



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

BIANCA ALENCAR VIEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE SEIS SOLOS
REPRESENTATIVOS DE UNIDADES PEDOLÓGICAS DA REGIÃO DE
MOSSORÓ – RN**

CAMPINA GRANDE/PB

2025

BIANCA ALENCAR VIEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE SEIS SOLOS
REPRESENTATIVOS DE UNIDADES PEDOLÓGICAS DA REGIÃO DE
MOSSORÓ – RN**

Tese apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental, área de concentração Geotecnia, linha de pesquisa Geotecnia Ambiental e Obras de Terra.

Orientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto

CAMPINA GRANDE/PB

2025

V658a Vieira, Bianca Alencar.
Análise do comportamento geotécnico de seis solos representativos de unidades pedológicas da região de Mossoró-RN / Bianca Alencar Vieira. – Campina Grande, 2025.
91 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.
"Orientação: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior, Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto".
Referências.

1. Geotecnia. 2. Formação Jandaíra. 3. Solos Expansivos. 4. Solos Colapsíveis. I. Santos Júnior, Olavo Francisco dos. II. Freitas Neto, Osvaldo de. III. Título.

CDU 624.13(043.2)

BIANCA ALENCAR VIEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE SEIS SOLOS
REPRESENTATIVOS DE UNIDADES PEDOLÓGICAS DA REGIÃO DE
MOSSORÓ – RN**

Tese apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil e Ambiental, área de concentração Geotecnia, linha de pesquisa Geotecnia Ambiental e Obras de Terra.

Orientador: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior – Orientador (UFRN)

Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto – Coorientador (UFRN)

Prof^a. Dr^a. Carina Silvani – Examinadora Interna (UFCEG)

Prof. Dr. Ricardo Nascimento Flores Severo – Examinador Externo (IFRN)

Prof. Dr. Raimundo Leidimar Bezerra – Examinador Externo (UEPB)

Campina Grande, 19 de maio de 2025



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): BIANCA ALENCAR VIEIRA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JÚNIOR - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR. OSVALDO DE FREITAS NETO – UFRN – COORIENTADOR, DR.^a CARINA SILVANI – PPGECA/UFMG – EXAMINADORA INTERNA, DR. RAIMUNDO LEIDIMAR BEZERRA – UEPB – EXAMINADOR EXTERNO, DR. RICARDO NASCIMENTO FLORES SEVERO – IFRN – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 20/2025). / TÍTULO DA TESE: “ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE SEIS SOLOS REPRESENTATIVOS DE UNIDADES PEDOLÓGICAS DA REGIÃO DE MOSSORÓ – RN” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 14:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VIDEOCONFERÊNCIA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VIDEOCONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE TESE, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 19 DE MAIO DE 2025**

5.

6.

Documento assinado digitalmente
RICARDO NASCIMENTO FLORES SEVERO
Data: 20/05/2025 15:57:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

7.

8.

9. **DR. RICARDO NASCIMENTO FLORES SEVERO – IFRN – EXAMINADOR EXTERNO**



Documento assinado eletronicamente por **OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JÚNIOR, PROFESSOR**, em 19/05/2025, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Oswaldo de Freitas Neto, Usuário Externo**, em 20/05/2025, às 10:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARINA SILVANI, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/05/2025, às 11:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bianca Alencar Vieira, Usuário Externo**, em 20/05/2025, às 11:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raimundo Leidimar Bezerra, Usuário Externo**, em 20/05/2025, às 11:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 20/05/2025, às 14:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5453924** e o código CRC **B84E482A**.

DEDICATÓRIA

À Helena, minha filha, que ainda está no meu ventre, mas que conseguiu iluminar a minha vida, me manter forte em seguir buscando os meus sonhos. Dedico a você, essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por estar sempre presente em minha vida, iluminando todos os meus passos ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Ronaldo e Zuleide, e aos meus irmãos, Beatriz, Breno e Bruno, agradeço por todo o amor, apoio, ajuda e compreensão, sem os quais não teria conseguido realizar meus desejos e sonhos.

Aos meus avós, Antônio Chagas e Maria do Socorro, sempre vivos em minha memória e no meu coração, por serem fontes de inspiração e sabedoria.

Às minhas filhas, Anne Sophia e Helena, minhas maiores motivações.

Ao meu esposo, Lauro Nogueira, por todo o amor, paciência, incentivo e apoio. Por estar sempre ao meu lado e por ser, acima de tudo, um grande amigo.

Aos meus orientadores, Olavo dos Santos e Osvaldo de Freitas, pelo auxílio e conhecimento transmitidos ao longo do desenvolvimento deste estudo.

Aos colegas de estudo, amigos e companheiros do Laboratório de Geotecnia/UFRN, pela ajuda e parceria constantes.

Sou imensamente grata a todos por terem contribuído para transformar um sonho em realidade.

RESUMO

Solos expansivos e colapsíveis, comuns em regiões semiáridas, são solos não saturados que apresentam variações volumétricas significativas com a umidade. Essa característica os torna problemáticos para a engenharia civil, pois podem comprometer a estabilidade de edificações e infraestrutura devido ao comportamento geotécnico desfavorável resultante das condições climáticas locais. Neste contexto, a presente pesquisa avalia o potencial de expansão e colapso de seis solos do município de Mossoró. A metodologia envolveu a coleta de amostras deformadas e indeformadas, a realização de ensaios laboratoriais, destacando-se ensaios de caracterização física, química, mineralógica, de expansão e colapso dos solos, bem como investigações em campo. A maioria das amostras analisadas pertence à Formação Jandaíra, principal unidade litoestratigráfica da Bacia Sedimentar Potiguar. A maioria das amostras foi classificada como areia argilosa, sendo que algumas apresentaram porcentagens significativas de frações finas, enquanto outras revelaram a presença expressiva de pedregulhos em sua composição. Quanto à mineralogia dos solos, algumas amostras revelaram a presença de argilominerais do tipo 2:1, pertencentes ao grupo das esmectitas, associados a um maior potencial de expansão. Os ensaios de expansão conduzidos em amostras deformadas e indeformadas evidenciaram uma variabilidade significativa no comportamento expansivo dos solos analisados. Os dados laboratoriais revelaram que maiores deformações volumétricas nem sempre estiveram associadas às maiores tensões requeridas para recomposição da amostra, o que destaca a complexidade do fenômeno de expansão. As análises das trajetórias de deformações verticais indicaram que, nos solos com baixo potencial expansivo, não houve diferença relevante entre as tensões de expansão obtidas pelos métodos A e C, conforme descrito na norma ASTM D4546-21. Por sua vez, os índices de colapso dos solos analisados variaram de leves a moderadamente severos, e em alguns casos, mesmo quando o índice não ultrapassou o valor convencional de 2%, observou-se variações significativas de deformação ao longo do tempo, indicando instabilidade relevante. Os resultados obtidos reforçam a importância de uma caracterização geotécnica aprofundada para a adequada previsão do comportamento dos solos estudados, contribuindo para o planejamento seguro de obras em regiões semiáridas como Mossoró.

Palavras-chaves: Geotecnia; Formação Jandaíra; Solos Expansivos; Solos Colapsíveis.

ABSTRACT

Expansive and collapsible soils, common in semi-arid regions, are unsaturated soils that exhibit significant volumetric changes with moisture variation. This characteristic makes them problematic for civil engineering, as they can compromise the stability of buildings and infrastructure due to unfavorable geotechnical behavior resulting from local climatic conditions. In this context, the present study evaluates the expansion and collapse potential of six soils from the municipality of Mossoró. The methodology involved the collection of disturbed and undisturbed samples, the performance of laboratory tests—especially physical, chemical, and mineralogical characterization, as well as expansion and collapse tests—and field investigations. Most of the analyzed samples belong to the Jandaíra Formation, the main lithostratigraphic unit of the Potiguar Sedimentary Basin. The majority of samples were classified as clayey sand, with some showing significant percentages of fine particles, while others revealed a considerable presence of gravel. Regarding soil mineralogy, some samples showed the presence of 2:1 clay minerals, belonging to the smectite group, which are associated with a higher expansion potential. The expansion tests conducted on both disturbed and undisturbed samples showed significant variability in the expansive behavior of the analyzed soils. Laboratory data revealed that greater volumetric deformations were not always associated with higher stresses required to recompress the samples, highlighting the complexity of the expansion phenomenon. Analyses of vertical strain trajectories indicated that, in soils with low expansion potential, there was no significant difference between the expansion stresses obtained using Methods A and C, as described in ASTM D4546-21. In turn, the collapse indices of the analyzed soils ranged from slight to moderately severe, and in some cases, even when the index did not exceed the conventional threshold of 2%, significant deformation over time was observed, indicating relevant instability. The results reinforce the importance of thorough geotechnical characterization for accurately predicting the behavior of the studied soils, contributing to the safe planning of construction projects in semi-arid regions such as Mossoró.

Keywords: Geotechnics; Jandaíra Formation; Expansive Soils; Collapsible Soils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar	20
Figura 2 - Mapa de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Norte com destaque ao município de Mossoró	22
Figura 3 - Composição química dos argilominerais (a) (SiO ₂) (b) [Al(OH) ₃]	26
Figura 4 - Representação gráfica da estrutura de camadas 1:1 (caulinita)	27
Figura 5 - Representação gráfica da estrutura de camadas 2:1 (ilita).....	27
Figura 6 - Representação gráfica da estrutura de camadas 2:1 (montmorilonita).....	28
Figura 7 - Representação da dupla camada difusa	29
Figura 8 - Ensaio edométrico duplo para obtenção dos parâmetros utilizados no critério de Reginatto e Ferrero (1973).....	34
Figura 9 - Mapa das Unidades Litoestratigráficas do Município de Mossoró	36
Figura 10 - Reconhecimento de solos do município de Mossoró.....	37
Figura 11 - Unidades residenciais na região de coleta de amostras apresentando fissuras, trincas e rachaduras nas alvenarias	38
Figura 12 - Amostras (a) AM 01 (b) AM 02.....	39
Figura 13 - Amostra AM 03.....	39
Figura 14 - Amostras (a) AM 04 (b) AM 05	40
Figura 15 - Localização dos pontos de amostragem	40
Figura 16 - Coleta da amostra indeformada ID.01	41
Figura 17 - Poço de inspeção aberto no furo ST.10.....	41
Figura 18 - Levantamento topográfico na área de estudo	43
Figura 19 - Gráfico Deformação versus tensão vertical: Determinação da tensão de expansão	46
Figura 20 - Pedregulhos característicos dos solos analisados	50
Figura 21 - Carta de Van der Merwe (1964).....	52
Figura 22 - Curvas de compactação	53
Figura 23 - Difratoograma DRX da amostra AM-01.D.01-P	53
Figura 24 - Difratoograma DRX da amostra AM-02.D.01-P	54
Figura 25 - Difratoograma DRX da amostra AM-03.D.01-P	54
Figura 26 - Difratoograma DRX da amostra AM-04.D.01-P	55
Figura 27 - Difratoograma DRX da amostra AM-05.D.01-P	55

Figura 28 - Difratoograma DRX da amostra AM-06.ID.03	56
Figura 29 - Resultados obtidos no ensaio de expansão para as amostras indeformadas da região AM 06.....	59
Figura 30 - Deformação vertical das amostras com potencial colapsível	60
Figura 31 - Resultados obtidos nos ensaios de expansão para as amostras deformadas da região AM 06.....	61
Figura 32 - Trajetória de deformações verticais durante o ensaio de expansão das amostras deformadas	62
Figura 33 - Ensaio de expansão com estágio de inundação igual a 7 kPa para as amostras deformadas nas regiões analisadas	63
Figura 34 - Trajetória de deformações verticais durante o ensaio de expansão com inundação sob tensão de 7 kPa das amostras analisadas	64
Figura 35 - Trajetória de deformações verticais durante o ensaio de expansão aplicando o método A	64
Figura 36 - Resultados obtidos no ensaio de colapso no estágio de inundação	65
Figura 37 - Curvas de colapso com inundação à 50 kPa.....	66
Figura 38 - Perfil estratigráfico do solo (Perfil 1)	68
Figura 39 - Perfil estratigráfico do solo (Perfil 2)	69
Figura 40 - Perfil estratigráfico do solo (Perfil 3)	70
Figura 41 - Perfil estratigráfico do solo (Perfil 4)	71
Figura 42 - Seções utilizadas para traçar os perfis estratigráficos.....	72
Figura 43 - Curvas de níveis da região AM 06.....	74
Figura 44 - Modelagem tridimensional da topografia da região AM 06.....	75
Figura 45 - Curva Granulométrica da Amostra AM-01.D.01-P	84
Figura 46 - Curva Granulométrica da Amostra AM-02.D.01-P	84
Figura 47 - Curva Granulométrica da Amostra AM-03.D.01-P	84
Figura 48 - Curva Granulométrica da Amostra AM-04.D.01-P	85
Figura 49 - Curva Granulométrica da Amostra AM-05.D.01-P	85
Figura 50 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10.0,2	85
Figura 51 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10.0,6	86
Figura 52 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10.0,8	86
Figura 53 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10.1,0	86
Figura 54 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10.1,4	87
Figura 55 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10.1,5	87

Figura 56 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.01	87
Figura 57 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.02	88
Figura 58 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.03	88
Figura 59 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.04	88
Figura 60 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.05	89
Figura 61 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.06	89
Figura 62 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.07	89
Figura 63 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.08	90
Figura 64 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.09	90
Figura 65 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.10	90
Figura 66 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.11.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do Índice de Colapso	33
Tabela 2 - Nomenclatura das amostras deformadas utilizadas	42
Tabela 3 - Ensaio de laboratório executados no estudo	43
Tabela 4 - Caracterização granulométrica dos solos dos pontos AM 01, AM 02, AM 03, AM 04 e AM 05.....	49
Tabela 5 - Caracterização granulométrica dos solos do ponto AM 06	50
Tabela 6 - Resultados obtidos nos ensaios de limites de consistência, massa específica dos sólidos e teor de umidade.....	51
Tabela 7 - Resultado dos ensaios de Difração de Raios X	56
Tabela 8 - Resultado dos ensaios de Fluorescência de Raios X	57
Tabela 9 - Parâmetros físicos dos corpos de prova indeformados ensaiados pelo Método C	58
Tabela 10 - Parâmetros físicos dos corpos de prova deformados ensaiados pelo Método C	60
Tabela 11 - Parâmetros físicos dos corpos de prova deformados ensaiados pelo Método A	62
Tabela 12 - Resultados obtidos nos ensaios de sondagem à percussão (SPT)	67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Justificativa.....	17
1.2. Hipóteses da pesquisa	17
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivo Geral.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos.....	18
1.4. Organização da tese	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1. Formação Jandaíra.....	20
2.2. Pedologia do município de Mossoró.....	21
2.3. Mineralogia dos solos.....	26
2.4. Solos Expansivos	28
2.5. Solos Colapsíveis	32
3. METODOLOGIA.....	35
3.1. Área de estudo	35
3.2. Coleta de Amostras	38
3.3. Levantamento topográfico da região AM 06	43
3.4. Ensaios de campo da região AM 06.....	44
3.5. Metodologia dos ensaios laboratoriais	44
3.5.1. Ensaios de caracterização física dos solos.....	44
3.5.2. Ensaio de caracterização mineralógica dos solos	44
3.5.3. Ensaio de caracterização química dos solos	45
3.5.4. Ensaios de expansão dos solos.....	45
3.5.4.1. Ensaios de expansão pelo Método C em amostras indeformadas	46
3.5.4.2. Ensaios de expansão pelo Método C em amostras deformadas.....	47
3.5.4.3. Ensaios de expansão pelo Método A em amostras deformadas.....	47

3.5.5. Ensaio de colapso de amostras indeformadas dos solos	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1. Caracterização física dos solos	49
4.2. Caracterização mineralógica dos solos	53
4.3. Caracterização química dos solos	57
4.4. Avaliação do potencial de expansão	57
4.4.1. Expansão das amostras indeformadas pelo Método C.....	57
4.4.2. Expansão das amostras deformadas pelo Método C.....	60
4.4.3. Expansão das amostras deformadas pelo Método A.....	62
4.5. Avaliação do potencial de colapso.....	65
4.6. Ensaios de campo na região AM 06	67
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
REFERÊNCIAS	78
ANEXOS	84

1. INTRODUÇÃO

O solo, enquanto base essencial para toda construção de engenharia civil, assume uma importância que vai além de sua função estrutural, desempenhando um papel importante como material de construção. Entretanto, a presença de solos expansivos e/ou colapsíveis representa uma preocupação para obras de engenharia civil, acarretando sérios desafios para a segurança das obras e prejuízos econômicos. Esses solos apresentam um comportamento indesejado, expandindo e/ou contraindo em resposta à variação de volume durante períodos de inundação e/ou estiagem, comprometendo a estabilidade estrutural, podendo resultar em desabamentos de edificações, túneis e ocasionando danos em rodovias e canais de irrigação.

A análise da presença de solos expansivos e colapsíveis em diferentes regiões do mundo tem sido objeto de estudo ao longo dos anos. O objetivo central dessas investigações reside na compreensão do comportamento desses solos, bem como na identificação dos fatores que desencadeiam tais fenômenos. Essa abordagem visa encontrar soluções que assegurem tanto a segurança quanto a eficiência econômica nas obras de engenharia (Ayeldeen *et al.*, 2017; Bell; Maud, 1995; Chen, 1988; Clemence; Finbarr, 1981; Dudley, 1970; Estabragh; Rafatjo; Javadi, 2014).

Especificamente, no Brasil, em várias regiões, é comum a presença de solos argilosos, não saturados e com alta porosidade. O estudo do comportamento desses solos em relação ao potencial de expansão e colapso tem despertado o interesse de diversos pesquisadores. Por exemplo, Ferreira e Ferreira (2009) avaliaram, por meio de ensaios edométricos sob diferentes condições, a variação do volume e da tensão de expansão do solo, devido à mudança do teor de água, em um Vertissolo coletado no município de Petrolândia-PE.

Em outro estudo, Barbosa *et al.* (2023) propuseram um método simplificado para avaliar o potencial expansivo de argilas utilizando ensaios de caracterizações físicas geotécnicas. Este método baseia-se na correlação entre o índice de plasticidade (IP) e o teor de silte/argila. Para validar essa abordagem, os autores utilizaram correlações entre parâmetros geotécnicos de 321 amostras do banco de dados SiSolos da EMBRAPA e um banco de dados geotécnico contendo 100 amostras localizadas no estado do Acre.

Já Falcão *et al.* (2023) analisaram diversos parâmetros que contribuem para o potencial de colapso de um solo localizado em um Campo Experimental de Engenharia

Geotécnica no estado do Rio Grande do Sul. Esse estudo abrangeu um amplo programa de ensaios de laboratório e em campo, oferecendo uma compreensão abrangente dos fatores que influenciam o comportamento desse solo específico.

Por sua vez, Bandeira *et al.* (2024) realizaram uma investigação sobre o comportamento de um solo submetido à inundação, com foco na aplicação em fundações rasas. Para isso, foram conduzidos ensaios de laboratório e de campo no Campo Experimental da Universidade Federal do Cariri, localizado no município de Juazeiro do Norte. Esses ensaios avaliaram a relação carga *versus* recalque e o comportamento de colapso do solo natural e compactado. Os principais resultados indicaram que o solo indeformado apresentou comportamento de colapso quando molhado, sob tensões superiores a 100 kN/m². Por outro lado, o solo compactado apresentou uma redução significativa do recalque por colapso, sugerindo ser uma opção eficaz de tratamento para suportar fundações superficiais. Além disso, os ensaios de placa mostraram-se eficazes para estimar o potencial de colapso dos solos em campo.

A região do semiárido brasileiro apresenta condições climáticas que favorecem a formação de solos potencialmente colapsíveis e expansivos, uma vez que esta apresenta um clima caracterizado por longos períodos de seca e chuvas escassas e irregulares. Essas condições climáticas resultam em um regime hídrico particular, com altas taxas de evapotranspiração e baixas taxas de infiltração de água no solo (Ferreira, 1995).

Em particular, o município de Mossoró, situado no estado do Rio Grande do Norte, apresenta registros de manifestações patológicas em edificações, associadas à expansão e aos recalques do solo em determinadas áreas urbanas. Apesar da relevância do tema, ainda não há estudos publicados em periódicos acadêmicos que investiguem detalhadamente esse comportamento do solo na região. Do ponto de vista geológico, grande parte do município está situada sobre a Formação Jandaíra, a maior unidade da Bacia Potiguar, composta predominantemente por rochas carbonáticas. Estudos anteriores identificaram a presença de argilominerais expansivos, como montmorilonita e vermiculita, em solos carbonáticos desenvolvidos sob condições de clima semiárido e déficit hídrico (Lemos; Curi, 1997; Oliveira *et al.* 2018; Hu *et al.*, 2021; Al-Mahbashi; Dafalla, 2023).

1.1. Justificativa

O município de Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte, apresenta um setor industrial em expansão, destacando-se a produção de petróleo e gás, a produção de cimento, o processamento de sal e a indústria cerâmica. Recentemente, o setor de produção de energias renováveis também ganhou força na região, notadamente com a implementação de campos de energia eólica. Esse cenário tem impulsionado não apenas o aumento populacional, mas também o crescimento expressivo de projetos de engenharia na área.

No entanto, o município de Mossoró está localizado em uma região semiárida, com características climáticas que favorecem a formação de solos potencialmente colapsíveis e expansivos. Esses solos apresentam o potencial de causar danos substanciais às estruturas, incluindo rachaduras, trincas e, em casos extremos, o colapso total da edificação.

A ocorrência de expansão e recalques do solo em determinadas áreas urbanas de Mossoró é um problema que ainda não foi devidamente estudado. A falta de conhecimento sobre a suscetibilidade de ocorrência desses solos dificulta a implementação de medidas eficazes de mitigação, colocando em risco a segurança das construções e da população. Nesse contexto, a pesquisa sobre a caracterização de solos expansivos e colapsíveis em Mossoró é relevante por diversos motivos.

Primeiramente, a investigação contribuirá para o conhecimento sobre a ocorrência desses solos em uma região semiárida, fornecendo informações importantes para a segurança de construções em áreas com características climáticas semelhantes. Em segundo lugar, o estudo oferecerá informações fundamentais para a implementação de medidas eficazes de mitigação de riscos associados a esses solos. Por fim, a pesquisa também desempenhará um papel significativo no avanço científico e tecnológico da engenharia geotécnica, fornecendo dados essenciais para compreender os fatores que contribuem para a ocorrência de fenômenos de expansão e colapso do solo, bem como para o desenvolvimento de soluções voltadas à resolução desses desafios.

1.2. Hipóteses da pesquisa

Diante das condições geotécnicas e climáticas do município de Mossoró, parte-se da hipótese de que os solos presentes na região apresentam comportamento expansivo e/ou colapsível significativo, sobretudo em função das variações de umidade

típicas do clima semiárido local. Supõe-se que essas manifestações ocorrem de forma diferenciada entre as unidades litoestratigráficas identificadas, devido à variabilidade mineralógica e textural dos solos.

Acredita-se ainda que a presença de argilominerais com alta capacidade de absorção de água, como montmorilonita, esteja diretamente relacionada ao maior potencial de expansão volumétrica dos solos.

Além disso, admite-se que solos com maior proporção de finos e menor densidade seca sejam mais suscetíveis ao colapso estrutural quando submetidos à infiltração de água.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Avalizar o potencial de expansão e colapso de seis solos do município de Mossoró.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar as propriedades físicas dos solos mapeados, para fornecer dados importantes à classificação e ao entendimento do comportamento geotécnico dos solos;
- Avaliar a composição química e mineralógica dos solos para entender suas influências nas propriedades mecânicas, com o objetivo de correlacionar determinados minerais e elementos químicos com comportamentos indesejados dos solos, como expansão e colapso;
- Avaliar o potencial expansivo dos solos referentes às unidades litoestratigráficas identificadas na área de estudo, verificando a sua capacidade de alteração volumétrica em função da variação de umidade, a fim de compreender os riscos associados à instabilidade de estruturas construídas sobre esses solos, especialmente em regiões sujeitas a ciclos de seca e chuva;
- Investigar o potencial colapsível de solos quando submetidos a variações de umidade, visando identificar possíveis recalques no de terreno que possam comprometer fundações, pavimentos e outras obras de engenharia.
- Realizar ensaios de campo, como o SPT (Standard Penetration Test), e levantamento topográfico, com o objetivo de traçar os perfis estratigráficos dos solos e

as curvas de nível da área de estudo, fornecendo subsídios à análise geotécnica e ao mapeamento das variações altimétricas do terreno.

1.4. Organização da tese

A presente tese está estruturada em sete capítulos que abrangem de forma sistemática o desenvolvimento da pesquisa. No primeiro capítulo são apresentados o contexto do estudo, a delimitação do problema, os objetivos gerais e específicos, a hipótese do estudo, bem como a justificativa da pesquisa, evidenciando sua relevância técnica e científica para a área da engenharia geotécnica. O capítulo dois reúne os principais conceitos, definições e estudos anteriores relacionados ao comportamento de solos expansivos e colapsíveis, abordando aspectos como mineralogia, propriedades físicas e mecânicas, mecanismos de expansão e colapso, bem como técnicas de estabilização e métodos de caracterização.

O capítulo três descreve os procedimentos adotados para a execução da pesquisa, incluindo o mapeamento e a seleção das amostras, os ensaios laboratoriais realizados para a caracterização geotécnica, física, química e mineralógica dos solos, além das análises específicas para avaliação do potencial expansivo e colapsível. No capítulo quatro são apresentados os dados obtidos a partir dos ensaios, acompanhados da interpretação crítica dos resultados, buscando identificar relações entre a composição dos solos e seu comportamento geotécnico.

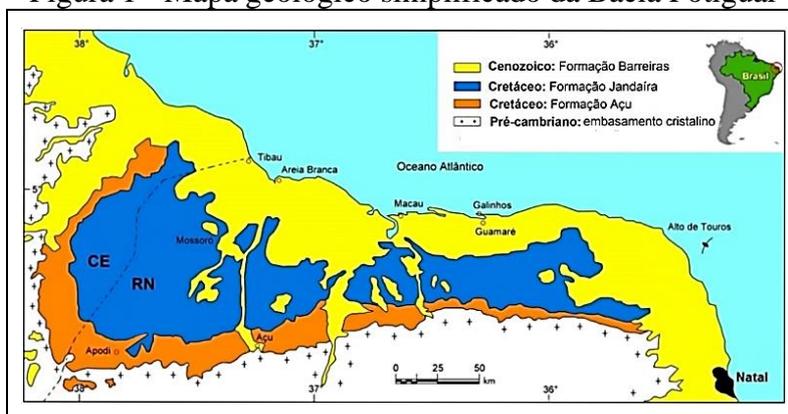
No capítulo cinco são retomados os objetivos propostos e discutidas as principais conclusões da pesquisa, além de sugestões para estudos futuros e possíveis aplicações práticas dos resultados. Já o capítulo seis reúne todas as fontes da literatura utilizadas ao longo do trabalho. Por fim, o último capítulo é destinado para anexos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Formação Jandaíra

A Formação Jandaíra representa uma das principais unidades litoestratigráficas que compõem a Bacia Potiguar, situada no extremo leste da Margem Equatorial Brasileira. Esta bacia está presente predominantemente no Estado do Rio Grande do Norte, estendendo-se parcialmente até o Estado do Ceará, conforme ilustrado na Figura 1. A Formação Jandaíra faz parte da Subsequência Estratigráfica *Drifte* da Bacia Potiguar, constituída por rochas carbonáticas que se depositaram durante o período Eoturoniano-Eocampaniano e estendem-se por grande parte da área emergente da Bacia Potiguar (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

Figura 1 - Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar



Fonte: Adaptado de Gomes *et al.* (2019).

De acordo com Pessoa Neto *et al.* (2007), a espessura dessas rochas carbonáticas varia consideravelmente, desde algumas dezenas de metros na porção oeste da bacia até atingir cerca de 600 metros na plataforma interna atual. No entanto, essa espessura diminui progressivamente em direção às áreas de águas profundas, devido à erosão ou condensação. Além disso, as rochas da Formação Jandaíra apresentam, em geral, uma tonalidade que varia do cinza (representando calcários dolomitizados e dolomitos) ao creme-claro (indicativo de calcários calcíticos), com textura que vai de fina até grossa (SGB, 2014).

Em termos de mineralogia, alguns estudos investigaram a composição de solos desenvolvidos sobre calcários da Formação Jandaíra. Lemos e Curi (1997) analisaram dois tipos de Cambissolos (eutrófico e vértico) localizados na Chapada do Apodi, uma região na fronteira entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará, especificamente próxima ao município de Mossoró-RN. Os resultados revelaram que a fração de areia

fina desses solos era predominantemente composta por quartzo, feldspato e calcita, enquanto a fração de silte também continha mica (muscovita). Já na fração argila, foram identificados mica, caulinita, goethita e anatásio. Além desses, o Cambissolo Eutrófico também exibiu uma intercalação de mica-vermiculita e hematita, enquanto o Cambissolo Vértico continha esmectita em sua composição.

Mota *et al.* (2007), por sua vez, selecionaram três tipos de solos para estudo também na Chapada do Apodi: Cambissolo Háptico Ta eutrófico típico; Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico argissólico; e Argissolo Vermelho distrófico arênico. As análises mineralógicas revelaram que o quartzo predominava tanto na fração de areia quanto na de silte, enquanto a fração de argila era principalmente composta por caulinita.

Oliveira *et al.* (2018) conduziram suas pesquisas na Chapada do Apodi, especificamente em uma região situada no município de Limoeiro do Norte, CE. A área de estudo foi dividida em três superfícies distintas: convexa, côncava e plana. Os solos nas áreas convexas e planas foram classificados como Cambissolo Cálcico (loâmico) e continham, na sua fração fina, argilominerais como vermiculita, ilita, esmectita e caulinita em sua composição. Já o solo na área côncava foi identificado como Cambissolo Cálcico (argiloso) e apresentava apenas ilita e caulinita na composição mineralógica da fração fina.

2.2. Pedologia do município de Mossoró

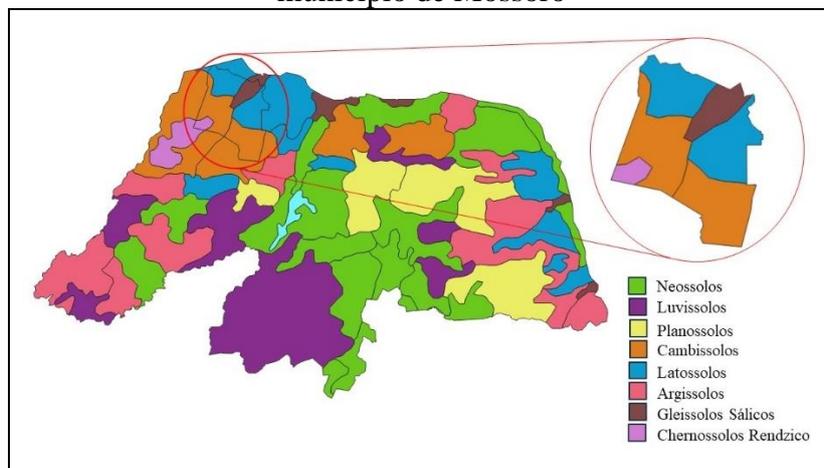
O Brasil ocupa uma área territorial de 8.510.417,8 km², conforme estabelecido na Portaria n. PR-197/2023, expedida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil, 2023) e é reconhecido como um país de dimensões continentais. Sua extensão territorial abrange praticamente metade da área total da América do Sul, representando aproximadamente 47,7% do continente.

Essa vasta extensão territorial resulta em uma grande diversidade ambiental, refletida em uma ampla variedade de solos. Para organizar essas informações de forma sistemática, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) categoriza os solos em seis níveis, sendo que o primeiro nível (ordens) composto por treze classes distintas (Santos *et al.*, 2018).

No estado do Rio Grande do Norte é possível observar uma diversidade de solos, evidenciando-se oito distintas classes do primeiro nível de categorização do SiBCS,

como detalhado na Figura 2. No contexto específico do município de Mossoró – RN, identificam-se quatro tipos de solos classificados como cambissolo, latossolo, chernossolo e gleissolo (Figura 2). Os cambissolos e latossolos dominam consideráveis extensões do município, desempenhando papéis cruciais no cenário das obras de engenharia da região. É importante destacar que o latossolo, em particular, é o solo mais abrangente no contexto do Nordeste brasileiro, representando 29,5% de toda a área. Essa predominância confere ao latossolo um papel fundamental não apenas localmente, mas também em termos regionais (Marques *et al.*, 2014).

Figura 2 - Mapa de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Norte com destaque ao município de Mossoró



Fonte: Elaboração da autora a partir da base de dados da Embrapa (2025).

O latossolo é composto por material mineral e se caracteriza pela presença do horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial, com exceção do horizonte hístico. De modo geral, o horizonte B latossólico é formado por quantidades variáveis de óxidos de ferro e de alumínio, argilominerais do tipo 1:1, além de quartzo e outros minerais que demonstram uma maior resistência aos processos de intemperismo (Santos *et al.*, 2018). Representando o segundo tipo de solo mais prevalente no Brasil, os Latossolos ocupam cerca de 19,4% de toda a área nacional (Santos *et al.*, 2011).

Prandel *et al.* (2021) submeteram alguns solos brasileiros, incluindo o Latossolo Amarelo, a análises elementares e mineralógicas utilizando fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF) e o Método de Rietveld com dados de difração de raios X (RM-XRD). A análise granulométrica do latossolo revelou predominância da fração areia grossa, correspondendo a 64,2% da massa total do solo, seguida pela argila, representando 32,1% do total. Quanto à análise EDXRF, observou-se uma

predominância de óxido de silício (SiO_2) na fração de areia, óxidos de alumínio (Al_2O_3) e de ferro (Fe_2O_3) na fração de argila, e óxido de titânio (TiO_2) predominante na fração de silte. Por outro lado, a análise RM-XRD indicou que as frações de areia (fina e grossa) são principalmente compostas por quartzo, enquanto a fração de argila é predominantemente constituída por caulinita e haloisita, e a fração de silte apresentou um teor significativo de quartzo. Outros minerais também foram identificados no solo, como goethita, anatásio, gibbsita e rútilo.

Em outro estudo conduzido por Di Raimo *et al.* (2022), foram investigados vinte e nove perfis de solo distribuídos no estado de Mato Grosso. Todos os horizontes dos perfis foram amostrados e submetidos a análises físicas, químicas e espectrais incluindo espectroscopia Vis-NIR-SWIR-MIR e fluorescência de raios X portátil (pXRF). Foram analisadas cinco classes de solos, dentre elas o Latossolo Vermelho e o Latossolo Vermelho Amarelo. Ambos os solos apresentam predominância da fração de areia, seguida pela fração de argila em todos os horizontes analisados. Além disso, a presença de óxido de silício e de alumínio foram predominantes em todos os horizontes. Na análise mineralógica, foram identificados a presença dos minerais hematita, goethita, caulinita e gibbsita nos perfis de latossolos analisados.

Barreto e Costa (2018) avaliaram as diferenças químicas e mineralógicas entre os Latossolos coletadas no Distrito Mosqueiro, no município de Belém, e em uma mina piloto de bauxita no município de Rondon do Pará. Em termos mineralógicos, os solos são compostos por caulinita e quartzo, além de conter goethita e anatásio. O Latossolo de Rondon também apresentava a presença de gibbsita. Em relação à composição química, os solos são essencialmente constituídos por SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 .

Os Cambissolos são solos caracterizados pela presença de material mineral com um horizonte B incipiente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, com exceção do horizonte hístico com uma espessura igual ou superior a 40 cm, ou um horizonte A chernozêmico quando o B incipiente exibe alta atividade de argila e saturação por bases elevada. Caso haja plintita e/ou petroplintita, horizonte glei ou horizonte vértico, sua presença não satisfaz aos requisitos para classificação como Plintossolos, Gleissolos ou Vertissolos, respectivamente (Santos *et al.*, 2018).

Lopes *et al.* (2022) realizaram uma análise das propriedades químicas e mineralógicas de solos de dois tipos distintos, Latossolo e Cambissolo Hálico, em dois municípios do Rio Grande do Norte. Utilizando a técnica de Difração de Raios-X (DRX), identificaram, em todas as amostras de solo investigadas, a presença de óxidos

de Ferro, como goethita e hematita, assim como argilominerais 1:1, predominantemente caulinita, e illita, um argilomineral não expansivo do tipo 2:1.

Por outro lado, Tech *et al.* (2022) focaram em avaliar os teores de óxidos nos horizontes de um Cambissolo localizado em Mossâmedes, Goiás. Empregando dois métodos distintos, Fluorescência de raios-X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF) e EDXRF, os óxidos encontrados em maior abundância nos horizontes foram SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e K_2O .

Os Gleissolos são constituídos por material mineral, muitas vezes caracterizados por sua natureza hidromórfica, que apresentam um horizonte glei dentro de 150 cm a partir da superfície, imediatamente abaixo dos horizontes A ou E (com ou sem gleização), ou de um horizonte hístico com espessura insuficiente para classificá-los como Organossolos. Estes solos não possuem uma textura exclusivamente arenosa em todos os horizontes dentro dos primeiros 150 cm a partir da superfície, nem apresentam um horizonte vértico que seja diagnosticamente indicativo de Vertissolos. Além disso, horizontes plânicos, plínticos, concrecionários ou litoplínticos, quando presentes, devem ser encontrados a uma profundidade superior a 200 cm a partir da superfície do solo (Santos *et al.*, 2018).

Doum *et al.* (2020) realizaram uma análise das propriedades mineralógicas e químicas de amostras de solos classificadas como Gleissolo e Latossolo em dois locais distintos (Dimako e Koba), na Região Leste de Camarões, África Central. A caracterização física revelou que tanto as amostras de Gleissolos quanto as de Latossolos exibiam uma textura de argiloarenosa ou argila arenosa. As análises mineralógicas indicaram que os Gleissolos consistem principalmente em caulinita e quartzo, com a presença de acessórios como anatásio e rutilo. Algumas amostras também mostraram a ocorrência de goethita e ilmenita. Por outro lado, os Latossolos são compostos essencialmente por quartzo, hematita e caulinita, acompanhados por minerais acessórios como anatásio, gibbsita e zircão. Os Latossolos de Dimako também revelaram a presença de goethita em sua composição. Em termos de constituição química, ambos os solos exibiram uma predominância de SiO_2 , seguida por Al_2O_3 . Outros óxidos também foram identificados em proporções muito menores, como Fe_2O_3 e TiO_2 .

Em outro estudo, Novais *et al.* (2023) investigaram cinco perfis de solo localizados no Planalto Central brasileiro, incluindo Gleissolo e Latossolo. A análise física indica que os Latossolos apresentam textura que varia de muito argilosa para

argilosa, enquanto o Gleissolo exibe uma textura predominantemente argilosa. A caracterização mineralógica revelou que os solos são compostos essencialmente por caulinita, gibbsita, hematita, goethita e, predominantemente, quartzo. No entanto, em um dos perfis de Latossolo e no perfil de Gleissolo, foram observados minerais ilita.

Os Chernossolos são compostos principalmente por materiais minerais e possuem características distintivas, como alta saturação por bases e um horizonte A chernozêmico sobrejacente a um horizonte B textural ou B incipiente, ambos com alta atividade de argila, ou sobre horizonte C carbonático, horizonte cálcico ou petrocálcico, ou ainda estar sobrepostos a rochas quando o horizonte A contiver uma concentração elevada de carbonato de cálcio (Santos *et al.*, 2018).

Oliveira *et al.* (2021) realizaram um estudo sobre a origem dos minerais da fração argila presente em três perfis de solo desenvolvidos a partir de sedimentos carbonáticos no Pantanal do Estado de Mato Grosso do Sul. Dois desses perfis foram classificados como Chernossolos, enquanto o terceiro era um Gleissolo. Os solos dos três perfis apresentavam uma consistência dura quando secos e uma consistência pegajosa e plástica quando úmidos, além da presença de um caráter vértico. Além disso, a caracterização granulométrica indicou uma textura que variou entre franco, franco-argiloso arenoso e franco-arenoso. Os resultados da técnica DRX revelaram a predominância do interstratificado de ilita-esmectita e quartzo na fração de argila, com a esmectita sendo encontrada nos três perfis, e a presença de outros minerais como caulinita e calcita. Análises da técnica EDXRF revelaram elevada concentração de SiO_2 nos três perfis de solos e a presença de níveis significativos de Na_2O , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , além de outros óxidos em menores proporções.

Santos *et al.* (2018) argumentam que embora os Chernossolos se desenvolvam em uma ampla gama de condições climáticas e a partir de diferentes materiais de origem, seu processo de formação depende da interação de fatores que promovem a formação e persistência de um horizonte superficial rico em matéria orgânica. Esse horizonte também apresenta altos teores de cálcio e magnésio, além da presença significativa de argilominerais 2:1, especialmente aqueles do grupo das esmectitas, que são expansíveis na presença de água.

2.3. Mineralogia dos solos

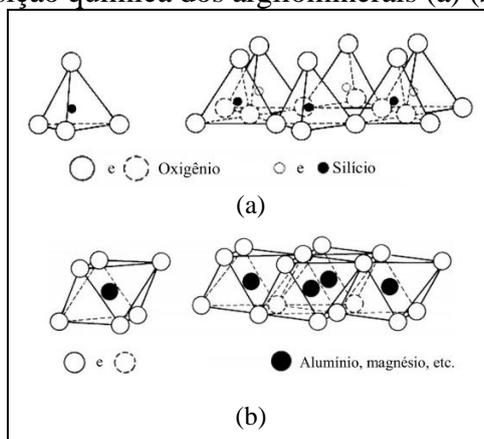
Os solos têm sua origem na decomposição da rocha matriz, resultado de uma interação complexa de processos físicos e químicos. A composição mineralógica dos solos é, portanto, diretamente relacionada à constituição do substrato rochoso. O quartzo é um dos minerais mais prevalentes na Terra, encontrado na maioria das rochas. Sua resistência à degradação resulta na formação de grãos maiores de areia e silte. Constituído por dióxido de silício (SiO_2), o quartzo exibe uma atividade superficial baixa.

O feldspato, por sua vez, é um mineral que compõe uma parcela significativa das rochas da crosta terrestre. Sua composição química comum inclui alumínio, silício e oxigênio, podendo conter também potássio, sódio ou cálcio. Durante o intemperismo, os minerais primários das rochas ricas em feldspato se decompõem, formando argilominerais, como caulinita, montmorilonita e ilita, constituindo a fração fina dos solos, ou seja, as argilas (Mitchell; Soga, 2005). Além das diferenças de tamanho, os argilominerais apresentam características físicas e químicas distintas dos grãos de areia e silte, o que confere em comportamentos distintos nos solos.

A literatura clássica (Lambe; Whitman, 1969; Mitchell; Soga, 2005) discorre sobre a composição química e o comportamento dos argilominerais encontrados em solos argilosos na presença de água, como será sintetizado a seguir.

A composição mineralógica dos argilominerais apresenta duas estruturas principais. A primeira é composta por tetraedros de silício ligados a quatro átomos de oxigênio (SiO_2), dispostos em planos (Figura 3a). A segunda é composta por octaedros de alumínio ou magnésio rodeados por oxigênio ou hidroxilas [$\text{Al}(\text{OH})_3$] (Figura 3b). Essas estruturas estão conectadas por átomos de oxigênio que pertencem a ambas.

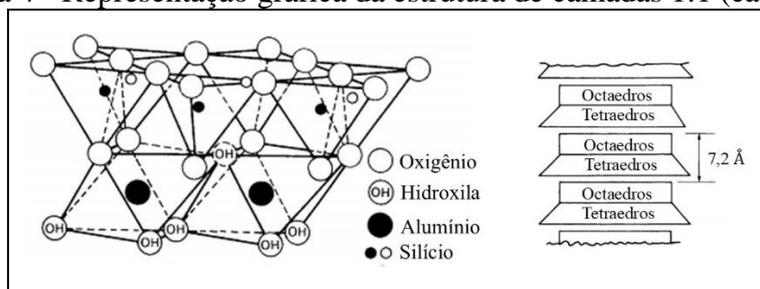
Figura 3 - Composição química dos argilominerais (a) (SiO_2) (b) [$\text{Al}(\text{OH})_3$]



Fonte: Mitchell; Soga, 2005

Os minerais argilosos resultam do arranjo em camadas, originando dois tipos predominantes: a estrutura de camada 1:1, composta por uma folha tetraédrica e uma octaédrica interligadas por pontes de hidrogênio, como no caso da caulinita ilustrada na Figura 4. Cada camada tem cerca de 7,2 Å de espessura. Essa disposição confere uma estrutura mais estável, impedindo a infiltração de água entre as camadas.

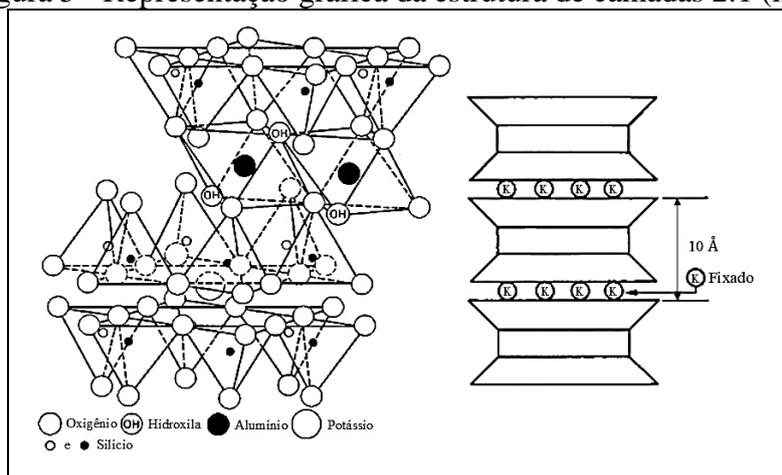
Figura 4 - Representação gráfica da estrutura de camadas 1:1 (caulinita)



Fonte: Mitchell; Soga, 2005

Por outro lado, as estruturas 2:1 envolvem a sobreposição contínua de duas lâminas tetraédricas para uma octaédrica, com uma espessura de aproximadamente 10 Å e são encontradas em minerais como a illita, vermiculita e montmorilonita. No caso específico da illita, suas camadas são ligadas por íons de potássio, conforme ilustrado na Figura 5. A carga negativa necessária para equilibrar os íons de potássio resulta da substituição isomórfica de silício por alumínio nas camadas tetraédricas.

Figura 5 - Representação gráfica da estrutura de camadas 2:1 (illita)



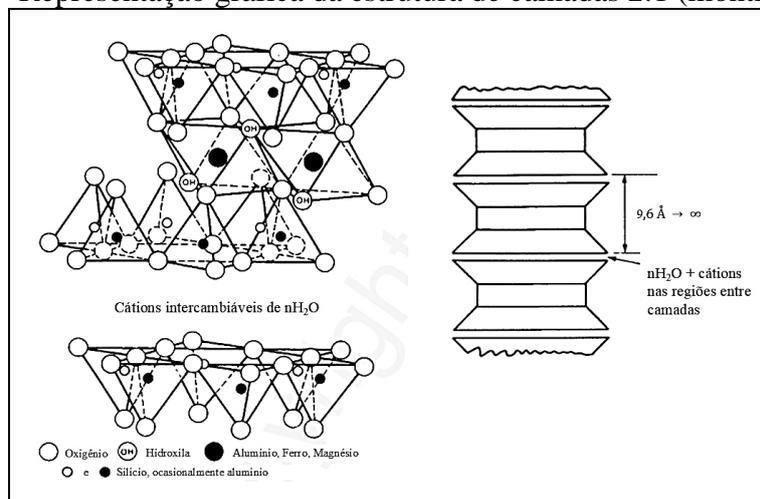
Fonte: Mitchell; Soga, 2005

No caso das montmorilonitas, a substituição isomórfica ocorre nas lâminas octaédricas, onde íons de magnésio e ferro substituem parcialmente o alumínio. Apesar de apresentarem uma estrutura do tipo 2:1, essas argilas não possuem íons de potássio

fortemente ligados entre as camadas, como ocorre em outras esmectitas. Em vez disso, as cargas negativas resultantes dessas substituições são compensadas por cátions trocáveis presentes no solo, que se localizam entre as camadas.

Essas cargas negativas livres exercem uma forte atração por moléculas de água, facilitando sua entrada nos espaços interlamelares. Quanto maior a densidade de carga negativa entre as camadas, maior é a capacidade expansiva da argila, uma vez que mais moléculas de água podem ser atraídas e retidas. As ligações entre as camadas ocorrem principalmente por forças de Van der Waals (Figura 6), permitindo que, com a hidratação, ocorra a separação das camadas e, conseqüentemente, a expansão volumétrica do mineral.

Figura 6 - Representação gráfica da estrutura de camadas 2:1 (montmorilonita)



Fonte: Mitchell; Soga, 2005

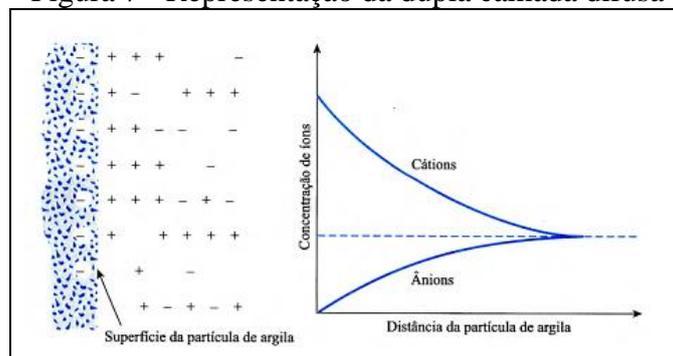
2.4. Solos Expansivos

Os solos expansivos são solos não saturados que apresentam expansão quando submetidos a saturação. Esse fenômeno ocorre devido à presença de argilominerais expansivos na fração argilosa, constituídos por uma estrutura 2:1, como a montmorilonita e a vermiculita. Esses minerais possibilitam a penetração de água entre as camadas da estrutura mineralógica, resultando em expansão. A variação de volume das partículas em nível microscópico induz alterações no volume e na organização do esqueleto do solo em uma escala macroestrutural, desencadeando o efeito expansivo no solo (Monroy; Zdravkovic; Ridley, 2015). A ocorrência de solos expansivos pode ocasionar danos estruturais em edificações, manifestando-se por meio de fissuras, trincas e rachaduras, podendo até mesmo levar ao colapso estrutural.

Entre as principais características dos solos expansivos, destaca-se a elevada superfície específica das partículas dos argilominerais. Essa característica intensifica tanto a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) quanto a retenção de água no solo. A CTC representa a quantidade de íons positivos (cátions) retidos nas superfícies das partículas de argila, tais como Cálcio (Ca^{++}) e Sódio (Na^{+1}), as quais geralmente apresentam cargas negativas devido às substituições isomórficas ocorridas nas estruturas tetraédricas e octaédricas e a quebra da continuidade da estrutura em suas extremidades (Lambe; Whitman, 1969).

Nas argilas secas, a carga negativa é compensada pelos cátions intercambiáveis que circundam as partículas, mantidos por atração eletrostática. Ao adicionar água, esses cátions e alguns ânions passam a flutuar ao redor das partículas de argila. A concentração de cátions aumenta de maneira gradual em direção à superfície, originando o fenômeno geralmente identificado como a dupla camada difusa (DCD) ao redor da partícula, conforme pode ser observado na ilustração da Figura 7 (Yong; Mohamed; Warkentin, 1992).

Figura 7 - Representação da dupla camada difusa



Fonte: Das (2011).

A dupla camada difusa provoca a separação entre minerais e partículas, desencadeando a dilatação em argilominerais expansivos. A atração das moléculas dipolares de água pelas cargas negativas na superfície das partículas impulsiona a expansão do solo, afastando as camadas tetraédricas e octaédricas. Portanto, o comportamento de contração ou expansão dos solos expansivos em resposta às variações de umidade está associado à alteração na espessura da DCD das partículas de argilominerais expansivos, contraindo-se quando secas e expandindo-se quando úmidas (Yong; Mohamed; Warkentin, 1992).

Diante disso, Ferreira (1995) destaca dois mecanismos fundamentais que influenciam a expansibilidade dos solos. O primeiro é intrínseco aos próprios solos, incluindo composição mineralógica, textura e estrutura, que estabelecem a capacidade expansiva teórica, que é a sua tendência natural a se expandir quando em contato com a água. Por outro lado, o segundo é derivado de fatores externos, como climatologia, hidrogeologia, vegetação e intervenção humana, e determina se o potencial expansivo pode ou não se desenvolver. Esses mecanismos atuam de forma conjunta, resultando na complexa dinâmica que governa a expansão dos solos.

A expansibilidade dos solos pode ocorrer devido a dois principais fatores (Ferreira, 1995):

- i) mudanças sazonais de umidade resultantes das mudanças climáticas ao longo do ano. Durante estações específicas, as precipitações se concentram, enquanto nos meses secos pode ocorrer uma evapotranspiração desequilibrada, levando à retirada de água do solo. Durante os períodos chuvosos, ocorre uma compensação, restabelecendo a umidade perdida.
- ii) alteração da umidade natural do terreno por intervenção humana, como irrigação, construção, compactação, drenagem inadequada, mineração e escavações. Essas ações têm impacto direto no equilíbrio hídrico do solo, gerando modificações nas propriedades físicas e no comportamento geotécnico.

A identificação de solos expansivos pode ser feita através de dois tipos de métodos de análise: diretos e indiretos. Os métodos indiretos utilizam índices físicos, limites de consistência ou parâmetros associados à textura, que podem ser facilmente obtidos em ensaios de laboratório e campo. Esses métodos fornecem um indicativo da potencialidade de expansão do solo, mas não fornecem uma medida direta do potencial de expansão. Em contrapartida, os métodos diretos baseiam-se na medição direta do potencial de expansão do solo. Esses métodos são mais acurados que os métodos indiretos, mas são mais complexos e onerosos. Os métodos diretos mais comuns são os ensaios edométricos, de placa e com expansocolapsômetro (Vilar; Ferreira, 2015).

A maioria das pesquisas sobre o comportamento de solos expansivos concentram-se na análise dos efeitos de aditivos na mitigação do fenômeno de expansão e na melhoria das propriedades geotécnicas desses solos. Por exemplo, Chenarboni *et al.* (2021) e Mohamed *et al.* (2023) demonstram que a adição de materiais como

cimento e zeólita, no primeiro estudo, e cimento e cinzas volantes ricas em cálcio, no segundo, resultou em mudanças significativas nas propriedades dos solos expansivos. Especificamente, observaram melhorias na resistência à compressão não confinada (UCS), nos limites de Atterberg, além de influência na densidade seca máxima e no teor de umidade ótimo das misturas.

Indiramma *et al.* (2020) constataram que a adição de cal e cinza volante, tanto isoladamente quanto em combinação, reduz os limites de plasticidade e a expansão livre, ao mesmo tempo em que aumenta a resistência e a massa específica seca do solo. Silva *et al.* (2020) também confirmam a eficácia da cal hidratada e da cinza de casca de arroz na redução da expansão do solo, resultando em melhorias significativas nas características físicas e químicas. Paiva *et al.* (2016) complementam que a adição de cal pode eliminar completamente a tensão de expansão, levando a valores nulos de expansão livre. De forma semelhante, Silvani *et al.* (2020) demonstrou que a expansão unidimensional de solos tratados com cal pode ser prevista com alta precisão por meio de um índice que combina porosidade e teor de cal, alcançando um coeficiente de correlação de 96% entre esse índice e os valores observados de expansão.

Por outro lado, um resíduo da produção de usinas de açúcar e etanol que vem ganhando destaque como estabilizante de solos expansivos é a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), que possui propriedades semelhantes às das cinzas volantes. No estudo de Silvani, Silva e Guedes (2024) observaram que sua adição a misturas de areia e bentonita reduz significativamente a expansão volumétrica, especialmente em teores acima de 12,5%, e promove estabilização em até 24 horas. A CBCA também diminui a CTC, indicando alterações mineralógicas, atribuídas à presença de óxidos de cálcio e magnésio, que favorecem a troca de cátions e reduzem a expansão.

Estudos mais recentes exploram o uso de inteligência artificial para prever e otimizar o comportamento de solos expansivos, superando as limitações dos métodos convencionais de análise geotécnica. Modelos baseados em técnicas avançadas, como *Gene Expression Programming* (GEP), *Multigene Expression Programming* (MEP) e redes neurais artificiais (ANN), como empregados por Jalal *et al.* (2023) e Jalal *et al.* (2024), mostraram bom desempenho na previsão da pressão de expansão e da resistência à compressão de solos potencialmente expansivos.

2.5. Solos Colapsíveis

Os solos colapsíveis são solos não saturados que experimentam uma redução abrupta de volume quando submetidos ao aumento de umidade, sem que haja variação na tensão total a que estão sujeitos. Segundo Reginatto e Ferrero (1973), o fenômeno de colapso é inverso ao observado durante o adensamento. Nesse processo, a água é absorvida pelo solo, resultando em um teor de umidade no final do colapso maior do que antes do início. A resistência ao cisalhamento do solo é consideravelmente reduzida, e a diminuição de volume devido ao colapso ocorre em um curto período após a saturação.

Conforme destacado por Reginatto e Ferrero (1973), solos dessa natureza podem ser categorizados como verdadeiramente colapsíveis ou condicionalmente colapsíveis. A classificação de verdadeiramente colapsíveis se aplica aos solos que, ao serem inundados, sofrem colapso mesmo na ausência de cargas externas. Por outro lado, os solos condicionalmente colapsíveis são capazes de suportar determinado nível de tensão durante a inundação, porém, ao ultrapassar esse limite, experimentam o colapso.

Barden, McGown e Collins (1973) identificaram três condições necessárias para que ocorra um colapso significativo dos solos:

- i) Uma estrutura porosa, não saturada e potencialmente instável (metaestável).
- ii) Um valor suficientemente elevado de tensão aplicada para criar uma condição metaestável.
- iii) Um valor suficientemente alto de sucção do solo (ou outro agente de ligação ou "cimentação") para estabilizar os contatos intergranulares, cuja redução durante o umedecimento levará ao colapso.

O mecanismo de colapso dos solos pode ser dividido em duas etapas principais. Na primeira etapa, ocorre a eliminação dos meniscos capilares, que são responsáveis pela sucção matricial. A segunda etapa envolve o enfraquecimento das ligações cimentícias, presentes em alguns solos. Essas ligações, compostas por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, carbonato de cálcio etc., contribuem para a coesão do solo. Do ponto de vista físico, o fenômeno de colapso está estreitamente ligado à redução da resistência ao cisalhamento nos solos não saturados (Barden; McGown; Collins, 1973).

Ferreira (1995) agrupou os métodos para identificação de solos colapsíveis em dois subgrupos: diretos e indiretos. Os métodos indiretos utilizam índices físicos, limites

de consistência e parâmetros relacionados à textura, obtidos de maneira simples em ensaios de laboratório e campo, para indicar a potencialidade ao colapso estrutural. Já os métodos diretos fundamentam-se na medição direta do potencial de colapso do solo e preveem recalques mediante ensaios edométricos simples ou duplos e ensaios de campo com expansocolapsômetro.

A partir de ensaios edométricos simples, nos quais o corpo de prova, confinado lateralmente, é submetido a um carregamento vertical até uma tensão de interesse e, posteriormente, inundado, com medição do deslocamento vertical, Vargas (1977) propôs um critério para determinar o potencial de colapso do solo por meio da Equação (1):

$$PC (\%) = \frac{Hc - Hi}{Hi} \times 100 \quad (1)$$

Em que,

PC (%) é o potencial de colapso;

Hi é a altura do corpo de prova até a tensão considerada imediatamente antes da inundação;

Hc é a altura do corpo de prova imediatamente após a inundação.

Segundo esse critério, o solo é considerado colapsível quando o potencial de colapso for igual ou superior a 2%.

Uma abordagem semelhante é adotada pela norma ASTM D5333-3 (2017), que define o índice de colapso (I_c), calculado pela mesma expressão da Equação (1). O grau de colapso é classificado de leve a severo, dependendo do valor de I_c , conforme apresentado na Tabela 1.

Grau de colapso do solo	Índice de Colapso I_c, %
Nenhum	0
Leve	0,1 a 2,0
Moderado	2,1 a 6,0
Moderadamente severo	6,1 a 10,0
Severo	> 10,0

Fonte: D5333-3

Reginatto e Ferrero (1973), por outro lado, utilizaram ensaios edométricos duplos, onde um ensaio é realizado com o corpo de prova na umidade natural e o outro é feito com o corpo de prova inundado, para propor o coeficiente de colapsibilidade, dado pela expressão (2.2). Os parâmetros podem ser observados na Figura 8.

$$C = \frac{P_{cs} - P_0}{P_{cn} - P_0} \quad (2.2)$$

Onde,

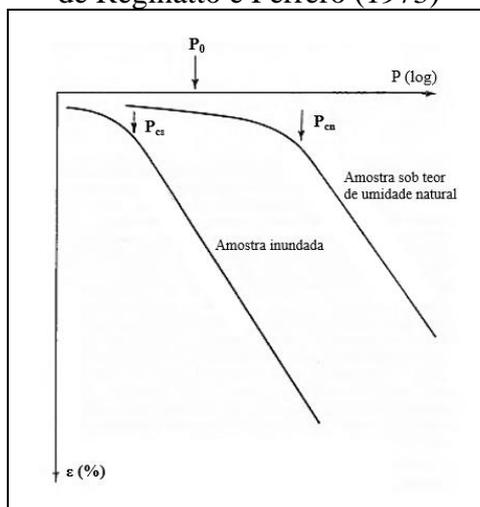
C é o coeficiente de colapsibilidade;

P_0 é a tensão vertical devido ao peso próprio do solo em campo;

P_{cs} é a tensão de pré-consolidação virtual do solo inundado;

P_{cn} é a tensão de pré-consolidação virtual do solo na umidade natural.

Figura 8 - Ensaio edométrico duplo para obtenção dos parâmetros utilizados no critério de Reginatto e Ferrero (1973)



Fonte: Adaptado de Reginatto e Ferrero (1973)

De acordo com esse critério, o solo é considerado colapsível se $P_{cn} > P_{cs}$. Quando $P_{cs} < P_0$, o solo é considerado verdadeiramente colapsível. De outro modo, quando $P_{cs} > P_0$ o solo é caracterizado como condicionalmente colapsível e a possibilidade de colapso depende se P é maior ou menor que P_{cs} .

Estudos recentes têm se concentrado em avaliar o comportamento de solos colapsíveis frente a estabilizações químicas visando à redução do potencial de colapso. Ayeldeen *et al.* (2022) demonstraram a eficácia do uso de tratamento isolado com cimento ou fibra, bem como a combinação desses dois aditivos, na diminuição do potencial de colapso. Da mesma forma, Seiphoori e Zamanian (2022) e Johari *et al.* (2021) também destacaram que injeções de suspensões diluídas de nanopartículas de argila apresentaram um desempenho significativo na mitigação desse fenômeno.

Por outro lado, a compactação se apresenta como uma técnica mecânica simples, relativamente barata e eficaz na melhoria dos solos, capaz de reduzir significativamente a colapsibilidade. Diversos estudos demonstraram a eficiência de diferentes métodos de compactação na redução do potencial de colapso, como os trabalhos de Rodrigues *et al.* (2021), Silveira e Rodrigues (2020) e Gao *et al.* (2020).

3. METODOLOGIA

O estudo geotécnico desenvolvido nesta tese de doutorado apresenta uma análise abrangente das propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos do município de Mossoró, no Rio Grande do Norte. Além disso, investiga o potencial expansivo e colapsível desses solos.

A escolha inicial da área de estudo foi motivada por um extenso programa de investigação geotécnica na região, justificado pelos problemas estruturais observados em várias edificações residenciais, possivelmente relacionados às características expansivas e colapsíveis do solo. Posteriormente, o escopo foi ampliado para abranger outros tipos de solo identificados e mapeados no município. Adicionalmente, Mossoró é uma região em expansão territorial, impulsionada sobretudo por investimentos em energias renováveis e no setor industrial.

Serão abordados os procedimentos adotados para a coleta das amostras deformadas e indeformadas, bem como os ensaios de laboratório desenvolvidos. Serão realizados ensaios de laboratório para a caracterização física, química e mineralógica, bem como ensaios de expansão e colapso, em todas as amostras de solo coletadas.

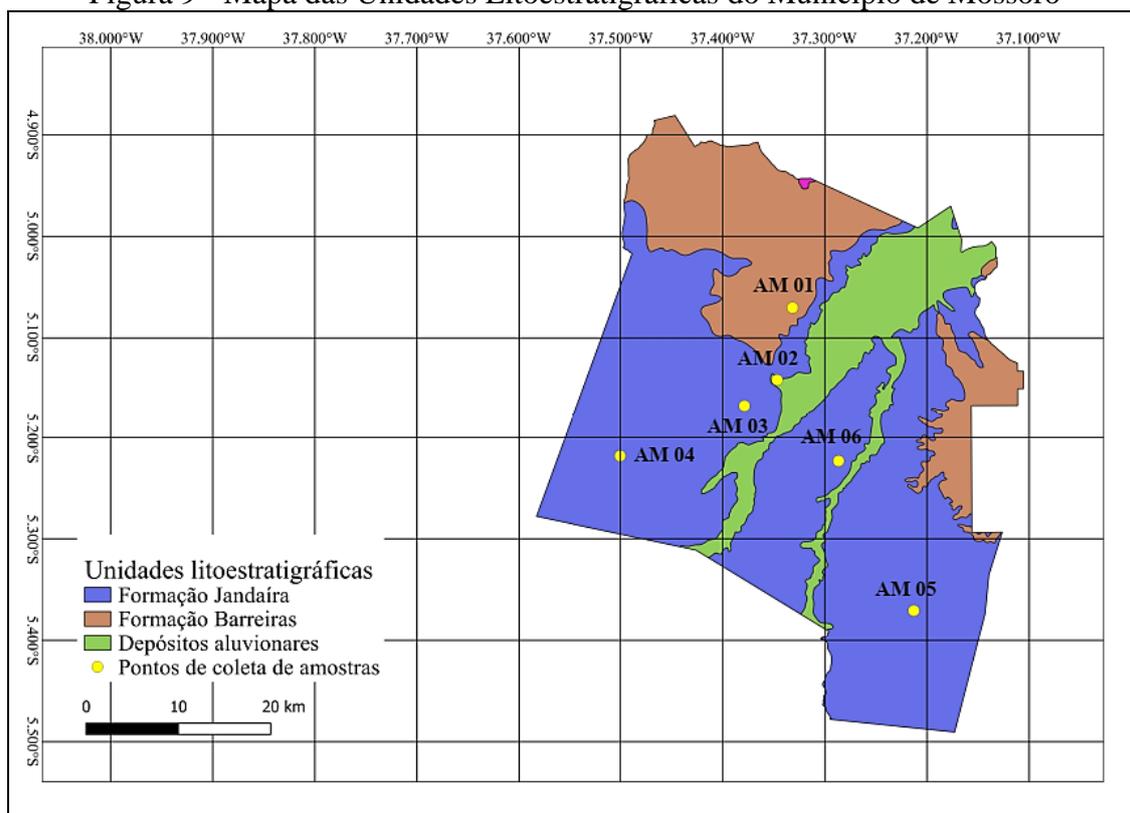
3.1. Área de estudo

A área de estudo corresponde ao município de Mossoró, situado no estado do Rio Grande do Norte. Mossoró é localizado na Mesorregião Oeste Potiguar e Microrregião Mossoró, com distâncias de 281 km até a capital estadual, Natal, e 237 km até a capital do Ceará, Fortaleza. A extensão territorial do município compreende 2.099,3 km², destacando-se como o de maior abrangência territorial no Rio Grande do Norte. Geograficamente, sua delimitação ao norte abrange os municípios de Aracati, no Ceará, além de Tibau e Grossos, no Rio Grande do Norte; ao sul, faz fronteira com Governador Dix-Sept Rosado e Upanema; a leste, limita-se com Areia Branca, Serra do Mel e Assu; e a oeste, suas fronteiras estendem-se até Baraúna (IBGE, 2023; IDEMA, 2008).

O município de Mossoró situa-se em uma área de clima semiárido muito quente. Nessa região, são predominantes as estações secas, abrangendo um período de 7 a 8 meses (de junho a janeiro), e estações chuvosas, compreendidas entre fevereiro e maio, que caracteriza o período úmido, além de um período de intensa umidade, que vai desde março até meados de maio (SGB, 2014; IDEMA, 2008).

Além disso, o território mossoroense está inserido, geograficamente, na Bacia Potiguar. Sua composição abrange diversas unidades litoestratigráficas, incluindo a Formação Jandaíra, o Grupo Barreiras e os Depósitos Aluvionares, conforme exposto na Figura 9 (SGB, 2014). Destaca-se, sobretudo, a significativa extensão territorial ocupada pela Formação Jandaíra, a qual engloba uma vasta área do município. Adicionalmente, ressalta-se que quatro pontos de coletas de amostras (AM 03, AM 04, AM 05 e AM 06) estão localizados dentro dessa mesma unidade geológica.

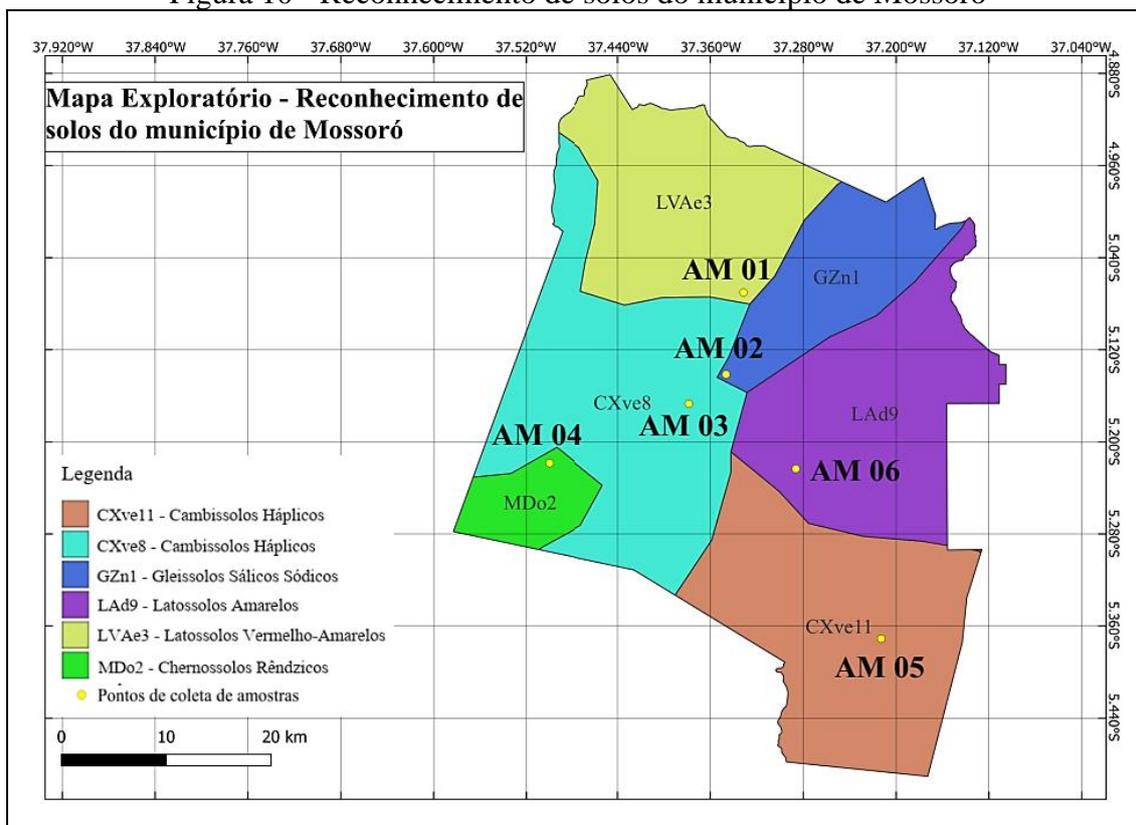
Figura 9 - Mapa das Unidades Litoestratigráficas do Município de Mossoró



Fonte: Elaboração da autora a partir da base de dados do Serviço Geológico do Brasil (2025).

No contexto da investigação pedológica da região em estudo, a Figura 10 proporciona um panorama detalhado do mapeamento dos diferentes tipos de solos presentes na área. As amostras foram coletadas de cada um dos tipos de solo, incluindo: Latossolos Amarelo e Vermelho-Amarelo (AM 01 e AM 06), Cambissolos Háplicos (AM 03 e AM 05), Gleissolo Sálícos Sódicos (AM 02) e Chernossolos Rêndzicos (AM 04), conforme a classificação proposta por Santos *et al.* (2011).

Figura 10 - Reconhecimento de solos do município de Mossoró

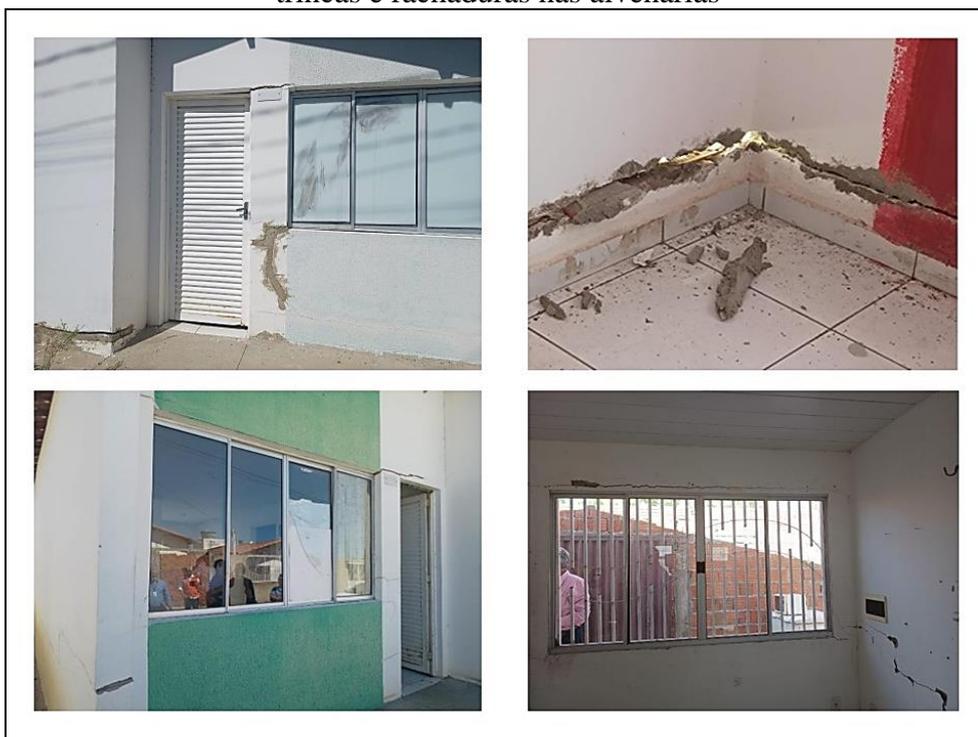


Fonte: Elaboração da autora a partir da base de dados do Serviço Geológico do Brasil (2025).

Em relação ao potencial expansivo e colapsível da região em estudo, as Cartas de Suscetibilidade de Ocorrência de Solos Expansivos e Colapsíveis no Brasil, elaboradas por Holanda (2022) através de Redes Neurais Artificiais e disponíveis em ambiente *web*, evidenciaram que o solo no município de Mossoró apresenta uma alta suscetibilidade tanto à expansão quanto ao colapso.

É importante destacar que a região de coleta de amostras AM 06 está localizada em uma área residencial, onde diversas edificações apresentam manifestações patológicas, possivelmente relacionadas à expansão e contração do solo. Essas manifestações incluem fissuras, trincas e rachaduras nas estruturas de alvenaria, como evidenciado na Figura 11. Além das questões mencionadas, também é possível observar desníveis entre o radier e o solo de fundação. Em função dessas constatações, foi realizada uma investigação geotécnica mais aprofundada nessa área, com a coleta de amostras de múltiplos pontos, incluindo amostras deformadas e indeformadas, sondagens à percussão SPT e sondagens à trado.

Figura 11 - Unidades residenciais na região de coleta de amostras apresentando fissuras, trincas e rachaduras nas alvenarias



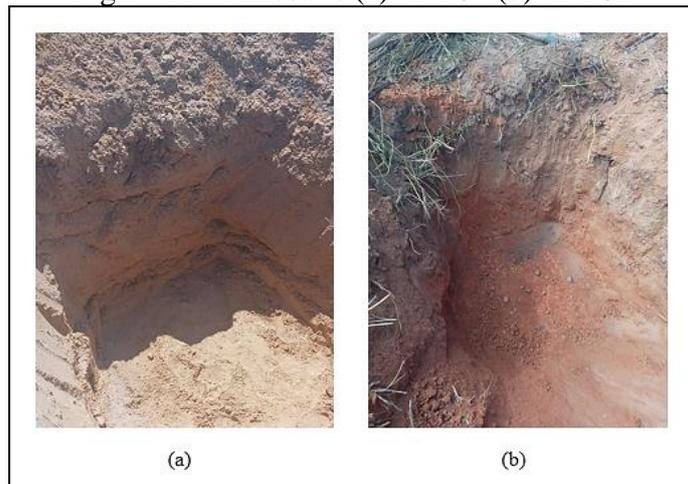
Fonte: Elaboração da autora (2025).

3.2. Coleta de Amostras

As atividades de campo incluíram a coleta de amostras deformadas nos pontos AM 01, AM 02, AM 03, AM 04 e AM 05, além da coleta de amostras deformadas e indeformadas em diversos pontos da região AM 06.

Os pontos AM 01 e AM 02 estão localizados em uma área plana nas proximidades da rodovia BR-304. A coleta de amostras deformadas foi realizada por meio da escavação de poços com profundidade de um metro. No ponto AM 01, o solo extraído apresentou coloração amarelada, e a caracterização tátil-visual indicou a predominância de material arenoso, como mostrado na Figura 12 (a), sendo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo. Já no ponto AM 02 foi observado um horizonte superficial acinzentado seguido por um solo avermelhado, conforme evidenciado na Figura 12 (b). A amostra apresentou uma composição arenosa-argilosa com presença de pedregulhos, sendo proveniente de uma área classificada como Gleissolo Sálico Sódico.

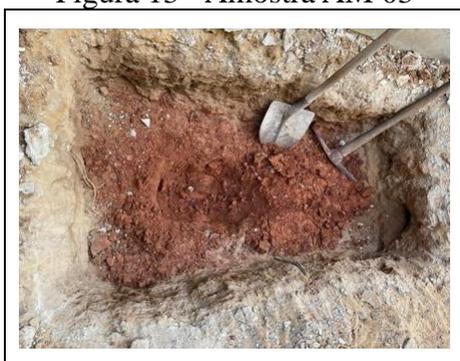
Figura 12 - Amostras (a) AM 01 (b) AM 02



Fonte: Elaboração da autora (2025).

O ponto AM 03 está localizado em uma área plana de uso residencial. A coleta da amostra foi realizada por meio da escavação de um poço com profundidade de 60 cm, considerando que sondagens anteriores indicaram que a mesma camada de solo se estende até aproximadamente 4,0 m de profundidade. A camada superficial foi removida para permitir a coleta do material destinado ao estudo. O solo extraído apresentou coloração avermelhada e, com base na caracterização tátil-visual, foi identificado como argila arenosa, conforme mostrado na Figura 13. Este solo foi classificado como Cambissolo Hálico.

Figura 13 - Amostra AM 03

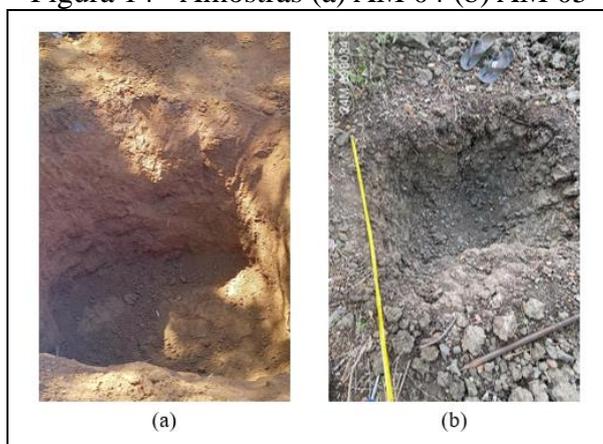


Fonte: Elaboração da autora (2025).

O ponto AM 04 está localizado próximo à rodovia BR-405, em uma área plana e residencial. O solo coletado apresentou coloração alaranjada e se encontra em uma área classificada como Chernossolos Rêndzicos. Já o ponto AM 05, situado às margens da rodovia RN-016, apresentou solo de coloração cinza escura. Ambos os solos foram coletados por meio da abertura de poços com profundidade média de 1 metro. As

amostras possuem alto teor de argila e demonstram elevada plasticidade quando em contato com a água. A Figura 14 ilustra os poços de coleta de solos.

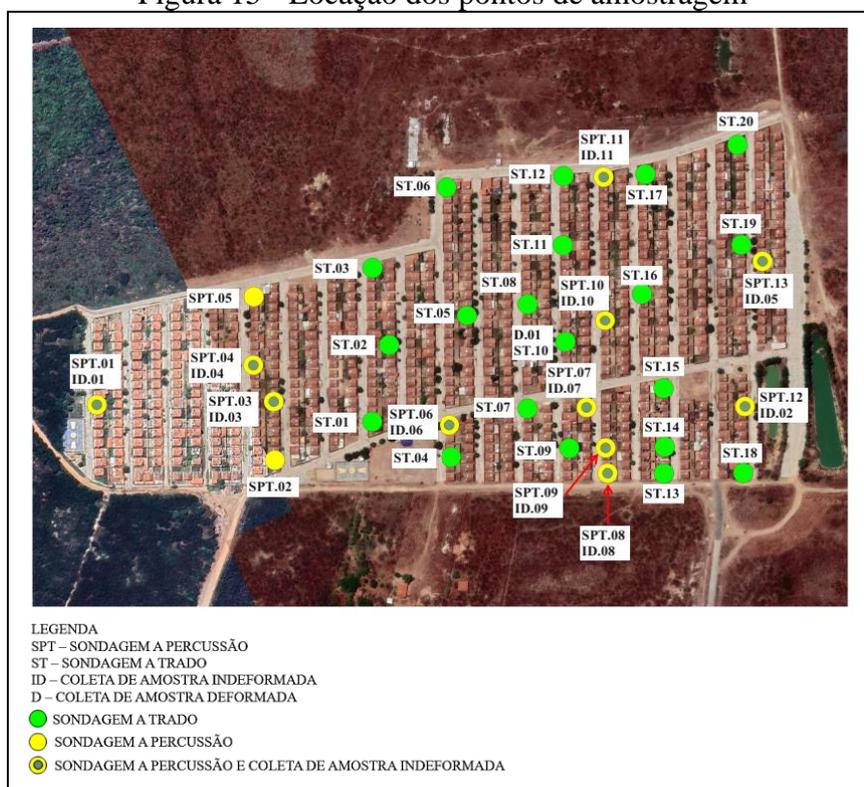
Figura 14 - Amostras (a) AM 04 (b) AM 05



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Por fim, no ponto AM 06, situado em uma área residencial com solo classificado como Latossolo Amarelo, foram realizadas, além da coleta de amostras indeformadas e deformadas, a execução do ensaio de resistência à penetração (SPT) e sondagem a trado para identificar o perfil do subsolo. A localização exata desses pontos está ilustrada na Figura 15.

Figura 15 - Locação dos pontos de amostragem



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Foram coletadas onze amostras indeformadas (ID) a uma profundidade de 0,50 m, de formato cúbico com 30 cm de aresta. Os blocos de solo foram cuidadosamente envolvidos em filme plástico, em seguida, revestidos com uma camada de gesso e dispostos em caixas de madeira. A Figura 16 mostra imagens da coleta da amostra indeformada ID.01.

Figura 16 - Coleta da amostra indeformada ID.01



Fonte: Elaboração da autora (2025).

As amostras deformadas foram obtidas através de um poço de inspeção aberto associado a sondagem ST.10, nas profundidades de 0,20 m, 0,60 m, 0,80 m, 1,0 m, 1,4 m e 1,5 m. Nesse poço foi possível visualizar ao menos três camadas distintas de solo. Por análise tátil-visual, o solo da camada superficial pode ser considerado areno-argiloso, seguido por um solo argiloso e a terceira camada sendo um solo argiloso com pedregulhos. Essa variabilidade pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 - Poço de inspeção aberto no furo ST.10



Fonte: Elaboração da autora (2025).

A fim de facilitar a identificação das amostras de solos estudadas, criou-se um sistema de nomenclatura com o seguinte padrão:

$$AM-XX.T.N^{\circ}-F.Y.Z$$

Onde:

AM-XX: representa o ponto de coleta

T: é o tipo de amostra (D = deformada, ID = indeformada)

N^o: corresponde ao número da amostra no ponto

F: é a forma de retirada da amostra deformada no ponto

- T = sondagem à trado;
- P = poço de inspeção.

Y: representa o número do furo de sondagem (01, 02, etc.)

Z: corresponde a profundidade de retirada da amostra deformada através do furo de sondagem, em metros.

A Tabela 2 apresenta de forma sintetizada a nomenclatura padronizada das amostras estudadas e a Tabela 3 apresenta os ensaios de laboratório realizados nesse estudo.

Tabela 2 - Nomenclatura das amostras deformadas utilizadas

Código da Amostra	Ponto	Tipo	Nº da amostra	Forma de retirada	Furo	Prof. (m)
AM-01.D.01-P	AM 01	Deformada	01	Poço de inspeção	-	-
AM-02.D.01-P	AM 02	Deformada	01	Poço de inspeção	-	-
AM-03.D.01-P	AM 03	Deformada	01	Poço de inspeção	-	-
AM-04.D.01-P	AM 04	Deformada	01	Poço de inspeção	-	-
AM-05.D.01-P	AM 05	Deformada	01	Poço de inspeção	-	-
AM-06.D.01-ST.10.0,2	AM 06	Deformada	01	Trado	10	0,2
AM-06.D.01-ST.10.0,6	AM 06	Deformada	01	Trado	10	0,6
AM-06.D.01-ST.10.0,8	AM 06	Deformada	01	Trado	10	0,8
AM-06.D.01-ST.10.1,0	AM 06	Deformada	01	Trado	10	1,0
AM-06.D.01-ST.10.1,4	AM 06	Deformada	01	Trado	10	1,4
AM-06.D.01-ST.10.1,5	AM 06	Deformada	01	Trado	10	1,5
AM-06.ID.01	AM 06	Indeformada	01	-	-	-
AM-06.ID.02	AM 06	Indeformada	02	-	-	-
AM-06.ID.03	AM 06	Indeformada	03	-	-	-
AM-06.ID.04	AM 06	Indeformada	04	-	-	-
AM-06.ID.05	AM 06	Indeformada	05	-	-	-
AM-06.ID.06	AM 06	Indeformada	06	-	-	-
AM-06.ID.07	AM 06	Indeformada	07	-	-	-
AM-06.ID.08	AM 06	Indeformada	08	-	-	-
AM-06.ID.09	AM 06	Indeformada	09	-	-	-
AM-06.ID.10	AM 06	Indeformada	10	-	-	-
AM-06.ID.11	AM 06	Indeformada	11	-	-	-

Fonte: Elaboração da autora (2025).

Tabela 3 - Ensaios de laboratório executados no estudo

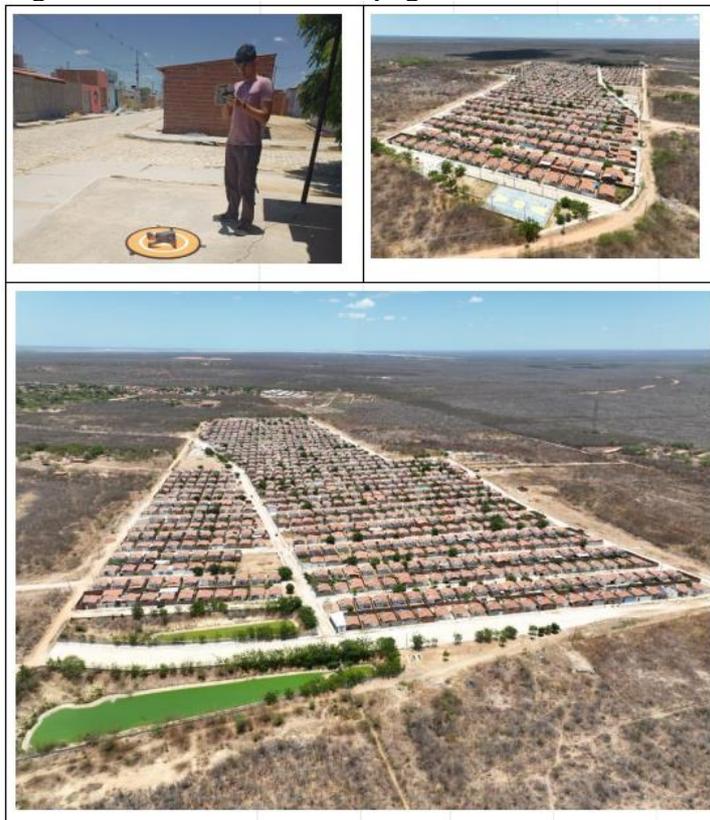
Caracterizações	Tipo de ensaio	Quantitativo
Física	Granulometria	22
	Umidade	22
	Limites de Atteberg	22
	Massa específica dos sólidos	22
	Compactação	6
	<i>Crumb Test</i>	16
Química	Fluorescência de Raios X (FRX)	6
Mineralógica	Difração de Raios X	6
Expansividade	Ensaio de expansão	19
Colapsibilidade	Ensaio de colapso	6

Fonte: Elaboração da autora (2025).

3.3. Levantamento topográfico da região AM 06

Para auxiliar nas análises geotécnicas, na área da coleta de amostras AM 06 foi realizado um levantamento topográfico com o auxílio de drone, conforme observado na Figura 18. Essa abordagem moderna proporciona uma visão aérea abrangente da área de interesse, permitindo a captura de imagens de alta resolução e a criação de modelos tridimensionais precisos do terreno.

Figura 18 - Levantamento topográfico na área de estudo



Fonte: Elaboração da autora (2025).

3.4. Ensaios de campo da região AM 06

Na região AM 06 foram realizadas onze sondagens a percussão (SPT) e vinte sondagens à trado para análise do subsolo da região. O procedimento empregado para obtenção dessas amostras seguiu as diretrizes estabelecidas pelas normas ABNT NBR 6484:2020 e ABNT NBR 9603:2023.

3.5. Metodologia dos ensaios laboratoriais

3.5.1. Ensaios de caracterização física dos solos

A preparação das amostras de solo foi conduzida em conformidade com a ABNT NBR 6457:2024. Os ensaios de caracterização física foram realizados nas cinco amostras deformadas provenientes das regiões AM 01, AM 02, AM 03, AM 04 e AM 05, bem como nas onze amostras indeformadas e nas amostras deformadas do provenientes do furo de sondagem ST.10, coletadas no ponto AM 06.

Esses ensaios abrangeram a análise granulométrica, seguindo as orientações estabelecidas na ABNT NBR 7181:2016, determinação do Limite de Liquidez, conforme a ABNT NBR 6459:2016, determinação do Limite de Plasticidade, conforme a ABNT NBR 7180:2016 e a obtenção da Massa Específica dos Sólidos, de acordo com a ABNT NBR 6458:2016.

Para avaliar a capacidade de dispersão dos solos em água, realizou-se o ensaio de dispersão dos solos (*Crumb Test*) seguindo as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 13601:2020.

Os ensaios de compactação tipo Proctor Normal foram realizados nas amostras provenientes das regiões AM 01, AM 02, AM 03, AM 04, AM 05 e AM-06.ID.03, seguindo o procedimento descrito na ABNT NBR 7182:2016. A partir desses ensaios, foram traçadas as curvas de compactação para determinar a massa específica aparente seca máxima (ρ_d) e a umidade ótima (w_{ot}) de cada amostra de solo.

3.5.2. Ensaio de caracterização mineralógica dos solos

Para identificar os minerais presentes nas amostras de solo, realizou-se a técnica de Difração de Raios-X (DRX) utilizando o equipamento XRD-6000 da marca Shimadzu. Essa técnica se utiliza da difração de raios-X para reconhecer minerais por meio de seus distintos padrões de difração. Para o procedimento, a amostra a ser

analisada tinha granulometria passante na peneira de 150 mesh. As amostras analisadas foram AM-01.D.01-P, AM-02.D.01-P, AM-03.D.01-P, AM-04.D.01-P, AM-05.D.01-P e AM-06.ID.03.

3.5.3. Ensaio de caracterização química dos solos

Para avaliar a composição e a concentração dos elementos presentes na fração fina nos solos (material passante na peneira de 150 mesh) foram realizados os ensaios de Fluorescência de Raios-X (FRX) utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. As amostras analisadas foram AM-01.D.01-P, AM-02.D.01-P, AM-03.D.01-P, AM-04.D.01-P, AM-05.D.01-P e AM-06.ID.03.

3.5.4. Ensaio de expansão dos solos

Os ensaios de expansão foram conduzidos utilizando células edométricas convencionais, seguindo os procedimentos especificado na norma ASTM D4546-21. Os corpos de prova, moldados de acordo com as recomendações normativas, incluíam tanto amostras indeformadas quanto deformadas.

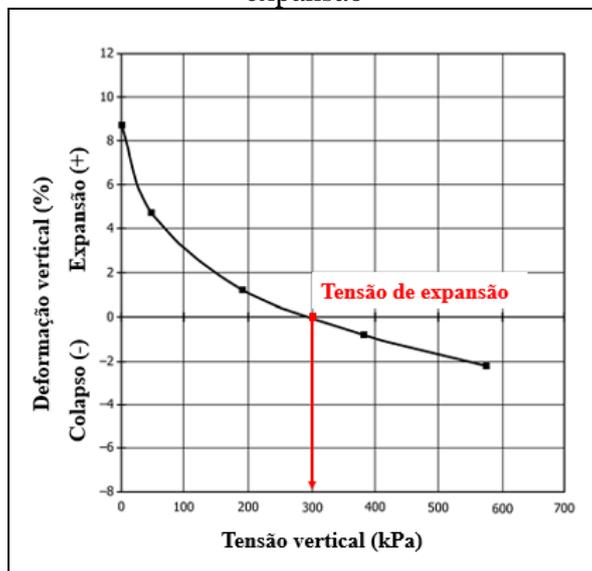
No ensaio de expansão livre, a qual todas as amostras de solos foram submetidas, os corpos de prova foram colocados nas células edométricas, com duas placas porosas secas posicionadas nas extremidades superior e inferior. Em seguida, aplicou-se uma sobrecarga total de aproximadamente 7,0 kPa, que considerou o peso da placa porosa, cabeçote e a sobrecarga, aguardando-se um período de 5 minutos para o assentamento do sistema. Após esse intervalo, foi realizada a leitura inicial com um relógio comparador analógico, e a seguir procedeu-se à inundação do corpo de prova com água destilada, monitorando a deformação do solo até a estabilização. As leituras foram feitas em intervalos de tempo regulares conforme estipulado pela norma ASTM D4546-21.

Após a estabilização da expansão, cada corpo de prova foi submetido a estágios progressivos de sobrecarga até que a altura original fosse restabelecida. Essa prática é descrita no Método C da norma ASTM D4546-21. Na versão anterior da norma, a tensão correspondente ao retorno da amostra à sua altura inicial era definida como tensão de expansão.

Já na versão mais recente, a tensão de expansão é obtida por meio de um gráfico de Deformação *versus* Tensão Vertical. Para isso, são necessários pelo menos quatro

corpos de prova idênticos, cada um submetido a diferentes tensões verticais durante a inundação, sendo que ao menos um deles deve contrair ao ser inundado. A curva é traçada, e a tensão de expansão é determinada pela interseção da curva com o eixo das abscissas, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Gráfico Deformação *versus* tensão vertical: Determinação da tensão de expansão



Fonte: Adaptado de ASTM D4546-21.

Nessa última análise da tensão de expansão, os solos coletados em cada uma das regiões de análise (AM 01, AM 02, AM 03, AM 04, AM 05 e AM-06.ID.03) foram testados conforme o Método A da norma ASTM D4546-21, no qual os corpos de prova são remoldados, e as tensões de expansão são determinadas. Vale destacar que a amostra AM-06.ID.03 foi selecionada por apresentar maior expansividade em comparação às demais amostras dessa região.

3.5.4.1. Ensaio de expansão pelo Método C em amostras indeformadas

Para realizar os ensaios de expansão pelo método C com amostras indeformadas, os corpos de prova foram moldados a partir das amostras AM-06.ID.01, AM-06.ID.02, AM-06.ID.03, AM-06.ID.04, AM-06.ID.07, AM-06.ID.08, AM-06.ID.10 e AM-06.ID.11. A tensão de expansão foi obtida aumentando-se a sobrecarga até o retorno da amostra à sua altura inicial.

3.5.4.2. Ensaio de expansão pelo Método C em amostras deformadas

Os corpos de prova cilíndricos remoldados para ensaio de expansão pelo Método C foram moldados utilizando as amostras AM-06.ID.01, AM-06.ID.03, AM-06.ID.05, AM-06.ID.06 e AM-06.ID.09. Estes corpos de prova foram preparados utilizando a fração de solo previamente seca ao ar e passante na peneira de 2,0 mm (Nº 10). Foi adicionada a quantidade necessária de água para permitir a compactação do solo dentro do anel metálico, até se atingir uma massa específica média de $2,0 \text{ g/cm}^3$, por meio da Prensa Manual CBR. A realização dos ensaios com corpos de provas compactados foi motivada por dois fatores: i) impossibilidade de amostragem indeformada das amostras AM-06.ID.05, AM-06.ID.06 e AM-06.ID.09; e ii) avaliar o potencial expansivo da fração fina dos solos AM-06.ID.01 e AM-06.ID.03. A tensão de expansão foi obtida aumentando-se a sobrecarga até o retorno da amostra à sua altura inicial.

3.5.4.3. Ensaio de expansão pelo Método A em amostras deformadas

Os corpos de prova deformados para o ensaio de expansão pelo Método A foram moldados a partir das amostras AM-01.D.01–P, AM-02.D.01–P, AM-03.D.01–P, AM-04.D.01–P, AM-05.D.01–P e AM-06.ID.03. Essas amostras foram preparadas utilizando a fração de solo previamente seca ao ar e passada na peneira de 4,75 mm (Nº 4). A quantidade de água necessária foi adicionada para permitir a compactação estática do solo dentro do anel metálico, realizada com a Prensa Manual CBR. Cada corpo de prova foi compactado até atingir a massa específica aparente máxima e a umidade ótima de cada solo, determinadas previamente no ensaio de compactação. Foram moldadas quatro amostras idênticas de cada tipo de solo, sendo cada uma submetida a uma tensão de inundação distinta, necessárias para a elaboração do gráfico Deformação vertical *versus* Tensão de expansão.

3.5.5. Ensaio de colapso de amostras indeformadas dos solos

Os ensaios de colapso foram realizados em algumas amostras indeformadas da região AM 06, que apresentaram deformações verticais de compressão significativas durante a fase de inundação nos ensaios de expansão conduzidos pelo Método C. Para isso, foram utilizadas células edométricas convencionais, seguindo os procedimentos especificados nas normas ASTM D4546-21 e ASTM D5333-03.

Para conduzir os ensaios, os corpos de prova foram moldados em anéis de aço inoxidável com uma altura média de 19,00 mm e um diâmetro médio de 50,3 mm. Os corpos de prova indeformados foram moldados a partir das amostras AM-06.ID.02, AM-06.ID.04, AM-06.ID.07, AM-06.ID.08, AM-06.ID.10 e AM-06.ID.11.

Cada corpo de prova, estando lateralmente confinado, foi submetido a carregamentos crescentes de compressão de 12,5 kPa, 25 kPa e 50 kPa, sem considerar a sobrecarga da pedra porosa e cabeçote. Cada etapa de carregamento teve duração suficiente para que se estabilizasse a deformação axial do corpo de prova. A inundação do corpo de prova foi realizada após aplicação da tensão de 50 kPa e estabilização da deformação axial. Após inundação, avaliou-se a variação de altura do corpo de prova por um período de 24 horas até que a deformação estabilizasse.

Calculou-se o índice de colapso do solo, conforme estabelecido pela ASTM D5333-3, que é representado pela deformação vertical do solo decorrente da sua inundação sob tensão, dado pela Equação 2:

$$I_c (\%) = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (2)$$

Onde

I_c (%) é o índice de colapso;

Δh é a variação de altura do corpo de prova devido a sua inundação;

h_0 é altura inicial do corpo de prova.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados das caracterizações físicas, dos ensaios de expansão e de colapso, bem como da análise química e mineralógica realizadas na área de estudo.

4.1. Caracterização física dos solos

A Tabela 4 apresenta a síntese dos resultados da análise granulométrica das amostras de solo, excetuando-se aquelas coletadas no ponto AM 06. Todas as curvas granulométricas podem ser visualizadas no Anexo. De modo geral, os solos avaliados exibem características predominantemente arenosas, embora contenham uma quantidade expressiva de frações finas, sobretudo partículas argilosas. Destacam-se, nesse aspecto, as amostras AM-03.D.01-P, AM-04.D.01-P e AM-05.D.01-P, que apresentaram elevados teores de argila, sendo que a amostra AM-05.D.01-P atingiu cerca de 40% dessa fração. A fração pedregulhosa, por sua vez, mostrou-se pouco representativa em todas as amostras, com a maior proporção observada na amostra AM-02.D.01-P, que registrou aproximadamente 8%.

Tabela 4 - Caracterização granulométrica dos solos dos pontos AM 01, AM 02, AM 03, AM 04 e AM 05

Amostra	Granulometria					
	Pedregulho	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila
AM-01.D.01-P	0,57%	12,73%	39,87%	22,55%	4,28%	20,00%
AM-02.D.01-P	7,91%	22,74%	24,44%	20,77%	7,54%	16,60%
AM-03.D.01-P	2,66%	17,54%	23,15%	15,26%	9,46%	31,93%
AM-04.D.01-P	5,17%	6,42%	14,23%	13,38%	21,27%	39,53%
AM-05.D.01-P	5,36%	5,05%	15,18%	34,68%	5,97%	33,76%

Fonte: Elaboração da autora (2025).

Dando continuidade à análise granulométrica, foram avaliadas as amostras de solo coletadas na região AM 06. Os resultados estão sintetizados na Tabela 5. Todas as curvas granulométricas podem ser visualizadas no Anexo. De modo geral, observa-se que a maioria das amostras é composta por solos de natureza predominantemente arenosa, acompanhada por uma fração significativa de argila. Ressalta-se também a presença marcante de pedregulhos em alguns materiais, com destaque para as amostras indeformadas AM-06.ID.01 e AM-06.ID.05, bem como para as amostras deformadas AM-06.D.01-ST.10.0,6 e AM-06.D.01-ST.10.0,8. Observações realizadas em campo e em laboratório indicam que esses pedregulhos apresentam superfícies lisas,

arredondadas ou semiarredondadas, características típicas de seixos, conforme observado na Figura 20.

Tabela 5 - Caracterização granulométrica dos solos do ponto AM 06

Amostra	Granulometria					
	Pedregulho	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila
AM-06.ID.01	29,59%	11,42%	10,62%	6,70%	8,96%	32,71%
AM-06.ID.02	8,45%	18,26%	24,67%	12,45%	6,17%	30,01%
AM-06.ID.03	20,31%	8,79%	20,71%	18,13%	10,44%	21,63%
AM-06.ID.04	18,65%	13,79%	17,18%	11,91%	10,90%	27,57%
AM-06.ID.05	30,83%	15,15%	20,84%	10,48%	5,97%	16,73%
AM-06.ID.06	13,98%	14,62%	24,09%	14,56%	6,61%	26,14%
AM-06.ID.07	21,62%	12,35%	19,02%	11,26%	8,66%	27,10%
AM-06.ID.08	20,70%	14,87%	34,86%	16,59%	3,61%	9,37%
AM-06.ID.09	22,75%	22,14%	18,01%	6,64%	7,82%	25,65%
AM-06.ID.10	18,22%	12,04%	13,28%	13,91%	9,71%	32,84%
AM-06.ID.11	13,99%	12,63%	19,06%	13,59%	12,02%	28,70%
AM-06.D.01-ST.10.0,2	11,26%	20,78%	22,12%	13,35%	7,84%	26,65%
AM-06.D.01-ST.10.0,6	46,59%	15,42%	17,49%	9,52%	3,52%	7,45%
AM-06.D.01-ST.10.0,8	49,00%	8,70%	12,12%	7,55%	6,04%	16,60%
AM-06.D.01-ST.10.1,0	7,57%	16,41%	28,17%	21,80%	9,33%	16,72%
AM-06.D.01-ST.10.1,4	13,76%	19,37%	24,65%	13,28%	3,69%	25,25%
AM-06.D.01-ST.10.1,5	14,55%	17,62%	24,45%	15,56%	5,02%	22,81%

Fonte: Elaboração da autora (2025).

Figura 20 - Pedregulhos característicos dos solos analisados



Fonte: Elaboração da autora (2025).

A partir das amostras obtidas na sondagem a trado ST.10 com abertura de poço de inspeção, verifica-se que a camada de pedregulho está situada em uma profundidade rasa, variando entre 0,6 m e 1,0 m em relação à superfície do solo. Essa constatação é corroborada pelos resultados de sondagem a percussão e a trado em outros pontos, onde o "impenetrável" foi alcançado, em média, nessa faixa de profundidade.

A Tabela 6 fornecem os resultados dos ensaios de limites de consistência, massa específica dos sólidos e teor de umidade higroscópico dos solos analisados. A massa específica dos sólidos apresentou variação entre 2,66 e 2,82 g/cm³. Predominantemente, os solos foram classificados como areia argilosa. A fração fina em praticamente todas as amostras recebeu classificação de plasticidade média a alta de acordo com o critério de classificação apresentado por Burmister (1949).

A atividade das argilas (A) variou de 0,18 a 1,03. Seguindo a classificação proposta por Skempton (1953), que divide as argilas em três grupos, quanto maior a atividade, maior é o potencial de expansão. Com base nessa classificação, as argilas presentes nos solos estudados foram categorizadas como inativas (atividade < 0,75) e normalmente ativas (atividade entre 0,75 e 1,25).

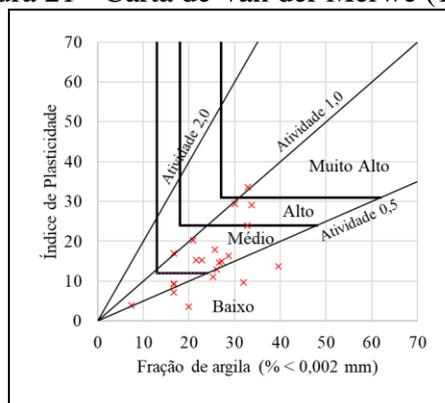
Tabela 6 - Resultados obtidos nos ensaios de limites de consistência, massa específica dos sólidos e teor de umidade

Amostra	Consistência			Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	Classificação SUCS	Teor de Umidade (%)	% da fração de argila	A
	LL (%)	LP (%)	IP (%)					
AM-01.D.01-P	18,99	15,38	3,61	2,66	SC-SM	1,20	20,00	0,18
AM-02.D.01-P	28,16	19,02	9,13	2,71	SC	10,32	16,60	0,55
AM-03.D.01-P	27,44	17,78	9,66	2,68	SC	2,95	31,93	0,30
AM-04.D.01-P	39,35	25,65	13,70	2,76	CL-ML	13,52	39,53	0,35
AM-05.D.01-P	60,03	31,00	29,03	2,73	CH-MH	11,61	33,76	0,86
AM-06.D.01-ST.10.0,2	30,26	15,62	14,64	2,67	SC	3,66	26,65	0,55
AM-06.D.01-ST.10.0,6	17,67	13,76	3,91	2,68	GM	1,69	7,45	0,52
AM-06.D.01-ST.10.0,8	36,70	19,67	17,03	2,72	GC	4,90	16,60	1,03
AM-06.D.01-ST.10.1,0	23,44	14,09	9,35	2,75	SC	2,55	16,72	0,56
AM-06.D.01-ST.10.1,4	34,43	23,37	11,06	2,70	SC	3,95	25,25	0,44
AM-06.D.01-ST.10.1,5	35,21	19,91	15,31	2,71	SC	3,45	22,81	0,67
AM-06.ID.01	52,79	28,80	23,99	2,75	GC	10,58	32,71	0,73
AM-06.ID.02	45,80	16,46	29,34	2,73	SC	7,31	30,01	0,98
AM-06.ID.03	28,01	12,81	15,19	2,66	SC	6,78	21,63	0,70
AM-06.ID.04	39,10	18,86	20,24	2,72	SC	7,79	20,86	0,97
AM-06.ID.05	24,92	17,68	7,24	2,70	SC	3,81	16,73	0,43
AM-06.ID.06	32,67	19,72	12,95	2,71	SC	4,59	26,14	0,50
AM-06.ID.07	32,70	17,73	14,97	2,82	SC	7,93	27,10	0,55
AM-06.ID.08	18,48	NP	-	2,71	SC	3,40	9,37	-
AM-06.ID.09	38,13	20,26	17,87	2,72	SC	5,20	25,65	0,70
AM-06.ID.10	60,26	26,68	33,57	2,74	CH	10,15	32,84	1,02
AM-06.ID.11	41,38	25,09	16,28	2,77	SC	7,79	28,70	0,57

LL = Limite de Liquidez; LP = Limite de Plasticidade; IP = Índice de Plasticidade; SUCS = Sistema Unificado de Classificação de Solos; A = Atividade da argila
Fonte: Elaboração da autora (2025).

Em contraste, aplicando os critérios de Van Der Merwe (1964), a maioria das amostras de solo analisadas apresentou grau de expansividade variando de médio a muito alto, conforme indicado pela cruz vermelha na Figura 21. Especificamente, as amostras AM-05.D.01–P, AM-06.ID.01, AM-06.ID.02 e AM-06.ID.10 foram classificadas como possuindo alta a muito alta expansividade.

Figura 21 - Carta de Van der Merwe (1964)

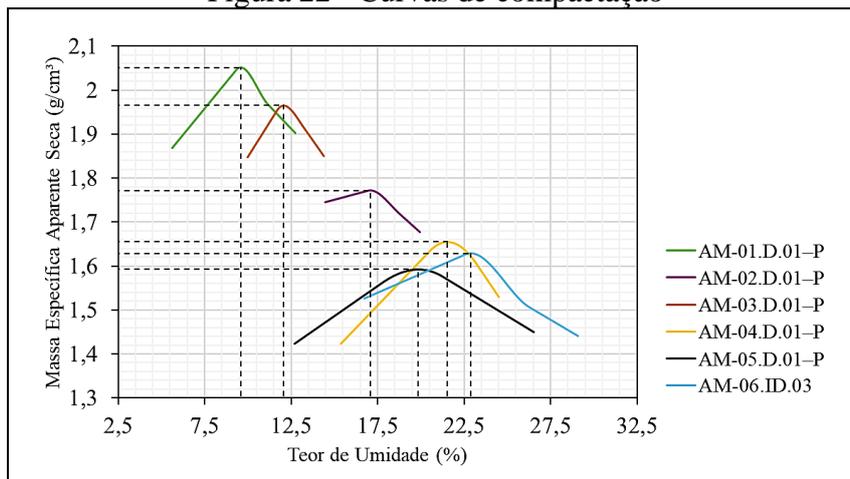


Fonte: Elaboração da autora (2025).

Com relação a avaliação da capacidade de dispersão dos solos, com exceção da amostra AM-06.ID.02, todas as demais manifestaram um comportamento não dispersivo. Apesar das amostras não demonstrarem tendência à dispersão, é importante integrar essa informação com outros dados, como a atividade da argila, porcentagem da fração fina, mineralogia dos solos, assim como o potencial à expansão e/ou colapso, para obter uma compreensão mais abrangente do comportamento do solo.

No que se refere à compactação das amostras, Figura 22 apresenta as curvas de compactação obtidas no ensaio de compactação Proctor normal. Observa-se que as amostras com maior teor de frações finas, sobretudo argila e silte (como AM-04.D.01–P, AM-05.D.01–P e AM-06.ID.03), apresentam valores mais elevados de umidade ótima e menores densidades secas máximas, comportamento típico de solos com estrutura mais plástica e maior retenção de água. Por outro lado, amostras com predominância da fração arenosa, como a AM-01.D.01–P, mostraram densidades secas máximas mais altas e umidades ótimas mais baixas, compatíveis com solos mais granulares e menos coesivos.

Figura 22 - Curvas de compactação



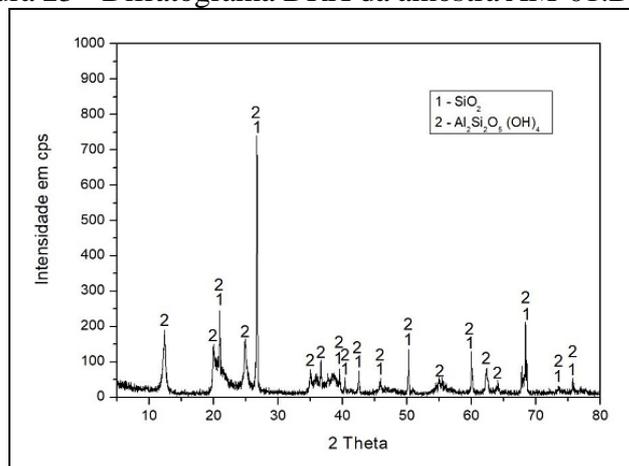
Fonte: Elaboração da autora (2025).

4.2. Caracterização mineralógica dos solos

A análise mineralógica visa identificar as fases cristalinas presentes em cada solo, fornecendo subsídios para a compreensão dos mecanismos que regem seu comportamento físico-mecânico, particularmente em relação à expansibilidade observada nos ensaios de laboratório.

A difratometria de raios X (DRX) realizada para a amostra AM-01.D.01-P, apresentada na Figura 23, revelou a presença predominante de duas fases minerais: dióxido de silício (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). A caulinita é um mineral do grupo das argilas do tipo 1:1, com baixa capacidade de troca catiônica e limitada expansibilidade. A predominância dessas duas fases sugere que o solo apresenta uma composição mineralógica relativamente simples, com domínio de partículas não expansivas.

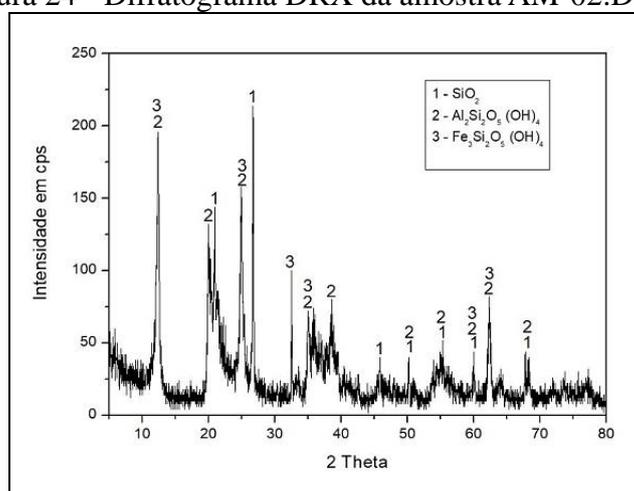
Figura 23 - Difratograma DRX da amostra AM-01.D.01-P



Fonte: Elaboração da autora (2025).

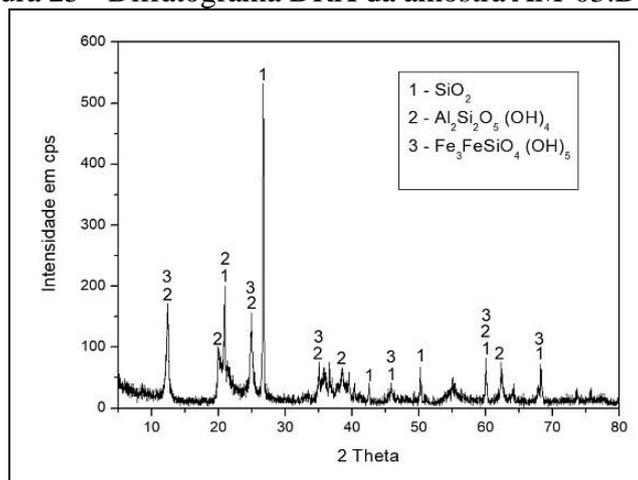
Para as amostras AM-02.D.01-P e AM-03.D.01-P, a difratometria de raios X (DRX), ilustrada nas Figura 24 e 24, revelou a presença de três fases minerais predominantes: dióxido de silício (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e haloisita férrica. As formas identificadas da haloisita férrica foram $\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ na amostra AM-02.D.01-P e $\text{Fe}_3\text{FeSiO}_4(\text{OH})_5$ na amostra AM-03.D.01-P. A haloisita férrica é uma variação da haloisita com substituição parcial de íons de alumínio por ferro trivalente (Fe^{3+}), o que lhe confere coloração amarronzada e propriedades físico-químicas diferenciadas, como maior atividade superficial e potencial de absorção de água.

Figura 24 - Difratograma DRX da amostra AM-02.D.01-P



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Figura 25 - Difratograma DRX da amostra AM-03.D.01-P

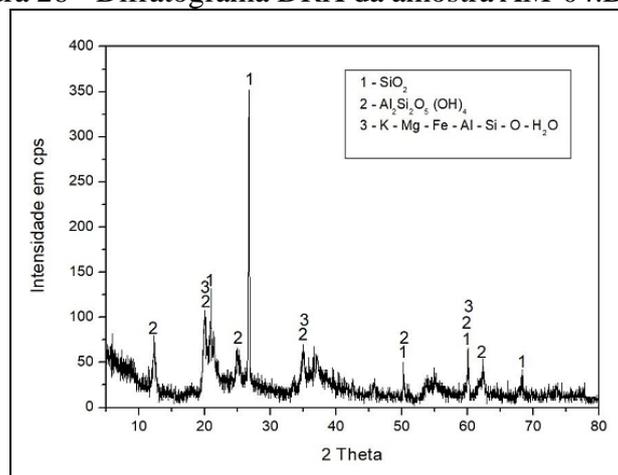


Fonte: Elaboração da autora (2025).

Por outro lado, o difratograma DRX da amostra AM-04.D.01-P (Figura 26) permitiu identificar a presença de três fases minerais principais: dióxido de silício (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e um composto complexo representado por K-Mg-

Fe–Al–Si–O–H₂O, possivelmente relacionado a minerais argilosos 2:1 do grupo das esmectitas (montmorilonita) ou ilitas mistas com substituições isomórficas e intercalações. A presença desse último mineral, com possível estrutura esmectítica ou mista, sugere um comportamento potencialmente expansivo, dada sua capacidade de absorção de água entre as camadas estruturais.

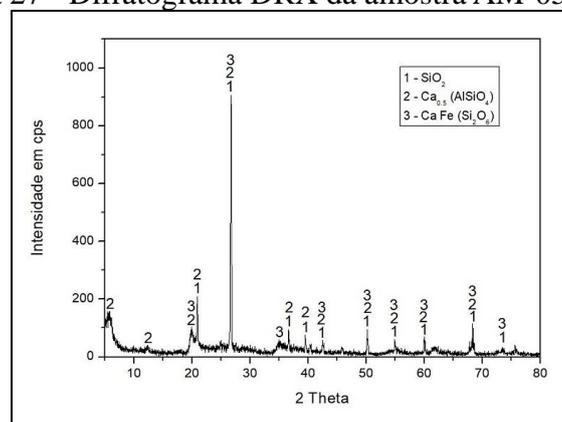
Figura 26 - Difratoograma DRX da amostra AM-04.D.01-P



Fonte: Elaboração da autora (2025).

A análise de DRX da amostra AM-05.D.01–P, representada na Figura 27, revelou a presença de três fases minerais distintas: dióxido de sílica (SiO₂), um feldspato plagioclásio rico em cálcio com fórmula simplificada Ca_{0,5}(AlSiO₄), e um piroxênio rico em cálcio e ferro, representado por CaFe(Si₂O₅). A ausência de minerais argilosos bem definidos como caulinita ou esmectita sugere que os processos pedogenéticos ainda não levaram à formação abundante desses produtos secundários, ou que as condições ambientais locais não foram totalmente favoráveis a essa transformação.

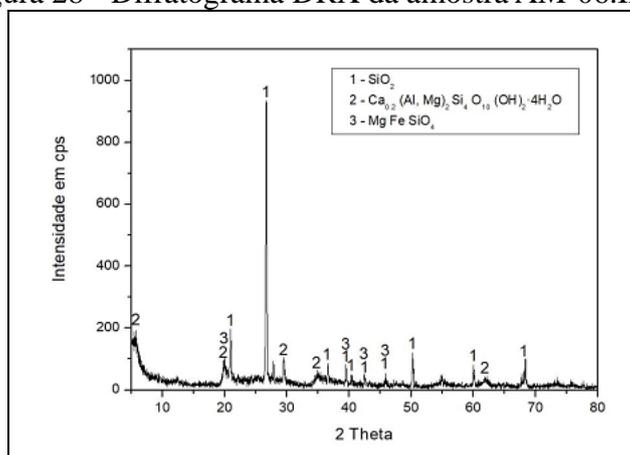
Figura 27 - Difratoograma DRX da amostra AM-05.D.01-P



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Por fim, a análise por difratometria de raios X (DRX) da amostra AM-06.ID.03, ilustrada na Figura 28 evidenciou a presença das fases minerais dióxido de silício (SiO_2), filossilicatos hidratados de cálcio, alumínio e magnésio 2:1 expansivo com fórmula aproximada $\text{Ca}_{0,2}(\text{Al}, \text{Mg})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, e olivina férrica-magnésiana (MgFeSiO_4). Esses filossilicatos são expansivos e apresentam significativa capacidade de troca iônica, além de elevada retenção de água em sua estrutura interlamelar. Portanto, a composição mineralógica identificada evidencia um solo com comportamento potencialmente expansivo, devido à presença dos filossilicatos hidratados, porém estabilizado parcialmente pela presença de quartzo e minerais ferromagnesianos.

Figura 28 - Difratograma DRX da amostra AM-06.ID.03



Fonte: Elaboração da autora (2025).

A Tabela 7 apresenta uma síntese dos resultados dos ensaios de DRX para todas as amostras analisadas. Percebe-se a predominância dos minerais SiO_2 e $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ na composição dos solos estudados.

Tabela 7 - Resultado dos ensaios de Difração de Raios X

Amostra	Fases		
	1	2	3
AM-01.D.01-P	SiO_2	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	-
AM-02.D.01-P	SiO_2	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	$\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
AM-03.D.01-P	SiO_2	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	$\text{Fe}_3\text{FeSiO}_4(\text{OH})_5$
AM-04.D.01-P	SiO_2	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	K-Mg- Fe-Al-Si-O-H ₂ O
AM-05.D.01-P	SiO_2	$\text{Ca}_{0,5}(\text{AlSiO}_4)$	$\text{CaFe}(\text{Si}_2\text{O}_5)$
AM-06.ID.03	SiO_2	$\text{Ca}_{0,2}(\text{Al}, \text{Mg})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	MgFeSiO_4

Fonte: Elaboração da autora (2025).

4.3. Caracterização química dos solos

A análise dos resultados de Fluorescência de Raios X (FRX), sintetizada na Tabela 8 nas seis amostras de solo revela uma composição química dominada pelos óxidos de silício (SiO_2) e alumínio (Al_2O_3) em todas as amostras, indicando a predominância de silicatos e aluminossilicatos como constituintes minerais primários e secundários. Observa-se uma variabilidade significativa nas proporções dos demais óxidos entre as amostras, sugerindo diferentes composições mineralógicas e graus de intemperismo.

Tabela 8 - Resultado dos ensaios de Fluorescência de Raios X

Amostra	Óxidos						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	TiO_2
AM-01.D.01-P	47,82	35,24	4,38	0,09	-	-	1,54
AM-02.D.01-P	36,79	34,05	13,18	0,25	0,61	-	1,64
AM-03.D.01-P	42,13	31,94	12,18	0,28	0,78	-	1,50
AM-04.D.01-P	36,46	27,00	19,93	0,64	2,21	1,17	1,59
AM-05.D.01-P	51,96	20,74	13,51	1,97	0,66	1,14	1,19
AM-06.ID.03	50,65	21,02	11,91	6,67	2,79	1,62	1,31

Fonte: Elaboração da autora (2025).

O óxido de ferro (Fe_2O_3) está presente em quantidades notáveis, podendo influenciar a coloração do solo e indicar a presença de minerais de ferro. O teor de óxido de cálcio (CaO) é geralmente baixo, com exceção da amostra AM-06.ID.03, que apresenta um teor consideravelmente elevado, sugerindo a presença de uma fase rica em cálcio. Os teores de óxido de potássio (K_2O) e óxido de magnésio (MgO) variam entre as amostras, indicando a possível presença de feldspatos, micas e minerais argilosos 2:1 em diferentes proporções. O óxido de titânio (TiO_2) ocorre em pequenas quantidades em todas as amostras.

4.4. Avaliação do potencial de expansão

4.4.1. Expansão das amostras indeformadas pelo Método C

Os índices físicos e o grau de saturação foram determinados para todos os corpos de provas indeformados submetidos ao ensaio de expansão, conforme detalhado na Tabela 9. Este processo incluiu a determinação de parâmetros como a massa específica aparente, teor de umidade, porosidade, e outros indicadores relevantes para a caracterização das propriedades físicas dos materiais analisados.

Tabela 9 - Parâmetros físicos dos corpos de prova indeformados ensaiados pelo Método C

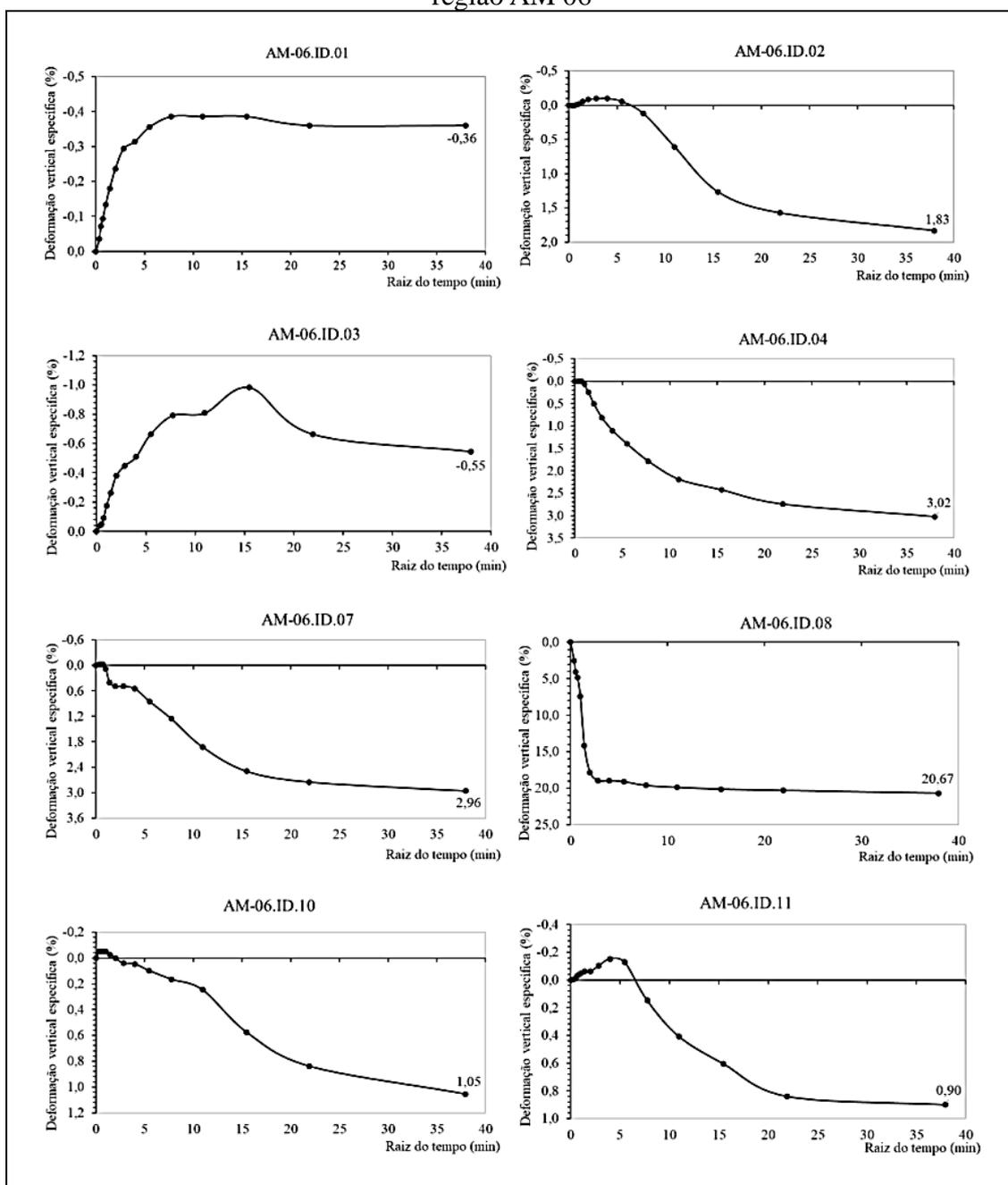
Amostra	Massa específica (g/cm^3)	Umidade natural de campo (%)	Massa específica dos sólidos (g/cm^3)	Densidade Relativa	Índice de Vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)
AM-06.ID.01	1,73	26,63	1,37	2,75	1,01	50,28	72,53
AM-06.ID.02	1,92	20,93	1,56	2,73	0,72	41,78	79,64
AM-06.ID.03	1,72	35,07	1,28	2,68	1,10	52,40	85,39
AM-06.ID.04	1,64	24,11	1,32	2,72	1,06	51,46	61,75
AM-06.ID.07	1,66	16,76	1,42	2,82	0,98	49,58	48,11
AM-06.ID.08	1,34	5,97	1,27	2,71	1,13	53,13	14,27
AM-06.ID.10	1,88	16,18	1,62	2,74	0,69	40,75	64,38
AM-06.ID.11	1,74	30,97	1,33	2,77	1,08	51,96	79,22

Fonte: Elaboração da autora (2025).

A Figura 29 exibe os gráficos de deformação específica vertical *versus* raiz do tempo obtidos nos ensaios de expansão pelo Método C da ASTM D4546-21 para o estágio de inundação dos corpos de prova indeformados da região AM 06. Constata-se que os corpos de prova derivados das amostras AM-06.ID.01 e AM-06.ID.03 exibiram uma pequena expansão durante essa fase, sendo necessário aguardar a estabilização das deformações antes de prosseguir para o próximo estágio de carregamento. Nesses casos, as tensões de expansão para as amostras AM-06.ID.01 e AM-06.ID.03 foram 12,5 kPa e 10 kPa, respectivamente. Em relação a amostra AM-06.ID.03 esse comportamento pode estar associado a presença de argilominerais expansivos na sua composição, evidenciando uma composição química favorável à retenção de água e à expansão volumétrica.

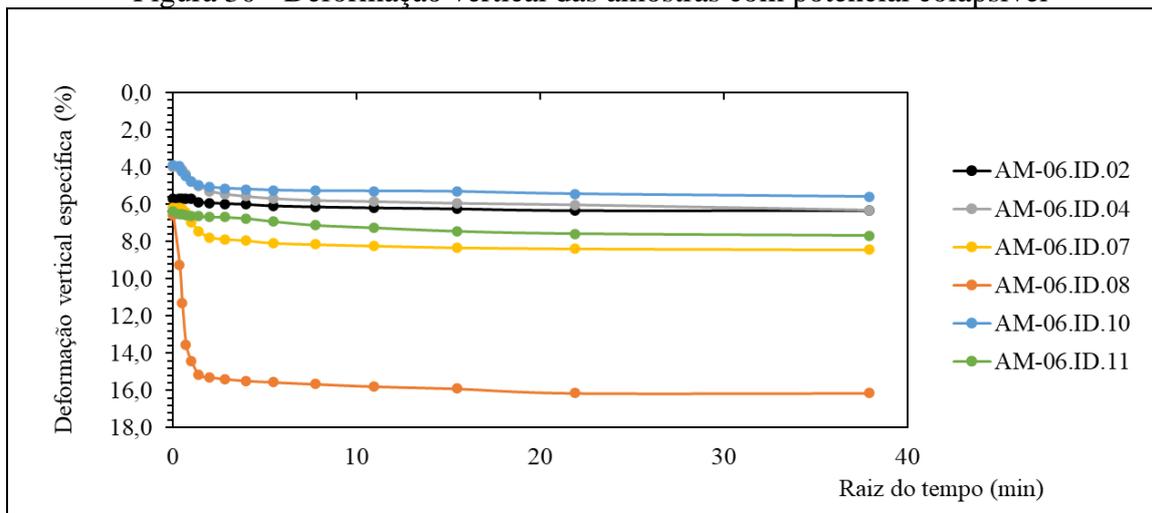
Em contrapartida, os corpos de prova provenientes das amostras AM-06.ID.02, AM-06.ID.10 e AM-06.ID.11 inicialmente apresentaram uma tendência de expansão durante o estágio de inundação, porém, diferentemente das amostras AM-06.ID.01 e AM-06.ID.03, retornaram à sua altura inicial sem requerer um aumento adicional no carregamento. É pertinente ressaltar que, exceto pelas amostras AM-06.ID.01 e AM-06.ID.03, as demais amostras de solo evidenciaram uma propensão ao colapso quando submetidas à inundação, refletindo variações na deformação específica que variaram de 0,90% a 20,67% entre os corpos de prova analisados. A Figura 30 apresenta a deformação das amostras que apresentaram potencial colapsível. A amostra AM-06.ID.11 destacou-se como a que apresentou deformação vertical mais significativa.

Figura 29 - Resultados obtidos no ensaio de expansão para as amostras indeformadas da região AM 06



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Figura 30 - Deformação vertical das amostras com potencial colapsível



Fonte: Elaboração da autora (2025).

4.2.2. Expansão das amostras deformadas pelo Método C

A Tabela 10 apresenta os índices físicos e o grau de saturação determinados para todos os corpos de provas deformados da região AM 06, submetidos ao ensaio de expansão.

Tabela 10 - Parâmetros físicos dos corpos de prova deformados ensaiados pelo Método C

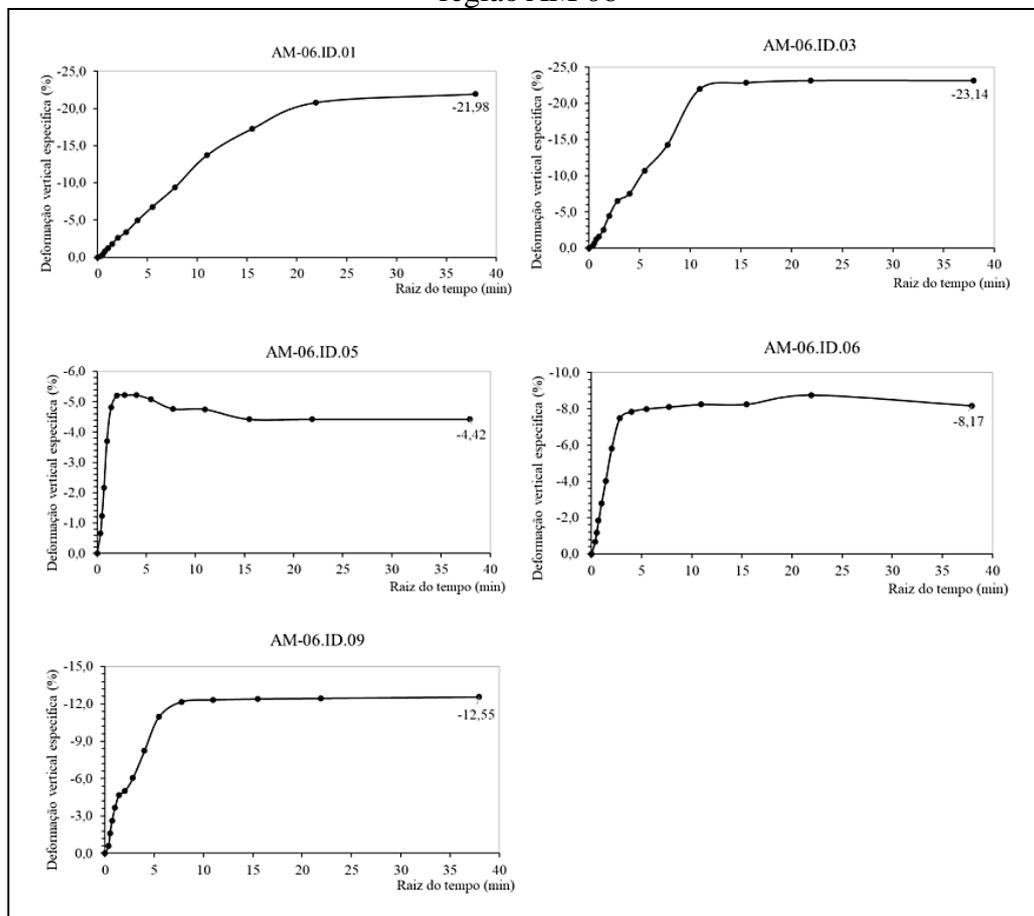
Amostra	Massa específica (g/cm^3)	Umidade natural de campo (%)	Massa específica dos sólidos (g/cm^3)	Densidade Relativa	Índice de Vazios	Porosidade (%)	Grau de Saturação (%)
AM-06.ID.01	2,00	4,71	1,93	2,75	0,43	30,08	30,17
AM-06.ID.03	2,00	13,80	1,72	2,68	0,56	35,88	66,09
AM-06.ID.05	2,00	5,74	1,89	2,70	0,43	30,07	36,05
AM-06.ID.06	2,00	3,53	1,93	2,71	0,40	28,76	23,69
AM-06.ID.09	2,00	4,21	1,93	2,72	0,41	29,20	27,77

Fonte: Elaboração da autora (2025).

A Figura 31 exibe os gráficos de deformação específica vertical *versus* raiz do tempo obtidos nos ensaios de expansão pelo Método C da ASTM D4546-21 para o estágio de inundação dos corpos de prova compactados da região AM 06. É evidente que ao confeccionar os corpos de prova com grãos mais finos do solo, compreendendo areia, silte e argila, ocorreram expansões significativas. Essas expansões resultaram em deformações específicas variando de 4,42% a 23,14% entre as amostras analisadas. A

amostra AM-06.ID.03 apresentou a maior expansão. Isto pode estar associado a presença de argilominerais expansivos na sua composição mineralógica.

Figura 31 - Resultados obtidos nos ensaios de expansão para as amostras deformadas da região AM 06



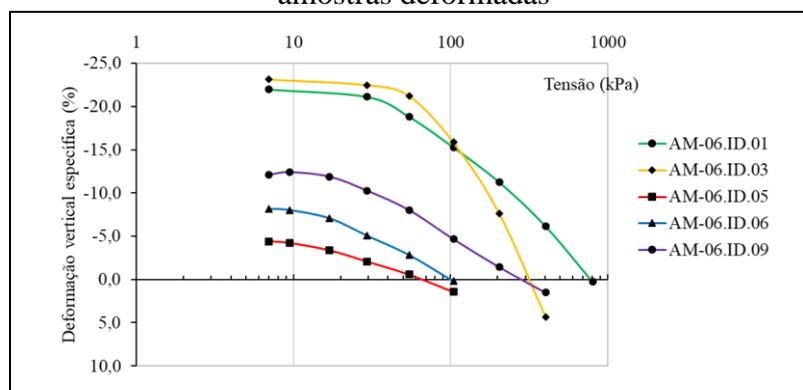
Fonte: Elaboração da autora (2025).

Além disso, as tensões de expansão atingiram patamares mais elevados durante os ensaios. Destacam-se valores de 65,5 kPa para o corpo de prova moldados a partir das amostras AM-06.ID.05, 100 kPa para AM-06.ID.06, aproximadamente 300 kPa para os corpos de prova derivados das amostras AM-06.ID.03 e AM-06.ID.09, e 800 kPa para a amostra AM-06.ID.01, conforme ilustrado na Figura 32.

Nessa figura, é possível observar o comportamento tensão *versus* deformação específica para as amostras deformadas. Especificamente, ao comparar as amostras AM-06.ID.01 e AM-06.ID.03 nas condições indeformadas e compactada somente com partículas finas, verifica-se um notável aumento na deformação específica devido à expansão. Estes achados podem estar associados alguns fatores, como a presença de argilominerais expansivos na fração fina (identificado no ensaio de DRX da amostra

AM-06.ID.03), a remoção de frações inertes (como pedregulhos), o estado de compactação e a forma como os grãos estão organizados.

Figura 32 - Trajetória de deformações verticais durante o ensaio de expansão das amostras deformadas



Fonte: Elaboração da autora (2025).

4.2.3. Expansão das amostras deformadas pelo Método A

A Tabela 11 apresenta a massa específica aparente seca máxima ($\rho_d^{m\acute{a}x}$) e a umidade (w_{ot}) ótima ao qual os corpos de prova foram compactados para realização do ensaio de expansão através do Método A.

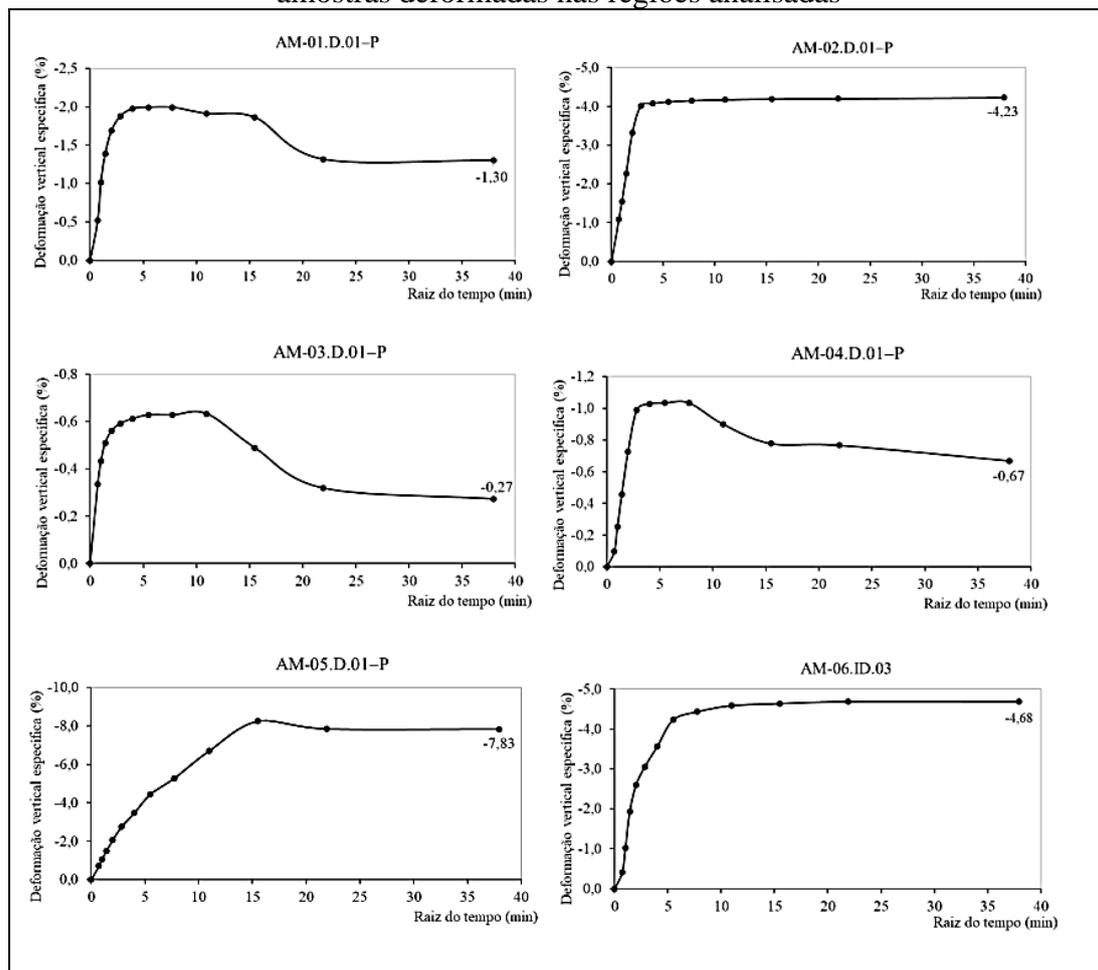
Tabela 11 - Parâmetros físicos dos corpos de prova deformados ensaiados pelo Método A

Amostra	$\rho_d^{m\acute{a}x}$ (g/cm^3)	w_{ot} (%)
AM-01.D.01-P	2,05	9,60
AM-02.D.01-P	1,77	17,08
AM-03.D.01-P	1,96	12,08
AM-04.D.01-P	1,65	21,55
AM-05.D.01-P	1,59	19,86
AM-06.ID.01	1,63	22,88

Fonte: Elaboração da autora (2025).

A Figura 33 apresenta os gráficos de deformação específica vertical em função da raiz do tempo, obtidos nos ensaios de expansão realizados pelo Método A da norma ASTM D4546-21, durante o estágio de inundação dos corpos de prova compactados de cada região analisada, sob uma tensão de 7 kPa. Como a tensão é muito baixa, o ensaio pode ser considerado de expansão livre. Entre as amostras analisadas, a AM-05.D.01-P apresentou o maior potencial de expansão.

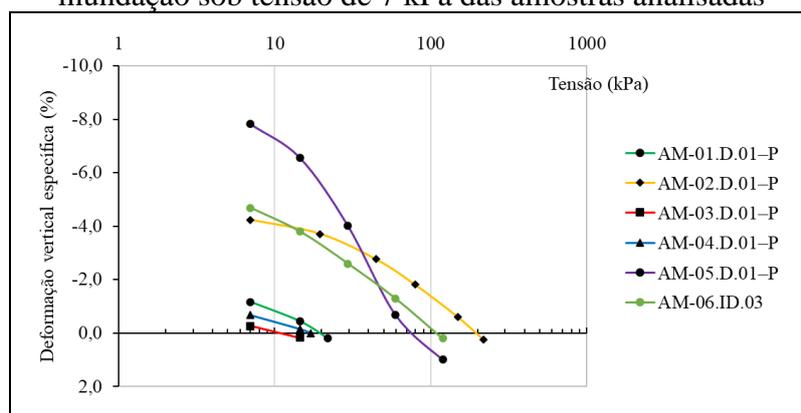
Figura 33 - Ensaios de expansão com estágio de inundação igual a 7 kPa para as amostras deformadas nas regiões analisadas



Fonte: Elaboração da autora (2025).

A partir das amostras submetidas ao ensaio de expansão livre, foi aplicada uma carga vertical crescente até que a altura inicial das amostras fosse restabelecida. A Figura 34 ilustra a evolução das deformações verticais em função da sobrecarga aplicada. Observa-se que as amostras AM-01.D.01-P, AM-01.D.03-P e AM-04.D.01-P apresentaram baixas tensões de expansão, com valor médio em torno de 30 kPa. Em contrapartida, a amostra AM-02.D.01-P exibiu a maior tensão de expansão, atingindo aproximadamente 200 kPa, seguida pelas amostras AM-06.ID.03 (cerca de 100 kPa) e AM-05.D.01-P (aproximadamente 75 kPa). Dessa forma, embora a amostra AM-05.D.01-P tenha apresentado o maior índice de expansão na condição de livre expansão, ela não foi a que exigiu maior tensão para ser recomposta à sua altura inicial, evidenciando que maior deformação nem sempre está associada a maior tensão de expansão.

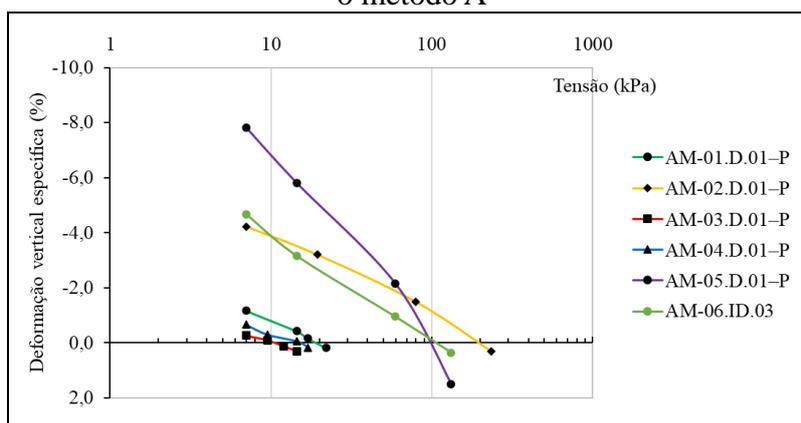
Figura 34 - Trajetória de deformações verticais durante o ensaio de expansão com inundação sob tensão de 7 kPa das amostras analisadas



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Por outro lado, ao se aplicar o método A para a determinação da tensão de expansão — utilizando quatro corpos de prova com diferentes tensões de inundação para cada solo — observa-se, conforme apresentado na Figura 35, que os valores obtidos não diferiram significativamente em relação à situação anterior. A exceção foi a amostra AM-05.D.01-P, cuja tensão de expansão apresentou um aumento, atingindo aproximadamente 100 kPa. Essa diferença pode ser atribuída à natureza gradual da aplicação de carga no segundo método, que pode captar melhor o ponto de equilíbrio em solos com maior índice de expansão, como é o caso da AM-05.D.01-P.

Figura 35 - Trajetória de deformações verticais durante o ensaio de expansão aplicando o método A

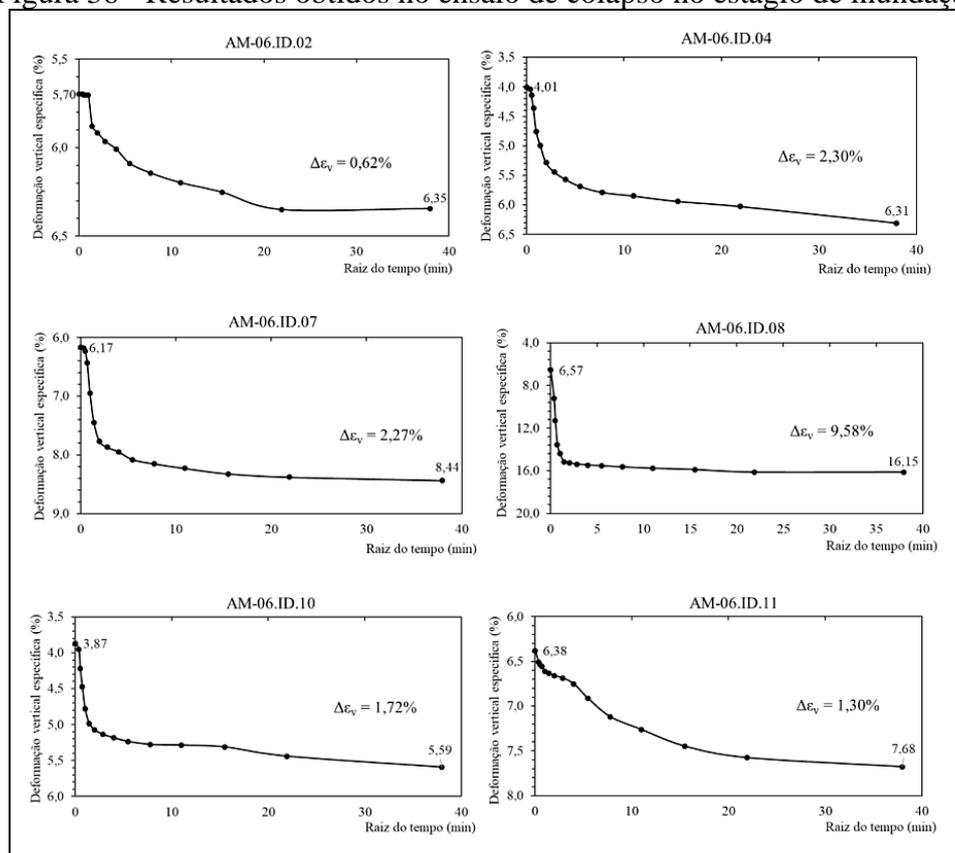


Fonte: Elaboração da autora (2025).

4.5. Avaliação do potencial de colapso

A Figura 36 apresenta os gráficos de deformação específica vertical em função da raiz do tempo, resultantes dos ensaios de colapso dos solos realizados durante o estágio de inundação sob uma tensão de 50 kPa das amostras indeformadas da região AM 06.

Figura 36 - Resultados obtidos no ensaio de colapso no estágio de inundação

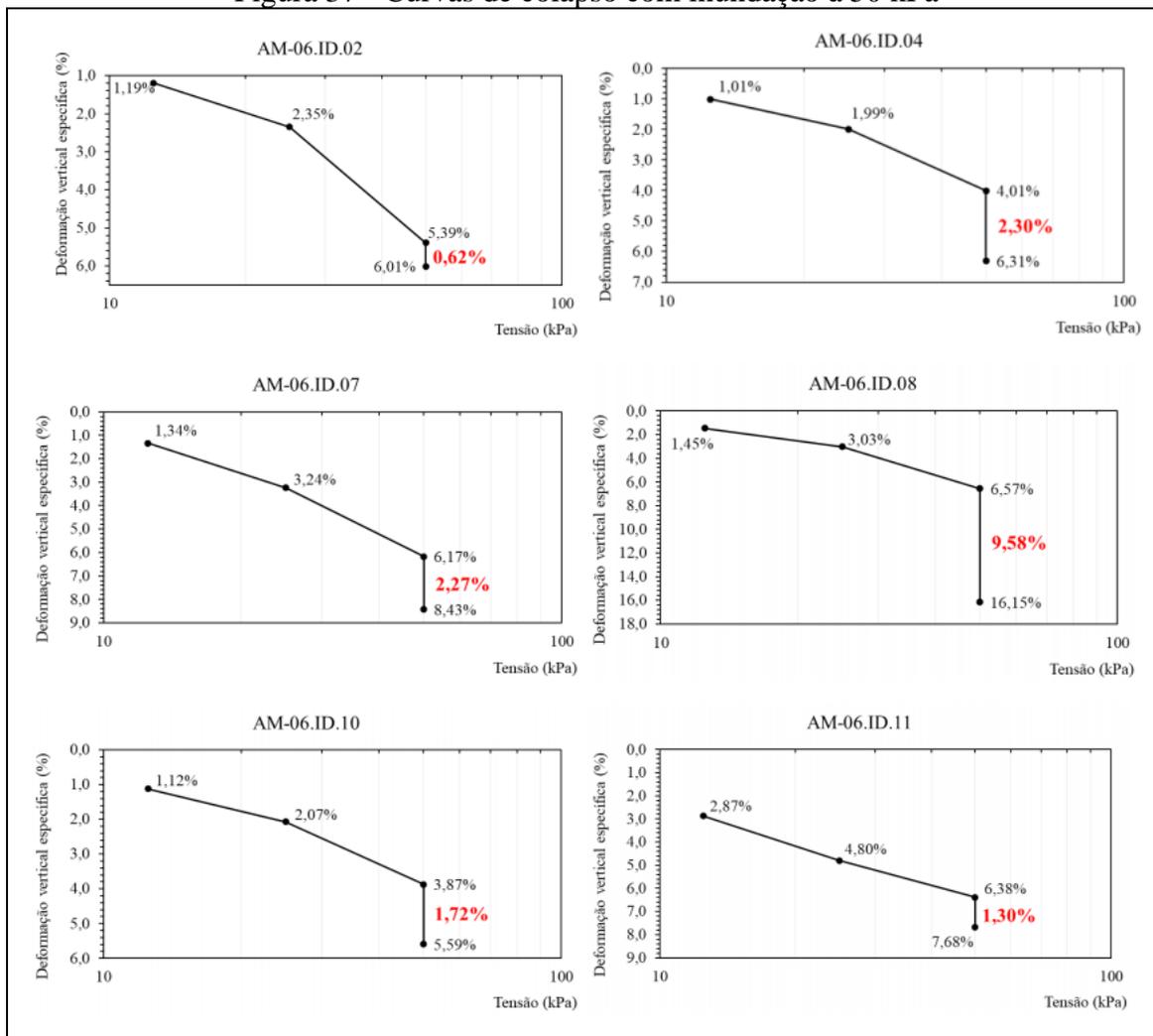


Fonte: Elaboração da autora (2025).

É evidente um aumento expressivo na deformação vertical específica ao longo do tempo. Em termos quantitativos, observou-se um incremento na deformação vertical específica ao término do estágio de inundação, variando de 0,62% a 9,58% para as amostras analisadas.

Na Figura 37, por sua vez, são apresentados os gráficos com as deformações específicas até atingir a tensão de inundação dos corpos de prova e o Índice de Colapso de cada amostra. A variação da deformação vertical, sob a tensão de 50kPa no momento da inundação, para a amostra AM-06.ID.08 é considerada de grau moderadamente severo de colapso, de acordo com a D5333-03. Por outro lado, as amostras AM-06.ID.04 e AM-06.ID.07 apresentam grau de colapso moderado. Por fim, a amostra AM-06.ID.03 tem grau de colapso considerado leve.

Figura 37 - Curvas de colapso com inundação à 50 kPa



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Pelo critério de Vargas (1977), o potencial de colapso das amostras AM-06.ID.04, AM-06.ID.07 e AM-06.ID.08 foi superior à 2%, ou seja, esses solos podem ser considerados colapsíveis. É fundamental ressaltar que, embora a deformação vertical da amostra AM-06.ID.010 tenha sido ligeiramente inferior a 2%, registrando 1,72%, sua relevância não pode ser negligenciada. Apesar de estar abaixo do limite estipulado por Vargas (1977) para ser classificada como colapsível, é recomendável dispensar uma atenção adicional a essa amostra. Isso se deve ao fato de que, durante o período de inundação, houve uma variação notável de 44,44% na deformação vertical entre o instante inicial (0h) e as 24 horas subsequentes.

4.6. Ensaios de campo na região AM 06

A análise dos ensaios SPT realizados na região AM 06 revelou uma alta resistência à penetração do solo nos pontos investigados, conforme demonstrado na Tabela 12, que lista os valores de NSPT obtidos. As sondagens realizadas atingiram uma profundidade média de 1,45 metros, com exceção do ponto SPT 01, onde a perfuração alcançou 2,45 metros antes de ser interrompida devido à impenetrabilidade ao trépano de lavagem, conforme os critérios de parada estabelecidos pela ABNT NBR 6484:2020.

A maioria das amostras coletadas durante as sondagens foram classificadas, por meio de análise tátil-visual, como areia argilosa compacta com presença de pedregulhos, conforme observado na Tabela 12. Essa classificação foi corroborada pelas análises granulométricas realizadas em laboratório em praticamente todas as amostras, mostrando uma consistência significativa com as observações de campo.

Tabela 12 - Resultados obtidos nos ensaios de sondagem à percussão (SPT)

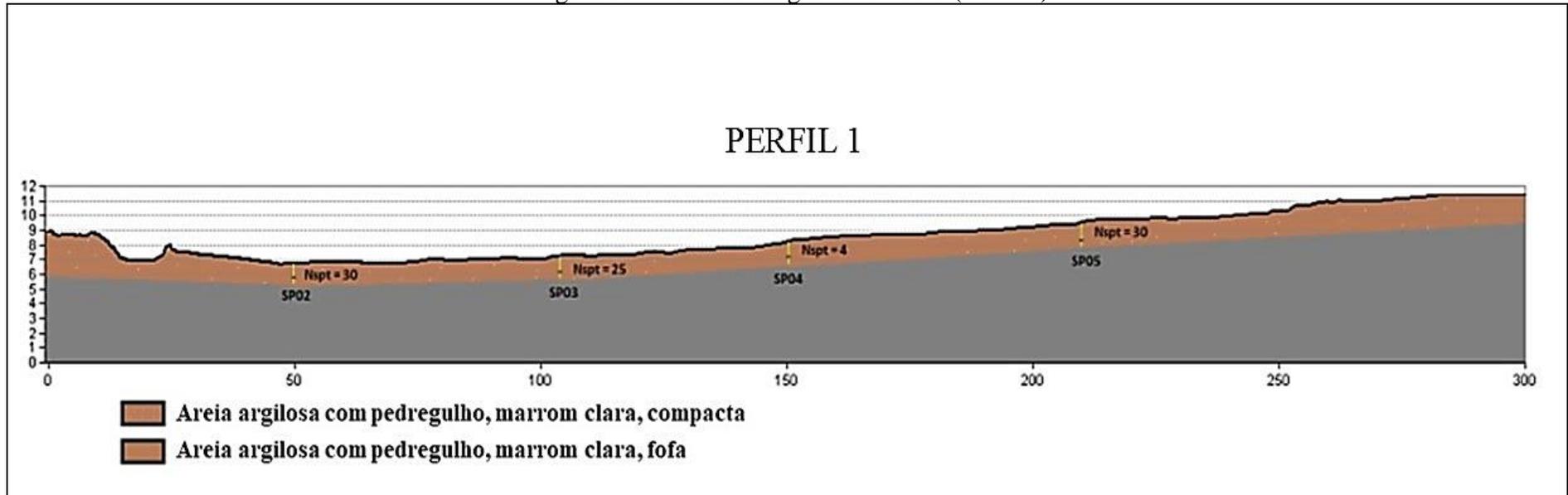
Amostra	Cota inicial do ensaio (m)	N _{SPT}	Classificação tátil-visual do solo	Compacidade
SPT 01	1,0	19	Areia com pedregulho	Compacta
	2,0	23	Areia siltoargilosa com pedregulho	Compacta
SPT 02	1,0	30	Areia argilosa com pedregulho	Compacta
SPT 03	1,0	25	Areia argilosa com pedregulho	Compacta
SPT 04	1,0	4	Areia argilosa com pedregulho	Fofa
SPT 05	1,0	30	Areia argilosa com pedregulho	Compacta
SPT 06	1,0	30	Areia argilosa com pedregulho	Compacta
SPT 07	1,0	16	Pedregulho	
SPT 08	1,0	35	Areia argilosa com pedregulho	Compacta
SPT 09	1,0	7	Areia argilosa com pedregulho	Pouco compacta
SPT 10	1,0	55	Areia argilossiltosa com pedregulho	Muito compacta
SPT 11	1,0	30	Areia argilossiltosa com pedregulho	Compacta
SPT 12	1,0	30	Areia argilosa com pedregulho	Compacta
SPT 13	1,0	30	Areia argilosa com pedregulho	Compacta

Fonte: Elaboração da autora (2025).

A alta porcentagem de argila na composição do solo, combinada com as condições de baixa umidade típicas do período de estiagem em que os ensaios foram realizados (mês de agosto) e a presença de uma camada superficial de pedregulhos podem ter contribuído para o aumento da resistência à penetração, resultando em um solo mais compacto e resistente durante os testes.

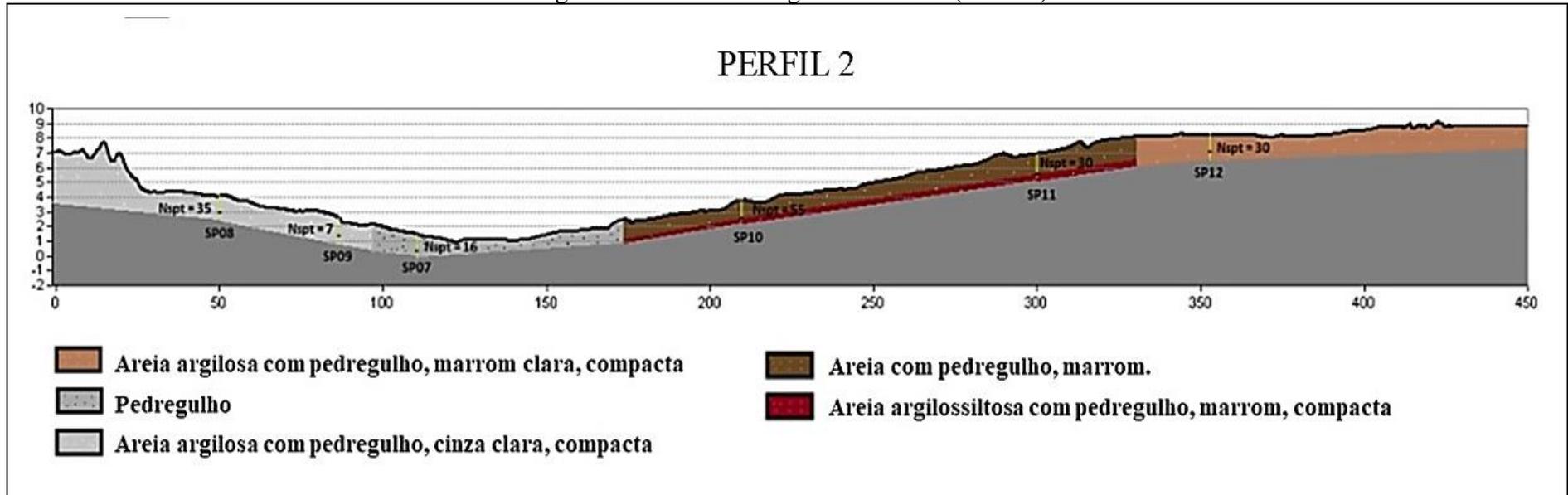
A partir das sondagens à percussão, foram elaborados quatro perfis geotécnicos do subsolo, conforme ilustrado nas Figuras 38, 39, 40 e 41. A Figura 42 mostra a seção que cada perfil foi traçado.

Figura 38 - Perfil estratigráfico do solo (Perfil 1)



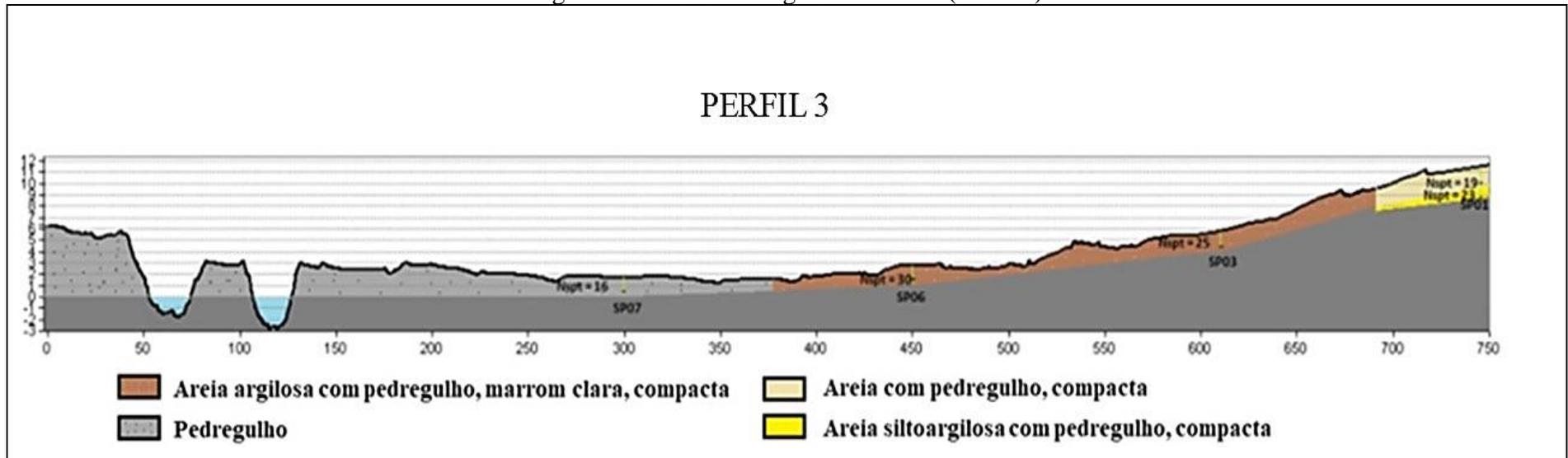
Fonte: Elaboração da autora (2025).

Figura 39 - Perfil estratigráfico do solo (Perfil 2)



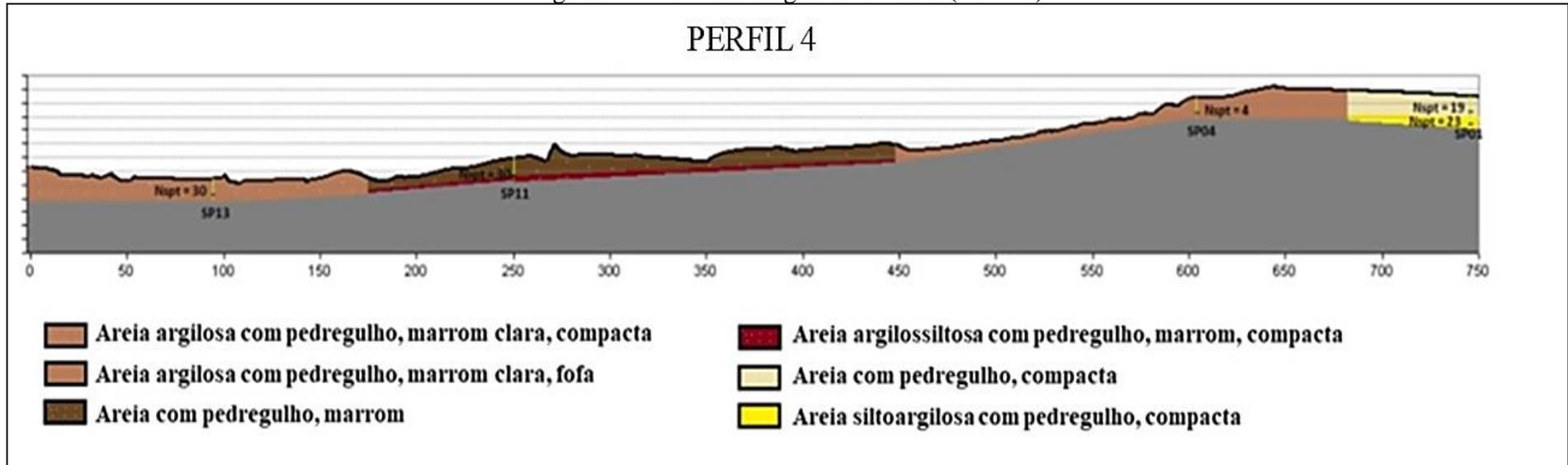
Fonte: Elaboração da autora (2025).

Figura 40 - Perfil estratigráfico do solo (Perfil 3)



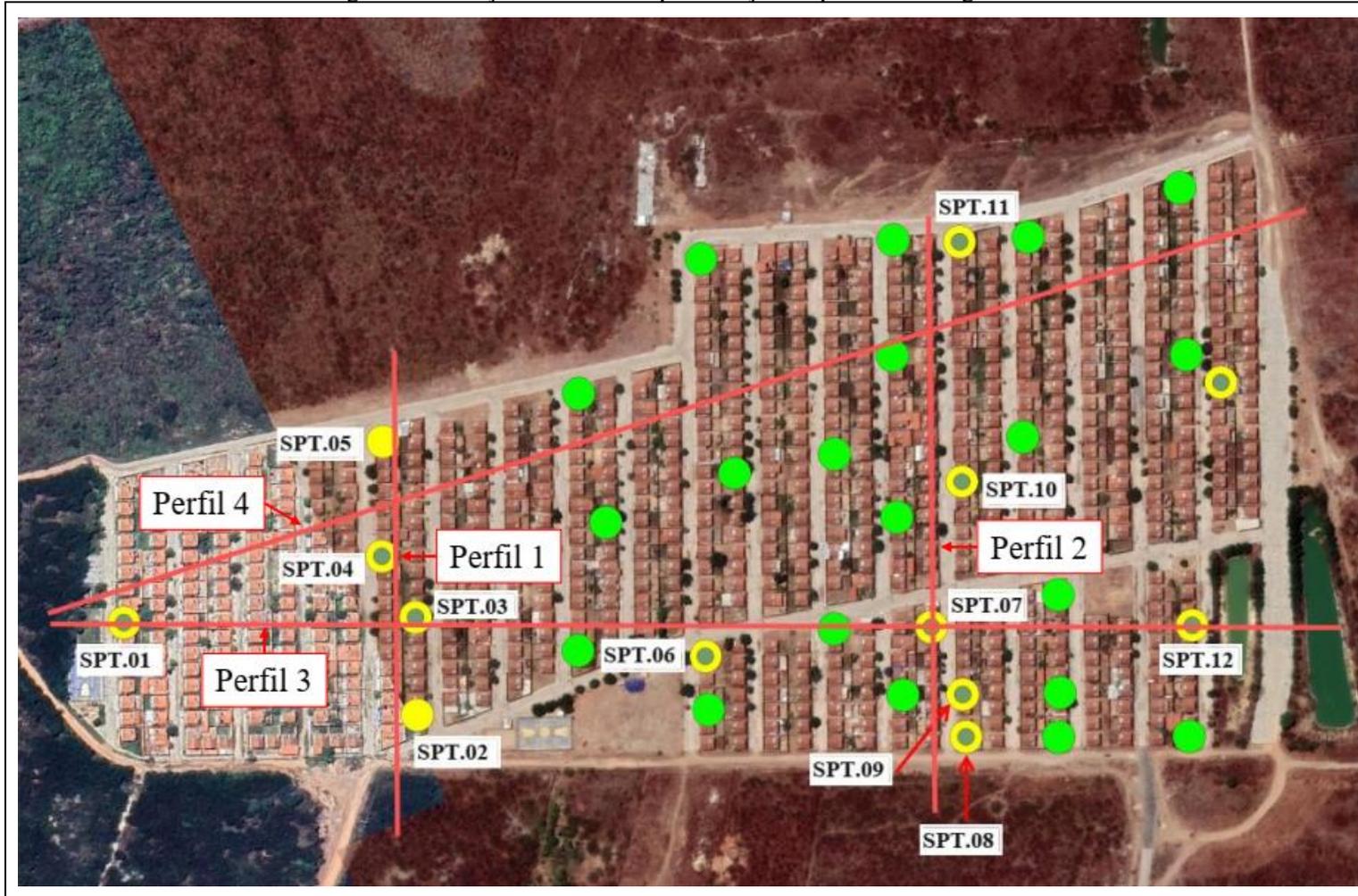
Fonte: Elaboração da autora (2025).

Figura 41 - Perfil estratigráfico do solo (Perfil 4)



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Figura 42 - Seções utilizadas para traçar os perfis estratigráficos



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Observa-se que a camada impenetrável foi atingida a uma profundidade relativamente rasa, em torno de 1,50 m a partir da superfície. Essa característica pode ser atribuída a dois possíveis fatores: i) a presença de rochas calcárias da Formação Jandaíra que afloraram em alguns pontos de sondagem; e ii) a existência de uma camada de pedregulho localizada a uma profundidade superficial, variando entre 0,60 m e 1,0 m em relação à superfície do solo, o que também foi verificado no poço de inspeção. Esses fatores contribuem para a dificuldade de penetração observada e devem ser considerados na análise geotécnica da área.

Apesar do impenetrável ser relativamente superficial, a fundação adotada nas residências é do tipo radier de concreto usinado, caracterizada por sua elevada rigidez. Este radier está assentado diretamente sobre a camada de solo superficial que, devido à sua natureza não saturada e à alta porcentagem de argila, é suscetível a problemas significativos quando exposto a variações de umidade, como durante chuvas intensas, o que pode comprometer a estabilidade da fundação. As residências, por serem de pequeno porte, transmite uma carga relativamente baixa ao solo de fundação. No entanto, quando o solo se satura, ele pode expandir e/ou colapsar, resultando em recalques diferenciais na fundação.

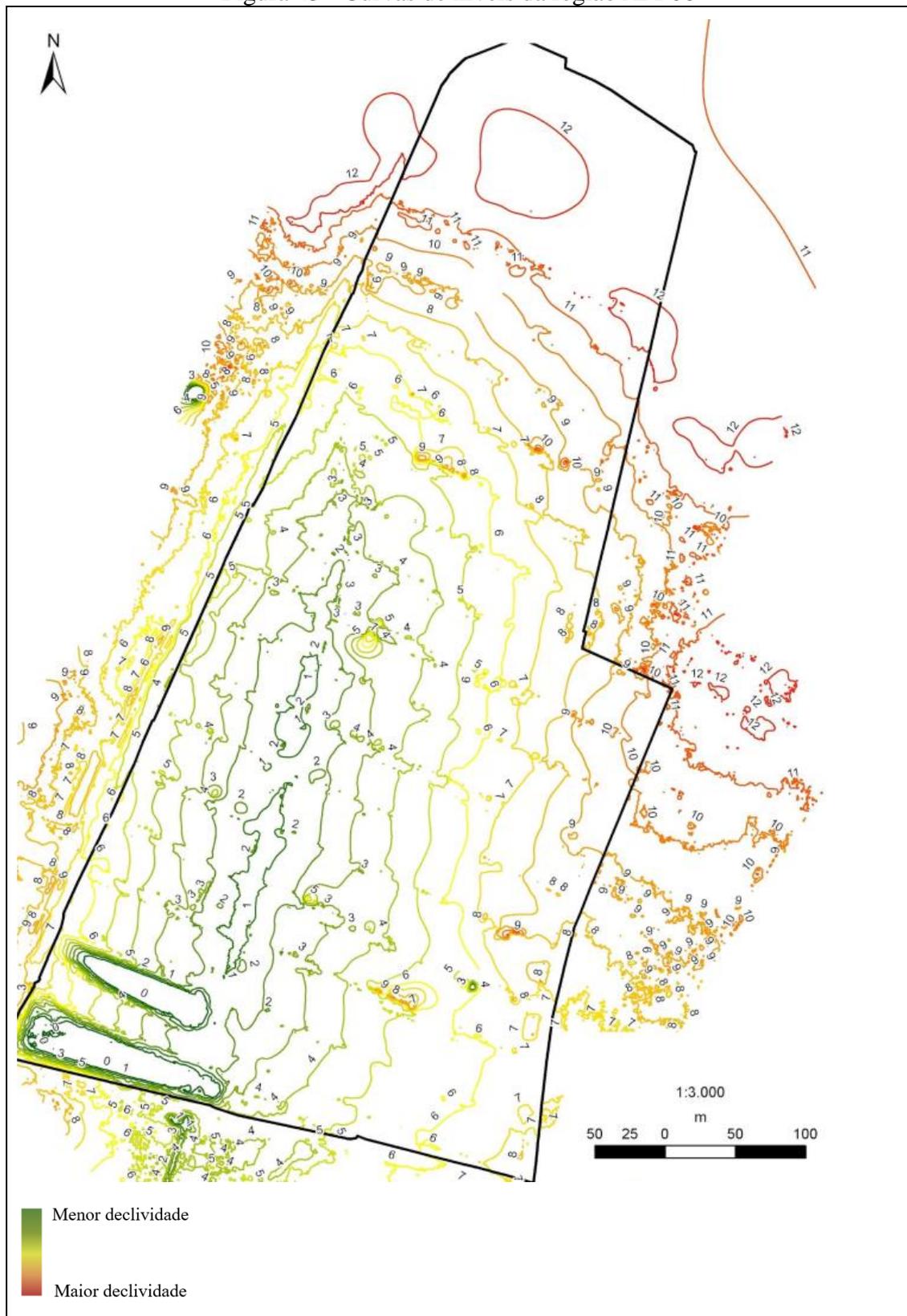
Em relação as sondagens a trado, estas apresentaram profundidades variáveis, abrangendo de 0,20 m a 1,83 m. De maneira geral, a maioria das amostras de solo obtidas nessas sondagens foi classificada como areia argilosa com presença de pedregulhos, alinhando-se com os resultados obtidos nas sondagens à percussão. Apenas na amostra ST 10 foi detectado o nível freático, que, após estabilização, foi registrado a uma profundidade de 1,50 m.

A Figura 43 apresenta as curvas de nível obtidas através do levantamento topográfico realizado na região e a Figura 44 mostra a modelagem tridimensional da topografia dessa região. Percebe-se que há uma variação considerável na elevação do terreno. As curvas de nível da Figura 43 indicam áreas com inclinações mais acentuadas e outras mais suaves. Na Figura 44, a modelagem tridimensional evidencia essa variação de relevo, destacando as depressões e elevações do terreno de forma mais clara.

A identificação de áreas de baixa elevação ou depressões através das curvas de nível e modelagem tridimensional pode indicar zonas mais propensas ao acúmulo de água, o que potencializa os problemas de expansividade e colapsabilidade dos solos. Nesse sentido, o levantamento topográfico e a modelagem 3D permitem prever esses

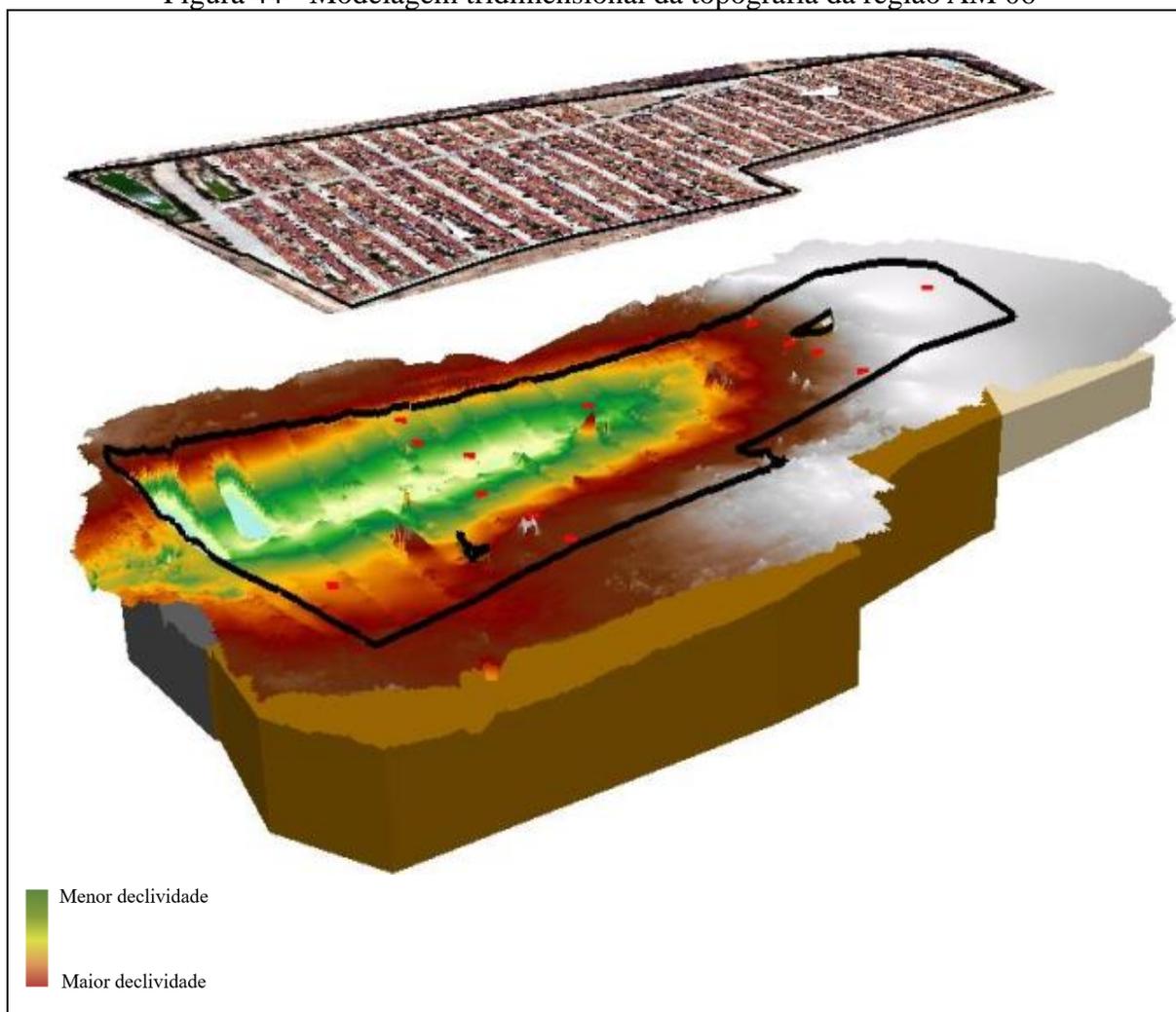
pontos críticos e planejar estratégias de drenagem adequadas para evitar a infiltração excessiva de água nesses locais.

Figura 43 - Curvas de níveis da região AM 06



Fonte: Elaboração da autora (2025).

Figura 44 - Modelagem tridimensional da topografia da região AM 06



Fonte: Elaboração da autora (2025).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, realizou-se a caracterização geotécnica de seis solos identificados no município de Mossoró, avaliando o potencial de expansão e potencial de colapso.

Com base nos resultados encontrados, pode-se concluir que:

- No que se refere à caracterização física, a maioria dos solos analisados foi classificada como areia argilosa. Alguns solos exibiram alto teor de frações finas, enquanto outros apresentaram porcentagens significativas de pedregulhos. Os ensaios de compactação revelaram que os solos com maior conteúdo de finos apresentaram menor densidade seca máxima e umidades ótimas mais elevadas.
- A análise mineralógica identificou a presença de dióxido de silício em todas as amostras analisadas. Em alguns solos, foi identificada a presença de caulinita. Nas amostras AM-04.D.01-P e AM-06.ID.03, no entanto, observou-se a ocorrência de argilominerais do tipo 2:1, do grupo das esmectitas, como a montmorilonita e filossilicatos hidratados contendo cálcio, magnésio e alumínio.
- A análise por Fluorescência de Raios X (FRX) revelou que todas as amostras apresentam composição dominada por óxidos de silício, alumínio e ferro. Na amostra AM-06.ID.03 foi identificado teor significativamente elevado de óxido de cálcio.
- Os ensaios de expansão realizados com corpos de prova indeformados revelaram comportamentos distintos entre os solos analisados. A maioria apresentou tendência ao colapso quando submetida à inundação, com deformações específicas verticais significativas. No entanto, as amostras AM-06.ID.01 e AM-06.ID.03 demonstram comportamento expansivo leve.
- Nos corpos de prova compactados, o comportamento expansivo foi mais intenso, com deformações específicas que ultrapassaram 20% em algumas situações. A maior deformação registrada foi registrada na amostra AM-06.ID.03, com valor de 23,14%.
- Os ensaios de expansão mostraram que, embora a maior deformação volumétrica tenha ocorrido sob a condição de expansão livre, ela não esteve diretamente relacionada à maior tensão de expansão necessária para restabelecer a altura inicial dos corpos de prova. Além disso, o uso do método A para determinar a tensão de expansão, que aplicou diferentes tensões de inundação, não alterou substancialmente os resultados obtidos no ensaio de expansão livre, exceto em casos específicos, onde a tensão de expansão foi ligeiramente aumentada.

- Os ensaios de colapso realizados durante o estágio de inundação sob uma tensão de 50 kPa mostraram um aumento expressivo na deformação vertical específica ao longo do tempo, com variações significativas nas amostras analisadas, variando de 0,65% a 9,58% ao término do estágio de inundação. A avaliação dos resultados revelou diferentes graus de colapso das amostras, com a amostra AM-06.ID.08 apresentando um grau moderadamente severo de colapso, enquanto outras mostraram um colapso moderado ou leve.
- Os ensaios SPT realizados em uma das regiões de estudo indicaram uma alta resistência à penetração do solo nos pontos investigados, com valores de N_{SPT} elevados, refletindo um solo compactado. A classificação das amostras coletadas foi predominantemente de areia argilosa compacta, com presença de pedregulhos.
- O levantamento topográfico realizado na região revelou variações consideráveis na elevação do terreno, com áreas de inclinação acentuada e outras mais suaves. A modelagem tridimensional dessas variações de relevo indicou a presença de depressões e elevações, áreas que podem ser mais propensas ao acúmulo de água.

Os resultados obtidos evidenciam que os solos estudados em Mossoró apresentam variações significativas em seu comportamento geotécnico, influenciadas principalmente pela mineralogia e composição química. A presença de argilominerais expansivos e altos teores de óxido de cálcio indicam potencial para expansão e colapso, especialmente após a compactação e variações de umidade. Assim, destaca-se a importância de investigações detalhadas e do planejamento de medidas preventivas, como drenagem e controle da compactação, para garantir a estabilidade de obras em regiões semiáridas.

Para o aprofundamento do presente estudo, recomenda-se que os seguintes aspectos sejam considerados em pesquisas futuras:

- a) Ampliação do mapeamento geotécnico por meio da expansão da área de estudo para outras regiões do município;
- b) Investigação de tratamentos estabilizantes, com foco na eficácia de diferentes métodos de estabilização físico-química aplicáveis aos solos locais;
- c) Estudo do comportamento hidro-mecânico dos solos, por meio de ensaios avançados com controle de sucção e análises acopladas de fluxo e deformação;
- d) Caracterização das propriedades mecânicas dos solos mediante a realização de ensaios de resistência ao cisalhamento.

REFERÊNCIAS

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

ABNT - 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, 2016a.

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

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

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016d.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182 - Solo: Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro: 2016e.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9603: Sondagem a trado - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13601: Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*crumb test*).** Rio de Janeiro: ABNT, 2020b.

AL-MAHBASHI, Ahmed M.; DAFALLA, Muawia. The distribution and mineralogy of expansive clay in a semi-arid region. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 16, n. 4, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5333-03 - Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils.** United States: 2017. Disponível em: www.astm.org.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4546-21 - Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils.** Estados Unidos: ASTM, 2021.

AYELDEEN, M.; NEGM, A.; EL-SAWWAF, M.; KITAZUME, M. Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. **Journal of rock mechanics and geotechnical engineering**, v. 9, n. 2, p. 329–339, 2017.

AYELDEEN, Mohamed; AZZAM, Waseim; ARAB, Mohamed G. The Use of Fiber to Improve the Characteristics of Collapsible Soil Stabilized with Cement. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 40, n. 4, p. 1873–1885, 2022.

BANDEIRA, A. P. N.; DE SOUZA NETO, J. B.; COUTINHO, R. Q.; XAVIER, J. M.; CHAVES, A. M. M.; DA SILVA ALVES, V. L. Investigating the Collapsible Behavior of Sedimentary Soil in Shallow Foundations. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 42, n. 4, p. 2725–2743, 2024.

BARBOSA, Victor H.R.; MARQUES, Maria E.S.; GUIMARÃES, Antônio C.R. Predicting Soil Swelling Potential Using Soil Classification Properties. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 41, n. 8, p. 4445–4457, 2023.

BARDEN, L.; MCGOWN, A.; COLLINS, K. The collapse mechanism in partly saturated soil. **Engineering Geology**, v. 7, n. 1, p. 49–60, 1973.

BARRETO, Igor Alexandre Rocha; COSTA, Marcondes Lima. Sintering of red ceramics from yellow Amazonian latosols incorporated with illitic and gibbsitic clay. **Applied Clay Science**, v. 152, p. 124–130, 2018.

BELL, F. G.; MAUD, R. R. Expansive clays and construction, especially of low-rise structures: a viewpoint from Natal, South Africa. **Environmental & Engineering Geoscience**, v. 1, n. 1, p. 41–59, 1995.

BRASIL. **Portaria No PR-197, de 21 de março de 2023**. Seção 1, edição 59: Brasília - DF, Edição 59, p. 88, 2023.

BURMISTER, Donald M. **Principles and techniques of soil identification**. In: , 1949, Washington, DC. Proceedings of Annual Highway Research Board Meeting. National Research Council. . Washington, DC: Highway Research Board, 1949. p. 402–434.

CHEN, F. H. **Foundation on Expansive Soils**, Amsterdam. Elsevier Scientific Publication Company, v. 463, 1988.

CHENARBONI, H. A.; LAJEVARDI, S. H.; MOLAABASI, H.; ZEIGHAMI, E. The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. **Construction and Building Materials**, v. 272, 2021.

CLEMENCE, S. P.; FINBARR, A. O. Design considerations for collapsible soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 107, n. 3, p. 305–317, 1981.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DI RAIMO, L. A. D. L.; COUTO, E. G.; MELLO, D. C.; DEMATTÊ, J. A. M.; AMORIM, R. S. S.; TORRES, G. N.; ...; FERNANDES-FILHO, E. I. Characterizing and Modeling Tropical Sandy Soils through VisNIR-SWIR, MIR Spectroscopy, and X-ray Fluorescence. **Remote Sensing**, v. 14, n. 19, 2022.

DOUM, J. M.; FUH, G. C.; FADIL-DJENABOU, S.; ONANA, V. L.; NDJIGUI, P. D.; ARMSTRONG-ALTRIN, J. S. Characterization and potential application of gleysols and ferralsols for ceramic industry: a case study from Dimako (Eastern Cameroon). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 20, 2020.

DUDLEY, J. H. Review of collapsing soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v. 96, n. 3, p. 925–947, 1970.

ESTABRAGH, A. R.; RAFATJO, H.; JAVADI, A. A. Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques. **Geosynthetics International**, v. 21, n. 3, p. 233–243, 2014.

FALCÃO, P. R.; BARONI, M., MASUTTI, G. C.; PINHEIRO, R. J. B.; DE FREITAS FAGUNDES, D. Assessment of the Impact of Inundation on the Strength of a Lateritic and Collapsible Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 41, n. 8, p. 4761–4773, 2023.

FERREIRA, Silvio Romero de Melo. **Colapso e Expansão em Solos Naturais devido a Inundação**. 1995. 1–379 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, S. R. M.; FERREIRA, M. G. V. X. Mudanças de volume devido a variação de teor de umidade em um Vertisol no Semi-Árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)**, v. 33, n. 33, p. 779–791, 2009.

GAO, C.; DU, G.; LIU, S.; ZHANG, D.; ZHANG, K.; ZENG, B. Field study on the treatment of collapsible loess using vibratory probe compaction method. **Engineering Geology**, v. 274, 2020.

GOMES, I. P.; VERÍSSIMO, C. U. V.; BEZERRA, F. H. R.; DOS SANTOS, J. L.; CÂMARA, J. R. F. Fraturas, carste e cavernas nos calcários Jandaíra em Felipe Guerra, Rio Grande do Norte. **Geologia USP - Serie Científica**, v. 19, n. 1, p. 43–67, 2019.

HOLANDA, Maria Júlia de Oliveira. **Solos colapsíveis e expansíveis no Brasil: classificação da suscetibilidade de ocorrência aplicando redes neurais artificiais**. 2022. Tese de doutorado - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

HU, J.; CI, E.; LI, S.; LIAN, M.; ZHONG, S. The pedogenesis of soil derived from carbonate rocks along a climosequence in a subtropical mountain, China. **Forests**, v. 12, n. 8, 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mossoró - Panorama**. 2023. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/mossoro/panorama>>. Acesso em: 1 set. 2023.

IDEMA - INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE. **Perfil do seu município - Mossoró**. Natal: IDEMA, 2008.

INDIRAMMA, P.; SUDHARANI, Ch; NEEDHIDASAN, S. **Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment - An**

experimental study. *In:* , 2020. *Materials Today: Proceedings.* Elsevier Ltd, 2020. p. 694–700.

JALAL, F. E.; IQBAL, M.; KHAN, W. A.; JAMAL, A.; ONYELOWE, K.; LEKHRAJ. ANN-based swarm intelligence for predicting expansive soil swell pressure and compression strength. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 2024.

JALAL, F. E.; IQBAL, M.; ALI KHAN, M.; SALAMI, B. A.; ULLAH, S.; KHAN, H.; NABIL, M. Indirect Estimation of Swelling Pressure of Expansive Soil: GEP versus MEP Modelling. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2023, 2023.

JOHARI, A.; GOLKARFARD, H.; DAVOUDI, F.; FAZELI, A. A predictive model based on the experimental investigation of collapsible soil treatment using nano-clay in the Sivand Dam region, Iran. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 80, n. 9, p. 6725–6748, 2021.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics.** New York: John Wiley & Sons, 1969.

LEMOS, M. S. S.; CURI, N. Evaluation of characteristics of Cambisols derived from limestone in low Tablelands in Northeastern Brazil: Implications for Management. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 8, p. 825–834, 1997.

LOPES, T. C. S.; PORTELA, J. C.; BATISTA, R. O.; BANDEIRA, D. J. D. C.; LEITE, I. D. O.; RAMALHO, L. B.; ...; SÁ, F. V. D. S. Clay Fraction Mineralogy and Structural Soil Attributes of Two Soil Classes under the Semi-Arid Climate of Brazil. **Land**, v. 11, n. 12, 2022.

MARQUES, F. A.; NASCIMENTO, A. F.; ARAUJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B. **Solos do Nordeste.** Recife: Embrapa, 2014.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior.** 3. ed. New York: Wiley, 2005.

MOHAMED, A. A. M. S.; YUAN, J.; AL-AJAMEE, M.; DONG, Y.; REN, Y.; HAKUZWEYEZU, T. Improvement of expansive soil characteristics stabilized with sawdust ash, high calcium fly ash and cement. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, 2023.

MONROY, R.; ZDRAVKOVIC, L.; RIDLEY, A. M. Mechanical behaviour of unsaturated expansive clay under Ko conditions. **Engineering Geology**, v. 197, p. 112–131, 2015.

MOTA, J. C. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; AMARO FILHO, J.; ROMERO, R. E.; MOTA, F. O. B.; LIBARDI, P. L. Atributos Mineralógicos de Três Solos Explorados com a Cultura do Melão na Chapada do Apodi-RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 445–454, 2007.

NOVAIS, J. J.; POPPIEL, R. R.; LACERDA, M. P.; DEMATTÊ, J. A. VNIR-SWIR Spectroscopy, XRD and Traditional Analyses for Pedomorphogeological Assessment in a Tropical Toposequence. **AgriEngineering**, v. 5, n. 3, p. 1581–1598, 2023.

OLIVEIRA, N. S.; SCHIAVO, J. A.; SOUZA, A. C.; LARANJEIRA, L. T.; MORAES, E. M. V.; PEREIRA, M. G. Mineralogy and genesis in an alkaline soil system in the southern Pantanal wetland, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 111, 2021.

OLIVEIRA, D. P.; SARTOR, L. R.; JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; ROMERO, R. E.; ANDRADE, G. R. P.; FERREIRA, T. O. Weathering and clay formation in semi-arid calcareous soils from Northeastern Brazil. **Catena**, v. 162, p. 325–332, 2018.

PAIVA, S. C. D.; LIMA, M. A. D. A.; FERREIRA, M. D. G. D. V. X.; FERREIRA, S. R. D. M. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Revista Materia**, v. 21, n. 2, p. 437–449, 2016.

PESSOA NETO, O. C. SOARES, U. M.; SILVA, J. G. F.; ROESNER, E. H.; FLORENCIO, C. P.; SOUZA, C. A. V. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 357–369, 2007.

PRANDEL, L. V.; SAAB, S. D. C.; TONIAL, L. M. D. S.; BRINATTI, A. M.; PIRES, L. F. Can the Granulometric Soil Fractions Attenuate the Radiation Differently from the Whole Soil?. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 64, p. 1–10, 2021.

REGINATTO, R. A.; FERRERO, C. J. **Collapse potential of soils and soil-water chemistry**. In: , 1973, Moscow. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering . Moscow: 1973. p. 177–183.

RODRIGUES, Roger Augusto; SOARES, Fabio Visnadi Prado; SANCHEZ, Marcelo. Settlement of Footings on Compacted and Natural Collapsible Soils upon Loading and Soaking. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 147, n. 4, p. 04021010, 2021.

SANTOS, H. G.; CARVALHO JUNIOR, W.; DART, R. O.; AGLIO, M. L. D.; SOUZA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. **O novo mapa do Brasil: Legenda atualizada**. In: Rio de Janeiro: Embrapa, 2011.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A. LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIRA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília - DF: Embrapa, 2018.

SEIPHOORI, Ali; ZAMANIAN, Mostafa. Improving mechanical behaviour of collapsible soils by grouting clay nanoparticles. **Engineering Geology**, v. 298, p. 106538, 2022.

SGB - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Geologia e recursos minerais da folha Mossoró**. Recife: CPRM, 2014.

SILVA, Jayne Araújo; BELLO, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira; FERREIRA, Silvio Romero de Melo. Comportamento geotécnico de um solo expansivo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal hidratada. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 2, p. 232–256, 2020.

SILVANI, C., LUCENA, L. C. D. F. L., GUIMARÃES TENORIO, E. A., FILHO, H. C. S., & CONSOLI, N. C. Key Parameter for Swelling Control of Compacted Expansive Fine-Grained Soil–Lime Blends. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 146, n. 9, 2020.

SILVANI, Carina; DA SILVA, Jucimara Cardoso; GUEDES, João Pedro Camelo. Sugarcane Bagasse Ash as a Green Stabilizer for Swelling Soil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 42, n. 2, p. 1459–1470, 2024.

SILVEIRA, Isabela Augusto; RODRIGUES, Roger Augusto. Collapsible Behavior of Lateritic Soil Due to Compacting Conditions. **International Journal of Civil Engineering**, v. 18, p. 1157–1166, 2020.

SKEMOTON, A. W. **The colloidal activity of clays.** *In:* , 1953, Switzerland. 3rd International Conference On Soil Mechanics And Foundations Engineering. Switzerland: 1953. p. 57–61.

TECH, L.; PIRES, L. F.; BRINATTI, A. M.; SAAB, S. C.; CORRECHEL, V.; MOMOLI, R. S. Elemental and radiation attenuation parameter analyses to characterize a Cambisol from the Serra Dourada State Park, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 81, n. 3, 2022.

VAN DER MERWE D. H. **The Prediction of Heave from Plasticity Index and Percentage Fraction of Soils.** Civil Engineer in South Africa, p. 103–107, 1964.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** São Paulo: Mcgraw-Hill, Editora da Universidade de São Paulo, 1977.

VILAR, O. M.; FERREIRA, S. R. D. M. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

YONG, R. N.; MOHAMED, A. M. O.; WARKENTIN, B. P. **Principles of contaminant transport in soils.** Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992.

ANEXOS

Figura 45 - Curva Granulométrica da Amostra AM-01.D.01-P

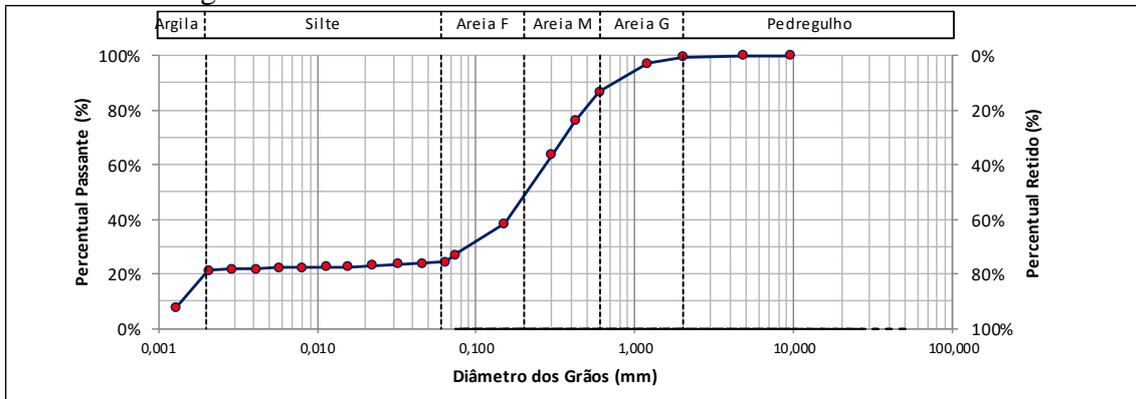


Figura 46 - Curva Granulométrica da Amostra AM-02.D.01-P

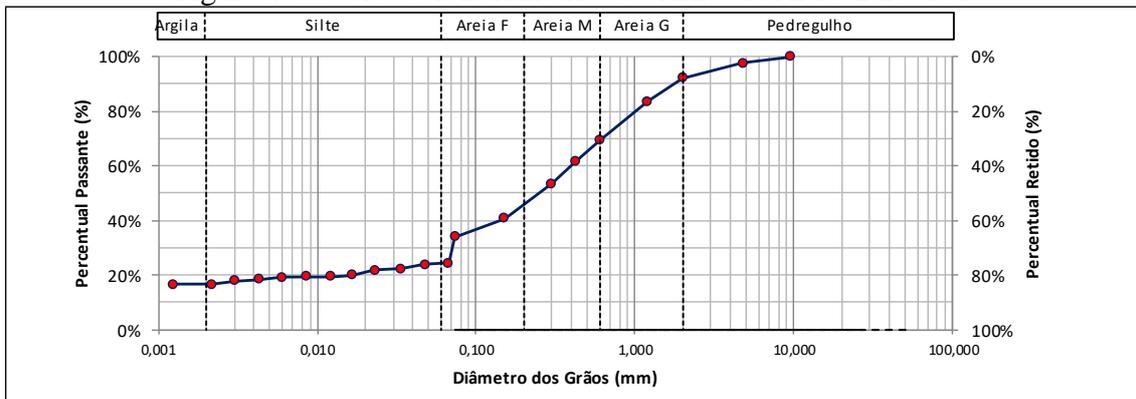


Figura 47 - Curva Granulométrica da Amostra AM-03.D.01-P

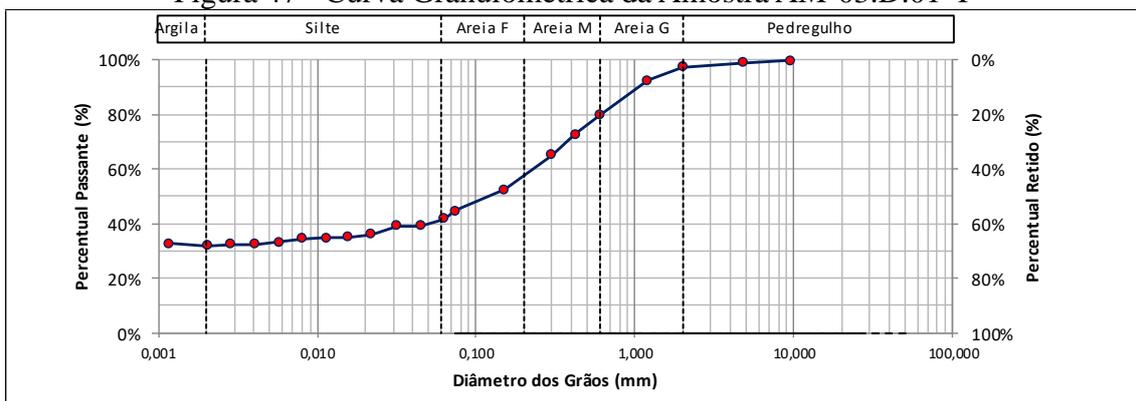


Figura 48 - Curva Granulométrica da Amostra AM-04.D.01-P

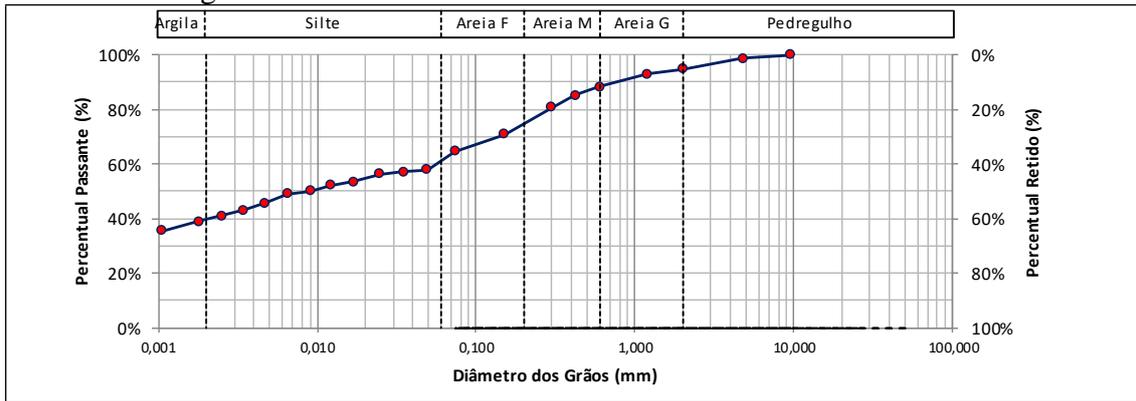


Figura 49 - Curva Granulométrica da Amostra AM-05.D.01-P

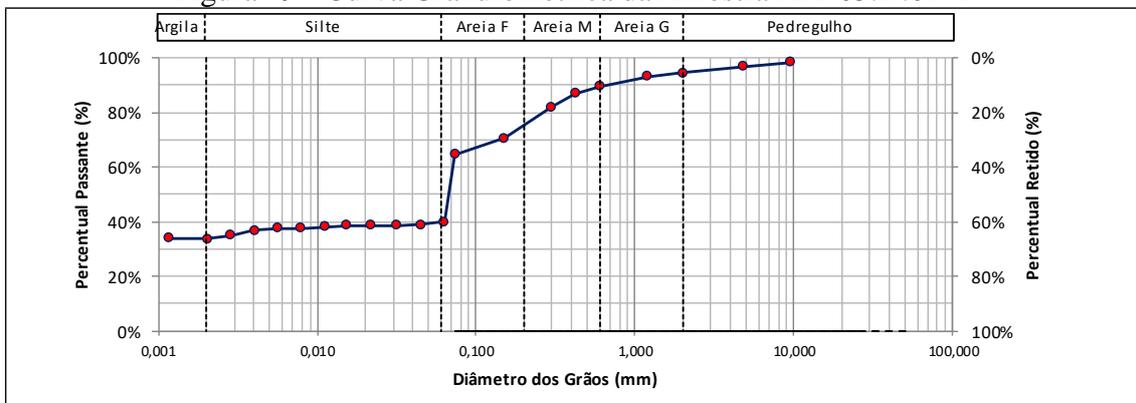


Figura 50 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10,0,2

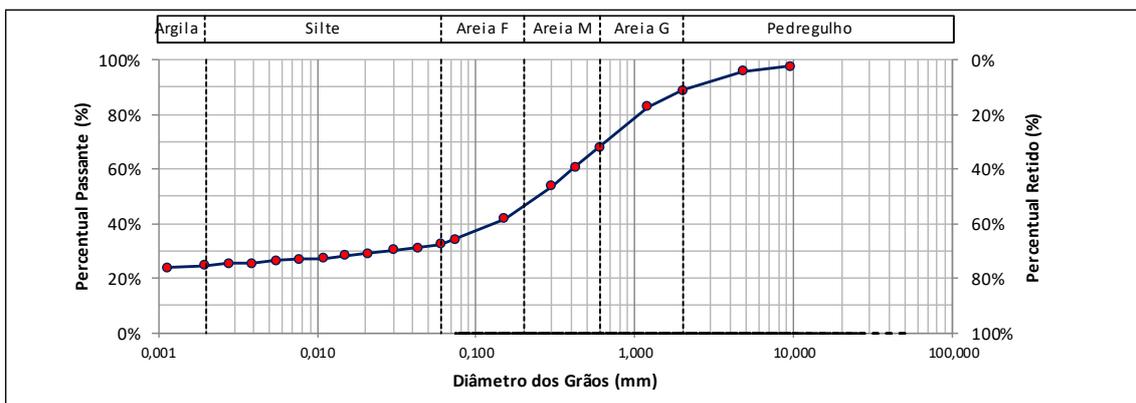


Figura 51 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10.0,6

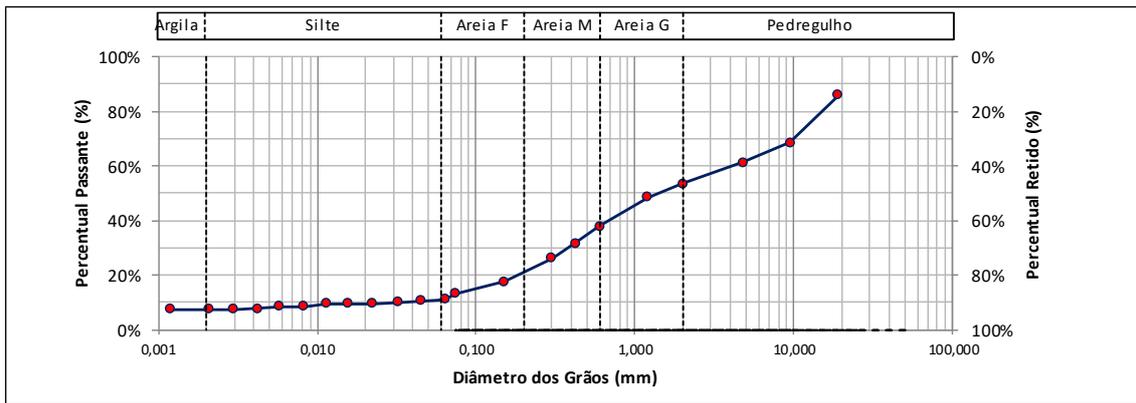


Figura 52 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10.0,8

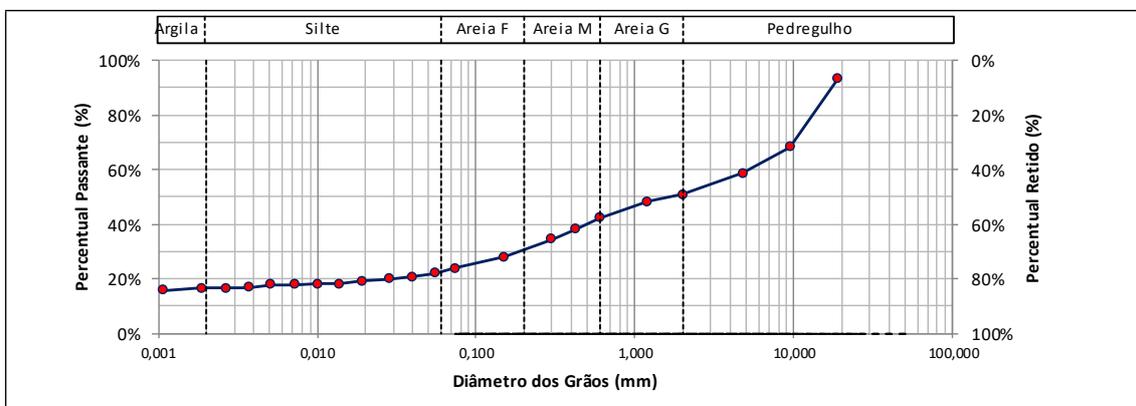


Figura 53 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10.1,0

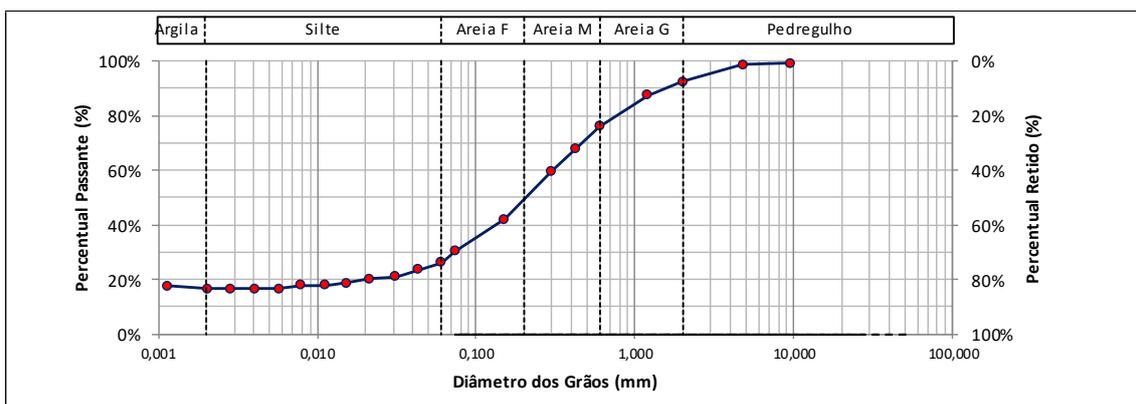


Figura 54 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10.1,4

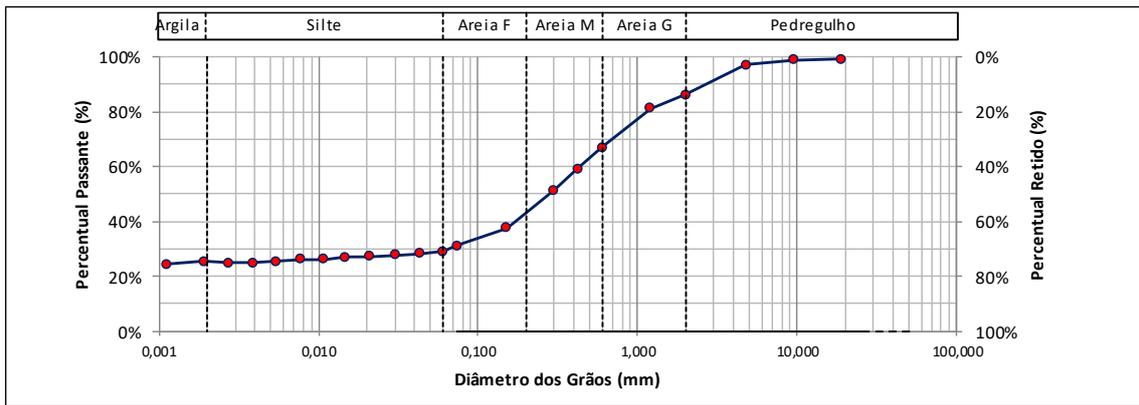


Figura 55 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.D.01-ST.10.1,5

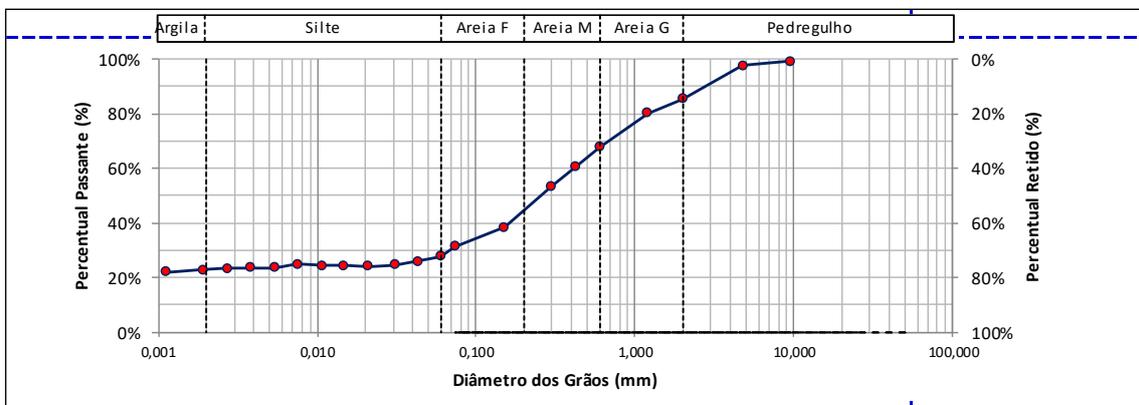


Figura 56 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.01

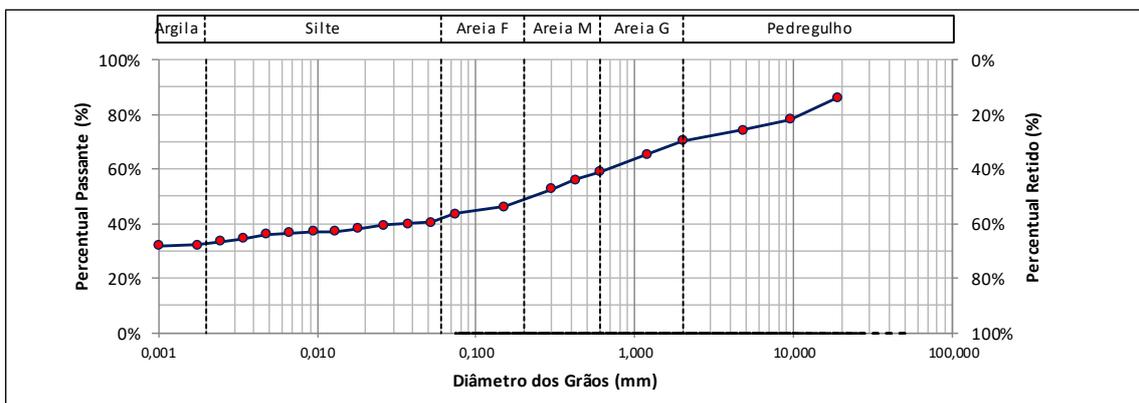


Figura 57 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.02

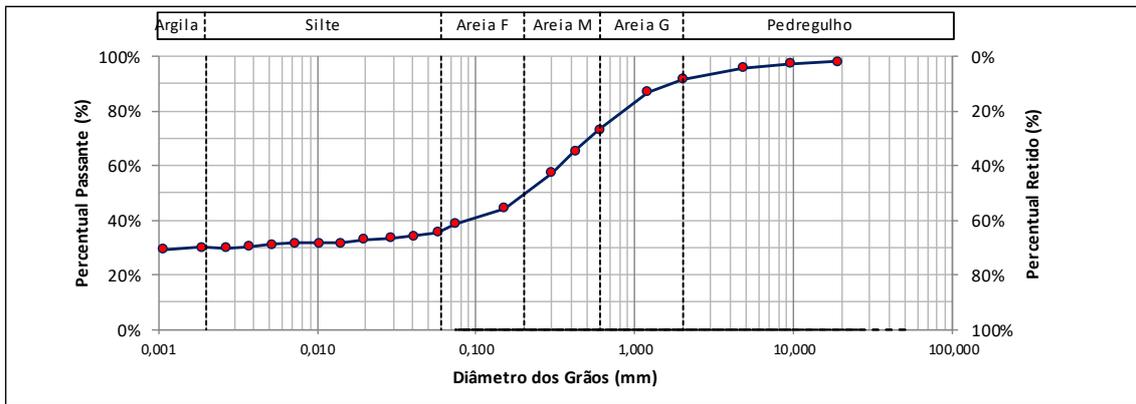


Figura 58 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.03

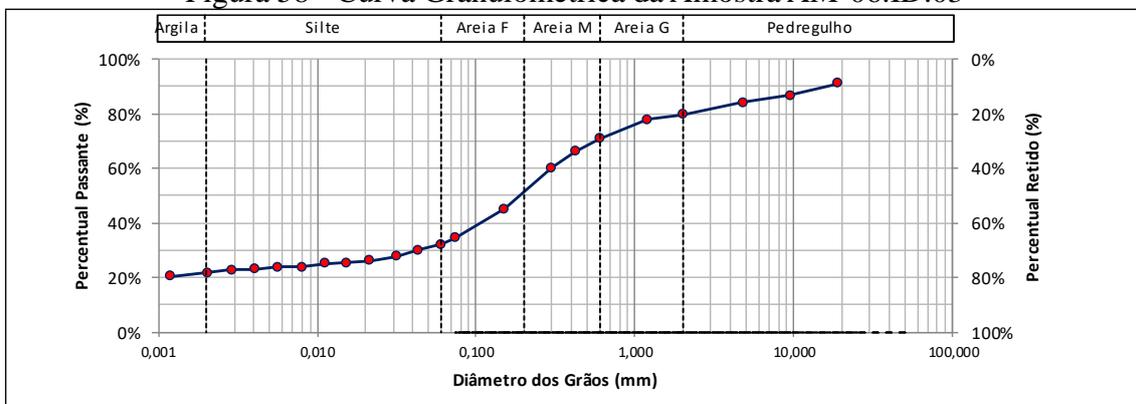


Figura 59 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.04

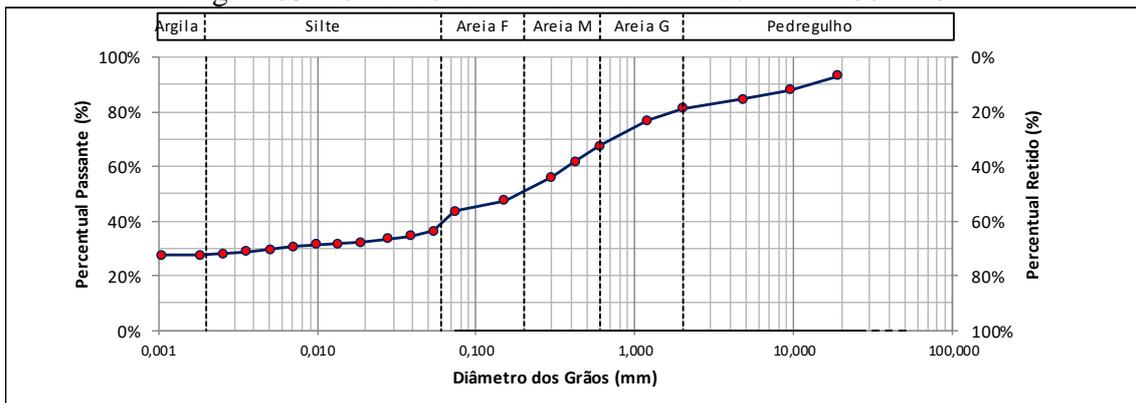


Figura 60 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.05

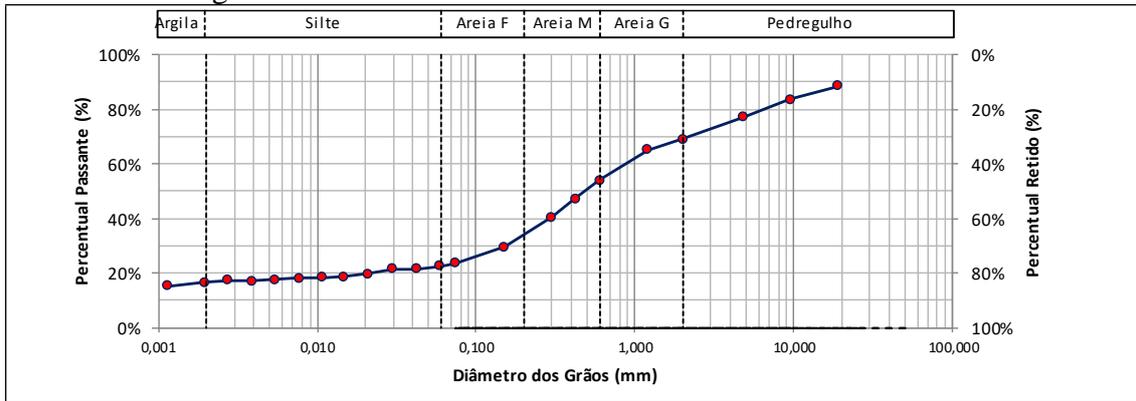


Figura 61 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.06

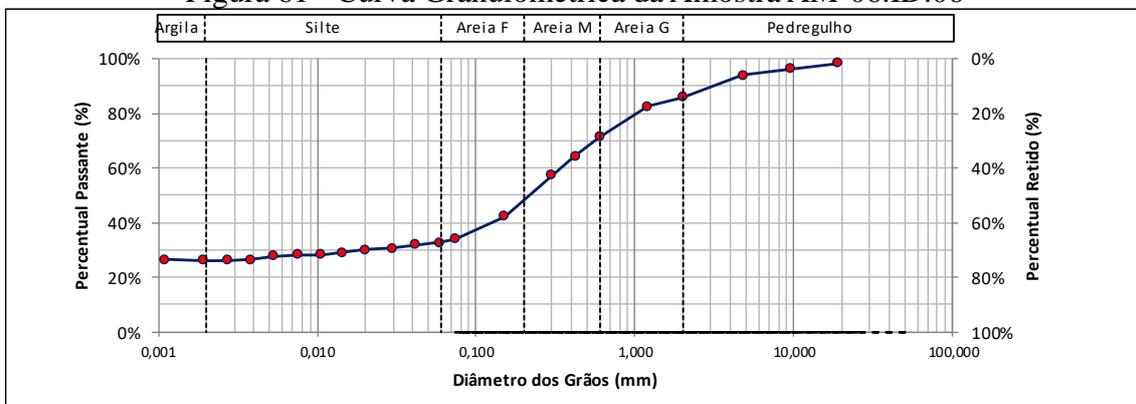


Figura 62 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.07

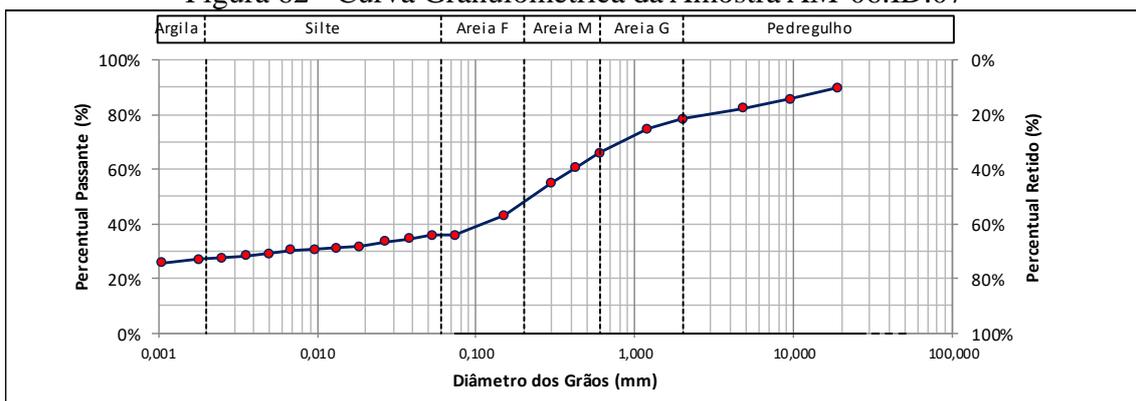


Figura 63 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.08

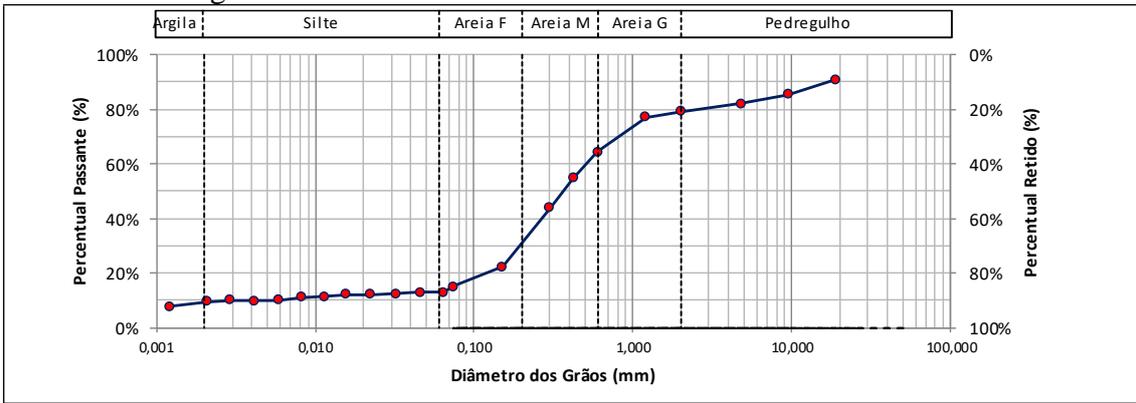


Figura 64 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.09

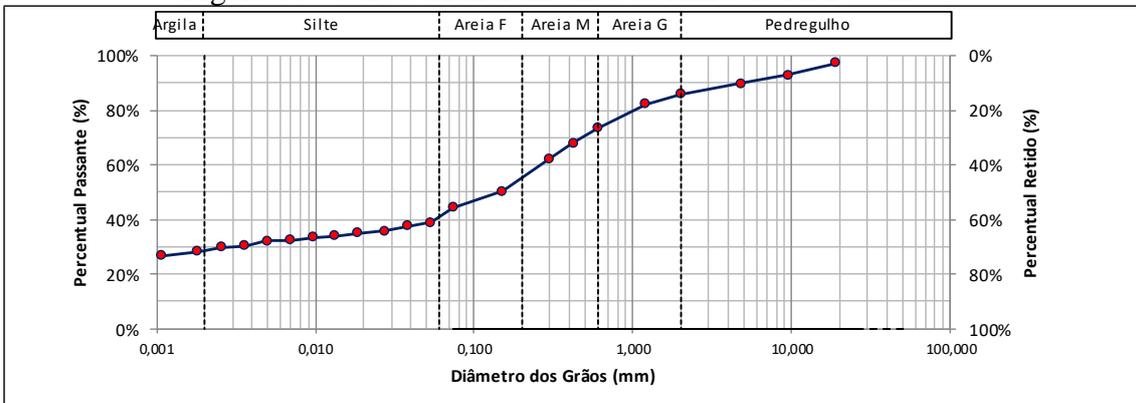


Figura 65 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.10

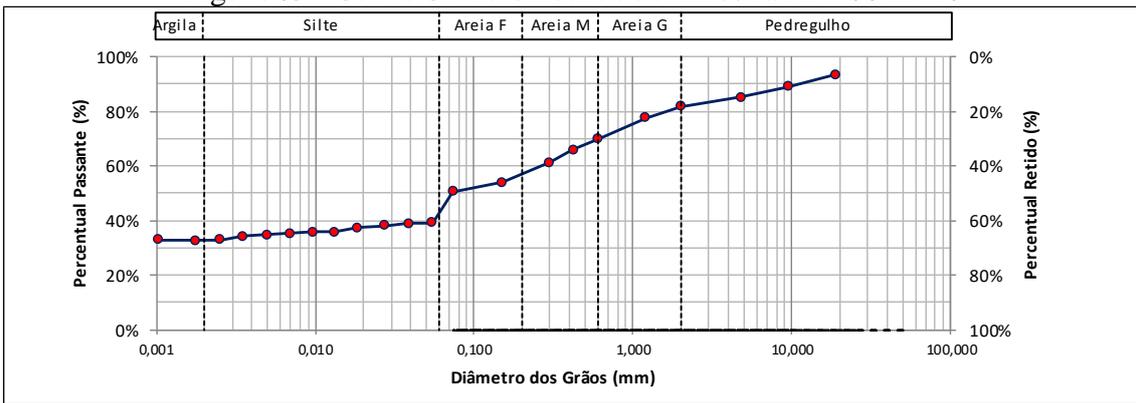


Figura 66 - Curva Granulométrica da Amostra AM-06.ID.11

