

Avaliação do potencial expansivo e colapsível de solos da Formação Jandaíra: um estudo numa área urbanizada de Mossoró – RN

Evaluation of the expansive and collapsible potential of soils from the Jandaíra Formation: a case study in an urbanized area in Mossoró – RN

Bianca Alencar Vieira¹; Olavo Francisco dos Santos Júnior²; Osvaldo de Freitas Neto³; Ricardo Nascimento Flores Severo⁴

- ¹ Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Engenharias, Caraúbas/RN, Brasil. Email: bianca.vieira@ufersa.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8306-2781>
- ² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Natal/RN, Brasil. Email: olavo.santos@ufrn.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7552-6646>
- ³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Natal/RN, Brasil. Email: osvaldocivil@ufrn.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9488-4123>
- ⁴ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Diretoria Acadêmica de Construção Civil, Natal/RN, Brasil. Email: ricardo.severo@ifrn.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9568-860X>

Resumo: A compreensão de solos não saturados é essencial na engenharia geotécnica, especialmente em regiões semiáridas, onde as condições climáticas favorecem a formação de solos potencialmente colapsíveis e expansivos. Este estudo investiga o comportamento de solos suscetíveis à expansão e/ou colapso na região de Mossoró – RN, inserida na Formação Jandaíra. Para tanto, realizou-se uma investigação geotécnica através de ensaios de laboratório, incluindo caracterização física, ensaios de expansão, colapso e resistência ao cisalhamento dos solos, e ensaios de campo, especificamente sondagens à percussão (SPT) e à trado. Os resultados revelaram solos predominantemente classificados como areia argilosa e com alta resistência à penetração. Algumas amostras apresentaram comportamento expansivo, principalmente em amostras compactadas com a fração fina do solo, com elevadas tensões de expansão, enquanto outras exibiram colapso sob inundação. A avaliação do ensaio de cisalhamento direto mostrou um comportamento típico de solos arenosos com alta fração fina, com resistência de pico bem acentuada e alta coesão antes do cisalhamento, que foi significativamente reduzida após a ruptura, mantendo-se o ângulo de atrito praticamente inalterado.

Palavras-chave: Investigação geotécnica; Solos não saturados; Região semiárida.

Abstract: Understanding the behavior of unsaturated soils is essential in geotechnical engineering, particularly in semiarid regions, where climatic conditions favor the development of potentially collapsible and expansive soils. This study investigates the behavior of soils susceptible to swelling and/or collapse in the Mossoró region, Rio Grande do Norte State, within the Jandaíra Formation. A geotechnical investigation program was carried out, including laboratory tests for physical characterization, swelling, collapse, and shear strength assessment, as well as field investigations consisting of Standard Penetration Tests (SPT) and hand-auger borings. The results revealed soils predominantly classified as clayey sand, with high penetration resistance. Some samples exhibited expansive behavior, particularly compacted specimens prepared from the fine soil fraction, which developed high swelling pressures, whereas others showed collapse upon inundation. The direct shear test results indicated behavior typical of sandy soils with a high fines content, characterized by a pronounced peak shear strength and high apparent cohesion at peak conditions. After failure, cohesion decreased significantly, while the friction angle remained practically unchanged.

Keywords: Geotechnical investigation; Unsaturated soils; Semi-arid region.

1. Introdução

O solo, enquanto base essencial para toda construção de engenharia, assume uma importância que vai além de sua função estrutural, desempenhando um papel crucial como material de construção. Entretanto, a presença de solos expansivos e/ou colapsíveis representa uma preocupação substancial, acarretando sérios desafios para a segurança das obras, além de prejuízos econômicos elevados.

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 sido objeto de estudo. 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 no município de Petrolândia-PE. Em outro estudo, Barbosa *et al.* (2022) realizaram a caracterização de um solo expansivo localizado no sudoeste da Amazônia. Por sua vez, Barbosa, Marques e Guimarães (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.

Já Falcão *et al.* (2023) analisaram o potencial de colapso de um solo localizado no estado do Rio Grande do Sul. Os principais resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento estava fortemente associada à sucção. Além disso, os ensaios de carga em estacas revelaram uma redução significativa na capacidade de suporte atribuída à saturação de solos previamente não saturados. Bandeira *et al.* (2024) realizaram uma investigação sobre o comportamento de um solo no município de Juazeiro do Norte – CE, submetido à inundação, com foco na aplicação em fundações rasas. Verificou-se que o solo indeformado apresentou comportamento de colapso quando molhado. Por outro lado, o solo na condição compactada apresentou uma redução significativa do recalque por colapso.

A região do semiárido brasileiro se destaca pelo 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, favorecendo a formação de solos não saturados potencialmente colapsíveis e expansivos.

Em particular, o município de Mossoró, situado no estado do Rio Grande do Norte, apresenta registros de expansão e recalques do solo em determinadas áreas urbanas. Geograficamente, grande parte da área do município está localizada sobre a Formação Jandaíra, constituída predominantemente por rochas carbonáticas do tipo calcário. A Formação Jandaíra representa uma das unidades litoestratigráficas que compõem a Bacia Potiguar. Esta bacia está presente predominantemente no Estado do Rio Grande do Norte, estendendo-se parcialmente até o Estado do Ceará.

Alguns estudos encontraram argilominerais expansivos, como a esmectita e vermiculita, na composição de solos carbonáticos, desenvolvidos em regiões com déficit hídrico (climas semiáridos) (HU *et al.* 2021; AL-AHBASHI; DAFALLA, 2023). Na Formação Jandaíra, Lemos e Curi (1997) e Oliveira *et al.* (2018) também relataram a presença desses argilominerais na fração fina de solos desenvolvidos sobre calcários dessa formação.

Apesar da Formação Jandaíra abranger uma grande extensão da área territorial do Rio Grande do Norte, a literatura sobre a caracterização geotécnica dessa região ainda é limitada. A importância deste estudo está na necessidade de um conhecimento mais detalhado sobre as características geotécnicas dos solos da Formação Jandaíra. Isso é especialmente relevante em face da crescente urbanização e da expansão de setores industriais, como a produção de energias renováveis, exemplificada pela implementação de campos de energia eólica em todo o estado.

Diante desse cenário, este estudo busca analisar o comportamento de solos suscetíveis à expansão e/ou colapso na região de Mossoró – RN, situada na Formação Jandaíra. Para isso, foi realizado um programa de investigação geotécnica, incluindo ensaios de campo e de laboratório, em uma área do município que apresentava manifestações patológicas significativas nas residências, possivelmente associadas a problemas de expansão e/ou colapso do solo.

2. Metodologia

2.1. Área de estudo

A área de estudo localiza-se em uma região do município de Mossoró, situado no estado do Rio Grande do Norte. A extensão territorial do município compreende 2.099,3 km², sendo o de maior abrangência territorial do estado (IBGE, 2023). 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 (SGB, 2014; IDEMA, 2008).

Além disso, o território mossoroense está inserido, geograficamente, na Bacia Potiguar. Sua composição abrange diversas unidades litoestratigráficas, com destaque a Formação Jandaíra, a qual engloba uma vasta área do município, conforme pode ser observado na Figura 1. Ressalta-se que os locais de coleta das amostras estão localizados dentro dessa unidade geológica. No contexto da investigação pedológica da região em estudo, as amostras foram coletadas na região correspondente ao Latossolo Amarelo distrófico, conforme a classificação proposta por Santos et al. (2011). Observou-se, nessa área, a presença de diversas residências apresentando manifestações patológicas, possivelmente relacionadas à expansão e contração do solo. Essas manifestações incluem fissuras, trincas e rachaduras nas estruturas de alvenaria, além de desníveis entre o radier e o solo de fundação.

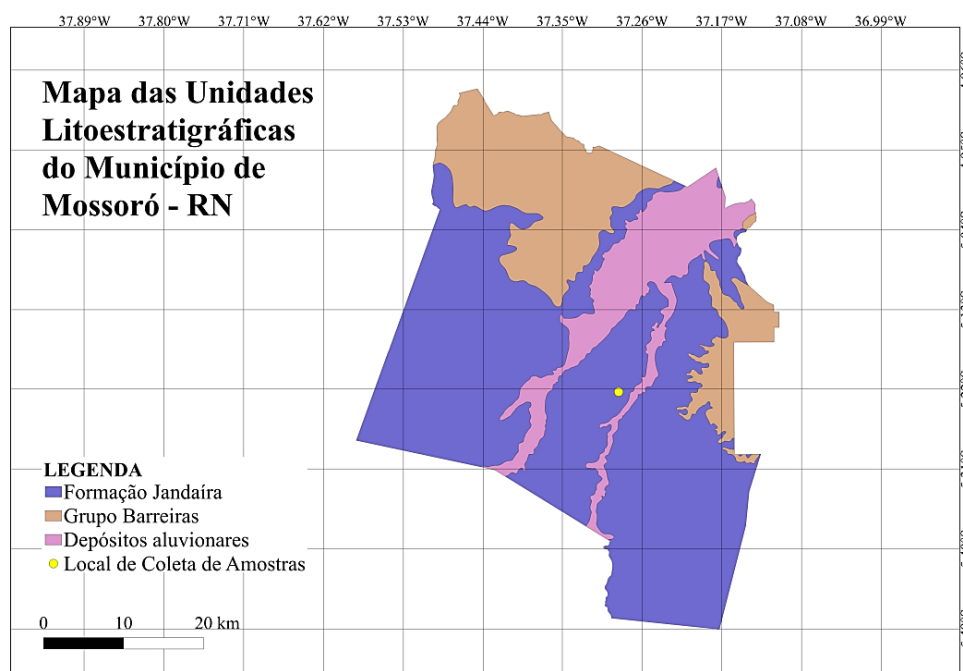


Figura 1 – Mapa das Unidades Litoestratigráficas do Município de Mossoró.

Fonte: Autores; base de dados do Serviço Geológico do Brasil (2024).

2.2. Investigação de campo

Para a obtenção dos perfis do subsolo e a avaliação da resistência à penetração dos solos em campo, foram realizados treze ensaios de sondagem à percussão (SPT - *Standard Penetration Test*) com circulação de água, além de vinte sondagens à trado. A Figura 2 ilustra a distribuição das sondagens e das coletas de amostras indeformadas na área de estudo.

Além disso, com o objetivo de compreender a distribuição dos solos em profundidade, foi aberto um poço de inspeção adjacente ao furo de sondagem a trado ST 10, com profundidade de 0,90 m. A partir dessa profundidade, a investigação prosseguiu por meio de sondagem a trado até 1,50 m. Foram coletadas amostras deformadas em diferentes profundidades a partir da superfície, especificamente a 0,20 m, 0,60 m, 0,80 m, 1,00 m, 1,40 m e 1,50 m. O poço de inspeção possibilitou a visualização de distintas camadas de solo, incluindo materiais pedregulhosos, arenosos e argilosos. Os pedregulhos apresentaram superfícies lisas, arredondadas a subarredondadas, características típicas de seixos, com diâmetro superior a 2 mm.



Figura 2 – Localização dos pontos de amostragem e das sondagens.

Fonte: Autores (2024).

2.3. Investigação de laboratório

Os ensaios de caracterização física foram realizados em onze amostras indeformadas, coletadas a uma profundidade de 0,50 m, cuja distribuição consta na Figura 2, e nas seis amostras deformadas obtidas na sondagem à trado ST 10. Esses ensaios incluíram a análise granulométrica, seguindo as orientações estabelecidas na ABNT NBR 7181:2016; determinação dos limites de Atterberg, conforme a ABNT NBR 6459:2016 e NBR 7180:2016; e obtenção da massa específica dos sólidos, de acordo com a ABNT NBR 6458:2016. O ensaio de compactação pelo método Proctor normal, conforme a NBR 7182:2016, e o ensaio de cisalhamento direto foram realizados à amostra com maior potencial expansivo, especificamente a amostra AI 03. Além disso, foram conduzidos ensaios de expansividade em todas as amostras indeformadas, bem como ensaios de colapsibilidade nas amostras que apresentaram potencial colapsível.

2.3.1. Ensaios de expansibilidade

Os ensaios de expansão livre foram conduzidos utilizando células edométricas convencionais, seguindo os procedimentos especificados na norma ASTM D4546-21. Para realizar esses ensaios, os corpos de prova foram moldados em anéis de aço inoxidável com altura de 19,00 mm e diâmetro de 50,3 mm.

Os corpos de prova indeformados foram moldados a partir das amostras AI 01, AI 02, AI 03, AI 04, AI 07, AI 08, AI 10 e AI 11. Por outro lado, os corpos de prova deformados foram preparados com as amostras AI 01, AI 03, AI 05, AI 06 e AI 09. Para a preparação dos corpos de prova deformados, foi utilizada a fração de solo previamente seca ao ar e passante pela peneira N° 10 (2,0 mm). O solo foi compactado estaticamente dentro do anel metálico, alcançando uma massa específica média de 2,0 g/cm³.

Os corpos de prova foram submetidos à inundação sob uma sobrecarga de 7 kPa. A deformação do solo foi monitorada até atingir uma condição de estabilização. Após a estabilização da expansão, cada corpo de prova foi submetido a estágios de compressão com cargas crescentes até atingir a altura inicial. A tensão correspondente ao retorno da amostra à sua altura inicial é denominada tensão de expansão.

2.3.2. Ensaios de colapsibilidade

Os ensaios de colapsibilidade para avaliar o potencial de colapso do solo foram realizados utilizando células edométricas convencionais, seguindo os procedimentos da ASTM D5333-3. Para conduzir os ensaios, os corpos de prova foram moldados em anéis de aço inoxidável com altura 19,0 mm e diâmetro de 50,3 mm.

Os corpos de prova indeformados foram moldados a partir das amostras AI 02, AI 04, AI 07, AI 08, AI 10 e AI 11, devido à observação de significativa deformação vertical de compressão durante os ensaios de expansão na fase de inundação. Cada corpo de prova foi submetido a carregamentos crescentes de compressão de 12,5 kPa, 25 kPa e 50 kPa. 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 até que a deformação estabilizasse.

A partir dos resultados obtidos, calculou-se o índice de colapso do solo, conforme estabelecido pela ASTM D5333-03, que é representado pela deformação vertical do solo decorrente da sua inundação sob tensão, dado pela Equação 1:

$$I_c (\%) = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (1)$$

Em que,

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.

2.3.3. Ensaios de cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto, realizados para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo na condição inundada e adensada da amostra AI 03, foram conduzidos conforme a norma ASTM D3080/D3080M – 23. Para a execução dos ensaios, as amostras deformadas foram moldadas utilizando solo passante na peneira nº 4 (4,8 mm), compactadas estaticamente em moldes metálicos, com altura de 31,8 mm e diâmetro de 59,4 mm, na umidade ótima e na massa específica aparente seca máxima. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados a uma velocidade de deslocamento constante de 0,025 mm/min, sob três diferentes tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, para estimar a resposta ao cisalhamento dos materiais.

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização física dos solos

A Tabela 1 sintetiza os resultados da caracterização granulométrica dos solos analisados. Percebe-se que, em sua maioria, as amostras são compostas por solos de natureza arenosa, evidenciando, simultaneamente, uma parcela considerável da fração argila. Predominantemente, os solos foram classificados como areia argilosa (SC) de acordo com o Sistema de Classificação Unificada dos Solos (SUCS). Adicionalmente, destaca-se a presença notável de pedregulhos em determinados solos, como é o caso do AI 01 e AI 05.

Com base nas observações realizadas tanto em campo quanto em laboratório, é possível notar que os pedregulhos em questão apresentam superfícies lisas, arredondadas e/ou semiarredondadas, características típicas de seixos. 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 0,60 m e 0,80 m em relação à superfície do solo. Cabe ressaltar que a presença desses pedregulhos em níveis tão superficiais pode estar relacionada, ao menos em parte, a intervenções antrópicas anteriores, como atividades de terraplenagem, lançamentos de resíduos da construção civil ou processos de urbanização não controlada.

Tabela 1 – Caracterização granulométrica dos solos.

Amostra	Granulometria						SUCS
	Pedregulho	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila	
AI - 01	29,59%	11,42%	10,62%	6,70%	8,96%	32,71%	GC
AI - 02	8,45%	18,26%	24,67%	12,45%	6,17%	30,01%	SC
AI - 03	20,31%	8,79%	20,71%	18,13%	10,44%	21,63%	SC
AI - 04	18,65%	13,79%	17,18%	11,91%	10,9%	27,57%	SC
AI - 05	30,83%	15,15%	20,84%	10,48%	5,97%	16,73%	SC
AI - 06	13,98%	14,62%	24,09%	14,56%	6,61%	26,14%	SC
AI - 07	21,62%	12,35%	19,02%	11,26%	8,66%	27,10%	SC
AI - 08	20,70%	14,87%	34,86%	16,59%	3,61%	9,37%	SC
AI - 09	22,75%	22,14%	18,01%	4,47%	6,99%	25,65%	SC
AI - 10	18,22%	12,04%	13,28%	13,91%	9,71%	32,84%	CH
AI - 11	13,99%	12,63%	19,06%	13,59%	12,02%	28,70%	SC
ST 10 – 0,2 m	11,26%	20,78%	22,12%	13,35%	7,84%	26,65%	SC
ST 10 – 0,6 m	46,59%	15,42%	17,49%	9,52%	3,52%	7,45%	GM
ST 10 – 0,8 m	49,00%	8,70%	12,12%	7,55%	6,04%	16,60%	GC
ST 10 – 1,0 m	7,57%	16,41%	28,17%	21,80%	9,33%	16,72%	SC
ST 10 – 1,4 m	13,76%	19,37%	24,65%	13,28%	3,69%	25,25%	SC
ST 10 – 1,5 m	14,55%	17,62%	24,45%	15,56%	5,02%	22,81%	SC

Fonte: Autores (2024).

A Tabela 2 fornece os resultados dos ensaios de limites de consistência, massa específica dos sólidos, teor de umidade e atividade da argila dos solos analisados. A massa específica dos sólidos apresentou variação entre 2,53 e 2,75 g/cm³. Adicionalmente, 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).

Tabela 2 – 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)	Teor de Umidade (%)
	LL (%)	LP (%)	IP (%)		
AI - 01	52,79	28,80	23,99	2,75	10,58
AI - 02	45,80	16,46	29,34	2,73	7,31
AI - 03	28,01	12,81	15,19	2,66	6,78
AI - 04	39,10	18,86	20,24	2,72	7,79
AI - 05	24,92	17,68	7,24	2,70	3,81
AI - 06	32,67	19,72	12,95	2,71	4,59
AI - 07	32,70	17,73	14,97	2,82	7,93
AI - 08	18,48	NP	-	2,71	3,40
AI - 09	38,13	20,26	17,87	2,72	5,20
AI - 10	60,26	26,68	33,57	2,74	10,15
AI - 11	41,38	25,09	16,28	2,77	7,79
ST 10 – 0,2m	30,26	15,62	14,64	2,67	3,66
ST 10 – 0,6m	17,67	13,76	3,91	2,68	1,69
ST 10 – 0,8m	36,70	19,67	17,03	2,72	4,90
ST 10 – 1,0m	23,44	14,09	9,35	2,75	2,55
ST 10 – 1,4m	34,43	23,37	11,06	2,70	3,95
ST 10 – 1,5m	35,21	19,91	15,31	2,71	3,45

LL = Limite de Liquidez; LP = Limite de Plasticidade; IP = Índice de Plasticidade.

Fonte: Autores (2024).

Entre os métodos indiretos de avaliação do potencial expansivo dos solos, destaca-se o critério de Van Der Merwe (1964), o qual relaciona a porcentagem de fração de argila e o IP do solo com seu potencial expansivo. A maioria das amostras de solos estudados pode ser considerada com um grau de expansão que varia de médio a muito alto, conforme demonstrado pela cruz verde na Figura 3.

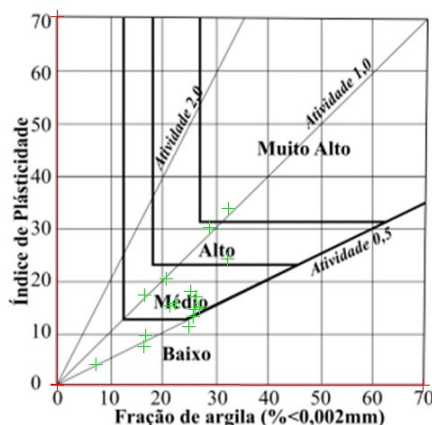


Figura 3 – Carta de Van der Merwe.

Fonte: Autores (2024).

A curva de compactação da amostra AI 03, apresentada na Figura 4, revelou uma massa específica seca aparente máxima de 1,63 g/cm³, com uma umidade ótima de 22,9%. O valor de 1,63 g/cm³ está dentro da faixa esperada para solos arenosos argilosos. No entanto, a umidade ótima, que é superior ao intervalo típico para esse tipo de solo (geralmente entre 8% e 15%), indica uma maior concentração de fração argila, estimada em cerca de 21% conforme a caracterização granulométrica. Essa característica pode ser atribuída à presença significativa de argila, especialmente se contiver argilominerais expansivos. Solos com elevado teor de argila tendem a necessitar de mais água para alcançar sua densidade máxima, devido à sua alta capacidade de retenção de umidade e propensão à expansão.

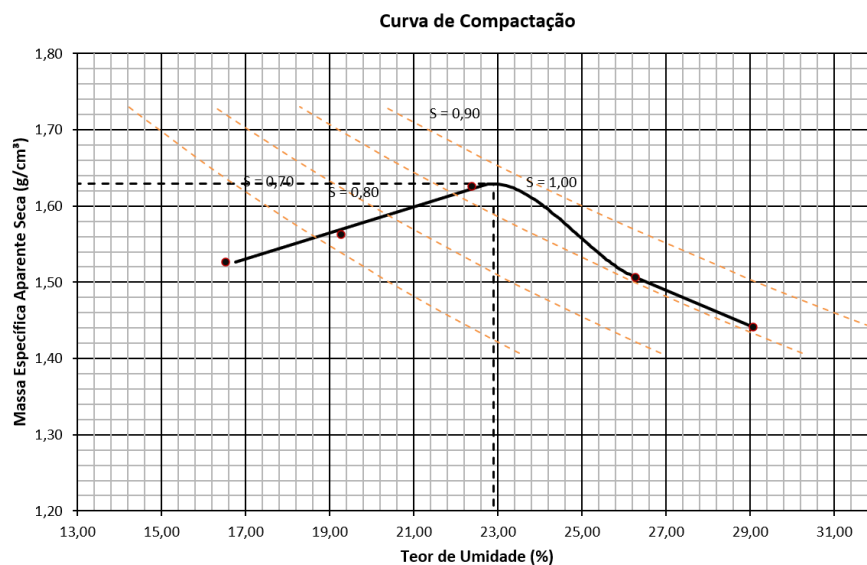


Figura 4 – Curva de compactação da amostra AI 03.

Fonte: Autores (2024).

3.2. Resistência à penetração e perfis geotécnicos do subsolo

A análise dos ensaios SPT revelou uma alta resistência à penetração do solo nos pontos investigados, conforme demonstrado na Tabela 3, que lista os valores de N_{SPT} obtidos. As sondagens realizadas atingiram uma profundidade média de 1,45 metros, com exceção do ponto SP 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.

Tabela 3 – Resultados obtidos nos ensaios de sondagem à percussão (SPT).

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

Fonte: Autores (2024).

A maioria das amostras coletadas durante as sondagens foi classificada, por meio de análise tátil-visual, como areia argilosa compacta com presença de pedregulhos. Essa classificação foi corroborada pelas análises granulométricas realizadas em laboratório em praticamente todas as amostras, evidenciando boa concordância com as observações de campo. A elevada porcentagem de argila na composição do solo, associada às condições de baixa umidade típicas do período de estiagem em que os ensaios foram realizados (mês de agosto), pode ter contribuído para o aumento da resistência à penetração. Em solos não saturados, a redução do teor de umidade pode aumentar a sucção matricial e, consequentemente, a resistência aparente do solo, contribuindo para os elevados valores de ($N_{\{SPT\}}$) observados durante os ensaios.

A partir das sondagens à percussão, foram elaborados dois perfis geotécnicos do subsolo, conforme ilustrado na Figura 5. O Perfil 1 foi traçado no sentido transversal à área estudada, enquanto o Perfil 2 foi delineado longitudinalmente. 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.

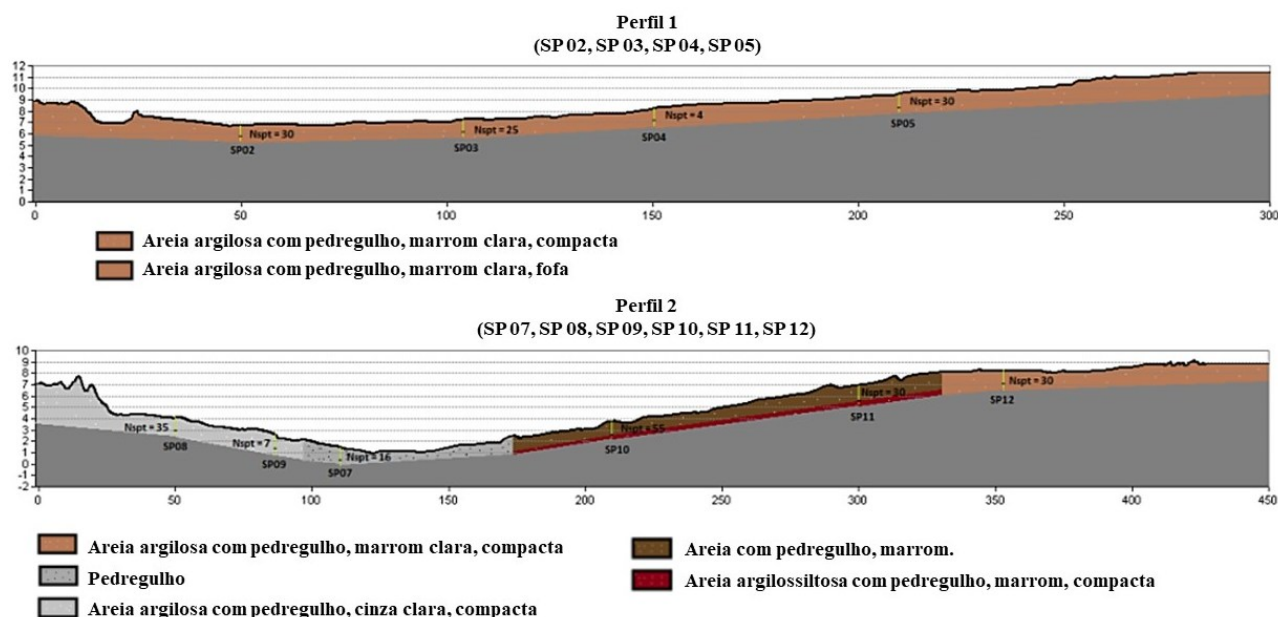


Figura 5 – Perfis geotécnicos do subsolo.

Fonte: Autores (2024).

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.

3.3. Avaliação do potencial de expansão

No contexto dos ensaios de expansão, é essencial analisar o comportamento dos corpos de prova durante a fase de inundação para entender melhor as características de deformação do solo. A Figura 6 apresenta os gráficos de deformação específica vertical *versus* raiz do tempo, obtidos no ensaio de expansão durante essa etapa nos corpos de prova indeformados. Observa-se que os corpos de prova oriundos das amostras AI 01 e AI 03 exibiram uma leve expansão, o que exigiu um período de estabilização das deformações antes de avançar para o próximo estágio de carregamento. Nesse processo, as tensões de expansão para as amostras AI 01 e AI 03 foram de 12,5 kPa e 10 kPa, respectivamente.

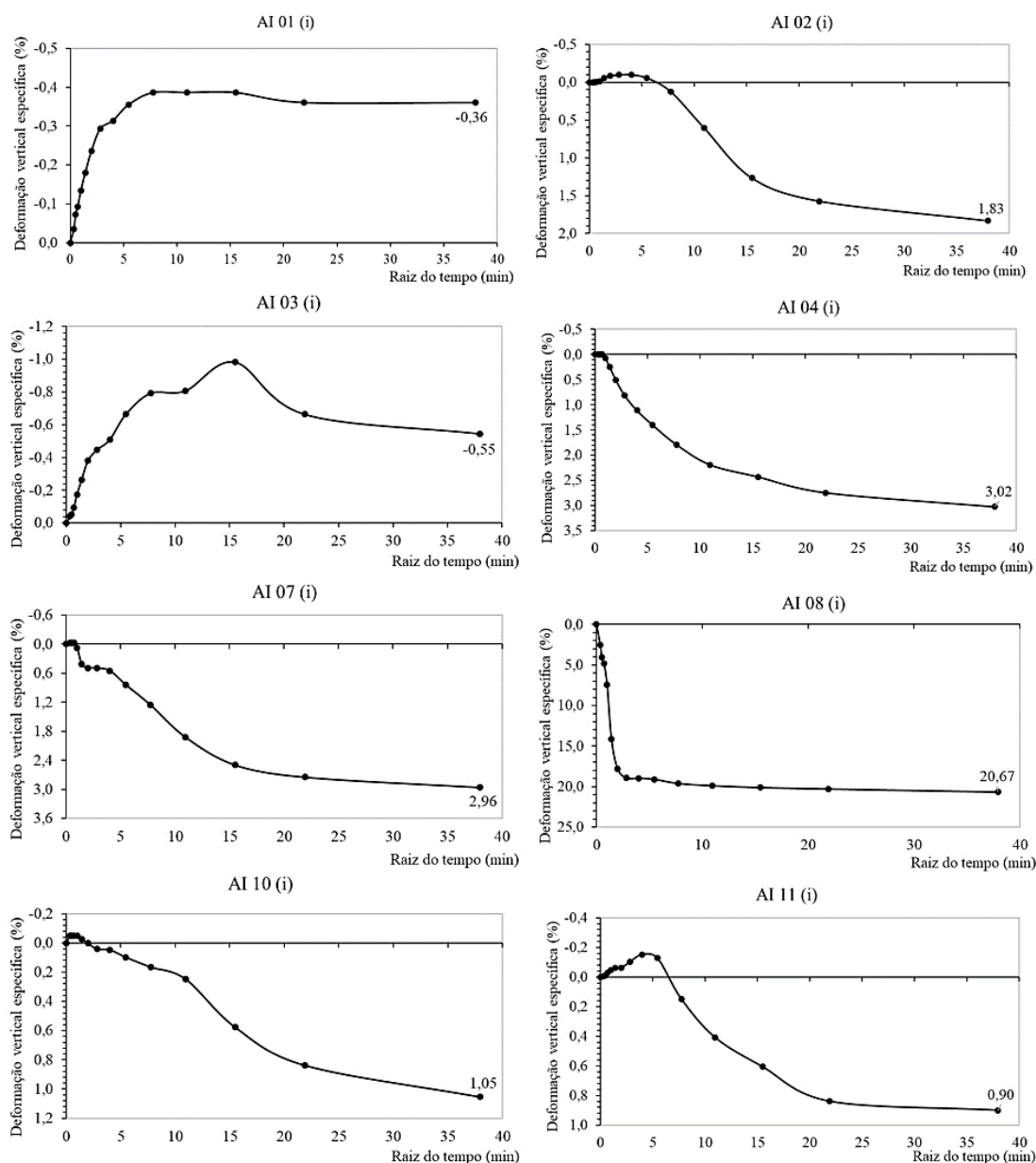


Figura 6 – Resultados obtidos no ensaio de expansão para as amostras indeformadas.

Fonte: Autores (2024).

Em contrapartida, os corpos de prova provenientes das amostras AI 02, AI 10 e AI 11 inicialmente apresentaram uma tendência de expansão durante o estágio de inundação, porém, diferentemente das amostras AI 01 e AI 03, retornaram à sua altura inicial sem requerer um aumento adicional no carregamento. É pertinente ressaltar que, exceto pelas amostras AI 01 e AI 03, as demais amostras de solo evidenciaram uma propensão ao colapso quando submetidas à inundação, refletindo variações na deformação específica que variaram de 0,9% a 20,67% entre os corpos de prova analisados.

A Figura 7 exibe os gráficos de deformação específica vertical *versus* raiz do tempo obtidos nos ensaios de expansão para o estágio de inundação dos corpos de prova deformados. É evidente que, ao confeccionar os corpos de prova com a fração mais fina do solo, ocorreram expansões significativas. Essas expansões resultaram em deformações específicas variando de 4,42% a 23,14% entre as amostras analisadas.

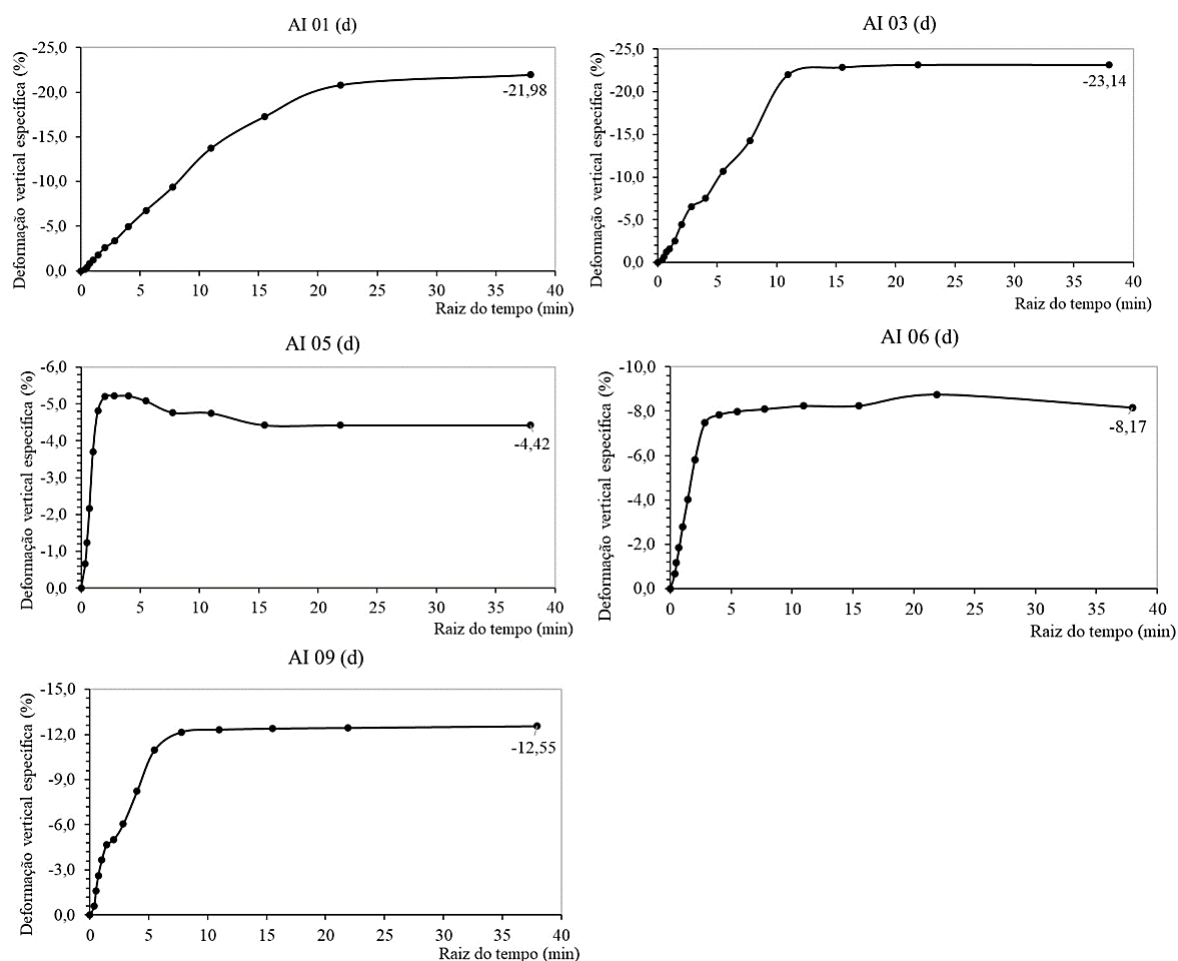


Figura 7 – Resultados obtidos nos ensaios de expansão para as amostras deformadas.

Fonte: Autores (2024).

Além disso, as tensões de expansão atingiram patamares mais elevados durante os ensaios. Destacam-se valores de 100 kPa para os corpos de prova moldados a partir das amostras AI 05 (d) e AI 06 (d), 400 kPa para os corpos de prova derivados das amostras AI 03 (d) e AI 09 (d), e 800 kPa para a amostra AI 01 (d), conforme ilustrado na Figura 8. Nessa figura, é possível observar o comportamento tensão *versus* deformação específica para os corpos de provas deformados. Especificamente, ao comparar as amostras AI 01 (d) e AI 03 (d) nas condições indeformadas e deformadas, verifica-se um notável aumento na deformação específica devido à expansão.

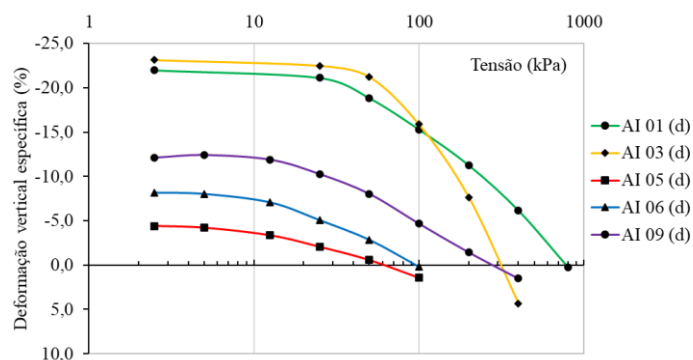


Figura 8 – Curvas de expansão dos corpos de provas deformados.
Fonte: Autores (2024).

3.4. Avaliação do potencial de colapso

No estudo das propriedades de colapsibilidade do solo, é fundamental compreender a evolução da deformação específica vertical durante a inundação sob carga aplicada. Na Figura 9 são apresentados os gráficos com as deformações específicas até atingir a tensão de inundação (50 kPa) dos corpos de prova. Os incrementos de deformação vertical ($\Delta\epsilon_v$) observados ao final do estágio de inundação variaram de 0,65% a 9,58% nas amostras analisadas, indicando diferentes graus de colapsibilidade entre os solos. O menor incremento de deformação foi observado na amostra AI 02 com $\Delta\epsilon_v$ de 0,65% e o maior atingiu 9,58% para a amostra AI 08.

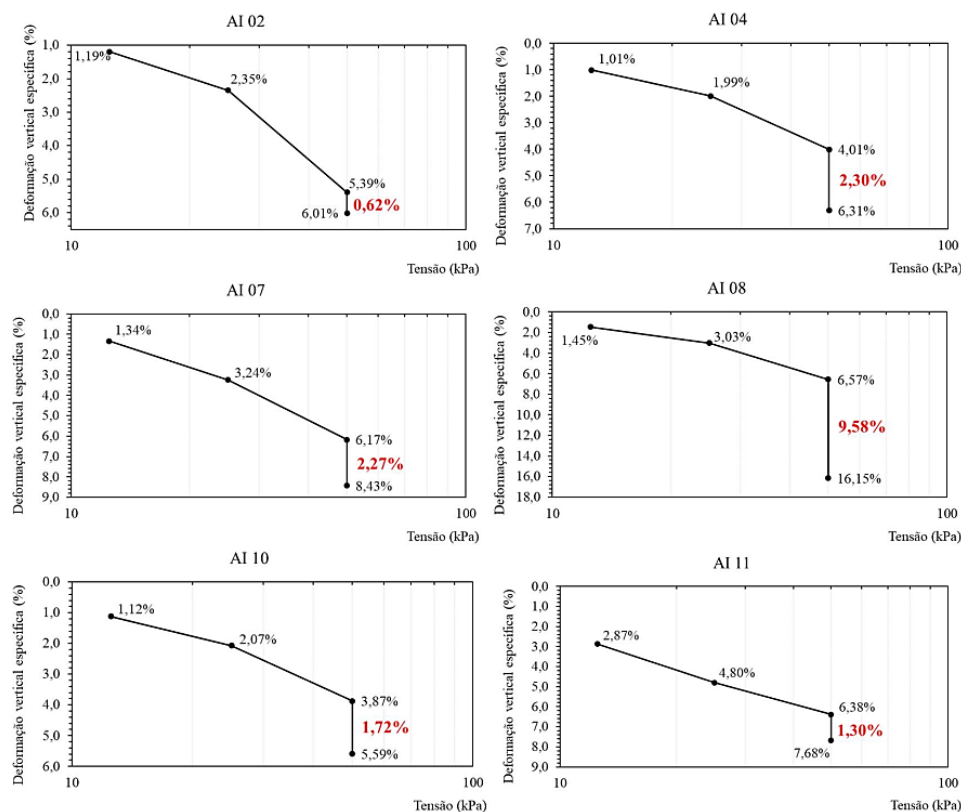


Figura 9 – Curvas de colapso com inundação à 50 kPa.
Fonte: Autores (2024).

A variação da deformação vertical para as amostras AI 04, AI 07 e AI 08, sob a tensão de 50 kPa no momento da inundação, foi superior à 2%, ou seja, de acordo com o critério proposto por Vargas (1977) esses solos podem ser considerados colapsíveis. Por outro lado, conforme o índice de colapso definido pela Equação (1), a amostra AI 08 é classificada como de colapso moderadamente severo, segundo a classificação da ASTM D5333 – 03, enquanto as amostras AI 04 e AI 07 são classificadas como de colapso moderado, e as amostras AI 02, AI 10 e AI 11 como de colapso leve.

É importante destacar que, embora a deformação vertical da amostra AI 10 tenha sido ligeiramente inferior a 2%, registrando 1,72%, sua relevância não deve ser subestimada. Apesar de não atingir o limite estipulado por Vargas (1977) para ser considerada colapsível e ser classificada como colapso leve pela ASTM D5333 – 03, recomenda-se uma atenção especial a essa amostra. Isso se deve à variação significativa de 44,44% na deformação vertical observada durante o período de inundação, entre o instante inicial (0h) e as 24 horas subsequentes.

3.5. Resistência ao cisalhamento do solo

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados na amostra AI 03, que apresentou maior potencial expansivo. Os corpos de prova foram submetidos a tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. A Figura 10 mostra a relação entre a tensão cisalhante e o deslocamento horizontal. Observa-se que, independentemente da tensão aplicada, o solo apresentou um comportamento típico, atingindo inicialmente uma condição de resistência ao cisalhamento máxima, ou de pico (fase de endurecimento), seguido de uma queda gradual (fase de amolecimento) até alcançar a resistência ao cisalhamento residual. Esse comportamento é característico de solos com alta fração de argila, como a amostra AI 03, que contém 21,63% de argila, influenciando diretamente o desenvolvimento da resistência ao cisalhamento e o subsequente amolecimento após o pico.

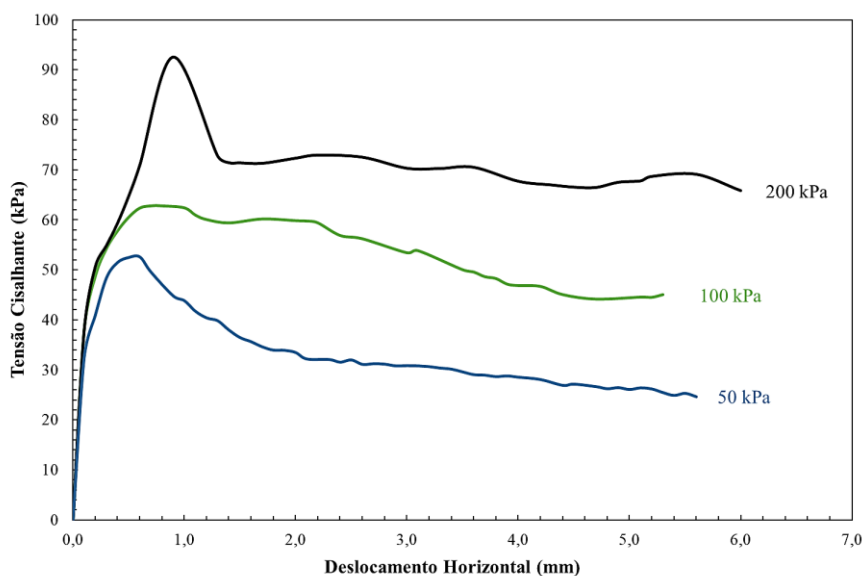


Figura 10 – Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal referente ao ensaio de cisalhamento direto da amostra AI 03.

Fonte: Autores (2024).

Adicionalmente, a resistência de pico é mais pronunciada para a maior tensão normal aplicada, de 200 kPa, que atingiu aproximadamente 90 kPa de tensão cisalhante. Esse comportamento é esperado devido ao fenômeno de imbricamento das partículas do solo, que aumenta com a aplicação de tensões normais mais elevadas. Quando maiores tensões normais são aplicadas, as partículas do solo se compactam, resultando em um confinamento mais eficiente e, conseqüentemente, em uma maior resistência ao deslizamento entre as partículas. Esse aumento no embricamento das partículas gera uma resistência ao cisalhamento de pico mais elevada, o que explica o aumento da tensão cisalhante à medida que a tensão normal é incrementada.

A Figura 11 apresenta as envoltórias de resistência ao cisalhamento, tanto para o estado de pico quanto para o estado residual, obtidas nas tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. A envoltória de pico evidencia uma maior resistência inicial ao cisalhamento do solo, com uma coesão de aproximadamente 37,6 kPa e um ângulo de atrito de 15,04°. No entanto, após o solo atingir sua resistência máxima e sofrer alterações estruturais durante o cisalhamento, a envoltória residual indica uma redução significativa, com a coesão caindo para cerca de 14,2 kPa e o ângulo de atrito diminuindo ligeiramente para 14,73°. Esse comportamento ressalta a transição entre o estado inicial e o estado de deformação permanente do solo.

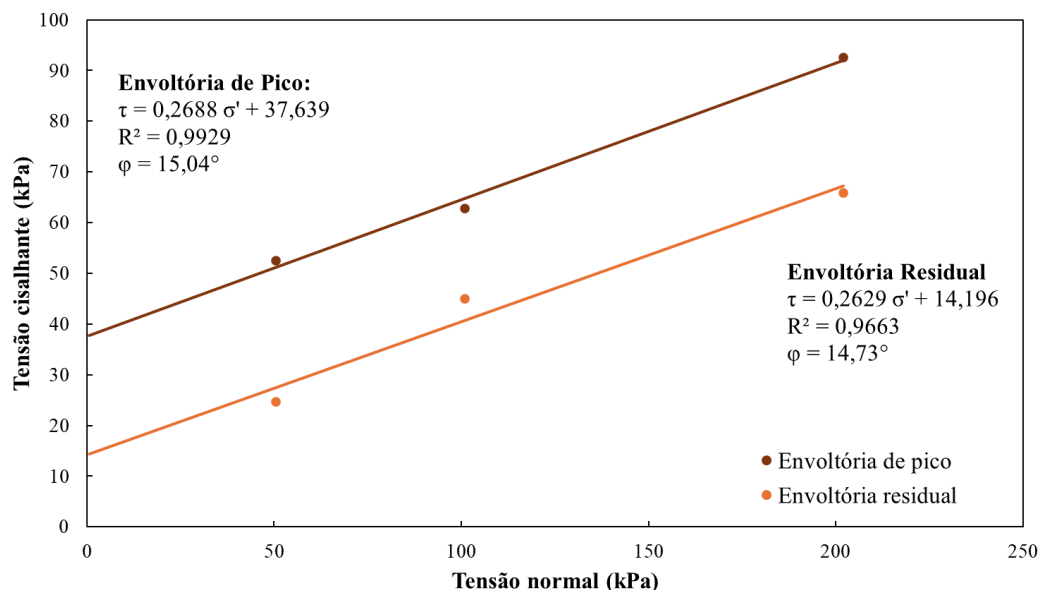


Figura 11 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico e residual da amostra AI 03.

Fonte: Autores (2024).

A elevada coesão observada no estágio inicial de cisalhamento pode ser atribuída principalmente à fração argilosa presente no solo, que confere maior resistência coesiva devido à natureza coloidal das partículas de argila. Essas partículas finas formam ligações fortes que aumentam a resistência do solo ao cisalhamento. Contudo, à medida que o cisalhamento progride e a estrutura do solo é reorganizada, parte dessa coesão é perdida, resultando na diminuição observada na condição residual. O solo, portanto, passa de um estado com maior resistência para um estágio onde a coesão é significativamente menor, como evidenciado pela queda para 14,2 kPa, praticamente metade do valor da coesão antes da ruptura.

Em contrapartida, o ângulo de atrito do solo apresenta pouca variação entre os estados de pico e residual. Com valores bastante próximos (15,04° e 14,73°, respectivamente), essa pequena diferença sugere que o atrito interno entre as partículas do solo não é tão sensível às mudanças estruturais induzidas pelo cisalhamento. Diferente da coesão, que diminui consideravelmente, o ângulo de atrito mantém-se quase inalterado, indicando que o atrito entre as partículas arenosas e de silte presentes na composição do solo continua a contribuir de maneira estável para a resistência ao cisalhamento, mesmo após o rearranjo da estrutura do solo.

4. Considerações finais

Este artigo apresentou um estudo sobre o comportamento de solos suscetíveis à expansão e/ou colapso na região de Mossoró – RN, situada na Formação Jandaíra, a partir de ensaios geotécnicos de laboratório e em campo. Com base nos resultados encontrados pode-se concluir que:

- A caracterização física indicou solos predominantemente arenosos com significativa fração de argila, classificados como areia argilosa (SC) com pedregulhos superficiais entre 0,6 e 0,8 m de profundidade.

- A análise de compactação da amostra com maior potencial de expansão indicou uma massa específica seca máxima de 1,63 g/cm³ e uma umidade ótima de 22,9%, refletindo a presença de uma fração significativa de argila, com maior retenção de umidade e susceptibilidade à expansão.

- A análise dos ensaios SPT indicou uma alta resistência à penetração do solo que pode estar associado a condições baixa de umidade e alta porcentagem da fração argila. A maioria das amostras foi classificada como areia argilosa compacta com pedregulhos, corroborando com a caracterização física obtida em laboratório.

- Os perfis de solo elaborados a partir das sondagens à percussão indicaram uma camada impenetrável, localizada em média a 1,50 m de profundidade, associada à presença de afloramento de rochas calcárias ou pedregulhos;

- Os ensaios de expansão mostraram que apenas duas amostras indeformadas apresentaram leve expansão durante a fase de inundação, enquanto as demais amostras indeformadas apresentaram tendência ao colapso sob inundação, com deformações variando de 0,9% a 20,67%.

- Os ensaios de expansão com corpos de prova deformados, observou-se maior expansão, com deformações específicas entre 4,42% e 23,14%. As tensões de expansão atingiram valores elevados, variando de 100 kPa a 800 kPa, indicando aumento significativo da expansão nas amostras compactadas com a fração fina do solo.

- Os ensaios de colapsibilidade sob carga de 50 kPa mostraram um aumento significativo na deformação vertical específica durante a inundação, variando entre 0,65% e 9,58%. Três amostras analisadas foram classificadas como solos colapsíveis segundo o critério de Vargas (1977). Enquanto pela classificação da ASTM D5333-03, uma amostra foi categorizada com colapso moderadamente severo, enquanto duas amostras apresentaram colapso moderado.

- O ensaio de cisalhamento direto realizado na amostra com maior potencial expansivo, mostraram um comportamento típico de solos argilosos, com uma resistência ao cisalhamento de pico seguida de amolecimento. A resistência de pico aumentou com o aumento da tensão normal aplicada. A coesão foi significativamente afetada pelo cisalhamento, enquanto o ângulo de atrito apresentou variação insignificante.

Com os resultados deste estudo, é evidente a importância de compreender o comportamento de solos não saturados, especialmente os carbonáticos em regiões semiáridas, como os da Formação Jandaíra, quando submetidos a ciclos de inundação e secagem e a tensões de trabalho. Isso é fundamental para avaliar a necessidade de tratamentos no solo que assegurem a estabilidade das fundações, evitando manifestações patológicas e garantindo a segurança das edificações.

Referências

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7181: Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- 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, 2017.
- AL-MAHBASHI, A. M.; DAFALLA, M. *The distribution and mineralogy of expansive clay in a semi-arid region*. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 16, n. 4, 283, 2023.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *D5333-03 - Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils*. Pennsylvania, EUA: 2017.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *D4546-21 - Standard Test Methods for One - Dimensional Swell or Collapse of Soils*. Pennsylvania, EUA: 2021.

-
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *D3080/D3080M-23 - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. Pennsylvania, EUA: 2023.
- 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, 2725-2743, 2024.
- BARBOSA, V. H. R.; MARQUES, M. E. S.; GUIMARÃES, A. C. R.; CASTRO, C. D. Characterization of an expansive soil in southwest Brazilian amazon - Behavior of an expansive subgrade in a flexible pavement. In: *Advances in Transportation Geotechnics IV: Proceedings of the 4th International Conference on Transportation Geotechnics Volume 3*. Springer International Publishing, 323-335, 2022.
- BARBOSA, V. H. R.; MARQUES, M. E. S.; GUIMARÃES, A. C. R. Predicting soil swelling potential using soil classification properties. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 41, n. 8, 4445-4457, 2023.
- BURMISTER, D. M. Principles and techniques of soil identification. In: *Proceedings of Annual Highway Research Board Meeting. National Research Council*. 402-434. Washington, DC. 1949.
- 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, 4761-4773, 2023.
- 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, 779-791, 2009.
- 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, 1044, 2021.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mossoró - Panorama. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/mossoro/panorama>. Acesso em: 05/07/2024.
- IDEMA - INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE. *Perfil do seu município - Mossoró*. Natal: IDEMA, 2008.
- LEMONS, M. S. S.; CURI, N. Evaluation of characteristics of Cambisols derived from limestone in low tablelands in northeastern Brazil. v. 32, n. 8. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 825-834, 1997.
- 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, 325-332, 2018.
- SGB - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. *Geologia e recursos minerais da folha Mossoró*. Recife: CPRM, 2014.
- SANTOS, H. G.; CARVALHO JÚNIOR, W.; DART, R. O.; ÁGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília - DF: Embrapa, 2018.
- VAN DER MERWE D. H. The Prediction of Heave from Plasticity Index and Percentage Fraction of Soils. *Civil Engineer in South Africa*, 103-107, 1964.
- VARGAS, M. *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: McGraw-Hill, Editora da Universidade de São Paulo, 1977.