação marinha, que possuem inclinação das vertentes entre 0° e 5°. Essa área é mais alargada nos bairros mais densos, como Pajuçara, Ponta Verde e Jatiúca, se estreitando nos bairros pertencentes ao litoral norte da cidade.

- **Acd:** são áreas de relevo ondulado, depositados por ação eólica longitudinalmente a linha de costa, constituída por depósitos areno-quartzosos, identificada na região do Pontal da Barra, em trecho desde a praia até a laguna Mundaú.

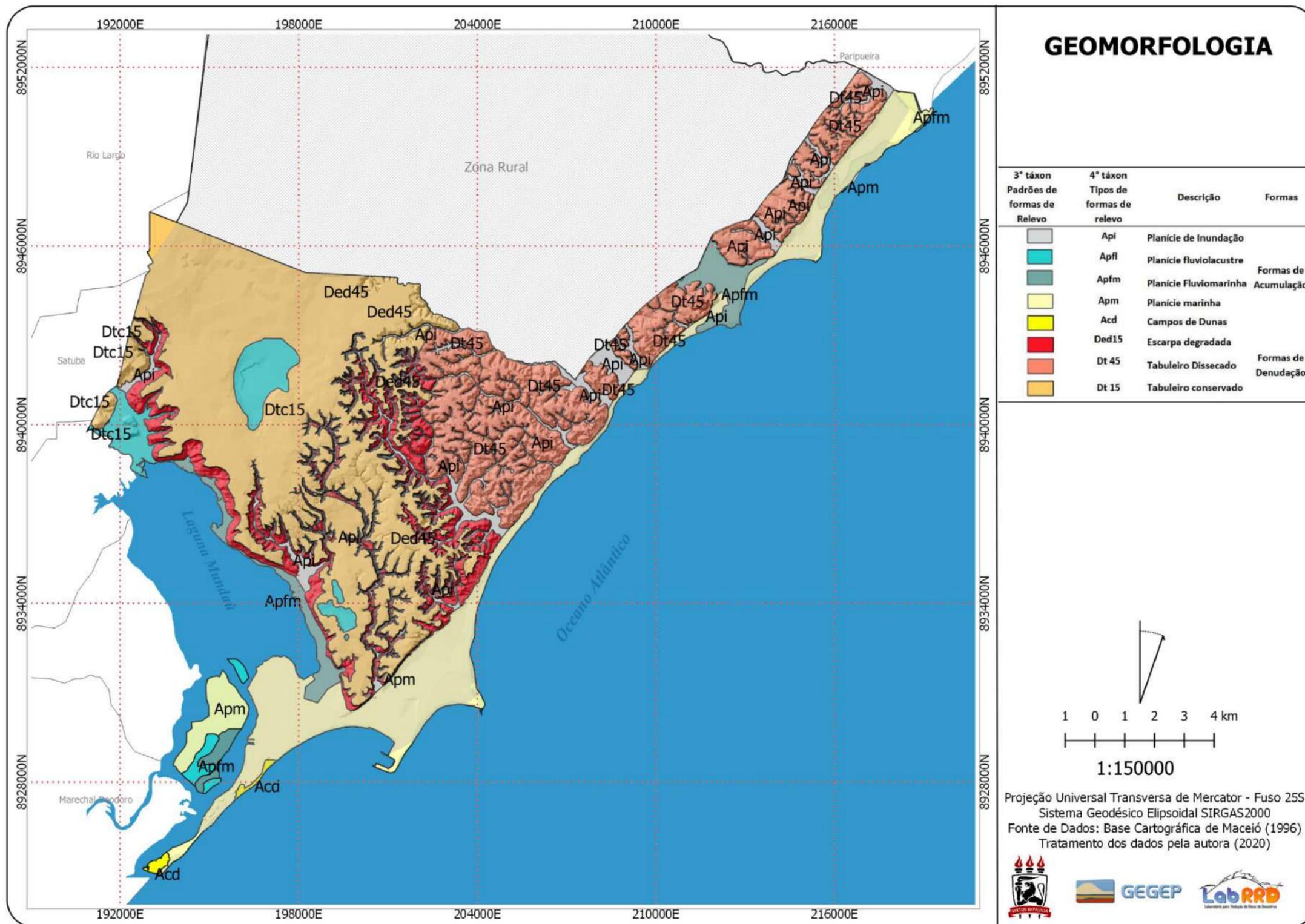
Após a definição das compartimentações geomorfológicas, foi realizada uma campanha de validação em campo, obtendo-se fotografias terrestres e aéreas, fazendo-se uso de RPA. Todas as classes foram identificadas, com identificações de alterações antrópicas na paisagem. A Figura 23 apresenta um detalhamento de algumas áreas identificadas e a Figura 24 apresenta o mapa geomorfológico produzido nesta pesquisa para a área urbana do município de Maceió.

Figura 23 - Mapa Geomorfológico da área urbana da cidade de Maceió.



Fonte: A autora (2022)

Figura 24 - Mapa Geomorfológico da área urbana da cidade de Maceió.



Fonte: A autora (2022)

Em Maceió, topo dos Tabuleiros Conservados apresenta relevo plano, claramente observado através do mapa de declividade, onde se concentra densidade construtiva acentuada, de uso misto, desenvolvendo-se importantes obras de engenharia, com verticalização crescente para uso residencial e com disponibilidade territorial potencial para expansão urbana.

Uma outra característica encontrada nos mapas geomorfológicos e que merece destaque está relacionada com a ocorrência de embaciamento nos topos dos Tabuleiros conservados (Apfl - Planície Fluvio-lacustre). A primeira dessas áreas está localizada no bairro Tabuleiro dos Martins, inserida na região com maior altitude (com hipsometria entre 60 - 70m), onde segundo Lima e Neto (2020) as águas superficiais se acumulam nas depressões do terreno natural e são intensivamente exploradas para consumo humano e industrial. Segundo Almeida e Ferreira Neto (2017), essa área passou por um intenso processo de urbanização na década de 1980, o que induziu a obras de drenagem das águas acumuladas para a bacia do rio Jacarecica.

A segunda área está localizada nas proximidades do Centro Educacional de Pesquisas Aplicadas – CEPA, no bairro do Pinheiro, onde há ocorrências de inundações frequentes no período chuvoso. Essa região encontra-se com menores altitudes, sendo identificadas através do mapa hipsométrico cotas entre 40m - 50m. Estudos realizados nessa região por Dantas, Mello e Goes (2019) apontam a ocorrência de solo hidromórfico gerado em ambiente lacustre, oriundo da pedogênese de arenitos imaturos da Formação Barreiras.

Em relação aos Tabuleiros Dissecados são identificados na região nordeste, onde se encontram os bairros de Jacarecica, Guaxuma, Garça Torta, Riacho Doce, Pescaria e Ipioca. Estes bairros apresentam grande potencial turístico e atualmente passam por um processo de urbanização com adensamento crescente, originada pelas mudanças no Código de Edificações e Urbanismo do Município de Maceió (Lei 3.537/86), que possibilitou a partir de 2007 a verticalização em até 20 pavimentos na região, sendo potencializada após a construção do Shopping Park Maceió (2013), da Avenida Josefa de Melo (2014) e das obras em andamento de duplicação da AL-101 Norte.

O limite entre os Tabuleiros Costeiros e a planície litorânea e lagunar é claramente demarcada por encostas íngremes, classificadas no mapeamento geomorfológico como Escarpas Degradadas que se apresentam susceptíveis a movimento de massa e erosão, causados por processos antrópicos e intensificados no período chuvoso e são nessas áreas onde encontram-se as regionalmente conhecidas “Grotas”.

3.4 MAPEAMENTO GEOLÓGICO

Na etapa de mapeamento geológico será apresentada a metodologia utilizada para a delimitação da Formação Barreiras na área urbana de Maceió a partir de dados morfométricos, vistos no item 3.4. Após a delimitação, os perfis típicos de solo foram avaliados a fim de identificar a fácies geológica de maior ocorrência identificada até a profundidade estudada nas sondagens SPT trabalhadas nesta tese.

3.4.1 Delimitação da Formação Barreiras na área Urbana de Maceió

Os principais mapas geológicos da cidade de Maceió são apresentados em escalas de 1:50.000 e 1:250.000. Em virtude da generalização cartográfica existente para as pequenas escalas, esses mapas não apresentam detalhamentos que sirvam de base para planejamento territorial e ambiental na cidade.

A necessidade de um mapa geológico em melhor escala e que compreendesse principalmente a Formação Barreiras se tornou essencial para esta pesquisa, uma vez que a plotagem dos pontos de sondagem no mapa geológico auxiliaria na identificação e caracterização do domínio compreendido.

Com esse intuito, foi utilizada a base cartográfica existente na Prefeitura de Maceió/AL, para a extração de dados altimétricos que permitissem, através de uma análise da geomorfologia local, um melhor entendimento das unidades geológicas do município.

A morfologia dos Tabuleiros Costeiros associada a Formação Barreiras na costa brasileira pode ser encontrada na literatura, discutindo direta e/ou indiretamente, entre outras questões, a distribuição e limites dessa unidade geológica como em Furrier, Araújo e Meneses (2006), no estado da Paraíba, em Almeida *et al.* (2018) na Zona Urbana da Ilha de São Luís – MA, em Barbosa, Lima e Furrier (2019) no município de Conde – PB, West e Mello (2020) na região Sul do Espírito Santo, Souza, Lupinacci e de Oliveira (2021) na região da Costa das Baleias – BA, entre outros.

A partir dos mapas hipsométrico, de declividade e da compartimentação geomorfológica realizada, tomando como referência o conhecimento prévio do mapeamento geológico proposto por Mendes (2017), foi realizado uma delimitação das unidades geológicas presentes na área urbana da cidade de Maceió, em escala 1:10.000, com ênfase nos depósitos de Formação Barreiras.

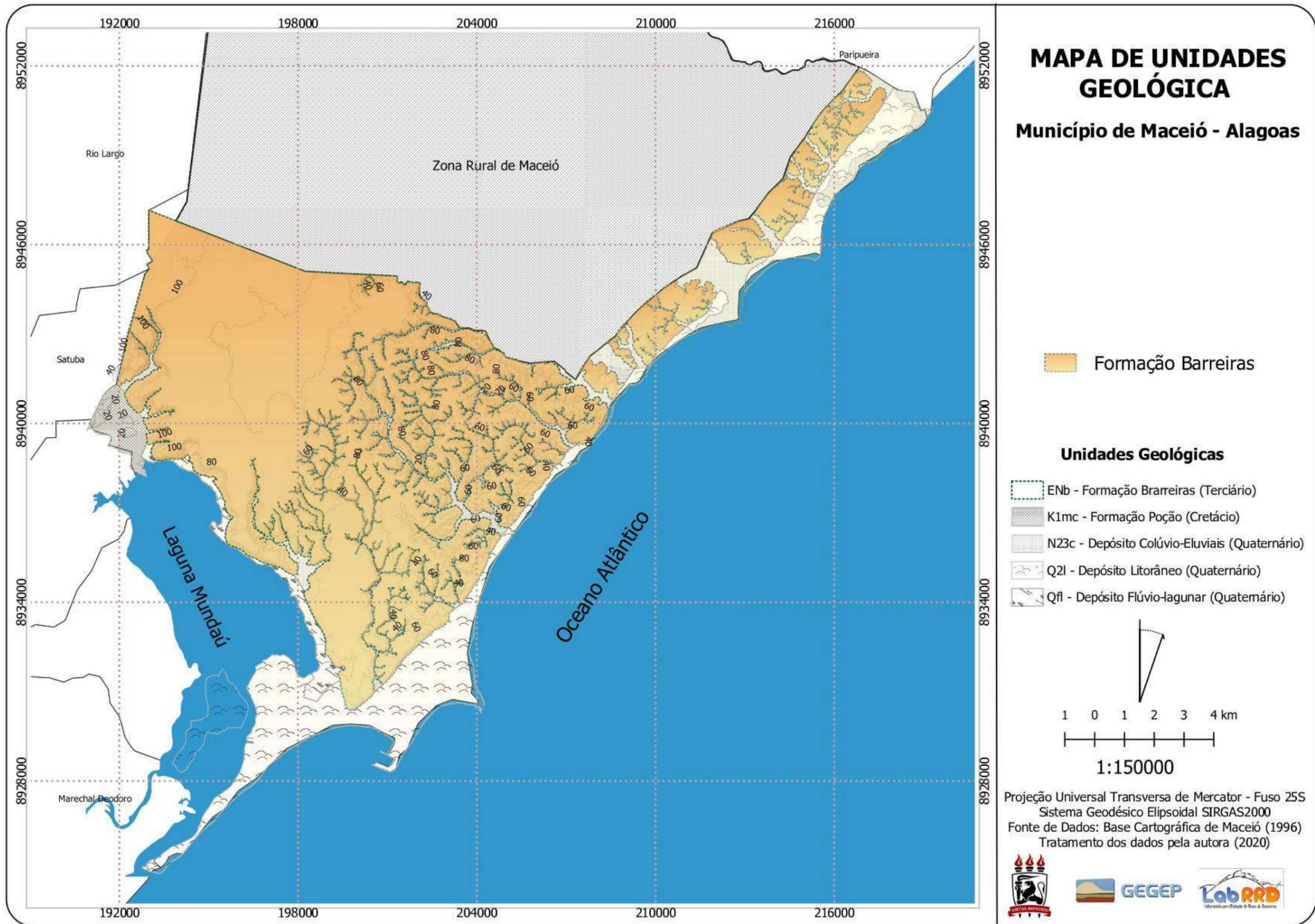
Os limites da Formação Barreiras foram vetorizados considerando as curvas de nível a partir da cota de 5m, podendo chegar até a cota 85m à medida que se distanciam do mar, no sentido Sul-Norte, percorrendo vales que se iniciam na região dos altos tabuleiros, com cotas mais elevadas e vão até a base das escarpas que limitam os sedimentos de praia (depósitos litorâneos). Uma campanha de campo para validação desse limite foi realizada no ano de 2019, conjuntamente com a campanha de validação da compartimentação geomorfológica.

Os resultados apontaram a Formação Barreiras como a unidade mais expressiva encontrada no mapeamento geológico, recobrimo uma área de aproximadamente 143,41km², correspondendo a 72,45% da área urbana de Maceió, percorrendo toda a região dos tabuleiros conservados e dissecados. Os depósitos litorâneos corresponderam a 17,12% da área estudada (aproximadamente 33,86km²), em uma faixa mais alargada na região dos bairros Pajuçara, Ponta Verde e Jatiúca, estreitando-se nos bairros do litoral norte. Os depósitos flúviolagunares corresponderam a 4,54km² (2,30%), localizados as margens da Laguna Mundaú. O resultado deste mapeamento pode ser observado através da Figura 24.

Os mapas geológicos apontam a noroeste, o afloramento da Formação Poção, porém, não há critérios geomorfológicos para essa delimitação, sendo considerados os limites descritos nos produtos cartográficos consultados, adaptada para escala trabalhada, correspondendo a aproximadamente 2,98km² (1,5%) da área estudada.

Na escala trabalhada foi possível ainda a identificação de depósitos nos sopés das escarpas e fundo de vales, que nos mapas geológicos consultados não são visíveis em função da generalização cartográfica. Esses depósitos foram reclassificados e caracterizados como Colúvio-eluviais, representando 6,63% (13,14km²) da área estudada. A Figura 25 apresenta os resultados das unidades geológicas identificadas, com ênfase no depósito de Formação Barreiras.

Figura 25 - Mapa Geológico de unidades geológicas com destaque para a Formação Barreiras



Fonte: A autora (2022)

3.4.2 Identificação das Fácies Existentes no Domínio

Um aspecto geológico a ser considerado como característica importante da Formação Barreiras é a identificação de suas Fácies Sedimentares, estas que transmitem informações da Formação, tais como seus processos de transporte, deposição e/ou diagênese. De acordo com Christofolletti (1981), os sedimentos que vão sendo depositados através de uma dada bacia, terão características e aspectos gerais diferentes, os quais são correlacionáveis com os ambientes locais de deposição. Essas variações laterais, dentro da bacia de sedimentação, são chamadas de fácies sedimentares.

Alheiros (1998), através de estudo das fácies ambientais desses sedimentos, verificaram que estes constituem um sistema deposicional fluvial do tipo entrelaçado, interagindo com fácies de leques aluviais, mostrando pelo menos três fácies distintas, sendo estas consideradas:

- a) **Leque Aluvial proximal:** granulação grossa e má seleção granulométrica, com conteúdo de argila disseminado pelo sedimento, podendo apresentar areias grossas e conglomeráticas;
- b) **Canal Fluvial:** é disseminado pelo sedimento em decorrência principalmente da argilização dos feldspatos que constituem na grande parte dos grãos de areia, sendo caracterizada por ser de base arenosa e mais suscetível a processos erosivos;
- c) **Leque Distal/planície aluvial:** nesta fácies os sedimentos mostram estratificação horizontal com intercalação de camadas arenosas e argilosas com repetição vertical desse padrão, o que indica ciclos de deposição, possuindo conteúdo argiloso mais significativo, com granulometria fina a média.

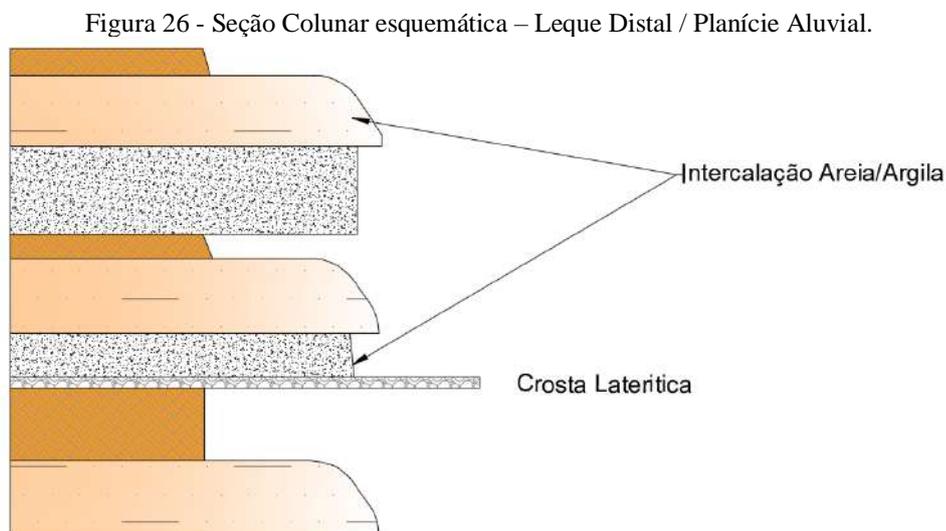
Considerando estas três descrições básicas das fácies de Formação Barreiras e observando as variações de granulometria apresentadas através dos perfis típicos representativos advindos das sondagens SPT, pode ser identificada a fácies predominante de ocorrência na cidade de Maceió.

Não há indicações de camadas conglomeráticas nas sondagens analisadas, e a presença de pedregulho e seixos na descrição tátil visual é muito pequena, representando menos de 1% do total de sondagens. Dessa forma, o leque aluvial proximal pode ser descartado. A fácies Canal também pode ser desconsiderada inicialmente, pois os perfis representativos mostram muitos finos e camadas com pouco ou nenhum surgimento de areias na maior parte dos perfis.

Dessa forma, as características induzem a identificação da fácies Leque Distal/ planície aluvial. Apesar do perfil de solo se apresentar predominantemente argiloso, não existindo uma

fície com características totalmente argilosa, a granulometria pode ser destaca como característica. Além dessa forte indicação, é possível que para cidade de Maceió a camada argilosa se apresente mais espessa, encontrando-se em sua maioria nas camadas superiores.

Segundo Bandeira (2010), a alternância de argila e areia, característica do leque distal, cria situações peculiares, principalmente no que diz respeito a estabilidade de encostas, considerando que, se nas camadas de topo o solo for argiloso e conseqüentemente menos permeável, esta camada sustentará a cobertura vegetal e reduzirá a erosão, já em caso de camadas arenosas na base da encosta, poderá ocorrer o processo erosivo, causando tombamento e queda de blocos da camada superior. A Figura 26 apresenta a coluna esquemática para o leque distal proposta por Alheiros e Ferreira (1991).



Fonte: Adaptado de Alheiros e Ferreira (1991).

Na cidade de Maceió há carência de estudos que indiquem as características dos sedimentos de Formação Barreiras, principalmente no que diz respeito à caracterização e identificação das fácies existentes, porém, estudos realizados por Bandeira (2003), Bandeira (2010) e Silva (2007) podem ser usados como referência para identificação e validação dos resultados obtidos nesta pesquisa.

3.5 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA PARA GERAÇÃO DE MAPAS DE RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO

As análises Geoestatísticas realizadas tiveram como objetivo principal reconhecer o comportamento geotécnico do solo em termos de resistência a penetração SPT, na área urbana da cidade de Maceió, inserida sob sedimentos de Formação Barreiras.

A melhoria na escala de representação dos limites da Formação Barreiras na cidade de Maceió através de dados altimétricos, permitiu uma maior acurácia nas localizações das sondagens existentes no município, e com isso maior segurança para definir aquelas que realmente encontravam-se sob estes sedimentos.

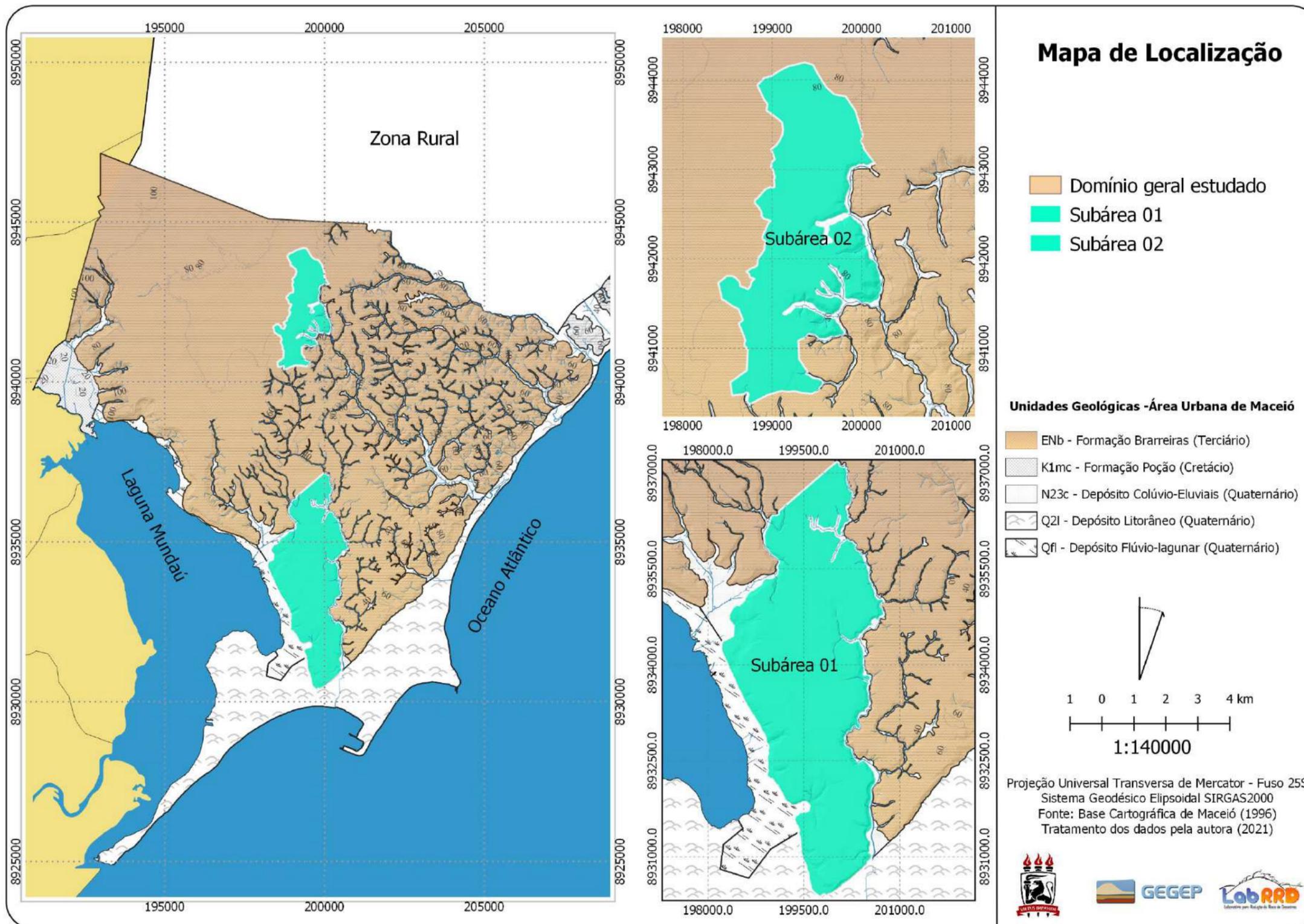
Assim, para a construção dos mapas de resistência a penetração (N_{spt}), foram observados inicialmente, a distribuição espacial dos registros SPT, identificando na porção que compreende os bairros do litoral norte (Ipioca, Pescaria, Riacho Doce, Garça Torta e partes dos bairros Benedito Bentes, Jacarecica e Guaxuma), a inexistência ou ausência de registros SPT suficientes para uma análise adequada, limitando assim a possibilidade de avaliação geoestatística de toda a zona urbana de Maceió.

Dessa forma, foram definidas 3 áreas distintas (Figura 27) para a modelagem geoestatística considerando a maior densidade de registros de sondagens: área Domínio; Subárea 01 e Subárea 02. A área Domínio representa a maior porção estudada na zona urbana de Maceió, composto pelos bairros mais adensados, com área de aproximadamente 129,30km², onde a distribuição espacial dos registros de sondagens SPT sob sedimentos de formação Barreiras era predominante, incluindo ainda todos os locais de coleta de amostras e investigação Geotécnica.

A Subárea 01 possui 9,61km², compreendida entre as coordenadas UTM E = 198206,394 e N = 8930367,288; E = 200761,268 e N = 8937175,781, zona 25S, meridiano central -33°, onde estão inseridos os bairros do Farol, Pitanguinha, Pinheiro, Gruta de Lourdes e parte do Mutange e Bebedouro. Nesta subárea ainda estão 03 locais de investigação geotécnica realizada nesta pesquisa, a Grota da Moenda, a encosta do Mutange e o HCOR, tratadas no capítulo 4.

A subárea 02 possui 3,61km², está compreendida entre as coordenadas UTM E = 198396,269 e N = 8940374,300; E = 200228,394 e N = 8944195,805, zona 25S, meridiano central -33°, onde estão inseridas parte dos bairros Antares, Benedito Bentes, Tabuleiro dos Martins e Cidade Universitária.

Figura 27 - Áreas de influência dos mapas geoestatísticos.



Fonte: A autora (2022)

Considerando a variabilidade espacial desses dados, os registros SPT foram segregados em dois períodos com relação a estação seca (agosto-março) e estação chuvosa (abril-julho), considerando as características hidrológicas da região (Cap.02), analisada a resistência à penetração N_{spt} nas profundidades de 2,0m, 4,0m, 6,0m, 9,0m e 12,0m, considerando a experiência das fundações executadas na região estudada, sendo essas profundidades as mais relevantes. As análises geoestatísticas foram realizadas através do software ArcGis 10.4.1, conectado ao sistema gerenciador de banco de dados PostGIS, envolvendo basicamente duas etapas:

- a) análise exploratória dos registros de sondagem;
- b) Estimativa dos valores com base na krigagem ordinária.

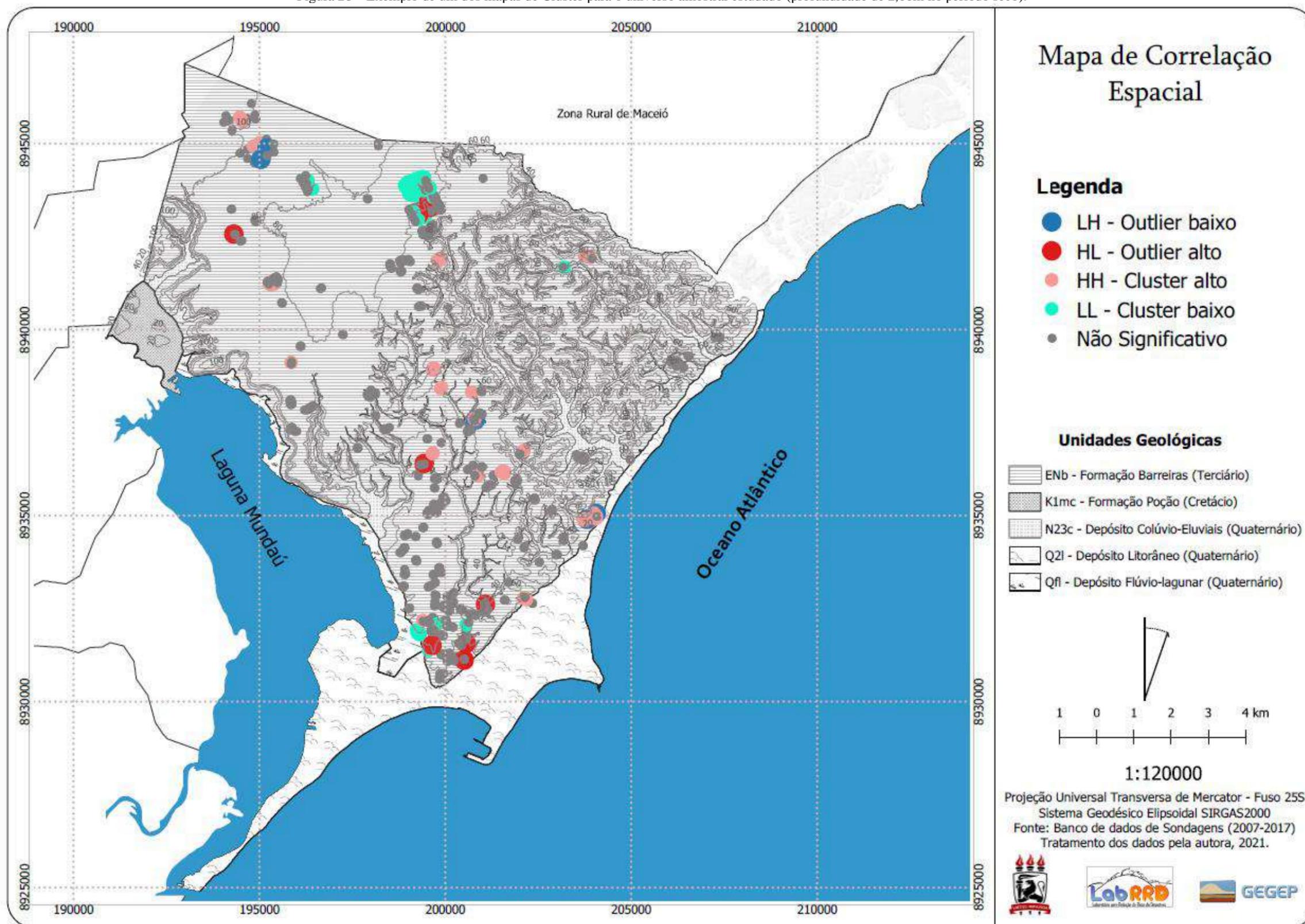
A análise exploratória dos registros de sondagem se deu de duas formas, a primeira, realizando uma avaliação da autocorrelação espacial entre as amostras através da construção dos mapas de *Clusters*, e a segunda realizando a análise exploratória através da estatística descritiva, ambas utilizando as ferramentas do pacote de análise espacial existente no ArcGis.

Os chamados mapas de *Cluster* representam espacialmente as amostras analisadas, realizando agrupamento de valores próximos em pares, estatisticamente significativos, considerando a estatística de dispersão do índice I de Moran (1950), observando os níveis de similaridade (autocorrelação positiva) ou dissimilaridade (autocorrelação negativa), além da aleatoriedade e proximidade entre os dados (Legendre, 1993, Legendre, 1990). Em termos práticos, a representação espacial é um mapa do tipo COType, indicando a similaridade através do agrupamento espacial de amostras com valores altos e baixos (clusters) ou dissimilaridade, indicando outlier, seguindo 05 padrões a saber:

- a) HH – Similaridade estatística de valores altos e próximos (agrupamento de cluster);
- b) LL - Similaridade estatística de valores baixos e próximos (agrupamento de cluster);
- c) HL - Dissimilaridade estatística de valores altos (outlier de valor alto)
- d) LH – Dissimilaridade estatística de valores baixos (outlier de valor baixo)
- e) Não significativos – não se enquadram nos agrupamentos por apresentarem níveis variados.

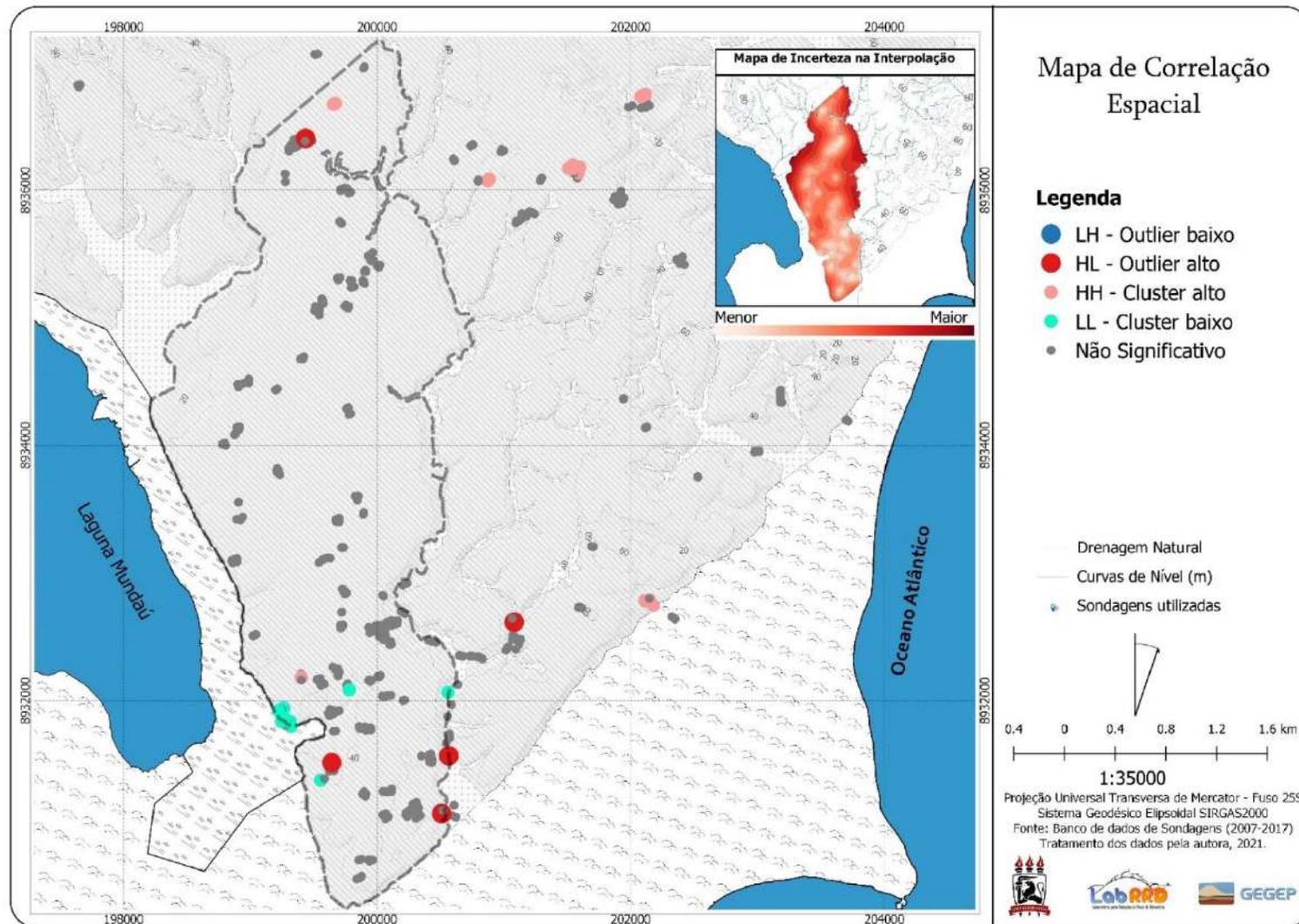
Os mapas de cluster foram construídos para todas as análises realizadas e após a geração desses mapas, os *outliers* e *clusters* de valores altos e baixos eram avaliados, verificando se a sua exclusão traria melhorias estatísticas nos resultados da interpolação por krigagem, realizada por validação cruzada. As Figuras 28, 29 e 30 apresentam exemplos de mapas de *outliers* e *clusters* construídos nas análises.

Figura 28 – Exemplo de um dos mapas de Cluster para o universo amostral estudado (profundidade de 2,00m no período seco).



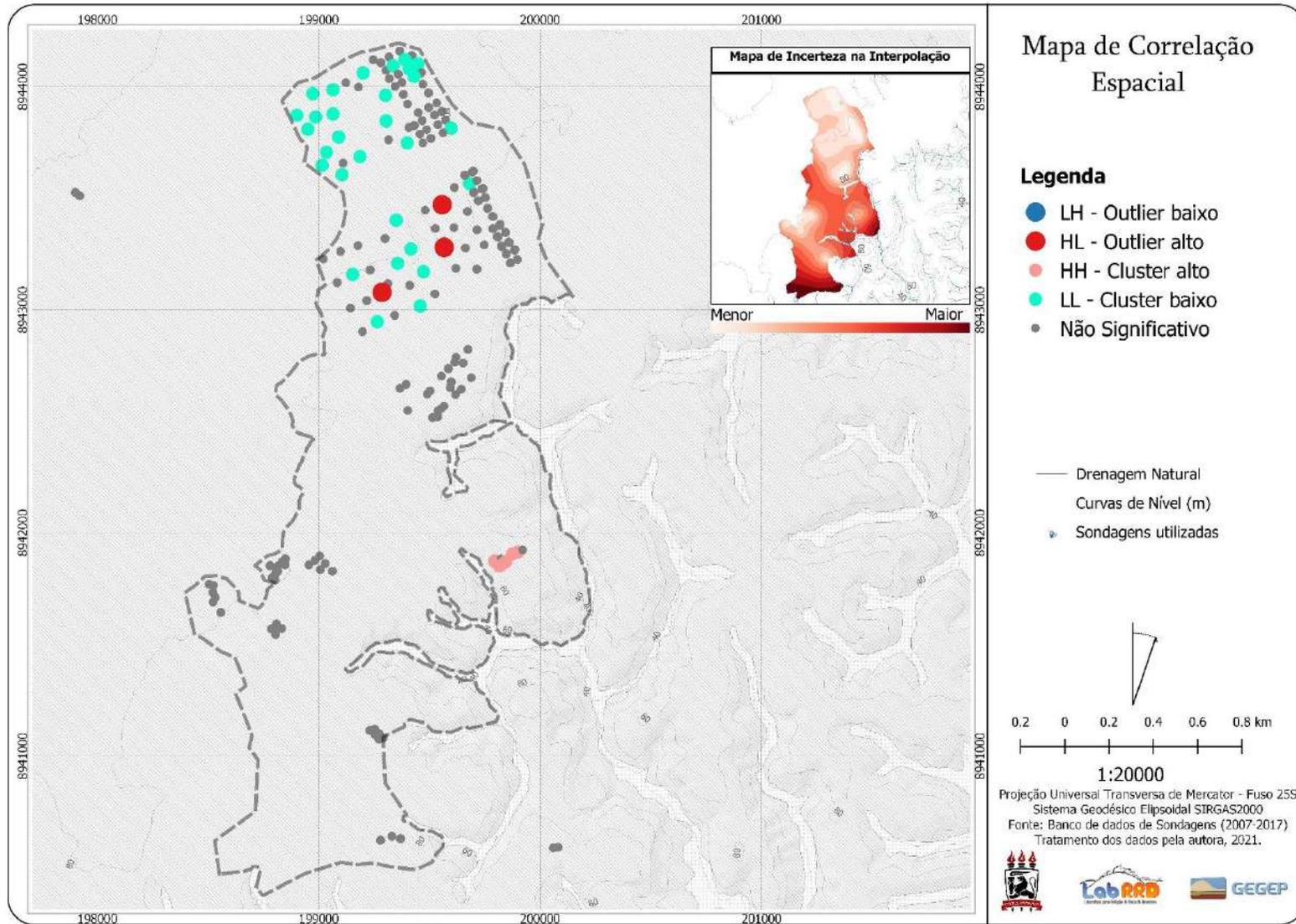
Fonte: A autora (2022)

Figura 29 - Exemplo de um dos mapas de Cluster para a subárea 01 (profundidade de 2,00m no período seco).



Fonte: A autora (2022)

Figura 30 - Exemplo de um dos mapas de Cluster para a subárea 02 (profundidade de 2,00m no período seco).

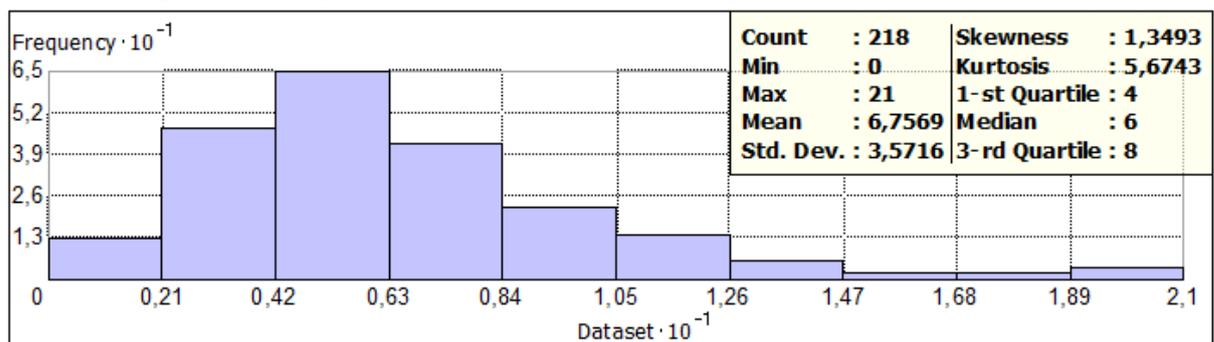


Fonte: A autora (2022)

A análise exploratória com base na estatística descritiva se deu através da ferramenta *Geostatistical Analytic* do ArcGis. Essa ferramenta fornece parâmetros estatísticos básicos e subsídio para avaliação da correlação entre as amostras. Estão disponíveis para realização das análises o histograma, contendo a estatística básica, a análise através do gráfico Normal Q-Q, do mapa de Voronoi, do semivariograma e da nuvem de covariância.

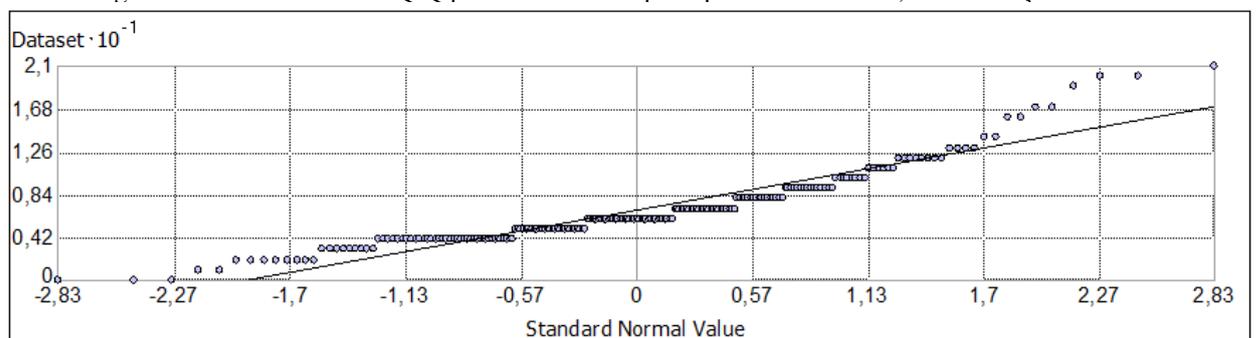
Nessa etapa que antecede a interpolação propriamente dita, é possível identificar o tipo de amostra e realizar a normalização destas quando necessário. Os parâmetros estatísticos obtidos auxiliam na compreensão do comportamento amostral e estão descritos nos resultados para cada área estudada. Para efeito de representação, A Figura 31 apresenta um exemplo de histograma e a Figura 32 um exemplo do gráfico Normal Q-Q, obtidos para a profundidade de 2,00m na estação seca, na área Domínio estudada. Pode ser observado que as amostras apresentam um histograma de distribuição normal, possuindo correlação espacial.

Figura 31 - Histograma para a variável Nspt na profundidade de 2,00m – estação seca.



Fonte: A autora (2022)

Figura 32 - Gráfico Normal Q-Q para a variável Nspt na profundidade de 2,00m – estação seca.



Fonte: A autora (2022)

A segunda etapa da análise estatística foi a estimativa dos valores com base na krigagem ordinária (método descrito no item 3.1.3), onde se realizou a interpolação propriamente dita.

Uma das grandes vantagens desse método é a possibilidade de avaliação das incertezas na interpolação, analisadas a partir da variância e covariância.

Nesta etapa, foi avaliada a possível ocorrência de anisotropias através do variograma unidirecional, com direção de 0°, 45° e 135° e abertura de 90°. Foi observado que as amostras demonstram a presença de anisotropia em relação a variável resistência N_{spt} , ou seja, ocorre uma variação nas propriedades em função das direções. Dessa forma, as direções de análises variaram em função das profundidades e dos períodos em cada área estudada, de forma a minimizar esse fenômeno.

O modelo esférico foi o utilizado por apresentar melhor adequação para as amostras utilizadas. Ao realizar a análise por validação cruzada foi possível avaliar através do variograma, o erro produzido na interpolação. Também foi possível a construção de um mapa apontando áreas onde os resultados da interpolação possuem maiores ou menores incertezas.

Após a realização das interpolações por krigagem, foi necessário a definição de intervalos de representação espacial exibidos através de classes temáticas nos mapas produzidos. Esses intervalos foram definidos considerando os estados de compacidade e consistência dos solos sugeridos pela ABNT NBR 6484/2020, observando que de acordo com as características presentes nos perfis representativos dos solos estudados (item 3.3.1), as sondagens demonstram uma predominância de camadas argilosas, foram utilizados os valores de N_{spt} para as argilas e siltes argilosos, conforme Tabela 5 e 6.

Tabela 5 - Índice de resistência a Penetração N para argilas

Índice de resistência a penetração N	Designação
≤ 2	Muito mole
3 a 5	Mole
6 a 10	Média (o)
11 a 19	Rija (o)
20 a 30	Muito Rija (o)
> 30	Dura

Fonte: NBR 6484 (2020)

Tabela 6 - Índice de resistência a Penetração N para areias e siltes

Índice de resistência a penetração N	Designação
≤ 4	Fofa (o)
5 a 8	Mediamente compacta (o)
9 a 18	Pouco compacta (o)
19 a 40	Compacta (o)
> 40	Muito compacta (o)

Fonte: NBR 6484 (2020).

3.5.1 Mapas geoestatísticos da Subárea Domínio.

A análise iniciou através da construção dos mapas de *outliers* e *clusters*. Das 1592 sondagens existentes foram utilizados 1.252 registros SPT para a geração dos mapas geoestatísticos da subárea Domínio, havendo diminuição gradativa da quantidade de registros com a profundidade.

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos na análise exploratória dos dados. Os parâmetros estatísticos para o universo amostral utilizado mostram uma variação na quantidade de registros SPT em cada profundidade e na estação chuvosa. Como pode ser observado, os maiores coeficientes de variação ocorrem na profundidade de 2,00m, que também possui maior quantidade de registros analisados, e esses coeficientes são menores nas maiores profundidades.

Tabela 7 - Parâmetros estatísticos obtidos na análise exploratória para a área Domínio.

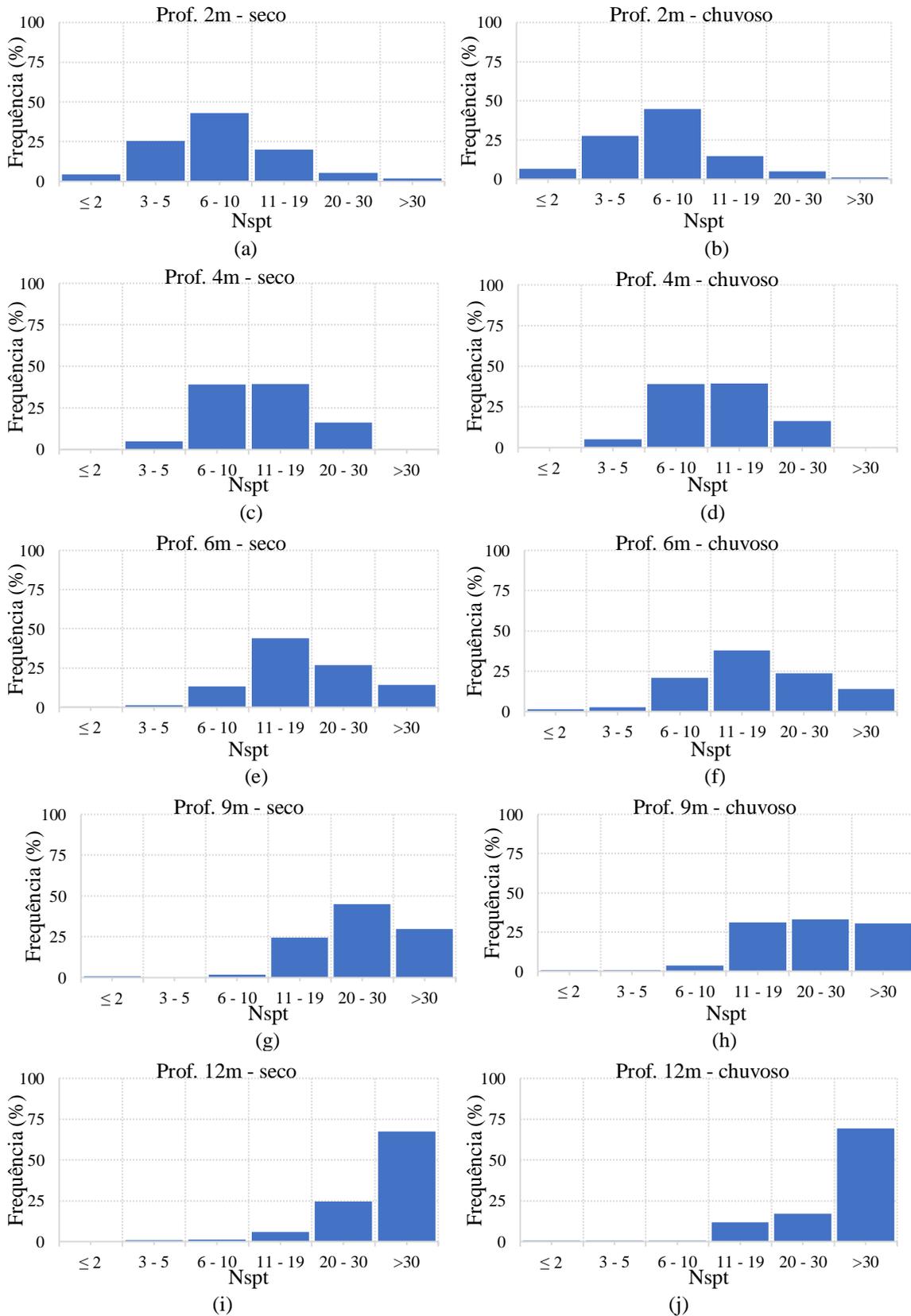
Parâmetros	Nspt (2,0m)		Nspt (4,0m)		Nspt (6,0m)		Nspt (9,0m)		Nspt (12,0m)	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Nº de sondagens	822	430	593	416	652	380	427	292	243	173
Mínimo	1	1	2	1	1	1	0	1	11	9
Máximo	30	24	30	30	50	47	50	50	50	50
Média	8,14	7,20	12,20	11,6	19,97	17,32	26,11	27,04	38,13	38,54
Desvio padrão	4,55	3,58	4,71	4,84	7,66	7,93	8,26	11,21	8,47	8,84
Mediana	7	7	11	11	18	16	26	26	38	39
Coef. de variação	0,65	0,51	0,43	0,44	0,43	0,50	0,32	0,43	0,22	0,23

Nota: S – período seco; C – período chuvoso;

Fonte: A autora (2022)

Foi construído o histograma (Figura 33) com a frequência de ocorrência dos valores de Nspt na área domínio de acordo com o período e a profundidade, utilizando todas as sondagens, sem haver uma avaliação exploratória das amostras. Foi observado que na profundidade de 2,00m, os valores de Nspt mais frequentes estão no intervalo de 6 -10, tanto para o período seco como para o período chuvoso. Para a profundidade de 4,00m os intervalos de 6 – 10 e de 11- 19 possuem basicamente a mesma frequência de ocorrência, já para a profundidade de 6,00m, predominam os intervalos de 11 – 19, para a profundidade de 9,00m os intervalos de 20 – 30 e para a profundidade de 12,00m valores superiores a 30 golpes.

Figura 33 - Histograma dos valores N_{spt} para a área Domínio nas profundidades de 2m no período seco (a) e chuvoso (b), 4m no período seco (c) e chuvoso (d), 6m no período seco (e) e chuvoso (f), 9m no período seco (g) e chuvoso (h) e 12m no período seco (i) e chuvoso (j).



Fonte: A autora (2022)

Os parâmetros de ajuste obtidos para o modelo geoestatístico com base na krigagem ordinária podem ser observados através da Tabela 8. O alcance, ou seja, a distância considerada onde ocorre correlação entre as amostras, variou entre 1450 e 2000 metros. Esse valor é relativamente alto, mostrando a diminuição da correlação entre as amostras, pela carência de sondagens em determinadas áreas, aumentando as incertezas dos valores estimados, principalmente na zona periférica da área estudada.

Tabela 8 - Parâmetros obtidos na estimativa dos valores por krigagem ordinária para a área Domínio.

Parâmetros	Nspt (2,0m)		Nspt (4,0m)		Nspt (6,0m)		Nspt (9,0m)		Nspt (12,0m)	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Modelo	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.
Efe. pepita(C0)	14	9	1	10	28	40	38	52	51	43
Patamar (C+C0)	10	5	25	35	40	28	40	72	26	45
alcance (a) (m)	1450	1800	1500	2000	1500	2000	1700	1800	1800	1900

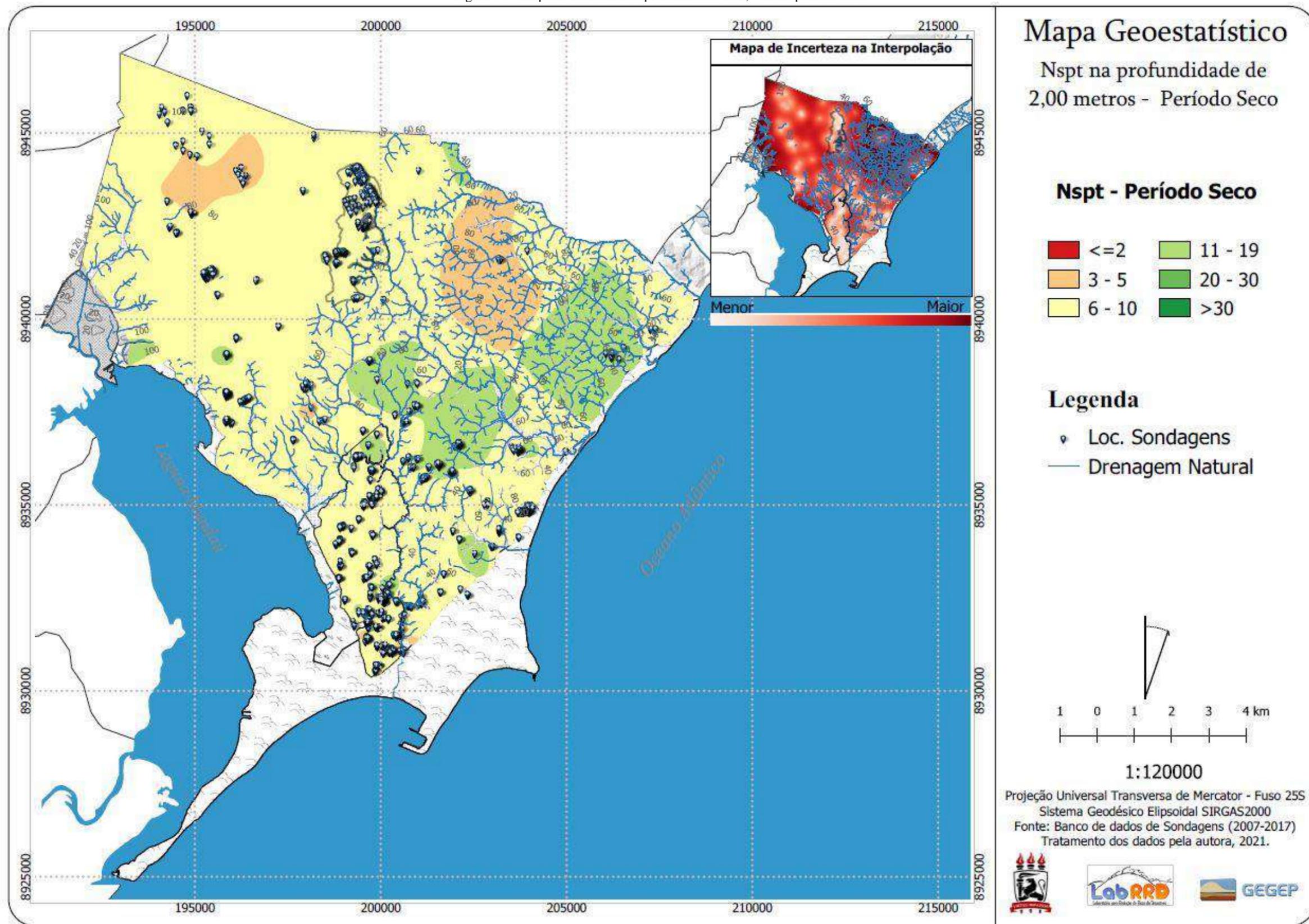
Nota: S – período seco; C – período chuvoso;

Fonte: A autora (2022)

O efeito pepita (C_0) idealmente deve possuir valores $j(0) = 0$, entretanto, na prática, à medida que h tende a zero, $j(h)$ se aproxima de um valor positivo, chamado efeito pepita que revela descontinuidade do semivariograma para distâncias menores que a mesma distância entre as amostras. O maior valor do efeito pepita (C_0) foi obtido na profundidade de 9,00m no período chuvoso, podendo ser atribuído a diminuição de disponibilidade de registros SPT com o aumento da profundidade, a má distribuição espacial desses registros, a baixa correlação, como também a erros de medição.

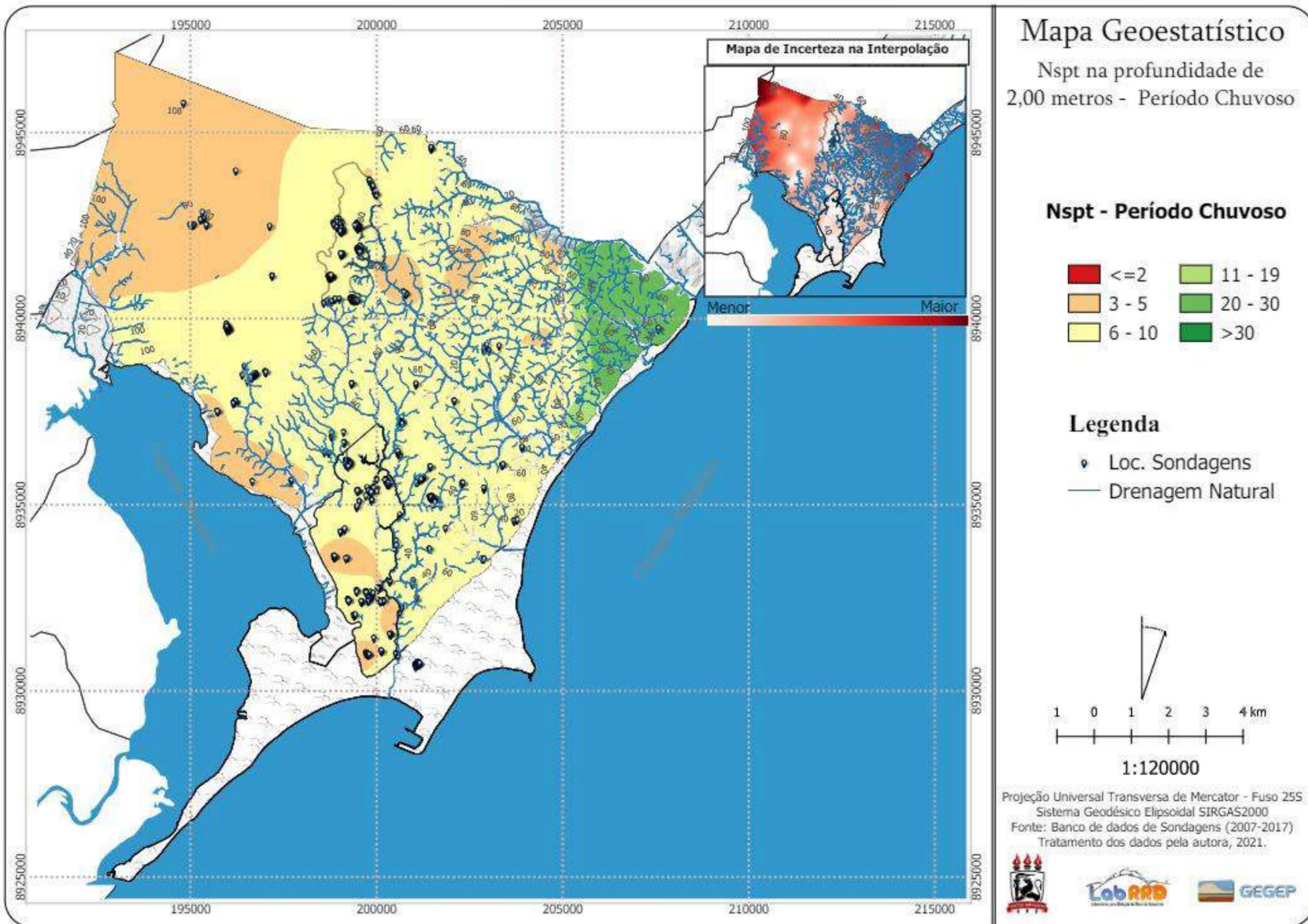
Os mapas de variabilidade espacial da resistência Nspt para a área domínio para a profundidade de 2,00m são apresentados nas Figuras 34 para o período seco e Figuras 35 para período chuvoso, na profundidade de 4,00m Figuras 36 para o período seco e Figuras 37 para período chuvoso, na profundidade de 6,00m Figuras 38 para o período seco e Figuras 39 para período chuvoso, na profundidade de 9,00m Figuras 40 para o período seco e Figuras 41 para período chuvoso e na profundidade de 12,00m Figuras 42 para o período seco e Figuras 43 para período chuvoso. Os mapas de incertezas produzidos (canto superior direito) direcionam as áreas com menor e maior incerteza dos valores interpolados.

Figura 34 - Mapa de resistência a profundidade de 2,00m no período seco.



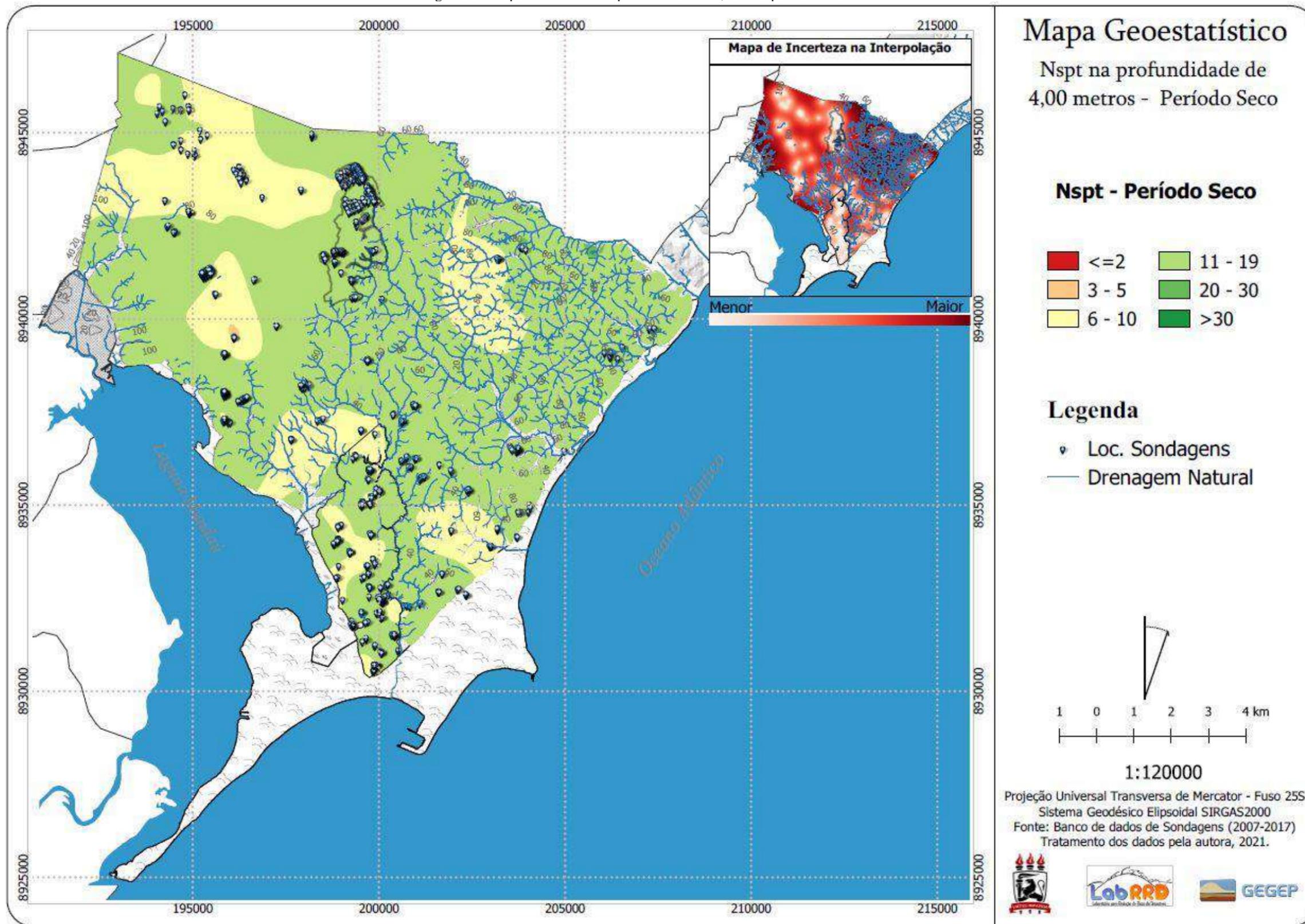
Fonte: A autora (2022)

Figura 35 - Mapa de resistência a profundidade de 2,00m no período chuvoso



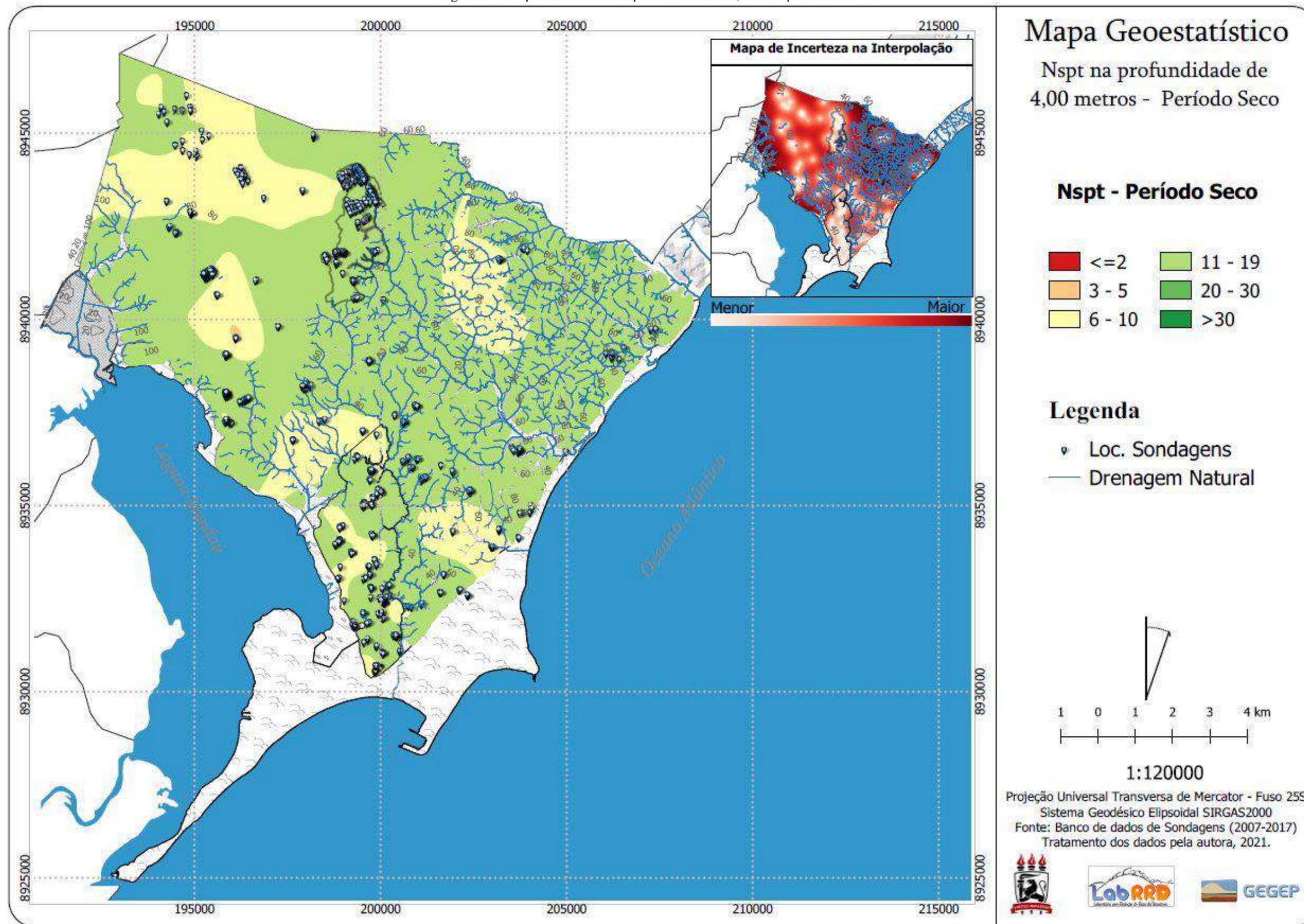
Fonte: A autora (2022)

Figura 36 - Mapa de resistência a profundidade de 4,00m no período seco.



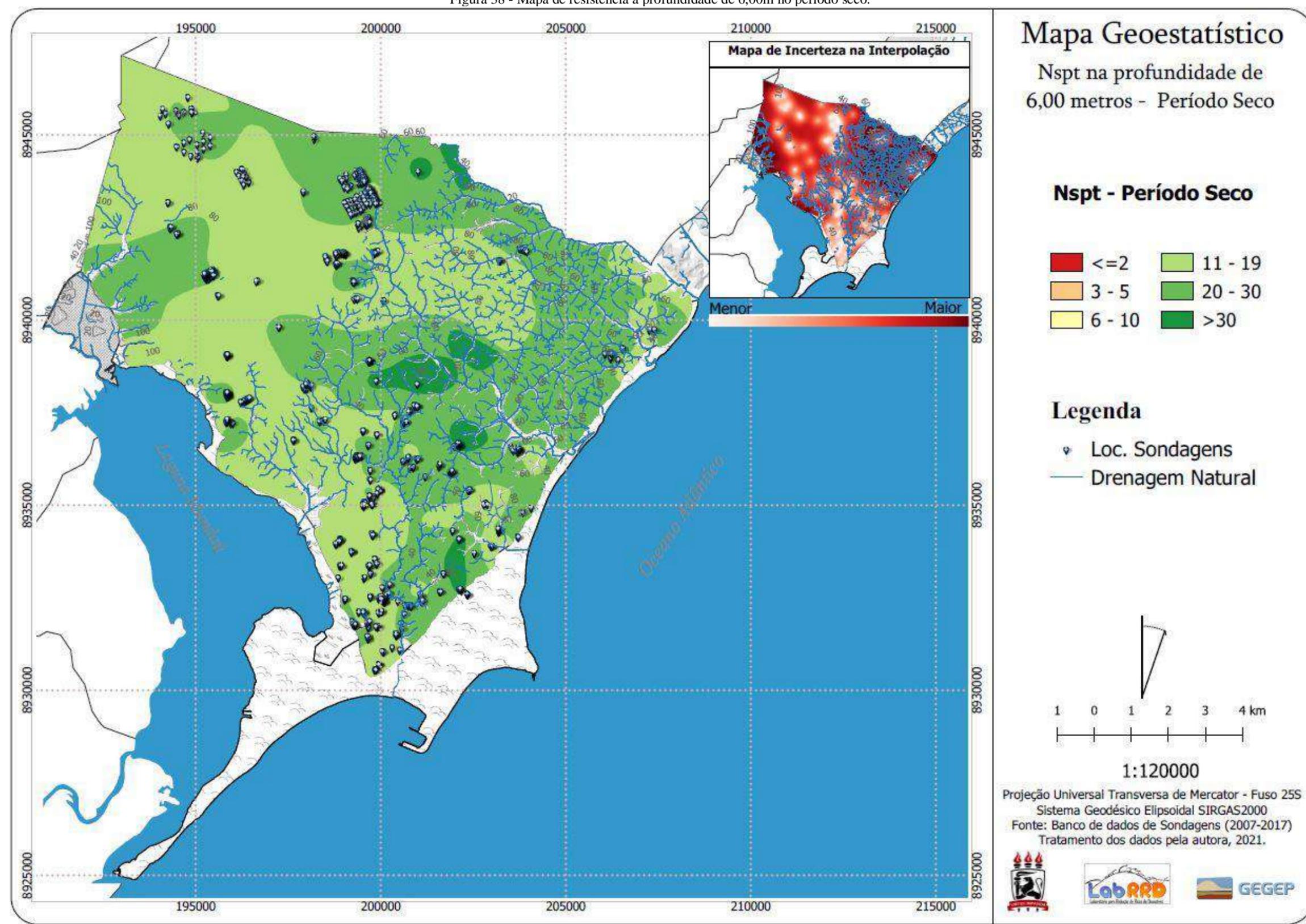
Fonte: A autora (2022)

Figura 37 - Mapa de resistência a profundidade de 4,00m no período chuvoso.



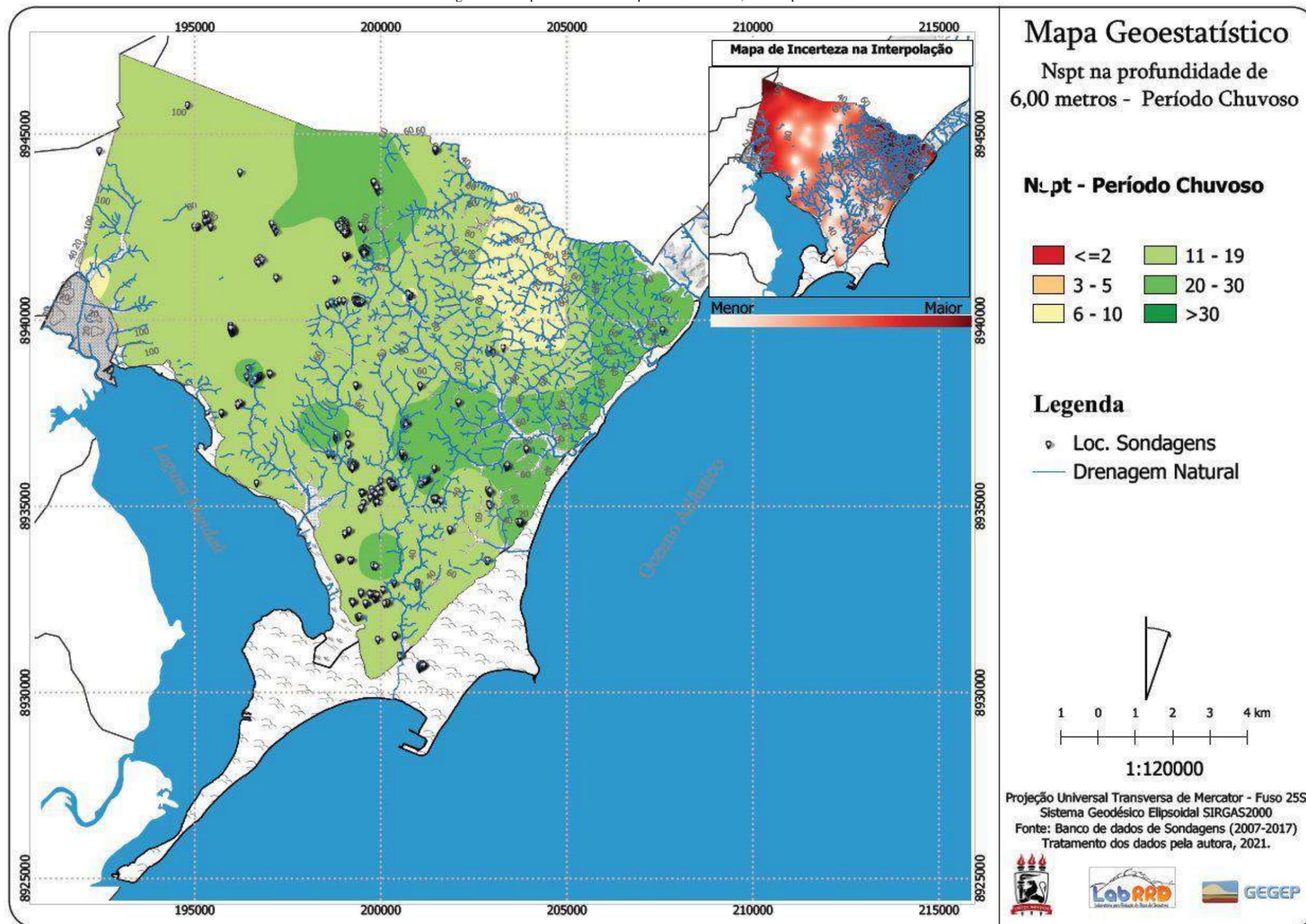
Fonte: A autora (2022)

Figura 38 - Mapa de resistência a profundidade de 6,00m no período seco.



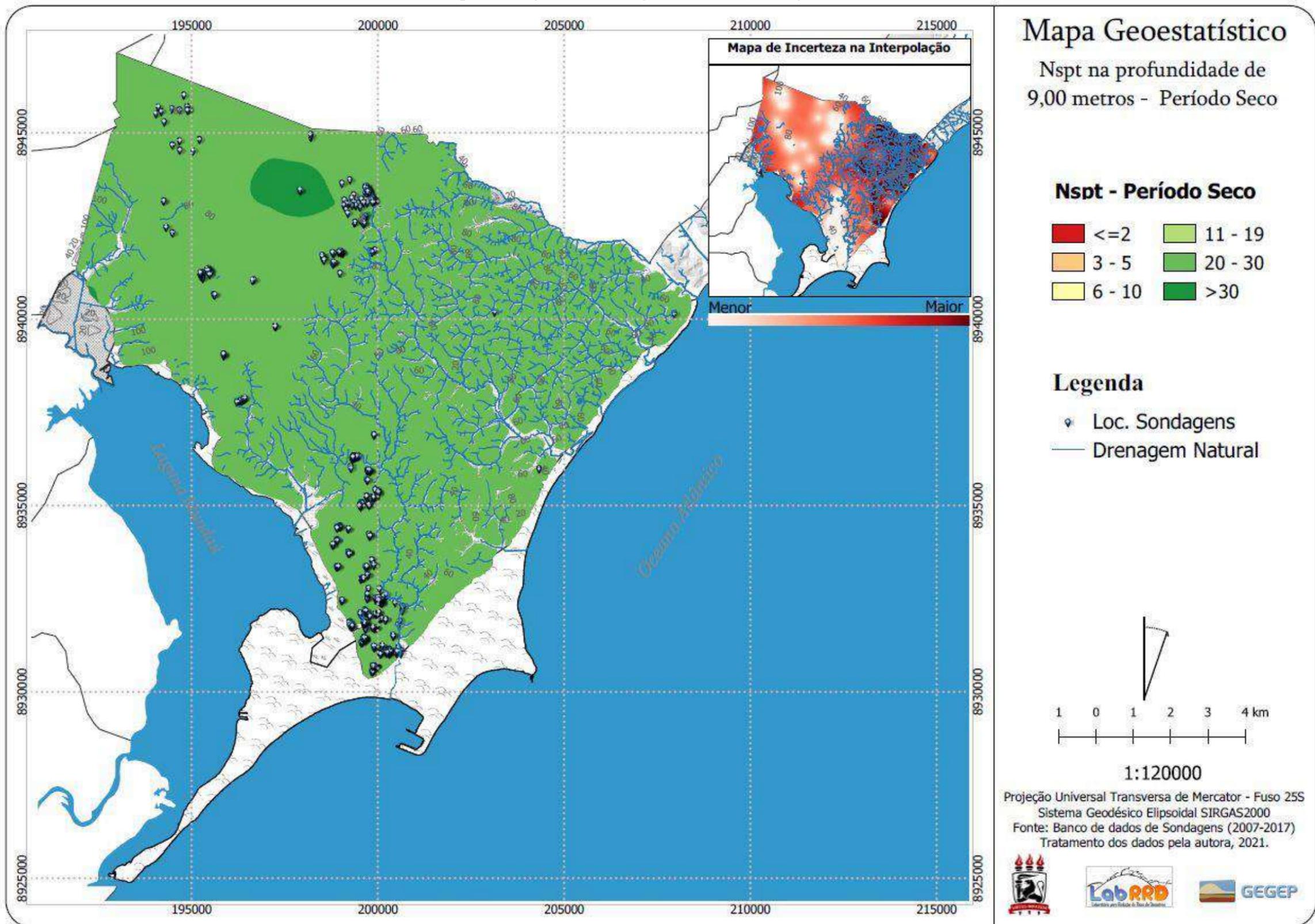
Fonte: A autora (2022)

Figura 39 - Mapa de resistência a profundidade de 6,00m no período chuvoso



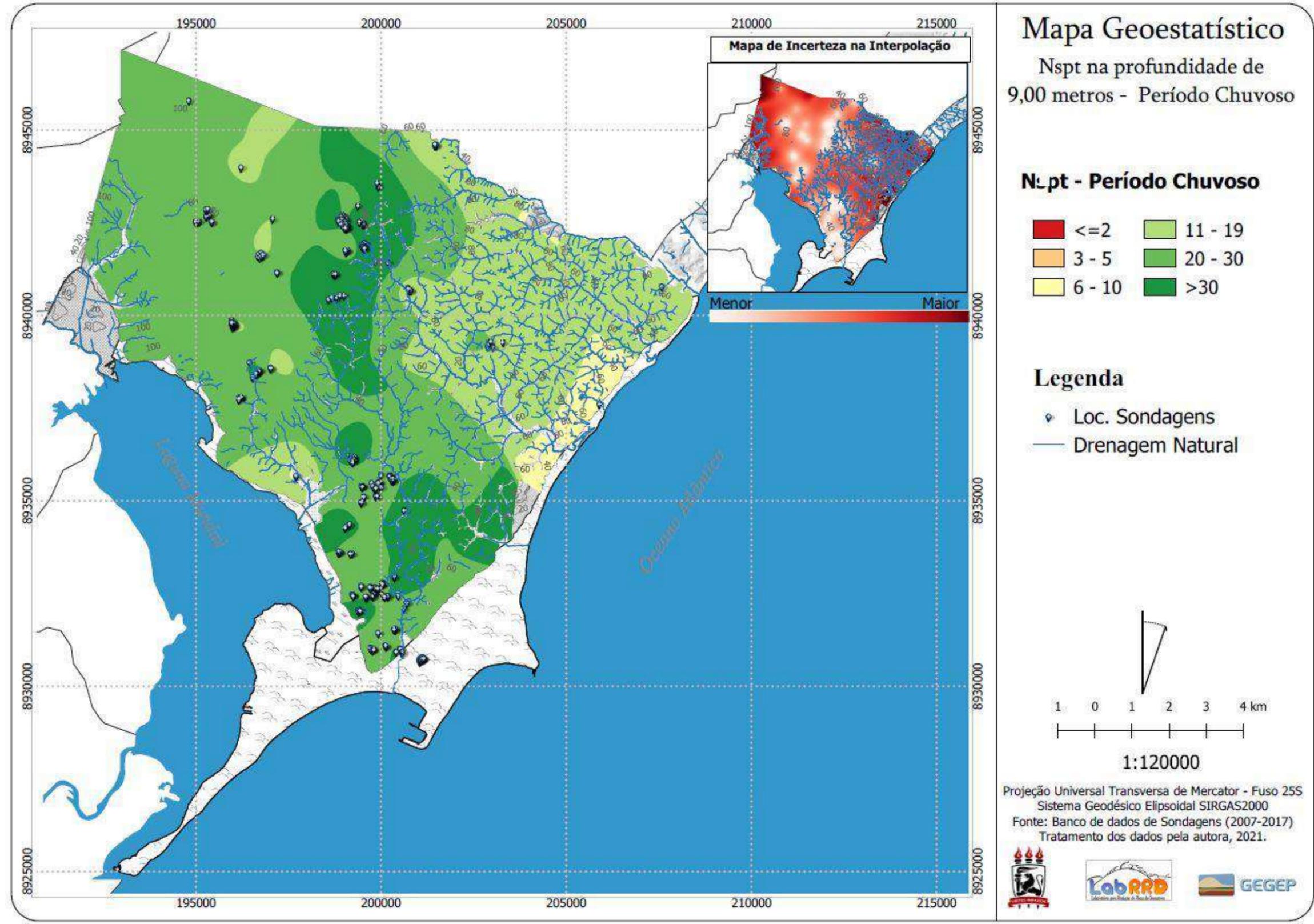
Fonte: A autora (2022)

Figura 40 - Mapa de resistência a profundidade de 9,00m no período seco.



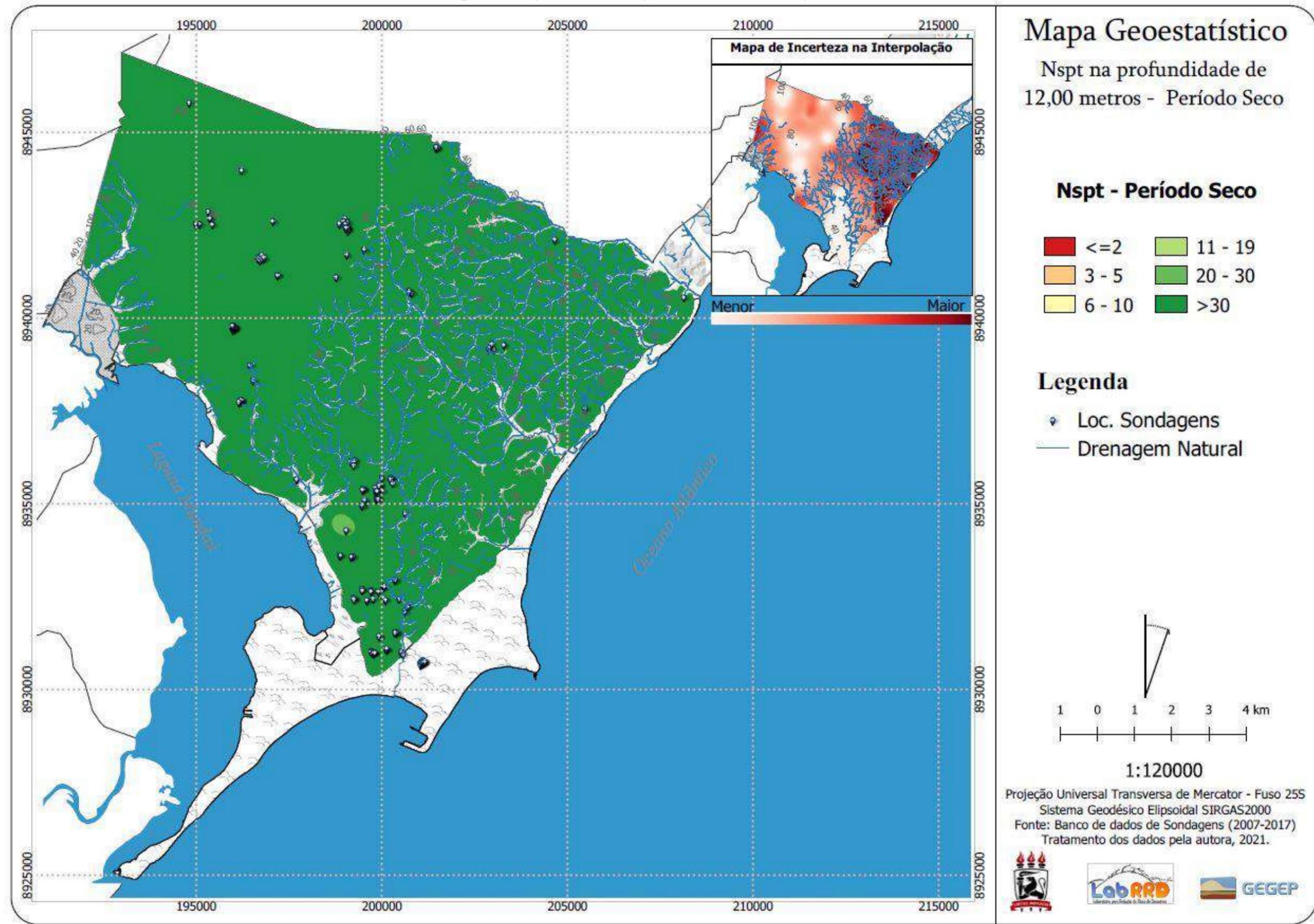
Fonte: A autora (2022)

Figura 41 - Mapa de resistência a profundidade de 9,00m no período chuvoso.



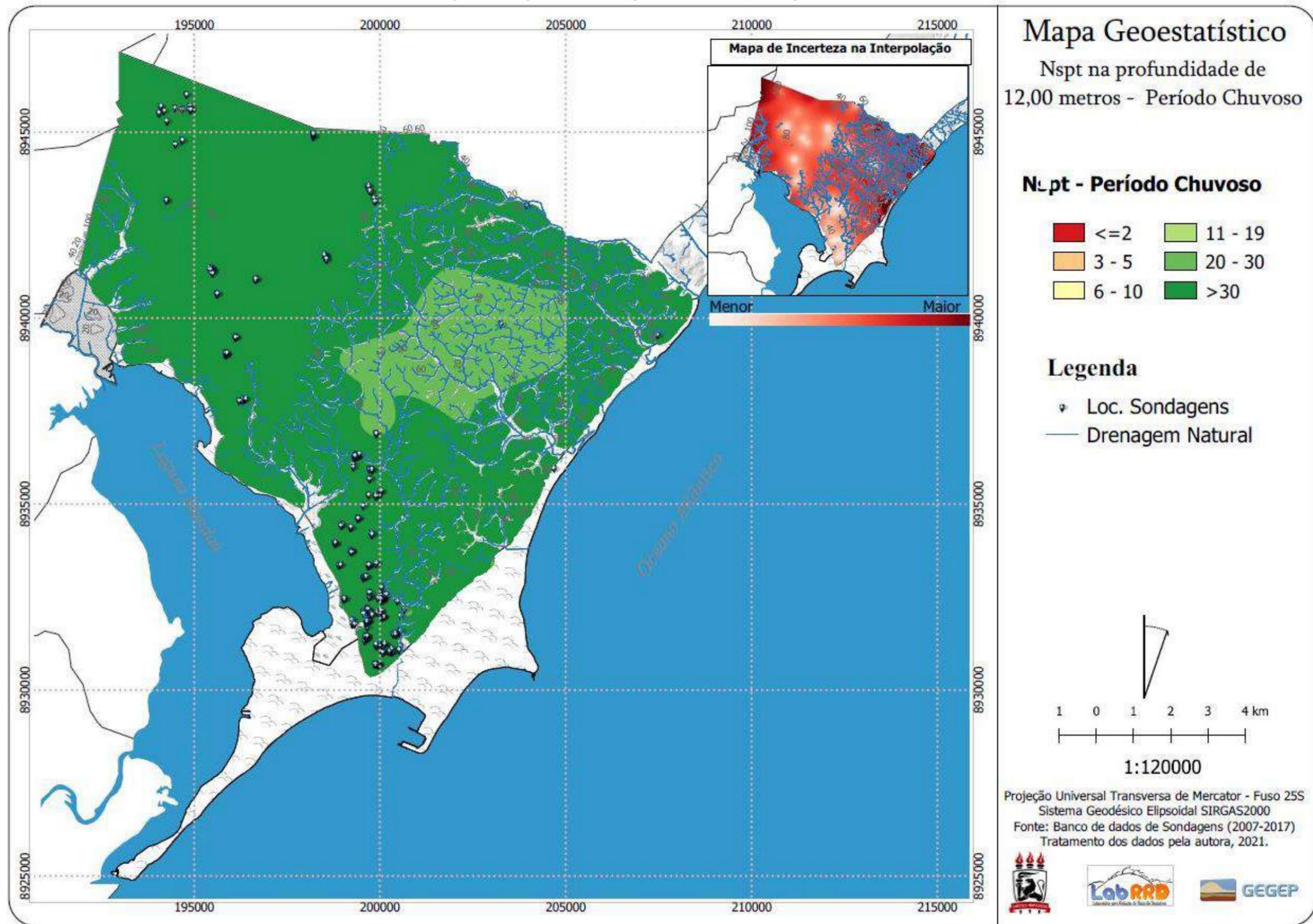
Fonte: A autora (2022)

Figura 42 - Mapa de resistência a profundidade de 12,00m no período seco.



Fonte: A autora (2022)

Figura 43 - Mapa de resistência a profundidade de 12,00m no período chuvoso.



Fonte: A autora (2022).

Foi observado aumento de resistência Nspt com a profundidade na área Domínio. Complementar a representação espacial dos valores de resistência Nspt, foram calculados os percentuais de área que compreende aos intervalos Nspt para os períodos seco e chuvoso nas profundidades estudadas (Tabela 9).

Tabela 9 - Percentual de área correspondente ao intervalo de resistência Nspt para área Domínio.

Intervalo Nspt	Nspt (2,0m)		Nspt (4,0m)		Nspt (6,0m)		Nspt (9,0m)		Nspt (12,0m)	
	Área (%)*		Área (%)*		Área (%)*		Área (%)*		Área (%)*	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
≤ 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 - 5	8	27	-	5	-	-	-	-	-	-
6 - 10	78	67	25	46	-	5	-	3	-	-
11 - 19	14	6	75	49	50	71	-	27	-	-
20 - 30	-	-	-	-	46	24	92	55	1	11
> 30	-	-	-	-	4	-	8	15	99	89

Nota: S – período seco; C – período chuvoso; *Percentual da área total referente ao Domínio.

Fonte: A autora (2022)

Em 2,0m de profundidade pode ser observado um intervalo predominante que está compreendido entre 6 - 10, sendo observada uma diminuição na faixa de resistência do solo entre 3-5 e 11 - 19 no período chuvoso, passando de 8% a 27% e de 14% para 6%, mostrando forte influência da umidade. Para a profundidade de 4,00m, o intervalo de predominância é encontrado 11- 19, correspondendo a 75% da área no período seco e 49% no período chuvoso.

Para 6,0m de profundidade, 50% da área encontra-se no intervalo Nspt entre 11 – 19 para o período seco e 71% no período chuvoso. Para 9,0m o intervalo predominante encontra-se entre 20 – 30, correspondente a 92% da área no período seco e 55% no período chuvoso. Nesta profundidade, é observado que o período chuvoso há um percentual de área maior que no período seco para Nspt > 30, sendo considerada pela maior disponibilidade e distribuição espacial de dados SPT, ocasionando ampliação de área.

Para a profundidade de 12,0m, foi observado que o intervalo predominante de Nspt é >30, tanto para o período seco (99% da área) como para o período chuvoso (89% da área).

3.5.2 Mapas Geoestatísticos da Subárea 01

A subárea 01 continha um total de 474 registros SPT. Após a realização da análise exploratória das amostras, se observou uma variação na quantidade de registros SPT em cada profundidade, havendo uma diminuição de registros na estação chuvosa (Tabela 10). O maior coeficiente de variabilidade ocorreu na profundidade de 2,00m no período seco, com menor desvio padrão no período chuvoso.

Tabela 10 - Parâmetros estatísticos obtidos na análise exploratória para a subárea 01.

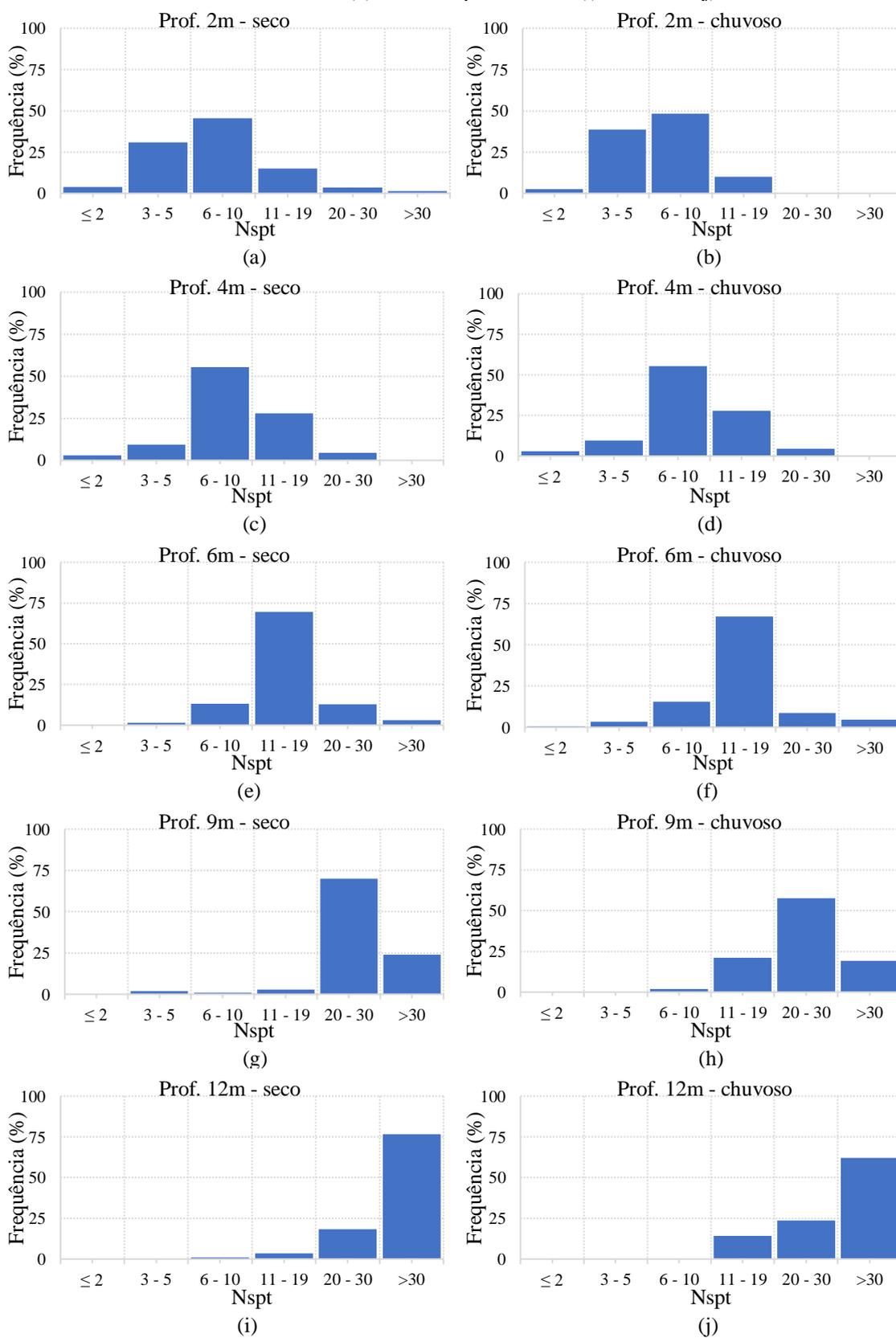
Parâmetros	Nspt (2,0m)		Nspt (4,0m)		Nspt (6,0m)		Nspt (9,0m)		Nspt (12,0m)	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Nº de sondagens	218	129	278	129	287	112	281	142	195	94
Mínimo	1	1	2	3	1	3	1	1	25	16
Máximo	21	12	23	18	31	27	50	50	50	50
Média	6	5	9	8	13	12	24	24	40	35
Desvio padrão	3,57	2,38	3,45	3,03	5,56	3,85	8,47	9,17	7,41	9,84
Mediana	6	6	9	9	13	12	25	24	41	36
Coef. de variação	0,53	0,44	0,38	0,34	0,41	0,31	0,34	0,38	0,18	0,27

Nota: S – período seco; C – período chuvoso;

Fonte: A autora (2022)

A partir dos registros de sondagens SPT analisados, foi possível construir o histograma (Figura 44) com a frequência de ocorrência dos valores de Nspt na subárea 01 de acordo com o período e a profundidade. Nas profundidades de 2,00m e 4,00m é observada a predominância dos valores Nspt entre 6 e 10 golpes, tanto no período seco como no chuvoso, já para a profundidade de 6,00m, predominam os intervalos de 11 e 19, para a profundidade de 9,00m os intervalos de 20 e 30 e para a profundidade de 12,00m valores superiores a 30 golpes.

Figura 44 - Histograma dos valores Nspt para a subárea 01 nas profundidades de 2m no período seco (a) e chuvoso (b), 4m no período seco (c) e chuvoso (d), 6m no período seco (e) e chuvoso (f), 9m no período seco (g) e chuvoso (h) e 12m no período seco (i) e chuvoso (j).



Fonte: A autora (2022).

Os parâmetros de ajuste obtidos para o modelo geoestatístico utilizado podem ser observados através da Tabela 11. O alcance, ou seja, a distância considerada onde ocorre correlação entre as amostras, variou entre 450 e 800 metros para a subárea 01. Observa-se um aumento do efeito pepita com o aumento da profundidade, mais significativo em 9,00m e 12,00m, tendo correlação com a diminuição do número de registros considerados.

Tabela 11 - Parâmetros obtidos na estimativa dos valores por krigagem ordinária para a subárea 01.

Parâmetros	Nspt (2,0m)		Nspt (4,0m)		Nspt (6,0m)		Nspt (9,0m)		Nspt (12,0m)	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Modelo	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.
Efeito pepita(C0)	8	4	7	8	10	14	39	70	33	60
Patamar (C+C0)	6	2	9	6	35	1	38	7	27	44
alcance (a) (m)	504	600	520	600	450	800	500	500	500	650

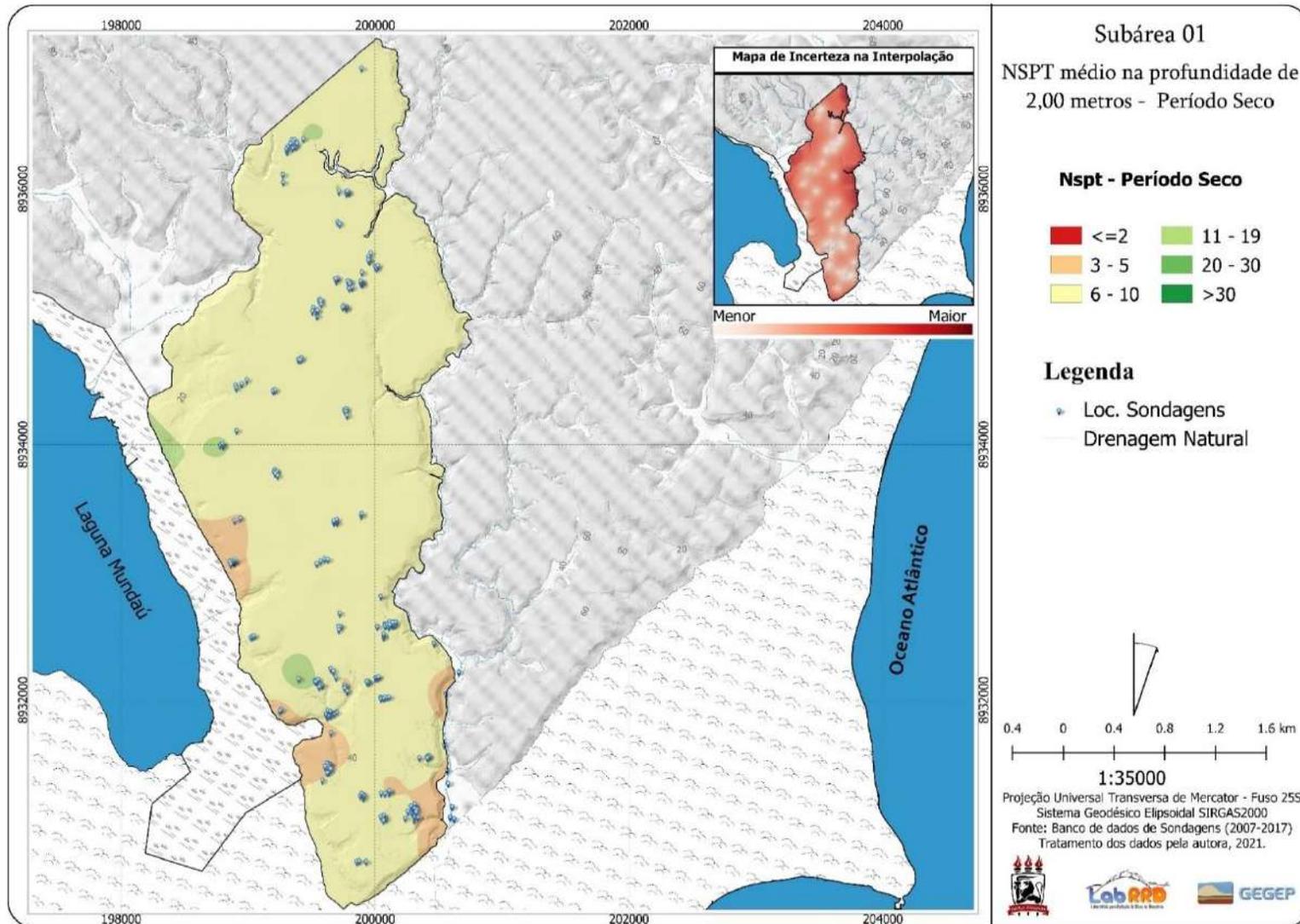
Nota: S – período seco; C – período chuvoso;

Fonte: A autora (2022).

A diminuição de número de registros SPT e a má distribuição espacial dos dados leva a maiores inconsistências nos valores interpolados, principalmente no período chuvoso. Essas inconsistências são mais acentuadas na região periférica da área estudada, onde se encontram as encostas. Os mapas de incertezas produzidos (canto superior direito) direcionam as áreas com menor e maior incerteza dos valores interpolados.

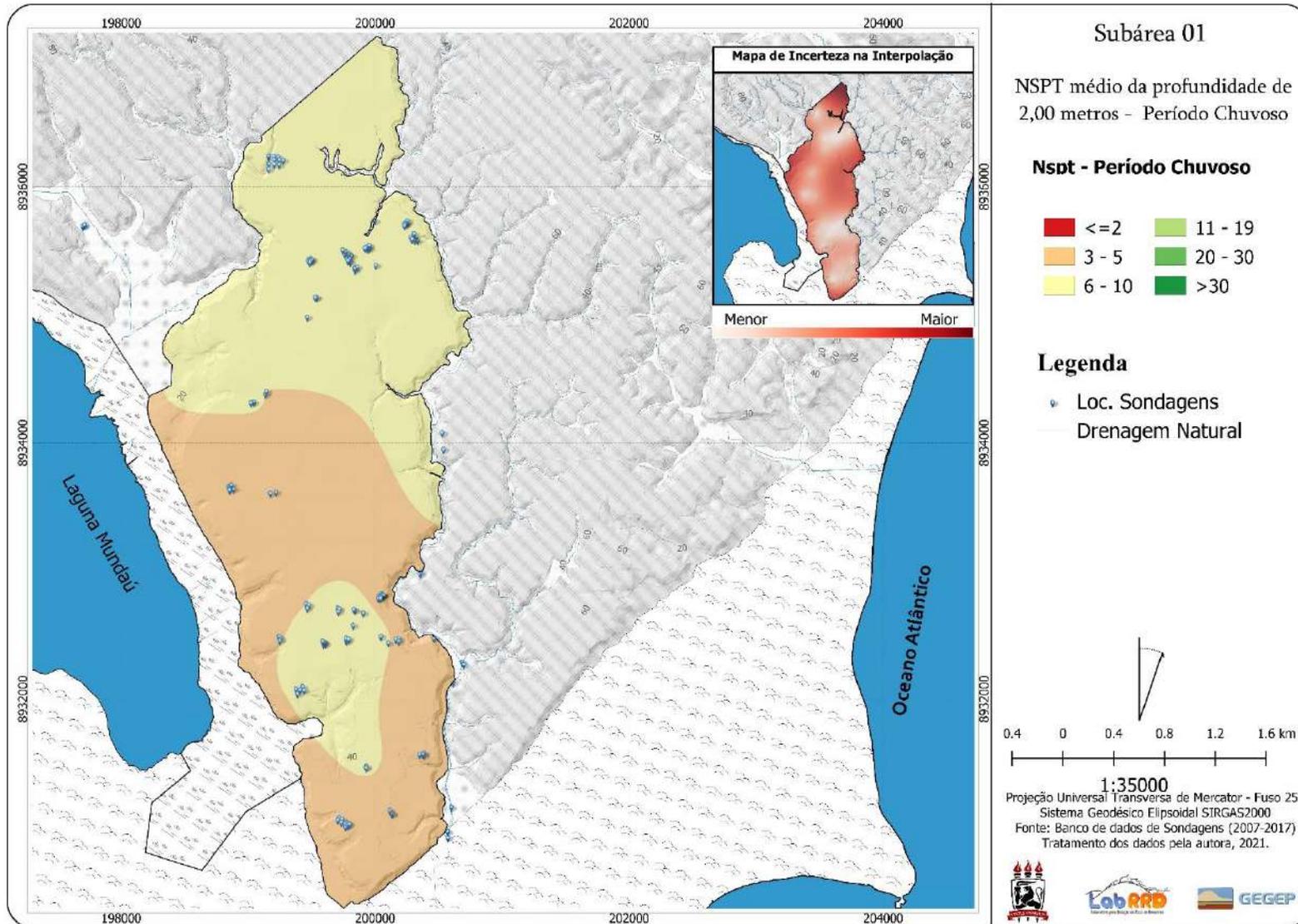
Os mapas de variabilidade espacial da resistência Nspt para a profundidade de 2,00m são apresentados nas Figuras 45 para o período seco e Figuras 46 para período chuvoso, na profundidade de 4,00m Figuras 47 para o período seco e Figuras 48 para período chuvoso, na profundidade de 6,00m Figuras 49 para o período seco e Figuras 50 para período chuvoso, na profundidade de 9,00m Figuras 51 para o período seco e Figuras 52 para período chuvoso e na profundidade de 12,00m Figuras 53 para o período seco e Figuras 54 para período chuvoso.

Figura 45 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 2,00m no período seco.



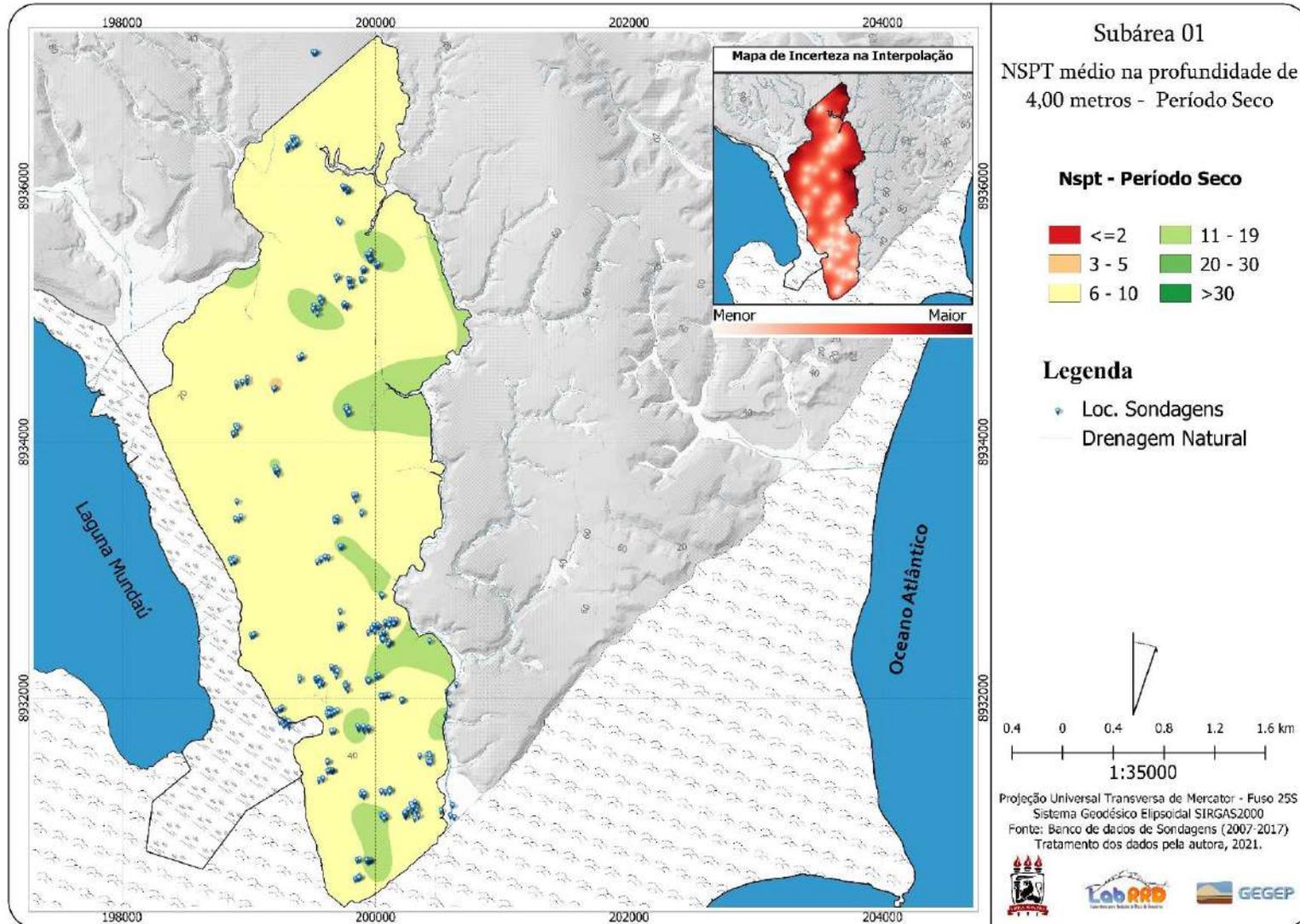
Fonte: A autora (2022).

Figura 46 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 2,00m no período chuvoso.



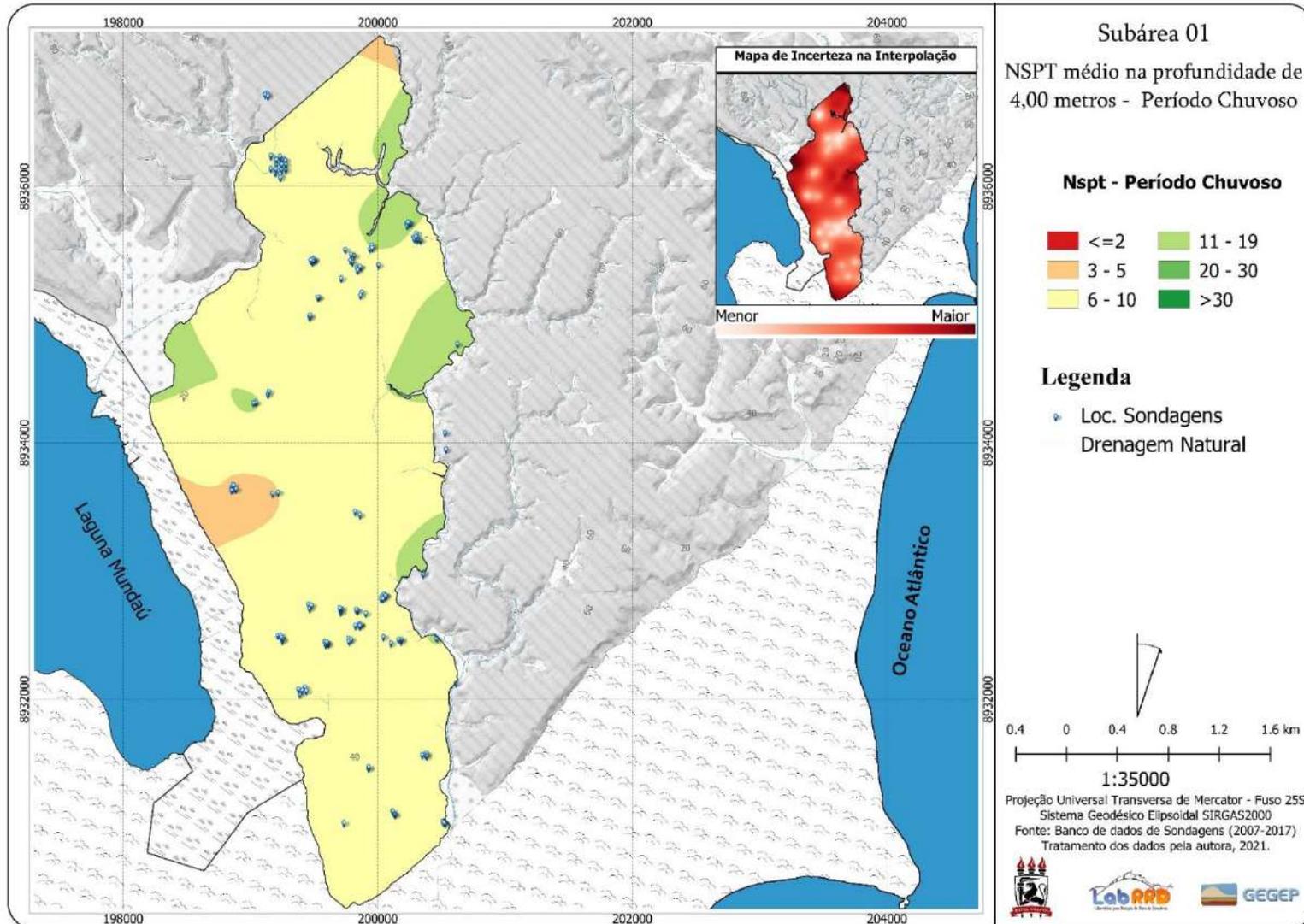
Fonte: A autora (2022).

Figura 47 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 4,00m no período seco.



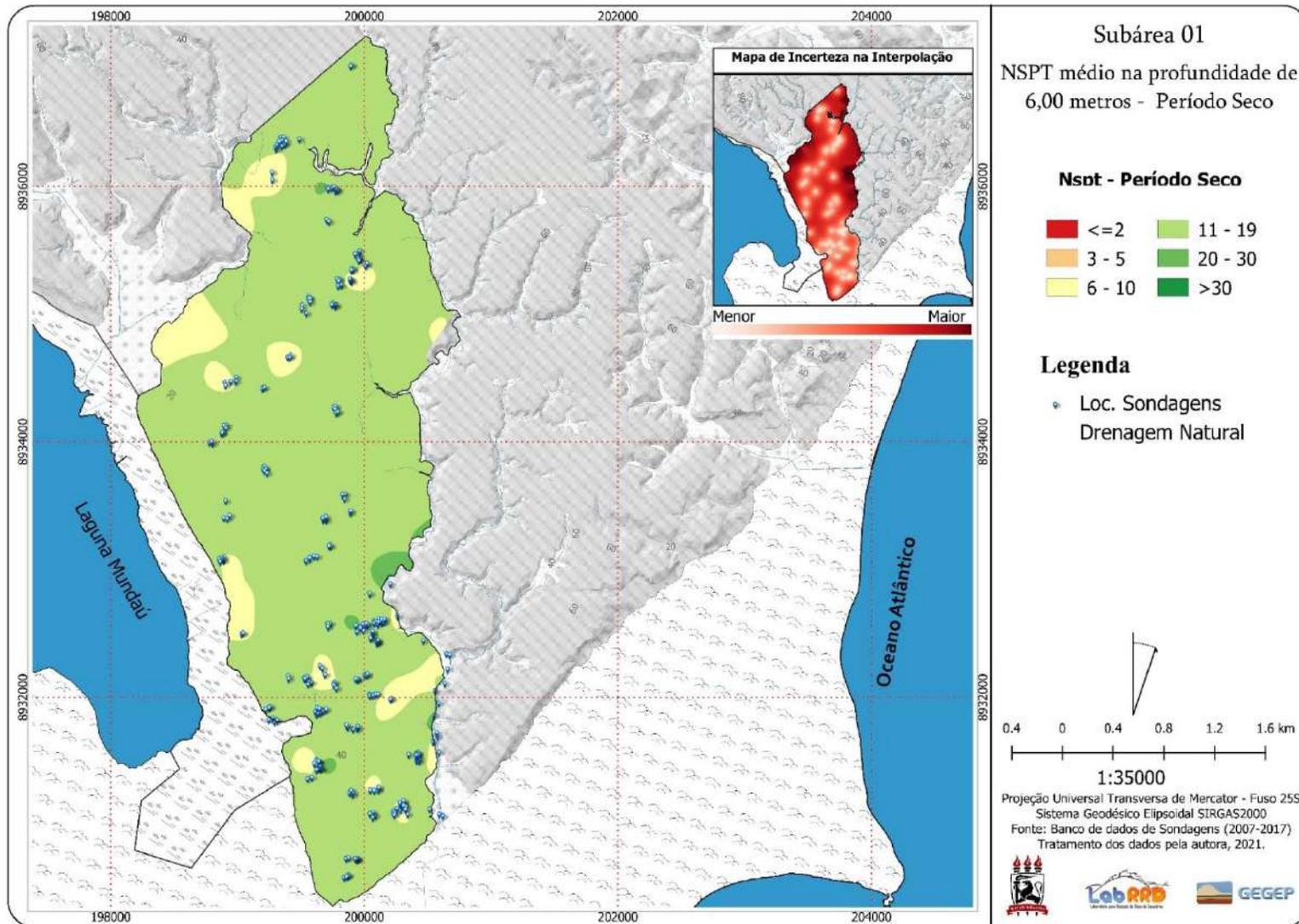
Fonte: A autora (2022).

Figura 48 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 4,00m no período chuvoso.



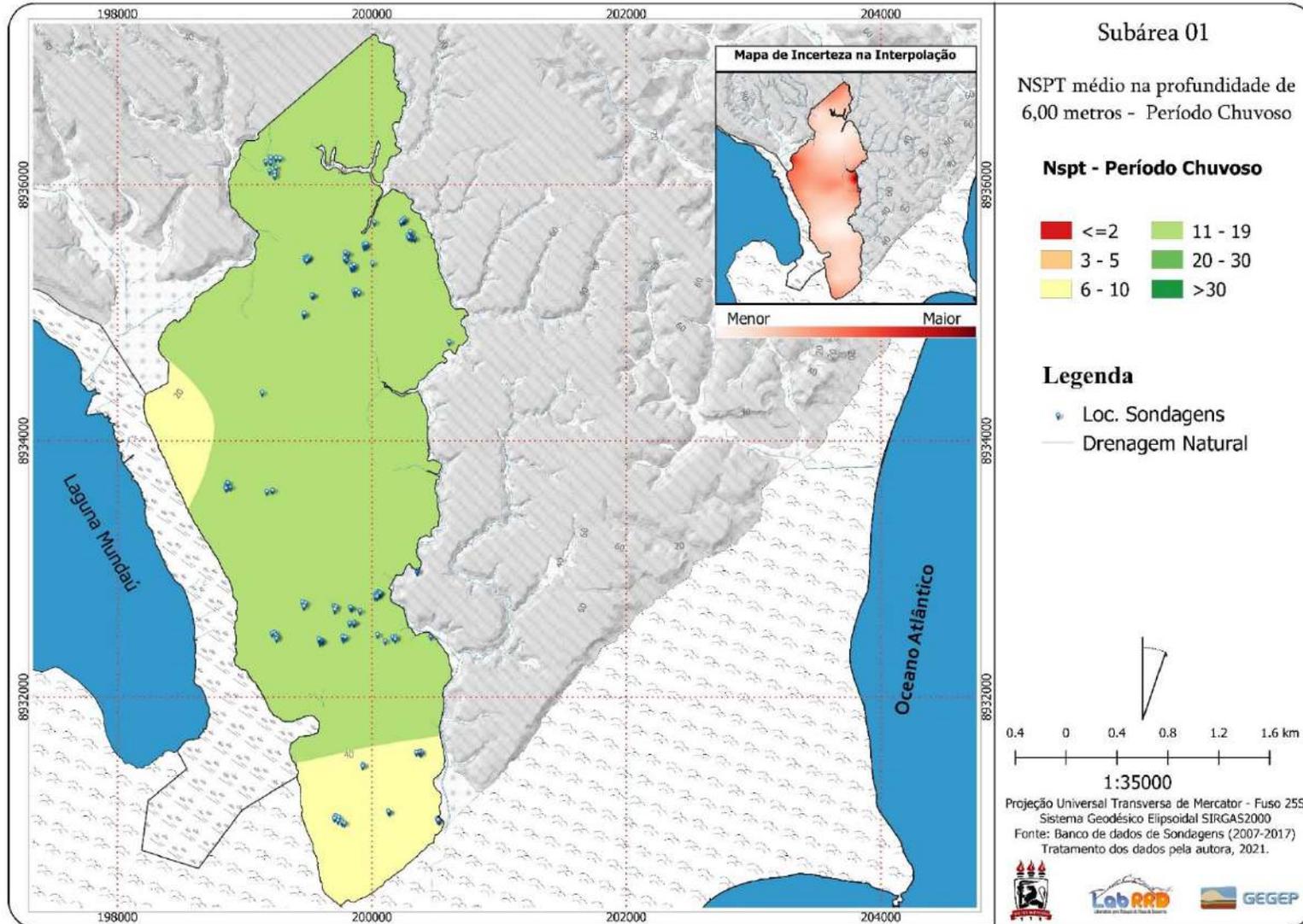
Fonte: A autora (2022).

Figura 49 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 6,00m no período seco.



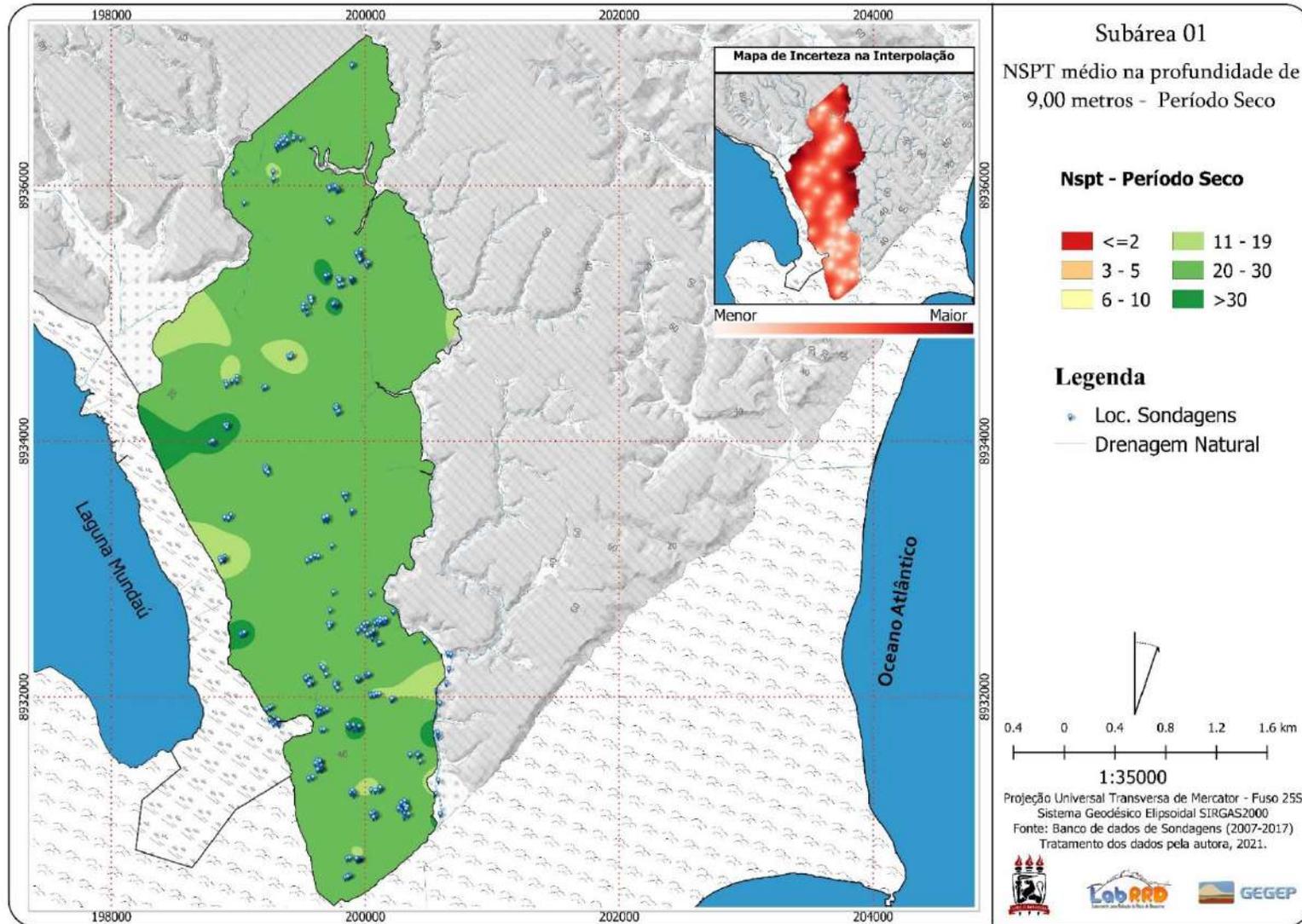
Fonte: A autora (2022).

Figura 50 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 6,00m no período chuvoso.



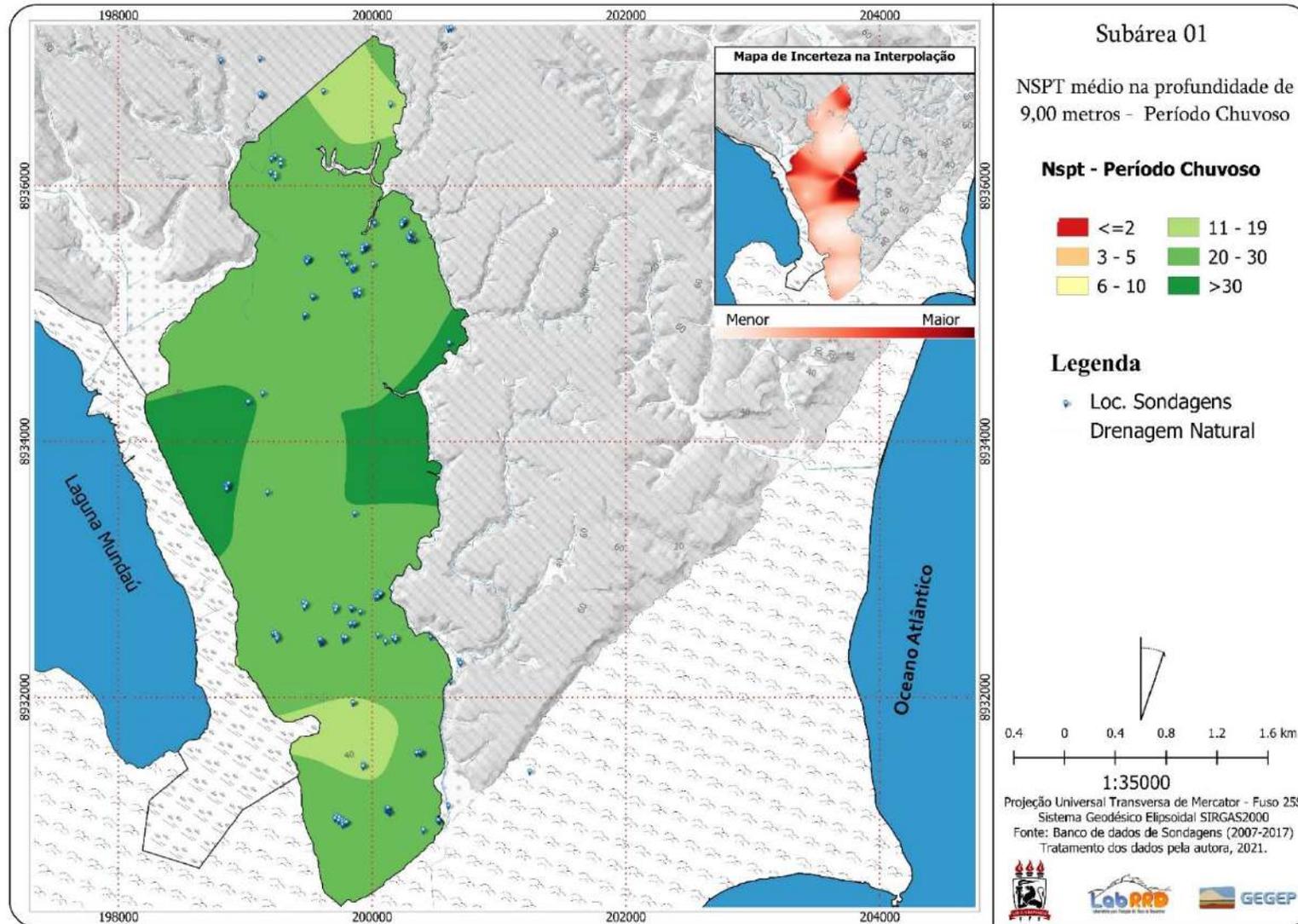
Fonte: A autora (2022).

Figura 51 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 9,00m no período seco.



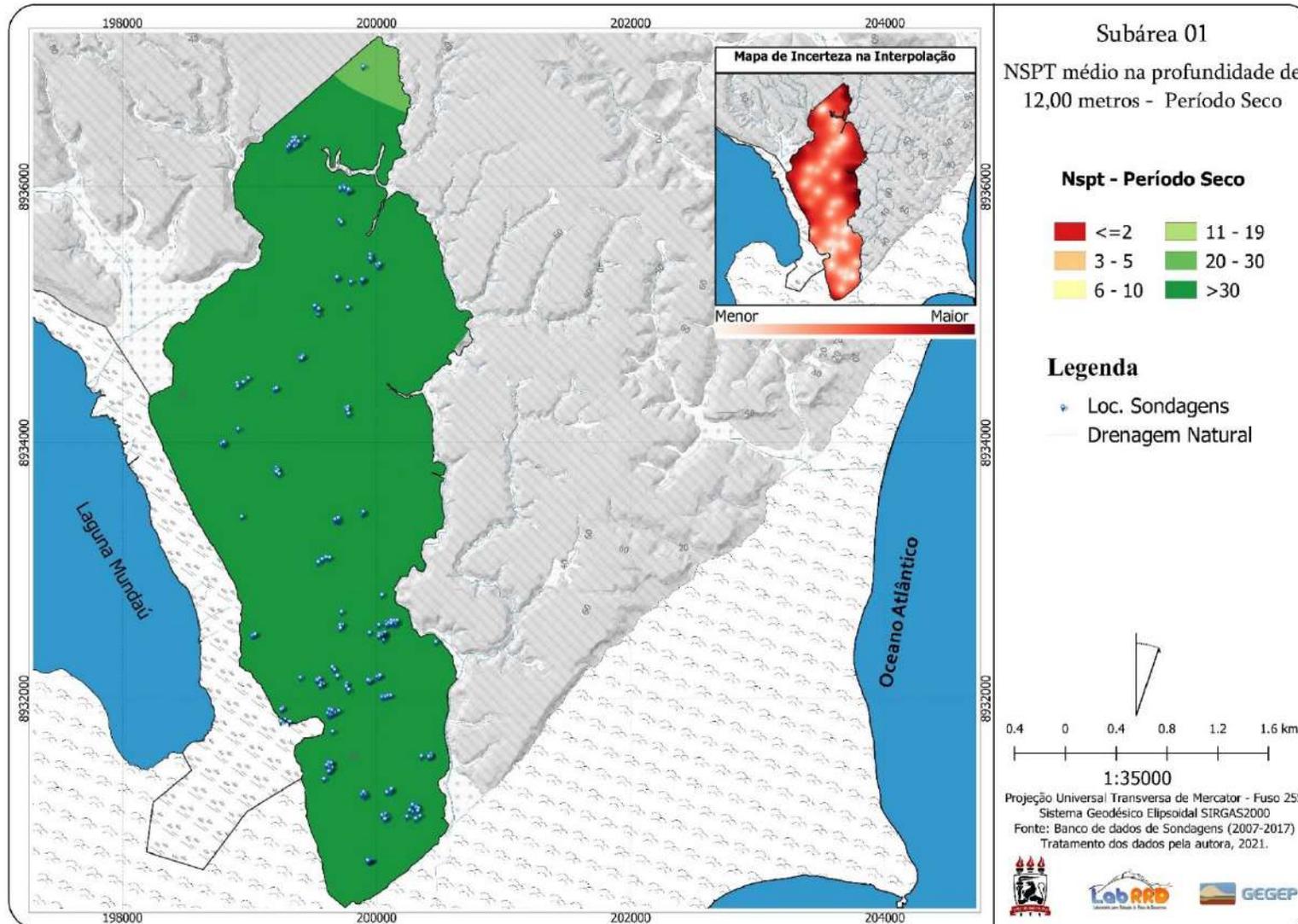
Fonte: A autora (2022).

Figura 52 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 9,00m no período chuvoso.



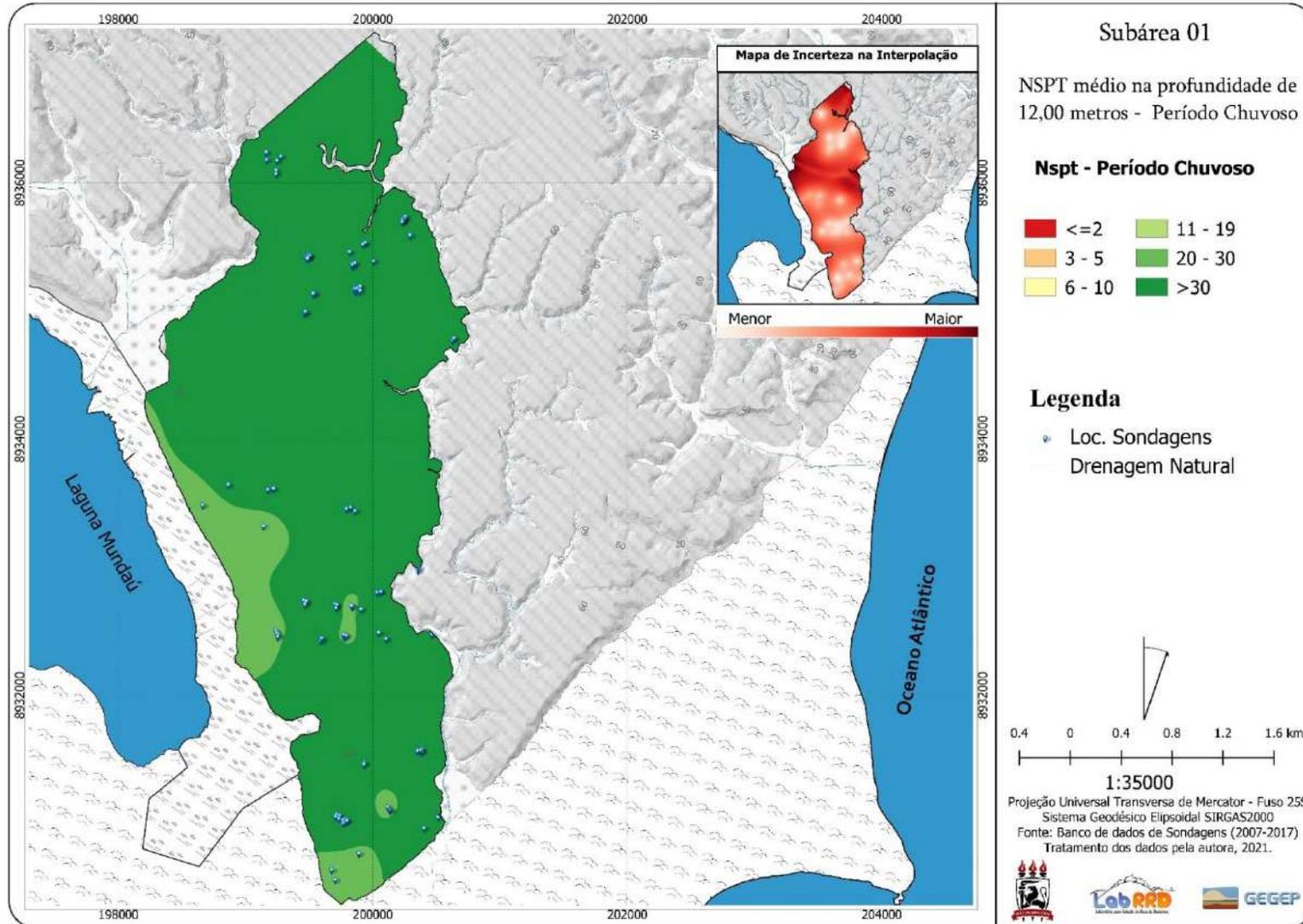
Fonte: A autora (2022).

Figura 53 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 12,00m no período seco.



Fonte: A autora (2022).

Figura 54 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 12,00m no período chuvoso.



Fonte: A autora (2022).

Para compreender melhor a resistência do solo e a influência do período chuvoso no local investigado, foram calculados os percentuais de área que compreende aos intervalos Nspt para os períodos seco e chuvoso nas profundidades estudadas da subárea 01 (Tabela 12).

Tabela 12 - Percentual de área correspondente ao intervalo de resistência Nspt para subárea 01.

Intervalo Nspt	Nspt (2,0m)		Nspt (4,0m)		Nspt (6,0m)		Nspt (9,0m)		Nspt (12,0m)	
	Área (%)*		Área (%)*		Área (%)*		Área (%)*		Área (%)*	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
≤ 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 - 5	6	45	-	3	-	-	-	-	-	-
6 - 10	93	55	88	88	10	15	-	-	-	-
11 - 19	1	-	12	9	89	85	6	8	-	-
20 - 30	-	-	-	-	1	-	91	78	2	10
> 30	-	-	-	-	-	-	3	14	98	90

Nota: S – período seco; C – período chuvoso. *Percentual da área total referente a subárea 01.

Fonte: A autora (2022).

Em 2,0m de profundidade pode ser observado que a faixa predominante de valores Nspt encontra-se entre 6 - 10, com 93% da área correspondente a esse valor no período seco e 55% no período chuvoso. A faixa de Nspt entre 3 – 5 varia de 6% no período seco para 45% no período chuvoso, mostrando forte influência da umidade.

Para a profundidade de 4,00m, o mesmo intervalo de predominância é encontrado (6 - 10), correspondendo a 88% da área tanto no período seco quanto no período chuvoso, porém com o surgimento de 3% da área na faixa de valor Nspt entre 3 - 5.

Para 6,0m de profundidade, 89% da área encontra-se no intervalo Nspt entre 11 – 19 para o período seco e 85% no período chuvoso, sendo observada pequena perda de resistência em alguns pontos. Para 9,0m o intervalo predominante encontra-se entre 20 – 30, correspondente a 91% da área no período seco e 78% no período chuvoso. Para a profundidade de 12,0m, foi observado que o intervalo predominante de Nspt é >30, tanto para o período seco (98% da área) como para o período chuvoso (90% da área).

O aumento de resistência Nspt com a profundidade também é observado na subárea 01, destacando a homogeneidade de intervalos predominantes, sendo observado ainda que as maiores perdas de resistência sob influência das chuvas ocorrem na profundidade de 2,00m, nas demais profundidades essa perda ocorre em menos de 10% da área.

3.5.3 Mapas Geoestatísticos da Subárea 02

O número de registros SPT trabalhados para a subárea 02 variaram em função da profundidade, com um universo amostral inicial de 304 sondagens. Houve diminuição do número de registros no período chuvoso como também ao longo da profundidade. Nas análises exploratórias foi observado maior coeficiente de variação na profundidade de 2,00m no período seco. A Tabela 13 apresenta os parâmetros estatísticos obtidos na etapa de análise exploratória dos dados, considerando as profundidades e períodos estudados.

Tabela 13 - Parâmetros estatísticos obtidos na análise exploratória para a subárea 01.

Parâmetros	Nspt (2,0m)		Nspt (4,0m)		Nspt (6,0m)		Nspt (9,0m)		Nspt (12,0m)	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Nº de sondagens	144	87	142	97	137	55	83	44	34	27
Mínimo	2	2	4	7	6	9	14	14	18	19
Máximo	14	9	25	27	35	30	50	50	50	50
Média	6	6	13	13	20	18	30	30	35	30
Desvio padrão	2,08	1,72	3,87	3,88	5,78	4,83	7,84	9,29	8,38	8,48
Mediana	6,5	6	13	14	20	17	29	30	35	32
Coef. de variação	0,31	0,27	0,29	0,28	0,29	0,26	0,26	0,31	0,24	0,28

Nota: S – período seco; C – período chuvoso.

Fonte: A autora (2022).

Na subárea 02, os parâmetros estatísticos mostraram um alcance variando entre 450m e 600m. Esse alcance pode ser considerado relativamente alto e está relacionado com a má distribuição espacial dos registros de sondagem. Os parâmetros de ajuste obtidos para a modelagem geoestatística podem ser observados através da Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros obtidos na estimativa dos valores por krigagem ordinária para a subárea 01.

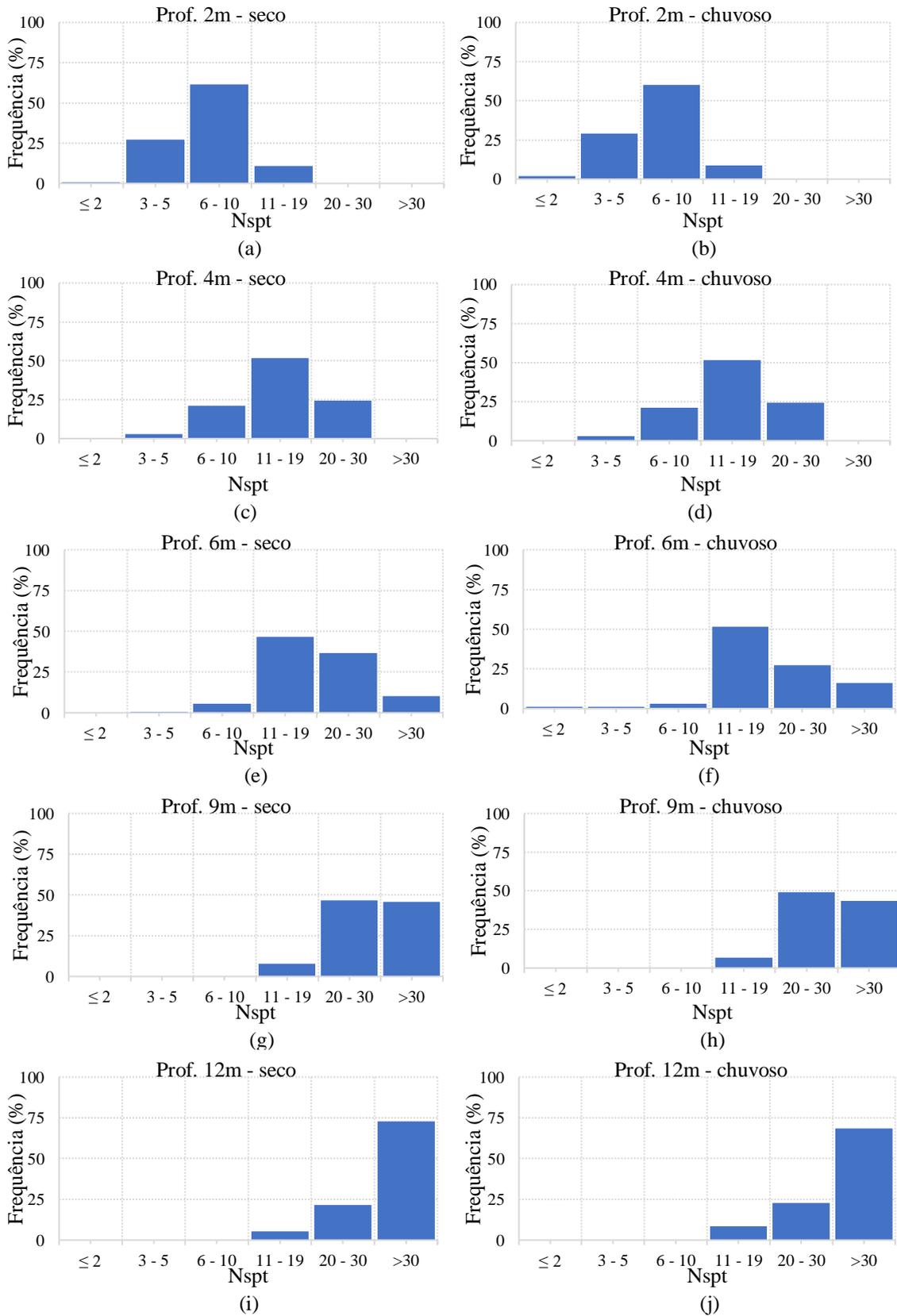
Parâmetros	Nspt (2,0m)		Nspt (4,0m)		Nspt (6,0m)		Nspt (9,0m)		Nspt (12,0m)	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Modelo	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.
Efeito pepita(C0)	2	3	15	13	21	8	25	22	27	35
Patamar (C+C0)	2	1	2	0	17	12	35	73	66	78
alcance (a) (m)	400	450	450	400	35	500	500	600	500	500

Nota: S – período seco; C – período chuvoso.

Fonte: A autora (2022).

A Figura 55 mostra os histogramas contendo a frequência de ocorrência dos valores de Nspt na subárea 02, construída a partir das análises do banco de dados de sondagem.

Figura 55 - Histograma dos valores Nspt para a subárea 02 nas profundidades de 2m no período seco (a) e chuvoso (b), 4m no período seco (c) e chuvoso (d), 6m no período seco (e) e chuvoso (f), 9m no período seco (g) e chuvoso (h) e 12m no período seco (i) e chuvoso (j).



Fonte: A autora (2022).

As análises geoestatísticas apresentaram intervalos com faixa de valores predominantes para cada profundidade e a área que correspondeu a cada intervalo foi calculada e está representada através da Tabela 15. Nota-se que em 2,00m de profundidade, mais de 80% dos registros de sondagem possuem Nspt no intervalo entre 6 – 10 golpes, tanto para o período seco como para o chuvoso, as maiores perdas ocorrem com Nspt entre 3-5, variando de 9% no período seco para 20% no período chuvoso. Para 4,00m de profundidade, foi observado que 1005 da área está entre o intervalo de 11 – 19 golpes. Em 6,00m de profundidade, o intervalo predominante está com Nspt 20 – 30 no período seco e 11 – 19 no período chuvoso. Em 9,00m de profundidade, a frequência de ocorrência dos intervalos Nspt entre 20 – 30 golpes e golpes, enquanto que ao se passar para a profundidade de 12,00m, destaca-se a predominância do intervalo > 30 golpes. Essas características condizem com o esperado e já observado em todas as áreas estudadas, um aumento de resistência com a profundidade.

Tabela 15 - Percentual de área correspondente ao intervalo de resistência SPT nas profundidades estudadas.

Intervalo Nspt	Nspt (2,0m) Área (%)*		Nspt (4,0m) Área (%)*		Nspt (6,0m) Área (%)*		Nspt (9,0m) Área (%)*		Nspt (12,0m) Área (%)*	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
	≤ 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 - 5	9	20	-	-	-	-	-	-	-	-
6 - 10	86	80	-	1	-	-	-	-	-	-
11 - 19	5	-	100	99	43	62	-	2	-	3
20 - 30	-	-	-	-	57	38	56	70	30	48
> 30	-	-	-	-	-	-	44	28	70	49

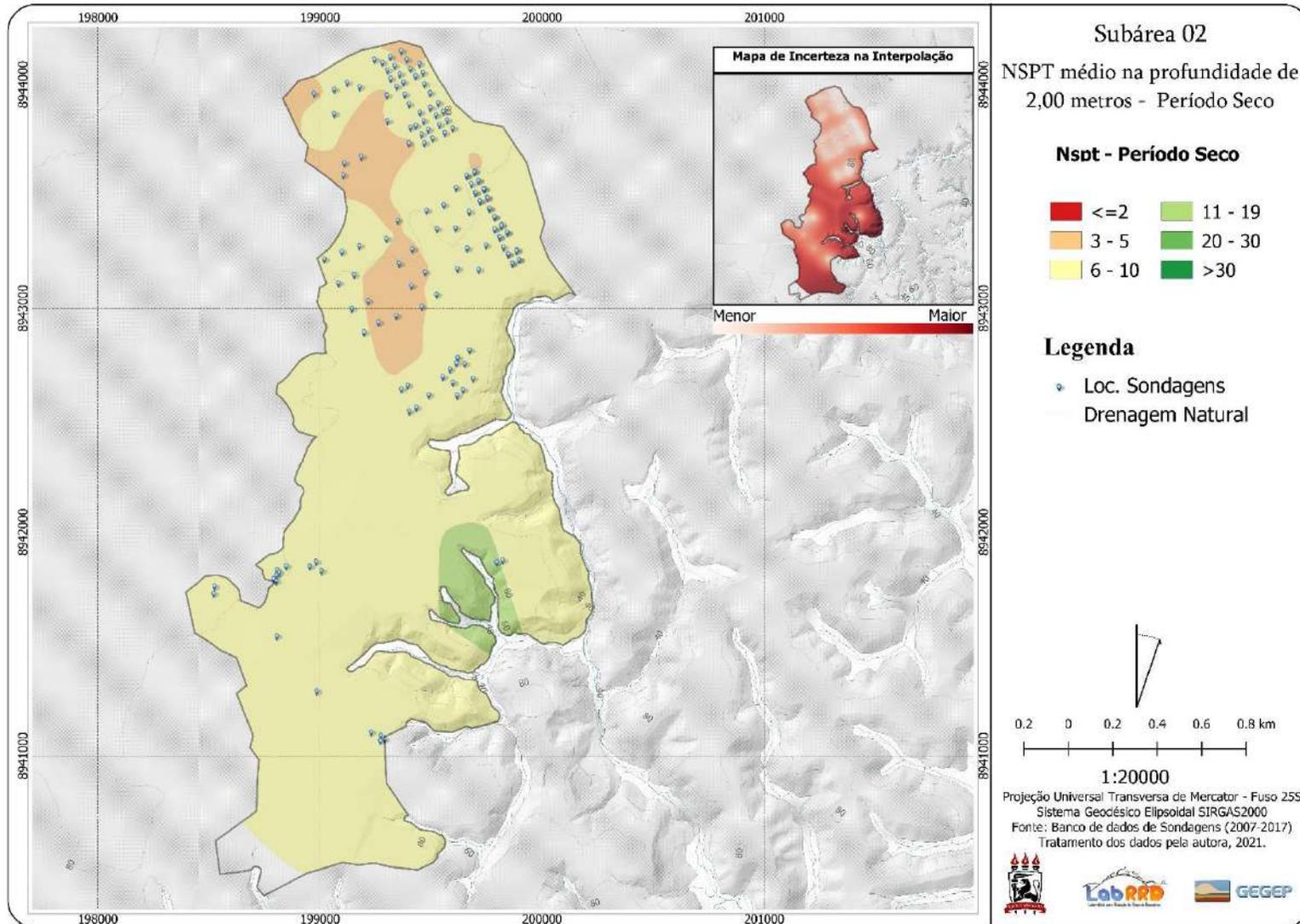
Nota: S – período seco; C – período chuvoso. *Percentual da área total referente a subárea 02.

Fonte: A autora (2022).

É observado que para a análise geoestatística, os intervalos Nspt para cada profundidade são aproximadamente coincidentes com os predominantes encontrados nos histogramas.

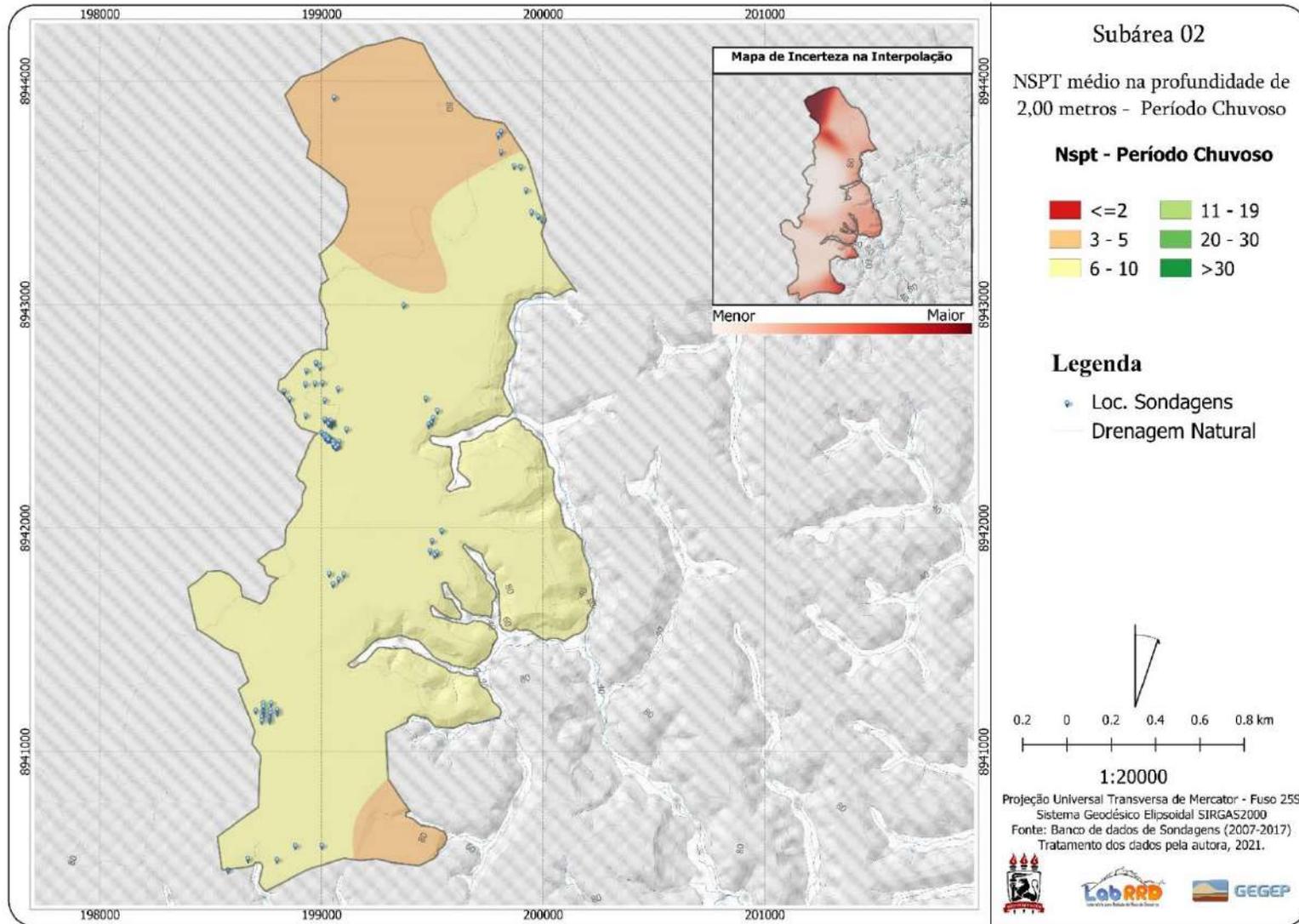
Os mapas de variabilidade espacial da resistência Nspt para a profundidade de 2,00m são apresentados nas Figuras 56 para o período seco e Figuras 57 para período chuvoso, na profundidade de 4,00m Figuras 58 para o período seco e Figuras 59 para período chuvoso, na profundidade de 6,00m Figuras 60 para o período seco e Figuras 61 para período chuvoso, na profundidade de 9,00m Figuras 62 para o período seco e Figuras 63 para período chuvoso e na profundidade de 12,00m Figuras 64 para o período seco e Figuras 65 para período chuvoso.

Figura 56 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 2,00m no período seco.



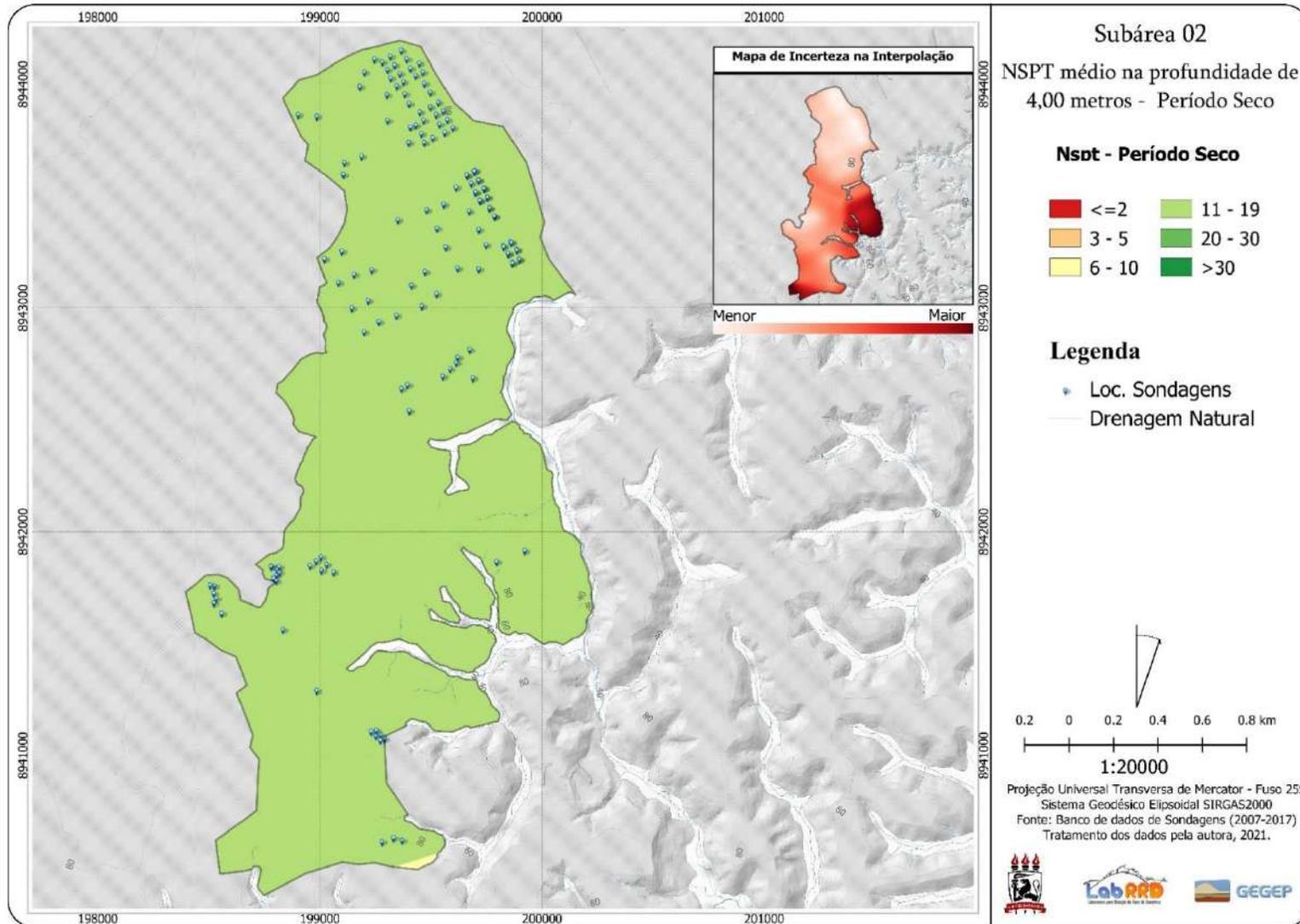
Fonte: A autora (2022).

Figura 57 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 2,00m no período chuvoso.



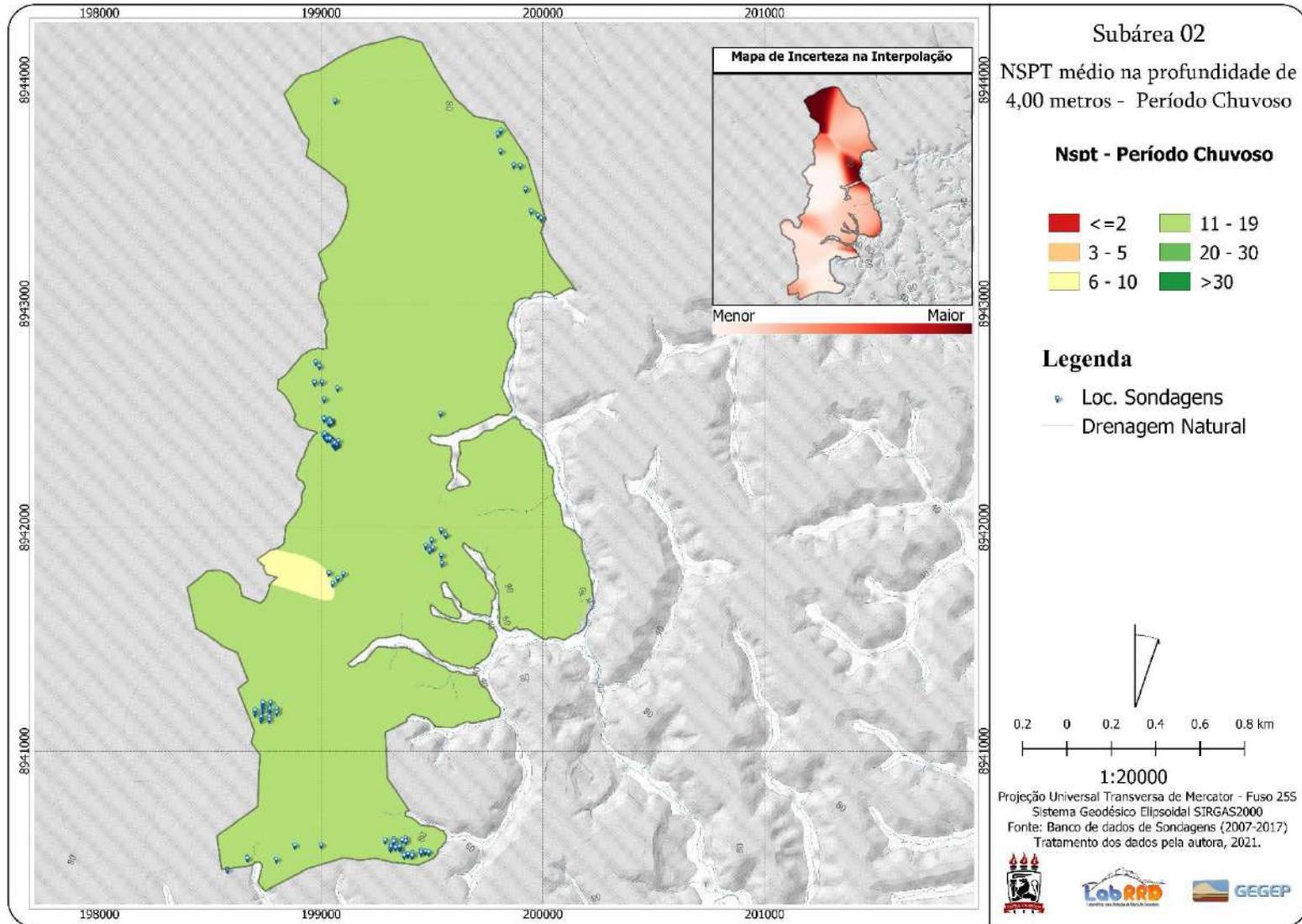
Fonte: A autora (2022).

Figura 58 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 4,00m no período seco.



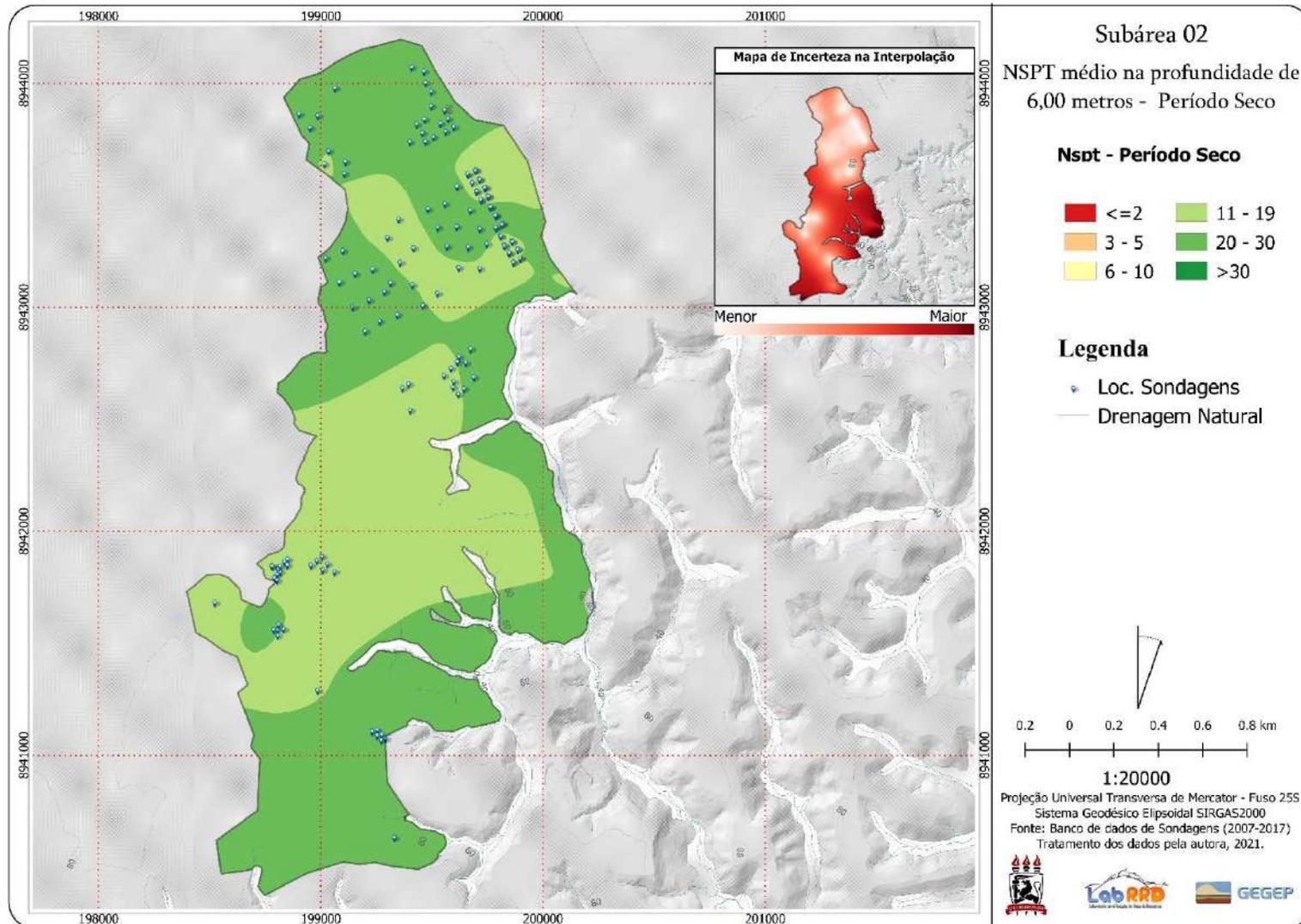
Fonte: A autora (2022).

Figura 59 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 4,00m no período chuvoso.



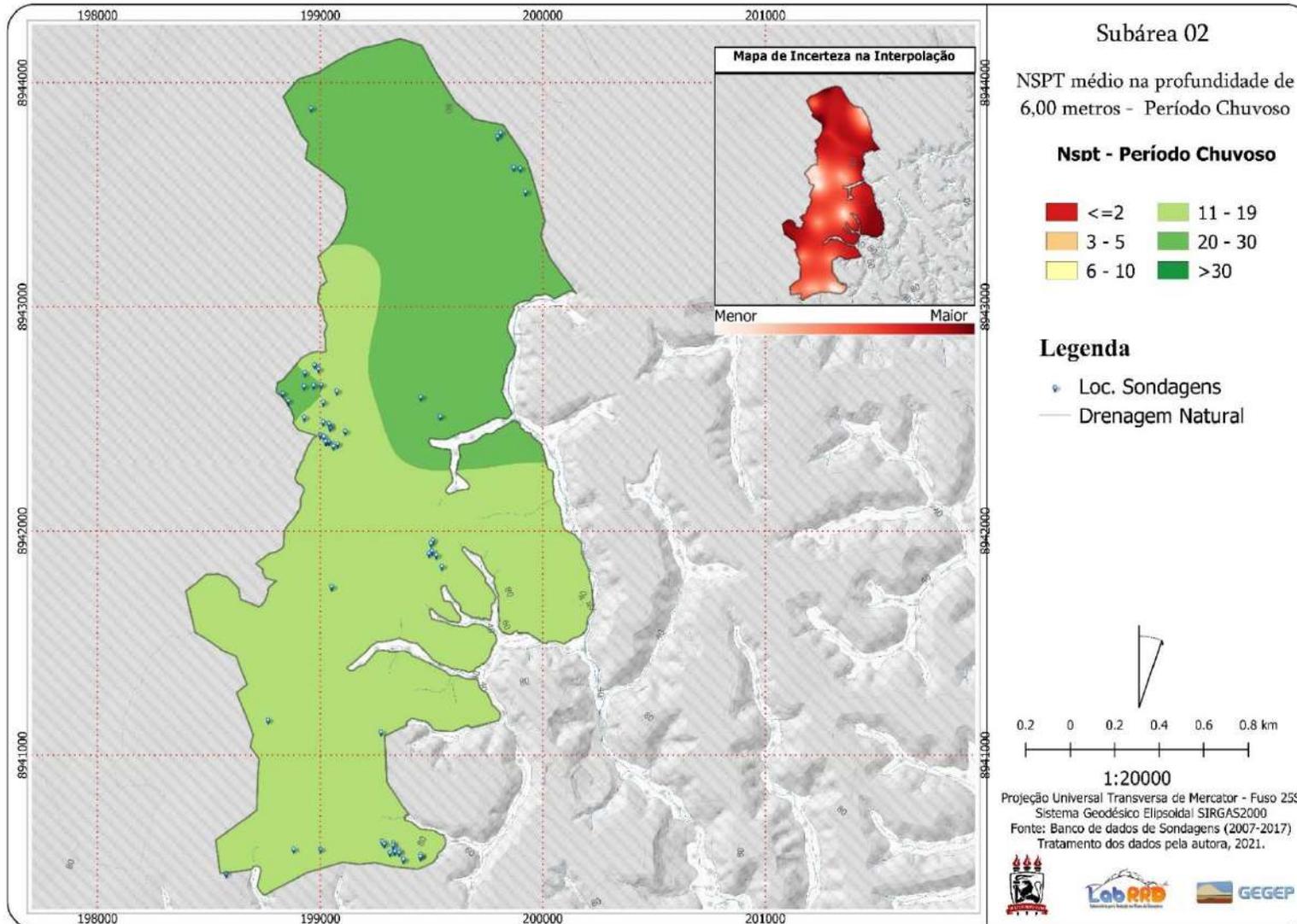
Fonte: A autora (2022).

Figura 60 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 6,00m no período seco.



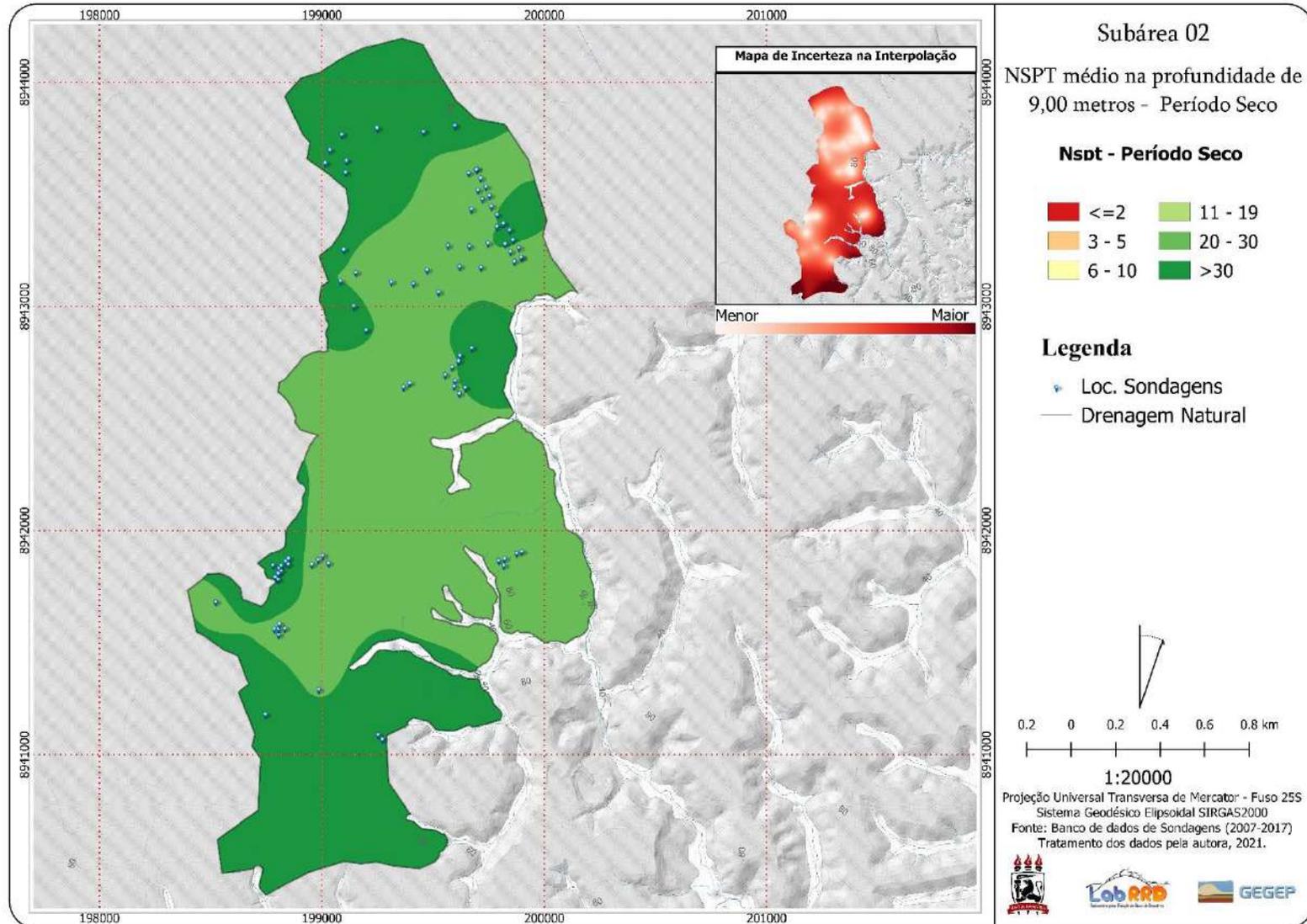
Fonte: A autora (2022).

Figura 61 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 6,00m no período chuvoso.



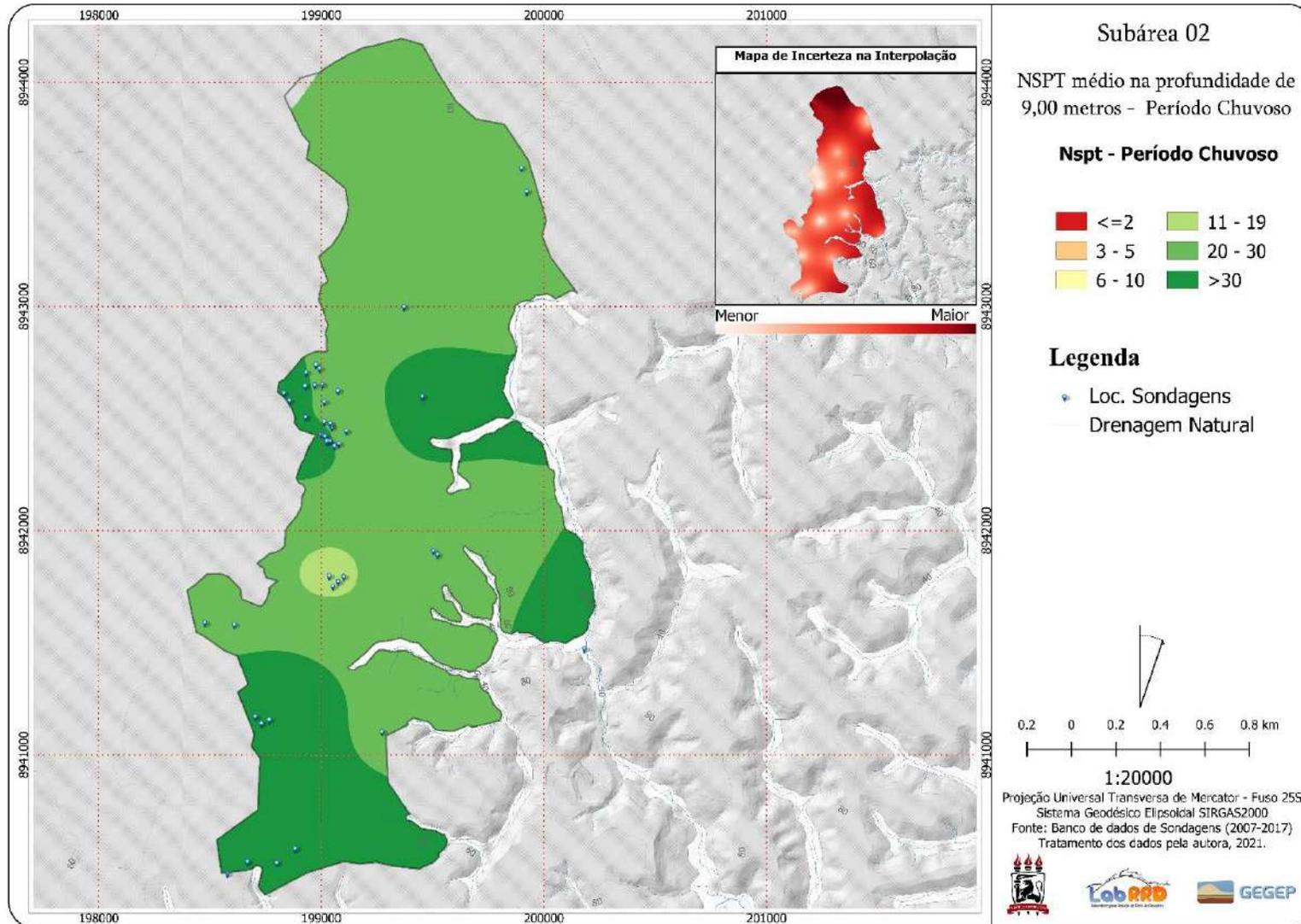
Fonte: A autora (2022).

Figura 62 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 9,00m no período seco.



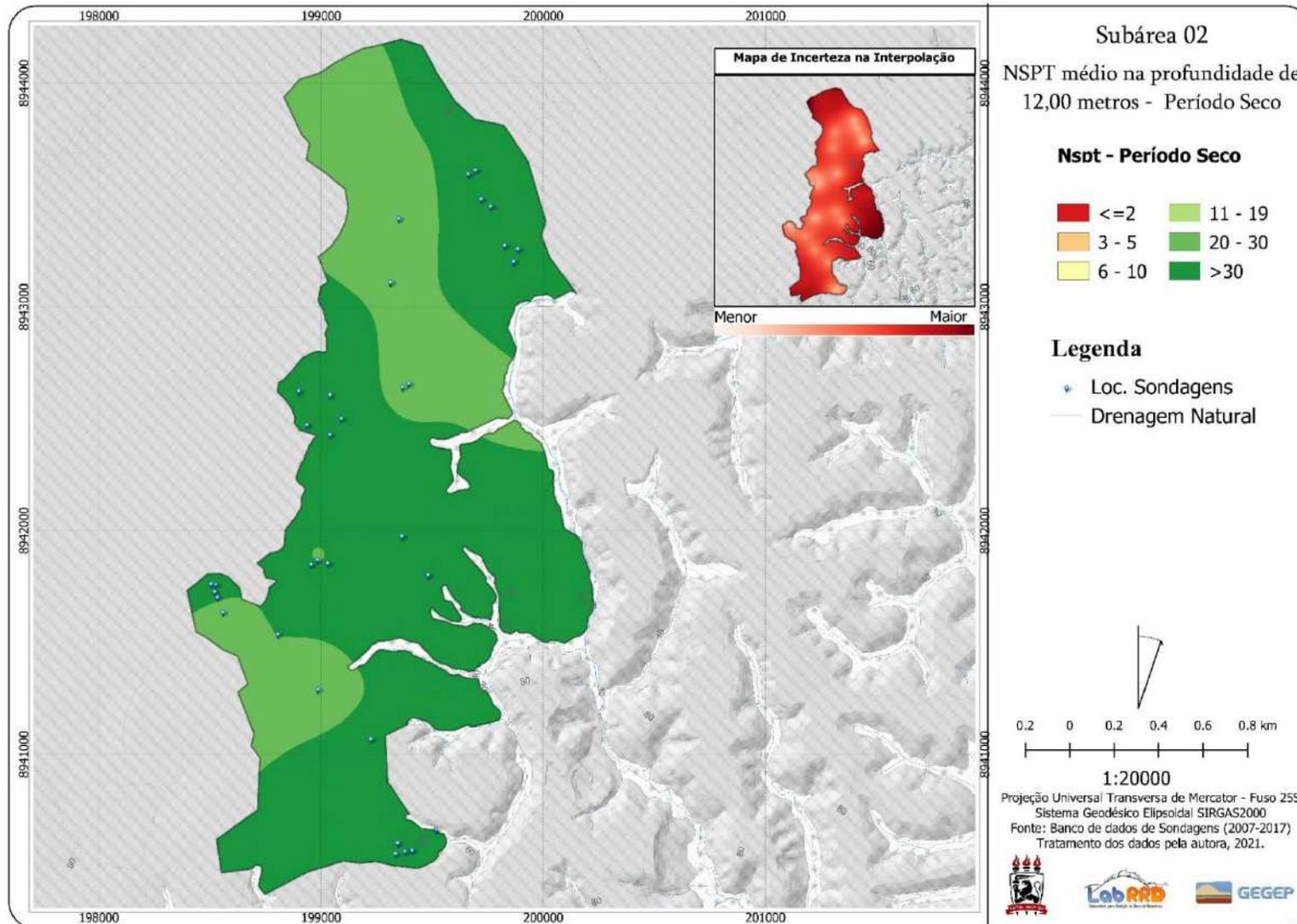
Fonte: A autora (2022).

Figura 63 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 9,00m no período chuvoso.



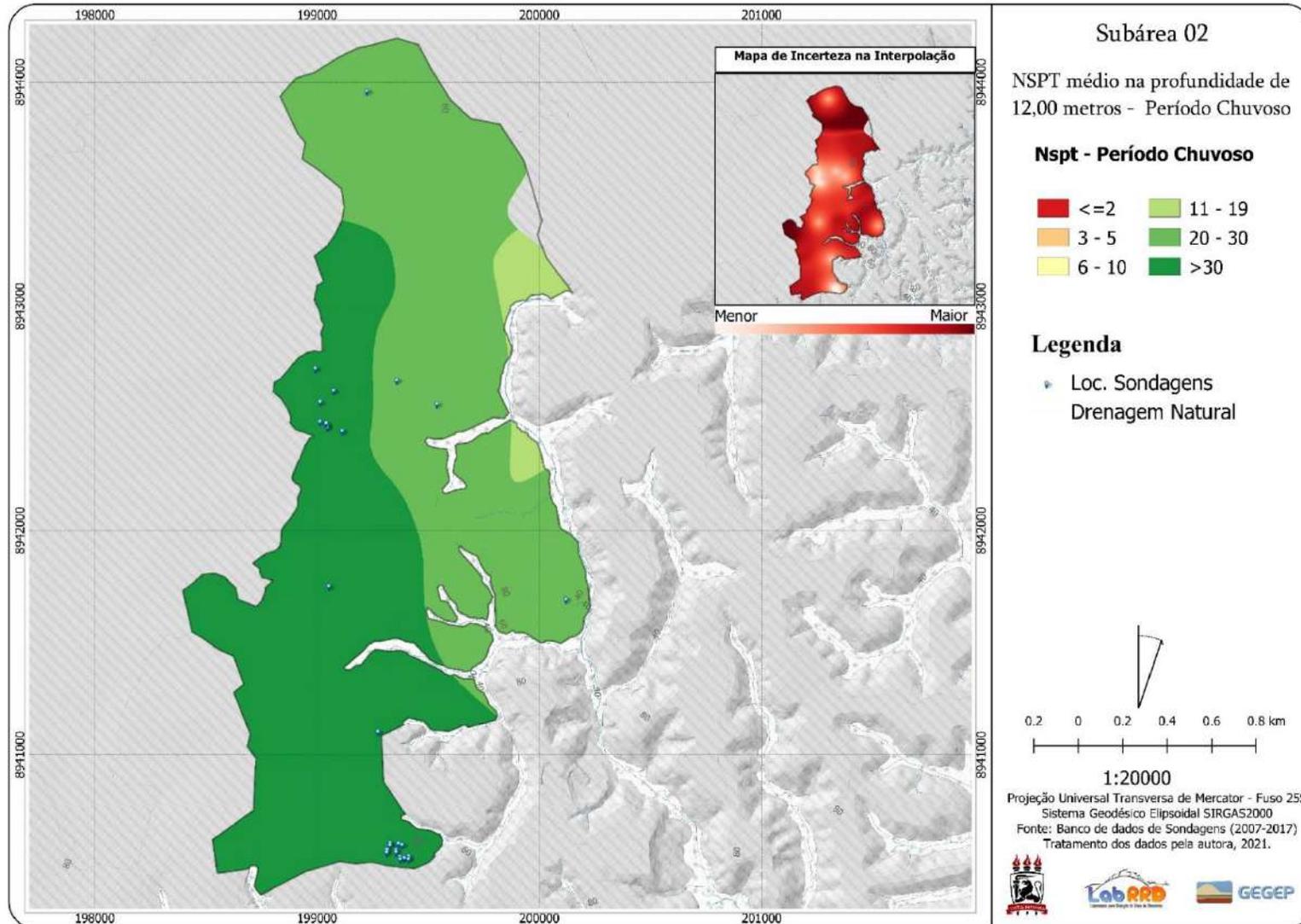
Fonte: A autora (2022).

Figura 64 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 12,00m no período seco.



Fonte: A autora (2022).

Figura 65 - Mapa de resistência Nspt a profundidade de 12,00m no período chuvoso.



Fonte: A autora (2022).

3.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

A etapa de mapeamento geomorfológico, geológico e geotécnico foi realizada através da estruturação de um banco de dados de sondagens SPT, informações cartográficas com referências altimétricas e técnicas geoestatísticas, associadas ao Sistema de Informações Geográficas para a geração de informações territoriais.

Foram identificadas 1.592 sondagens SPT, distribuídas na área de sedimentos da Formação Barreiras, subdivididas em 04 Unidades Geológicas de Engenharia (UGE). De acordo com as análises foi observada a ocorrência de camadas com predominância argilosa (81%), pertencentes às UGE BF-02 e BF-04, com descrição de ocorrência de óxidos e hidróxidos de ferro a partir de 3,00m de profundidade e sem a identificação de níveis de água.

Os dados altimétricos advindos da Base Cartográfica Municipal foram utilizados para a obtenção de dados geomorfométricos sobre o relevo e a partir deste mapeamento a determinação de compartimentação geomorfológica, definindo as formas de denudação e acumulação além da caracterização da dissecação do relevo. Nesse mapeamento merecem destaques a classificação quanto ao grau de dissecação do relevo, a ocorrência de áreas de abaciamento identificadas nos bairros do Farol e Tabuleiro dos Martins e para a identificação dos rebordos erosivos, ocupados em grande proporção identificadas pelas grotas.

O Mapeamento Geológico foi realizado utilizando dados morfométricos e com o auxílio de mapeamentos anteriores, validado por atividades de campo. Os resultados apontaram uma área de 143,41km² (72,45% do total da área urbana do município) composta por sedimentos de Formação Barreiras, induzindo a identificação da fácies geológica Leque Distal/Planície Aluvial. 13,14km² (6,63%) composto por sedimentos colúvio-eluviais, 4,54km² (2,30%), por sedimentos flúviolagunares localizados às margens da Laguna Mundaú, 2,98km² (1,5%) pela Formação Poção e 33,86km² (17,2%) por sedimentos litorâneos.

As análises geoestatísticas foram realizadas utilizando o método de krigagem ordinária, para 3 subáreas da zona urbana de Maceió, onde havia maior ocorrência de sondagens SPT. Os valores de resistência a penetração N_{spt} foram interpolados e mapeados para as profundidades de 2,00m, 4,00m, 6,00m, 9,00m e 12,00m. Os registros de sondagens foram segregados, de acordo com as duas estações predominantes (seca e chuvosa), sendo observada perda de resistência (N_{spt}) devido ao aumento da umidade (período chuvoso) em baixas profundidades, devendo se atentar a zona ativa influenciada pela infiltração identificada através dos mapas probabilísticos.

4 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

A caracterização geotécnica é uma etapa essencial para compreensão do comportamento do solo na região estudada, levando em consideração a carência de informações detalhadas sobre a Formação Barreiras na cidade de Maceió, principalmente no que diz respeito às áreas de encostas ocupadas, conhecidas como “Grotas”.

Dessa forma, este capítulo tem como objetivo, apresentar a campanha de investigação geotécnica realizada nesta pesquisa, objetivando fornecer dados que contribuam para a compreensão do comportamento geológico-geotécnico dos solos na região, disponibilizando resultados inéditos e parâmetros iniciais que podem auxiliar a comunidade geotécnica local em diversos projetos de engenharia.

4.1 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

O Programa de Investigação proposto nesta pesquisa se dividiu em duas principais etapas: a caracterização de campo e a caracterização de laboratório.

A etapa de caracterização de campo se iniciou com a escolha dos locais a serem investigados, considerando a melhor distribuição espacial dentro da área de estudo, histórico de problemas geológicos-geotécnicos e intensidade de execução de obras de engenharia.

Para melhor caracterização das possíveis áreas em encostas, foi realizado um levantamento com Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely Piloted Aircraft System - RPAS*), objetivando aquisição de dados topográficos em melhor escala e visualização das áreas mais propícias a coleta das amostras indeformadas nas encostas ocupadas. Assim, foram implantados pontos de controle no solo, rastreados com GNSS (*Global Navigation Satellite System – Sistema Global de Navegação por Satélite*) e em seguida realizado o voo nas áreas de interesse. Após o voo as imagens foram processadas e foram geradas ortofotocartas digitais, com elementos topológicos pertinentes à pesquisa.

A partir das análises realizadas, foram selecionados 04 locais a serem investigados: Na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), em escavação de uma obra de Fundação do Hospital do Coração (HCOR) e em encostas localizadas nas Grotas da Moenda e encosta do Mutange.

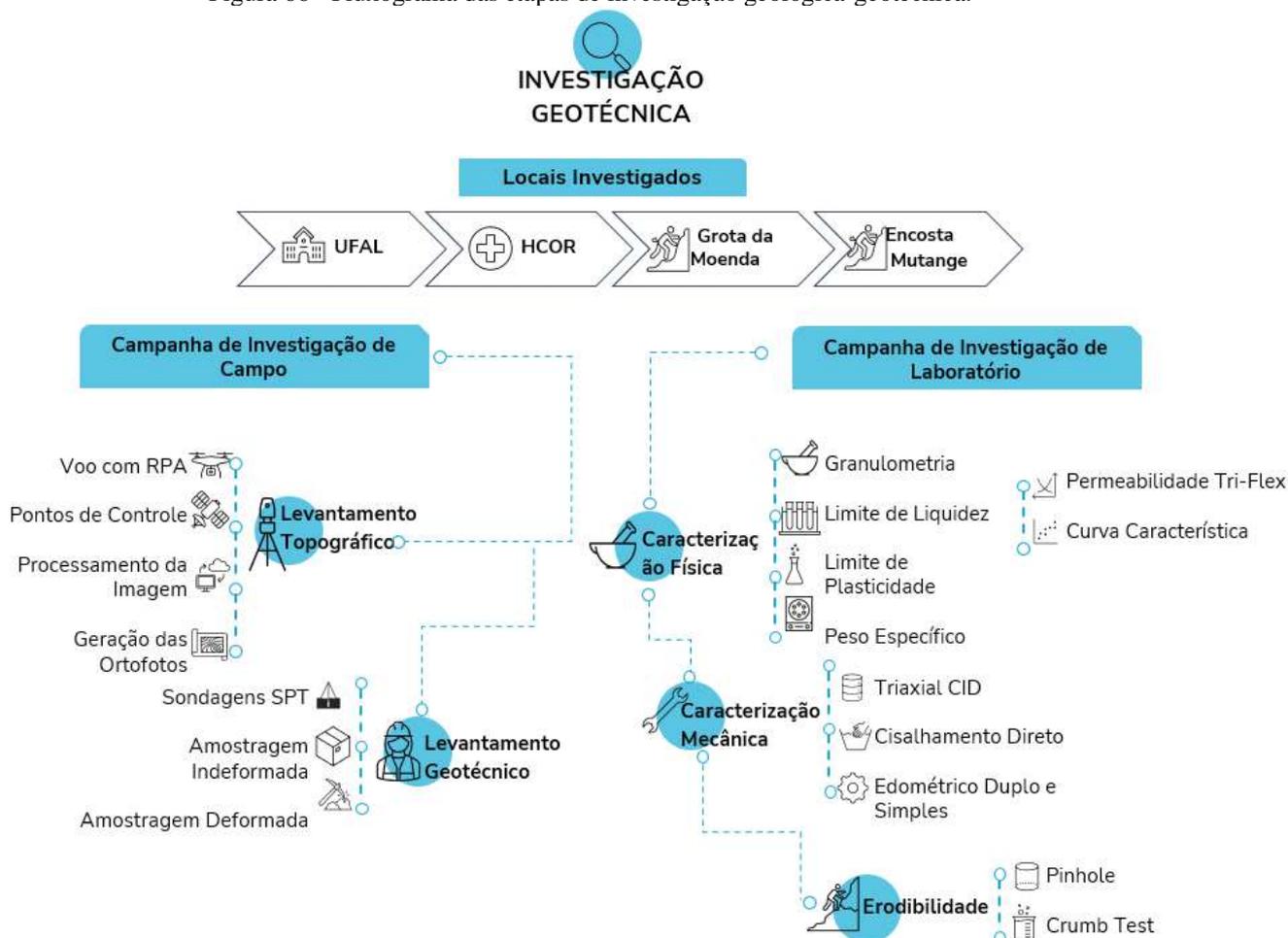
Nestes locais foram realizadas sondagens de simples reconhecimento (SPT) e coletadas amostras indeformadas (blocos) para realização da etapa de caracterização de laboratório, sendo extraídas duas amostras na Universidade Federal de Alagoas, a profundidades de 3,00m e

5,35m, uma amostra no Hospital do Coração (HCOR) a uma profundidade de 1,50m, na Grota da Moenda foram coletadas amostras no topo, meio e base da encosta, e por fim na Grota do Mutange, coletadas amostras no topo e meio da encosta.

A campanha de investigação de laboratório foi executada através da realização dos ensaios de caracterização física, permeabilidade Tri-Flex, determinação da curva característica através do método do papel filtro, ensaios de dispersão rápida e Pinhole Test e ensaios de resistência mecânica, Edométricos duplos e simples, cisalhamento direto na condição natural, inundada e com inversão (“residual), e Triaxial CID.

Para melhor compreensão das etapas metodológicas discutidas e executadas neste capítulo, um fluxograma é apresentado através da Figura 66.

Figura 66 - Fluxograma das etapas de investigação geológica-geotécnica.



Fonte: A autora (2022).

A campanha de investigação geotécnica de campo e de laboratório foi executada para todos os locais investigados. Os ensaios de caracterização física foram realizados utilizando amostras deformadas, coletadas em sacos. Nas amostras indeformadas (blocos) foram

realizados os ensaios de permeabilidade Tri-Flex, curva característica através do método do papel filtro, Cisalhamento direto, nas condições natural, inundado e com reversão (residual), Edométrico duplo e simples, expansão livre e Triaxial CID. A Tabela 16 apresenta a quantificação dos ensaios realizados nesta pesquisa.

Tabela 16 - Quantificação das coletas, levantamentos e ensaios realizados.

Campanha de Investigação Geotécnica de Campo		
Etapas		Quantidade
Sondagens de simples reconhecimento		04
Coleta de amostras indeformadas (blocos)		15
Coleta de amostras deformadas (sacos)		08
Levantamento com RPA		03
Levantamento Planimétrico com GNSS		02
Campanha de Investigação Geotécnica de Laboratório		
Ensaio		Quantidade
Caracterização Física	Granulometria por sedimentação	16
	Limite de Liquidez	08
	Limite de Plasticidade	08
	Peso específico seco	08
Ensaio de Cisalhamento Direto na condição Natural		32
Ensaio de Cisalhamento Direto na condição Inundada		32
Ensaio de Cisalhamento Direto com reversão		32
Ensaio Edométrico Duplo		16
Ensaio de Expansão Livre		08
Edométrico Simples para 20kPa		08
Edométrico Simples para 200kPa		08
Ensaio Triaxial CID		32
Ensaio de Dispersão rápida		08
Pinhole Test		08
Permeabilidade Tri-flex		08
Curva Característica		08

Fonte: A autora (2022).

A partir das análises realizadas, foram selecionados 04 locais a serem caracterizados, assim distribuídos:

Local 1 - UFAL: o Programa de investigação Geotécnica foi executado no Campo Experimental de Geotecnia (CEG/UFAL) da Universidade Federal de Alagoas, Campus A. C. Simões, localizado na Av. Lourival Melo Mota, S/N, Tabuleiro do Martins. Essa área foi

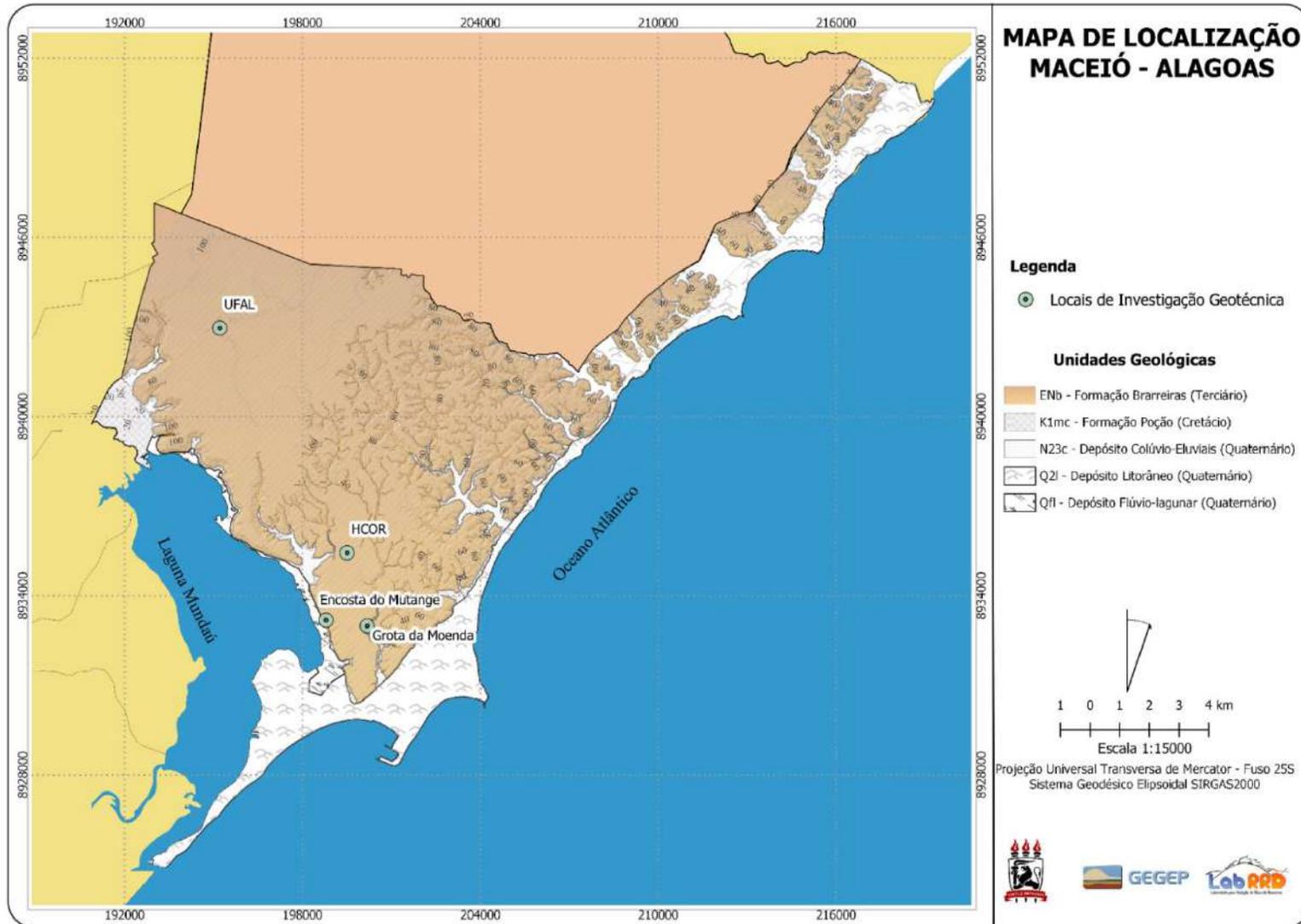
escolhida por possuir disponibilidade territorial potencial para ocupação, com ocorrência de importantes obras de engenharia, localizando-se na região mais alta da área estudada.

Local 2 - HCOR: o segundo local investigado está em uma área mais central do domínio estudado, na obra de fundação da extensão do Hospital do Coração (HCOR) localizado na rua Ariosvaldo Pereira Cintra, bairro Gruta de Lourdes.

Local 3 - Grota da Moenda: A Grota da Moenda está localizada nos limites dos bairros Pintanguinha, Feitosa e Farol, estando o local específico de coleta de amostras na vertente do bairro Pitanguinha. Segundo o Plano Municipal de Redução de Risco de Maceió (PREFEITURA MUNICIPAL DE MACEIÓ, 2007), a região estudada faz parte do complexo de risco do Baixo Reginaldo, possuindo dois processos geológicos/geotécnico principais, o movimento de massa e a inundação. Por se tratar de uma área ocupada, de fácil acesso, de médio risco social e que faz parte de um dos principais complexos de risco geológico/geotécnico da cidade de Maceió, a Grota da Moenda foi considerada uma das áreas ideais a serem estudadas. Apesar das altas declividades, uma via local cruza o vale e liga os bairros Pitanguinha e Farol ao bairro Feitosa, essa via é conhecida como “Ladeira da Moenda”, que se torna uma rota alternativa para cruzar os vales íngremes que cortam a malha da cidade. Não existem registros oficiais sobre a origem e ocupação da área, porém, relatos de moradores mais antigos indicam uma ocupação irregular através de parcelamento de solo informal na década de 80 da Fazenda Santo Antônio, na época de propriedade do Tenente Antônio Gonçalves de Mello.

Local 4 - Encosta do Mutange: As áreas escolhidas estão localizadas na região mais ocupada, com maior densidade construtiva sobre sedimentos de Formação Barreiras. A encosta do Mutange está inserida no complexo de Risco Mundaú (PMRR, 2007), caracterizado por vertentes declivosas, suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa, possuindo aproximadamente 40 metros de desnivelamento e declividade em torno de 30°. O bairro do Mutange está localizado no perímetro urbano de Maceió e foi definido a partir da lei municipal 4.953 em 06 de janeiro de 2000, alterando a lei Nº 4.687/98. Trata-se de um bairro relativamente recente em função da sua criação, mas não em função de sua ocupação, sendo considerada uma das áreas mais antigas da cidade de Maceió. A Figura 67 apresenta um mapa contendo os locais investigados e sua distribuição espacial.

Figura 67 - Locais investigados.



Fonte: A autora (2022).

4.2 CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO DE CAMPO

Na campanha de investigação de campo serão abordadas as metodologias utilizadas para as investigações de subsuperfície, referentes a execução de sondagens de simples reconhecimento SPT e levantamento com Aeronave Remotamente Pilotada, além da coleta de amostras deformadas e indeformadas, essenciais a investigação geotécnica proposta nesta pesquisa.

4.2.1 Investigação de Superfície - Levantamento com Aeronave Remotamente Pilotada

Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) é uma aeronave não tripulada pilotada a partir de uma estação de pilotagem remota que tenha qualquer outra finalidade que não seja recreativa, tais como comercial, corporativa e experimental (ANAC, 2017).

Os RPA surgiram inicialmente para fins militares, sendo difundido para a sociedade civil com diversas finalidades, inclusive recreativa. Atualmente, os mapeamentos utilizando técnicas fotogramétricas consolidadas fazendo uso de RPA tem permitido o levantamento de áreas com qualidade e precisão e a um custo significativamente menor que a fotogrametria convencional.

O termo fotogrametria deriva das palavras gregas *photos*, que significa luz, *gramma*, que significa algo desenhado ou escrito e *metron*, que significa "medir". Portanto, Fotogrametria, de acordo com suas origens, significaria "medir graficamente usando luz" (TOMMASELLI, 2009). Com o avanço dessa ciência a produção Cartográfica tornou-se muito mais rápida e eficiente.

Existem inúmeras aplicações para a Fotogrametria e quase todos os problemas que demandam medições podem ser realizados por processos fotogramétricos. A fotogrametria apresenta uma série de vantagens sobre os processos diretos de medição, tanto para mapeamento quanto para outras aplicações como a aquisição rápida dos dados, apresentam-se como documentos legais relativos à época de sua tomada, a precisão pode ser aumentada de acordo com a necessidade, o objeto medido não é tocado etc. A aplicação mais conhecida para a aerofotogrametria é o mapeamento, tarefa impossível de ser realizada sobre toda a superfície terrestre por métodos diretos. Com o advento da Fotogrametria a aquisição de mapas de determinadas regiões tornaram-se possíveis sendo destacadas dentre as aplicações da fotogrametria a produção de cartas topográficas, projetos, locação e manutenção de estradas, inventários florestais e minerais, arqueologia, geologia,

planejamento urbano e cadastro urbano, mapeamento de plantas, cadastro rural, medicina, indústria e etc.

As informações obtidas por fotogrametria para fins de mapeamento podem ser agrupadas em dois tipos principais: imagem raster (ou matriciais) e vetoriais. Os produtos vetoriais incluem toda a informação processada que em sua forma final de registro ou apresentação não é uma imagem, mas está representada por pontos ou vetores simbolizando objetos que foram selecionados e classificados de acordo com as especificações para o mapa. O produto vetorial mais comum é a cartografia topográfica em todas as escalas, da grande à pequena. Estes produtos estão representados por imagens digitais dos objetos na sua aparência original ou que sofreram algum tipo de processamento, seleção ou classificação e incluem: as fotografias digitais, mosaicos, ortofotoimagens, ortofotocartas (fotografias corrigidas geometricamente) e modelos tridimensionais de objetos. Para este resultado se faz a orientação interna e externa (relativa e absoluta). Nesta a projeção da fotografia é transformada de perspectiva central para a projeção ortogonal (BERBERAN, 2002).

A partir das técnicas fotogramétricas, podem ser gerados os Modelos Digitais do Terreno (MDT), que representam o comportamento de um fenômeno que ocorre em uma região da superfície terrestre. Os dados de MDT são de fundamental importância em aplicações de geoprocessamento desenvolvidas no ambiente de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Esses modelos são obtidos a partir de uma amostragem do fenômeno dentro da região de interesse. As amostras são processadas de forma a criar modelos digitais que vão representar a variabilidade do fenômeno nessa região.

Os levantamentos com RPA no Brasil seguem o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017 (RBAC-E nº 94/2017) da ANAC e é complementar às normas de operação de drones estabelecidas pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

Os RPA possuem grande aplicabilidade nos setores da construção civil, mineração, meio ambiente, infraestrutura e principalmente no setor agrícola. Pode ser utilizado para monitoramento de áreas de risco, agricultura de precisão e para obter informações em grandes escalas, sendo uma tecnologia cada vez mais crescente e utilizada no mercado atual.

Para fins dessa pesquisa, o RPA foi utilizado na obtenção de informações qualitativas e quantitativas sobre as áreas estudadas, auxiliando na tomada de decisão dos possíveis locais a serem investigados. As ortofotos digitais foram geradas apenas para as encostas da Moenda e Grota do Mutange, gerando modelos digitais de elevação, para reconhecimento topográfico. Para a UFAL, não foi possível realizar levantamento com RPA por três fatores: as proximidades

do complexo Penitenciário e existência do radar meteorológico no campus, que emitem sinais bloqueadores que interrompem a frequência com a aeronave, e as proximidades com o aeroporto Zumbi dos Palmares, que necessitava de autorização especial e prévia da ANAC para realização do voo.

Para a realização do levantamento aéreo utilizando o RPA, inicialmente foi necessário a execução dos planos de voo das áreas de interesse. Para isso, foi utilizado o aplicativo *DroneDeploy*. Pela proximidade do aeroporto, não foi possível realizar o levantamento com RPA na amostra retirada na UFAL, exigência das normativas da ANAC, ainda havendo possibilidade de interferência de sinal em virtude do radar meteorológico e dos sinais de bloqueio de celular emitidos em virtude das proximidades do complexo penitenciário de Alagoas.

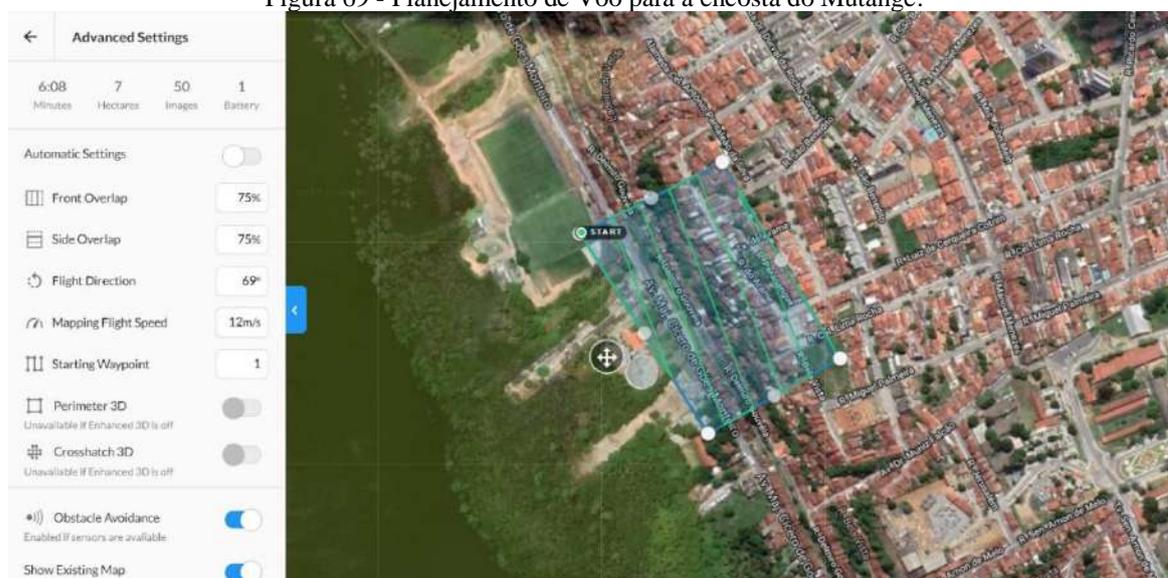
As técnicas de levantamento fotogramétrico foram realizadas para as duas encostas estudadas. As imagens desse planejamento podem ser observadas nas Figuras 68 e 69 para a Grota da Moenda e encosta do Mutange, que mostram a área recoberta e as linhas de voo.

Figura 68 - Planejamento de Voo para a Grota da Moenda.



Fonte: A autora (2022).

Figura 69 - Planejamento de Voo para a encosta do Mutange.



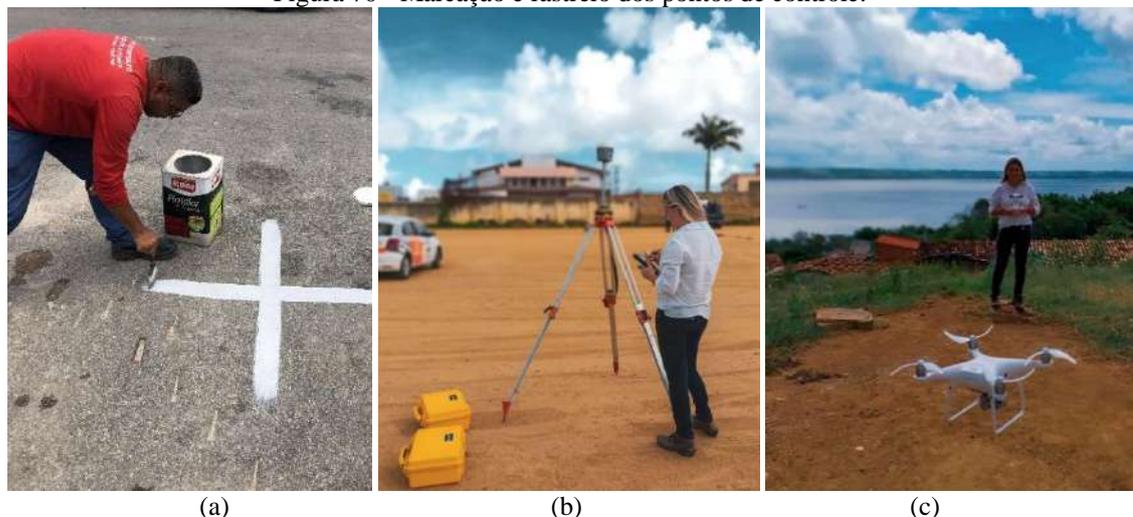
Fonte: A autora (2022).

Para as áreas da Grota da Moenda e Mutange, foram utilizados 75% de recobrimento lateral e longitudinal, esses valores não são convencionais na fotogrametria tradicional, porém foram utilizados em virtude de uma maior oscilação da aeronave no momento da execução do voo, em virtude dos ventos e de seu peso. A velocidade de voo foi de 12m/s e altura de 120m, permitida por lei. As linhas e voo foram dispostas de forma a melhor representar as áreas a serem levantadas.

Para a Grota da Moenda, foram levantados 19ha, obtendo 246 imagens. Para a Encosta do Mutange, foram levantados 7ha, obtendo 50 fotografias.

Após a execução do planejamento de voo, foi necessário realizar a identificação de pontos em campo, passíveis de identificação nas imagens e a inserção de alvos em solo, que pudessem ser facilmente reconhecidos nas imagens após o voo. Esses pontos de controle foram posteriormente rastreados com receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e as coordenadas serviram como amarração para as imagens, só após esse processo o voo foi realmente realizado. A Figura 70 apresenta a pintura dos alvos a serem rastreados (a), a montagem da Base do GNSS (b) e o início do levantamento com o RPA (c).

Figura 70 - Marcação e rastreamento dos pontos de controle.



Fonte: A autora (2022).

O Levantamento GNSS foi realizado no modo estático, com um receptor de duas frequências RTK (*Real Time Kinematic*), marca CHC, modelo i80 com precisão posicional horizontal de $2,5\text{mm} + 0,1 \text{ ppm}$ e vertical de $3,5\text{mm} + 0,4 \text{ ppm}$. O levantamento aéreo foi realizado com um RPA modelo Phantom 4 Pro de fabricação da DJI, certificado pela ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) através do cadastro nº PP-988032490.

Segundo ANAC (2007), o RPA utilizado para esta pesquisa é do tipo classe 3, não sendo necessário projeto autorizado, mas deverão ser cadastradas na ANAC, apresentando informações sobre o operador e sobre o equipamento, desde que operem em até 400 pés (120m) acima da linha do solo e em linha de visado visual, classificada como operação VLOS, operação na qual o piloto mantém o contato visual direto com o drone (sem auxílio de lentes ou outros equipamentos). Dessa forma, os voos realizados para fins desta pesquisa utilizaram esta instrução, não sendo possível a realização de levantamento aéreo no Campus da Universidade Federal de Alagoas em virtude da proximidade do Aeroporto internacional Zumbi dos Palmares, instrução do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Ainda dificultaria o levantamento nessa área, as unidades do Sistema Prisional Alagoano e os sinais emitidos pelo radar meteorológico localizado no campus.

As coordenadas rastreadas estão no sistema de Referência SIRGAS2000, Projeção UTM, zona 25S, Meridiano central -33° . As altitudes obtidas através do GNSS foram corrigidas para o geóide, a fim de se obter a altura ortométrica, fazendo uso do MAPGE2015, modelo geoidal utilizado para o Brasil. A Tabela 17 apresenta as coordenadas dos pontos de controle utilizadas para a ortorretificação das imagens coletadas.

Tabela 17 - Coordenadas dos pontos de controle.

Pontos	Norte (m)	Este (m)	Altitude Geométrica (m)	Descrição	Altitude Ortométrica (m)
Pontos de Controle Encosta do Mutange					
0	8933298,636	198735,650	46,740	BASE	55,700
1	8933236,953	198794,189	43,587	P.C. 1	52,547
2	8933192,558	198786,863	43,567	P.C. 2	52,527
3	8933171,671	198766,644	38,871	P.C. 3	47,831
4	8933328,157	198736,363	45,172	P.C. 4	54,132
5	8933259,611	198640,431	6,939	P.C. 5	15,899
6	8933238,553	198636,113	2,327	P.C. 6	11,287
7	8933273,431	198614,636	2,316	P.C. 7	11,276
Pontos de Controle Encosta Grota da Moenda					
1	200068,417	8933002,873	37,468	P.C. 1	46,428
2	200127,021	8932596,426	40,182	P.C. 2	49,142
3	200258,931	8933009,662	21,965	P.C. 3	30,925
4	200381,833	8932999,121	31,608	P.C. 4	40,568
5	200535,909	8933093,464	39,164	P.C. 5	48,124

Fonte: A autora (2022).

O processamento das imagens foi realizado no Software *Agisoft PhotoScan* versão estudantil. O *software* gera ainda um Modelo Digital de Superfície (MDS), nuvem de pontos, e após o ajuste através dos pontos de controle é possível a geração do ortomosaico, que pode ser exportado e trabalhado em programas de SIG (Sistema de informações Geográficas).

4.1.1.1 Ortofotos geradas para a Grota da Moenda e Encosta do Mutange

Para encosta do Mutange e Grota da Moenda, foi gerada uma ortofotocarta a partir das imagens obtidas com RPA, com a identificação de elementos importantes para a caracterização da área estudada com identificação das edificações no entorno. A Figura 71 e 72 apresentam a ortofotocarta da Grota da Moenda e da Encosta do Mutange, respectivamente.

Figura 71 - Ortofoto da Grotta da Moenda.



Fonte: A autora (2022).

Figura 72 - Ortofoto da Encosta do Mutange.



Fonte: A autora (2022).

4.2.2 Investigação de Subsuperfície – Sondagens à Percussão (Standard Penetration Test - SPT)

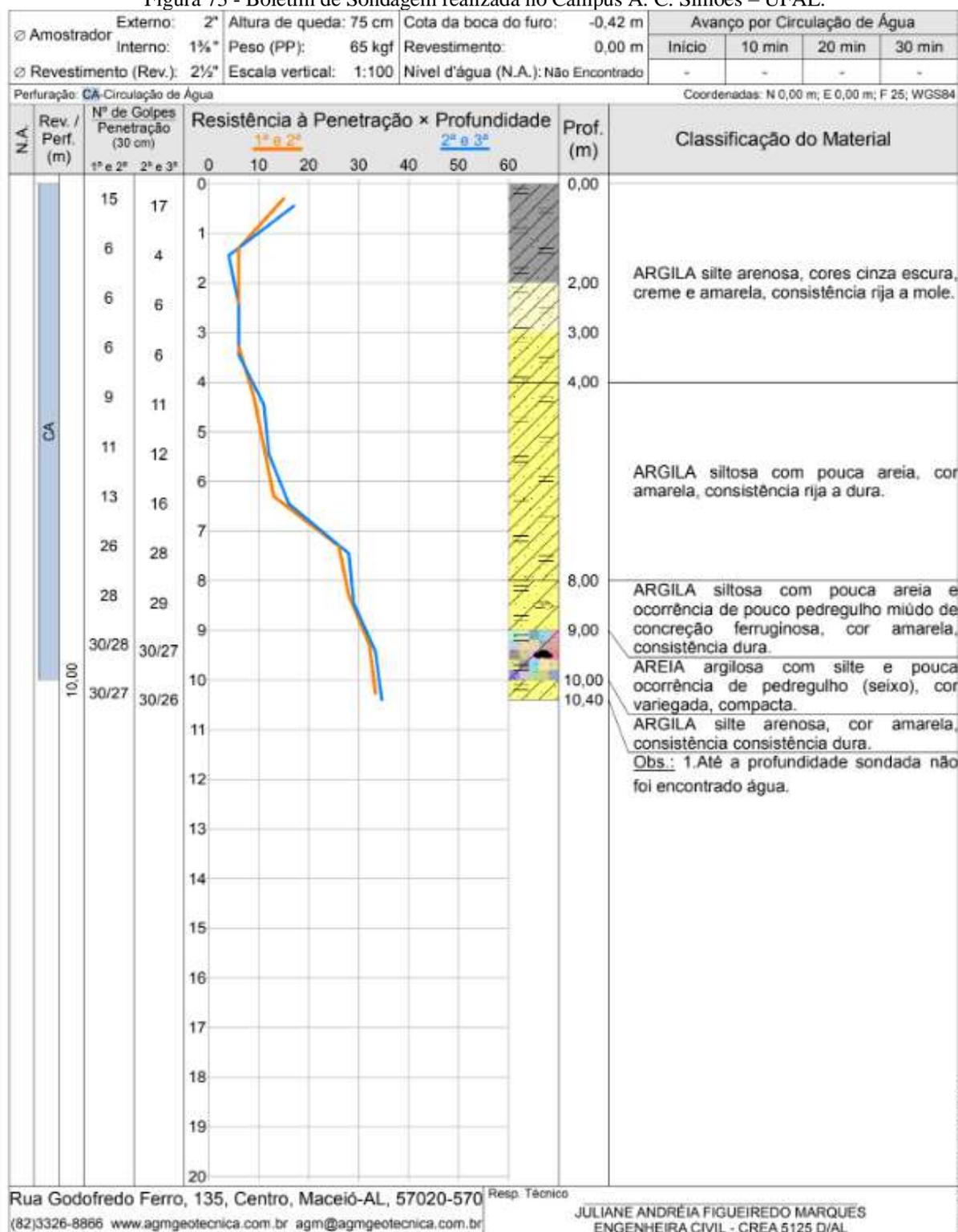
Com o objetivo de realizar uma análise exploratória dos materiais que compõe o solo nas áreas estudadas, foram realizadas investigações de subsuperfície que compreenderam as sondagens de simples reconhecimento.

Em cada local investigado foi realizado uma sondagem, executada pela empresa AGM Geotécnica LTDA, seguindo as orientações e padrões determinados pela NBR 6484 – Método de Execução de Sondagens (ABNT, 2020). A Sondagem realizada no Campus A.C. Simões – UFAL e HCOR são anteriores ao desenvolvimento desta pesquisa, realizadas em outubro de 2015 e abril de 2017 respectivamente, com propósitos distintos, porém consideradas adequadas para fins desta pesquisa.

Uma sondagem SPT foi realizada no topo de cada encosta estudada, em dezembro de 2019. A dificuldade de acesso e a indisponibilidade de locais adequados inviabilizaram a execução de outros ensaios SPT que permitissem uma completa caracterização das camadas que compõe as encostas, porém, a investigação auxiliou na tomada de decisão dos locais possíveis para amostragem indeformada.

O boletim de sondagem apresentado na Figura 73 foi realizado no Campus A.C. Simões – UFAL e possui coordenadas E = 195197,33 e N = 8942945,18 (SIRGAS2000, UTM 25S). Esta sondagem atingiu a profundidade de 10,40m, distribuídas em 5 camadas, com predominância argilosa, ocorrendo uma camada arenosa com 1,00m de espessura em uma profundidade de 9,00m. Neste perfil são identificados ausência de nível de água e ocorrência de pedregulhos e concreções ferruginosas.

Figura 73 - Boletim de Sondagem realizada no Campus A. C. Simões – UFAL.

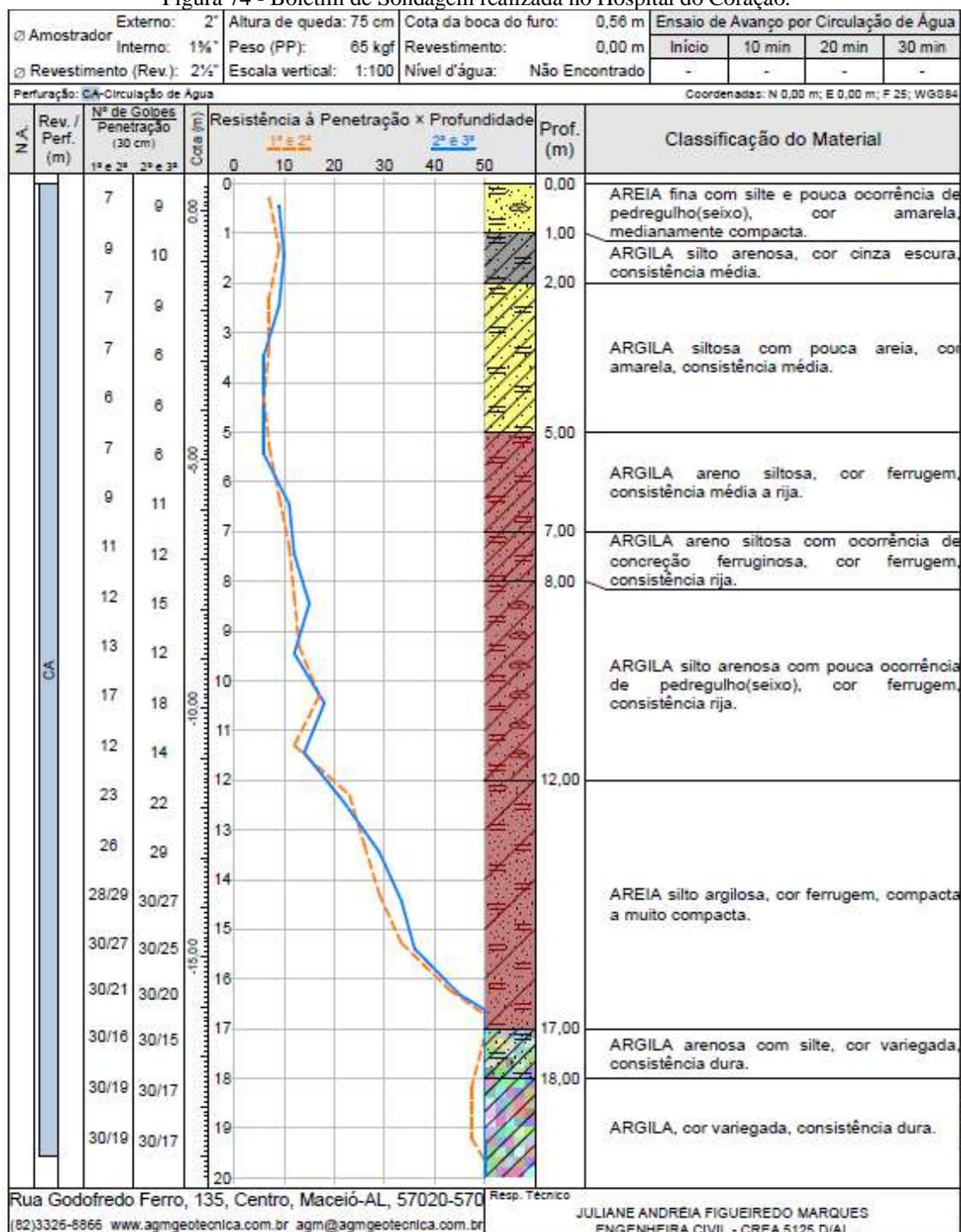


Fonte: A autora (2022).

A Figura 74 apresenta a sondagem realizada no Hospital do Coração, com coordenadas E = 199463,14 e N = 8935435,02 (SIRGAS2000, UTM 25S) e a Figura 75 apresenta ainda o detalhe dos solos coletados no bico do amostrador, em que podem ser observados a variação de coloração e material das amostras a cada metro. A sondagem atingiu uma profundidade de

20,00m, ocorrendo intercalações de camadas arenosas e argilosas, com presença de pedregulho e seixos.

Figura 74 - Boletim de Sondagem realizada no Hospital do Coração.



Fonte: A autora (2022).

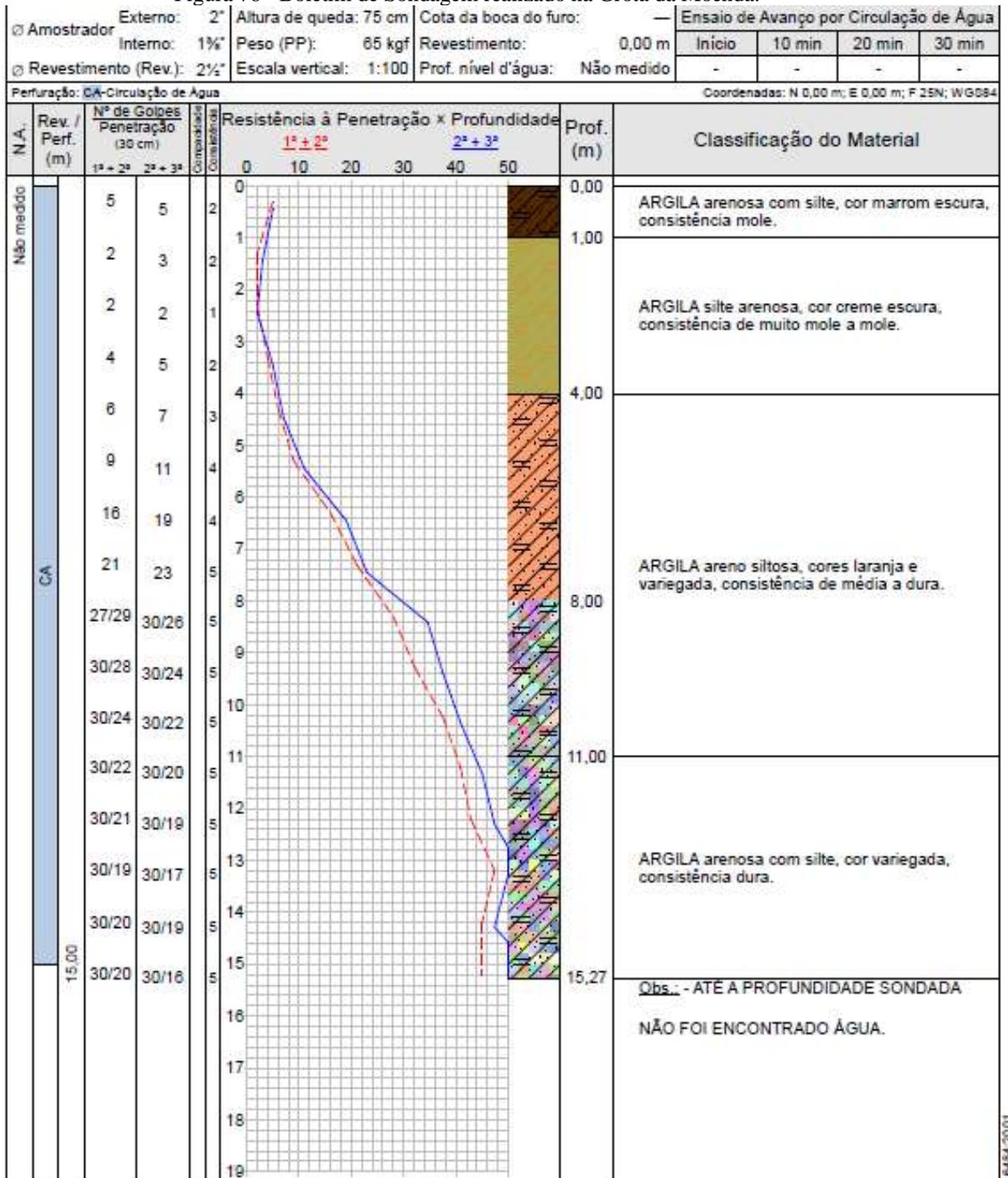
Figura 75 - Amostras coletadas a cada metro para a sondagem do Hospital do Coração.



Fonte: A autora (2022).

Para a Grota da Moenda, foi realizado um furo de sondagem SPT nas coordenadas E = 200159,93 e N = 8932970,29 (SIRGAS2000, UTM 25S), localizada no topo da encosta para melhor caracterização dos solos estudados, conforme apresentado através da Figura 76. As altas declividades e o difícil acesso dificultaram o transporte dos equipamentos necessários a realização da sondagem, sendo realizada nos fundos de casas voltados para a encosta. A sondagem atingiu uma profundidade de 15,27m, sendo possível a identificação de quatro camadas de solo em um perfil exclusivamente argiloso. A Figura 77 apresenta as amostras coletadas a cada metro, demonstrando as variações de coloração e a heterogeneidade do solo presente nessa encosta.

Figura 76 - Boletim de Sondagem realizado na Grota da Moenda.



Fonte: A autora (2022).

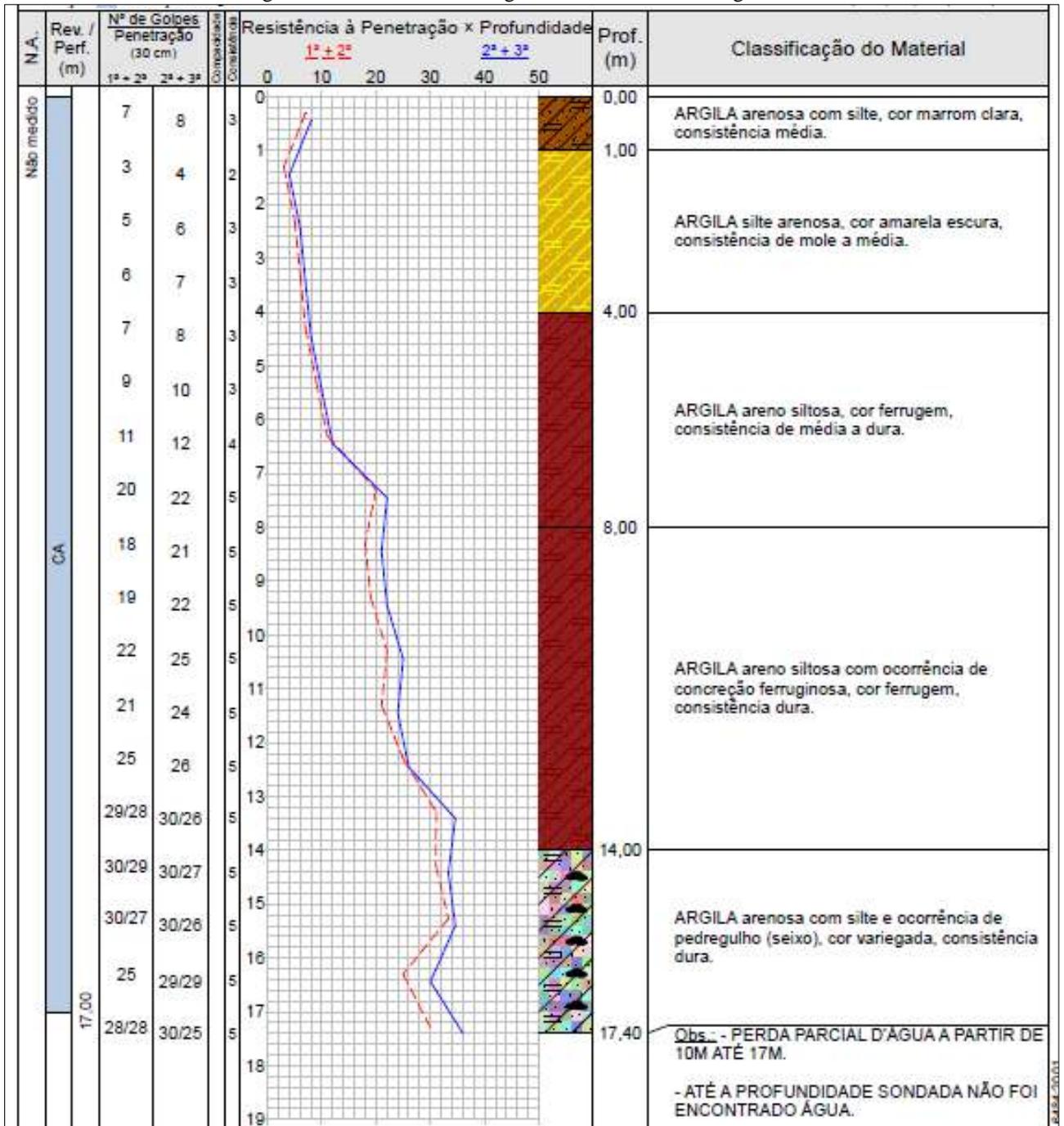
Figura 77 - Amostras coletadas a cada metro para a sondagem da Grota da Moenda.



Fonte: A autora (2022).

Para a Encosta do Mutange, foi realizado um furo de sondagem no topo da encosta, localizado nas coordenadas E = 198787,29m e N = 8933174,49m (SIRGAS2000, UTM 25S), conforme apresenta a Figura 78, apresentando ainda uma imagem das amostras coletadas a cada metro através da Figura 79. A sondagem atingiu uma profundidade de 17,40m e este perfil também apresenta camadas com predominância argilosa, com ocorrência de concreções ferruginosas e seixos, destacando a não ocorrência de nível de água até a profundidade estudada.

Figura 78 - Boletim de Sondagem da Encosta do Mutange



Fonte: A autora (2022).

Figura 79 - Amostras coletadas a cada metro para a sondagem da Encosta do Mutange.



Fonte: A autora (2022).

4.2.3 Amostragem indeformadas

A campanha de investigação geotécnica de campo contou com a extração de amostras indeformadas, sendo consideradas apropriadas para se obter parâmetros de solo confinado, embora ao se extrair a amostra, haja um alívio das tensões aplicadas naturalmente na qual a amostra se encontrava submetida.

Os procedimentos para a realização da coleta deste tipo de amostra são normatizados pela NBR 9604 - Abertura de Poços e Trincheiras de Inspeção de Solos com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas (ABNT, 2016).

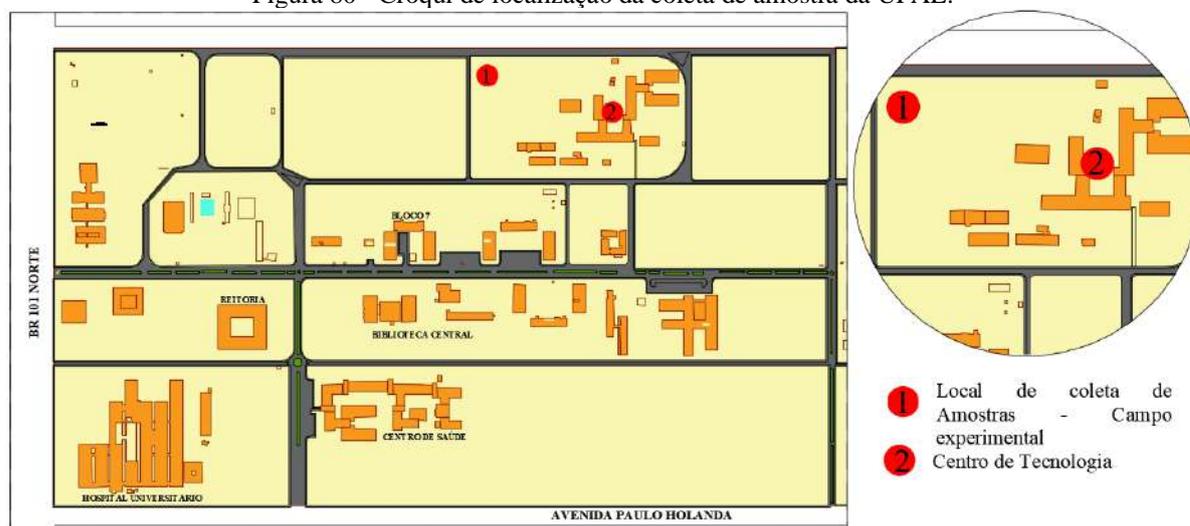
As amostras indeformadas requerem um esforço maior em sua coleta, em virtude dos procedimentos manuais necessários e dos cuidados eminentes para o não amolgamento durante a coleta e transporte. Dessa forma, todas as amostras tipo blocos coletados, foram retiradas manualmente, com escavação até a cota desejada, seguida de talhamento e moldagem até atingirem a forma cúbica.

Após talhada, as amostras foram envolvidas com tecido, sendo pincelada por parafina até criar uma camada rígida, este procedimento foi repetido por duas vezes para minimizar a perda de umidade no bloco. Após a parafinagem, as amostras indeformadas foram envolvidas com plástico filme e papel alumínio. A retirada da amostra foi realizada seccionando a base do bloco com a utilização de talhadeira e cabo de aço, acondicionados em seguida em caixas de madeira. Seus espaços laterais preenchidos com serragem umedecida, de forma a evitar perda excessiva de umidade e minimizando os possíveis atritos do solo durante o transporte, uma vez que todos os ensaios foram realizados no laboratório de Solos da UFPE. Após o transporte, os blocos foram armazenados na câmara úmida de Solos e Instrumentação da UFPE.

No instante da coleta das amostras deformadas, foram coletados também sacos de aproximadamente 10kg contendo amostras de solo deformadas. O material foi coletado em sacos de náilon e possibilitaram a realização dos ensaios de caracterização.

As primeiras amostras coletadas foram no Campo Experimental de Geotecnia (CEG/UFAL), localizado no Campus A.C. Simões, na Universidade Federal de Alagoas, localizada na BR104 Norte, no bairro Cidade Universitária, no mês de outubro de 2018. A Figura 80 apresenta com maior detalhe a localização do local de coleta das amostras.

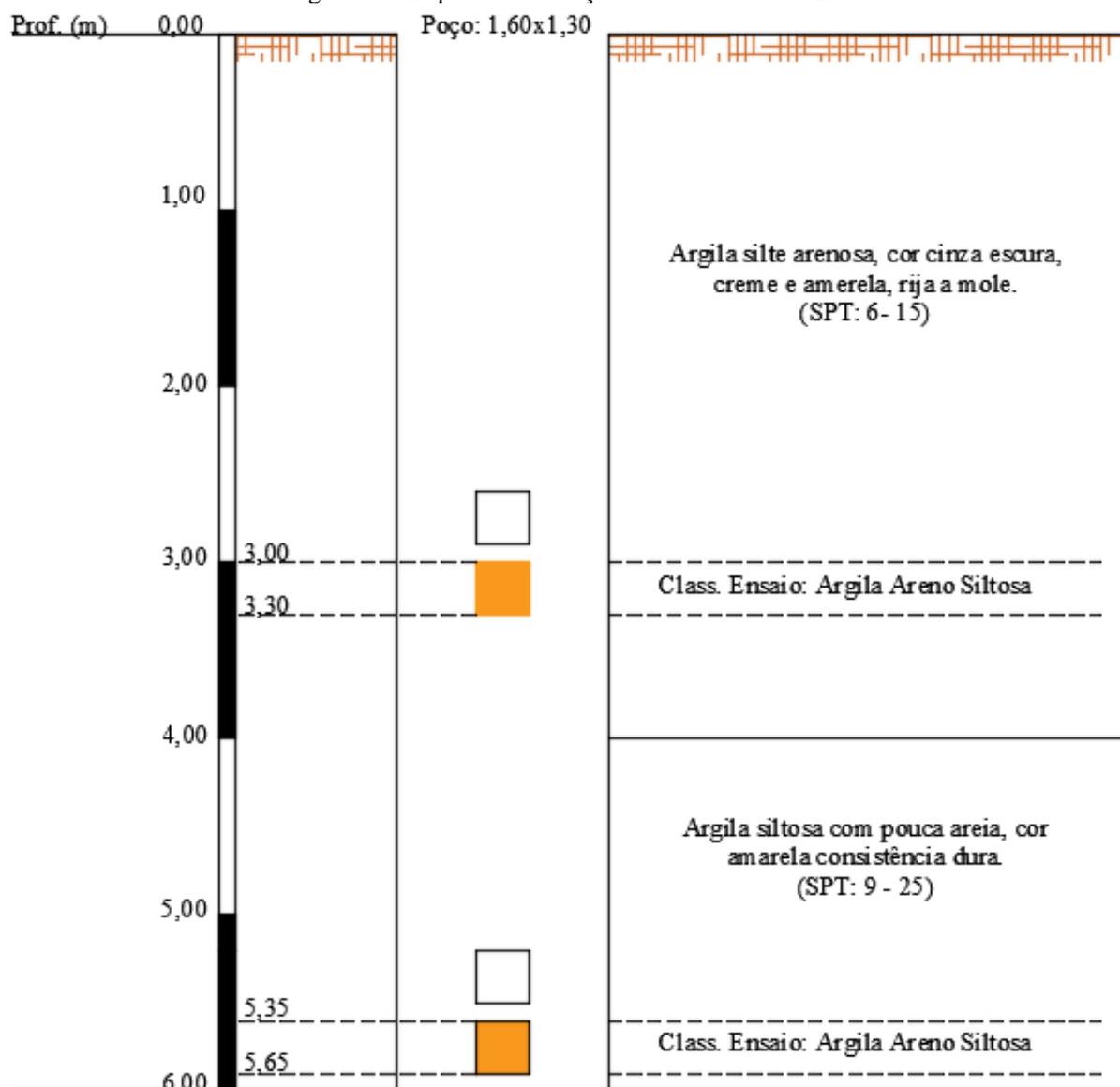
Figura 80 - Croqui de localização da coleta de amostra da UFAL.



Fonte: A autora (2022).

Para esta coleta, foi escavado um poço de inspeção ultrapassando duas camadas conforme perfil de sondagem, com uma profundidade de 6,00m e dimensões de 1,60m x 1,30m. A Figura 81 apresenta um esquema do poço de inspeção e da localização dos blocos coletados.

Figura 81 - Esquema da extração de amostras - UFAL.



Fonte: A autora (2022).

As amostras foram coletadas a uma profundidade de 3,00m – 3,30m na primeira camada e de 5,35m – 5,65m na segunda camada. As amostras coletadas foram cúbicas e possuíam aproximadamente 0,30m de arestas, estas foram armazenadas no Campus da UFAL até o transporte. A amostra da primeira camada foi caracterizada como argila silto-arenosa, possuindo coloração amarelada compacta e sem evidência de raízes. A amostra da segunda camada era uma argila siltosa, de coloração amarela com presença de concreções lateríticas.

A Figura 82 apresenta (a) o “serrilho” utilizado para a remoção do material escavado e para içar a amostra após a coleta e (b) o primeiro bloco sendo coletado.

Figura 82 - Procedimento de coleta de amostras indeformadas no campus da UFAL.



Fonte: A autora (2022).

A segunda coletada de amostras indeformadas ocorreu em uma escavação para execução de obra de fundação da extensão do Hospital do Coração em Maceió. A Obra fica localizada na rua Aryosvaldo Pereira Cintra no bairro Gruta de Lourdes e possuiu escavação até a cota de 10,00m (Figura 83).

Figura 83 - Croqui de localização da coleta de amostra do Hospital do Coração.



Fonte: A autora (2022).

Essa região se torna importante por apresentar crescente verticalização sob sedimentos de Formação Barreiras, identificada com maior potencial iniciando a partir do ano de 2007. A coleta de amostra indeformada se deu a uma profundidade de 3,00m. Para fins de acompanhamento, foi realizado um vôo com Aeronave remotamente Pilotada (Figura 84) da área em questão.

Figura 84 - Localização da coleta da amostra do Hospital do Coração



Fonte: A autora (2022).

A Amostra foi coletada apenas na primeira camada, na profundidade inicial de 1,50m, no mês de março de 2019, caracterizada como areia silte argilosa, de coloração amarela, homogênea e sem sinais de raízes. Todos os cuidados foram tomados para que as máquinas que trabalhavam na obra paralisassem suas atividades na área de extração do bloco. A Figura 85 apresenta fotos da escavação e coleta.

Figura 85 - Localização da coleta da amostra do hospital do Coração.



Fonte: A autora (2022).

A amostra do hospital do coração foi coletada em um único bloco, com as dimensões de 50x50cm, sendo esta única em quantidade suficiente para os ensaios, porém, exigiu um esforço considerável para o transporte, sendo necessária a utilização de um guincho para

remoção, como apresentado na Figura 86 (a) e de um transpalete manual com capacidade de 3.000kg (Figura 86b).

Figura 86 - Transporte e armazenamento da amostra.



Fonte: A autora (2022).

A terceira coleta deu-se na Grota da Moenda, no mês de março de 2019, em uma encosta localizada no bairro Pitanguiha. A Grota da Moenda possui escarpas com aproximadamente 40m de altura, com perfil transversal em “V”, cortado pelo Riacho do Reginaldo. Os blocos indeformados coletadas estão localizadas na escarpa menos ocupada, com inclinação de aproximadamente 58°. A Figura 87 apresenta um croqui de localização da Grota da Moenda, aproximando a encosta estudada.

Figura 87 - Croqui de Localização do Local de Coleta das amostras – Grota da Moenda.



Fonte: A autora (2022).

Para essa encosta, foram coletadas três amostras em pares, no topo, meio e base respectivamente. A amostra coletada na base foi caracterizada como argila areno-siltosa extremamente dura, de coloração avermelhada a ferrugem, possuindo concreções lateríticas e nódulos de argila amarelada em seu perfil. A amostra coletada no meio da encosta foi caracterizada como uma argila arenosa amarela, com a presença de poucas raízes e camada orgânica espessa. A amostra coletada no topo da encosta, possuía raízes de coqueiro e aspecto poroso, caracterizada como argila silte-arenosa. Antes da retirada dos blocos indeformados, foi realizada escavação entre 1,5m e 2,00m de forma a retirar a camada superficial mais orgânica e somente a esta profundidade iniciado o processo de talhamento. A Figura 88 apresenta a extração das amostras no topo (a), meio (b) e base (c) da encosta.

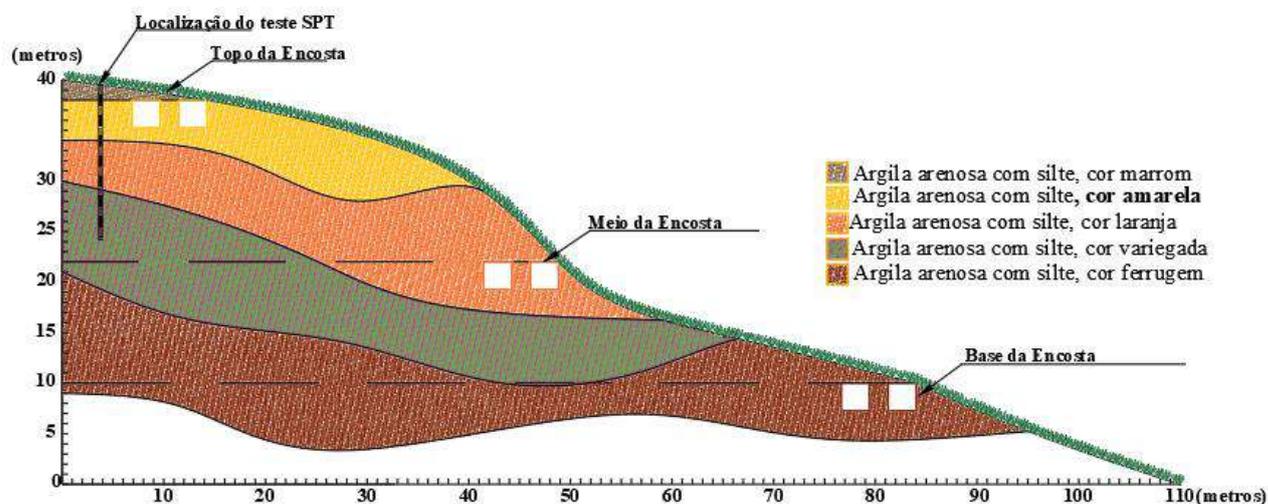
Figura 88 - Coleta de amostra na Grota da Moenda.



Fonte: A autora (2022).

De forma a ilustrar melhor o perfil da encosta e a localização da coleta de amostras, é apresentada a Figura 89.

Figura 89 - Esquema de extração das amostras da Grota da Moenda.



Fonte: A autora (2022).

A última campanha de coleta de amostras deu-se no mês de setembro de 2019 com acesso através da Rua do Arame no bairro do Pinheiro, iniciando pelo topo da encosta, com o fim da quadra chuvosa, no bairro do Mutange. O local de coleta foi escolhido juntamente com a equipe de Defesa Civil Municipal em área identificada com ocorrência de subsidência de solo. Esta encosta apresenta-se próxima à Laguna Mundaú, sendo identificadas fissuras expressivas nas residências próximas à encosta e possíveis planos de fraqueza que cruzam a escarpa até a Laguna. A Figura 90 apresenta um croqui de localização dos locais amostrados.

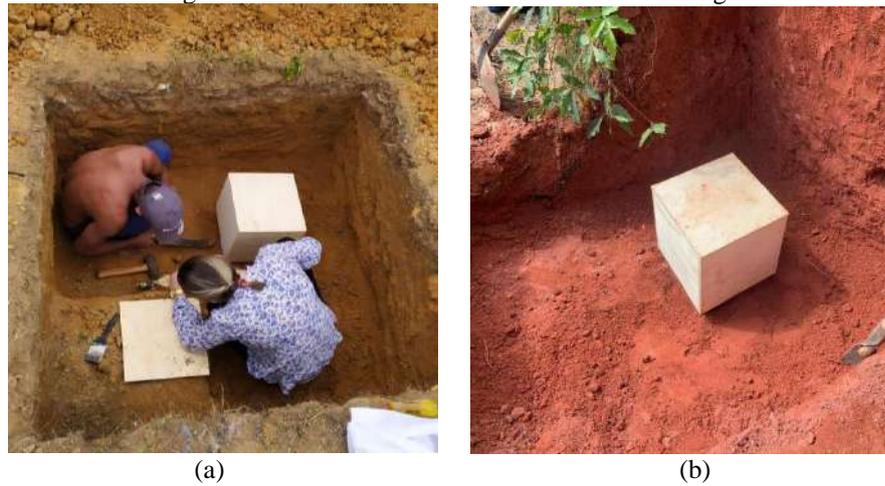
Figura 90 - Croqui de Localização do Local de Coleta das amostras – Encosta do Mutange



Fonte: A autora (2022).

Foram extraídas 02 amostras em pares no topo e no meio da encosta, não sendo possível a coleta na base, em virtude da identificação de movimento de massa ocorrido em períodos anteriores em toda a extensão da costa. A área apresentava densidade de ocupação significativa, o que dificultou a localização de pontos favoráveis a coleta. A Figura 91 apresenta a extração das amostras no topo (a) e meio (b) da encosta.

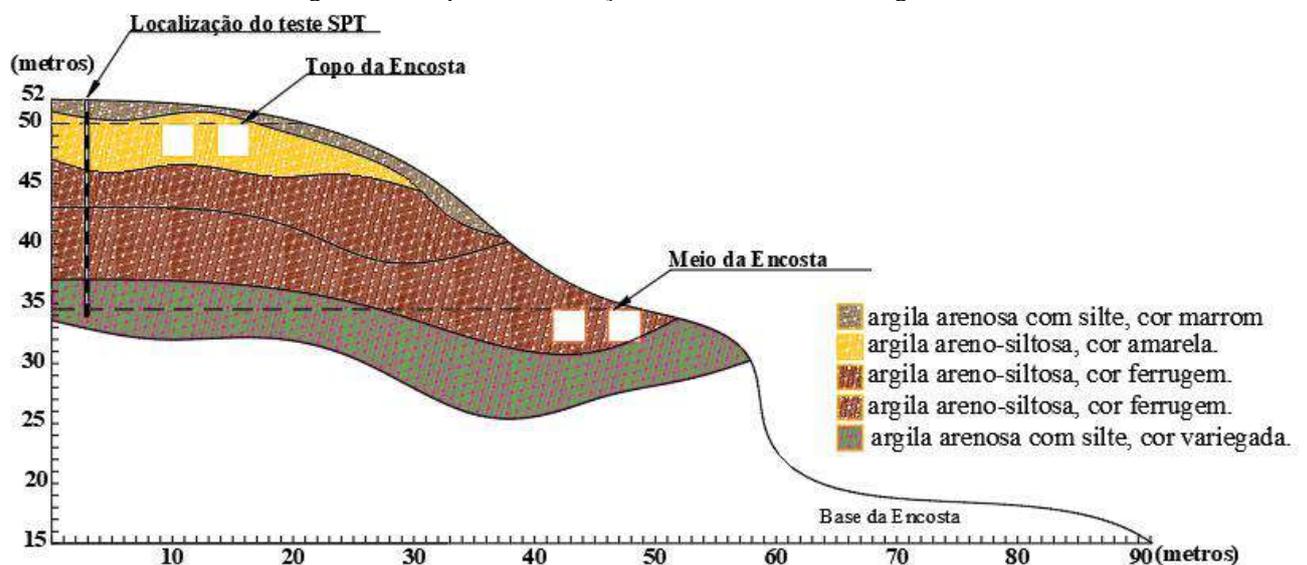
Figura 91 - Coleta de amostra na Encosta do Mutange.



Fonte: A autora (2022).

A amostra do topo da encosta (a) tem coloração amarelada, enquanto a do meio da encosta (b) possui coloração avermelhada, notadamente houve uma mudança nas camadas. O meio da encosta apresentou muitas concreções ferruginosas e nódulos de argila, além da presença de seixos. A Figura 92 apresenta um esquema do perfil da encosta e da localização das amostras coletadas.

Figura 92 - Esquema de extração das amostras do Mutange.



Fonte: A autora (2022).

4.3 CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO DE LABORATÓRIO

Neste item serão abordadas as metodologias utilizadas para execução da campanha de investigação de laboratório, no que diz respeito aos ensaios de caracterização física e mecânica propostos nesta pesquisa. Além das metodologias, serão apresentados ainda resultados individualizados para cada local investigado.

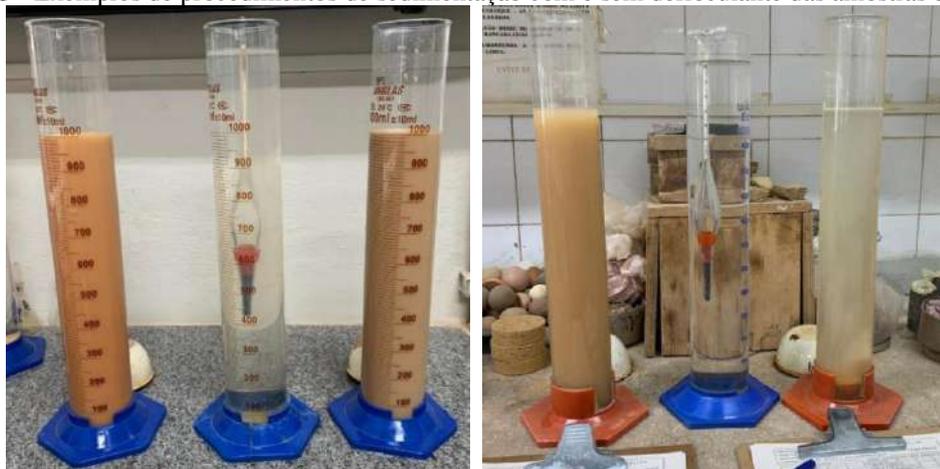
4.3.1 Ensaios de Caracterização física

A caracterização física dos solos foi realizada a partir das amostras deformadas coletadas nos locais investigados, considerando a análise granulométrica através do procedimento de sedimentação, com a adição de defloculante (hexametáfosfato de sódio) e sem a adição defloculante, seu posterior peneiramento, geração da curva granulométrica, execução dos limites de liquidez e limites de plasticidade para a determinação do índice de plasticidade, classificação dos solos segundo o sistema de classificação unificado (USCS) e a determinação da massa específica dos grãos.

A realização da sedimentação com defloculante tem como objetivo a desagregação das partículas de argila e silte possibilitando uma melhor análise das frações finas do solo. Já o ensaio sem defloculante, permite uma análise do comportamento do solo retratando uma situação real de campo. A granulometria dos solos analisados foi obtida utilizando como referência a metodologia normatizada através da NBR 7181/2018: Solo - Análise granulométrica e da NBR 6457/2016: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Após o procedimento de sedimentação (Figura 93), todas as amostras foram lavadas e colocadas em estufa por 24h, após esse período, foi realizado o peneiramento e pesagem do material retido.

Figura 93 - Exemplos de procedimentos de sedimentação com e sem defloculante das amostras estudadas.

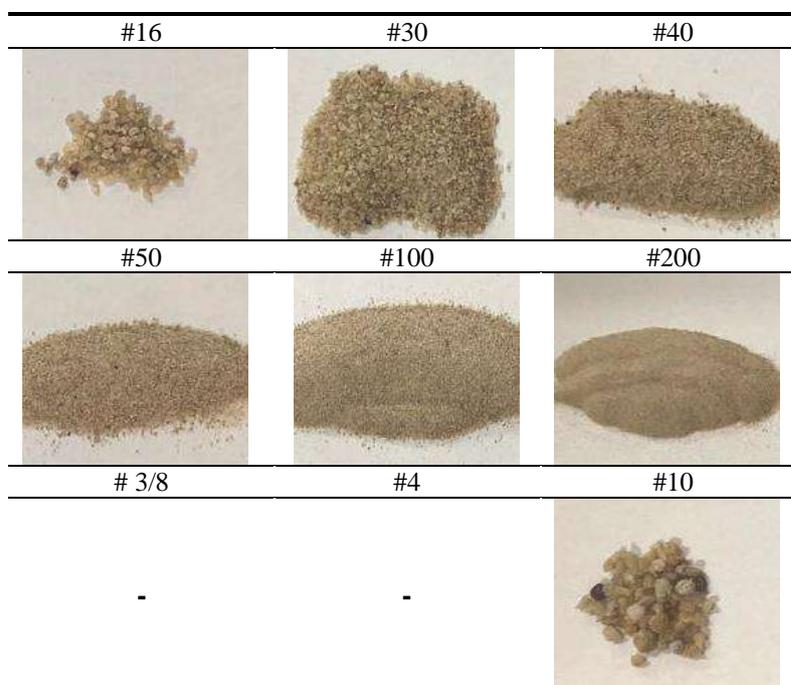


Fonte: A autora (2022).

A Figura 94 apresenta o material retido no peneiramento realizado com defloculante e a Figura 95 do peneiramento realizado no material sem adição defloculante, como exemplo das amostras estudadas, as Figuras correspondem a amostra da UFAL na profundidade de 3,00m.

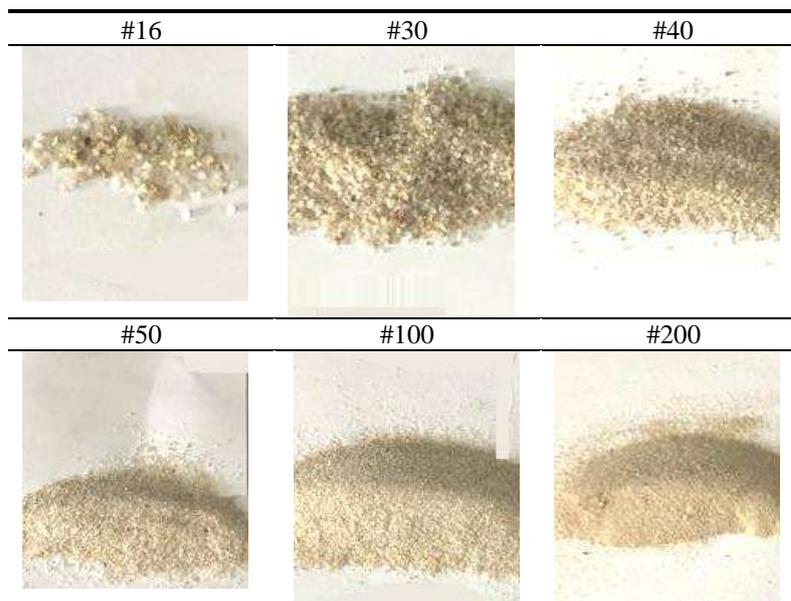
Figura 94 - Exemplo de procedimento de peneiramento sem defloculante.

Amostra UFAL – 3,00m



Fonte: A autora (2022).

Figura 95 - Exemplo de procedimento de peneiramento com defloculante
Amostra UFAL – 3,00m



Fonte: A autora (2022).

A determinação da massa específica seguiu as orientações da NBR6458/2017: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica. Para a determinação do limite de liquidez, foi utilizada a metodologia normatizada através da NBR 6459/2017: Solo - Determinação do limite de liquidez. Neste ensaio o solo é misturado com água até formar uma pasta consistente (Figura 96a), em seguida é colocado no aparelho de Casagrande e aberta uma fenda com o cinzel (Figura 96b), onde são aplicados golpes até a fenda se fechar (Figura 96c), e por fim, uma parte da amostra é coletada para a obtenção da umidade do material (Figura 96d).

Figura 96- Procedimento do ensaio de Limite de Liquidez.



Fonte: A autora (2022).

O ensaio de limite de plasticidade foi realizado seguindo os procedimentos da NBR 7180/2016 : Solo - Determinação do limite de plasticidade. Neste ensaio, o solo forma uma

pasta (Figura 97a), onde são realizadas 5 repetições e coletadas cinco amostras de acordo com o gabarito de aproximadamente 10cm de comprimento e 3mm de diâmetro (Figura 97b).

Figura 97 - Procedimento do ensaio de Limite de Plasticidade.

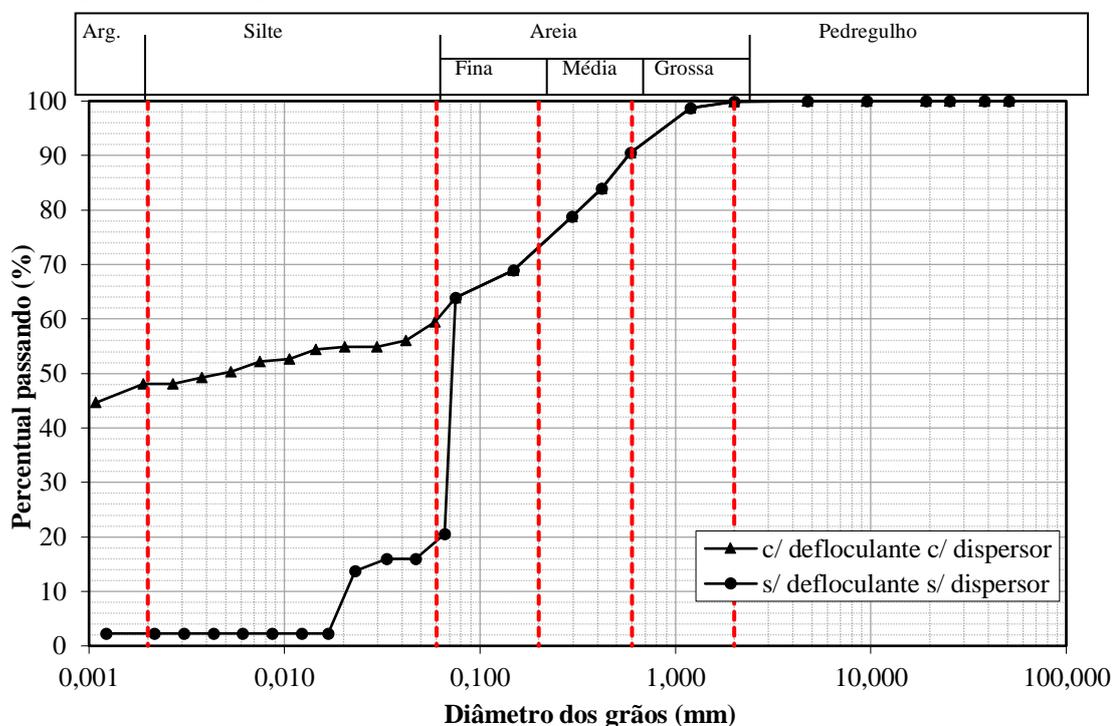


Fonte: A autora (2022).

4.3.1.1 Resultados da análise granulométrica e índices de consistência para as amostras da UFAL.

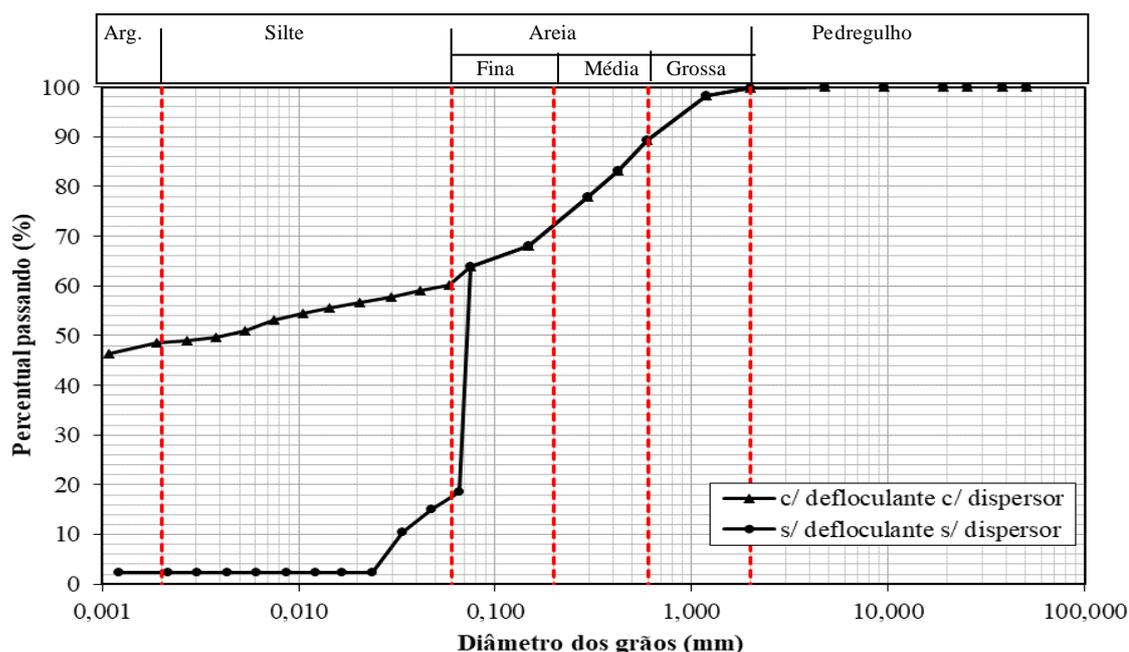
As Figuras 98 e 99 apresentam as curvas granulométricas das amostras da UFAL.

Figura 98 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) - amostra da UFAL – Prof. 3,00m



Fonte: A autora (2022).

Figura 99 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) - amostra da UFAL – Prof. 5,35m.



Fonte: A autora (2022).

Na análise com adição de defloculante, foi observado que as duas amostras possuem predominância de solos finos (passando na peneira #200 (0,075mm)), que para a profundidade de 3,00m foi de 62% e para a profundidade de 5,35m foi de 63%.

As duas camadas possuem plasticidade média, com a camada inferior (prof. 5,35m) apresentando um IP de 17%, e na camada superior (prof. 3,00m) o IP foi de 14%. Ambos os solos foram classificados de acordo com a classificação unificada (USCS) como argilas de baixa compressibilidade (CL).

Observa-se ainda que a composição granulométrica apresenta maior percentual de argila, tanto para a profundidade de 3,00m (48%) como para a profundidade de 5,35m (49%). A Tabela 49 apresenta uma síntese dos resultados encontrados na caracterização física com defloculante.

Tabela 18 - Síntese do ensaio de granulometria e índices de consistência para as amostras da UFAL.

Local	Composição Granulométrica (%) ABNT						Limite de Atterberg (%)			G _s	USCS
	Argila	Silte	Areia			Pedr.	LL	LP	IP		
			Fina	Média	Grossa						
UFAL -Prof. 3,00m	48,23	11,40	13,52	17,52	9,33	0,00	42,40	28,32	14,00	2,584	CL
UFAL – Prof. 5,35m	49,59	11,53	12,87	16,78	10,22	0,00	45,75	28,40	17,00	2,677	CL

Nota: LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade, GS = peso específico; CL= argila de baixa compressibilidade;

Fonte: A autora (2022).

Para os ensaios realizados sem a adição de defloculante, observou-se uma predominância de areia fina, com aproximadamente 52% na profundidade de 3,00m e 54% na

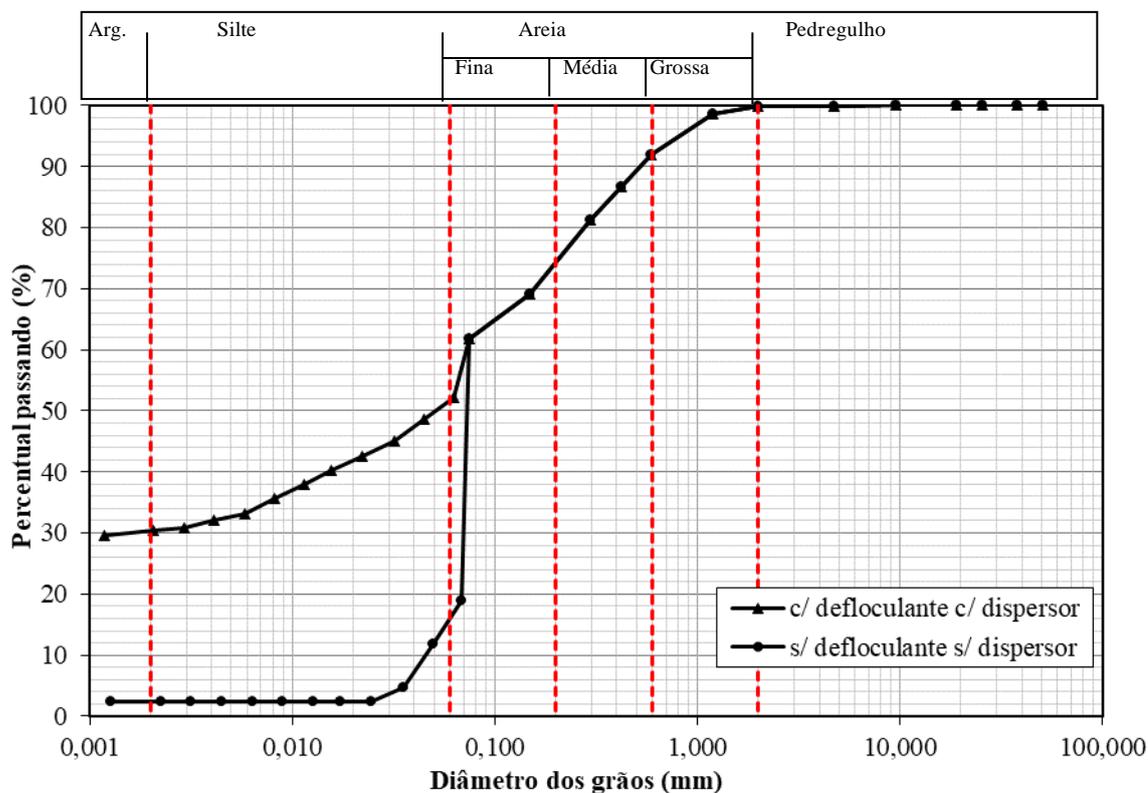
profundidade de 5,35m. Os altos percentuais de areia fina associada a diminuição dos percentuais de argila indicam que existem partículas de argila agregadas em seu estado natural.

4.3.1.2 Resultados da análise granulométrica e índices de consistência para as amostras do HCOR.

A Figura 100 apresenta a curva granulométrica da amostra do hospital do Coração, coletada a uma profundidade de 1,50m. Essa amostra foi classificada como Argila de baixa compressibilidade (CL) de acordo com a classificação unificada (USCS), possuindo 62% de solos finos passando pela peneira #200.

A sedimentação sem a adição de defloculante mostrou que a amostra analisada possui 48% de areia fina e 18% de areia média, fração predominante na amostra. Esses percentuais tendem a cair consideravelmente no ensaio com a adição de defloculante, o que caracteriza partículas agregadas de argila.

Figura 100 - Curva granulométrica Hospital (com e sem defloculante) da amostra do Coração – 1,50m



Fonte: A autora (2022).

No ensaio realizado com a adição de defloculante, foi observado uma predominância de argila (30,84%) e silte (30,91) praticamente equivalentes. O solo é considerado de plasticidade

média, com IP de 11,47. A Tabela 19 apresenta uma síntese dos resultados encontrados no ensaio de caracterização física executados com a adição de defloculante da amostra de solo do Hospital do Coração – HCOR.

Tabela 19 - Síntese do ensaio de granulometria e índices de consistência para o Hospital do Coração.

Local	Composição Granulométrica (%) ABNT						Limite de Atterberg (%)			UUSCS
	Argila	Silte	Areia			Pedr.	G _s			
			Fina	Média	Grossa		LL	LP	IP	
HCOR-										
Prof.							37,28	25,81	11,47	2,613
1,50	30,84	30,91	12,25	18,00	8,00	0,00				CL

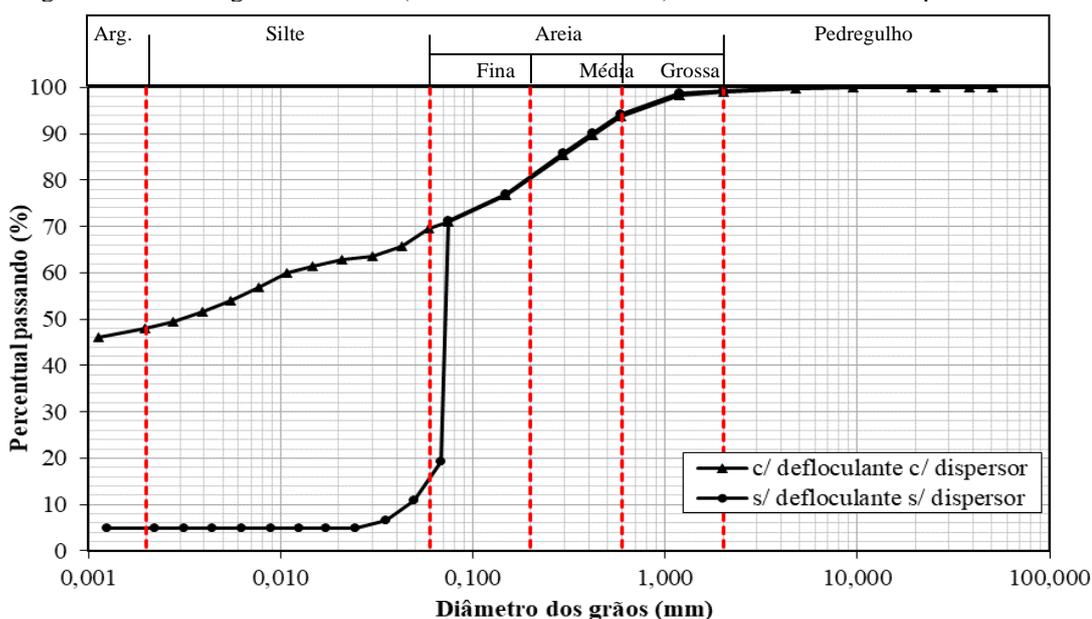
Nota: LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade, GS = peso específico; CL= argila de baixa compressibilidade;

Fonte: A autora (2022).

4.3.1.3 Resultados da análise granulométrica e índices de consistência para as amostras da Grota da Moenda.

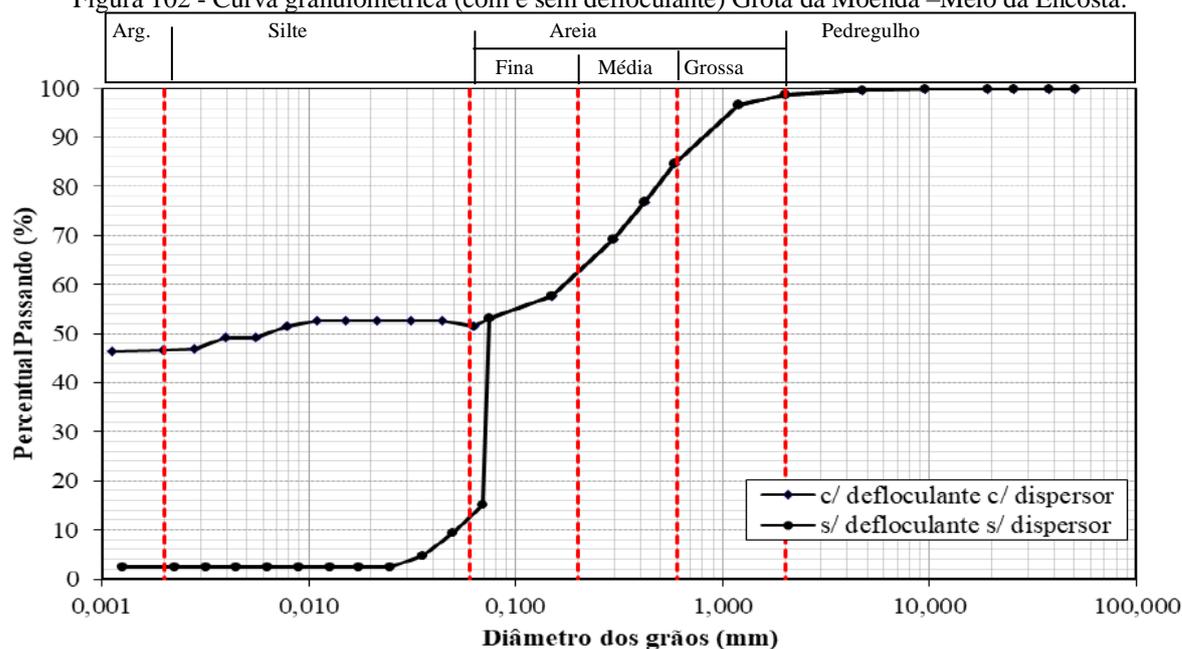
As curvas granulométricas com e sem a adição de defloculante, para o topo, meio e base da encosta localizada na Grota da Moenda, estão apresentadas através das Figuras 101, 102 e 103 respectivamente.

Figura 101 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) Grota da Moenda – Topo da Encosta



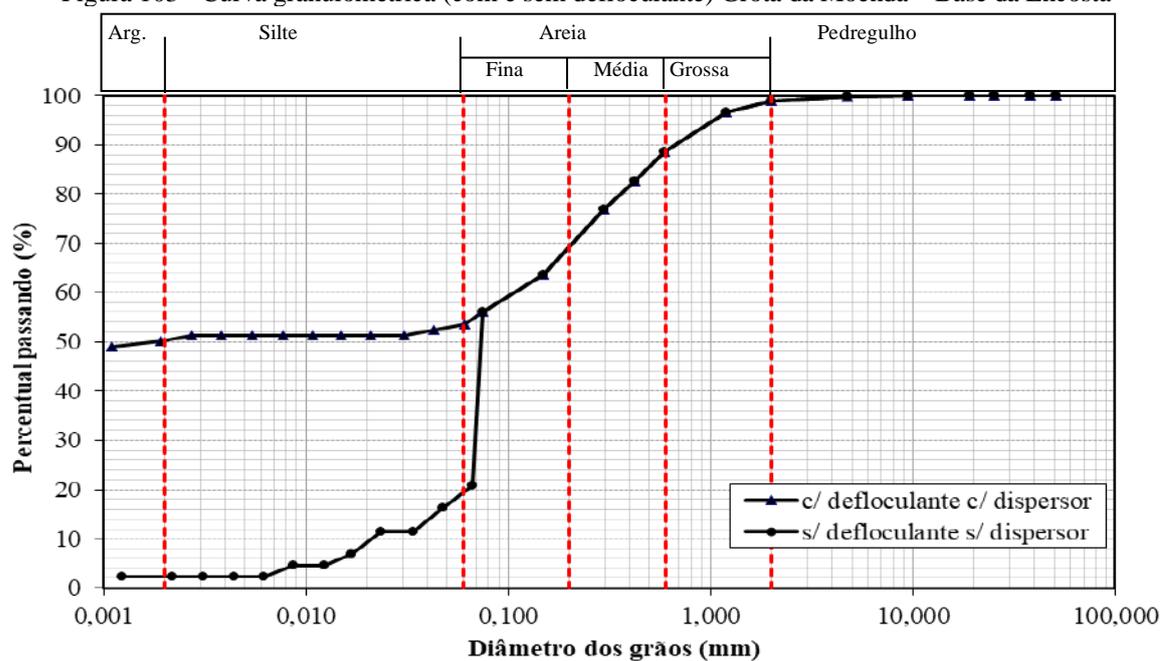
Fonte: A autora (2022).

Figura 102 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) Grota da Moenda –Meio da Encosta.



Fonte: A autora (2022).

Figura 103 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) Grota da Moenda – Base da Encosta



Fonte: A autora (2022).

O ensaio realizado sem a adição de defloculante mostrou maior percentual de areia fina e percentuais menos significativos de finos (silte e argila), com 62% de areia fina, 11,2% de silte e 7,81% de argila para o topo da encosta, no meio da encosta foi encontrado 47,3% de areia fina, 18,5% de silte e 2,3% argila, enquanto para a base da encosta foram encontrados 52% de areia fina, 8,7% silte e 2,3% a argila. A base e o meio da encosta foram classificados como argilas de baixa compressibilidade (CL) e o topo como Silte de baixa compressibilidade,

com índice de plasticidade 18% para a base e o meio da encosta, de plasticidade média, e 7% para o topo da encosta, sugerindo uma baixa plasticidade, A Tabela 20 apresenta os valores obtidos no ensaio de granulometria com defloculante das amostras da Grota da Moenda.

Tabela 20 - Síntese do ensaio de granulometria e índices de consistência para a Grota da Moenda.

Local	Composição Granulométrica (%) ABNT						Limite de Atterberg (%)			G _s	USCS
	Argila	Silte	Areia			Pedr.	LL	LP	IP		
			Fina	Média	Grossa						
Topo da Encosta	48,0	21,5	11,5	12,82	5,17	1,0	35	28	7	2,628	ML
Meio da Encosta	46,5	5,0	11,5	21,00	14,10	1,0	40	22	18	2,617	CL
Base da Encosta	49,0	4,0	14,5	19,65	10,59	2,0	42	24	18	2,674	CL

Nota: LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade, GS = peso específico; CL= argila de baixa compressibilidade; ML = Silte de baixa compressibilidade.

Fonte: A autora (2022).

4.3.1.4 Resultados da análise granulométrica e índices de consistência para as amostras da Encosta do Mutange

As Figuras 104 e 105 apresentam as curvas granulométricas das amostras na Encosta do Mutange.

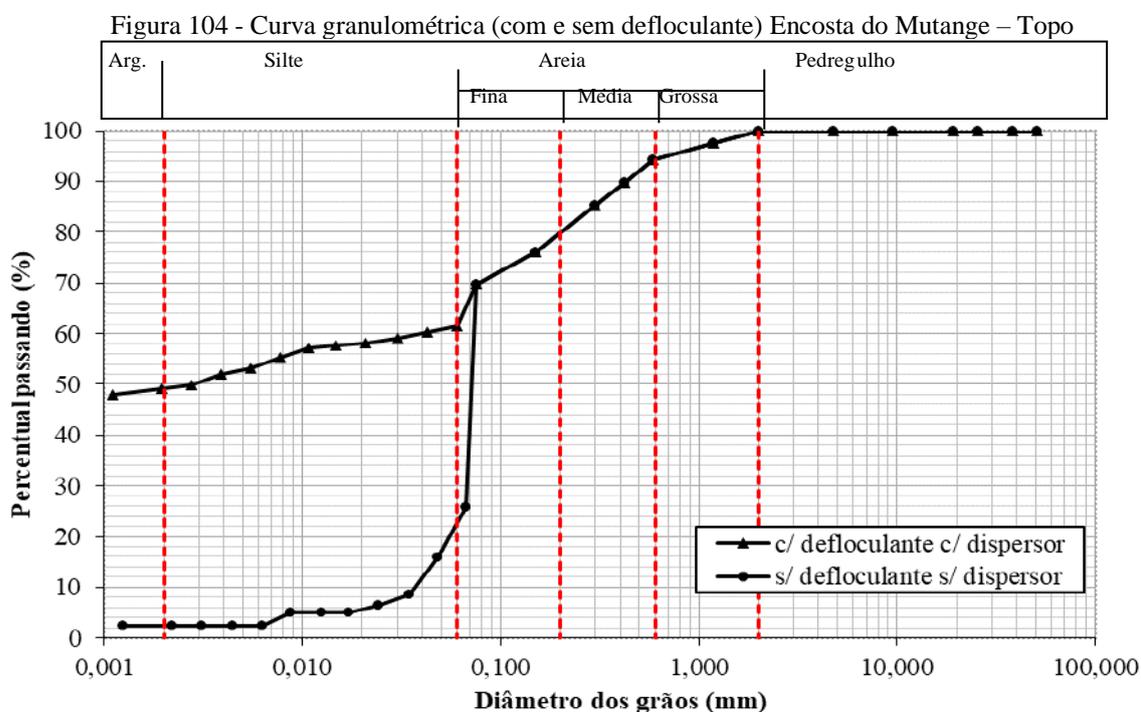
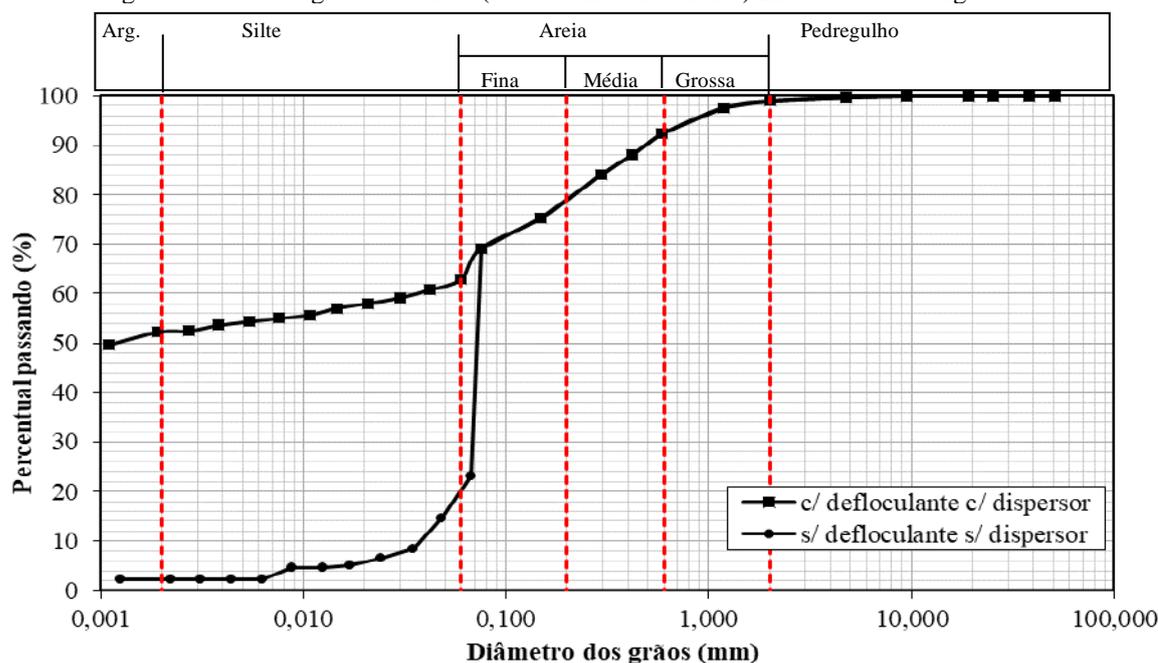


Figura 105 - Curva granulométrica (com e sem defloculante) Encosta do Mutange – Meio.



Fonte: A autora (2022).

A composição granulométrica das duas amostras de solo da encosta do Mutange apresentou valores muito próximos. No ensaio com adição de defloculante, onde há desagregação das partículas, a granulometria foi predominantemente fina (Argila + Silte passando pela peneira #200 – 0,075mm), com 68% para o meio da encosta e 66% para o topo da encosta. O maior percentual observado foi de argila, como pode ser observado na Tabela 21.

Tabela 21 - Síntese do ensaio de granulometria e índices de consistência para a encosta do Mutange.

Local	Composição Granulométrica (%) ABNT					Limite de Atterberg (%)			G _s	USCS	
	Argila	Silte	Areia			LL	LP	IP			
			Fina	Média	Grossa	Pedr.					
Topo da Encosta	49,77	11,79	18,44	14,32	5,68	0,00	36,82	9,52	9,52	2,663	ML
Meio da Encosta	52,00	11,00	16,00	13,23	6,77	1,00	37,11	10,59	10,59	2,660	CL

Nota: LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade, G_s = peso específico; CL= argila de baixa compressibilidade.

Fonte: A autora (2022).

Os solos apresentam plasticidade média, com IP 9,52 (para o topo da encosta) e 10,59 (para o meio da encosta), classificados como siltes e argilas de baixa compressibilidade estando no limite entre silte e argila de baixa compressibilidade.

No ensaio sem a adição de defloculante, os percentuais de argila foram de 2% para ambas as amostras, com predominância granulométrica das areias finas, com 58% para o topo da encosta e 59% para o meio da encosta. Essa diferença significativa dos percentuais de areia e argila indicam partículas agregadas, relacionadas a propriedades cimentantes dos óxidos de ferro e alumínio que acarretam estruturas macroagregadas.

4.3.2 Ensaio de Permeabilidade (Tri-flex)

A permeabilidade dos solos estudados nesta pesquisa, foram determinadas através do aparelho Tri-Flex 2 da ELE *Internationa Inc. Soiltest Products Division*. O equipamento tem a capacidade de fazer até três ensaios simultaneamente, simulando em diferentes pressões (confinante, topo e base).

O Ensaio foi realizado baseando-se na norma D5084-03 (ASTM, 2003) e em metodologias empregadas em pesquisas científicas, tais como Silva (2003), Meira (2008), Santana (2006). A moldagem dos corpos de prova foi realizada a partir de cravação estática em amostras indeformadas, cilíndricas de diâmetro em torno de 10 cm, e altura de 12cm. De acordo com Silva (2003), para a realização do ensaio o corpo de prova deve estar saturado, podendo ser realizada a reutilização do corpo de prova para outros ensaios, tais como o ensaio Edométricos na condição inundada, Pinhole com a amostra saturada ou determinação da curva característica através das moldagens dos anéis. A Figura 106 apresenta duas imagens do procedimento de cravação e moldagem do corpo de prova.

Figura 106 - Moldagem do corpo de prova para ensaio de Permeabilidade Tri-Flex.

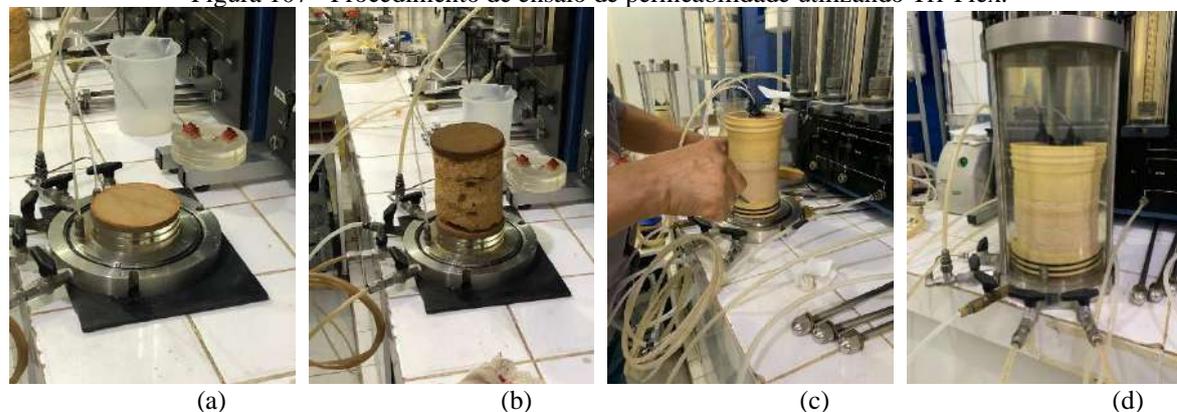


Fonte: A autora (2022).

Na execução do ensaio, o procedimento iniciou com a desmoldagem do corpo de prova. Um conjunto de pedras porosas e papel filtro foram colocados em contato com o solo, encamisase o corpo de prova com uma membrana de borracha e o inserindo dentro da célula de acrílico, que foi conectada ao aparelho através das tubulações de água. A válvula lateral é aberta, permitindo a entrada de água até encher a célula, retirando as bolhas de ar que porventura venham a existir. A Figura 107 apresenta (a) pedra porosa na base, (b) corpo de prova com

pedra porosa na base e no topo, (c) encamisamento com membrana de borracha e (d) célula preenchida com água.

Figura 107 - Procedimento de ensaio de permeabilidade utilizando Tri-Flex.



Fonte: A autora (2022).

A tensão confinante aplicada foi de 120kPa, com gradiente de 10kPa para todas as amostras. A cada 24h foi verificada a saturação utilizando o método de percolação de água no corpo de prova, ou seja, o volume de água que entra pela base era o mesmo que saia pelo topo.

Após a saturação, fecharam-se as válvulas de inserção de pressão da base e do topo da célula e determinou-se um gradiente de 10kPa, considerando um volume percolado (VP) de 5cm³ de água por amostra. É cronometrado o tempo que a água leva para percolar na amostra, repetindo-se o procedimento por três leituras do tempo coincidentes com variação de ±5%. O coeficiente de permeabilidade foi calculado através da equação 6:

$$k = \frac{V.L}{A.T.P} \quad (6)$$

Em que:

k é o coeficiente de permeabilidade medido em cm/seg

V é o volume percolado (5 cm³)

L é a altura da amostra (cm)

A é a área do corpo de prova (cm²)

T é o tempo médio para percolação do volume (s)

P é o gradiente psi x 70,37 cm/psi (cm – H₂O)

4.3.2.1 Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade Tri-Flex

A realização do ensaio de permeabilidade Tri-Flex forneceu parâmetros que permitiram a determinação do coeficiente de permeabilidade para os solos dos locais investigados. Esses estudos são considerados fundamentais para a caracterização geotécnica dos solos na área de

estudo, destacando a importância da influência da infiltração principalmente na estabilidade de taludes, uma vez que são considerados estudos em duas encostas da cidade de Maceió. A Tabela 22 apresenta os parâmetros obtidos durante a realização do ensaio de permeabilidade Tri-Flex.

Tabela 22 - Parâmetros obtidos para o ensaio de Permeabilidade Tri-Flex.

Amostras	Altura da Amostra	Volume percolado	Área da amostra	Tempo de percolação	Gradiente	Tensão Confinante
	L (cm)	V (cm ³)	A (cm ²)	T (s)	P (kPa)	kPa
UFAL- Prof. 3,00m	12,00	5	76,97	12	100	120
UFAL - Prof. 5,35m	12,01	5	75,42	15	100	120
HCOR- Prof.1,50m	12,10	5	78,53	33	100	120
Moenda - Topo da Encosta	11,90	5	75,42	9	100	120
Moenda - Meio da Encosta	12,00	5	75,42	12	100	120
Moenda - Base da Encosta	12,00	5	78,54	12	100	120
Mutange - Topo da Encosta	12,00	5	78,53	16	100	120
Mutange - Meio da Encosta	11,90	5	76,97	30	100	120

Fonte: A autora (2022).

Os valores de permeabilidade obtidos estão apresentados Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados do ensaio de Permeabilidade com Tri-Flex.

Amostras	Permeabilidade (m/s)	Classificação dos Solo
UFAL- Prof. 3,00m	$9,23 \times 10^{-6}$	Argila arenosa
UFAL- Prof. 5,35m	$7,53 \times 10^{-6}$	Argila arenosa
HCOR- Prof. 1,50m	$3,31 \times 10^{-6}$	Argila siltosa com areia
Moenda - Topo da Encosta	$8,62 \times 10^{-6}$	Argila silte-arenosa
Moenda - Meio da Encosta	$2,13 \times 10^{-6}$	Argila arenosa
Moenda - Base da Encosta	$9,23 \times 10^{-7}$	Argila arenosa
Mutange - Topo da Encosta	$6,78 \times 10^{-6}$	Argila arenosa
Mutange - Meio da Encosta	$3,66 \times 10^{-6}$	Argila arenosa

Fonte: A autora (2022).

Dentre as amostras ensaiadas, o solo que apresentou menor permeabilidade foi a base da encosta da Moenda ($9,23 \times 10^{-7}$) e com maior permeabilidade a amostra localizada na UFAL para a profundidade de 3,00m ($9,23 \times 10^{-6}$). Foi observado uma maior permeabilidade nas camadas superiores, que para as encostas estão no sentido do topo para a base. Em uma classificação genérica dos solos em função da condutividade hidráulica, as amostras estudadas

seriam classificadas como siltosas, por possuírem segundo Pinto (2006), k_{sat} (m/s) entre 10^{-6} e 10^{-9} .

4.3.3 Determinação da Curva característica através do ensaio do papel filtro

As medidas de sucção podem ser obtidas diretamente em campo ou em laboratório a partir de diversos métodos, como placa de pressão, psicrômetro e Papel Filtro (MARINHO, 1997), este último que determina a curva característica/curva de retenção do solo representada pela relação entre a umidade e a sucção, é utilizado para fins desta pesquisa, pela simplicidade de execução para medir faixas de sucção entre 10kPa e 100.000kPa (CARVALHO *et al.* 2015).

O ensaio do Papel Filtro consiste em medir a umidade do solo por meio da aferição da umidade retida no papel filtro, baseando-se na capacidade de meios porosos absorverem ou perderem certa quantidade de água quando estão em contato, assim, quando dois materiais são colocados juntos e lacrados em um ambiente hermeticamente fechado, eles trocarão água entre si até chegarem ao equilíbrio, o que ocorre com o solo e o papel filtro, fazendo com que o papel e o solo possuam a mesma sucção, porém com umidades gravimétricas diferentes.

A água que o papel filtro absorve pode ser usada como um indicador da sucção, sendo que, em geral, quanto mais seco o papel filtro na umidade de equilíbrio, maior a sucção do solo, de forma que conhecendo-se a curva de calibração do papel e a umidade gravimétrica é possível a determinação da sucção do solo (SILVA, M.M., 2007).

O ensaio permite medir a sucção matricial através da umidade do papel filtro que é colocado diretamente em contato com o solo, e a sucção total por meio da umidade do papel filtro que não está em contato direto com o solo (geralmente, separado por uma tela ou geogrelha).

Existem várias marcas de papel filtro no mercado, porém, para efeitos dessa pesquisa foi utilizado o papel da marca Whatman n°42. Os procedimentos gerais para a determinação das curvas de retenção são normatizados pela ASTM D 5298 – 10, tendo em vista a ausência de normatização brasileira, descritos aqui brevemente.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada nas amostras indeformadas, com a cravação de anéis biselados, que possuíam 2,5cm de altura e 5cm de diâmetro. Após a

moldagem (entre 8 e 12), os corpos de prova foram pesados e determinada a umidade natural do solo contido em cada anel.

Os corpos de prova foram então submetidos ao processo de saturação inicial através de acessão capilar, utilizando um conjunto de pedra porosa e papel filtro. A Figura 108 apresenta um mosaico dos procedimentos de cravação do anel na amostra indeformada (a), a moldagem final (b), pesagem (c) e saturação (d) dos corpos de prova.

Figura 108 - Passo a passo do procedimento adotado em laboratório.

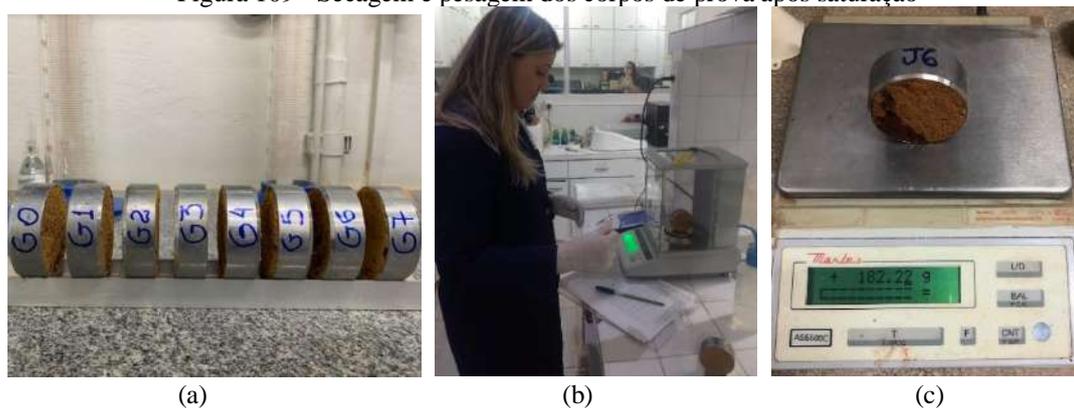


Fonte: A autora (2022).

As amostras permaneceram em processo de saturação que variou entre 8 e 15 dias, mostrando dificuldade em obter a saturação máxima por capilaridade, o que pode ser atribuído a quantidade de finos existente. A pesagem era realizada após 8 dias e verificado o grau de saturação obtido.

Após a saturação, deu-se início ao processo de secagem, em que foram calculados os pesos que cada corpo de prova deveria atingir para cada umidade desejada, decaindo a cada 2% da umidade máxima, até atingirem ou chegarem o mais próximo possível da umidade hidrocópica. Nas umidades desejadas, os corpos de prova eram preparados para a equalização através da aplicação do papel filtro em contato direto com o solo (o que permitiu a determinação da sucção matricial), o fechamento com plástico filme e papel alumínio, acondicionados em uma caixa de isopor por um período de 15 dias. A Figura 109 apresenta o procedimento de secagem (a) e pesagem (b e c) dos corpos de prova após o processo de saturação.

Figura 109 - Secagem e pesagem dos corpos de prova após saturação



Fonte: A autora (2022).

Após o período de equalização, os papéis foram retirados com o auxílio de uma pinça, e rapidamente (por um período máximo de 5s), pesados através de uma balança de precisão (0,0001 g). Tomada nota do peso do papel após o equilíbrio, este era imposto a secagem através de uma estufa a 105°C por um período de 24h. Após esse período, o papel era retirado da estufa e colocado em um dissecador com sílica por um curto período para que não absorvessem umidade do ar, onde era novamente submetido a pesagem. Segundo Jucá; Lins, 1992 a precisão do método do papel filtro é considerada regular e está principalmente associada ao processo utilizado na pesagem do papel, e a faixa de variação de umidade e sucção que se pretende trabalhar.

São consideradas duas observações realizadas durante a execução do ensaio para as amostras desta pesquisa.

- a) Durante o processo de saturação das amostras, foi observado o desprendimento de partículas de solo no papel filtro, em maior quantidade nas amostras mais arenosas. Essa perda foi desprezada por possuírem valores baixos em todas as amostras ensaiadas, não interferindo de maneira significativa nos valores de saturação desejados, porém, devendo se atentar para ensaios realizados em amostras mais arenosas, com a avaliação da perda de solo e de seu impacto nos resultados obtidos.
- b) Durante o processo de equalização das amostras, notou-se uma perda de umidade do solo mesmo com todos os cuidados necessários. Diante disso, os corpos de prova foram pesados novamente para se identificar o grau de saturação das amostras de solo no momento da pesagem do papel filtro (após 15 dias).

A determinação da sucção foi realizada através das equações 7 e 8, propostas por Chandler; Crilley; Montgomery-Smith, (1992) e citada por Marinho, (1994), utilizando a umidade do papel filtro calibrado após equalização e seco em estufa.

$$w_{papel} \leq 47\% \text{ tem - se } S_{kPa} = 10^{4,84-0,0622 w(\%)} \quad (7)$$

$$w_{papel} > 47\% \text{ tem - se } S_{kPa} = 10^{6,05-2,48 w(\%)} \quad (8)$$

Os valores de sucção foram representados através das curvas de retenção sucção (kPa) versus umidade (%), e ajustados através da metodologia proposta por Fredlund; Xing (1994), descrita através das equações 9 e 10.

$$\theta = \theta_{sat} \cdot C(\psi) \cdot \left[\frac{1}{\ln\left(\left(e + \frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right)} \right]^m ; \quad (9)$$

$$C(\psi) = 1 - \left[\frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_{res}}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_{res}}\right)} \right]^m \quad (10)$$

Em que

α , n , m são parâmetros de ajuste;

ψ_{res} é a sucção correspondente a umidade volumétrica residual;

$C(\psi)$ é o fator de correção

10^{-6} é o valor limite de sucção para qualquer tipo de solo segundo Fredlund e Xing (1994)

As curvas foram ajustadas pelo método de Gitirana Jr. e Fredlund (2004), que propuseram uma nova classe de equações para representar tanto curvas unimodais, quanto bimodais, comuns em solos tropicais intemperados, podendo ser utilizado para vários tipos de solo. A equação 11 apresenta o modelo de ajuste proposta pelos autores.

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi \sqrt{\psi_{b1} \cdot \psi_{res1}})^{d1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + (\psi \sqrt{\psi_{res1} \cdot \psi_{b2}})^{d2}} \cdot \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi \sqrt{\psi_{b2} \cdot \psi_{res2}})^{d3}} + S_4 \quad (11)$$

Em que

S é o grau de saturação

ψ é a sucção matricial

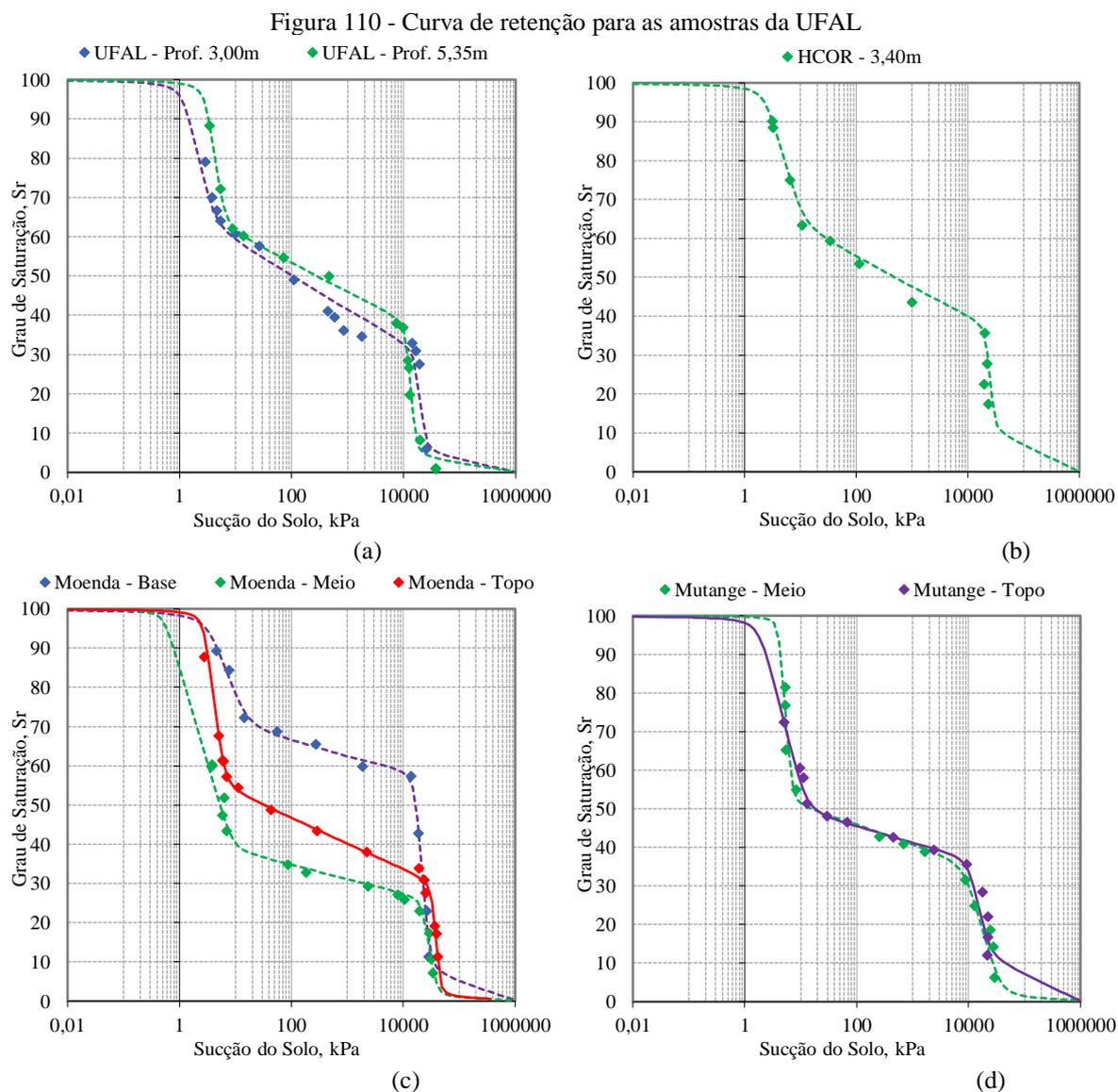
ψ_{res} é a sucção residual e

ψ_b é o valor de entrada de ar.

4.3.3.1 Resultados obtidos no ensaio do papel filtro

A Figura 110 apresenta as curvas de retenção para as amostras da UFAL nas profundidades de 3,00m e 5,35m (a), do Hospital do Coração – HCOR na profundidade de

1,50m (b), das amostras do topo, meio e base da encosta da Grota da Moenda (c) e do topo e meio da encosta do Mutange (d).



Fonte: A autora (2022).

Todas as curvas apresentam similaridade com três trechos distintos, o primeiro onde é observada uma significativa perda de umidade e pouca variação na sucção, onde encontra-se o primeiro ponto de entrada de ar (Ψ_{a1}) no início da dessaturação. O segundo trecho é caracterizado por um patamar, onde há uma menor perda de umidade, mas uma grande variação nos valores de sucção, entre 100kPa e 10000 kPa. O terceiro trecho corresponde ao segundo ponto de entrada de ar (Ψ_{a2}) marcado pelo início da perda de água dos microporos.

As curvas com comportamento bimodal (com dois pontos de entrada de ar) no formato “sela”, indicam presença de micro e macroporos e são consideradas comuns em solos tropicais e subtropicais (FEUERHARMEL *et al.* 2007), ocorrendo em função do intemperismo e acidez,

responsáveis pela agregação das partículas cimentadas por óxido e hidróxido de alumínio e ferro (CAMAPUM DE CARVALHO; LEROUEIL 2004). Estas características também foram encontradas por Coutinho *et al.* (2019) ao analisarem solos tropicais na cidade de Camaragibe, estado de Pernambuco, Brasil.

As curvas foram ajustadas através do método de Gitirana Jr. e Fredlund (2004). Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Parâmetros de ajuste para as curvas características por Gitirana Jr. e Fredlund (2004).

Amostras	ψ_{b1}	ψ_{res1}	S_{res1}	ψ_{b2}	S_b	ψ_{res2}	S_{res2}	a
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
UFAL- Prof. 3,00m	1,19	3,78	0,613	17249,9	0,316	22357	0,050	0,067
UFAL - Prof. 5,35m	3,07	5,72	0,616	11871,9	0,388	14929,2	0,039	0,080
HCOR- Prof.1,50m	2,46	10,10	0,619	22035,8	0,380	27474,8	0,104	0,062
Moenda - Topo da Encosta	2,76	6,06	0,539	34390,3	0,307	42007,1	0,010	0,069
Moenda - Meio da Encosta	0,52	8,60	0,381	21604,3	0,266	39517	0,01	0,036
Moenda - Base da Encosta	3,84	12,22	0,681	16664	0,591	28507	0,07	0,08
Mutange - Topo da Encosta	1,85	11,75	0,480	11000	0,380	21000	0,110	0,060
Mutange - Meio da Encosta	4,00	6,85	0,510	9000	0,370	35000	0,005	0,058

Fonte: A autora (2022).

Para as amostras localizadas na UFAL, os valores de sucção variam pouco nas duas profundidades e o formato das curvas também são semelhantes. O valor de entrada de ar inicial é de 1,19kPa para a profundidade de 3,00m e em torno de 3,00kPa para a profundidade de 5,35m, seguido por um trecho com pouca variação de umidade, com sucção variando entre 10,00kPa e 7.000kPa, seguido pelo último trecho, onde encontra-se o segundo ponto de entrada de ar, que ocorre em 8.000kPa. A umidade residual para a profundidade de 3,00m foi de 1,95% e para a profundidade de 5,35m foi de 2,49%.

Para a amostra do HCOR, o primeiro ponto de entrada de ar está em torno de 3kPa, com um trecho onde a variação de umidade está entre 13% a 15% e a variação de sucção entre 50kPa e 900kPa, com segundo ponto de entrada de ar em 1050kPa, com umidade residual de 5,72%.

Na Grota da Moenda, observa-se para o topo da encosta um valor de sucção em cerca de 3kPa para o primeiro ponto de entrada de ar e para o meio da encosta 0,52kPa, com o segundo ponto de entrada de ar em 12000kPa para as duas amostras. Os valores de umidade residual são de 4,85% para o topo e de 4,12% para o meio da encosta. A base da encosta apresentou valores de sucção em torno de 3,84kPa para o primeiro ponto de entrada de ar e de 11000kPa para o segundo ponto de entrada de ar, com valor de umidade residual de 2.76%.

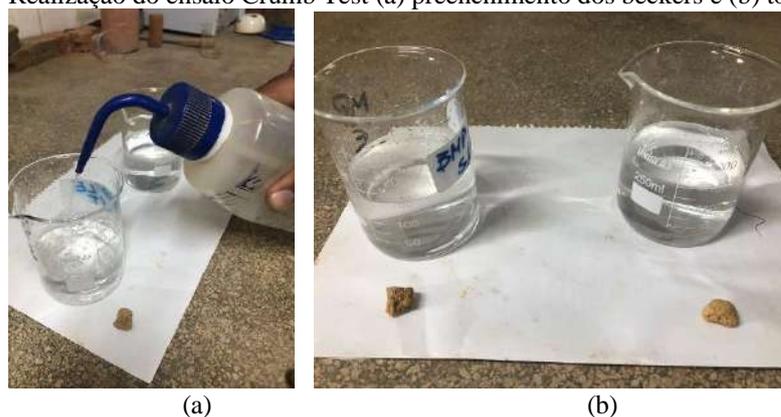
Para a Encosta do Mutange observa-se curvas de retenção com valores de sucção muito próximos. O primeiro ponto de entrada de ar está em 1,85kPa para o topo e 4,00 para o meio da encosta. O segundo ponto de entrada de ar está em 6.000kPa com umidade residual de 6,34% para o Topo da encosta e 3,45 para o meio da encosta.

4.3.4 Ensaio de Dispersão rápida - *Crumb Test*

O ensaio de *Crumb Test* é considerado um ensaio de dispersão rápida, utilizado principalmente para solos argilosos. No Brasil, é regido pela NBR 13601 da Associação Brasileira de Normas e Técnicas - (ABNT, 1996), sendo desenvolvido por cientistas australianos, com a finalidade de avaliar o comportamento de um agregado na umidade natural, quando submerso em água destilada, de forma qualitativa (BASTOS, 1999)

O método consistiu em preencher 2 recipientes de vidro (*becker*) com 200mL de água destilada, colocar dentro de cada um deles um torrão de aproximadamente 2g do solo seco ao ar, observando sua reação por um período de 60 minutos, avaliando de forma qualitativa a presença de turbidez na água, bem como a desagregação e dispersão dos grãos no solo analisado. Existe ainda a possibilidade de utilização de hidróxido de sódio ao invés de água destilada para a realização do ensaio, pois, segundo Head (2006), alguns solos argilosos dispersivos não reagem na água destilada, mas reagem na solução de hidróxido de sódio. Alguns procedimentos de ensaio podem ser observados através da Figura 111.

Figura 111 - Realização do ensaio *Crumb Test* (a) preenchimento dos beckers e (b) torrões do solo.



Fonte: A autora (2022).

A classificação do grau de dispersividade é dada após o tempo de observação, a saber:

- a)** Grau 01: Solos não dispersivos - O torrão de solo pode absorver água, sofrer esboroamento e esparramar-se no fundo do béquer, formando uma pilha achatada,

mas não se observa sinal de turvação no líquido, provocado por colóides em suspensão.

b) Grau 02: Solo levemente dispersivo - Há indícios de turvação na água, próximos à superfície do torrão (se a turvação for facilmente visível, registrar como grau 3).

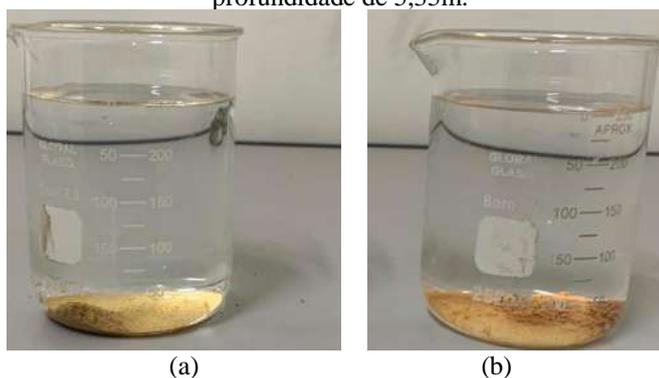
c) Grau 03: Solos moderadamente dispersivos - Observa-se uma nuvem de colóides em suspensão, geralmente finos veios espalhando-se no fundo do béquer, facilmente reconhecível.

d) Grau 04: Solos fortemente dispersivos - Observa-se uma nuvem coloidal, geralmente uma película muito fina, cobrindo quase todo o fundo do béquer. Em casos extremos, toda a água torna-se turva.

4.3.4.1 Apresentação e análise dos resultados obtidos no ensaio Crumb Test.

Os solos estudados na UFAL foram classificados como não dispersivo – Grau 01. Para amostra da UFAL, nas duas profundidades (3,00m e 5,35m), foi observado que o solo sofreu esboroamento e esparramou-se ao fundo do béquer, formando uma pilha achatada, mas não foram observados sinais de turvação do líquido, como pode ser observado através da Figura 112.

Figura 112 - Resultado do ensaio *Crumb Test* para as amostras da UFAL (a) na profundidade de 3,00m e (b) na profundidade de 5,35m.



(a)

(b)

Fonte: A autora (2022).

Para a amostra do HCOR, foi observado que os torrões se desmancharam e espalharam-se ao fundo do recipiente, porém não houve sinal de turbidez nem dispersão, como apresentado na Figura 113.

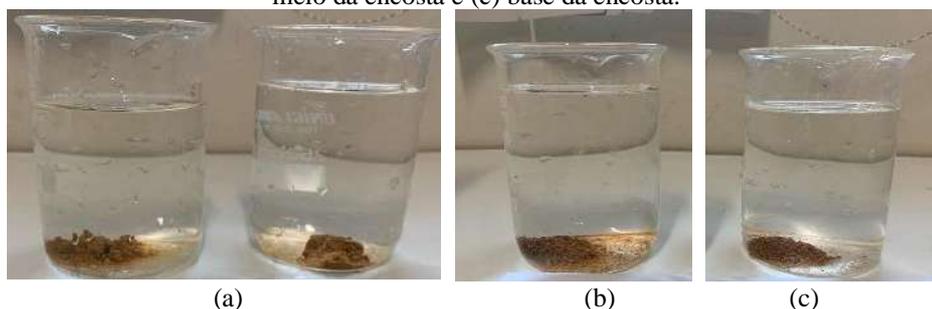
Figura 113 - Resultado do ensaio Crumb Test para as amostras do HCOR.



Fonte: A autora (2022).

Para a Grota da Moenda, foi observado que na base da encosta, um dos torrões se desfez totalmente, enquanto o outro apenas se desfez parcialmente, porém, não houve sinal de turbidez da água. Para os torrões do meio e topo da encosta, foi observado um espalhamento ao fundo do recipiente, mas sem turbidez na água. A Figura 114 apresenta o resultado do ensaio.

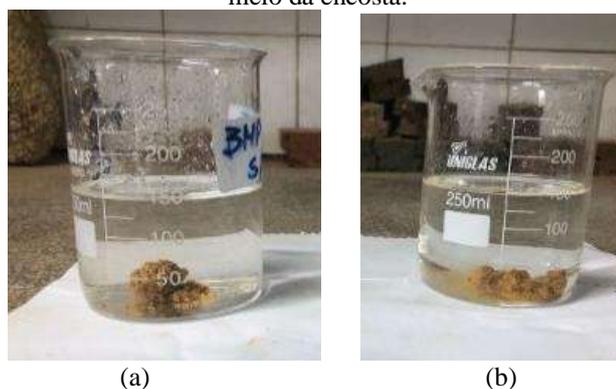
Figura 114 - Resultado do ensaio *Crumb Test* para as amostras da Grota da Moenda (a) Topo da encosta, (b) meio da encosta e (c) base da encosta.



Fonte: A autora (2022).

Para a amostra da encosta do Mutange, foi observado que os torrões não se espalharam totalmente ao fundo do recipiente, somente partiram-se, não sendo alterada a coloração da água ao fim do ensaio, como pode ser observado através da Figura 115.

Figura 115 - Resultado do ensaio Crumb Test para as amostras da Encosta do Mutange (a) topo da encosta e (b) meio da encosta.



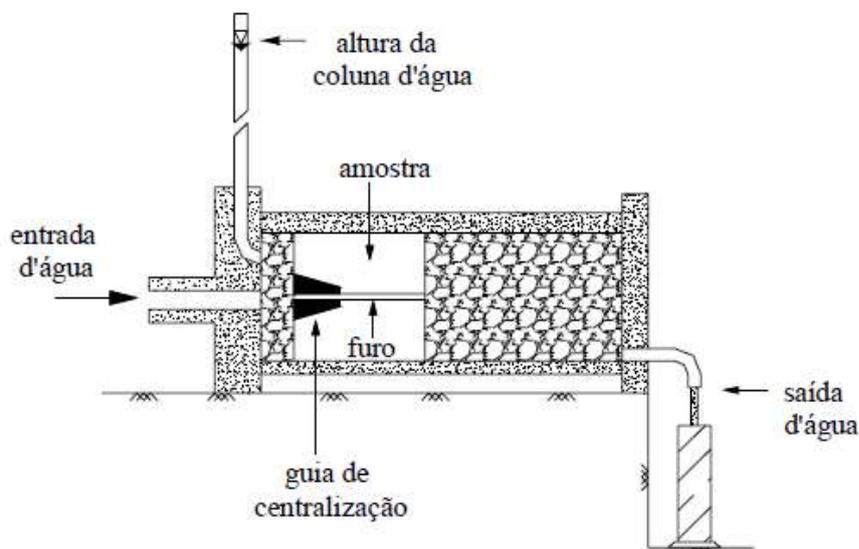
Fonte: A autora (2022).

4.3.5 Pinhole Test

O ensaio de *Pinhole* é conhecido também como ensaio de furo de agulha e no Brasil é regido pela norma NBR 14114 da ABNT (1998). Este ensaio objetiva avaliar de forma qualitativa a dispersão de uma amostra de solo quanto à erosão hídrica, em que é imposto um fluxo de água concentrado por um furo realizado no meio do corpo de prova cilíndrico, possuindo diâmetro de aproximadamente 1mm.

Sherard *et al.* (1976) apresentaram inicialmente este ensaio, indicando a previsão de erosão por dispersão. Nas argilas altamente dispersivas, a água se apresentará turva e o furo do corpo de prova será alargado, resultando em um aumento significativo da vazão da água, já com as argilas não dispersivas, a água terá aparência límpida e o furo não terá alteração, enquanto para argilas moderadas a levemente dispersas, o furo e a vazão não serão alterados, mas a água terá aparência levemente turva. A Figura 116 apresenta o modelo esquemático do equipamento para o ensaio de Pinhole.

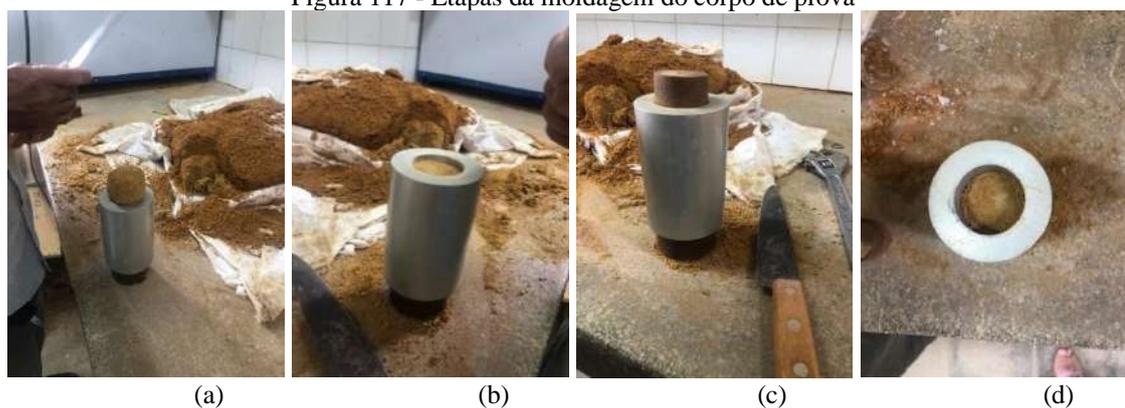
Figura 116 - Modelo esquemático do equipamento para o ensaio de Pinhole.



Fonte: Sherard *et al.* (1976)

Para fins desta pesquisa, os corpos de prova foram moldados a partir de amostras indeformadas, previamente seco ao ar. A amostra era moldada e empurrada cuidadosamente para dentro do anel, inicialmente era feita uma leve pressão com as mãos, tomando o cuidado para não quebrar o corpo de prova, em seguida foi utilizado para auxiliar um êmbolo cilíndrico de madeira. A Figura 117 apresenta (a) o início da moldagem do corpo de prova, (b), a inserção no anel, (c) auxílio com o êmbalo para nivelamento do corpo de prova e (d) o corpo de prova pronto para ser ensaiado.

Figura 117 - Etapas da moldagem do corpo de prova



Fonte: A autora (2022).

O mosaico de fotos apresentados na Figura 118 indicam alguns procedimentos realizados para execução do teste propriamente dito, dentre os quais consiste (a) a inserção da agulha no centro do CP, (b) colocação da tela e filtro e (c) inserção do conjunto junto a aparelhagem do ensaio, acoplando as mangueiras nas posições adequadas e ligando a torneira para liberação da água em fluxo constante.

Figura 118 - Etapas do procedimento do ensaio de Pinhole.



Fonte: A autora (2022).

As cargas hidráulicas utilizadas durante o ensaio foram de 2'' (50mm), 7'' (178mm), 15'' (380mm) e 40'' (1020mm), conforme NBR 14114/98.

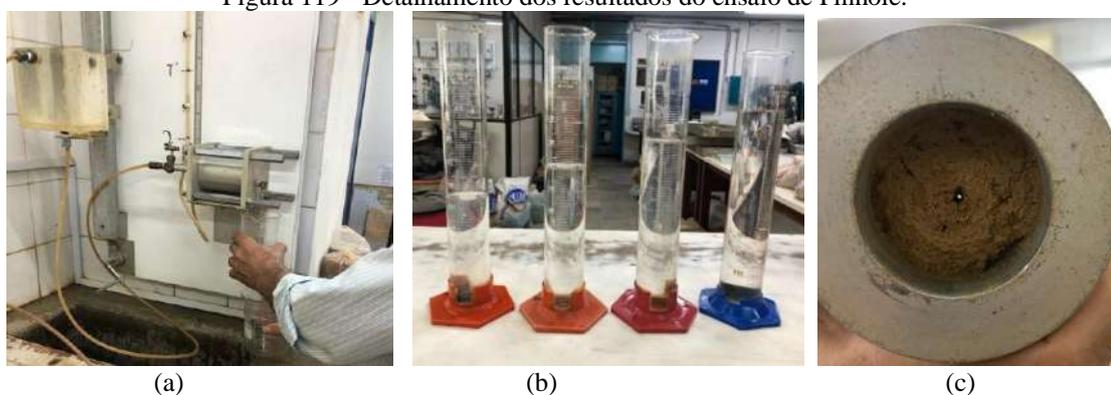
A percolação de água iniciou-se com a carga hidráulica de 2'' por um período de 5 minutos, recolhendo o volume de água percolado durante esse período e avaliando a existência de turbidez. Se a água apresentasse pequenos traços de coloração ou se fosse limpa, caso contrário, prosseguia-se a realização do ensaio aumentando a carga hidráulica para 7'' observando por mais 5 minutos e assim suscetivelmente para as demais cargas aplicadas.

Com a imposição de cargas hidráulicas distintas variando com o tempo e observada a turbidez da água, a classificação do solo quanto a dispersividade segundo a NBR 14114/98 será:

- a) ND₁ e ND₂: solos não dispersivos a incipientemente dispersivos;
- b) ND₃ e ND₄: solos de leve a moderadamente dispersivos e
- c) D₂ e D₁: solos dispersivos a altamente dispersivos.

Após a realização do ensaio, o equipamento é desmontado e verificado se existe um eventual alargamento do furo em função da vazão imposta para que seja possível a realização da classificação da dispersividade. A Figura 119 apresenta o início da realização de um dos ensaios (a), aparência da água após o ensaio (b) e a visualização do alargamento do furo da amostra após o ensaio (c).

Figura 119 - Detalhamento dos resultados do ensaio de Pinhole.



Fonte: A autora (2022).

4.3.5.1 Apresentação e análise dos resultados obtidos no Pinhole Test

As Tabelas 25 e 26 apresentam os valores medidos durante a execução do ensaio de Pinhole, em relação a quantidade de água em mL percolada pelo corpo de prova, para cada carga hidráulica aplicada nos tempos de 1 a 5 minutos, para todas as amostras ensaiadas.

Tabela 25 - Resultados das leituras realizadas no ensaio de Pinhole para as amostras da UFAL Prof. 3,00m e 5,35m e HCOR prof. 1,50m

Amostra	Tempo (s)	Carga Hidráulica			
		50	180	380	1020
		Vazão (cm ³ /s)	Vazão (cm ³ /s)	Vazão (cm ³ /s)	Vazão (cm ³ /s)
UFAL prof. 3,00m	60	2,08	2,50	2,87	3,67
	120	2,02	2,52	2,83	3,50
	180	2,02	2,52	2,83	3,50
	240	2,00	2,48	2,82	3,48
	300	2,00	2,50	2,83	3,52
	Vazão Média	1,67	2,32	2,67	3,10
UFAL prof. 5,35m	60	1,67	2,30	2,70	3,50
	120	1,67	2,33	2,67	3,50
	180	1,67	2,30	2,67	3,03
	240	1,67	2,35	2,65	2,73
	300	1,67	2,32	2,65	2,72
	Vazão Média	2,02	2,50	2,84	3,53
HCOR – Prof. 1,50m	60	1,42	2,05	2,60	3,27
	120	1,33	2,00	2,58	3,35
	180	1,43	2,08	2,67	3,25
	240	1,42	2,08	2,58	3,33
	300	1,45	2,05	2,58	3,30
	Vazão Média	1,41	2,05	2,60	3,30
Grota da Moenda – Topo da Encosta	60	1,50	2,20	2,72	3,50
	120	1,58	2,17	2,72	3,42
	180	1,50	2,25	2,75	3,42
	240	1,55	2,17	2,67	3,37
	300	1,52	2,17	2,75	3,43
	Vazão Média	1,53	2,19	2,72	3,43

Fonte: A autora (2022).

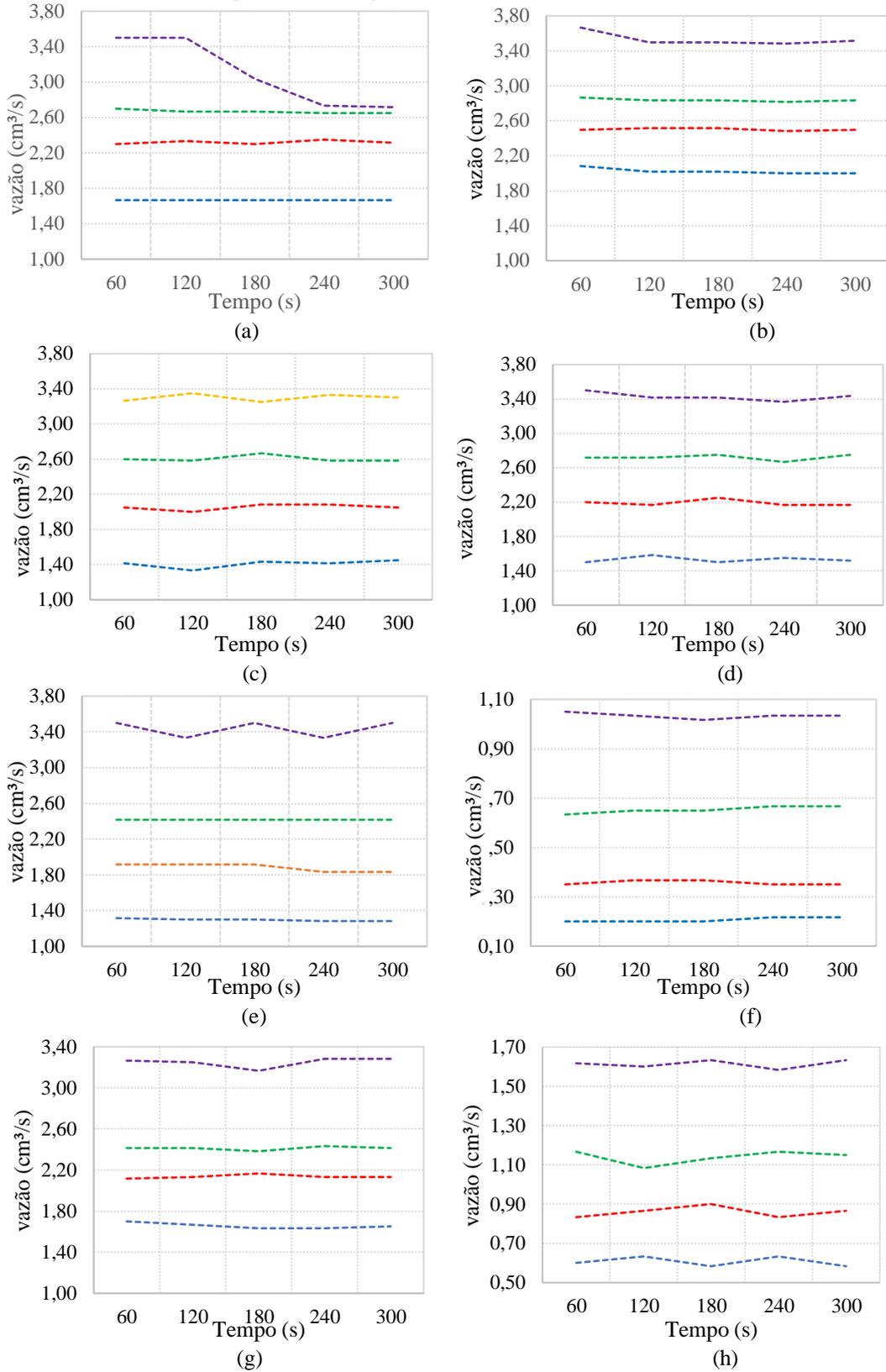
Tabela 26 - Resultados das leituras realizadas no ensaio de Pinhole para as amostras a Grota da Moenda e Encosta do Mutange.

Amostra	Tempo (s)	Carga Hidráulica			
		50	180	380	1020
		Vazão (cm ³ /s)	Vazão (cm ³ /s)	Vazão (cm ³ /s)	Vazão (cm ³ /s)
Grota da Moenda – Topo da Encosta	60	1,50	2,20	2,72	3,50
	120	1,58	2,17	2,72	3,42
	180	1,50	2,25	2,75	3,42
	240	1,55	2,17	2,67	3,37
	300	1,52	2,17	2,75	3,43
	Vazão Média	1,53	2,19	2,72	3,43
Grota da Moenda – Meio da Encosta	60	1,32	1,92	2,42	3,50
	120	1,30	1,92	2,42	3,33
	180	1,30	1,92	2,42	3,50
	240	1,28	1,83	2,42	3,33
	300	1,28	1,83	2,42	3,50
	Vazão Média	1,30	1,88	2,42	3,43
Grota da Moenda – Base da Encosta	60	0,20	0,35	0,63	1,05
	120	0,20	0,37	0,65	1,03
	180	0,20	0,37	0,65	1,02
	240	0,22	0,35	0,67	1,03
	300	0,22	0,35	0,67	1,03
	Vazão Média	0,21	0,36	0,65	1,03
Mutange – Topo da Encosta	60	1,70	2,12	2,42	3,27
	120	1,67	2,13	2,42	3,25
	180	1,63	2,17	2,38	3,17
	240	1,63	2,13	2,43	3,28
	300	1,65	2,13	2,42	3,28
	Vazão Média	1,66	2,14	2,41	3,25
Mutange – Meio da Encosta	60	0,60	0,83	1,17	1,62
	120	0,63	0,87	1,08	1,60
	180	0,58	0,90	1,13	1,63
	240	0,63	0,83	1,17	1,58
	300	0,58	0,87	1,15	1,63
	Vazão Média	0,61	0,86	1,14	1,61

Fonte: A autora (2022).

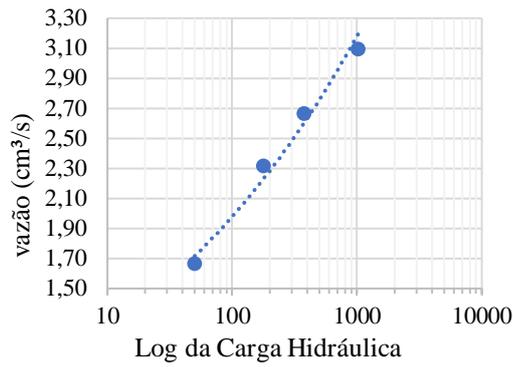
As Figuras 120 e 121 são referentes a vazão da água em função do tempo e a vazão em função da carga hidráulica para as amostras ensaiadas, seguindo as recomendações da NBR 14114 (ABNT, 1998).

Figura 120 - Gráfico de vazão vs. tempo para as amostras da UFAL prof. 3,00m (a), prof. 5,35m (b), HCOR prof. 1,50m (c), Moenda topo da encosta (d), Moenda meio da encosta (e), Moenda base da encosta (f), Mutange topo da encosta (g) e Moenda meio da Encosta (h).

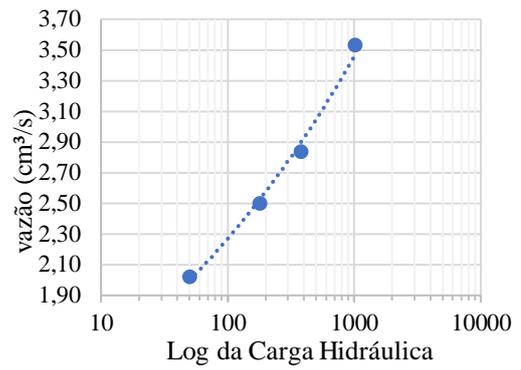


Fonte: A autora (2022).

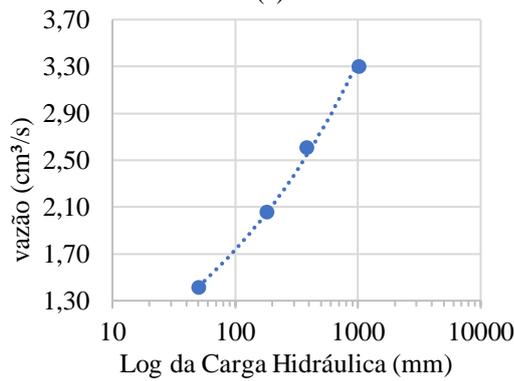
Figura 121 - Gráfico de vazão vs. carga hidráulica para as amostras da UFAL prof. 3,00m (a), prof. 5,35m (b), HCOR prof. 1,50m (c), Moenda topo da encosta (d), Moenda meio da encosta (e), Moenda base da encosta (f), Mutange topo da encosta (g) e Moenda meio da Encosta (h).



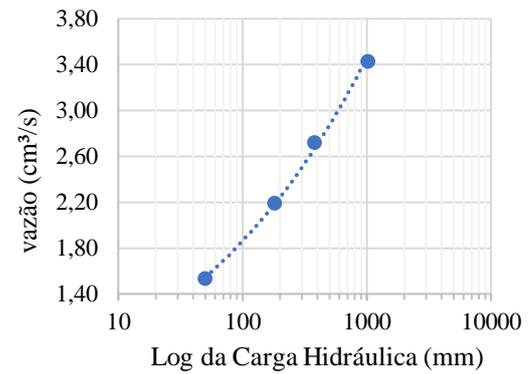
(a)



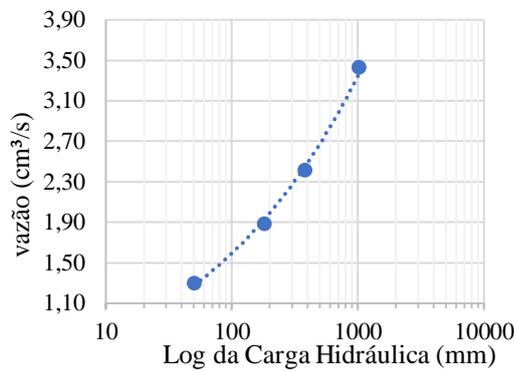
(b)



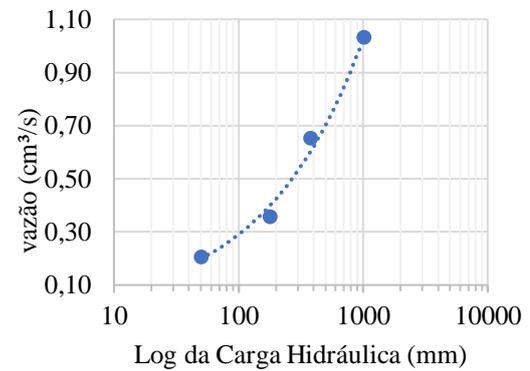
(c)



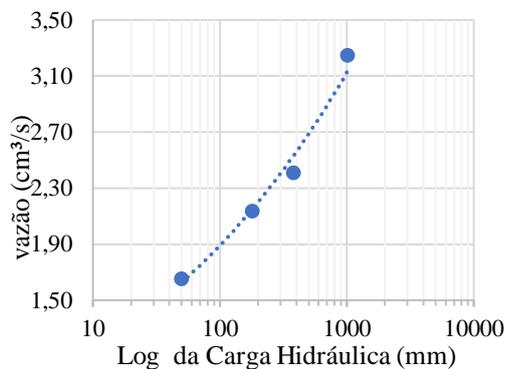
(d)



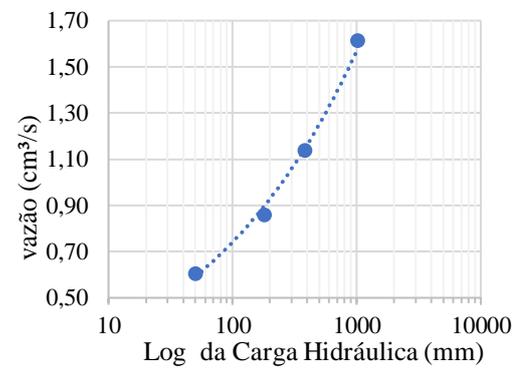
(e)



(f)



(g)



(g)

Fonte: A autora (2022).

As análises demonstram que em todas as amostras ensaiadas ocorrem pouca variação da vazão em função do tempo, permanecendo relativamente constante para cada carga

hidráulica aplicada, sendo observada uma vazão crescente continuamente com o aumento da carga hidráulica.

Não foi observada ainda, alteração na coloração do efluente percolado. Estas informações sugerem que nenhuma amostra se mostrou susceptível a este mecanismo de erosão, ou seja, por carreamento (*seepage erosion*), mesmo com aplicação de carga hidráulica máxima (1.020 mm) e com o prolongamento do tempo de ensaio, podendo ser atribuído ao fato de apresentarem bimodalidade textural, que é considerado uma condição essencial ao desenvolvimento deste mecanismo (RODRIGUES, 1984).

A classificação dos solos quanto a erodibilidade pelo ensaio de Pinhole foi ND1 - Não Dispersivo, corroborando com o resultado do ensaio do *Crumb Test*.

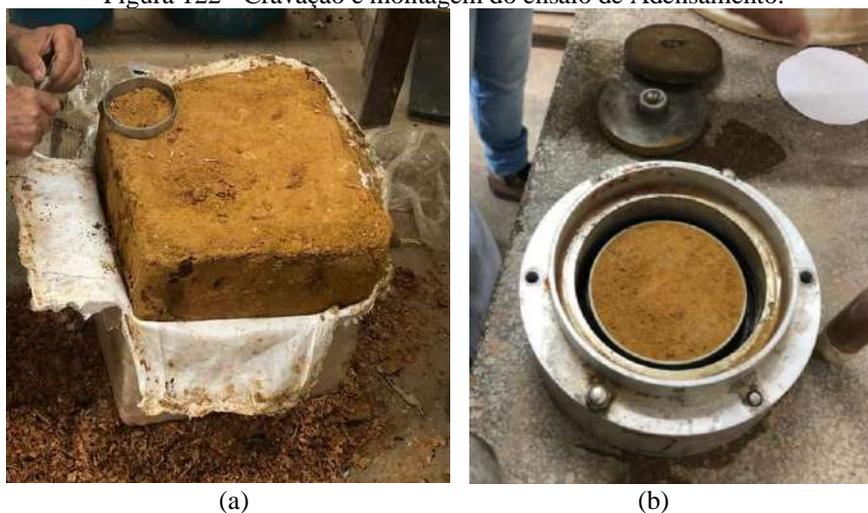
4.3.6 Ensaio Edométrico Duplo

De acordo com Pinto (2006) o ensaio edométrico ou ensaio de adensamento consiste na compressão do solo contido dentro de um anel metálico que impede qualquer de Formação lateral. O ensaio simula o comportamento do solo quando ele é comprimido pela ação do peso de novas camadas depositadas sobre ele.

O procedimento é prescrito pela norma da NBR 16853/2020 (ABNT, 2020), que consiste em se colocar uma amostra em um anel rígido ajustado em uma célula de compressão edométrica, com duas pedras porosas, acima e abaixo da amostra, que permitem a saída da água. A célula de compressão edométrica é então colocada numa prensa, para aplicação das cargas axiais. Os ensaios realizados para fins desta pesquisa utilizaram prensas convencionais e células de carga do tipo anel com dimensão de 60cm² e altura de cm, de fabricação da Ronald Top S.A. e extensômetro Mitutoyo com sensibilidade de 0,01mm, todos os equipamentos existentes no laboratório de solos da UFPE. As amostras analisadas que foram ensaiadas consideraram as condições natural de campo e inundada.

Os corpos de prova foram moldados por cravação estática, diretamente sobre a amostra indeformada. Na condição Inundada a amostra foi submetida a pequena tensão confinante durante 24h, após esse período foram realizados carregamentos de 10kPa; 20 kPa; 40 kPa; 80 kPa; 160 kPa; 320 kPa; 640 kPa;1280 e depois descarregado em 640 kPa; 160 kPa; 40 kPa para as amostras nas duas condições. A Figura 122 apresenta os detalhes de cravação (a) e montagem da amostra na célula de adensamento (b) a ser ensaiada.

Figura 122 - Cravação e montagem do ensaio de Adensamento.



Fonte: A autora (2022).

Os resultados dos ensaios permitiram a determinação dos parâmetros de compressibilidade (Índice de Compressão – C_c e índice de expansão – C_s e a determinação da tensão de escoamento (σ_{vm}) além da avaliação do potencial de colapso do solo.

A tensão de escoamento foi determinada através do método de Pacheco Silva. Apesar de o método de Casagrande ser mais difundido internacionalmente (Pinto, 2006), o Método Pacheco Silva possui a vantagem de não se fazer necessária a determinação de um raio mínimo na curva do ensaio (SOUSA NETO, 2004) sendo estes dois métodos bastante empregados no Brasil.

Os índices de compressão (C_c) foram determinados considerando os últimos estágios de tensão da curva de compressão, para todas as amostras, que variou entre 320kPa e 1280kPa, enquanto o índice de recompressão foi determinado considerando os trechos retilíneos das curvas de descarregamento, entre 40kPa e 1280kPa.

4.3.6.1 Resultados obtidos nos ensaios Edométricos Duplo para as amostras da UFAL

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios edométricos duplos realizados para todas as amostras ensaiadas, sendo avaliado suas características e comportamentos, através dos parâmetros obtidos no ensaio. A Tabela 27 apresenta as condições iniciais e finais dos corpos de prova do ensaio edométrico duplo (na condição natural e inundada).

Tabela 27 - Condições iniciais e finais dos corpos de prova para as amostras ensaiadas.

Local	Ensaio	Condições iniciais do Corpo de Prova				Condições Finais do Corpo de Prova		
		W ₀ (%)	γ _d (g/cm ³)	e ₀	S ₀ (%)	W _f (%)	e _f	S _f (%)
UFAL – 3,00m	EDN	18,36	1,30	0,98	48,21	14,67	0,76	49,86
	EDI	18,31	1,30	0,98	47,98	21,44	0,56	99,41
UFAL – 5,35m	EDN	21,14	1,24	1,15	49,20	15,68	0,70	59,96
	EDI	17,78	1,28	1,07	44,11	21,58	0,59	97,16
HCOR	EDN	14,094	1,493	0,75	49,037	12,79	0,566	59,06
	EDI	13,96	1,37	0,90	40,28	21,37	0,26	100,00
Moenda –Topo da Encosta	EDN	13,85	1,26	1,08	33,52	13,51	0,58	61,45
	EDI	16,70	1,22	1,15	37,84	23,78	0,49	100,00
Moenda – Meio da Encosta	EDN	18,85	1,24	1,10	44,60	14,60	0,49	78,81
	EDI	18,30	1,20	1,17	40,83	19,29	0,45	100,00
Moenda –Base da Encosta	EDN	16,60	1,57	0,69	64,00	14,63	0,52	75,64
	EDI	17,16	1,49	0,79	57,87	18,38	0,43	100,00
Mutange – Topo da Encosta	EDN	21,51	1,23	1,17	48,72	15,55	0,42	99,10
	EDI	21,40	1,23	1,16	48,94	14,53	0,43	100,00
Mutange – Meio da encosta	EDN	19,22	1,40	0,91	56,33	14,95	0,41	98,47
	EDI	17,34	1,33	1,00	45,95	20,93	0,38	100,00

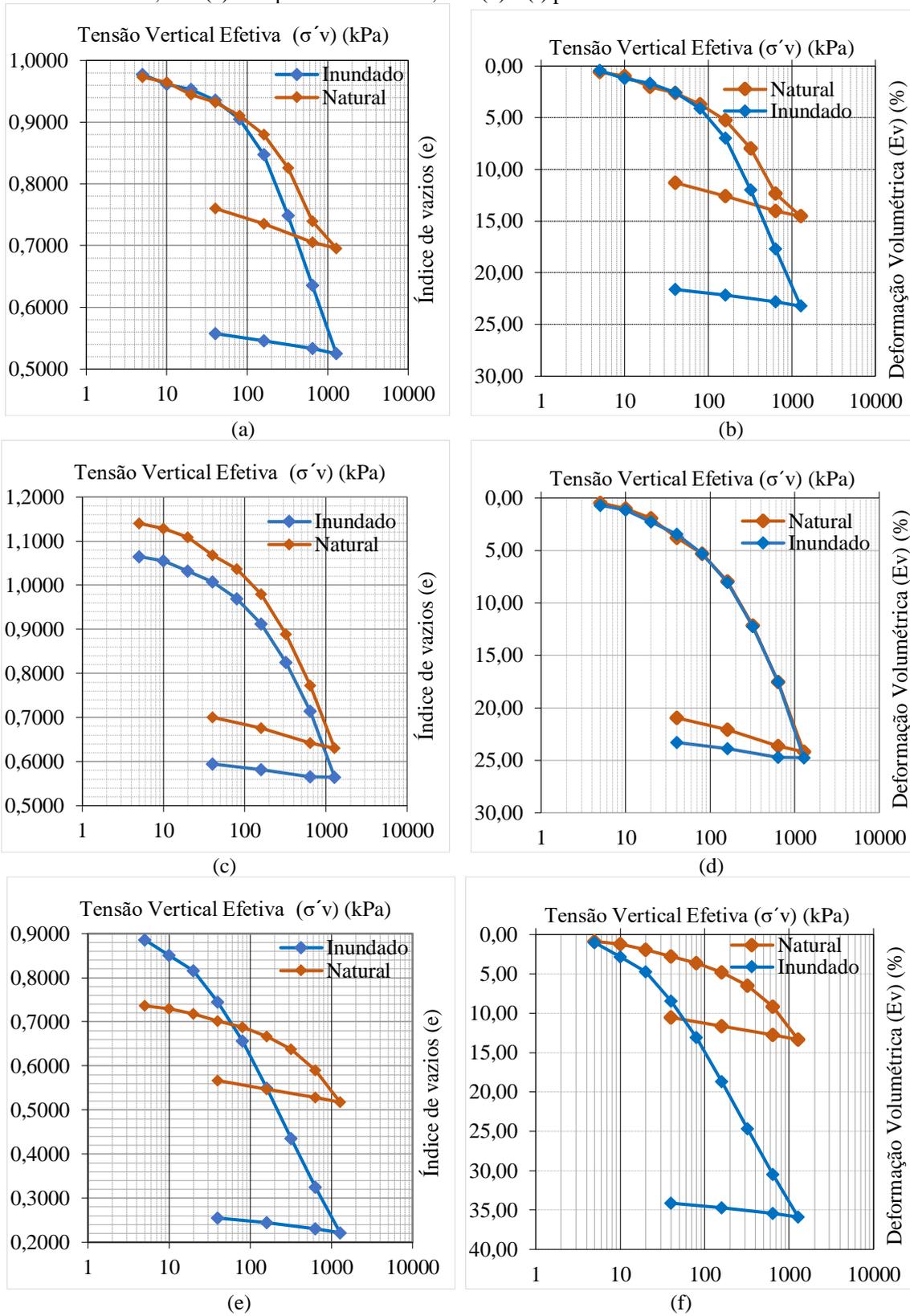
*EDN: Ensaio edométrico na umidade natural; EDI: Ensaio edométrico inundado; W₀: umidade inicial; γ_d: massa específica; e₀: índice de vazios inicial; S₀: saturação inicial; W_f: umidade final; e_f: índice de vazios final; S_f: saturação final.

Fonte: A autora (2022).

Pode ser observado que no Ensaio Edométrico realizado na umidade natural (EDN), todas as amostras ensaiadas apresentaram uma redução de umidade ao final do ensaio. Quanto ao grau de saturação, houve um aumento variando em função da redução dos índices de vazios, este que inicialmente apresentou menor valor para a base da encosta na Grota da Moenda (0,693), porém, de uma maneira geral, todos os valores são próximos, com os índices de vazios diminuindo enquanto o grau de saturação aumenta no decorrer do ensaio, com o aumento das tensões de carregamento. Na condição inundada, o grau de saturação final (S_f) das amostras foi superior a 97%, estando em convergência com resultados apresentados por Lafayette (2006), Meira (2008), Sousa (2014) e Ramos (2019), para solos de Formação Barreiras.

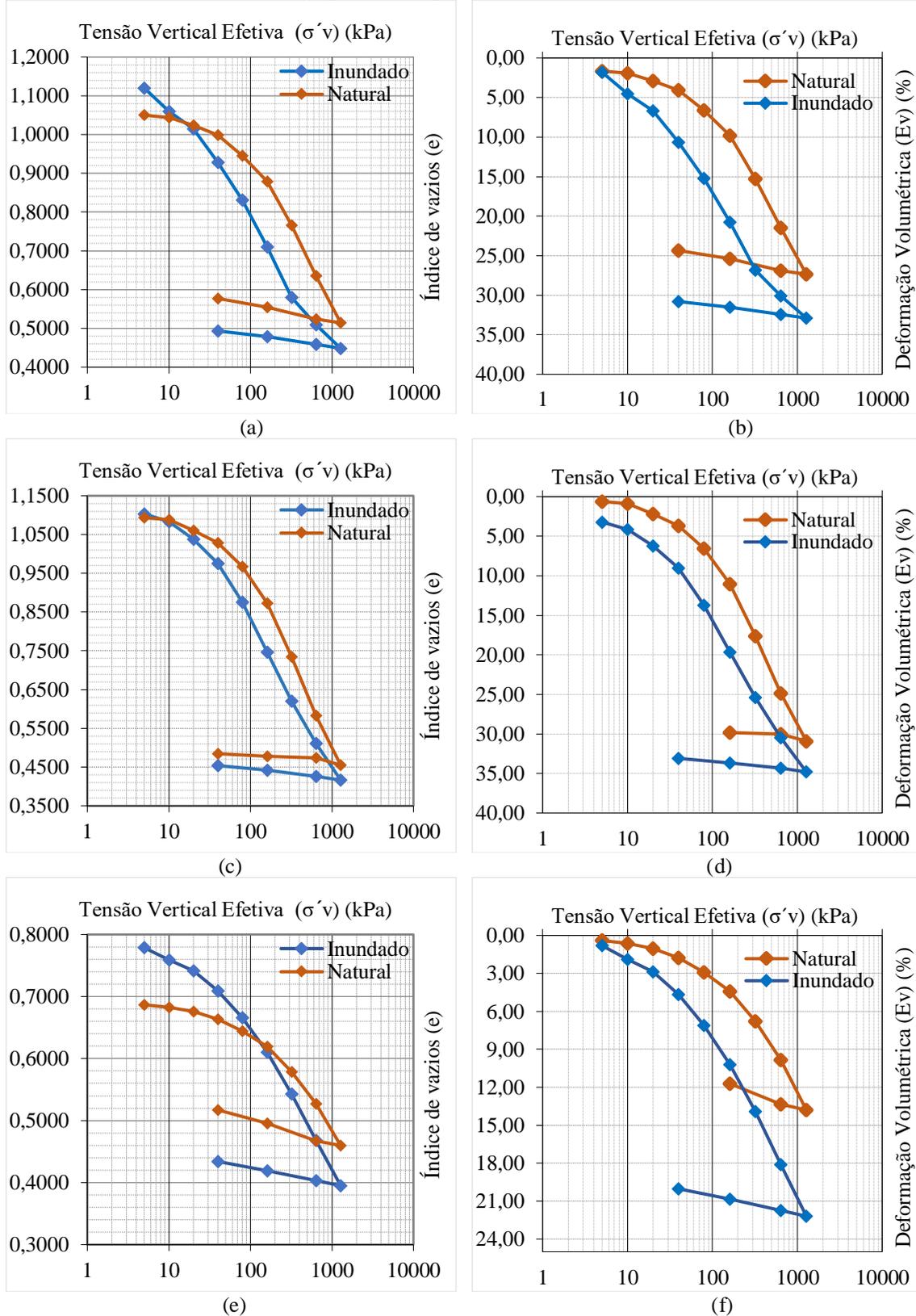
As Figuras 123, 124 e 125 apresentam os gráficos das curvas de variação de índice de vazios – tensão vertical efetiva (*e versus σ'v log*) e deformação volumétrica - tensão vertical efetiva (*εv versus σ'v log*) obtidas através dos ensaios Edométricos na condição natural e inundada para as amostras estudadas na UFAL nas profundidades de 3,00m e 5,35m, HCOR na profundidade de 1,50m, para o topo, meio e base da Grota da Moenda e topo e meio da Encosta do Mutange.

Figura 123 - Gráfico índices de vazios versus a tensão vertical (e versus $\sigma_v \log$) (a) para as amostras da UFAL na profundidade de 3,00m, (c) na profundidade de 5,35m e (e) para a amostra do HCOR (1,50), e gráfico de deformações volumétricas versus tensão vertical (ϵ_v versus $\sigma_v \log$) para a amostra da UFAL na profundidade de 3,00m (b) e na profundidade de 5,35m (d) e (f) para a amostra do HCOR.



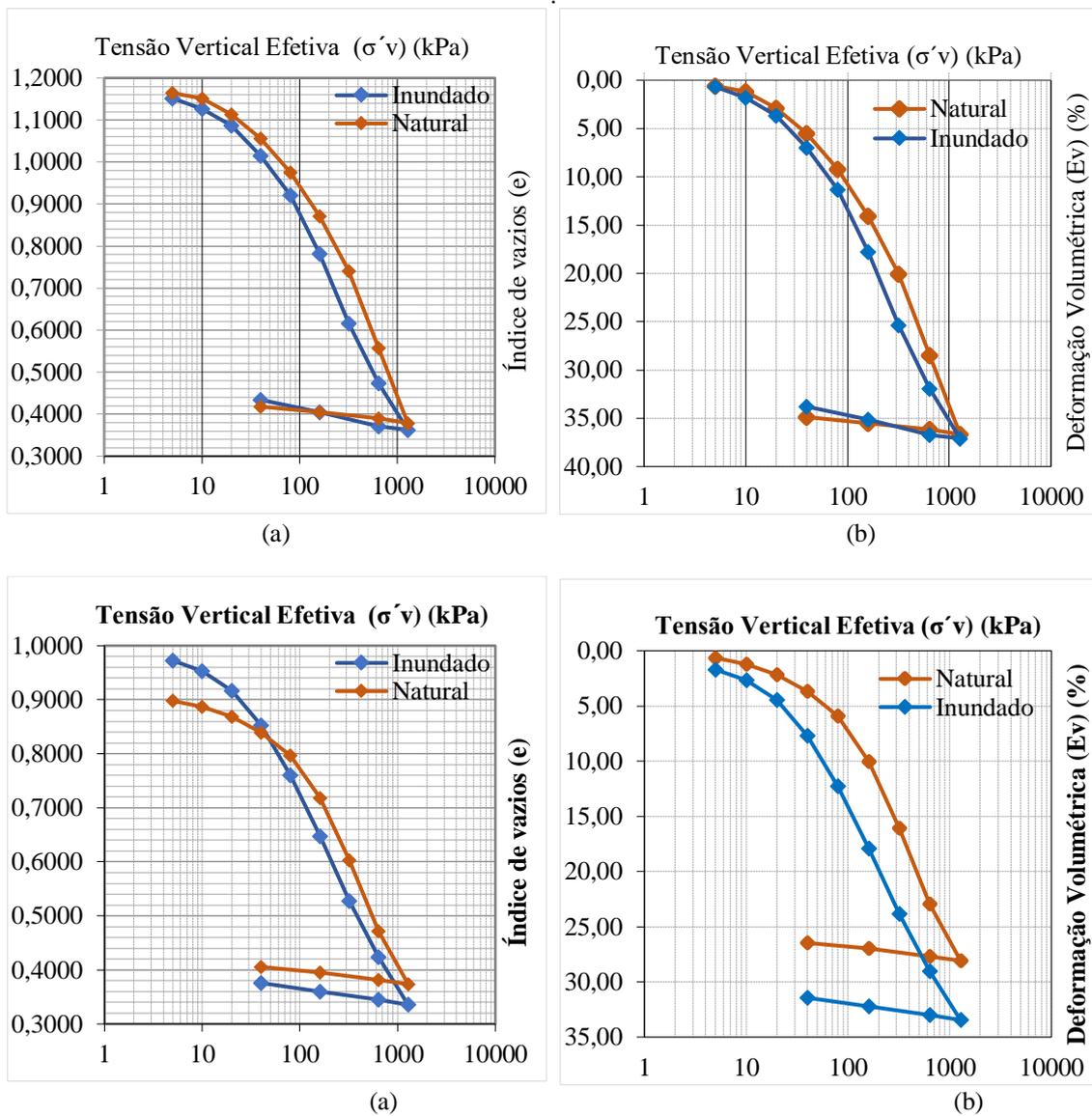
Fonte: A autora (2022).

Figura 124 - Gráfico índices de vazios versus a tensão vertical (e versus σ_v log) para as amostras da Grota da Moenda (a) Topo da encosta, (c) meio da encosta e (e) base da encosta, e gráfico de deformações volumétricas versus tensão vertical (ϵ_v versus σ_v log) para (b) o topo da encosta, (d) o meio da encosta e (f) a base da encosta.



Fonte: A autora (2022).

Figura 125 - Gráfico índices de vazios versus a tensão vertical (e versus σ_v log) para as amostras do Mutange (a) Topo da encosta, (c) meio da encosta, e gráfico de deformações volumétricas versus tensão vertical (ϵ_v versus σ_v log) para (b) o topo da encosta, (d) o meio da encosta.



Fonte: A autora (2022).

Os gráficos mostram claramente trechos virgens em todas as amostras analisadas, tanto para a condição natural como para a condição inundada. As curvas evidenciam ainda, uma maior rigidez do solo na condição natural, com maiores deformações na condição inundada, esta condição podendo ser justificada em virtude da diminuição da sucção em função da saturação. Desta forma, foi possível a determinação da tensão de escoamento pelo método de Pacheco Silva, e dos parâmetros de compressibilidade do solo, apresentados através da Tabela 28.

Tabela 28 - Resultados dos ensaios EDI e EDN para as amostras da UFAL.

Local	Ensaio	σ_{vm} (kPa)	Parâmetros	
			C_c	C_s
UFAL – 3,00m	EDN	110	0,365	0,023
	EDI	60	0,325	0,046
UFAL – 5,35m	EDN	290	0,334	0,029
	EDI	160	0,319	0,038
HCOR – Prof. 1,50m.	EDN	110	0,127	0,033
	EDI	28	0,361	0,022
Moenda – Topo da Encosta	EDN	92	0,398	0,033
	EDI	18	0,34	0,038
Moenda – Meio da Encosta	EDN	81	0,438	0,021
	EDI	32	0,276	0,025
Moenda – Base da Encosta	EDN	110	0,245	0,026
	EDI	61	0,163	0,043
Mutange – Topo da Encosta	EDN	92	0,545	0,026
	EDI	37	0,463	0,047
Mutange – Meio da Encosta	EDN	78	0,381	0,021
	EDI	28	0,353	0,027

Fonte: A autora (2022).

Os valores da tensão de escoamento (σ_{vm}), obtidos através do método de Pacheco Silva (1970), diminuem para a condição inundada, comparando-a com a condição natural para todas as amostras analisadas. Podem ser observadas que a compressão apresenta valores superiores para a condição natural quando comparados com a condição inundada. Para a Grota da Moenda, o maior valor obtido foi para o meio da encosta, já para a Encosta do Mutange, o maior valor encontra-se no topo, caracterizando comportamento mais compressivo que as demais amostras de solo no local.

Para expansão, o C_s apresenta valores superiores na condição inundada em comparação com a condição natural, variando entre 0,021 a 0,047. Esses valores indicam a baixa expansividade dos solos estudados, que segundo Guimarães (2002), são típicos de solos evoluídos (intemperizados), que não apresentam recuperação das deformações sofridas.

4.3.6.2 Avaliação do potencial de colapso dos solos nos locais investigados.

Através da análise dos ensaios edométricos duplos, fica notório que as amostras inundadas apresentaram maiores deformações para as mesmas tensões aplicadas, quando comparadas com as amostras naturais, representando assim, um grau de colapsividade.

A fim de avaliar o potencial de colapso, foram utilizados nesta pesquisa os critérios de Vargas (1978), Jennings e Knight (1975) e Reginatto e Ferrero (1973).

Vargas já em 1953 utilizou como experimento para sua classificação, estudos realizados em argilas porosas do Terciário na cidade de São Paulo, com avaliação através do ensaio edométrico duplo. Vargas (1978) classificou os solos como colapsáveis, considerando o valor do Potencial de Colapso (PC) maior que 2%. Para a determinação do Potencial de Colapso do solo para esta classificação, é utilizada a equação 12.

$$PC = \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (12)$$

Em que:

PC é o potencial de colapso expresso em percentagem

Δe representa a variação do índice de vazios devido ao colapso, e

e_0 é o índice de vazios antes da inundação, correspondente a tensão de inundação.

Jennings e Knigth (1975) realizaram, em seguida, uma classificação com maiores intervalos a partir do Potencial de Colapso dos solos, considerando a tensão de inundação de 200kPa. Para estes autores, a classificação é definida por:

- a) Solos que não apresenta problemas para a engenharia: quando $0 < PC < 1$;
- b) Solos com problemas moderados de colapso: quando $1 < PC < 5$;
- c) Solos colapsivelmente problemáticos: quando $5 < PC < 10$;
- d) Solos com problemas graves de colapso: quando $10 < PC < 20$ e
- e) Solos com problemas muito grave de colapso: quando $PC > 20$.

Reginatto e Ferrero (1973), consideraram para realizar sua classificação, a tensão vertical geoestática e a tensão de pré-consolidação, sob as condições de umidade natural e inundada, de forma a se obter um coeficiente de colapsividade, que pode ser expresso através da equação 13.

$$C = \frac{\sigma_{vps} - \sigma_{v0}}{\sigma_{vpn} - \sigma_{v0}} \quad (13)$$

Em que

C é o coeficiente de colapsividade;

σ_{vps} é a tensão de pré-consolidação do solo na umidade natural;

σ_{vpn} é a tensão de pré-consolidação do solo inundado e

σ_{v0} é a tensão vertical devido ao peso próprio do solo em campo.

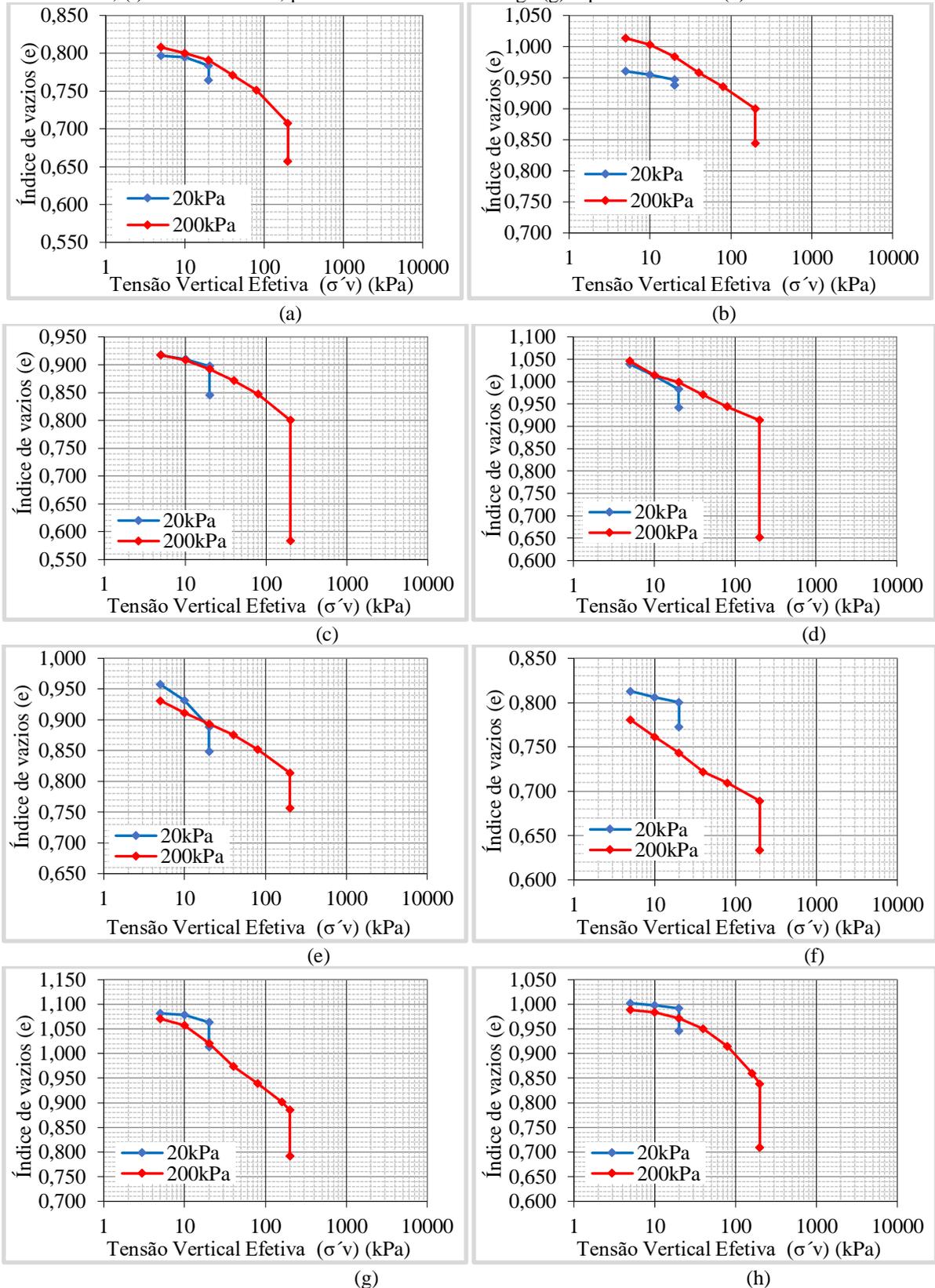
A partir da determinação do coeficiente de Colapsividade do solo, Reginatto e Ferrero (1973) propuseram a seguinte classificação:

- a) Solos verdadeiramente colapsáveis (VC): quando $\sigma_{vps} < \sigma_{v0}$ e $C < 0$;
- b) Solos Condicionados ao Colapso (CC): quando $\sigma_{vpn} > \sigma_{v0}$ e $0 < C < 1$ e;
- c) Solos não colapsáveis: quando σ_{vpn} e C são iguais a 1.

Os ensaios Edométricos simples foram realizados, com tensões de carregamento 5kPa, 10kPa e 20kPa, depois inundada, e em 5kPa, 10kPa, 20kPa, 40kPa, 80kPa, 160kPa até 200kPa e depois inundada.

A Figura 126 apresenta os gráficos de tensão vertical de consolidação *versus* índice de vazios obtido através do ensaio Edométrico simples para as amostras estudadas, mostrando claramente as deformações sofridas pelos corpos de prova nas tensões máximas de inundação.

Figura 126 - Gráfico tensão vertical efetiva vs índice de vazios para as amostras da UFAL na profundidade de (a) 3,00m, (b) 5,35m, (c) para o HCOR, para as amostras da Grota da Moenda (d) topo da encosta, (e) meio da encosta, (f) base da encosta, para as amostras do Mutange (g) topo da encosta e (h) meio da encosta.



Fonte: A autora (2022).

A partir do ensaio edométrico simples, foi possível realizar a avaliação dos potenciais de colapso (PC) através das metodologias propostas por Jennings e Knight (1975) e Vargas (1978). A Tabela 29 apresenta o resultado destas classificações para as amostras analisadas.

Tabela 29 - Critério de Classificação de Jennings e Knigth (1975) e Vargas (1978).

Local	e_{200}		Δ_o	e_o	PC %	Class. por Jennings e Knigth (1975)	Class. por Vargas (1978)
	Natural	Inundado					
UFAL - 3,00m	0,71	0,66	0,05	0,808	2,77	Problema Moderado	Colapsível
UFAL - 5,35m	0,90	0,844	0,056	1,014	2,78	Problema Moderado	Colapsível
HCOR	0,80	0,583	0,217	0,933	11,21	Problema Grave	Colapsível
Moenda – Base da Encosta	0,69	0,63	0,05	0,781	3,09	Problema Moderado	Colapsível
Moenda – Meio da Encosta	0,81	0,76	0,06	0,931	2,98	Problema Moderado	Colapsível
Moenda - Topo da Encosta	0,91	0,65	0,26	1,046	12,81	Problema Grave	Colapsível
Mutange –Topo da Encosta	0,886	0,792	0,093	1,071	4,51	Problema Moderado	Colapsível
Mutange –Meio da Encosta	0,99	0,88	0,11	0,995	5,66	Problemático	Colapsível

Fonte: A autora (2022).

De acordo com a Tabela 4.15, observa-se que os solos da UFAL nas profundidades de 3,00m e 5,35m, a base e meio da Grota da Moenda e o topo da encosta do Mutange apresentaram problemas moderados de colapsividade, com PC entre 1% - 5%. Os maiores problemas de colapsividade encontram-se no topo da Grota da Moenda e na amostra do HCOR, que obtiveram PC de 12,81% e 11,21 respectivamente, classificados com problemas graves de colapsividade.

A Tabela 30 apresenta os parâmetros e a classificação pelo coeficiente de colapsividade proposto por Reginatto e Ferrero (1973).

Tabela 30 - Critério de Classificação de Reginatto e Ferrero (1973).

Local	Profundidade (m)	σ_{v0} (kPa)	σ_{vpn} (kPa)	σ_{vos} (kPa)	Coefficiente de Colapsibilidade	Classificação
					C	
UFAL	3,00	39,06	110,00	60,00	0,30	Cond. ao Colapso
UFAL	5,35	66,61	290,00	160,00	0,42	Cond. ao Colapso
HCOR	1,50	20,57	110,00	28,00	0,063	Cond. ao Colapso
Moenda – Base da Encosta	2,10	33,16	110,00	61,00	0,36	Cond. ao Colapso
Moenda – Meio da Encosta	2,05	25,48	81,00	32,00	0,12	Cond. ao Colapso
Moenda - Topo da Encosta	2,55	32,10	92,00	18,00	-0,24	verd. colapsáveis
Mutange – Topo da Encosta	2,05	25,11	92,00	37,00	0,18	Cond. ao Colapso
Mutange – Meio da Encosta	1,80	25,13	78,00	28,00	0,05	Cond. ao Colapso

Fonte: A autora (2022).

Como pode ser observado, o Topo da encosta da Grota da Moenda se destaca como solo verdadeiramente Colapsível, as demais amostras foram classificadas como condicionadas ao colapso.

Foram determinados ainda os potenciais de colapso para as tensões verticais aplicadas durante o carregamento do ensaio edométrico duplo, a partir da diferença entre as deformações sofridas pelas curvas do ensaio nas condições naturais e inundadas para as tensões de 5kPa, 10kPa, 20kPa, 40kPa, 80kPa, 160kPa, 320kPa, 640kPa e 1280kPa. A Tabela 31 apresenta os valores obtidos para as amostras analisadas.

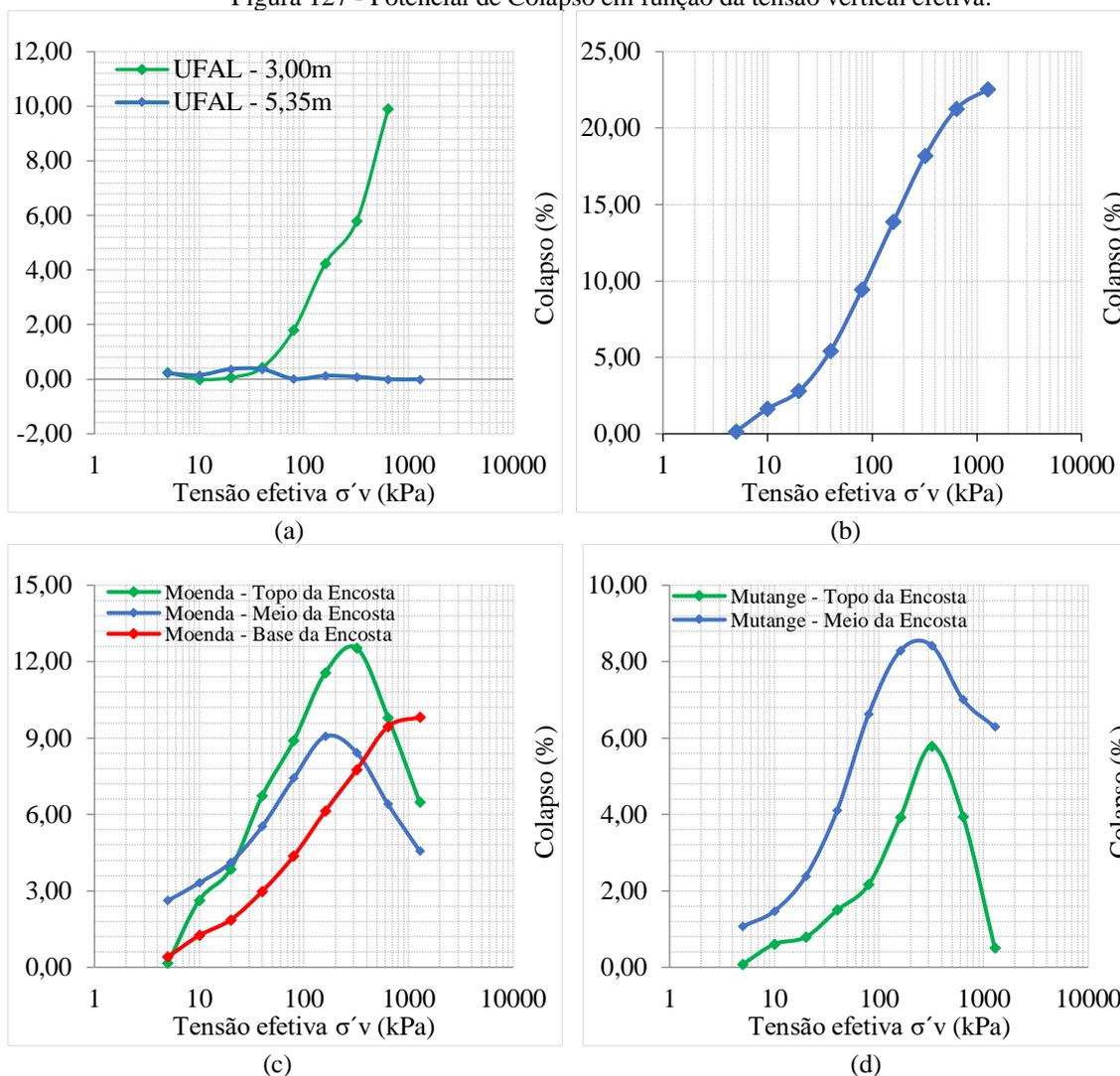
Tabela 31 - Potencial de colapso nas tensões aplicadas.

Amostra	Prof. (m)	Potenciais de Colapso nas tensões verticais de inundação								
		5 kPa	10 kPa	20 kPa	40 kPa	80 kPa	160 kPa	320 kPa	640 kPa	1280 kPa
UFAL	3	0,25	0,00	0,06	0,42	1,80	4,23	5,79	9,91	10,26
UFAL	5,35	0,22	0,15	0,37	0,37	0,02	0,13	0,09	0,00	0,00
HCOR	1,50	0,16	1,65	2,80	5,43	9,46	13,90	18,18	21,27	22,54
Moenda - Topo da Encosta	2,55	0,15	2,63	3,85	6,72	8,89	11,56	12,53	9,80	6,48
Moenda – Meio da Encosta	2,05	2,61	3,31	4,11	5,53	7,41	9,06	8,43	6,39	4,56
Moenda – Base da Encosta	2,1	0,40	1,25	1,86	2,98	4,36	6,12	7,75	9,45	9,82
Mutange – Topo da Encosta	2,05	0,08	0,61	0,79	1,49	2,17	3,92	5,79	3,94	0,50
Mutange – Meio da Encosta	1,8	1,07	1,47	2,38	4,11	6,63	8,29	8,42	7,00	6,29

Fonte: A autora (2022).

A Figura 127 apresentam os gráficos do potencial de colapso em função da tensão vertical efetiva para as amostras da UFAL (a), HCOR (b), Grota da Moenda (c) e Encosta do Mutange (d).

Figura 127 - Potencial de Colapso em função da tensão vertical efetiva.



Fonte: A autora (2022).

Para os solos estudados na UFAL, foi observado que na camada de solo superior o potencial de colapso atingiu valores bem superiores em comparação com a amostra em maior profundidade. Na profundidade de 3,00m o potencial de colapso é crescente a partir da tensão de 40kPa até atingir a tensão máxima do ensaio, em 1280kPa, enquanto para a profundidade de 5,35m, há pouca variação do potencial de colapso para todas as cargas aplicadas. Na amostra analisada para o HCOR em uma profundidade de 1,50m, foi observado um alto potencial de colapso, crescente em todas as tensões aplicadas.

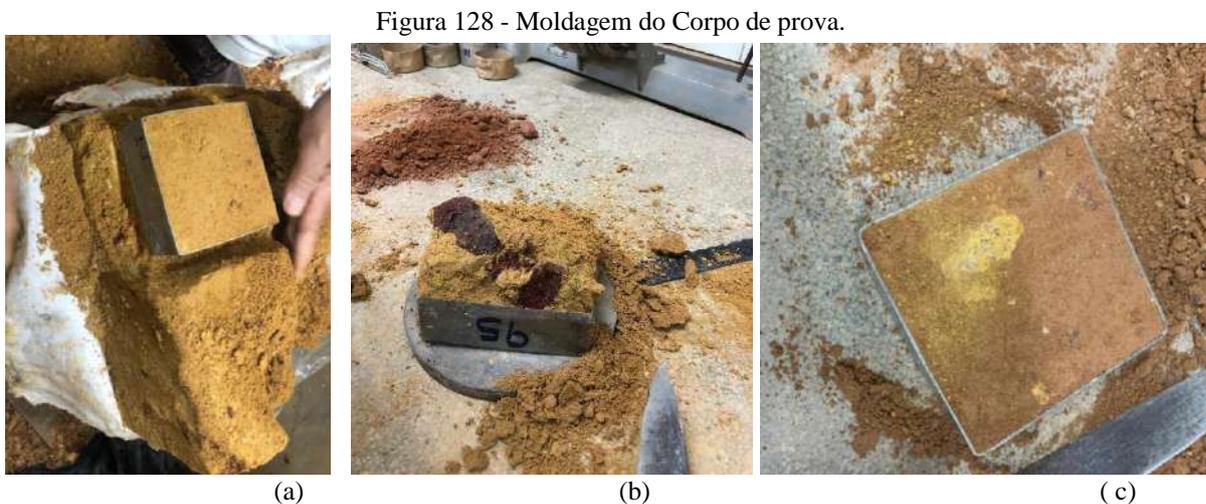
Para as amostras da Grota da Moenda, pode ser observado um potencial de colapso crescente com o aumento da tensão para a base da encosta. O topo e o meio da encosta apresentam colapso crescente até 320kPa e até 160kPa respectivamente, com uma ligeira redução nas tensões superiores. Este mesmo comportamento também foi observado nas amostras da Encosta do Mutange.

4.3.7 Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de Cisalhamento Direto é amplamente empregado para a determinação da resistência ao cisalhamento do solo, em que se aplica uma tensão normal, induzindo um plano preferencial, verificando-se a tensão cisalhante que provoca a ruptura. No Brasil, ainda não existe normas específicas para a realização deste ensaio, dessa forma, utilizou-se a norma americana D3080 (ASTM, 2020).

Os corpos de prova foram moldados através das amostras indeformadas, de seção quadrada, possuindo dimensões de 10,16cm de lado e 4,01cm de altura. Para cada bloco indeformado, foram extraídos 08 corpos de prova, destes 04 para o ensaio de cisalhamento na condição Natural e 04 para o ensaio na condição Inundado, sendo ainda realizado o ensaio de cisalhamento com reversão múltipla (residual).

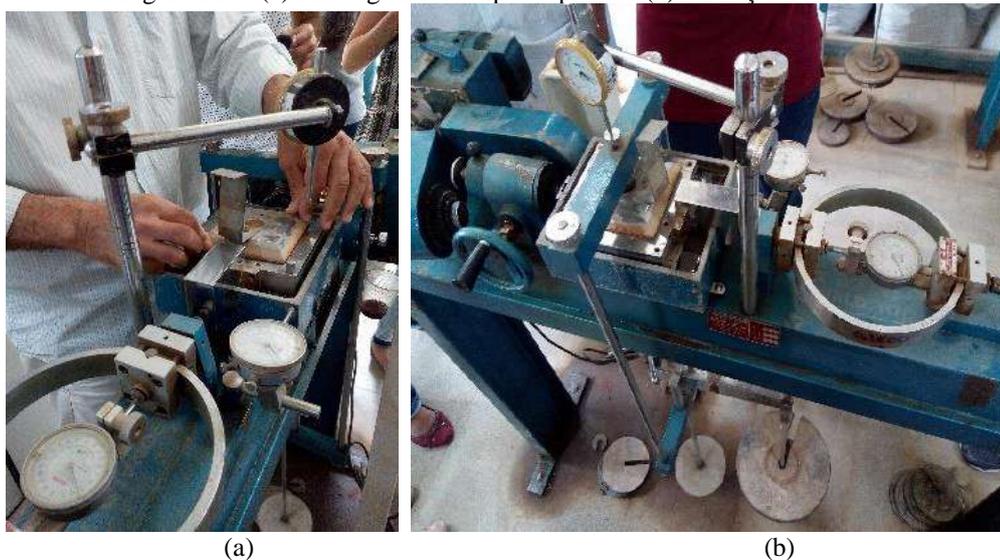
Algumas amostras possuíam presença de nódulos de argila e concreções ferruginosas de tamanhos variados, algumas mais resistentes, outras mais brandas, desmanchando ao serem pressionadas com as pontas dos dedos, o que em algumas situações dificultaram a moldagem dos corpos de prova. A Figura 128 apresenta a moldagem dos corpos de prova, com destaque para amostra da UFAL na profundidade 5,35m (b) e do meio da encosta do Mutange (c).



Fonte: A autora (2022).

Cada corpo de prova moldado foi ensaiado submetido a tensões normais distintas, sendo utilizadas para fins desta pesquisa, 25kPa, 50kPa, 150kPa e 300kPa. A Figura 129 apresenta a execução da etapa de cisalhamento.

Figura 129 - (a) Moldagem do Corpo de prova e (b) execução do ensaio.



Fonte: A autora (2022).

Na condição Natural, os corpos de prova foram submetidos a um período de adensamento de 1h. Após esse período, foi iniciado o cisalhamento, com uma velocidade de deslocamento de 0,025mm/min. Na condição Inundada, os corpos de prova passaram por um período de adensamento de 24h e seguiram a fase de cisalhamento com velocidade igual ao da condição natural.

O ensaio com reversão múltipla foi realizado para a obtenção da resistência residual do solo, em que após o cisalhamento dos corpos de prova na condição inundada, retornando a caixa de cisalhamento até a posição inicial, reiniciou-se o novo cisalhamento. Após a realização dos ensaios, as umidades finais dos corpos de prova foram determinadas através do método da estufa.

4.3.7.1 Resultados obtidos nos ensaios de Cisalhamento Direto.

Nas condições iniciais de ensaio, os corpos de prova não se apresentavam saturados e a umidade inicial variou entre 14% e 22% para as amostras analisadas. A Tabela 32 apresenta as condições iniciais dos corpos de prova para as amostras das Grotas da Moenda e Mutange e a Tabela 33 para as amostras coletadas na UFAL e HCOR.

Tabela 32 - Condições iniciais dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto das amostras da Grota da Moenda e Encosta do Mutange.

Local	Ensaio	Condições iniciais do Corpo de Prova					
		CP (n°)	σ_n (kPa)	W_0 (%)	γ_d (g/cm ³)	e_0	S_0 (%)
Grota da Moenda –Topo da Encosta	CDN	1	25	16,39	1,186	1,21	35,43
		2	50	16,37	1,184	1,22	35,32
		3	150	16,39	1,060	1,48	29,13
		4	300	16,41	1,175	1,23	34,92
	CDI	1	25	16,55	1,182	1,22	35,58
		2	50	16,49	1,186	1,21	35,70
		3	150	16,65	1,03	1,55	28,21
		4	300	16,66	1,183	1,22	35,89
Grota da Moenda –Meio da Encosta	CDN	1	25	21,17	1,225	1,14	48,73
		2	50	21,20	1,316	0,99	56,08
		3	150	21,14	1,295	1,02	54,22
		4	300	21,22	1,319	0,98	56,40
	CDI	1	25	19,58	1,189	1,20	42,67
		2	50	19,87	1,196	1,19	43,75
		3	150	19,60	1,435	0,82	62,32
		4	300	19,56	1,216	1,15	44,43
Grota da Moenda – Base da Encosta	CDN	1	25	16,42	1,539	0,74	59,53
		2	50	16,89	1,364	0,96	47,04
		3	150	16,40	1,348	0,98	44,59
		4	300	16,62	1,371	0,95	46,74
	CDI	1	25	16,42	1,267	1,11	39,52
		2	50	16,50	1,376	0,94	46,76
		3	150	16,47	1,374	0,95	46,54
		4	300	16,45	1,227	1,18	37,31
Mutange –Topo da Encosta	CDN	1	25	22,06	1,308	1,03	56,75
		2	50	22,07	1,313	1,03	57,21
		3	150	22,16	1,329	1,00	58,82
		4	300	22,70	1,311	1,03	58,7
	CDI	1	25	21,88	1,374	0,94	62,01
		2	50	21,31	1,32	1,02	55,67
		3	150	21,84	1,346	0,98	59,39
		4	300	21,67	1,327	1,01	57,21
Mutange –Meio da Encosta	CDN	1	25	15,79	1,367	0,95	44,37
		2	50	15,62	1,395	0,91	45,79
		3	150	15,63	1,373	0,94	44,35
		4	300	15,4	1,356	0,96	42,57
	CDI	1	25	15,72	1,339	0,99	42,4
		2	50	15,69	1,29	1,06	39,3
		3	150	15,78	1,422	0,87	48,19
		4	300	15,72	1,357	0,96	43,54

Fonte: A autora (2022).

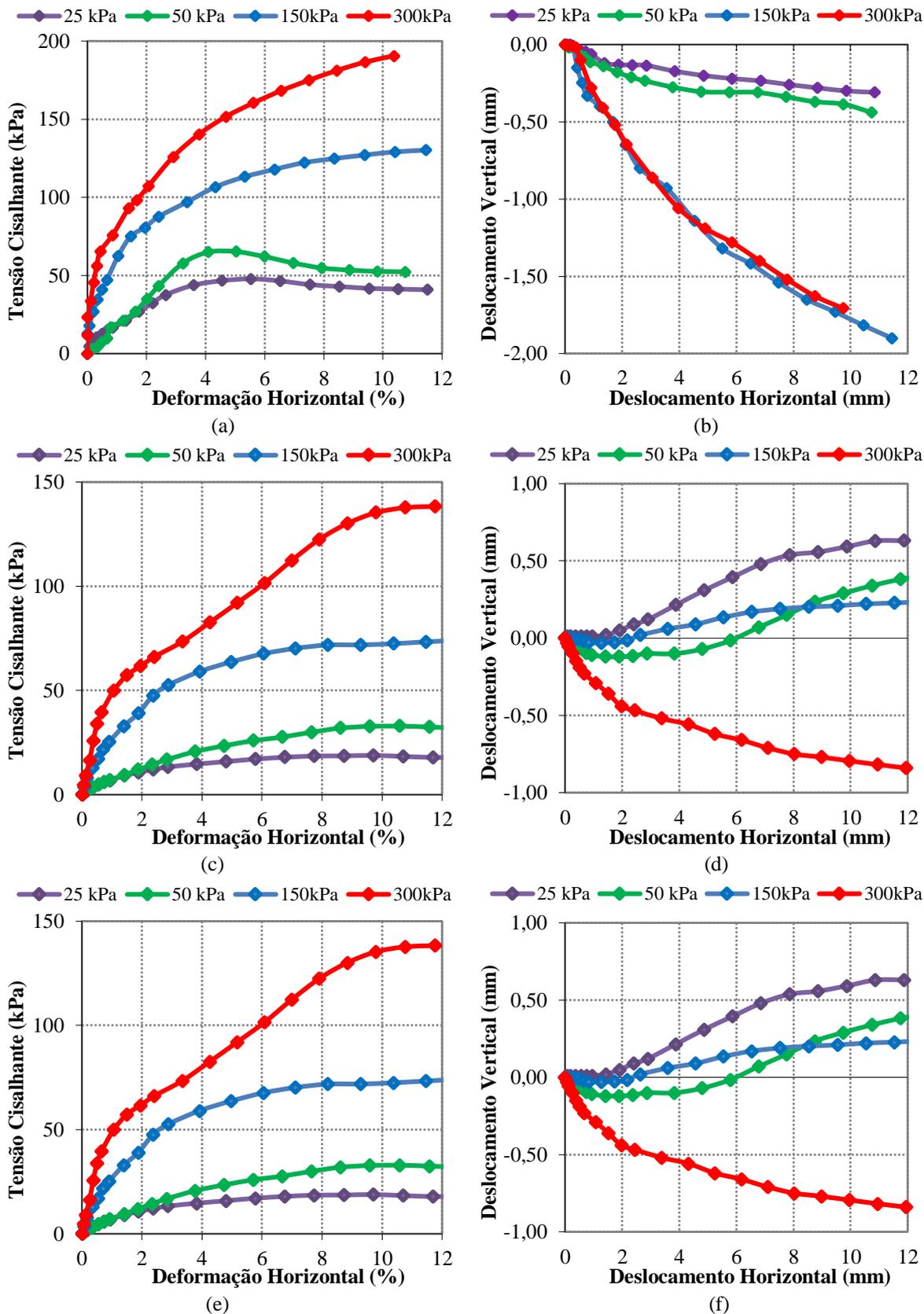
Tabela 33 - Condições iniciais dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto UFAL e HCOR.

Local	Ensaio	Condições iniciais do Corpo de Prova					
		CP (nº)	σ_n (kPa)	W_0 (%)	γ_d (g/cm ³)	e_0	S_0 (%)
UFAL – 3,00m	CDN	1	25	17,71	1,356	0,91	50,55
		2	50	17,74	1,208	1,14	40,20
		3	150	17,80	1,499	0,72	63,50
		4	300	17,79	1,325	0,95	48,36
	CDI	1	25	22,69	1,282	1,02	57,73
		2	50	22,56	1,313	0,97	60,19
		3	150	22,63	1,354	0,91	64,35
		4	300	22,66	1,352	0,91	64,29
UFAL – 5,35m	CDN	1	25	17,01	1,256	1,13	40,24
		2	50	17,08	1,501	0,78	58,35
		3	150	16,65	1,584	0,69	65,73
		4	300	17,02	1,480	0,81	56,29
	CDI	1	25	21,20	1,404	0,91	62,60
		2	50	21,22	1,299	1,06	53,52
		3	150	21,17	1,360	0,97	58,52
		4	300	21,16	1,235	1,17	48,49
HCOR – Prof. 1,50m	CDN	1	25	14,09	1,472	0,78	47,50
		2	50	14,12	1,410	0,85	43,22
		3	150	14,28	1,390	0,88	42,40
		4	300	14,12	1,676	0,56	65,98
	CDI	1	25	21,55	1,314	0,99	56,97
		2	50	21,92	1,200	1,118	48,62
		3	150	21,12	0,985	1,65	33,40
		4	300	20,98	1,316	0,99	55,65

Fonte: A autora (2022).

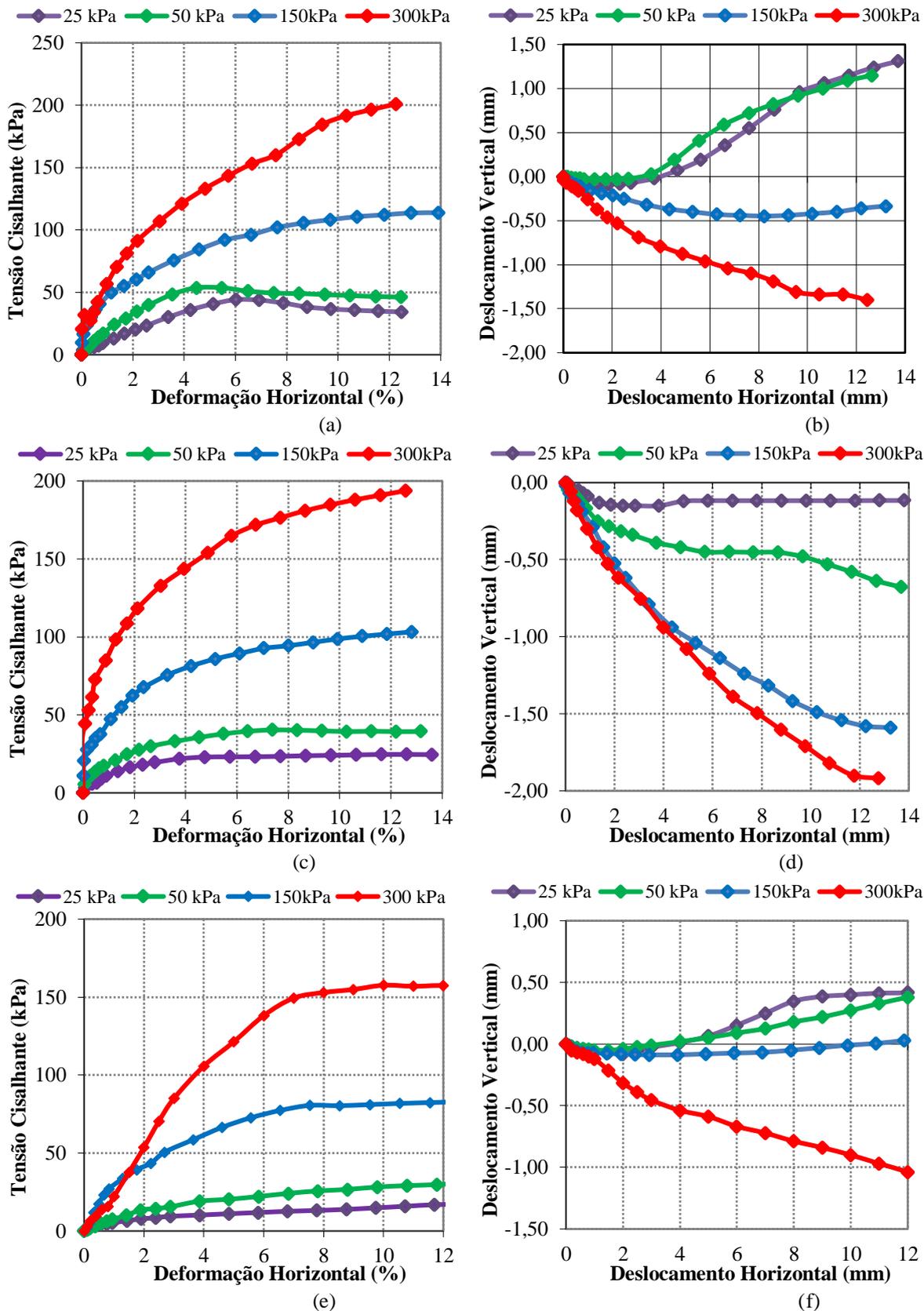
Para melhor compreensão dos resultados obtidos, são apresentados os gráficos de tensão cisalhante (τ) vs. deformação horizontal (dh) e deformação vertical (dv) vs. deformação horizontal (dh) nas condições natural, inundada e com reversão múltipla (“residual”), para as tensões de 25kPa, 50kPa, 150kPa e 300kPa das amostras da UFAL nas profundidades de 3,00m (Figura 130) e 5,35m (Figura 131), para o HCOR (Figura 132), Grota da Moenda topo (Figura 133), meio (Figura 134) e base (Figura 135) e Encosta do Mutange topo (Figura 136) e meio (Figura 137).

Figura 130 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra da UFAL - profundidade de 3,00m.



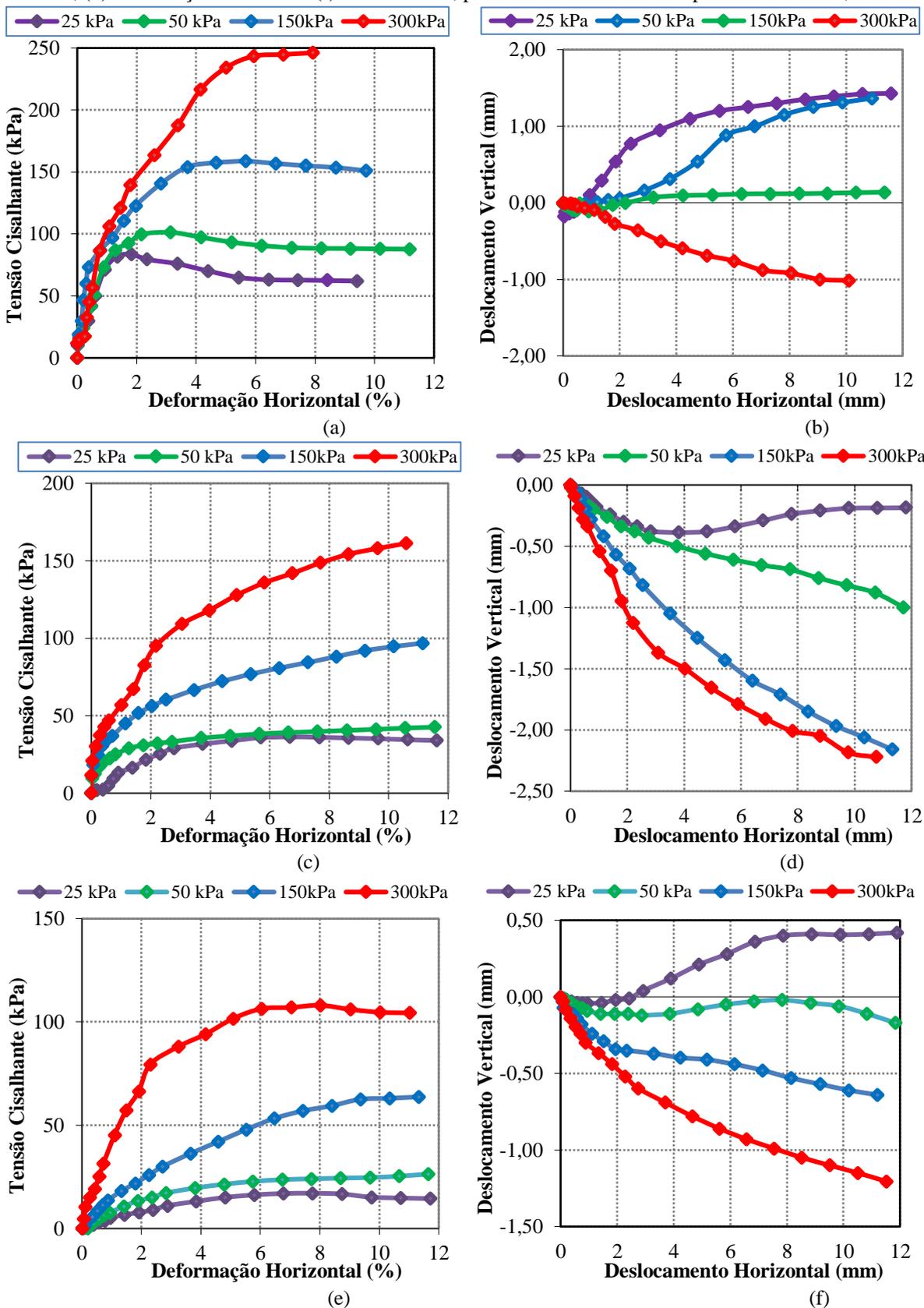
Fonte: A autora (2022).

Figura 131 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra da UFAL - profundidade de 5,35mm.



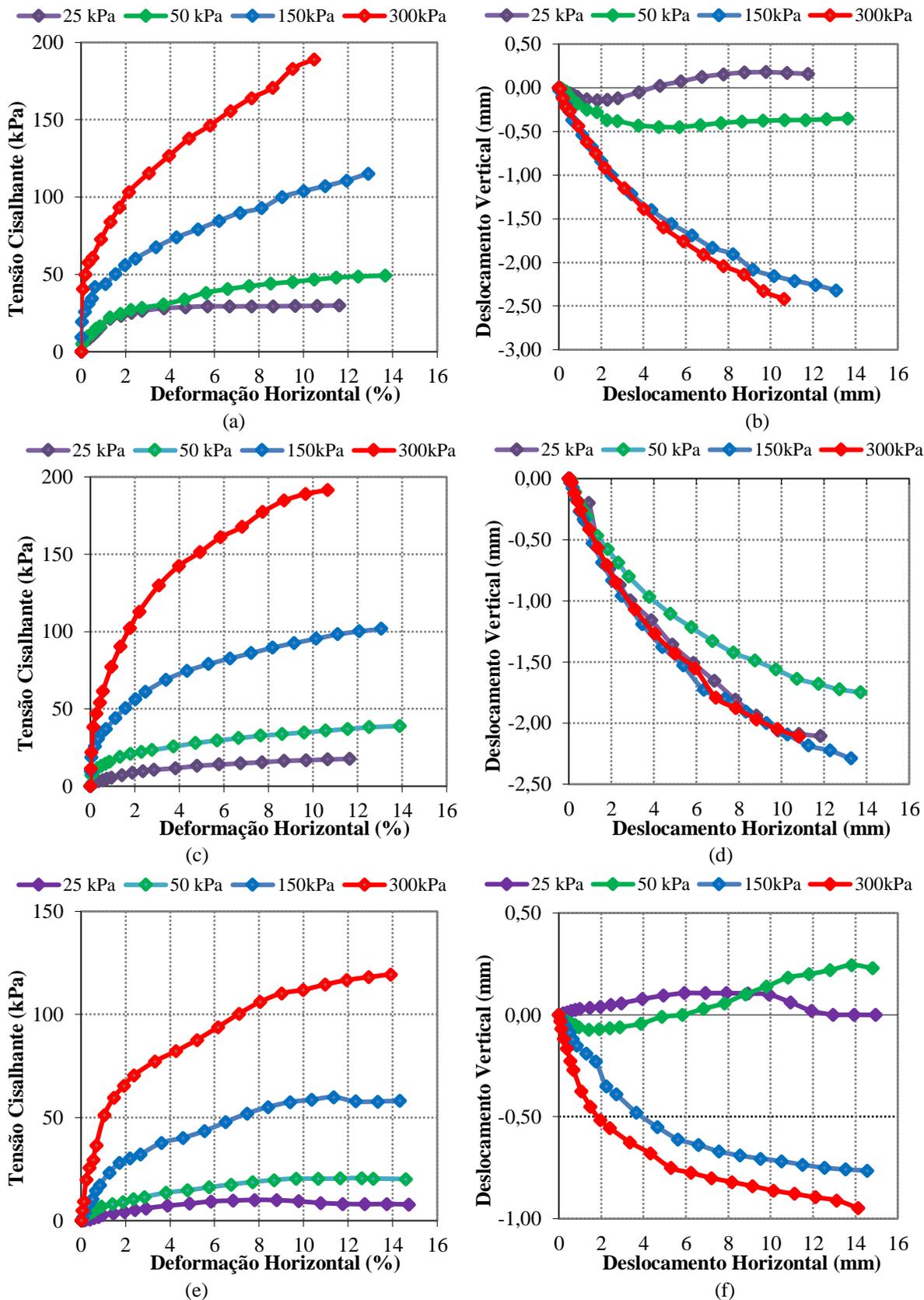
Fonte: A autora (2022).

Figura 132 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra do HCOR - profundidade de 1,50mm.



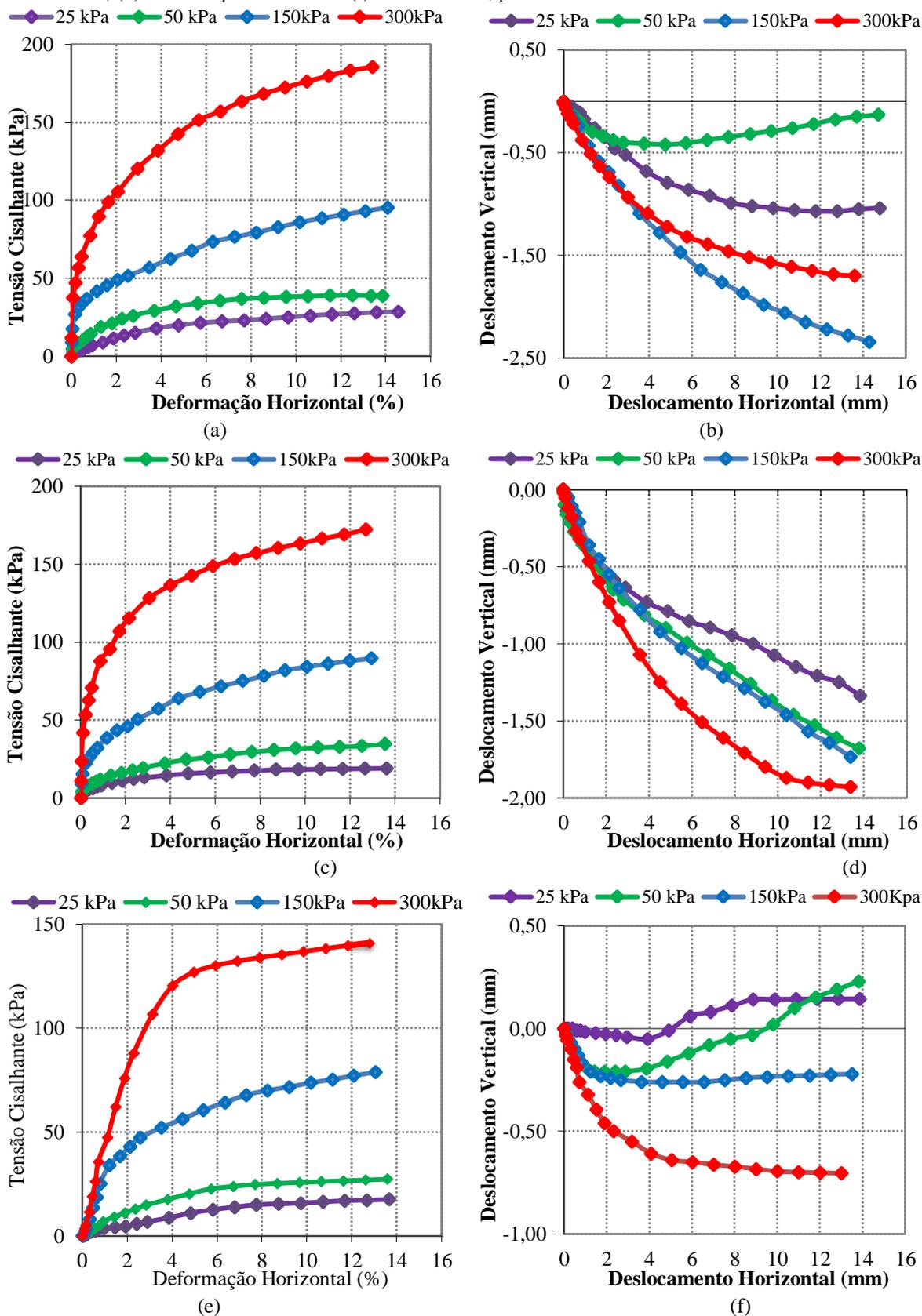
Fonte: A autora (2022).

Figura 133 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra do Topo da Grota da Moenda.



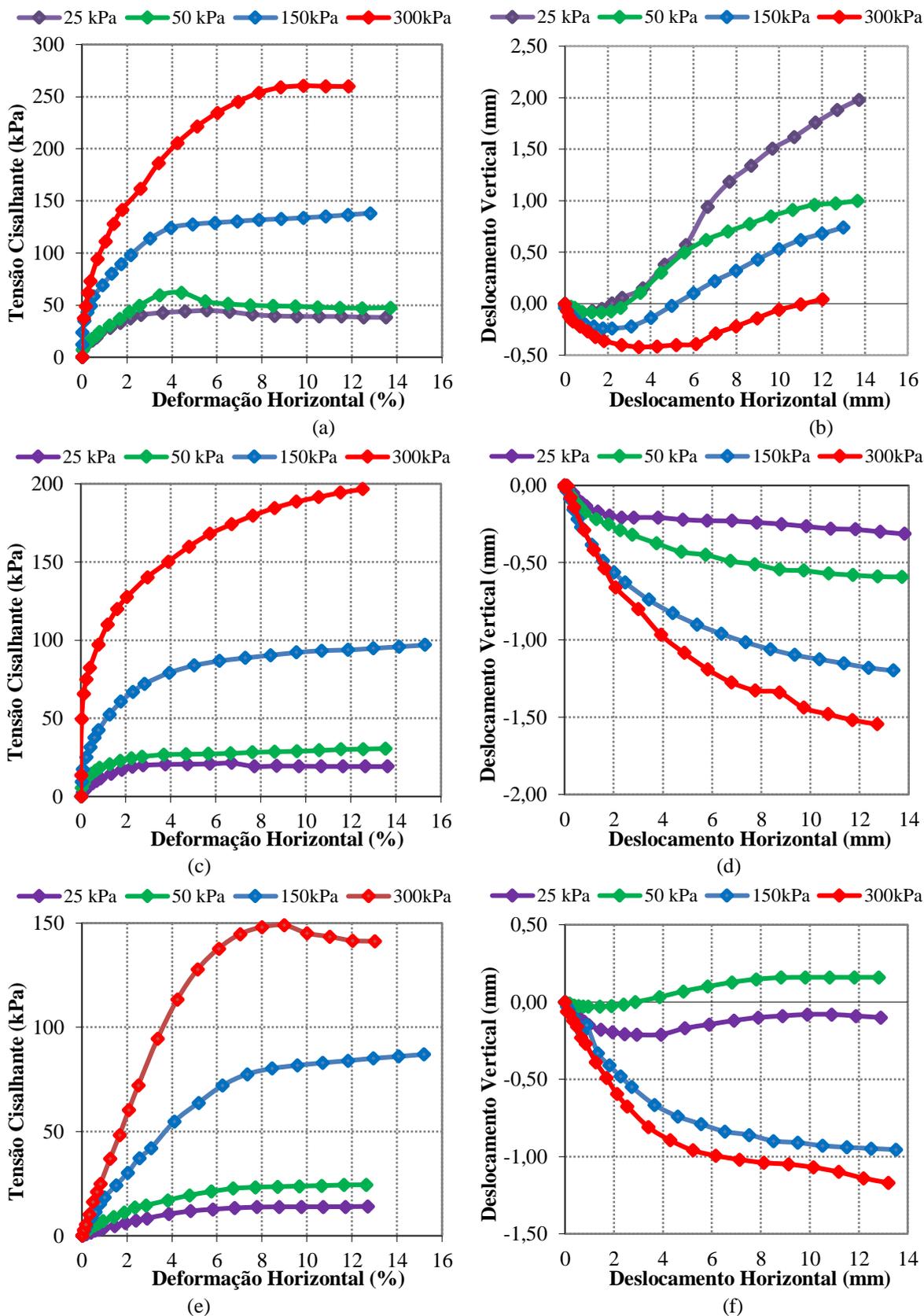
Fonte: A autora (2022).

Figura 134 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra do Meio da Grota da Moenda.



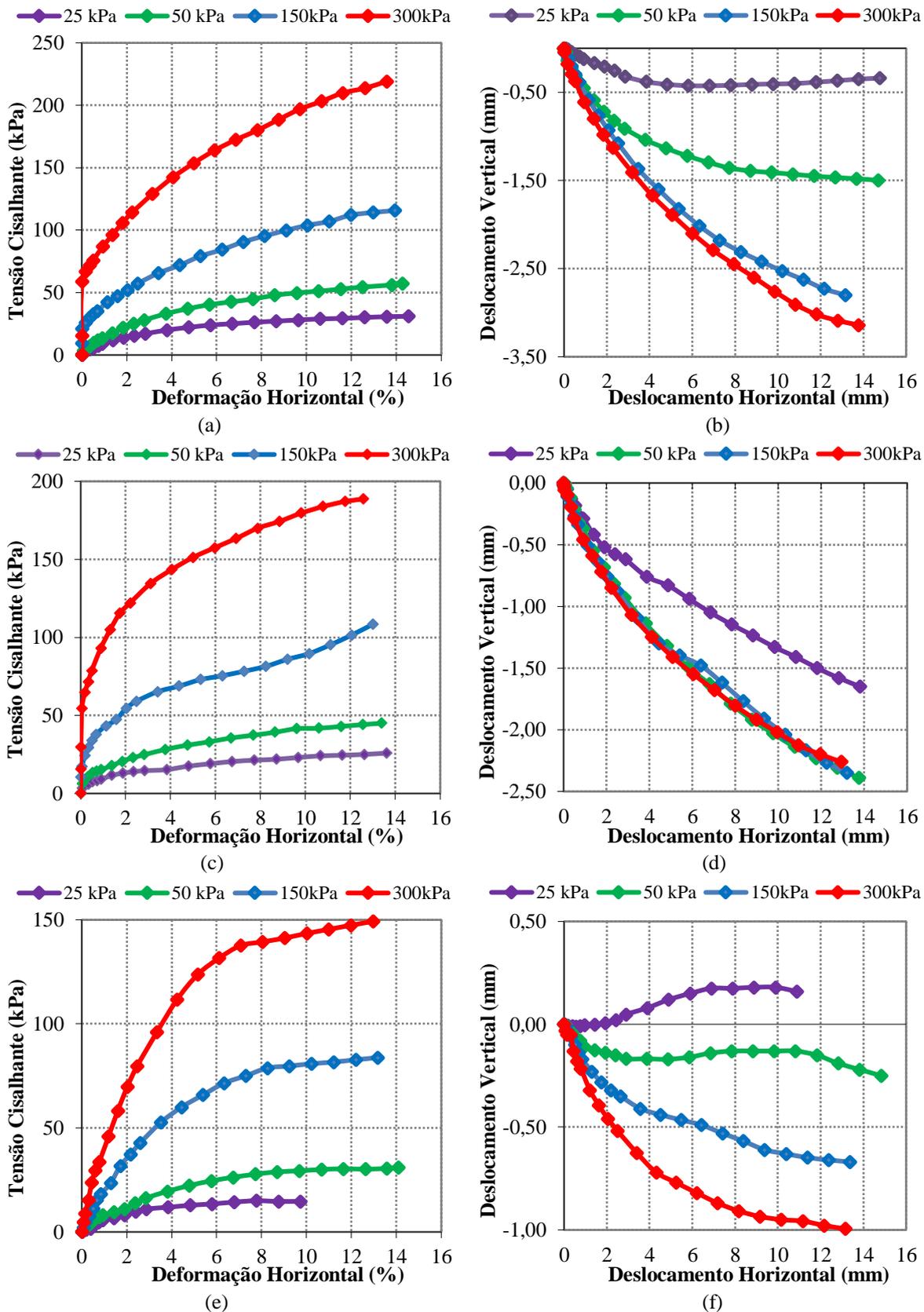
Fonte: A autora (2022).

Figura 135 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra da base da Grota da Moenda.



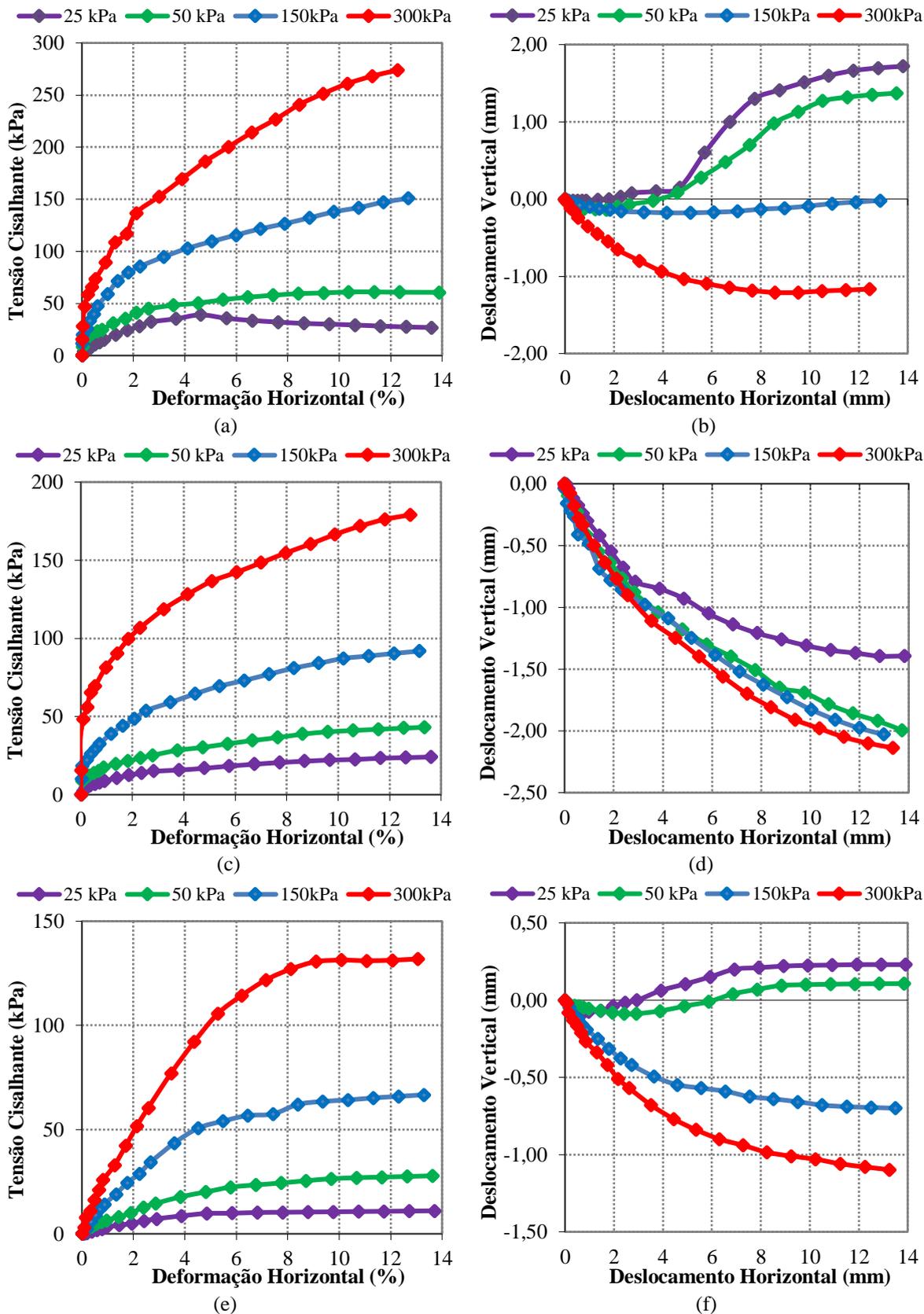
Fonte: A autora (2022).

Figura 136 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra do Mutange – Topo da Encosta.



Fonte: A autora (2022).

Figura 137 - Curvas Tensão Cisalhante vs. Deslocamento horizontal (a) na condição natural, (c) na condição inundada e (e) com reversão, e curvas Deslocamento Horizontal vs. Deslocamento Vertical (b) na condição natural, (d) na condição inundada e (f) com reversão, para a amostra do Mutange – Meio da Encosta.



Fonte: A autora (2022).

Os ensaios realizados na condição Natural para as amostras da UFAL, demonstram um crescimento da tensão cisalhante com o aumento do deslocamento horizontal sem demonstrar constância de valor, mostrando um comportamento de enrijecimento dos materiais. Foi observado um comportamento de compressão e leve expansão para as tensões de 50kPa e 150kPa para a camada de 3,00m de profundidade e 25kPa e 50kPa para a camada de 5,35m. O Aparecimento da resistência de pico foi apresentado nas tensões de 25kPa e 50kPa.

Para a amostra do HCOR na profundidade de 1,50m, foi observado resistência de Pico nas tensões de 25kPa e 50kPa na condição natural, observado compressão mais leve expansão nestas duas tensões. Na condição inundada, o comportamento observado foi somente de compressão para todas as tensões aplicadas, não havendo aparecimento de resistência de pico.

De forma semelhante, todos os ensaios realizados para as amostras coletadas na Grota da Moenda e encosta do Mutange demonstram um crescimento da tensão cisalhante com o aumento do deslocamento horizontal sem demonstrar constância de valor. As análises realizadas para as amostras coletadas no topo da encosta da Grota da Moenda, mostram compressão seguida de leve expansão apenas para a tensão de 25kPa na condição natural. Para as demais tensões ensaiadas o comportamento foi de compressão.

Para as amostras coletadas na base da encosta da Grota da Moenda foi observado um comportamento de compressão mais leve expansão para todas as tensões aplicadas, destacando o aparecimento da resistência de pico para as tensões de 25kPa e 50kPa na condição na condição natural. Para a condição Inundada, pode ser observado através da curva deformação vertical (dv) vs deformação horizontal (dh) um comportamento somente de compressão para todas as tensões, com aparecimento da resistência de pico para a tensão de 25kPa. Este comportamento é característico de solos com cimentação, o que pode ser comprovado através das características visuais da amostra que demonstram presença de concreções de óxido de ferro (laterita).

Comportamento distinto é apresentado para as amostras coletadas no meio da encosta da Grota da Moenda e no topo e meio da encosta do Mutange, em que não há definição de resistência de pico em nenhuma das tensões aplicadas, sendo observado um comportamento de compressão em todas as tensões, tanto para a condição natural como para a condição Inundada.

Este tipo de comportamento é característico de materiais que possuem comportamento plástico ou elasto-plástico, em que o solo se comporta de forma elástica até um certo valor de tensão a partir do qual toda deformação não elástica permanece. Nesse caso as tensões cisalhantes crescem ao longo dos deslocamentos, tendendo a atingir valores constantes. Para uma melhor compreensão, os parâmetros de resistência e os valores máximos obtidos nas condições de ruptura das amostras ensaiadas nas condições naturais e inundadas e residuais

estão apresentadas nas Tabelas 34, para as amostras da UFAL e HCOR|, Tabela 35 para as amostras da Grota da Moenda e Tabela 36 para as amostras da encosta do Mutange.

Tabela 34 - Valores máximos na condição de ruptura e parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para as amostras da UFAL e HCOR.

Amostra	Ensaio	CP (n°)	Condição de Ruptura Valores máximos					Parâmetros	
			σ_n (kPa)	dh (mm)	dv (mm)	σ_r (kPa)	τ_r (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
UFAL – Prof. 3,00m	CDN	1	25	5,611	0,910	26,461	47,86	35	30
		2	50	5,403	0,525	52,646	65,27		
		3	150	14,115	0,370	173,421	132,09		
		4	300	13,338	1,985	346,120	196,09		
	CDI	1	25	12,848	-0,328	28,62	20,23	8	29
		2	50	12,738	-0,457	57,17	34,82		
		3	150	12,446	-1,999	171,83	84,49		
		4	300	11,714	-1,878	340,42	174,71		
	CDR	1	25	9,707	0,500	27,85	18,82	0	20
		2	50	10,747	0,340	55,91	32,89		
		3	150	13,549	0,248	175,91	74,68		
		4	300	12,958	-0,849	343,86	138,84		
UFAL – Prof. 5,35m	CDN	1	25	6,615	0,360	26,737	44,12	26	30
		2	50	4,559	0,190	52,349	53,67		
		3	150	14,219	-0,310	174,827	114,84		
		4	300	13,422	-1,400	344,665	206,74		
	CDI	1	25	12,815	-0,116	28,61	24,61	10	28
		2	50	7,663	-0,452	53,98	40,36		
		3	150	14,256	-1,603	175,93	104,59		
		4	300	13,757	-1,930	341,41	196,42		
	CDR	1	25	14,877	0,083	14,00	11,00	0	13
		2	50	14,780	0,462	44,00	22,00		
		3	150	14,555	0,922	180,82	84,70		
		4	300	11,096	-1,138	336,78	157,30		
HCOR – Prof. 1,50m	CDN	1	25	1,85	0,54	25,503	83,56	25	31
		2	50	3,19	0,07	51,688	101,26		
		3	150	5,752	0,88	159,287	158,67		
		4	300	-1,018	11,09	336,76	249,23		
	CDI	1	25	6,781	-0,29	26,788	36,37	6	30
		2	50	13,725	-1,29	59,14	43,26		
		3	150	13,31	-2,268	168,49	100,63		
		4	300	12,751	-2,285	343,052	166,03		
	CDR	1	25	7,874	0,4	27,901	17,08	0	18
		2	50	13,826	-0,28	59,219	27,41		
		3	150	11,508	-1,205	164,193	63,71		
		4	300	8,145	-0,53	326,146	108,06		

Fonte: A autora (2022).

Tabela 35 - Valores máximos na condição de ruptura e parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para as amostras da UFAL.

Amostra	Ensaio	CP (n°)	Condição de Ruptura Valores máximos					Parâmetros	
			σ_n (kPa)	dh (mm)	dv (mm)	σ_r (kPa)	τ_r (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Grota da Moenda Topo da Encosta	CDN	1	25	14,77	0,130	29,25	30,74	18	31
		2	50	14,63	-0,344	58,41	49,57		
		3	150	14,07	-2,348	170,65	106,35		
		4	300	13,56	-2,598	346,21	193,18		
	CDI	1	25	14,815	-2,468	29,27	25,18	5	33
		2	50	14,718	-1,767	58,47	38,34		
		3	150	14,263	-2,325	170,95	85,25		
		4	300	13,797	-2,230	347,14	161,82		
	CDR	1	25	14,942	0,001	29,31	7,91	0	20
		2	50	14,818	0,230	56,96	20,20		
		3	150	14,542	-0,764	173,46	58,19		
		4	300	14,115	-0,947	348,40	119,48		
Grota da Moenda Meio da Encosta	CDN	1	25	14,791	-1,040	29,26	28,44	10	30
		2	50	12,706	-0,175	57,15	39,06		
		3	150	14,070	-2,340	174,56	95,38		
		4	300	13,618	-1,700	346,43	185,52		
	CDI	1	25	13,838	-1,337	28,44	19,05	7	29
		2	50	13,772	-1,678	56,26	33,25		
		3	150	13,386	-1,930	175,26	89,56		
		4	300	12,892	-1,562	338,14	172,08		
	CDR	1	25	13,865	0,145	28,83	17,60	0	23
		2	50	13,804	0,230	58,16	27,36		
		3	150	13,507	-0,221	177,95	78,86		
		4	300	13,005	-0,704	335,10	140,99		
Grota da Moenda Base da Encosta	CDN	1	25	5,636	0,568	26,47	44,80	25	34
		2	50	4,490	0,300	52,31	62,03		
		3	150	13,998	0,780	174,80	139,80		
		4	300	13,045	0,700	344,19	260,75		
	CDI	1	25	6,802	-0,230	26,55	21,34	5	33
		2	50	13,734	-0,592	56,69	30,61		
		3	150	13,367	-1,198	172,37	96,85		
		4	300	12,708	-1,545	336,81	196,47		
	CDR	1	25	12,894	-0,100	28,63	14,11	0	25
		2	50	12,816	0,160	57,22	24,48		
		3	150	13,513	-0,955	176,85	86,99		
		4	300	9,125	-1,050	329,60	149,01		

Fonte: A autora (2022).

Tabela 36 - Valores máximos na condição de ruptura e parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para as amostras da UFAL.

Amostra	Ensaio	CP (n°)	Condição de Ruptura Valores máximos					Parâmetros	
			σ_n (kPa)	dh (mm)	dv (mm)	σ_r (kPa)	τ_r (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Mutange - Topo da Encosta	CDN	1	25	14,772	-0,339	29,253	31,01	18	35
		2	50	14,685	-1,498	58,448	57,07		
		3	150	14,153	-2,838	174,552	115,7		
		4	300	13,778	-3,14	347,066	219,13		
	CDI	1	25	14,804	-1,73	29,264	26,67	8	32
		2	50	14,745	-2,46	58,488	46,24		
		3	150	13,198	-2,35	172,645	108,35		
		4	300	13,93	-2,299	347,667	192,2		
	CDR	1	25	10,888	0,16	28,001	14,58	0	24
		2	50	14,83	-0,25	58,546	30,85		
		3	150	13,381	-0,669	173,007	83,8		
		4	300	13,162	-0,995	351,963	149,22		
Mutange - Meio da Encosta	CDN	1	25	4,68	0,15	26,207	39	20	31
		2	50	11,535	1,32	56,404	60,98		
		3	150	12,88	-0,019	172,02	150,77		
		4	300	12,45	-1,165	341,896	273,8		
	CDI	1	25	13,821	-1,394	28,936	24,09	7	30
		2	50	13,735	-1,995	57,1	43,14		
		3	150	13,352	-2,137	174,034	91,85		
		4	300	13,99	-2,075	347,905	181,55		
	CDR	1	25	13,918	0,23	28,97	11,05	0	22
		2	50	13,845	0,107	57,89	27,82		
		3	150	13,508	-0,7	173,26	66,71		
		4	300	13,26	-1,098	345,03	131,92		

Fonte: A autora (2022).

Nas amostras da UFAL, o ensaio realizado na condição natural mostra que os valores de ângulo de atrito (ϕ') foram iguais para as duas profundidades, havendo uma queda do intercepto de coesão (c') para a profundidade de 5,35m. Para a condição inundada, observa-se uma perda de coesão, porém com ângulo de atrito próximo dos valores nas condições naturais. O mesmo ocorre para a amostra do HCOR na profundidade de 1,50m, que apresentou queda de coesão da condição natural para inundada de 25kPa para 6kPa, e pouca variação no ângulo de atrito.

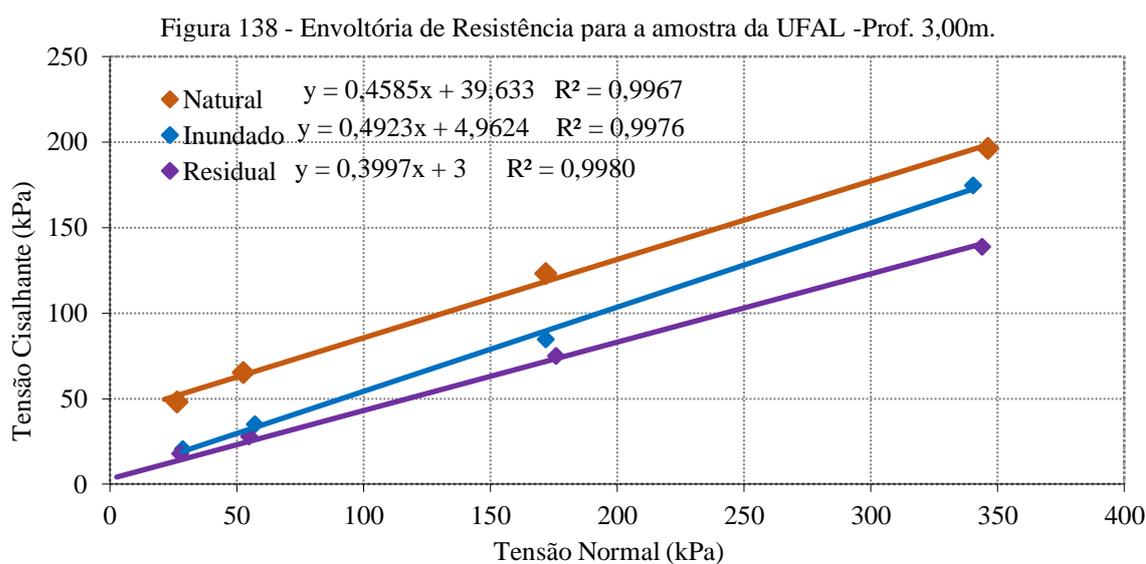
Para as amostras localizadas na Grota da Moenda observa-se maior resistência do solo localizado na base da encosta, que apresentou coesão de 25kPa na condição Natural, enquanto na mesma condição, os solos do meio e topo da encosta apresentaram 10kPa e 18kPa respectivamente. Há perda de coesão quando os solos são submetidos a condição inundada, porém com pouca variação do ângulo de atrito, verificada maior variação na amostra localizada

no topo da encosta, que apresentou valores de 31° na condição Natural e 25° na condição Inundada.

Para as amostras do Mutange, o topo da encosta apresentou menor coesão e maior ângulo de atrito na condição natural, quando comparada com a amostra do meio da encosta, porém com valores muito próximos. Na condição inundada, como esperado, ocorre redução da coesão, que apresentou valores de 8kPa para o topo da encosta e 7kPa para o meio da encosta, com pouca variação do ângulo de atrito.

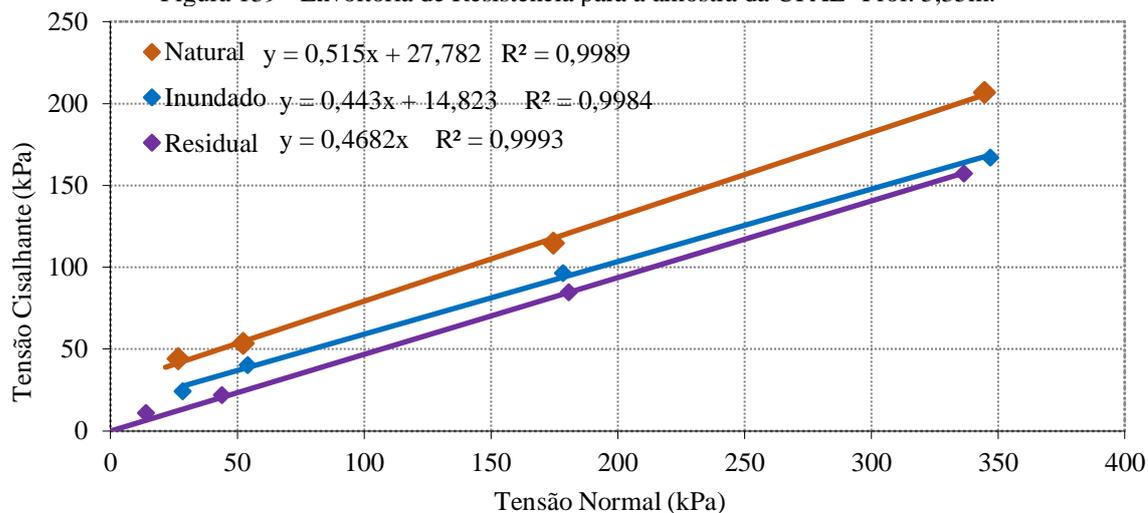
Esta condição de diminuição da coesão, quando comparado o ensaio realizado na condição natural com a condição inundada ocorre para todas as amostras e é esperada, uma vez que a literatura indica que apenas a coesão sofre influência da inundação devido ao efeito da sucção.

As envoltórias de Mohr-Coulomb representam as maiores tensões cisalhantes obtidas nos ensaios para cada tensão normal aplicada, e estão representadas para a amostra da UFAL na profundidade de 3,00m (Figura 138) e 5,35m (Figura 139), para a amostra do HCOR (Figura 140), para o topo (Figura 141), meio (Figura 142) e base (Figura 143) da Grota da Moenda, e topo (Figura 144) e meio (Figura 145) da encosta do Mutange. As envoltórias apresentam os parâmetros de resistência obtidos para os ensaios realizados na condição natural, inundada e para o ensaio com reversão múltipla (condição “residual”), realizados com os mesmos corpos de prova do cisalhamento inundado.



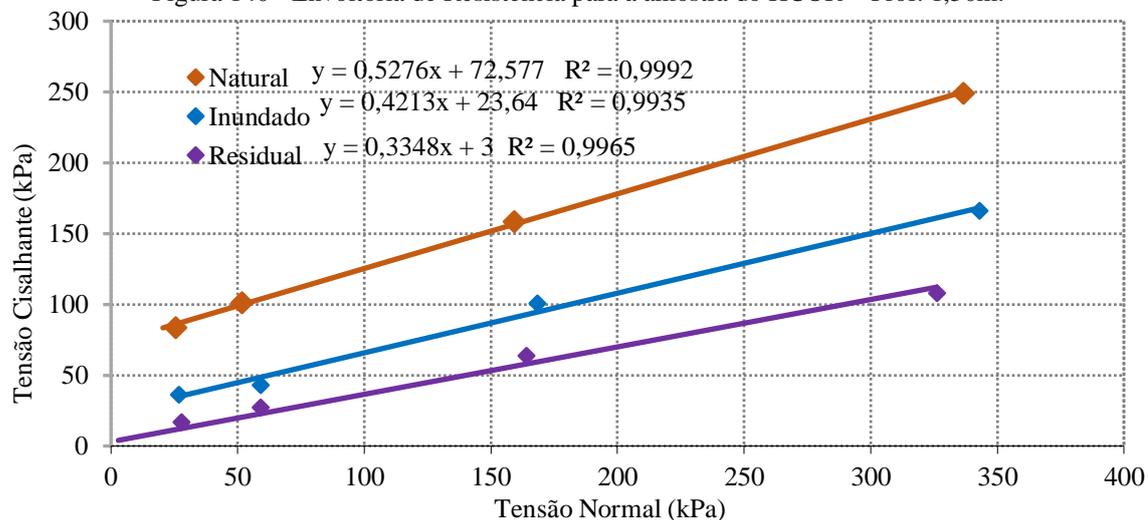
Fonte: A autora (2022).

Figura 139 - Envoltória de Resistência para a amostra da UFAL - Prof. 5,35m.



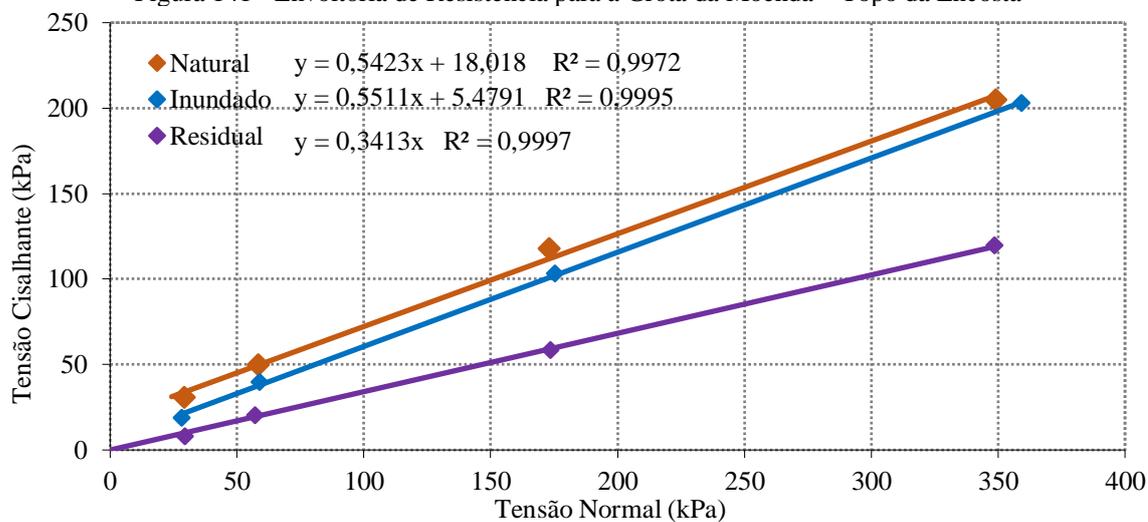
Fonte: A autora (2022).

Figura 140 - Envoltória de Resistência para a amostra do HCOR – Prof. 1,50m.



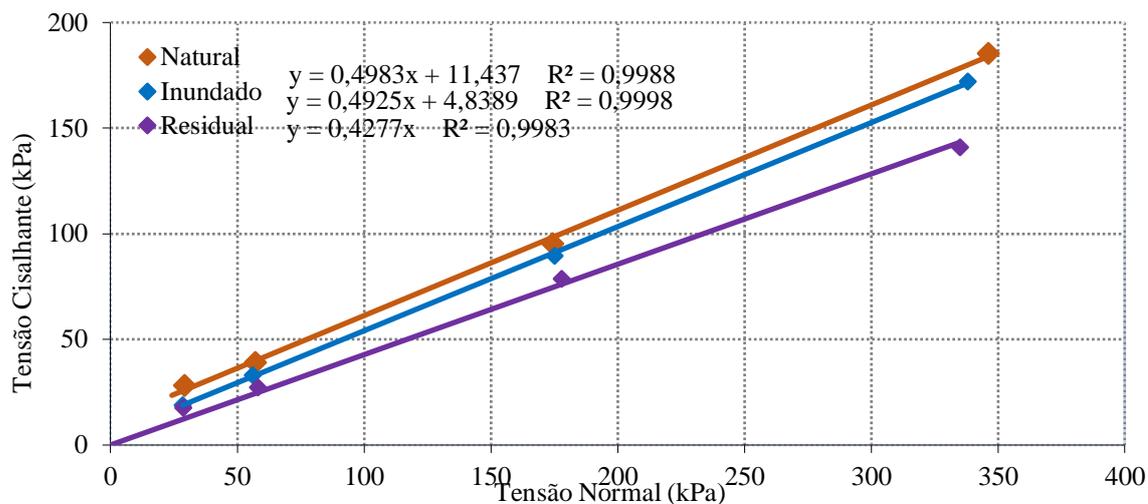
Fonte: A autora (2022).

Figura 141 - Envoltória de Resistência para a Grota da Moenda – Topo da Encosta



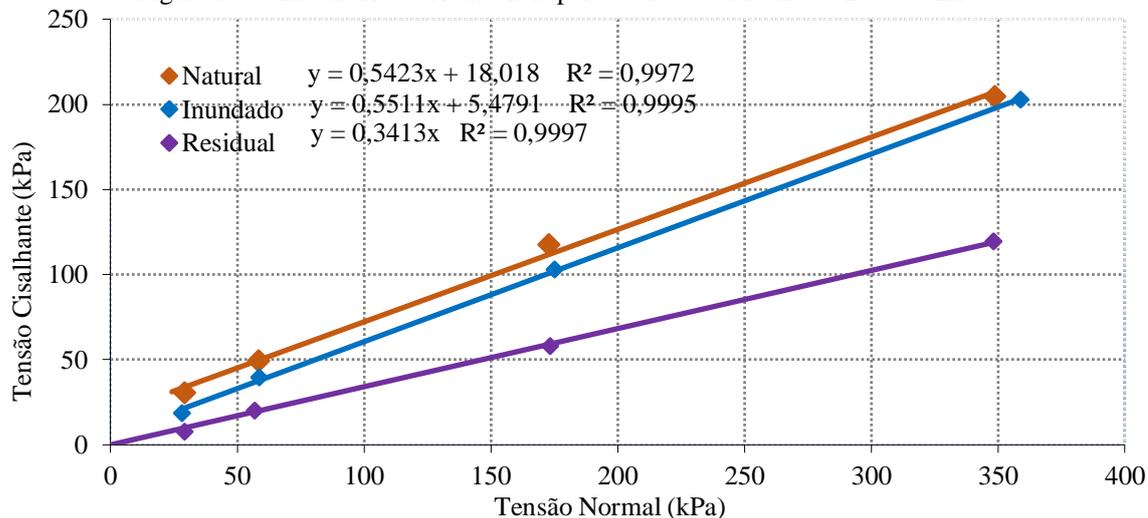
Fonte: A autora (2022).

Figura 142 - Envoltória de Resistência para a Grota da Moenda – Meio da Encosta



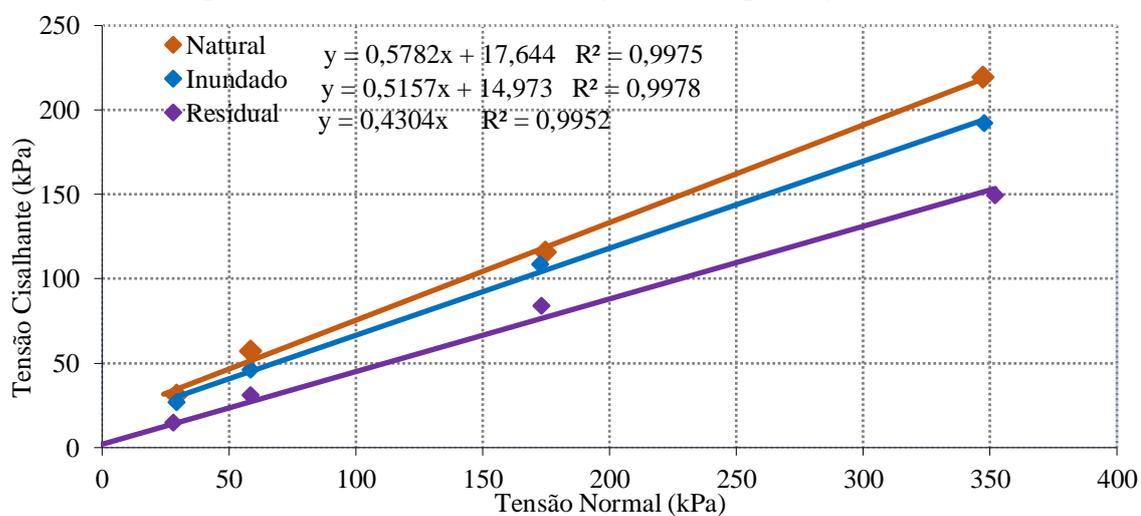
Fonte: A autora (2022).

Figura 143 - Envoltória de Resistência para a Grota da Moenda – Base da Encosta

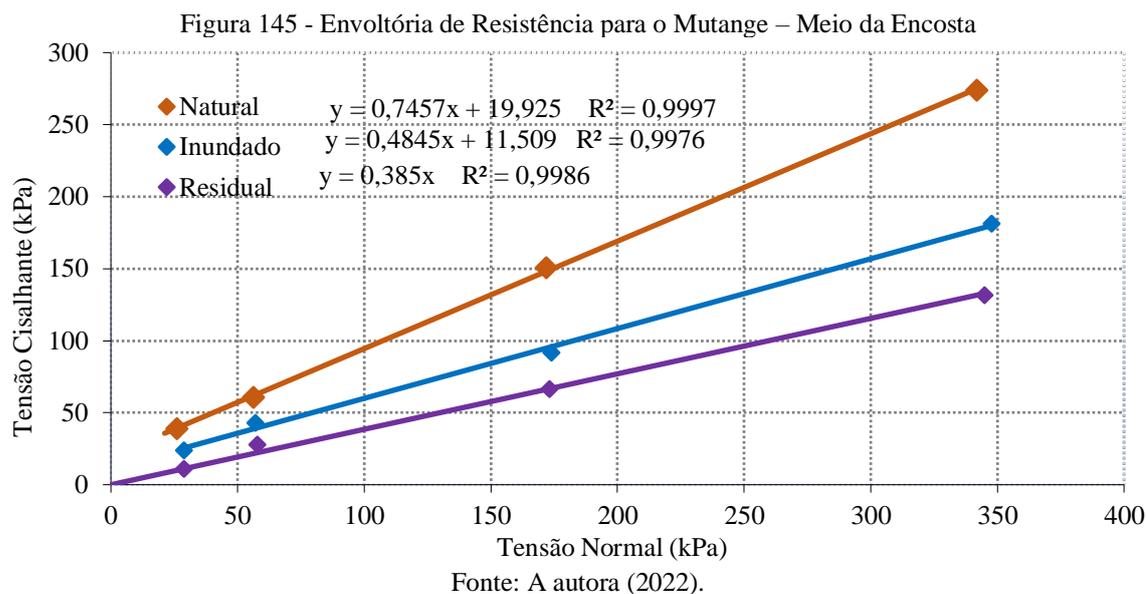


Fonte: A autora (2022).

Figura 144 - Envoltória de Resistência para o Mutange – Topo da Encosta



Fonte: A autora (2022).



Pode ser observado através das envoltórias de Mohr-Coulomb que a condição residual para todas as amostras ensaiadas não apresenta um paralelismo quando comparadas com a condição natural e inundada. Foi observada uma diminuição do ângulo de atrito residual, que variou entre 13° para a amostra da UFAL na profundidade de 5,35m, a 25°, para a amostra da Base da Encosta da Grota da Moenda. Esse comportamento observado de resistência residual das amostras (ângulo de atrito) é dependente da tensão normal efetiva, aumentando com as tensões normais aplicadas (BISHOP et. al., 1971)

4.3.8 Ensaio de Triaxial CID

O ensaio Triaxial pode ser considerado o mais completo para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, porém, este não possui normatização brasileira, sendo utilizada para a sua realização a norma internacional ASTM D 7181-11.

Uma característica importante deste tipo de ensaio é que o difere intrinsecamente do ensaio de cisalhamento direto, é o fato de não impor ao corpo de prova uma superfície de ruptura preferencial durante sua realização, possibilitando a ruptura no plano de maior fraqueza. Destaca-se ainda que as tensões principais (radial e axial) aplicadas neste ensaio impedem a rotação do corpo de prova durante o cisalhamento.

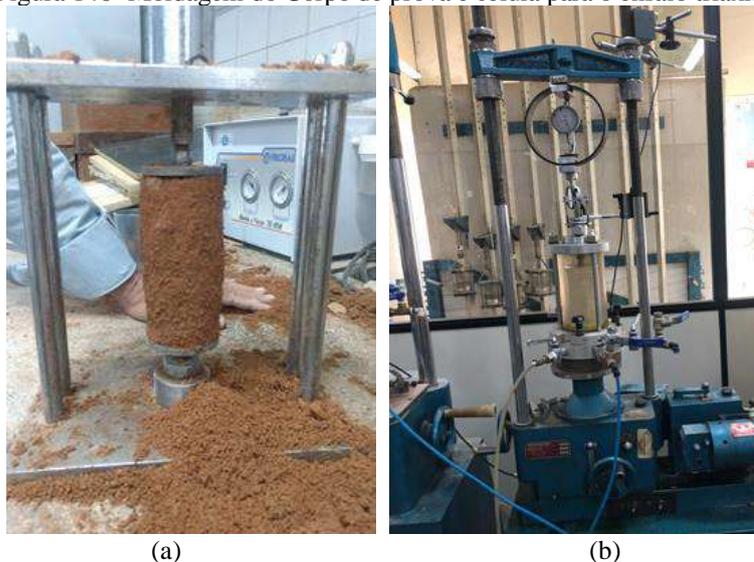
Pinto (2006) descreve o ensaio triaxial convencional consistindo na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico do solo. Após a moldagem, o corpo de prova é envolvido por uma membrana plástica e inserido dentro de uma câmara de ensaio, em que a célula é geralmente de acrílico transparente,

assentada sobre uma base de alumínio. Esta câmara é preenchida com água destilada e desareada, a qual se aplica uma pressão confinante (ou pressão de confinamento) do ensaio. Tal pressão atua em todas as direções, inclusive na vertical. Sendo assim, o corpo de prova fica sob um estado hidrostático de tensões.

Para análise da resistência do solo através do ensaio Triaxial, optou-se nesta pesquisa por realizá-lo na forma consolidada isotropicamente drenada (CID). Nesta condição, o corpo de prova é submetido a um processo de adensamento sob uma pressão confinante, por compressão do fluido da câmara em que as poropressões são dissipadas e que resulta em permanente drenagem do corpo de prova, uma vez que são colocadas pedras porosas consideradas permeáveis, na base e no topo deste. A percolação de água pela amostra é feita da base para o topo, expulsando o ar presente e preenchendo os espaços com água. De forma geral, a essa percolação ocorre em um tempo mínimo de 24 horas.

Para a realização do ensaio triaxial CID foram utilizadas amostras indeformadas. Para cada uma delas, foram moldados 04 corpos de prova cilíndricos de diâmetro 0,05m e altura de 0,10m na condição de umidade natural. O tempo de saturação das amostras foram entre 5 a 7 dias, após esse período iniciava-se o procedimento de cisalhamento do corpo de prova a partir da aplicação das tensões, e após o rompimento, eram feitas a exumação dos corpos de prova para determinação da umidade e saturação final após o ensaio. A Figura 146 apresenta (a) a moldagem do corpo de prova e (b) a célula triaxial com o ensaio em andamento.

Figura 146- Moldagem do Corpo de prova e célula para o ensaio triaxial.



Fonte: A autora (2022).

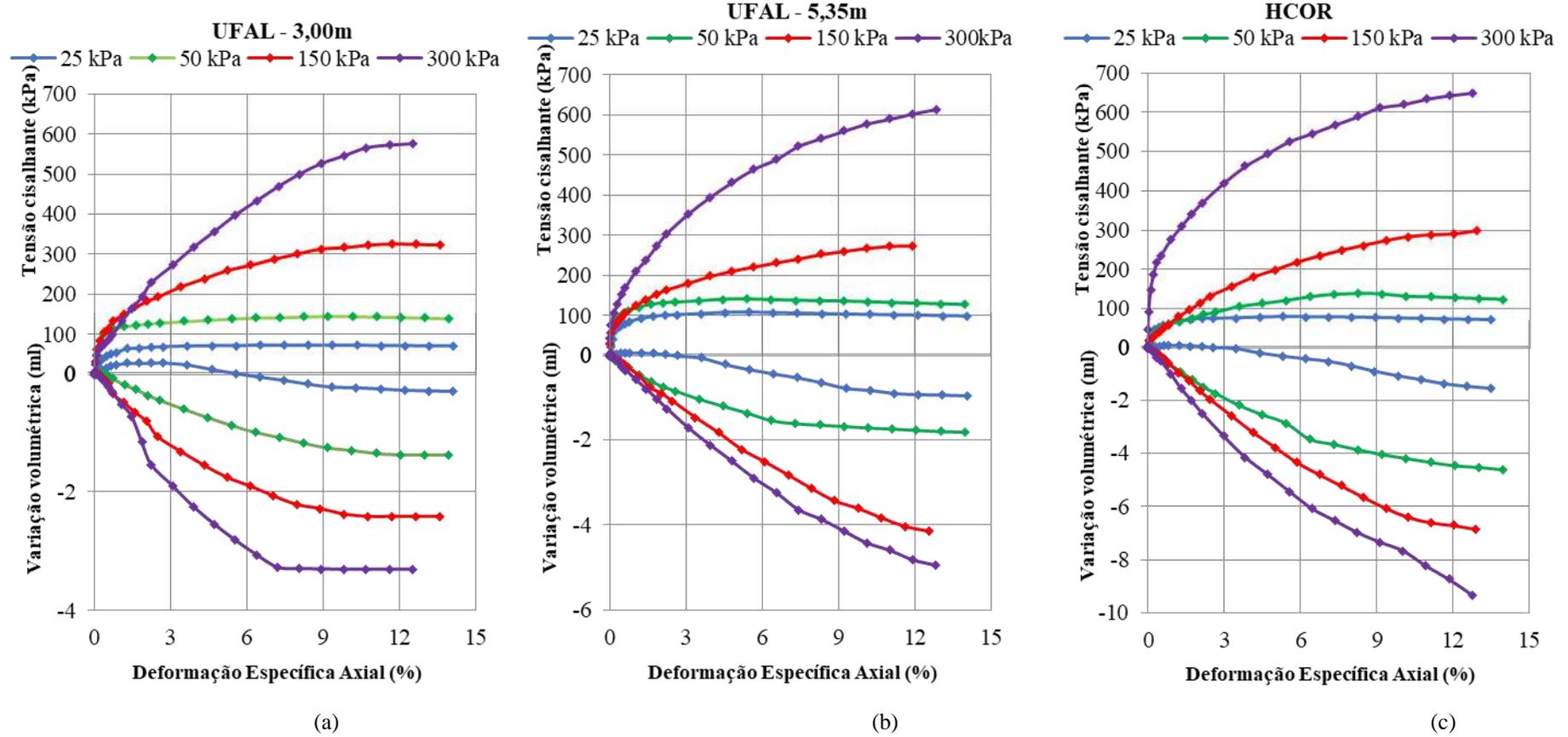
4.3.8.1 Resultados obtidos nos ensaios Triaxiais CID para as amostras da UFAL

Os resultados do ensaio Triaxial CID para as amostras estudadas são apresentados em termos de tensão cisalhante (τ) e variação volumétrica (dh) versus deformação axial (ε_a).

Foi observado que em todos os locais investigados que as maiores deformações ocorrem para as amostras impostas a maiores tensões, não sendo identificado aumento de volume em nenhum corpo de prova ensaiado. As maiores reduções de volume ocorreram nas amostras que se encontravam em maior tensão de confinamento, o que já era esperado, devido a possível expansão por alívio de tensão durante o processo de amostragem.

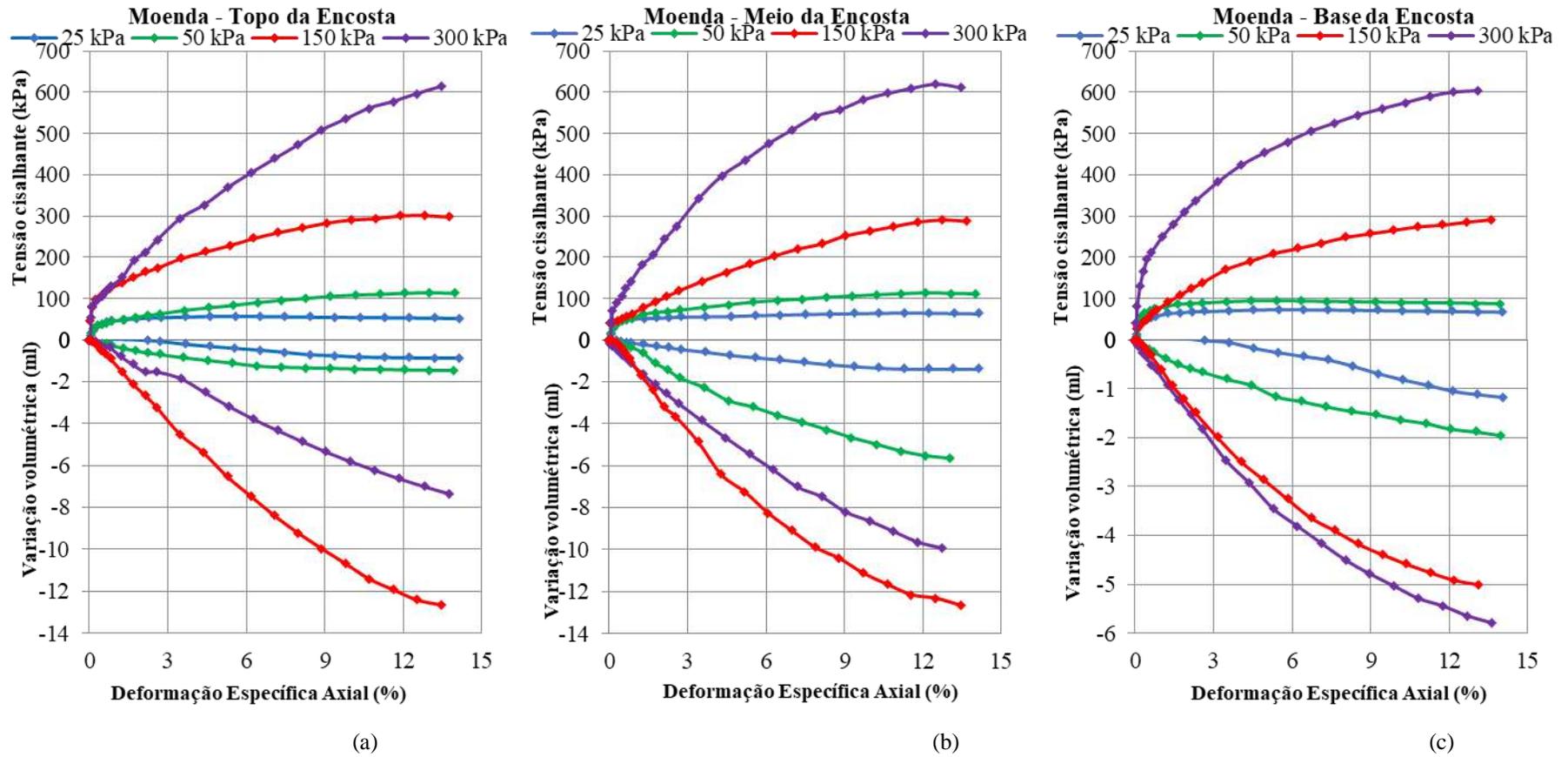
As Figuras apresentam as curvas de tensão cisalhante versus deformação horizontal e deformação vertical para as amostras da UFAL (Figura 147) na profundidade de 3,00m (a) e 5,35m (b) e para a amostra do HCOR (c), da Grota da Moenda (Figura 148) para o topo da encosta (a), meio da encosta (b) e base da encosta (c) e da encosta do Mutange (Figura 149) para o topo (a) e meio (b).

Figura 147 - Tensão cisalhante vs deformação horizontal e deformação vertical vs. deformação horizontal para as amostras da UFAL na profundidade de 3,00m (a) e 5,35m (b) e para a amostra do HCOR – prof. 1,50m (c).



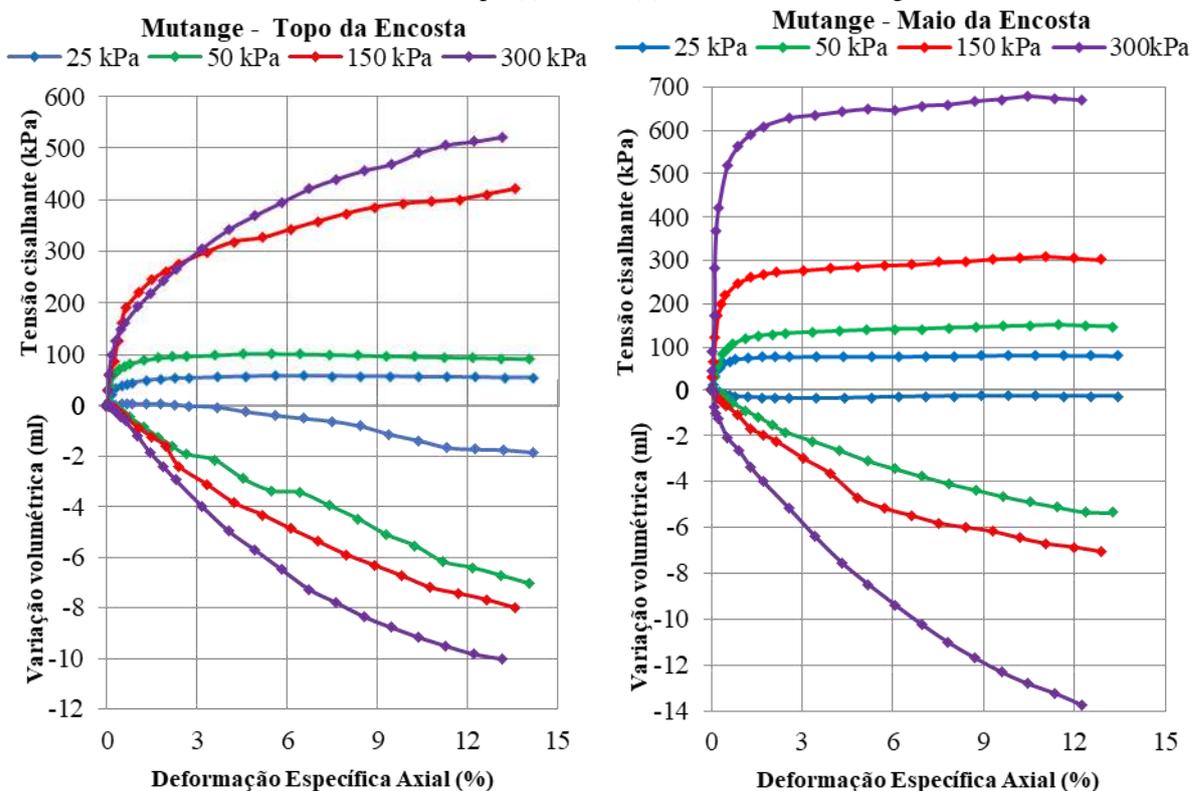
Fonte: A autora (2022).

Figura 148 - Tensão cisalhante vs deformação horizontal e deformação vertical vs. deformação horizontal para as amostras do Topo (a) e Meio (b) e Base (c) da Grota da Moenda.



Fonte: A autora (2022).

Figura 149- Tensão cisalhante vs deformação horizontal e Deformação vertical vs. Deformação horizontal para as amostras do Topo (a) e Meio (b) da encosta do Mutange.



(a)

(b)

Fonte: A autora
(2022).

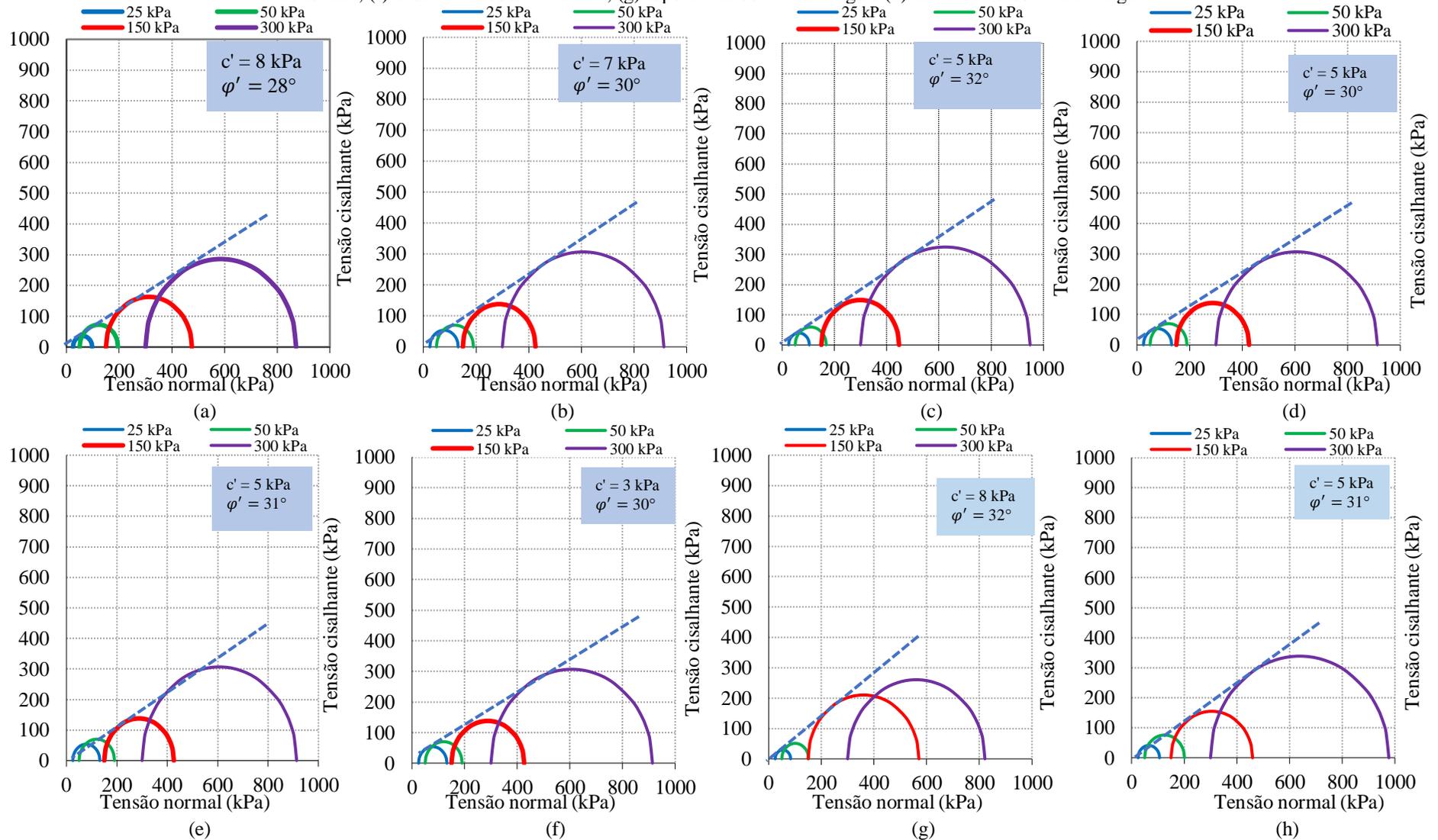
Todas as amostras analisadas possuem comportamento plástico para as tensões de 25 kPa e 50 kPa e enrijecimento para as tensões de 150 kPa e 300 kPa.

Nas amostras localizadas na UFAL, a profundidade de 5,35m apresentou maior variação volumétrica, comparada com a amostra na profundidade de 3,00m. A amostra do Hospital do coração- HCOR, extraída na profundidade de 1,50m apresentou comportamento semelhante, porém com maiores deformações volumétricas

Para as amostras localizadas na Grota da Moenda, foi observado que as maiores deformações volumétricas ocorrem no sentido topo-base da encosta, indicando aumento da deformação à medida que se chega na camada superior. Esse comportamento pode ser atribuído a maior percentagem de finos existentes no topo da encosta. Já as amostras localizadas na Encosta do Mutange, apresentam maior variação volumétrica para o meio da encosta.

A Figura 150 apresenta os gráficos das envoltórias de resistência das amostras estudadas.

Figura 150- Envolvórias de resistência para (a) amostra UFAL 3,00m, (b) amostra UFAL 5,35m, (c) amostra HCOR, (d) Topo da Encosta – Moenda, (e) meio da encosta – Moenda, (f) base da encosta – Moenda, (g) topo da encosta – Mutange e (h) meio da encosta – Mutange.



Fonte: A autora (2022).

Os parâmetros de resistência identificados nas amostras estudadas estão indicados na Tabela 37.

Tabela 37 - Parâmetros de resistência obtidos através do ensaio Triaxial.

Amostra	Int. de Coesão (c')	Ângulo de atrito (ϕ')
	(kPa)	(°)
UFAL- Prof. 3,00m	8	28
UFAL- Prof. 5,35m	7	30
HCOR- Prof. 1,0m	5	32
Moenda – Topo da Encosta	5	30
Moenda – Meio da Encosta	5	31
Moenda – Base da Encosta	3	30
Mutange – Topo da Encosta	8	32
Mutange – Meio da Encosta	5	31

Fonte: A autora (2022).

As maiores coesões foram obtidas para as amostras da UFAL na profundidade de 3,00m e para o topo da encosta do Mutange (8kPa), enquanto o menor valor de coesão encontrado se encontra na base da Encosta da Moenda (3kPa).

Foi observada pouca variação dos ângulos de atrito com valores entre 28° e 32°. Estes resultados corroboram com os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto na condição inundada, com valores ligeiramente inferiores obtidos durante o ensaio Triaxial, resultados já esperados uma vez que os modos de ruptura são diferentes para cada ensaio, pois diferentemente do cisalhamento direto, o ensaio Triaxial não impõe ao corpo de prova uma superfície de ruptura preferencial durante sua realização, possibilitando a ruptura no plano de maior fraqueza.

4.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA.

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias, os resultados e discussões acerca da investigação geotécnica de campo e laboratório aplicados à pesquisa. Na campanha de investigação de campo, foram realizados dois mapeamentos com RPA, quatro Sondagens SPT e coletados quinze blocos indeformados.

Nos ensaios granulométricos realizados com e sem adição de defloculante, foi observada a ocorrência de solos finos de predominância argilosa (entre 48 – 52%) de classificação SUCS CL (argila de baixa compressibilidade) e ML (silte de baixa compressibilidade), mostrando partículas agregadas de argila e silte, com destaque para a amostra localizada no HCOR, onde ocorreram percentuais equivalentes de argila e silte em torno de 30%. A permeabilidade dos solos apresentou valores da ordem de grandeza 10^{-6} m/s a

10^{-7} m/s para os locais investigados, com menor permeabilidade ocorrendo na Base da Encosta da Moenda.

Todas as curvas características apresentaram um comportamento bimodal, com dois pontos de entrada de ar, o primeiro menor que 10kPa e o segundo maior que 1.000kPa, com destaque para o comportamento distinto das amostras localizadas no Meio e na Base da Grota da Moenda, que quando comparadas com os demais locais apresentam comportamentos distintos.

O ensaio edométrico mostrou forte influência da inundação na deformação do solo, com maior rigidez na condição não saturada, com problema severo de colapso para as amostras do HCOR e Topo da Encosta na Grota da Moenda, conforme classificação proposta por Jennings and Knight, (1975).

Os ensaios de cisalhamento direto mostraram perda significativa de coesão do solo na condição saturada, quando comparada à condição natural, e praticamente não houve variação no ângulo de atrito. Na condição “residual” (inundado), o solo tem intercepto de coesão zero e o ângulo de atrito da ordem de 20° .

Os ensaios triaxiais CID-C, apresentados para os locais investigados, valores de coesão na faixa de 3kPa - 8 kPa, e ângulo de atrito entre 28° - 31° , coerentes e geralmente menores que os resultados encontrados em o teste de cisalhamento direto.

5 ANÁLISE DETALHADA E INTEGRADA DOS RESULTADOS OBTIDOS

Para a compreensão do comportamento dos sedimentos de Formação Barreiras na cidade de Maceió, se utilizou como subsídio técnicas de geoprocessamento para a integração, armazenamento e análise de dados pré-existentes, na esfera cartográfica e geotécnica, possibilitando a construção de um mapeamento geomorfológico, geológico e geotécnico, complementado pela investigação geotécnica detalhada em locais escolhidos para aprofundamento do conhecimento.

Dessa forma, este capítulo tem o objetivo de apresentar uma análise integrada entre os resultados obtidos nos capítulos anteriores, correlacionando-os entre si e com a literatura, trazendo um panorama geral do comportamento dos solos de Formação Barreiras em Maceió, e detalhando alguns aspectos específicos pela perspectiva dos locais investigados.

A primeira análise é realizada a partir dos resultados geoestatísticos obtidos, correlacionando as áreas estudadas e observando as similaridades e diferenças, destacando particularidades e as potencialidades desse mapeamento.

Em uma segunda análise, as características geotécnicas dos solos investigados em diferentes locais foram integradas, auxiliando na observação panorâmica dos resultados obtidos, ressaltando as particularidades de cada área e possibilitando uma compreensão das variações de comportamento de acordo com o tipo de solo investigado. As Unidades Geológicas de Engenharia (UGE) identificadas, foram associadas as características de solo encontradas na investigação geotécnica, em uma terceira etapa de análise, correlacionando os resultados obtidos.

5.1 SOBRE A VARIABILIDADE DOS VALORES NSPT ENCONTRADOS NAS ANÁLISES GEOESTATÍSTICA

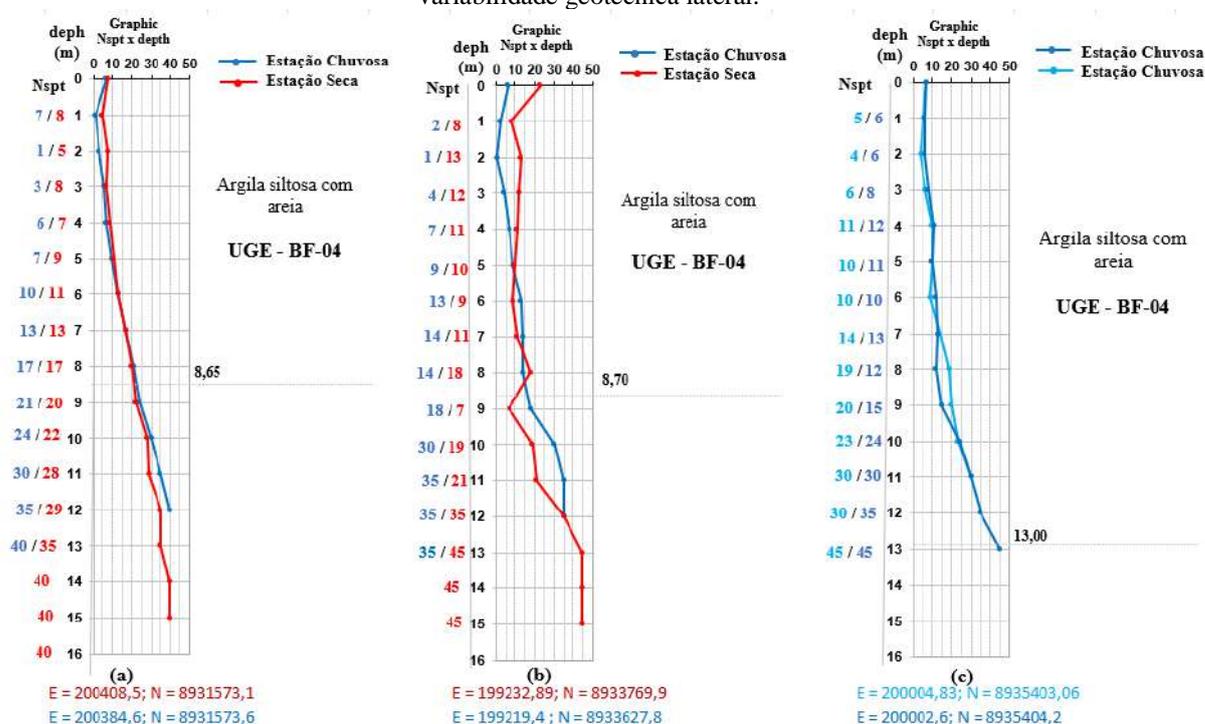
A variabilidade dos valores N_{spt} pode estar associada a vários fatores, como a variação do teor de água na zona não saturada, efeitos de sazonalidade, as propriedades físicas e mecânicas das unidades geológicas de engenharia identificadas, a variabilidade geotécnica lateral, à ocorrência de solos com potencial de colapsividade entre outros.

Os mapas probabilísticos demonstram uma área onde aparentemente o efeito da sazonalidade nos valores do N_{spt} se apresenta de forma mais acentuada, porém, em função das incertezas inerentes às estimativas geoestatística, a baixa disponibilidade e a limitada distribuição espacial dos registros SPT no período chuvoso, ainda são necessários estudos mais

detalhados para compreender os efeitos dessa variabilidade. Para auxiliar nessa compreensão, foram analisados individualmente e em pequenos grupos, registros de sondagens SPT próximas (entre 35,0m – 85,0m de distância entre si), nos períodos seco e chuvoso (Figura 151), localizadas espacialmente em ambiente SIG e oriundas do banco de dados SPT.

As análises demonstram uma redução dos valores de N_{spt} no período chuvoso em todas as áreas analisadas e, de uma maneira geral, ocorrem mais significativamente entre as profundidades de 0m – 4m, como apresentado nos exemplos de perfis “a” e “b” (Figura 151).

Figura 151 - Exemplos de sondagens SPT próximas espacialmente: (a) e (b) possível efeito da sazonalidade nos primeiros metros e possível variabilidade geotécnica lateral nas profundidades seguintes; (c) possível efeito da variabilidade geotécnica lateral.



Fonte: A autora (2022).

Considerando que as sondagens analisadas estão próximas e ocorrem na mesma UGE, supõe-se que esta variabilidade se dê em função da sazonalidade e não da heterogeneidade geotécnica lateral, sendo influenciada em função da variação de umidade pela infiltração ou ressecamento do solo. O perfil “c” (Figura 151), apresenta um exemplo em que as sondagens SPT próximas são ambas do período chuvoso, onde há ocorrência da mesma UGE e os valores de N_{spt} apresentam-se com pouca variabilidade entre si ao longo da profundidade e sem uma tendência específica.

As interpolações apresentaram maiores incertezas na região periférica das áreas estudadas, onde os registros de sondagens eram insuficientes ou inexistentes, o que limita um

olhar do comportamento da resistência a penetração Nspt na área domínio sob a ótica da geoestatística, em função da má distribuição espacial dos registros SPT. Apesar dessa dificuldade, fez-se a opção de realizar esse estudo, apresentando um grau de incertezas inseridas no mapeamento, oferecendo o máximo de informações possíveis, detalhando esse estudo em duas subáreas menores.

Todas as profundidades analisadas apresentaram homogeneidade de intervalos Nspt predominantes e uma síntese desses dados para as áreas analisadas são apresentadas na Tabela 38, contendo um resumo dos intervalos Nspt predominantes e percentual de área ocupada por este intervalo em cada área estudada para as profundidades analisadas.

Tabela 38 - Resumo dos valores Nspt predominantes encontrados nas áreas estudadas.

Áreas	Prof. 2,00m			Nspt (4,0m)			Nspt (6,0m)			Nspt (9,0m)			Nspt (12,0m)		
	Nspt	S	C	Nspt	S	C									
	Pred.	%	%	Pred.	%	%									
Domínio	6-10	56	79	11-19	79	53	20-30	55	-	20-30	53	47	>30	91	71
							11-19	-	57						
Subárea 01	6-10	83	77	6-10	61	68	11-19	93	89	20-30	90	85	>30	72	71
Subárea 02	6-10	87	83	11-19	84	87	20-30	60	48	>30	56	-	>30	72	47
										20-30	-	70			

Nota: S = período seco; C = período chuvoso.

Fonte: A autora (2022).

Não foram identificados níveis de água nas sondagens estudadas apesar da existência de aquífero na Formação Barreiras, demonstrando encontrar-se em profundidades superior às estudadas, mostrando a condição não saturada das UGE identificadas. Assim, para profundidades superiores a 20m, é importante considerar a possibilidade de ocorrência de flutuação de águas subterrâneas por ascensão capilar em camadas mais profundas, uma vez que as unidades geológicas de engenharia se apresentam com predominância argilosa, podendo exercer influência na resistência dos solos estudados não captadas pelas análises geoestatísticas realizadas.

5.2 SOBRE AS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DOS SOLOS NOS LOCAIS INVESTIGADOS

Quatro locais foram escolhidos, em que foi planejado e executado um programa de investigação geotécnica detalhado, que auxiliasse na compreensão do comportamento do solo de Formação Barreiras na cidade de Maceió.

A análise granulométrica realizada mostrou um maior percentual de argila em todas as amostras estudadas, coerentes com as classificações das UGE predominantes encontradas nos perfis típicos construídos. Esses solos possuem média plasticidade (7,04% – 14,08%) em quase todas as amostras, com destaque para a amostra da UFAL na profundidade de 5,35m e para a Base da Encosta localizada na Grota da Moenda, que apresentaram IP de 17,35% e 18,29%.

A granulometria realizada sem adição de defloculante mostrou uma diminuição dos percentuais das frações de argila e um aumento nos percentuais de silte e areia, indicando que as argilas encontram-se agregadas em seu estado natural, condizente com o previsto na literatura.

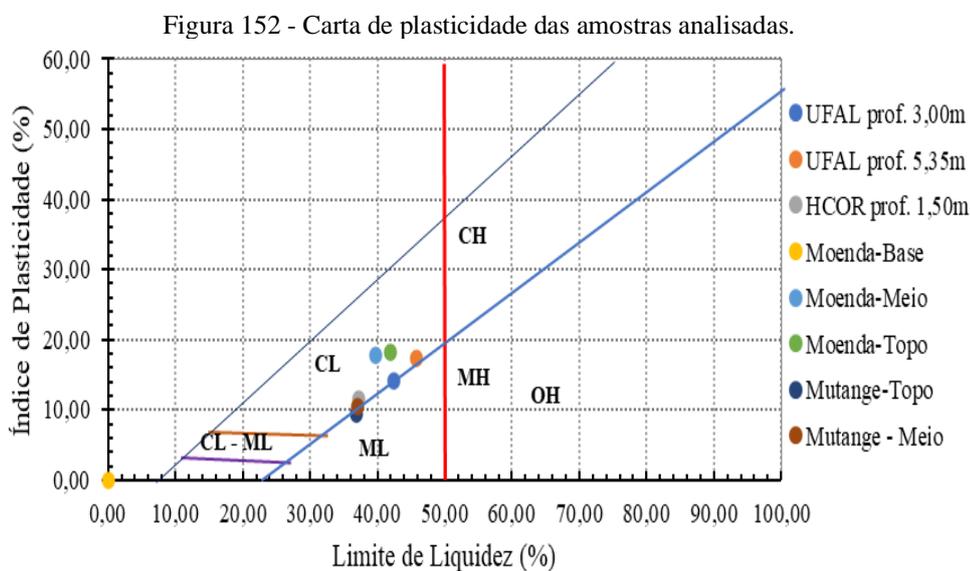
Os valores de permeabilidade do solo podem variar dependendo dos teores de argila e areia dos materiais estudados. A condutividade hidráulica variou entre 10^{-6} a 10^{-7} nos solos analisados, corroborando com os resultados obtidos por Coutinho and Severo (2009), que mencionam que os solos da Formação Barreiras em seu estado natural podem variar o coeficiente de permeabilidade na ordem de 10^{-5} a 10^{-7} m/s, dependendo do teor de material fino e da porosidade presente nas amostras. A Tabela 39 apresenta uma síntese dos resultados dos ensaios granulométricos.

Tabela 39 - Síntese da análise granulométrica

Amostra	% Pass. #200	Composição Granulométrica (%)						Limite de Atterberg (%)		Condutividade Hidráulica (m/s)	SUCS
		Argila	Silte	Areia			Pedr.	LL	IP		
				Fina	Média	Grossa					
UFAL -Prof. 3,00m	62	48,23	11,40	13,52	17,52	9,33	0	42,40	14,08	$9,23 \times 10^{-6}$	CL
UFAL – Prof. 5,35m	63	49,59	11,53	12,87	16,78	10,22	0	45,75	17,35	$7,53 \times 10^{-6}$	ML
HCOR – Prof. 1,50m	56	30,84	30,91	12,25	18,00	8,00	0	37,28	11,47	$3,31 \times 10^{-6}$	CL
Moenda – Topo da Encosta	71	48,0	21,5	11,5	12,82	5,17	1,0	35,20	7,04	$8,62 \times 10^{-6}$	ML
Moenda – Meio da Encosta	53	46,5	5,0	11,5	21,00	14,10	1,0	39,67	17,79	$2,13 \times 10^{-6}$	CL
Moenda – Base da Encosta	55	49,0	4,0	14,5	19,65	10,59	2,0	42,00	18,29	$9,23 \times 10^{-7}$	CL
Mutange – Topo da Encosta	66	49,77	11,79	18,44	14,32	5,68	0,00	36,82	9,52	$6,78 \times 10^{-6}$	ML
Mutange – Meio da Encosta	68	52,00	11,00	16,00	13,23	6,77	1,00	37,11	10,59	$3,66 \times 10^{-6}$	CL

Fonte: A autora (2022).

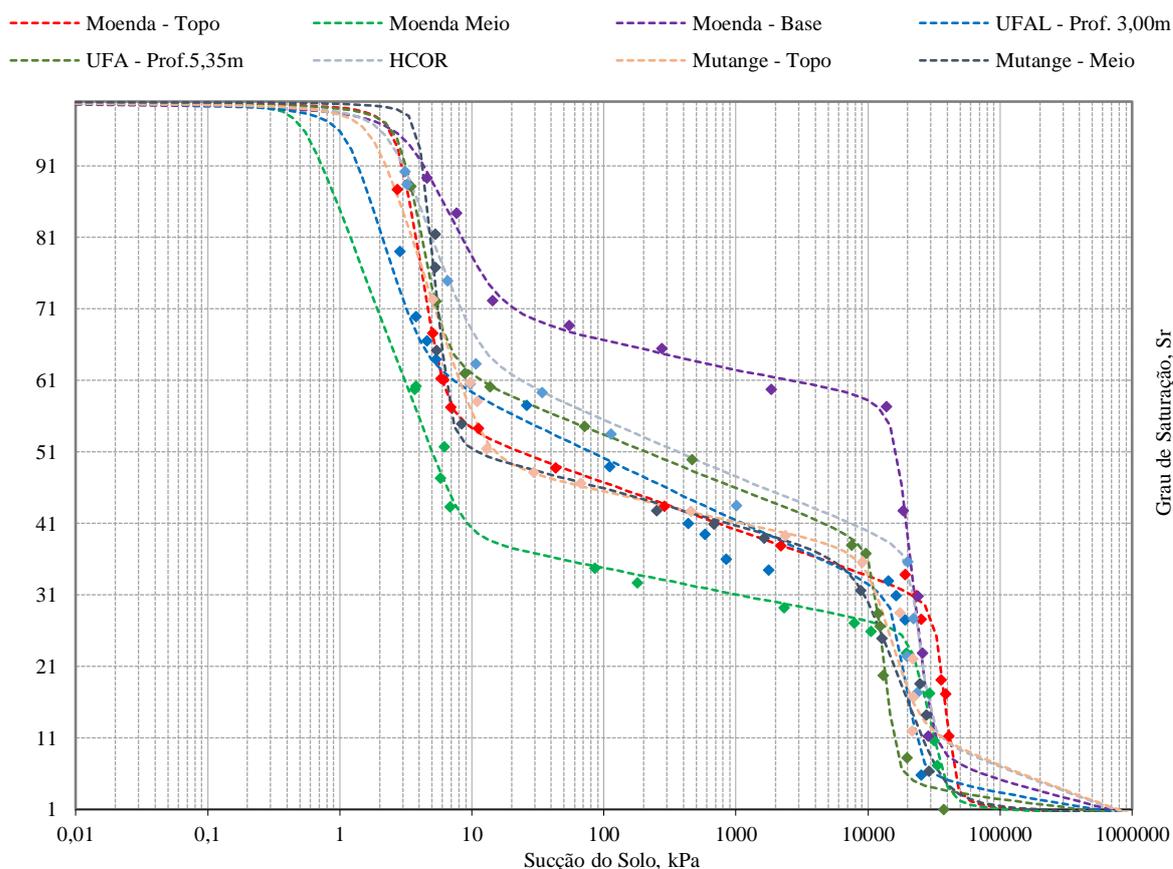
Os solos foram classificados como Siltes e Argilas de baixa compressibilidade pela classificação unificada (SUCS), porém, os limites entre os materiais siltosos e os argilosos se apresentam muito próximos, como pode ser observado através da Figura 152 que apresenta a carta de plasticidade das amostras analisadas.



Resultados similares foram encontrados por Marques (2006), que caracterizou um perfil de solo no Campus da UFAL, nas proximidades da área estudada. Para esta análise, o autor coletou amostras indeformadas de solo em nove profundidades diferentes no mesmo poço, com mesma classificação de solo para as camadas encontradas.

Os valores de sucção do solo são representados pela curva de retenção (Figura. 153), obtida pelo método do papel filtro, com ajuste pelo método de (Gitirana e Fredlund 2004). As curvas mostraram um comportamento bimodal, contendo dois pontos de entrada de ar, considerados comuns em solos tropicais e subtropicais (Feuerharmel e Bica, 2006). Todas as curvas são semelhantes com três trechos distintos, o primeiro onde se observa uma perda significativa de umidade e pouca variação na sucção, onde o primeiro ponto de entrada de ar (Ψ_{a1}) é encontrado. O segundo trecho é caracterizado por um platô, onde há menor perda de umidade, mas grande variação nos valores de sucção, entre 100kPa e 10.000 kPa. O terceiro trecho corresponde ao segundo ponto de entrada de ar (Ψ_{a2}), marcando o início da perda de água dos microporos. Curvas com este comportamento semelhante foram observadas por Futai e Almeida (2005); Feuerharmel e Bica (2006); Bonder (2012), Boszczowski e Ligocki (2012) e em solos de Formação Barreiras por Coutinho *et al.* (2021) e Sousa *et al.* (2021).

Figura 153 - Curvas características dos solos estudados.



Fonte: A autora (2022).

Os resultados de compressibilidade e resistência foram obtidos através dos ensaios edométricos simples e duplo, cisalhamento direto e triaxial e a síntese dos resultados obtidos pode ser observada através da Tabela 40.

O ensaio edométrico apresentou valores próximos quando comparados entre si, havendo um aumento da recompressão na condição inundada quando comparada com a condição natural, coerente com os resultados encontrado por Marques (2006) em amostras coletadas sob sedimentos de Formação Barreiras na área da UFAL.

Estudos mineralógicos por difratograma de raios X realizados por Gomes and Toujaguez (2016) a uma profundidade entre 1 – 1,5m em uma encosta inserida na área de estudo apontam ocorrências de picos característicos de Penita, pertencentes ao grupo das cloritas, cuja estrutura consiste em lâminas semelhantes à mica, mostrando assim uma maior tendência a colapsividade devido a infiltração. Essa característica colapsível dos solos mais superficiais na área de estudo corroboram com os resultados obtidos para a avaliação do potencial de colapso realizada pelos métodos de Jennings e Knight (1975) e Reginatto e Ferrero (1973), na Grota da Moenda – Topo

da Encosta e HCOR com profundidade de 1,50m, que classificou o solo com problema grave de colapso, com $CP > 11\%$.

Com relação ao ensaio de cisalhamento direto, as amostras estudadas apresentaram perda significativa do intercepto de coesão e pouca variação do ângulo de atrito quando submetidas à condição inundada, resultado esperado, uma vez que apenas a coesão sofre influência da inundação devido ao efeito da sucção.

Foi ainda executado o ensaio de cisalhamento com reversões múltiplas (residual), com o objetivo de se avaliar os parâmetros de resistência residual dos solos, de fundamental importância na análise de estabilidade de taludes. Os valores do ângulo de atrito “residual” são considerados próximos e segundo Lupinni *et al.* (1981), podem depender fortemente da mineralogia do solo, como ter relação com o percentual de finos encontrado. Esse comportamento também foi observado por Marques (2006) para condições similares na cidade de Maceió e comportamento semelhante para solos de Formação Barreiras estudados em Lima e Neto (200) e Lafayette (2006).

Tabela 40 - Síntese dos resultados de compressibilidade e resistência das amostras analisadas.

Amostra	Compressibilidade		Resistência ao Cisalhamento Direto					Resistência ao Cisalhamento Triaxial		Curva Característica
	Cc	PC (%)	c' (kPa)		φ (°)			c' (kPa)	φ' (°)	Ψ _{b1}
			Nat.	Inu.	Nat.	Inu.	Res.			
UFAL -Prof. 3,00m	0,325	2,77	35	8	30	29	20	8	28	1,19
UFAL – Prof. 5,35m	0,319	2,78	26	10	30	28	13	7	30	3,07
HCOR – Prof. 1,50m	0,361	11,21	25	6	31	30	18	5	32	2,46
Moenda – Topo da Encosta	0,340	12,81	18	5	31	33	20	5	30	2,76
Moenda – Meio da Encosta	0,276	2,98	10	7	30	29	23	5	31	0,52
Moenda – Base da Encosta	0,163	3,09	25	5	34	33	25	3	30	3,84
Mutange – Topo da Encosta	0,463	4,51	18	8	35	32	24	8	32	1,85
Mutange – Meio da Encosta	0,353	5,66	20	7	31	30	22	5	31	4,00

Fonte: A autora (2022).

5.3 SOBRE A CORRELAÇÃO ENTRE A CLASSIFICAÇÃO DAS UGE E OS RESULTADOS DOS ENSAIOS E ANÁLISES GEOESTATÍSTICA

O grupo de sondagens SPT utilizado para a criação do banco de dados, possibilitou a identificação de quatro Unidades Geológicas de Engenharia (UGE), definidas como camadas do subsolo, com características geotécnicas similares. Dada a disponibilidade de muitos dados, após as investigações de campo e laboratório, buscou-se realizar um reconhecimento das UGE nas áreas investigadas, caracterizando-as com base nos resultados obtidos a partir do banco de dados de sondagens SPT e correlacionando-os com os resultados dos ensaios geotécnicos nas áreas investigadas. Com base na granulometria, foi construída a classificação das UGE por local investigado, apresentada na Tabela 41.

Tabela 41 - Classificação das UGE nos solos investigados

Local Investigado	UGE	Descrição	SUCS
Grota da Moenda – Meio da Encosta	BF 04 -1	Argila Arenosa ($\leq 5\%$ de Silte)	CL
Grota da Moenda – Base da Encosta	BF 04 -1	Argila Arenosa ($\leq 5\%$ de Silte)	ML
Grota da Moenda – Topo da Encosta	BF 04 - 2	Argila areno-siltosa	CL
Encosta do Mutange – Topo da Encosta	BF 04 - 2	Argila areno-siltosa	ML
Encosta do Mutange – Meio da Encosta	BF 04 - 2	Argila areno-siltosa	CL
HCOR	BF 03	Areia Argilo-siltosa	CL

Fonte: A autora (2022).

Pode ser observado através da Tabela 41 que a UGE BF 04, do grupo das argilas compostas por areia e silte, foi encontrada em 05 (cinco) amostras de solo estudadas, condizente com os perfis típicos apresentados na Tabela 3.2. Apenas a amostra do HCOR, composta por uma areia argilo-siltosa ou silte-argilosa, uma vez que os percentuais de argila e silte nessa amostra estão muito próximos, foi classificada na UGE BF 03. As UGE BF 02 (argilas, argilas siltosas ou siltes argilosos) e UGE BF 01 (areias, areias siltosas e siltes arenosos) não foram identificadas nas amostras coletadas em campo.

Realizando uma análise mais detalhada, optou-se por realizar uma subdivisão da UGE BF 04, sendo observado que as amostras do meio e da base da Grota da Moenda são compostas por argila arenosa com até 5% de silte, classificadas como BF 04 -1, comportando-se distintamente dos demais locais investigados da mesma UGE, que apresentam aproximadamente 11% de silte, classificadas como BF 04 -2. Para efeitos de caracterização geotecnica impressa a essas UGE, foram associados intervalos de valores geológicos-geotécnicos obtidos através dos ensaios de laboratório, apresentados através da Tabela 42.

Tabela 42 - Parâmetros Geológicos-geotécnicos das UGE estudadas.

UGE	Descrição	SUCS	Compr.	Resistência ao Cisalhamento Direto				Resistência ao Cisalhamento Triaxial		Sucção	
			Cc	c (kPa)		ϕ (°)		c' (kPa)	ϕ' (°)	ψ_1 kPa	ψ_2 kPa
				Nat.	Inu.	Nat.	Inu.				
BF- 03	Areia Argilo-siltosa	ML - CL	0,361	25	6	31	30	5	32	3	12.000
BF04 - 1	Argila Arenosa ($\leq 5\%$ de Silte)	ML - CL	0,163- 0,276	10-25	5 - 7	30 -34	29 - 33	3 - 5	30 - 31	1 – 4	8.000
BF04 - 02	Argila areno-siltosa	ML - CL	0,319 – 0,463	18 - 35	5 - 10	30 - 35	28 - 33	5 - 8	28 - 32	1 – 4	10.000

Fonte: A autora (2022).

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A extensão dos sedimentos de Formação Barreiras (material transportado – Terciário) encontrada na costa brasileira e sua heterogeneidade requer estudos mais regionalizados e detalhados, de forma a compreender suas particularidades e similaridades, principalmente sobre a esfera geotécnica, a que se debruçou esta pesquisa.

Diante dessa necessidade, este trabalho trouxe um estudo geomorfológico, geológico e geotécnico, com associação de mapas probabilísticos de resistência N_{spt} , que acompanhados das áreas de incertezas dos valores estimados, com níveis aceitáveis, podem ser utilizados como parâmetros iniciais e orientação de investigação geotécnica local em diversos projetos de engenharia na cidade de Maceió.

Os resultados encontrados no mapeamento geoestatístico e na investigação geotécnica de laboratório apresentam um ponto de partida inicial para a caracterização geotécnica no município, não substituindo investigações mais detalhadas, mas servindo de parâmetro inicial para a área de estudo. Essas análises trazem uma importante contribuição para a comunidade geotécnica local, trazendo parâmetros inéditos, além de contribuir regionalmente, apresentando as particularidades existentes.

Este trabalho contribuí ainda para a ampliação dos estudos realizados através do Grupo de Estudos Geotécnico de Encostas, Planícies e Desastres – GEGEP sobre os sedimentos de Formação Barreiras no Nordeste Brasileiro, trazendo para a perspectiva de conhecimento a cidade de Maceió, Alagoas.

As principais conclusões obtidas nesta pesquisa evidenciam o alcance dos objetivos propostos na presente tese, associados aos aspectos quanto a etapa de mapeamento geomorfológico, geológico e geotécnico, descritos nos itens a seguir.

6.1 QUANTO AO MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO E GEOLÓGICO

A etapa de mapeamento geomorfológico e geológico está associada ao alcance dos seguintes objetivos específicos: construção de um banco de dados espacial a partir de sondagens SPT; delimitação da Formação Barreiras a partir de dados altimétricos, geológicos e geomorfológicos. Destacam-se as principais conclusões obtidas nesta etapa:

- A construção de um banco de dados de sondagens SPT para a cidade de Maceió foi realizada e contou com a espacialização de 1592 registros, mostrando-se útil na compreensão do subsolo de Formação Barreiras na área estudada e permitindo identificar perfis geotécnicos

representativos do subsolo, subdivididas em quatro Unidades Geológicas de Engenharia (UGE) de acordo com sua ocorrência.

- Na área estudada há ocorrência de camadas predominantemente argilosas, de ocorrência entre 65% a 85% das sondagens analisadas, pertencentes às UGE BF-02 e UGE BF-04, enquanto camadas com predominância arenosa ocorrem entre 15- 35%, representadas pelas UGE BF -01 e UGE BF-03 (ver Tabela 3).
- A Ocorrência de intercalações entre diferentes UGE de predominância argilosa e arenosa, com repetição vertical desse padrão, pode estar associada a ciclos deposicionais, comuns a fácies geológica sedimentar da Planície Distal/Aluvial, possível fácies encontrada nos solos analisados.
- A partir de 3,00m de profundidade, são identificadas descrições de ocorrência de óxidos e hidróxidos de ferro, que atribuiu um ganho de resistência N_{spt} nas camadas (ver Tabela 3).
- Nas sondagens analisadas não são encontradas descrições de níveis de água até as profundidades estudadas (em torno de 20m), enfatizando a condição não saturada dos solos estudados.
- Os dados altimétricos advindos da Base Cartográfica de Maceió mostraram-se adequados na utilização e obtenção de dados geomorfométricos sobre o relevo, auxiliados pelos mapas de hipsometria e declividade.
- As técnicas de morfologia permitiram a identificação dos Tabuleiros Costeiros, que ocorre de forma clara em toda a área urbana de Maceió e quando associada à Formação Barreiras, permitiu uma delimitação da extensão desses sedimentos na área de estudo, melhorando a escala de representação cartográfica dos mapas oficiais.
- Áreas de abaciamento foram identificadas nos bairros do Farol e Tabuleiro dos Martins a partir dos mapas de hipsometria e declividade, importantes para orientar as políticas de uso e ocupação de solo nessas regiões.
- As atividades de campo associadas ao mapeamento realizado possibilitaram um melhoria na escala de trabalho dos mapas geológicos existentes, identificando uma área de 143,41km² (72,45% do total da área urbana do município) composta por sedimentos de Formação Barreiras, 13,14km² (6,63%) composto por sedimentos colúvio-eluviais, 4,54km² (2,30%) por sedimentos flúviolagunares localizados as margens da Laguna Mundaú, 2,98km² (1,5%) composto pela Formação Poção e 33,86km² (17,2%) composto por sedimentos litorâneos (ver Figura 25), mostrando o potencial de técnicas de geoprocessamento no mapeamento geomorfológico/geológico.

6.2 QUANTO AO MAPEAMENTO GEOTÉCNICO A PARTIR DE ANÁLISES GEOESTATÍSTICAS

A etapa de mapeamento geotécnico está associada ao objetivo de realizar avaliação geoestatística da resistência à penetração do solo (N_{spt}) na área estudada, com destaque nas principais considerações:

- As análises geoestatísticas possibilitaram a compreensão da resistência à penetração N_{spt} ao longo da profundidade nas áreas estudadas;
- A divisão em subáreas permitiu uma avaliação mais detalhada de determinadas regiões na área urbana de Maceió, possibilitando um melhor entendimento dos aspectos geotécnicos em função das informações extraídas dos boletins de sondagens.
- Foi possível verificar valores N_{spt} crescentes com a profundidade, apresentando uma faixa de intervalo de resistência predominante em cada profundidade estudada (2,00m, 6,00m, 9,00m e 12,00m).
- A subárea Domínio (correspondente a maior área estudada) possui incertezas maiores nos valores interpolados em função da baixa quantidade de sondagens SPT e da má distribuição espacial em relação a área estudada, porém, possibilitando um entendimento inicial do comportamento dos solos na região.
- Nas subáreas 01 (a Sudoeste) e 02 (a Nordeste) existem maior distribuição espacial dos registros SPT, o que possibilitou menores incertezas nos valores interpolados, identificando predominância de faixas de valores N_{spt} entre 70% - 90%.
- Nas análises geoestatísticas verificou-se uma variabilidade dos valores N_{spt} em função da sazonalidade, particularmente na profundidade de 2,00m (ver Tabelas 9, 12 e 15), confirmadas pelas análises de perfis próximos entre si e pertencentes as mesmas UGE.
- De uma maneira geral, os mapas probabilísticos apresentaram-se satisfatórios, principalmente para as áreas com maior quantidade de amostras e melhor distribuição espacial, com incertezas maiores sendo observadas na zona periférica.

6.3 QUANTO A CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA

Esta etapa está associada ao objetivo de realizar a caracterização geotécnica do solo em locais definidos, através de investigações em campo e laboratório, sendo apresentados os principais resultados:

- A campanha de investigação geotécnica de laboratório apresentou resultados compatíveis entre si e coerentes com os encontrados na literatura para a Formação Barreiras.
- Nos ensaios de granulometria realizados com e sem adição de defloculante, foi identificada a predominância de solos finos com partículas de argila e silte agregadas.
- Dos solos analisados, a amostra localizada no HCOR apresentou particularidade, possuindo o maior percentual de silte (30%).
- Os solos não apresentam características dispersivas observadas nos ensaios realizados;
- Todas as curvas características dos solos investigados apresentaram comportamento bimodal, com dois pontos de entrada de ar, com o primeiro inferior a 10kPa e o segundo superior a 1.000kPa, indicando a influência dos macroporos e microporos na entrada e saída de água, comum em solos tropicais intemperizados.
- Dentre as curvas características estudadas, destaca-se a da Grota da Moenda, que apresentou curvas distintas entre si para o meio e a base da encosta, destoando das demais curvas estudadas.
- O ajuste das curvas características através da modelagem proposta por Gitirana Jr. e Fredlund (2004) mostrou-se mais adequada quando comparada a outros modelos, por apresentar complementação das curvas nas regiões de saturação residual.
- A permeabilidade do solo obtida através do equipamento Tri-Flex, mostrou uma diminuição com a profundidade e nas encostas, esse comportamento é do topo para a base, com valores de ordem de grandeza 10^{-6} m/s - 10^{-7} m/s, estando coerente com os valores encontrados na literatura, como em Coutinho e Severo (2009).
- O ensaio Edométrico mostra uma forte influência da inundação na deformação dos solos estudados, apresentando maior rigidez na condição não saturada.
- A avaliação de Colapso mostrou Problema Moderado para maioria dos solos estudados, com $PC < 5\%$, destacando a amostra do HCOR e o Topo da encosta na Grota da Moenda, que apresentaram maiores problemas segundo a classificação proposta por Jennings e Knight (1975), com problema Grave de Colapso.
- Os ensaios de cisalhamento direto apresentaram coesão entre 5kPa -10kPa e ângulo de atrito entre 28° - 33° na condição saturada, com significativa perda de coesão do solo na condição saturada, quando comparada com a condição natural, com pouca variação do ângulo de atrito. Na condição “residual” (inundada), o solo apresenta intercepto de coesão nulo e o ângulo de atrito variando entre 13° e 25° .

- Os ensaios triaxiais CID-C, apresentaram valores de coesão na faixa de 3kPa – 8kPa, e ângulo de atrito entre 28° – 32° para os locais investigados, estando coerentes e em geral menores dos que os resultados encontrados no ensaio de cisalhamento direto, como esperado.

6.4 SUGESTÕES DE ESTUDOS/PESQUISAS FUTURAS

Esta etapa está associada ao objetivo de realizar a caracterização geotécnica do solo em locais definidos, através de investigações em campo e laboratório, sendo apresentados os principais resultados:

- A campanha de investigação geotécnica de laboratório apresentou resultados compatíveis entre si e coerentes com os encontrados na literatura para a Formação Barreiras.
- Nos ensaios de granulometria realizados com e sem adição de defloculante, foi identificada a predominância de solos finos com partículas de argila e silte agregadas.
- Dos solos analisados, a amostra localizada no HCOR apresentou particularidade, possuindo o maior percentual de silte (30%).
- Os solos não apresentam características dispersivas observadas nos ensaios realizados;
- Todas as curvas características dos solos investigados apresentaram comportamento bimodal, com dois pontos de entrada de ar, com o primeiro inferior a 10kPa e o segundo superior a 1.000kPa, indicando a influência dos macroporos e microporos na entrada e saída de água, comum em solos tropicais intemperizados.
- Dentre as curvas características estudadas, destaca-se a da Grota da Moenda, que apresentou curvas distintas entre si para o meio e a base da encosta, destoando das demais curvas estudadas.
- O ajuste das curvas características através da modelagem proposta por Gitirana Jr. e Fredlund (2004) mostrou-se mais adequada quando comparada a outros modelos, por apresentar complementação das curvas nas regiões de saturação residual.
- A permeabilidade do solo obtida através do equipamento Tri-Flex, mostrou uma diminuição com a profundidade e nas encostas, esse comportamento é do topo para a base, com valores de ordem de grandeza 10^{-6} m/s - 10^{-7} m/s, estando coerente com os valores encontrados na literatura, como em Coutinho e Severo (2009).
- O ensaio Edométrico mostra uma forte influência da inundação na deformação dos solos estudados, apresentando maior rigidez na condição não saturada.
- A avaliação de Colapso mostrou Problema Moderado para maioria dos solos estudados, com $PC < 5\%$, destacando a amostra do HCOR e o Topo da encosta na Grota da Moenda, que

apresentaram maiores problemas segundo a classificação proposta por Jennings e Knight (1975), com problema Grave de Colapso.

- Os ensaios de cisalhamento direto apresentaram significativa perda de coesão do solo na condição saturada, quando comparada com a condição natural, com pouca variação do ângulo de atrito. Na condição “residual” (inundada), o solo apresenta intercepto de coesão nulo e o ângulo de atrito variando entre 13° e 25° .
- Os ensaios triaxiais CID-C, apresentaram valores de coesão na faixa de 3kPa – 8kPa, e ângulo de atrito entre 28° – 32° para os locais investigados, estando coerentes e em geral menores dos que os resultados encontrados no ensaio de cisalhamento direto, como esperado.

REFERÊNCIAS

- ALHEIROS, M. M.; FERREIRA, M. Da G. De. V. X. A sub-bacia Cabo. In: Revisão geológica da faixa sedimentar costeira de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte. **Estudos Geológicos. Série B**. Recife: [s.n.], 1991.
- ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M.F.; MONTEIRO, F.A.J.; OLIVEIRA FILHO, J. S. **Sistemas Depositionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental**. Belém - PA: [s.n.], 1998. p. 753–760.
- ALMEIDA, A.J.P.; FERREIRA NETO, J. V. Mapeamento de Áreas Impermeáveis para Caracterização da Urbanização da Bacia Endorreica do Tabuleiro do Martins, Maceió/AL. **Revista Contexto Geográfico**. [S.l.]: [s.n.], 2017.
- ALMEIDA, I. M.; ALMEIDA, G.). **A utilização de bases de dados na cartografia geotécnica de Lisboa**. (ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, Org.). Ouro Preto: [s.n.], 2002. p. 7.
- ALMEIDA, L. E. G. **Mapeamento Geotécnico de Casa Branca (SP) – ênfase no uso da técnica de avaliação de terrenos e perfis típicos de materiais inconsolidados**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2000.
- ALMEIDA, R. B. *et al.* Características geológicas e geomorfológicas da Estação Ecológica do Rangedor, localizada na Zona Urbana da Ilha de São Luís (MA), associadas à sua disponibilidade hídrica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2018. v. 01, p. 2120–2129.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D5084-03. Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. . 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D5298 – 10. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. . 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D7181-11. V.1, P. .-11. Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. . 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. . 2020.
- ANAC. Regulamento Brasileiro de Aviação Especial - RBAC-E n. 94 – **Requisitos Gerais Para Aeronaves não Tripuladas de Uso Civil**. 2017.
- ANJOS, C.A.M.; WANDERLEY, P.R. DE M.; CARVALHO FILHO, A. M. **Mapa geotécnico da cidade de Maceió- etapa final**. UFAL/FINEP-PADCT II. 1987. 63p.
- ANJOS, C.A.M. DOS; QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. . D. A. A. **Instabilidade de taludes naturais próximo a vias urbanas em Maceió –AL**. Maceió, Alagoas: [s.n.], 1993. p. 240–254.

ANJOS, C. A. . D. **Estudo da estabilidade de encostas em Maceió**. [S.l.]: Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande-PB, 1992.

ANJOS, C. A. M. Considerações sobre as vulnerabilidades aos deslizamentos urbanos na cidade de Maceió - AL. **Revista de Gociências**, 1991. v. 01, n 4, p. 4–12.

ARAI, MITSURU; UESUGUI, NAMIO; ROSSETTI, DILCE; GOES, A. **Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no Nordeste do Estado do Pará**. (Sociedade Brasileira de Geologia, Org.). Belém - PA: [s.n.], 1988. p. 738–752.

ARAI, M. Dinoflagelados (Dinophyceae) miocênicos do Grupo Barreiras no nordeste do estado do Pará (Brasil). **Revista da Universidade de Guarulhos-Geociências**, 1997. v. especial, p. 98–106.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Geologia de Engenharia e Ambiental**. 2 ed. São Paulo: ABGE, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Abertura de Poços e Trincheiras de Inspeção de Solos com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13601: Solo - Avaliação da dispersividade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test) - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14114: Solo - Solos argilosos dispersivos. Classificação por meio do ensaio do furo de agulha (Pinhole Test). Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16853: Solo — Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2017 a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2017 b.

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

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

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

AUGUSTO FILHO, O. **Implementação de banco de dados geotécnico como ferramenta**

adicional de gestão urbana da URBEL. 2005. 14p.

BANDEIRA, A. P. N.; ALHEIROS, M. M.; COUTINHO, R. Q. Mapeamentos de Risco de Escorregamento: Contextualização e Estudos de caso em Camaragibe (PE). (ABMS, Org.). Salvador - BA: [s.n.], 2005. p. 61–74.

BANDEIRA, A. P. **Mapa de Risco de Erosão e Escorregamento das Encostas com Ocupação Desordenada do Município de Camaragibe-PE.** [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

BANDEIRA, A. P. **Parâmetros Técnicos para Gerenciamento de Áreas de Risco de Escorregamento de Encostas na Região Metropolitana do Recife.** [S.l.]: Universidade Federal de Alagoas, 2010.

BARBOSA, G. V. Et Al. **Evolução da Metodologia para Mapeamento Geomorfológico do Projeto Radambrasil.** Série Geom ed. Salvador - BA: [s.n.], 1984.

BARBOSA, L. M. **Quaternário costeiro do estado de Alagoas: Influências das variações do nível do mar.** [S.l.]: Universidade Federal da Bahia, 1985.

BARBOSA, T. S.; LIMA, V. F. De; FURRIER, M. Mapeamento Geomorfológico e Geomorfologia Antropogênica Do Município Do Conde – Paraíba. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 2019. v. 20, n. 3.

BASARIR, H. *et al.* Geostatistical modeling of spatial variability of SPT data for a borax stockpile site. **Engineering Geology**, 2010. v. 114, n. 3–4, p. 154–163. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.04.012>>.

BASTOS, C. A.; MIRANDA, T. C.; SHULER, A. R.; SCHMITT, L. A.; VESCONCELOS, S. M. Mapeamento Geotécnico da Planície Costeira Sul do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul: [s.n.], 2007.

BASTOS, C. A. B. **Estudos Geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados.** [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

BASTOS, G. **Estruturação de um Banco de Dados a partir do Mapeamento Geotécnico Aplicado á Região de Ribeirão Preto (SP).** [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2005.

BERBERAN, A. **Fotogrametria.** Apostila. Universidade de Coimbra. Disponível em www.mat.uc.pt/~engeo/cadeiras/ano4aFotogrametria/. Acesso em 22.05.2020. 2002.

BERTOLINI, W. Z.; DEODORO, S. C. Estudo Da Dissecação Do Relevo No Alto Rio Piranga (Mg) Relief Dissection Study in the High Piranga River (Mg). **Geociências**, 2018. v. 37, n. 1, p. 183–192.

BISHOP, A.W.; GREEN, G.E.; GARGA, V.K.; ANDERSEN, A.; BROWN, J. D. A New Ring Shear Apparatus and its Application to the Measurement of Residual Strength. **Geotechnique**, 1971. v. 21, p. 168–172.

BONDER, M. G. M. B. H. Soil – Water Characteristic Curves Obtained for a Colluvial and

Lateritic Soil Profile Considering the Macro and Micro Porosity. 2012. p. 1405–1420.

BORGES, M. de V. **Contribuição de um sistema de dados georeferenciados baseado em geomorfologia e pedologia para o estudo de fundações na cidade de Rio Branco, Acre.** [S.l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

BOSZCZOWSKI, R.B.; LIGOCKI, L. P. Características Geotécnicas dos solos residuais de Curitiba e RMC. In *Twin Cities – Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba. Twin Cities – Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba*. Curitiba - Paraná: [s.n.], 2012.

BRASIL - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Projeto Radam Brasil. Folha Folhas SC 24/25 Aracaju/Recife: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra.** Rio de Janeiro: [s.n.], 1983.

BGS - SERVIÇO GEOLÓGICO BRITÂNICO. Visualizador de Geologia da Grã-Bretanha. 2019. Disponível em:
<<https://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/geologyOfBritain/viewer>>. Acesso em: 20.12.2019.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. Principles of Geographical Information Systems. **Oxford University Press**, 1998. p. 19.

CAETANO, N. B. **Procedimentos metodológicos para o planejamento de obras e usos: uma abordagem geotécnica e geoambiental.** [S.l.]: Universidade Estadual Paulista, 2006.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LEROUEIL, S. Curva Característica de Sucção Transformada. **Revista Solos e Rochas**, 2004. v. 27, n. 2675–5475, p. 231–242.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.; MEDEIROS, J. . **Introdução a Ciência da Geoinformação.** São José dos Campos: [s.n.], 2004.

CAMPOS NETO, O.P.A.; SOUSA LIMA, W. Carta Estratigráfica da Bacia Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 2007. v. 15, n. 2.

CARVALHO, J.M.C.; CARVALHEIRO, A. Geostatistics Applied to SPT Data - A Case Study. In: KRIGE, W. J. K. and D. G. (Org.). **Geostatistics 2000**. [S.l.]: [s.n.], 2001.

CARVALHO FILHO, A.M.; WANDERLEY, P.R.M.; ANJOS, C. A. **Mapa Geotécnico da Cidade de Maceió - 1º etapa: Mapas Geológico, Geomorfológico, Declividade, Geotécnico e Mapa preliminar de Uso e Ocupação do Solo.** FINEP/FUNDEPS/UFAL. 1987. 63p.

CARVALHO, J. C. *et al.* **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo - Brazil: [s.n.], 2015.

CELESTINO, T.B.; DINIZ, N. C. Informática. In: ABGE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (Org.). **Geologia de Engenharia**. [S.l.]: [s.n.], 1998, p. 163–196.

CERQUEIRA, J. A. C. **Definição de uma superfície geoidal local através de posicionamento por gps.** [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

CHACÓN, J.; IRIGARAY, C.; FERNÁNDEZ, T. Et Al. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. **Eng Geol Environ**, 2006. v. 65, p. 341–411.

CHANDLER, R. J.; CRILLEY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low rise buildings. [S.l.]: [s.n.], 1992. p. 82–89.

CHRISTOFOLETTI, A. O Canal Fluvial. *In*: EDGARD BLUCHER (Org.). **Geomorfologia Fluvial**. 1. ed. São Paulo: [s.n.], 1981.

CORRÊA, A. C. De B. *et al.* Megageomorfologia e morfoestrutura do Planalto da Borborema. **Revista do Instituto Geológico**, 2010. v. 31, n. 1–2, p. 35–52.

COUTINHO, R.Q.; MONTEIRO, C.F.B.; OLIVEIRA, A. T. J. Banco de Dados das Argilas Orgânicas Moles/Médias do Recife. (ABMS -Núcleo Nordeste, Org.). São Paulo - Brazil: [s.n.], 1996. p. 105–116.

COUTINHO, R.Q.; SOUSA, M. A. Analysis of the Applicability of USCS, TRB and MCT Classification Systems to the Tropical Soils of Pernambuco, Brazil, for Use in Road Paving. **Advances in Transportation Geotechnics IV**. [S.l.]: [s.n.], 2021, V. 164.

COUTINHO, R.Q. & SEVERO, R. N. F. Investigação Geotécnica Para Projeto de Estabilidade de Encostas. **5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas.**, 2009. p. 55. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/cobrae/2009-coutinho.pdf>>.

COUTINHO, R. Q. *et al.* Geotechnical Characterization and Failure Mechanism of Landslide in Granite Residual Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2019. v. 145, n. 8, p. 05019004.

CREPANI, E. . Et Al. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento Ecológico-Econômico. São José dos Campos: [s.n.], 1998.

DANTAS, M.E.; MELLO, L.B.; GOES, H. **Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro , Mutange e Bebedouro. Aspectos geomorfológicos e do histórico de ocupação do bairro.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2019.

DANTAS, M. **Biblioteca de Padrões de Relevo do Território Brasileiro - Apêndice II.** *In*: CPRM- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM (Org.). [S.l.]: [s.n.], 2017, p. 54.

DANTAS, M. E.; MEDINA, A. I. GEOMORFOLOGIA. **Projeto Porto Seguro Santa Cruz Cabralia.** Salvador - BA: [s.n.], 2000, p. 9–30.

DATE, C. J. **Uma Introdução a Sistemas de Bancos de Dados.** São Paulo: [s.n.], 2004.

DIAS, T. DE L.; CÂMARA, G.; DAVIS JR, C. A. Modelos Espaço-Temporais. *In*: INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Org.). **Banco de Dados Geográficos.** Curitiba -

Paraná: [s.n.], 2005.

ELMASRI, R.; NAVATHE, S. **Sistema de Banco de Dados. Pearson Education do Brasil Ltda.** 4. ed. [S.l.]: [s.n.], 2005.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação.** [S.l.]: [s.n.], 1999.

F. N. GITIRANA, G. DE; FREDLUND, D. G. Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004. v. 130, n. 2, p. 209–212.

FEIJÓ, F.J.; VIEIRA, R. A. B. Sequências cretáceas das bacias Sergipe e Alagoas. (UNESP, Org.). Rio Claro: [s.n.], 1990.

FEIJÓ, F. J. Bacias de Sergipe e Alagoas. **Boletim Geociências PETROBRÁS**, 1994. v. 8, p. 149–161.

FERRASSOLI, M.A.; ALVES, V.A.H.S.; MENDES, V. A. **Estudos sobre a Instabilidade do Terreno nos Bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL). Aspectos Geológicos e Estruturais.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2019.

FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D. The use of filter-paper and suction-plate methods for determining the soil-water characteristic curve of undisturbed colluvium soils. **Geotechnical Testing Journal**, 2006. v. 5, p. 419–425.

FEUERHARMEL, C. *et al.* Determinação das curvas características de solos coluvionares em diferentes condições de moldagem. Salvador - BA: [s.n.], 2007. p. 343–348.

FOLLE, D.; COSTA, J.F.C.L.; KOPPE, J. C. Geração de Mapas de SPT: uma abordagem geoestatística. Curitiba - Paraná: [s.n.], 2001.

FOLLE, D. **O estudo Geoestatístico de Sondagens SPT para Geração de Mapas auxiliares em Obras de Engenharia.** [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

FOLLE, D. *et al.* 3-D soil-resistance maps in the presence of a strong vertical trend. **Engineering Geology**, 2008. v. 102, n. 1–2, p. 46–53. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.07.006>> Acesso em 12.10.2020.

FRANCO, G.B.; MARQUES, E.A.G.; CALIJURI, M.L.; GOMES, R. L. Cartografia geotécnica: estágio atual do conhecimento 1. **Caminhos da Geografia**, 2010. v. 11, n° 35, n. 1678–6343, p. 158–172.

FREDLUND, D. G.; XING, A.). Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian geotechnical journal**, 1994. v. 31, n. 4, p. 521–532.

FURRIER, M.; ARAÚJO, M. E.; MENESES, L. F. Geomorfologia e Tectônica da Formação Barreiras no Estado da Paraíba Max. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, 2006. v. 6,

n. 2, p. 61–70.

FUTAI, M.M.; ALMEIDA, M. S. S. An experimental investigation of the mechanical behaviour of an unsaturated gneiss residual soil. **Géotechnique**, 2005. v. 55, n. 3, p. 201–213.

GOMES, A. A. S.; TOUJAGUEZ, R. . Caracterização física e mineralógica do talude de corte no bairro do Mutange, em Maceió-AL. **Revista de Geociências do Nordeste**, 2016. v. 2, p. 152–160.

GOMES, R. L.; TEIXEIRA, N. N. Aplicação de técnicas de mapeamento geotécnico na avaliação ambiental de área de instalação de posto de combustível em Ilhéus-BA. Uberlândia: [s.n.], [s.d.]. p. 12.

GRIFFITH, J. S. Mapping in engineering geology. **The Geological Society**, 2002. v. 1, p. 287.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008.

GUIMARÃES, F. S. *et al.* Uma proposta para automatização do índice de dissecação do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 2017. v. 18, n. 1, p. 155–167.

GUIMARÃES, R. C. **Análise das propriedades e Comportamento de um perfil de Solo Laterítico Aplicado ao Estudo do Desempenho de estacas Escavadas**. [S.l.]: Universidade de Brasília, 2002.

HEAD, K.H.; EPPS, R. Manual of Soil laboratory testing. (P. Press, Org.). London: [s.n.], 2006.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades. 2020.

IFG INSTITUT FÜR GEBIRGSMECHANIK. **Rock Mechanical Investigations of the Salt Formation and the Overburden of the Braskem Cavern Field Maceió**. Alemanha: [s.n.], 2022.

INMET, I. Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de dados Meteorológico para ensino e Pesquisa. 2022.

JENNINGS, J. E.; KNIGHT, K. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. (I. S. for S. M. and G. Engineering, Org.). London: [s.n.], 1975.

JOURNEL, A. Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons. **Computers and Geosciences**, 1989. v. 16, p. 1242.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, J. C. H. Mining Geostatistics. London: [s.n.], 1978.

JUCÁ, J. F. T.; LINS, A. H. . Estudo do comportamento dos Solos não Saturados na Universidade Federal de Pernambuco. Brasília - DF: [s.n.], 1992. p. 71–108.

KORTH, H. F.; SILBERSCHATZ, A.; SUDARSHAN, S. **Sistema de Banco de Dados**. São Paulo: [s.n.], 2005.

LAFAYETTE, K. P. V. **Estudo Geológico - Geotécnico do Processo erosivo em Encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti - Cabo de Santo Agostinho/PE**. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

LANA, M. C. Bacia de Sergipe-Alagoas: Uma hipótese de evolução tectono-sedimentar. *In*: PETROBRÁS (Org.). **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. [S.l.]: [s.n.], 1990, p. 311–332.

LIMA, I. F. **Maceió, a cidade restinga: contribuição ao estudo morfológico do litoral alagoano**. Maceió: [s.n.], 1990.

LIMA, R. B. De; NETO, J. V. F. Qualidade das águas subterrâneas na bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, Maceió-AL. **Revista de Geografia**, 2020. p. 277–298.

LUIZ, A.M.F.; GUTIERREZ, N. H. M. Geostatistical data analysis of the Standard Penetration Test (SPT) conducted in Maringá-Brazil and correlations with geomorphology. **Soils and Rocks**, 2020. v. 43, n. 4, p. 619–629.

LUPINNI, J. F.; SKINNER, A. E.; VAUGHAN, P. R. The drained residual strength of cohesive soils. **Geotechnique**, 1981. v. 31, p. 181–213.

MAIA, L. P. **Procesos Costeros y Balance Sedimentario a lo Largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicaciones para una Gestion Adecuada de la Zona Litoral**. [S.l.]: Universidade de Barcelona, 1998.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com método do papel filtro. [S.l.]: [s.n.], 1994. p. 515–522.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. Rio de Janeiro: [s.n.], 1997. p. 373–398.

MARQUES, R. F. **Estudo da capacidade de carga de estacas escavadas com bulbos, executadas em solo não saturado da Formação Barreiras da cidade de Maceió - AL**. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

MAY, M. EL; DLALA, M.; CHENINI, I. Urban geological mapping: Geotechnical data analysis for rational development planning. **Engineering Geology**, 2010. v. 116, n. 1–2, p. 129–138.

MEIRA, F. F. D. A. **Estudo do Processo Erosivo em Encostas Ocupadas**. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

MENDES, V.A.; LIMA, M.A.B.; MORAES, D.M.F.; BRITO, M. F. L. **Geologia e Recursos Minerais do Estado de Alagoas**.

MENDES, R. M.; LORANDI, R. Analysis of spatial variability of SPT penetration resistance in collapsible soils considering water table depth. **Engineering Geology**, 2008. v. 101, n. 3–4,

p. 218–225.

MENDES, V. A. **Geologia E Recursos Minerais do Estado de Alagoas: escala 1:250.000**. CPRM-Ser ed. Recife: [s.n.], 2017.

MIRANDA, T. C. Mapeamento das Unidades Geotécnicas e Montagem de Banco de Dados na Área Abrangida Pela Obra de Duplicação da BR101 Sul, RS, Brasil. (ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, Org.). Coimbra: [s.n.], 2007. p. 15.

MITAS, L.; MITASOVA, H. Spatial interpolation. **Geographical information systems: principles, techniques, management and applications**. 2. ed. [S.l.]: [s.n.], 1999, p. 481–492.

MOURA-FÉ, M. M. Barreiras: Série, Grupo ou Formação? **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2014. v. 7, n. 6, p. 1055–1061.

MOURA, A. P. de. Caracterização geotécnica das argilas moles da Costa Atlântica de Santa Catarina com o uso da cartografia e sistemas de informações geográficas. (Sociedade Brasileira de Cartografia, Org.). Belo Horizonte: [s.n.], 2003. p. 5.

MURAKAMI, S. *et al.* Reliable land subsidence mapping using a spatial interpolation procedure based on geostatistics. **Soils Found**, 2006. v. 46, p. 123–134.

NATHANAIL, C.P.; ROSENBAUM, M. S. Spatial Management of Geotechnical data for Site Selectio. **Engineering Geology**, 1998. v. 1, n.50, p. 347–356.

NOBRE, R. C. M. *et al.* Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. **Journal of Contaminant Hydrology**, 2007. v. 94, p. 277–292.

NOBRE, R. C. M. . **Avaliação de Risco para Uso e Proteção de Aquíferos. Estudo de Caso: Região Metropolitana de Maceió - AL**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

PACHECO SILVA, F. Uma nova Construção Gráfica para Determinação de Pressão de Pré-Adensamento de uma Amostra de Solo. (P. IPT, Org.). Rio de Janeiro: [s.n.], 1970. p. 225–232.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª edição ed. São Paulo - Brazil: [s.n.], 2006.

PRADO, R. B. **Geotecnologias Aplicadas à Análise Espaço Temporal do Uso e Cobertura da Terra e Qualidade da Água do Reservatório de Barra Bonita**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2004.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MACEIÓ. **PMRR, Plano Municipal de Redução de Risco da Cidade de Maceió**.

RAMOS, M. C. L. **Estudo Geológico Geotécnico e Análise da Estabilidade de uma Encosta Localizada no Bairro Curado II no Município de Jaboatão dos Guararapes - PE**. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

- RASPA, G.; MOSCATELLI, M.; STIGLIANO, F.; PATERA, A.; MARCONI, F.; FOLLE, D.; VALLONE, R.; MANCINI, M.; CAVINATO, G.P.; MILLI, S.; COSTA, J. F. C. L. . Geotechnical Characterization of the Upper Pleistocene-Holocene Aluvial Deposits of Roma (Italy) by Means of Multivariate Geostatistics: Cross Validation results. **Engineering Geology**, 2008. v. 1, n. 101, p. 251–268.
- RAZMYAR, A.; ESLAMI, A. Evaluating the Geotechnical and Geophysical Characteristics of Expanding Districts in Tehran Using Field Experiments. **Civil Engineering Journal**, 2018. v. 4, n. 2, p. 363.
- REGINATTO, A. R.; FERRERO. Collapse Potential of Soils and Water Chemistry. Moscow: [s.n.], 1973. p. 177–183.
- RODRIGUES, J. E. Estudo geotécnico dos fenômenos erosivos acelerados (voçorocas). (A. B. de G. de E. e Ambiental, Org.). Belo Horizonte: [s.n.], 1984. p. 169–182.
- ROSS, J. L. O registro dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, 1992. v. 6, p. 17–29.
- ROSS, J. L. S. Análise Empírica Da Fragilidade Dos Ambientes Naturais Antropizados. **Geography Department, University of Sao Paulo**, 1994. p. 63–74.
- ROSSETTI, D. F.; BEZERRA, F. HR; DOMINGUEZ, J. M. Late Oligocene–Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil. **Earth-Science Reviews**, 2013. v. 123, p. 87–112. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825213000792>>. Acesso em 18.12.2019.
- SAADI, A.; TORQUATO, J. R. Contribuição à Neotectônica do Estado do Ceará. **Revista de Geologia**, 1992. v. n.5, p. 5–38.
- SANTANA, R. G. **Análise de Soluções de Engenharia para estabilização de encostas ocupadas na região Metropolitana de Recife - PE. Estudo de caso: Ruptura ocorrida em encosta com ocupação desordenada na UR2, Iburá**. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2006.
- SANTOS, R. C. A. L. **Estudo Sedimentológico e Geoambiental no Sistema Lagunar Mundaú - Alagoas**. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 1998.
- SANTOS, R. J. Q.; LIMA, R. C. A.; FERREIRA, N. J. V. **A Geomorfologia do Tabuleiro como Consequência do Neotectonismo, Geografia - Espaço, Tempo e Planejamento**. Maceió: [s.n.], 2004.
- SEOANE, S. T. C. M. De A. R. C. De A. L. J. C. S. Erosão e progradação do litoral brasileiro : Alagoas. In: AMBIENTE, M. do M. (Org.). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília - DF: [s.n.], 2006, p. 198–213.
- SHARMA, B.; RAHMAN, S. K. Use of GIS Based Maps for Preliminary Assessment of Subsoil of Guwahati City. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, 2016. v.

04, n. 05, p. 106–116.

SHERARD, J.L.; DUNNIGAN, L.P.; DECKER, R.S.; STEEL, E. F. Identification and nature of dispersive soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE**, 1976. v. 102, p. 287–301.

SILVA, A. M. B. G. Da. **Condicionantes geológico-geotécnicos de escavação grampeada em solo residual de gnaiss**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, M.M. **Caracterização Geotécnica de um Solo de Cálccario da Encosta Continental PE-18, Paulista, com ênfase na determinação da resistência ao cisalhamento**. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

SILVA, M.M.. **Estudo Geológico-Geotécnico de uma Encosta com Problemas de Instabilidade do Município de Camaragibe**. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

SOARES, W. C. **Banco de Dados Geológico - Geotécnico com Base em Sondagens á Percussão e Uso de SIG: Análise Espacial da Profundidade do Lençol Freático e do Nspt para Obras de Fundação em João Pessoa -PR**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2011.

SOUSA, M.A.S.; COUTINHO, R.Q.; MOTTA, L. M. G. Analysis of the unsaturated behaviour of compacted lateritic fine-grained tropical soils for use in transport infrastructure. **ROAD MATERIALS AND PAVEMENT DESIGN**, 2021. p. 1–28.

SOUSA, A. P. L. **Estudos geotécnicos e de estabilidade de taludes da encosta do alto do padre Cícero no município de Camaragibe - PE**. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

SOUSA NETO, J. B. **Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devido á inundção (colapso)**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

SOUZA, S. O.; LUPINACCI, C. M.; OLIVEIRA, R. C. de. A Cartografia Geomorfológica enquanto instrumento para o planejamento em áreas litorâneas: considerações a partir da região Costa das Baleias - Bahia - Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 2021. v. 22, n. 3, p. 488–507.

STURARO, J.R.; LANDIM, P.M.B.; RIEDEL, P. S. O Emprego da Técnica Geoestatística da Krigagem Indicativa em Geotecnia Ambiental. **Solos e Rochas – Revista Latino-americana de Geotecnia**, 2000. v. 23, n.3, p. 157–164.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. [S.l.]: [s.n.], 2009.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. 1º Edição ed. São Paulo: McGRAW-HILL do Brasil, 1978.

WEST, D. C.; MELLO, C. L. Distribuição Da Formação Barreiras Na Região Sul Do Espírito Santo e Sua Relação Com a Deformação Neotectônica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 2020. v. 21, n. 1.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística, Conceitos e Aplicações**. São Paulo - Brazil: [s.n.], 2013.

YOUNG, C. S. **Banco de Dados. Organização, Sistemas e Administração**. São Paulo - Brazil: [s.n.], 1990.

ZOU, H. *et al.* Assessing Spatial Variability of Piezocone Penetration Resistance of Layered Soft Clays Using Geostatistics. 2017. p. 310–319.

ZUQUETTE, L. V., PEJON, O.J., COLLARES, J. Q. S. Engineering geological mapping developed in the Fortaleza Metropolitan Region, State of Ceara, Brazil. **Engineering Geology**, 2004. v. 17, p. 227–253.

ZUQUETTE, L. V. **A importância do mapeamento geotécnico no uso e na ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 1993.