



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ELUIZA ÉCILA COSME SANTIAGO

**ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE A EXPANSÃO POR MÉTODO DIRETO DE UM
SOLO DE ANGICOS/RN**

ANGICOS

2025

ELUIZA ÉCILA COSME SANTIAGO

**ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE A EXPANSÃO POR MÉTODO DIRETO DE UM
SOLO DE ANGICOS/RN**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Arthur Gomes Dantas de Araujo,
Prof. Dr.

ANGICOS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S235e Santiago, Eluiza Écila Cosme.

ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE A EXPANSÃO POR
MÉTODO DIRETO DE UM SOLO DE ANGICOS/RN / Eluiza

Écila Cosme Santiago. - 2025.

36 f.: il.

Orientador: Arthur Gomes Dantas de Araujo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal

Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2025.

1. Solo expansivo. 2. Ensaio de expansão
livre. 3. Método direto. 4. Angicos/RN. I. de
Araujo, Arthur Gomes Dantas, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia
Duarte CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ELUIZA ÉCILA COSME SANTIAGO

**ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE A EXPANSÃO POR MÉTODO DIRETO DE UM
SOLO DE ANGICOS/RN**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 05 / 08 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Arthur Gomes Dantas de Araujo, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Luis Henrique Gonçalves Costa, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Kléber Cavalcanti Cabral, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Nossa Senhora por me dar forças nos momentos de fraqueza, luz nos dias difíceis e fé para seguir em frente mesmo quando tudo parecia impossível.

Agradeço à minha mãe, Alice Kaliane da Silva Cosme Oliveira, minha inspiração diária, por todo esforço e dedicação para que nunca me faltasse nada, sempre fez o possível e o impossível para que eu realizasse meus sonhos, mesmo com todas as dificuldades. Por ser minha coluna de sustentação e está sempre ao meu lado, me dando apoio, amor e deixando claro, em voz e caixa alta que eu sou capaz – lhe darei muito orgulho ainda. Eu te amo infinitamente Mãe e se eu for metade da mulher, engenheira forte e independente que és, já serei muito feliz.

À minha filha, Ísis Mariane Cosme Miranda, razão da minha vida, do meu esforço e da minha perseverança. Ísis é a responsável pela força tirada de onde não tem, é por ela e por seu futuro. Contrariando todas as estatísticas de ser mãe adolescente, hoje encerro a minha maior conquista com o amor da minha vida ao meu lado. Que este momento sirva como exemplo de que, com dedicação e coragem, é possível alcançar nossos sonhos, mesmo diante dos desafios.

Agradeço à minha avó, Francisca Izabel da Silva Evangelista, por todo amor infinito e por todos ensinamentos enriquecedores, pela criação impecável, por estar sempre com o colo pronto e disposta a mover o mundo por mim. Ela que com sua fé e seu amor sempre me ensinou com todo carinho e paciência, que com determinação e fé, conseguimos tudo. Sem dúvidas, a mulher mais forte que eu conheço, desejo ser metade da mulher que ela é, se assim for, serei muito feliz.

Ao meu pai, Eriwson Carlos Rodrigues Santiago, agradeço por mesmo que de longe me incentivar e me dizer sempre que possível o quanto sou capaz e o quanto eu mereço muito. “Gorda quando você se formar, o mundo vai ser pequeno”, quero ter a coragem de viver no mundo igual a ele.

Aos meus familiares, meu padrasto Adriano (Pexe); ao meu avô, Luiz Antonio, ao meu tio, Luiz Filho; aos meus irmãos, Alexandre Maximus e Antonella; à minha madrastra, Mara; agradeço por todo amor, incentivo e por nunca medirem esforços para que eu pudesse trilhar esse sonho e a vida em geral.

Agradeço também ao meu orientador, Arthur Gomes Dantas de Araujo, pela paciência, dedicação e valiosas contribuições ao longo deste trabalho. Sua orientação foi essencial para que eu pudesse desenvolver com segurança este estudo, mesmo diante das dúvidas e dos momentos difíceis. Muito obrigada por acreditar no meu potencial e por me conduzir com firmeza e sabedoria nesta etapa tão importante.

Aos membros da banca examinadora, Luis Henrique Gonçalves Costa e Kléber Cavalcanti Cabral, expresso minha gratidão pelas contribuições durante essa jornada, e pela disponibilidade em participar deste momento tão especial na minha trajetória acadêmica. Suas observações agregaram conhecimento e fortaleceram ainda mais este trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da UFERSA – campus Angicos, que contribuíram para minha formação ao longo desses anos, deixo os meus mais sinceros agradecimentos. Cada ensinamento, cada desafio proposto, moldou não apenas minha vida profissional, mas também pessoal.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa caminhada. Amigos, colegas de curso, funcionários da instituição, e todas as pessoas que torceram por mim. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio, foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

*“À minha família, que me ensinou o significado de casa mesmo antes
da faculdade de engenharia civil”.*

"Consagre ao Senhor todos os teus sonhos
e tudo o que você for fazer, e você será bem-
sucedido em todo eles."

Provérbios 16:3

RESUMO

Solos expansivos, especialmente comuns em regiões semiáridas, são caracterizados pela presença de argilominerais, os quais promovem variações volumétricas em função da variação de umidade. Este trabalho tem como objetivo avaliar a suscetibilidade à expansão de um solo localizado no município de Angicos, no estado do Rio Grande do Norte, por meio da aplicação do método direto de expansão livre, conforme especificações da norma ABNT NBR 12007:1990. A motivação para o estudo surgiu a partir da identificação de manifestações patológicas, como trincas, em edificações da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Angicos, possivelmente associadas à variação volumétrica do solo local, quando submetido ao umedecimento. Para a realização dos ensaios, foram moldadas amostras de solo submetidas a duas diferentes cargas verticais (0,50 kPa e 1,00 kPa) durante dois dias de submersão. Os resultados mostraram que ambas as amostras apresentaram comportamento expansivo relevante, sendo a deformação mais acentuada na amostra submetida à menor carga. Os valores obtidos permitiram classificar o solo como de suscetibilidade média a elevada à expansão, corroborando os dados obtidos em estudo anterior desenvolvido por Vale (2023), que utilizou métodos indiretos para análise do mesmo material.

Palavras-chave: Solo expansivo. Ensaio de expansão livre. Método direto. Angicos/RN.

ABSTRACT

Expansive soils, especially common in semiarid regions, are characterized by the presence of clay minerals, which promote volumetric variations as a function of moisture content. This study aims to evaluate the susceptibility to expansion of a soil located in the municipality of Angicos, in the state of Rio Grande do Norte, by applying the direct free expansion method, according to the specifications of the ABNT NBR 12007:1990 standard. The motivation for the study arose from the identification of pathological manifestations, such as cracks, in buildings of the Federal Rural University of Semi-Arid Region (UFERSA), Angicos campus, possibly associated with the volumetric variation of the local soil when subjected to wetting. To conduct the tests, soil samples were molded and subjected to two different vertical loads (0.50 kPa and 1.00 kPa) for two days of submersion. The results showed that both samples exhibited significant expansive behavior, with the deformation being more pronounced in the sample subjected to the lower load. The values obtained allowed the soil to be classified as having medium to high susceptibility to expansion, corroborating the data obtained in a previous study developed by Vale (2023), which used indirect methods to analyze the same material.

Keywords: Expansive soil. Free expansion test. Direct method. Angicos/RN.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Localização do município em que foi realizada a coleta da amostra de solo	25
Figura 2	–	Local da coleta da amostra de solo	26
Figura 3	–	Patologias na estrutura na biblioteca: a) sala de estudos coletivo; b) corredor das salas; c) sala de estudos coletivo; d) parede da sala dos livros; e) parede do banheiro masculino; f) sala de estudos individual;	27
Figura 4	–	Coleta do bloco indeformado	27
Figura 5	–	Processo de moldagem do corpo-de-prova: a) início do processo de moldagem; b) moldagem do corpo-de-prova em andamento; c) Corpo-de-prova moldado no anel metálico	28
Figura 6	–	Ensaio de expansão livre em andamento	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Fatores que ocasionam o processo de expansão do solo	20
Tabela 2	–	Métodos de identificação de solos expansivos	22
Tabela 3	–	Classificações do grau de expansão relacionada aos limites de consistência	22
Tabela 4	–	Critérios de classificação de solos expansivos com base na expansão livre e tensão de expansão	23
Tabela 5	–	Dados para os ensaios	29
Tabela 6	–	Índices físicos antes e depois dos ensaios	31
Tabela 7	–	Comparação dos ensaios	32
Tabela 8	–	Comportamento do solo no Ensaio 1 (sobrecarga igual a 0,50kPa)	32
Tabela 9	–	Comportamento do solo no Ensaio 2 (sobrecarga igual a 1,00kPa)	33
Tabela 10	–	Comportamento do solo nos ensaios 1 e 2	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BCA	Biblioteca Campus Angicos
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
NBR	Norma Brasileira
SPT	Standard Penetration Test - Teste de Penetração Standard
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semiárido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Solo	16
2.2	Solos expansivos	17
2.2.1	Expansão dos solos	18
2.2.2	Fatores que influenciam na expansão	19
2.2.3	Critérios de identificação dos solos expansivos	21
3	METODOLOGIA	25
3.1	Local da coleta do bloco indeformado	25
3.2	Aspectos geológicos	26
3.3	Coleta do bloco indeformado	26
3.4	Ensaio de expansão livre	28
3.5	Caracterização física	30
4	RESULTADOS	31
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

A instabilidade volumétrica de solos argilosos em função da variação do teor de umidade é um desafio recorrente enfrentado pela engenharia geotécnica, especialmente em regiões semiáridas. Os solos expansivos possuem a capacidade de alterar significativamente seu volume devido à presença de argilominerais do grupo das esmectitas, como a montmorilonita, que interagem com a água provocando processos de expansão e retração. Tais fenômenos são potencialmente danosos para obras de infraestrutura, podendo gerar manifestações patológicas como fissuras, recalques e até perda de funcionalidade estrutural (FERREIRA et al., 2017).

A cidade de Angicos/RN, localizada na região Central do estado do Rio Grande do Norte, insere-se em um contexto climático e geológico propício à ocorrência de solos com comportamento expansivo. A observação de fissuras e deformações no piso da Biblioteca da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Angicos, motivou a investigação geotécnica do solo local. A importância desse tipo de estudo é destacada por Das (2013), ao afirmar que o conhecimento prévio da suscetibilidade expansiva do solo é essencial para a adoção de soluções de projeto seguras e economicamente viáveis.

Nesse sentido, o presente trabalho pretende avaliar a suscetibilidade à expansão de um solo localizado em Angicos/RN por meio do método direto de ensaio de expansão livre, segundo a norma ABNT NBR 12007 (1990). Este método permite medir diretamente a variação volumétrica de uma amostra de solo confinado lateralmente e inundado, fornecendo uma estimativa mais precisa do potencial expansivo do material analisado.

1.1 Objetivos

Neste item serão abordados o objetivo geral e específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal a análise da susceptibilidade à expansão de um solo, localizado ao lado da Biblioteca Central de Angicos – BCA da Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, situado no município de Angicos/RN, utilizando métodos diretos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a coleta de amostra indeformada da área de estudo;
- Determinar os índices físicos da amostra no solo indeformado e após umedecimento;
- Realização do ensaio de expansão livre fora da prensa de adensamento;
- Classificar o solo quanto ao seu potencial de expansão, com base nos resultados obtidos

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este trabalho tem como tema principal a expansividade do solo, sendo assim apresentados os conceitos, as características, os locais de ocorrência e os métodos de identificação registrados na literatura referentes aos solos expansivos.

2.1 Solo

O solo é definido, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo, como uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos; contêm matéria viva e podem ser vegetados na natureza e, eventualmente, terem sido modificados por ações do homem (SANTOS et al., 2018).

O solo é composto por materiais que resultam do intemperismo das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. Quando a decomposição se dá por desintegração mecânica, através de agentes como água, temperatura, vegetação e vento, formam-se os pedregulhos e areias e os siltes, e, somente em condições especiais, as argilas (CAPUTO, 1988).

A decomposição química é o processo onde ocorre a modificação química ou mineralógica das rochas de origem, sendo a água o principal agente modificador. Quanto aos mecanismos de ataque, os mais importantes são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação. As argilas representam o último produto do processo de decomposição (CAPUTO, 1988).

Desse modo, verifica-se que o solo é um recurso natural de grande importância para o meio ambiente, uma vez que suas relações com a biosfera ocasionam fenômenos que transformam rochas através de desintegração mecânica ou decomposição natural em solos com características e propriedades distintas.

No decorrer do tempo, a mecânica dos solos clássica tem buscado desenvolver princípios para descrever o comportamento dos solos. No entanto, esses princípios, em geral, foram estabelecidos com base no comportamento dos solos saturados. Contudo, Carvalho et al. (2015) afirma que existem solos em condição não saturada que apresenta comportamento mecânico e propriedades físico-químicas diferente do convencional.

A maioria dos solos também está sujeito à expansão ou colapso quando em contato com água, dependendo da tensão aplicada e do histórico de tensão. Além disso, ao carregar o solo é

possível que ocorra contração, e ao retirar o carregamento, devido ao alívio de tensões, poderá haver expansão. Além disso, na situação de um solo muito compacto pode ocorrer o rolamento das partículas umas por cima das outras devido a uma ação de cisalhamento, provocando dilatação resultando em variação de volume, apesar de não ser expansivo (BARBOSA, 2013; SHARMA, 1998).

2.2 Solos Expansivos

A mecânica dos solos estuda os solos e, devido à diferença de natureza e comportamento divide-os em solos saturados e solos não saturados. Os solos expansivos estão inseridos no grupo dos solos não saturados, uma vez que em contato com água sofrem uma forte tensão de expansão por causa da sua composição mineralógica. O comportamento dos solos expansivos está associado ao fenômeno mecânico e físico-químico que ocorre a nível microscópico, sendo uma consequência das propriedades das partículas argilominerais presentes no solo (GENS; ALONSO, 1992).

Dentre os solos não saturados, existem aqueles que são classificados como solos expansivos. Esses solos apresentam variações volumétricas excessivas como o aumento da umidade, e retrações drástica na perda dela. Os solos expansivos originam-se da decomposição de rochas ígneas básicas, basaltos, diabásios, que permitam o surgimento de argilominerais de estrutura laminar 2:1. Rochas sedimentares e metamórficas, também, são capazes de promover o surgimento de solos expansivos, por meio do intemperismo (TENÓRIO, 2018).

Segundo Presa (1978), os solos expansivos são, em geral, argilas que contém um determinado teor de minerais de argilas expansivas, no decorrer do tempo, sofreram dessecação devido a perda da água, rebaixamento do lençol freático e evaporação, ocasionando a tensão intersticial tornando-a negativa em relação a pressão atmosférica.

Conforme Santos (2017), os solos expansivos são aqueles que apresentam variações significativas de volume em resposta a mudanças no teor de umidade. Esse comportamento é geralmente associado à presença de argilas do tipo esmectita, especialmente a montmorilonita, que possui estrutura cristalina capaz de absorver grandes quantidades de água entre suas camadas.

Para Ayala et. al. (1986), o solo é caracterizado como expansivo quando possui duas características específicas, que são as características próprias do solo como sua composição mineralógica, estrutura interna e textura e, as características do ambiente em que o solo está localizado, como o clima, a flora e a intervenção humana. Para Vale (2023), a junção das

características próprias do solo com as características do ambiente torna o solo instável ocasionando a variação volumétrica do solo.

Marinho (2018), destaca cinco principais pontos que caracterizam um solo expansivo, são eles: solos não saturados, solos com minerais argílicos, em especial montmorilonita ou vermiculita, contrações e expansões com aparecimento de superfícies de fricção, solos com drenagem baixa e atividade alta, derivados de rochas ígneas, basicamente, basalto, diabásios e gabros e de rochas sedimentares basicamente: folhelhos, margas e calcários, solos em regiões onde a evapotranspiração excede a precipitação, regiões semiáridas de clima tropical e temperado.

Vilar e Ferreira (2015) discorrem ainda que para que se apresente o potencial expansivo de um solo durante a mudança de umidade são necessárias as mudanças sazonais que se dá em decorrência das variações do clima durante todo o ano, essas oscilações da umidade na superfície do terreno dependem da relação precipitação/evaporação, e as modificações da umidade natural do terreno em decorrência direta da ação do homem.

2.2.1 Expansão dos solos

O comportamento expansivo dos solos está intimamente ligado a presença de determinados tipos de argilominerais no solo, que tendem a sofrer expansão em função do contato com a água. Os argilominerais que frequentemente são chamados de expansivos, são os do tipo 2:1 como a montmorilonita, vermiculita, esmectita e micas (FERREIRA 1995).

A expansividade do solo é um processo complexo e depende de diversas variáveis. Os principais fatores que influenciam a expansão nos solos são a composição mineralógica, umidade, estado de tensões e clima. Este último, desempenha papel importante na intensificação do comportamento expansivo. Regiões semiáridas, como o interior do Rio Grande do Norte, apresentam longos períodos de seca seguidos por chuvas intensas, o que favorece ciclos de umedecimento e secagem no solo. Isso acentua o movimento volumétrico das camadas superficiais, agravando os danos potenciais às construções (OLIVEIRA; LIMA, 2020).

A expansividade apresenta-se através da relação pressão de expansão e a variação volumétrica. A partir disso, é importante ressaltar que obras que estão inseridas nesse contexto, podem estar sujeitas a um conjunto de comportamentos indesejáveis, que são o resultado das pressões de expansão que ocorrem durante o umedecimento, bem como das variações de volumes de solo. Da mesma forma que o solo se expande quando entra em contato com a

umidade, eles se contraem quando estão ressecados e devido a esse processo de expansão/contração, o solo tende a sofrer com fadiga, o que acaba tornando este solo passível de erosão (OLIVEIRA; JESUS; MIRANDA, 2006).

Os fenômenos de expansão resultam de causas normalmente associadas à presença de minerais de natureza expansiva, ocasionando um fenômeno mais complexo, dominado por causas físico-químicas e que, além do aumento de volume, traz consigo outra consequência associada, a tensão de expansão. Nesses solos, pode ocorrer aumento de volume pelo umedecimento e posterior redução por secagem, fenômeno que tende a se repetir ciclicamente por variações sazonais de umidade ou de sucção do solo num comportamento que se assemelha ao abrir e fechar o fole de uma sanfona.

Os solos expansivos são não saturados que contêm argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1, como as montmorilonitas e as vermiculitas. Assim, tais solos podem estar associados a qualquer rocha cuja decomposição enseja a formação de argilominerais expansivos, como é o caso de rochas ígneas básicas, tais como os basaltos, diabásios e gabros onde a decomposição do piroxênio e do feldspato possibilita a formação de montmorilonita. Por outro lado, certas formações, como as sedimentares, que permitem a acumulação de diferentes componentes, também dão origem a solos expansivos, como é o caso de folhelhos, margas e calcários, podendo-se encontrá-los, ainda, em solos formados a partir de rochas metamórficas (VILAR E FERREIRA, 2015).

Os autores afirmam ainda que a preservação dos minerais expansivos se deve à formação desses solos em regiões semiáridas de clima tropical e mesmo temperado, onde, comumente, a evapotranspiração excede a precipitação. Algumas características predominantes são indicativas da ocorrência de solos que experimentam variação de volume quando inundados.

2.2.2 Fatores que influenciam na expansão

Segundo Ataíde (2017), a capacidade de expansão do solo resulta de diversos fatores e uma série de combinações de eventos. Os fatores que possibilitam o desencadeamento dos processos de expansão são a densidade seca, a estrutura do solo, mineralogia das argilas, a plasticidade, a química da água presente no solo e a sucção. A Tabela 1 apresenta detalhadamente as características de cada fator citado acima.

Tabela 1: Fatores que ocasionam o processo de expansão do solo

DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICA
Densidade seca	onde existe uma elevada densidade usual em que há indícios de espaçamento menores entre as partículas (MORAIS, 2017).
Estrutura do solo	no caso das argilas floculadas podem apresentar maior poder de expansão em comparação com as argilas dispersas, além disso, a sua estrutura e textura são alteradas com a compactação e apresentam maior teor de umidade ou remoldagem;
mineralogia das argilas	os argilominerais que venham a causar variações no seu volume no solo são as montmorilonitas, vermiculitas e algumas camadas mistas de minerais (PAIVA, 2016).
plasticidade	os solos que exibem comportamentos plásticos sobre grandes quantidades e variações de umidade, apresentam alto limite de liquidez (ATAÍDE, 2017).
química da água presente no solo	Os cátions de Mg^{2+} na presença da água no solo tem como resultado uma menor expansão de cátions de Na^{+} (ATAÍDE, 2017).
sucção	Capacidade do solo de absorver ou reter água. Tem relação direta com o grau de saturação, tamanho e forma dos poros, características químicas e elétricas das partículas do solo e água, gravidade e a tensão superficial. (BARBOSA, 2019).

FONTE: Ataíde (2017)

Para Paiva (2016), algumas situações específicas também contribuem para a ocorrência dos processos de expansão, como a presença de água do subsolo – lençóis rasos de água são uma grande fonte de umidade para o solo e lençóis de água superficiais ajudam na elevação do nível de umidade; o carregamento – uma grandeza de sobrecarga que quando aplicada, influi quantitativamente na mudança de volume que venha a ocorrer em relação ao teor de umidade e densidade; e o clima – a quantidade de precipitações, suas variações e a evapotranspiração que ocorrem durante todo ano, tem fortes influências na umidade e perfil do solo da região.

Também são consideradas situações específicas causadoras de expansão nos solos, as condições de umidade inicial – é possível observar que de acordo com a menor umidade encontrada no solo, maior será a sua capacidade de absorver água e de se expandir; a drenagem e fontes de águas superficiais; o perfil do solo – de acordo com a espessura e a posição de cada camada que tem potencial expansiva, pode influenciar de forma considerável a movimentação do solo; a permeabilidade; a história de tensões – quando um solo é sobreadensado, ele vem a ser mais expansivo que outro com o mesmo índice de vazios; as variações de umidade – quando essas variações ocorrem na parte superior do perfil de solo próximo a zona ativa, definem bem um dos principais fatores de levantamento das estruturas; e a vegetação – a presença de árvores,

arbustos e gramas na região onde se encontram os solos expansivos, podem interferir de forma direta na capacidade expansiva destes solos (PAIVA, 2016).

2.2.3 Critérios de identificação dos solos expansivos

A caracterização desses solos geralmente envolve a análise de suas propriedades físicas e químicas, como granulometria, limites de Atterberg, peso específico, teor de umidade natural e, principalmente, ensaios específicos de expansão. Dentre esses, o método direto — também chamado de ensaio de expansão livre — é amplamente utilizado por simular de forma prática o comportamento do solo ao ser submerso em água, sem carga aplicada (ABNT NBR 12007, 1990).

Segundo Ferreira (2023), a identificação visual desses solos em campo não é fácil. Índices tradicionais utilizados para caracterizar os solos, como SPT, a granulometria, índices de consistência, não são capazes de identificar com exatidão se um solo é colapsível ou expansivo.

Diversos pesquisadores, com o objetivo de determinar a suscetibilidade da expansibilidade de um solo definiram certos critérios para identificar este comportamento. Os métodos são divididos em dois grandes grupos: métodos diretos e indiretos. Os métodos indiretos são aqueles que se utilizam dos índices físicos e limites de consistência ou parâmetros ligados à textura de simples obtenção em ensaios de laboratório e campo para indicar a potencialidade de expansão. Os métodos diretos baseiam-se na medida do potencial de expansão do solo avaliado pelos ensaios edométricos, de placa ou com o expansocolapsômetro. A Tabela 2 compilada por Schreiner (1987) e Ferreira (1995) mostra vários métodos de identificação de solos expansivos.

Tabela 2: Métodos de identificação de solos expansivos

Métodos	Subdivisões	Critério	Referência
INDIRETOS	Identificativos	Difração e raio-X, Microscopia eletrônica de varredura, Análise termogravimétrica e Adsorção de etilenoglicol e glicerina	Ayala <i>et al.</i> (1986)
		Físico-químico	Fink <i>et al.</i> (1971)
	Orientativos	Granulometria, Consistência e Índices físicos e Classificação Geotécnica	Prikonskij (1952), Skempom (1953), Seed <i>et al.</i> (1962), Van Der Merwe (1964), Chen (1965), Vijayvervia e Ghazzaly (1973), Rodriguez Ortiz (1975), Cuellar (1978). Daksanamurthy e Raman (1973).
		Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Identificação visual.	Patrick e Snethen (1976), Ayala <i>et al.</i> (1986), Ferreira (1990c e 1993a).
DIRETOS	Avaliativos	Ensaio de Expansão de Lambe	Lambe (1960).
	Quantitativos	Expansão Livre e Tensão de Expansão, Ensaios Edométricos Duplos e Simples, placa, Expansímetro	Seed <i>et al.</i> (1962), Chen (1965), Vijayverviya e Ghazzaly (1973), Rodriguez Ortiz (1975), Cuellar (1978), Jimenez Salas (1980).
		Ensaios Edométricos de Sucção controlada	Escario (1967 e 1969), Aitchison <i>et al.</i> (1973), Johnson (1978), McKeen (1980).

Fonte: (Schreiner, 1987; Ferreira, 1995).

Os solos expansivos podem ser classificados quanto aos limites de consistência e quanto a expansão e tensão de expansão. Na Tabela 3 pode ser identificado o grau de expansão relacionada ao Limite de Liquidez (LL) e ao Índice de Plasticidade (IP).

Tabela 3: Classificações do grau de expansão relacionada aos limites de consistência

Grau de Expansão	Chen (1965)	Seed <i>et al.</i> (1962)	Daksanamurthy & Raman (1973)
Muito Alto	$LL > 60$	$IP > 35$	$LL > 70$
Alto	$40 < LL \leq 60$	$20 < IP \leq 35$	$50 < LL \leq 70$
Médio	$30 \leq LL \leq 40$	$10 \leq IP \leq 20$	$35 < LL \leq 50$
Baixo	$LL < 30$	< 10	$20 \leq LL \leq 35$

Fonte: Ferreira (2023).

Os ensaios de expansão livre medem a variação de espessura da amostra, fazendo-se uma relação entre a sua altura inicial e final, quando é colocada dentro de um recipiente com água. A expansão livre (El) é determinada em percentual após a sua estabilização. Alguns métodos utilizam pequenas sobrecargas antes da inundação.

A percentagem de expansão “livre” pode ser encontrada de acordo com a Equação 1.

$$EI(\%) = \frac{\Delta H}{H} * 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

El = expansão “livre”, em percentagem;

ΔH = altura da expansão devido à saturação;

H = altura do corpo de prova antes da inundação

Na Tabela 4, apresenta-se os critérios de classificação de solos expansivos com base na expansão livre e tensão de expansão, isto é, à tensão que o solo exerce durante o processo de expansão.

Tabela 4: Critérios de classificação de solos expansivos com base na expansão livre e tensão de expansão.

Critério de Seed <i>et al.</i> (1962)	Critério de Vijayvergiya & Ghazzaly (1973)	Grau de Expansibilidade
Expansão livre (%) para tensão de sobrecarga 7 kPa	Expansão livre (%) para tensão de sobrecarga 10 kPa	Tensão de expansão (kPa)
0-1	< 1	< 30
1-5	1 - 4	< 30 – 120
5 - 25	4 - 10	120 – 300
> 25	> 10	> 300
		Baixa Média Alta Muito alta

Fonte: Ferreira (2023).

Segundo Das (2013), o índice de expansão é uma das principais variáveis a ser observada para a classificação do potencial expansivo de um solo. Valores elevados indicam a necessidade de adoção de técnicas de melhoria ou substituição do solo, a fim de garantir a estabilidade da estrutura.

Nos estudos realizados em solos do município de Paulista-PE, Paiva et al. (2016) identificaram comportamento altamente expansivo em solo natural, sendo possível reduzir a expansão a níveis nulos com a adição de 5% de cal hidratada. Embora o solo de Angicos não tenha sido tratado com estabilizantes neste trabalho, a comparação sugere que tratamentos similares podem ser eficazes para reduzir sua expansividade.

Ferreira et al. (2017) reforçam que a expansão volumétrica dos solos pode causar danos significativos às estruturas e que a adição de cal é uma técnica eficiente de estabilização, pois atua na flocculação das partículas argilosas e redução do índice de plasticidade. Essa abordagem é especialmente relevante para a região de Angicos, onde edificações como a Biblioteca da UFERSA já apresentam manifestações patológicas, evidenciando a necessidade de intervenções preventivas ou corretivas.

O solo estudado foi, anteriormente, analisado por Vale (2023) onde foi realizada a caracterização física do solo, no qual os resultados indicaram um limite de liquidez de 29%, limite de plasticidade de 20% e índice de plasticidade de 9%, classificando o solo como de baixa plasticidade segundo a carta de Casagrande. A massa específica dos grãos foi determinada em 2,70 g/cm³. A análise granulométrica revelou que o solo possui 48% de fração fina, sendo composto por 31% de partículas argilosas e 17% de silte. Esses dados corroboram a identificação de um solo com comportamento potencialmente expansivo, apesar do grau de expansividade ter sido classificado como médio nos métodos indiretos.

3 METODOLOGIA

Neste segmento, serão discutidos os recursos empregados na pesquisa, bem como a abordagem metodológica utilizada.

3.1 Local da coleta do bloco indeformado

O solo estudado localiza-se ao lado da Biblioteca da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – BCA – UFERSA (Figura 2), que fica localizada na cidade de Angicos, no Estado do Rio Grande do Norte (Figura 1).

Figura 1: Localização do município em que foi realizada a coleta da amostra de solo



Fonte: IBGE (2024).

Figura 2: Local da coleta da amostra de solo



Fonte: Adaptado Google Earth (2025).

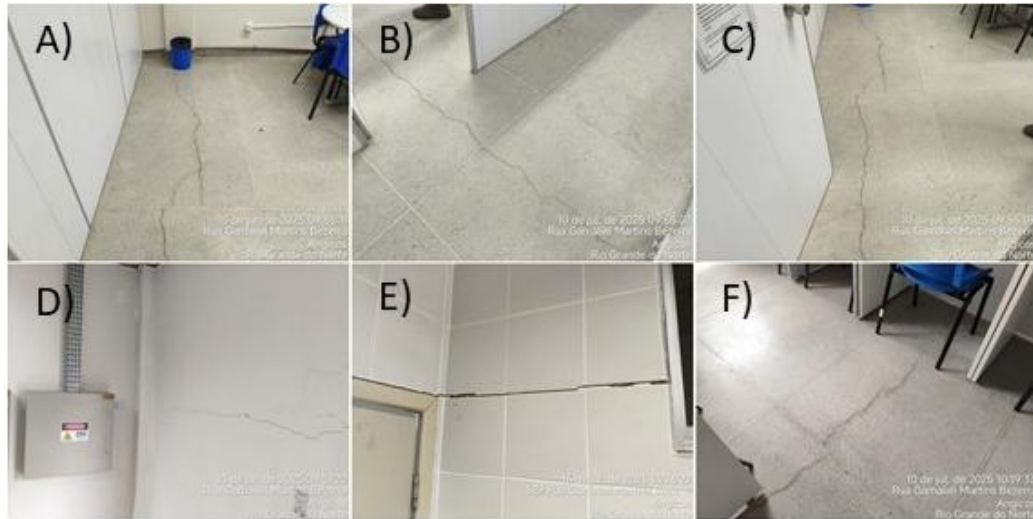
3.2 Aspectos geológicos

A litologia de Angicos, RN, é caracterizada pela predominância de solos desenvolvidos sobre rochas do embasamento cristalino, com destaque para a Formação Açú, composta por arenitos, folhelhos e argilitos. Além disso, a região possui áreas com latossolos e solos brunos não cálcicos ou luvisolos, geralmente cobertos pela vegetação da Caatinga.

3.3 Coleta do bloco indeformado

O surgimento de patologias em vários locais da estrutura da biblioteca (Figura 3) provocou a necessidade de estudar o solo local, com o objetivo de analisar a susceptibilidade a expansão do solo.

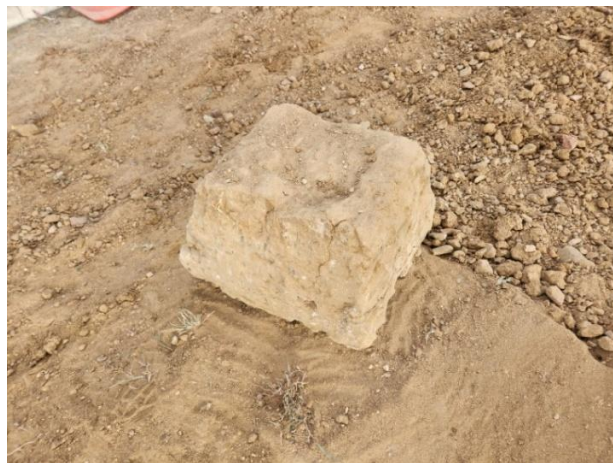
Figura 3: Patologias na estrutura na biblioteca: a) sala de estudos coletivo; b) corredor das salas; c) sala de estudos coletivo; d) parede da sala dos livros; e) parede do banheiro masculino; f) sala de estudos individual;



Fonte: Autoria própria (2025).

O estudo desenvolveu-se em duas etapas. Na primeira, em campo, foi realizado a coleta, seguindo orientações da ABNT, de um bloco indeformado, que é uma amostra colhida de forma a preservar suas propriedades e estrutura originais, como se estivesse "in situ". O processo envolve a escavação cuidadosa de um bloco de solo, com suas faces superior e inferior devidamente marcadas, e a sua proteção com materiais como plástico filme e papel alumínio para evitar perdas de umidade e alterações na estrutura (Figura 4).

Figura 4: Coleta do bloco indeformado



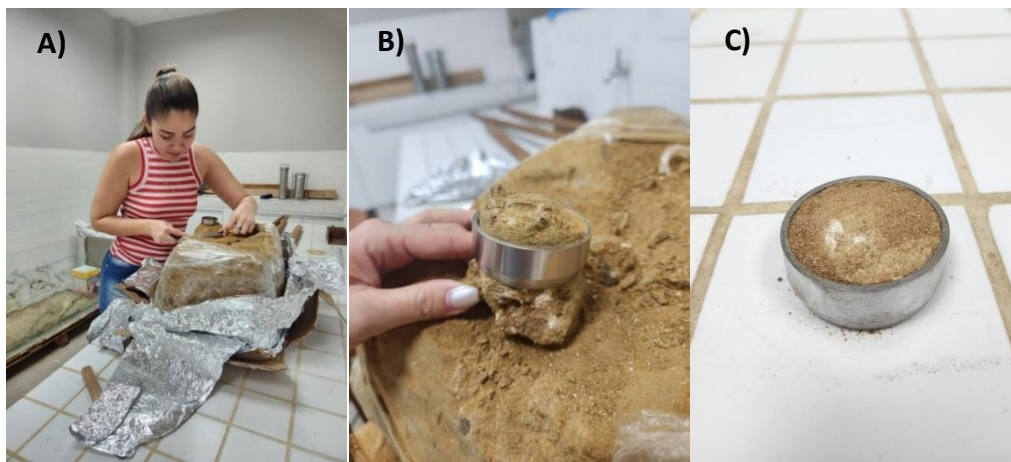
Fonte: Autoria própria (2025).

3.4 Ensaio de expansão livre

Na segunda etapa, em laboratório, foram moldados os corpos-de-prova destinados aos ensaios de expansão livre. Inicialmente, foi retirada a umidade do solo natural.

O corpo de prova é moldado em um anel metálico com dimensões 50,68 mm x 20,44 mm, com auxílio de espátula, serra e serrote, cautelosamente, para não causar danos ao material, como apresentado na Figura 5.

Figura 5: Processo de moldagem do corpo-de-prova: a) início do processo de moldagem; b) moldagem do corpo-de-prova em andamento; c) Corpo-de-prova moldado no anel metálico.



Após a moldagem dos corpos-de-prova, foi dado início aos ensaios de expansão livre. Primeiro, foi realizado o ensaio com sobrecarga de 0,5 kPa e posteriormente o ensaio com sobrecarga de 1 kPa. Neste trabalho, o corpo-de-prova foi colocado em um sistema adaptado para medir a expansão do solo, pois não foi possível utilizar a célula de adensamento em conjunto com a prensa (Figura 6).

Figura 6: Ensaio de expansão livre em andamento



Fonte: Autoria própria (2025).

O sistema utilizado neste trabalho consiste de um prato metálico, no qual foi posicionada internamente uma pedra porosa seguido do corpo-de-prova (anel + solo) e outra pedra porosa no topo. Acima do corpo de prova foi colocada a sobrecarga. No ensaio 1, a sobrecarga foi composta pelo próprio cabeçote, utilizado para apoiar a ponta do relógio comparador. No ensaio 2, foi colocado abaixo do cabeçote discos metálicos para atingir a sobrecarga desejada, como mostra os dados da tabela 5.

Tabela 5: Dados para os ensaios

		ENSAIO 1	ENSAIO 2
Sobrecarga	g	99,5	998,8
	kPa	0,5	1
Área de seção transversal do anel	cm²	20,17	20,17
Diâmetro	cm	5,068	5,068
Massa	g	73,53	78,11
Altura	cm	2,044	2,044

Fonte: Autoria própria (2025).

Para medição da expansão foi usado um relógio comparador com curso total de 30mm e precisão de 0,01 mm, fixado em um suporte metálico.

Após a montagem do ensaio, foi feita a inundação do corpo-de-prova e realizadas leituras de expansão após 8", 15", 30", 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h, 24h e 48h.

3.5 Caracterização física

Foi utilizada a caracterização física realizada por Vale (2023). Os ensaios seguiram as normas da ABNT, sendo aplicadas a NBR 6459:1984 para determinação do limite de liquidez, a NBR 7180:1984 para o limite de plasticidade, a NBR 6508:1984 para a massa específica dos grãos e a NBR 7181:1984 para a análise granulométrica.

4 RESULTADOS

A partir dos ensaios realizados, foi possível observar o comportamento expansivo do solo de Angicos/RN frente à variação da umidade em duas condições distintas de carga vertical: 0,5 kPa e 1,0 kPa. Os dados obtidos permitiram a análise do deslocamento vertical ao longo do tempo, além da determinação da expansão percentual em cada condição de ensaio.

A investigação foi comparada com o estudo de Vale (2023), que avaliou o mesmo solo utilizando métodos indiretos. Naquele estudo, os ensaios de caracterização física indicaram um solo com 48% de fração fina, 31% de argila e 17% de silte, índice de plasticidade de 9% e massa específica de 2,70 g/cm³, classificando-o como de grau médio de expansividade. No entanto, como destacado pelo próprio autor, os métodos indiretos não são conclusivos, o que justifica a aplicação do método direto neste trabalho como meio de confirmação e aprofundamento da análise.

A Tabela 6 apresenta os resultados dos índices físicos antes e após a realização dos ensaios 1 e 2. A saturação do solo pode ser comprovada pelo aumento da umidade e grau de saturação. Já o aumento do índice de vazios e porosidade representa a ocorrência da expansão do corpo-de-prova durante o processo de saturação.

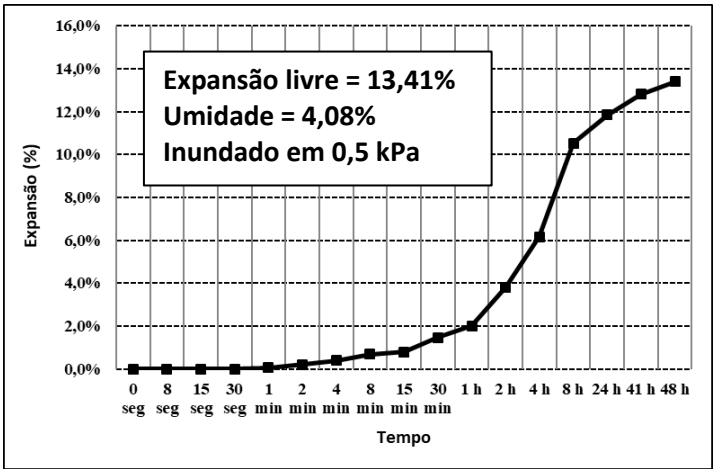
Tabela 6: Índices físicos antes e depois dos ensaios

Índices físicos	Antes do ensaio		Após o ensaio	
	ENSAIO 1	ENSAIO 2	ENSAIO 1	ENSAIO 2
W (%)	4,05	3,37	23,74	24,38
γ_s (g/cm ³)	2,65	2,65	2,65	2,65
γ (g/cm ³)	1,86	1,96	1,95	2,13
γ_d (g/cm ³)	1,79	1,9	1,58	1,71
e	0,48	0,4	0,68	0,55
n (%)	32,4	28,6	40,5	35,5
Sr (%)	22,4	22,3	92,5	97,5

Fonte: Autoria própria (2025).

As Tabelas 7 e 8 apresentam a variação da expansão do solo em função do tempo. Foi verificado um aumento volumétrico progressivo do solo, seguido de uma tendência de estabilização. Após 48h, foi verificado um resultado de expansão livre de 13,41% para o

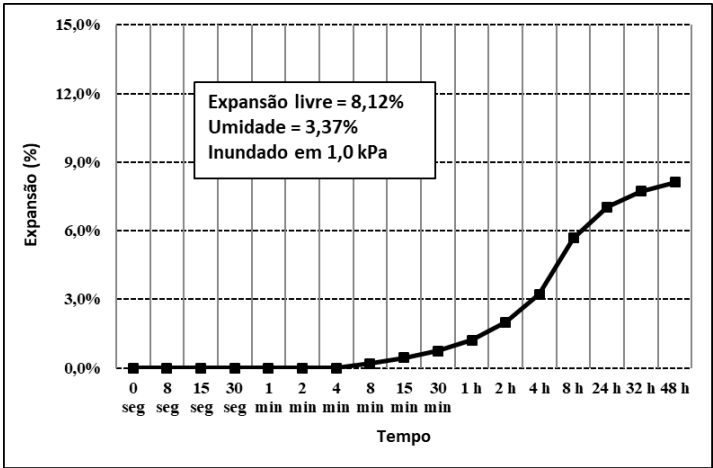
Ensaio 1 e de 8,12% para o Ensaio 2Tabela 07: Comportamento do solo no Ensaio 1 (sobrecarga igual a 0,50kPa)



Fonte: Autoria própria (2025).

Isso confirma o que é amplamente relatado na literatura (Oliveira; Lima, 2020; Ferreira, 1995): a aplicação de tensões verticais tende a restringir o potencial de expansão dos solos devido à limitação das forças de repulsão entre as partículas argilosas.

Tabela 08: Comportamento do solo no Ensaio 2 (sobrecarga igual a 1,00kPa)

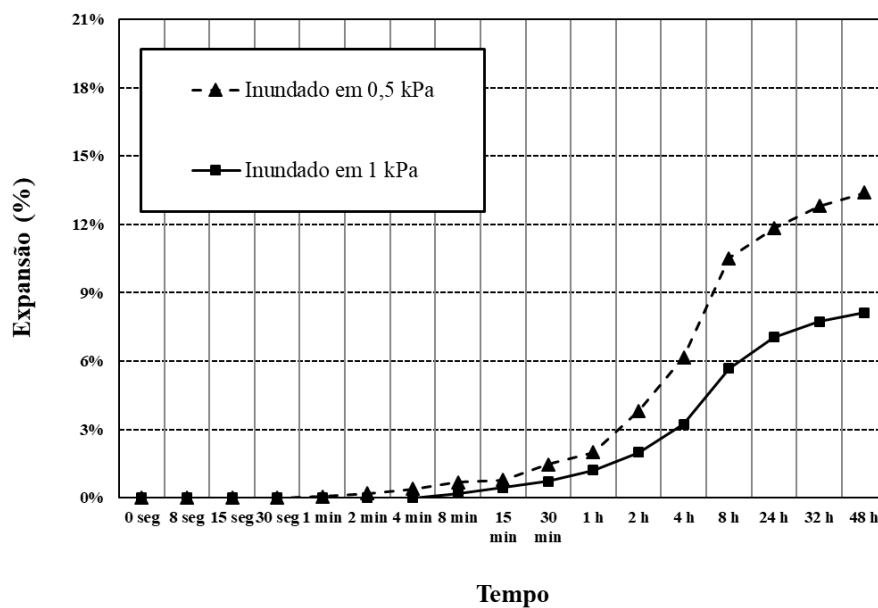


Fonte: Autoria própria (2025).

A Tabela 6, anteriormente apresentada, mostra a comparação direta entre os dois ensaios, revelando a redução da expansão absoluta e relativa sob a maior carga vertical. Essa diferença reforça o entendimento de que a tensão de confinamento exerce influência significativa na resposta volumétrica dos solos expansivos, tal como afirmado por Ataíde (2017) e Das (2013).

As tabelas geradas com os dados dos ensaios permitem visualizar claramente a relação entre tempo de imersão e deformação vertical acumulada. Em ambos os casos, o maior índice de expansão ocorre nas primeiras horas (Tabela 9), comportamento característico dos solos com presença de argilominerais do tipo 2:1, como a montmorilonita, conforme descrito por Santos (2017) e Marinho (2018).

Tabela 09: Comportamento do solo nos ensaios 1 e 2



Fonte: Autoria própria (2025)

Com os ensaios realizados, obteve-se dados de deslocamento em função do tempo dos dois corpos de provas. Podendo assim, analisar através de tabelas e baseado na bibliografia o comportamento desse solo.

As tabelas, mostram as condições iniciais da amostra, o comportamento do solo ao longo do tempo após ser submerso, a medição da expansão com extensômetro e o cálculo da expansão absoluta e percentual.

Pode-se observar ainda que, mesmo com a aplicação de carga vertical (1kPa), o solo ainda apresentou expansão significativa, embora menor do que no ensaio 1, que foi realizado com apenas 0,50 kPa (Tabela 7).

Tabela 10: Comparação dos ensaios

Ensaio	Pressão aplicada	Expansão (mm)	Expansão (%)
Ensaio 1	0,50 kPa	2,74	13,41
Ensaio 2	1,00 kPa	1,66	8,12

Fonte: Autoria própria (2025).

A aplicação de carga reduziu o grau de expansão vertical, o que é esperado em solos expansivos. Isso mostra a influência da tensão de confinamento no comportamento volumétrico do solo.

Os resultados obtidos neste estudo indicaram que o solo da região de Angicos/RN apresenta suscetibilidade média a elevada à expansão, de acordo com o método de expansão livre. Este comportamento está associado à presença de minerais do grupo das esmectitas, especialmente a montmorilonita, conforme já indicado por Ferreira et al. (2009) como principal agente de instabilidade volumétrica nos Vertissolos do semiárido.

Em comparação ao estudo de Vale (2023), que utilizou métodos indiretos para avaliar um solo da mesma localidade, os resultados aqui obtidos pelo método direto corroboram a classificação de grau médio de expansividade sugerida naquele trabalho. No entanto, ao usar o ensaio de expansão livre foi possível verificar de maneira direta a expansão, o que reforça a importância de se utilizar metodologias diretas na caracterização de solos potencialmente expansivos.

Por fim, os resultados obtidos neste trabalho também convergem com as observações de Ferreira e Ferreira (2009), que destacaram a influência do teor de umidade inicial e da trajetória de tensão aplicada sobre o comportamento volumétrico dos solos. A variação do volume depende não apenas das características mineralógicas, mas também das condições hidromecânicas às quais o solo é submetido.

Dessa forma, a análise comparativa evidencia a importância do reconhecimento e tratamento dos solos expansivos no contexto da engenharia civil, particularmente em regiões semiáridas como Angicos/RN.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação realizada permitiu avaliar a suscetibilidade à expansão de um solo da cidade de Angicos/RN por meio do método direto de ensaio de expansão livre. Os resultados obtidos evidenciaram que o solo analisado apresenta comportamento expansivo relevante, com variações volumétricas expressivas em função do contato com a água. Esse comportamento reforça a hipótese de que a presença de argilominerais do tipo esmectita, principalmente montmorilonita, é um fator determinante na instabilidade volumétrica observada.

A manifestação de patologias estruturais nas imediações da área de estudo, como observado na Biblioteca da UFERSA, corrobora os resultados laboratoriais, indicando a importância da caracterização geotécnica para a prevenção de danos em edificações construídas sobre esse tipo de solo.

A comparação com outros estudos da literatura reforça a validade dos resultados obtidos. O trabalho de Vale (2023), por exemplo, utilizando métodos indiretos, classificou o solo da mesma região com grau médio de expansividade, resultado que foi ratificado pelos métodos diretos aplicados neste estudo. Já os estudos desenvolvidos em solos do município de Paulista-PE (FERREIRA et al., 2017; PAIVA et al., 2016) demonstraram que a adição de cal hidratada pode ser uma alternativa eficaz na estabilização de solos com comportamento similar ao estudado, abrindo possibilidades futuras de aplicação dessa técnica em Angicos/RN.

Conclui-se, portanto, que o solo analisado apresenta risco potencial à estabilidade de obras civis se não forem adotadas medidas de reconhecimento e tratamento adequadas. Recomenda-se, com base nos achados deste trabalho, que projetos de fundações e infraestrutura na região considerem os efeitos da expansão volumétrica, adotando técnicas preventivas como rebaixamento da umidade natural do solo, aplicação de camadas drenantes ou estabilização química com agentes como por exemplo a cal, areia ou cinza da casca do arroz.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
 NBR 6459:1984 – *Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 1984a.
 _____. NBR 7180:1984 – *Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 1984b.
 _____. NBR 6508:1984 – *Determinação da massa específica dos grãos*. Rio de Janeiro, 1984c.
 _____. NBR 7181:1984 – *Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984d.
 _____. NBR 12007:1990 – *Solo – Determinação do índice de expansão*. Rio de Janeiro, 1990.

ALBUQUERQUE, E. D. A.; et al. Caracterização da expansividade de um solo natural e tratado com cal do município de Paulista-PE. In: ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ENGENHARIA – REPAE, 2021, Recife. *Anais...* Recife: UPE, 2021.

AMORIM, S. F. Contribuição à cartografia geotécnica: sistema de informações geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do Estado de Pernambuco (SIGSEC-PE). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

ATAÍDE, S. O. F. Estudo da influência do teor de umidade no comportamento mecânico de um solo com características expansivas do semiárido pernambucano. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

ARAÚJO, A. G. D. Análise do processo de fissuras e do comportamento de estacas granulares ancoradas submetidas a secagem e umedecimento em solos expansivos. Seminário de Qualificação de Doutorado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BARBOSA, F. A. S. Análise do comportamento hidromecânico e da dinâmica de fissuração de um solo expansivo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BASTOS, E. G. Variação volumétrica de uma argila expansiva do litoral norte de Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1994.

CAPUTO, H. P. *Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. v. 1.

CASAGRANDE, A. The structure of clay and its importance in foundation engineering. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, v. 19, p. 168-209, 1932.

CASTRO, F. J. C. O. Um estudo físico-químico matemático de estabilização alcalina de solos argilosos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1981.

CHEN, F. H. *Foundations on expansive soils*. New York: Elsevier, 1998.

DAS, B. M. *Princípios de engenharia de fundações*. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

DELGADO, A. Influencia de la trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno. Tese (Doutorado) – Universidad de Sevilla, Sevilla, 1986.

FERREIRA, S. R. M. Colapso e expansão em solos naturais devido à inundação. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, A. S.; et al. Caracterização da expansividade de um solo natural e tratado com cal do município de Paulista-PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2017. *Anais...*

FERREIRA, S. R. M. Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6., 2008, Salvador. *Anais...* Salvador: EDUFBA, v. 2, p. 593-619, 2008.

FERREIRA, A. S.; FERREIRA, M. R. Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um Vertissolo no semiárido de Pernambuco. *Revista de Geociências*, v. 29, n. 3, p. 21-34, 2009.

GENS, A.; ALONSO, E. E. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 29, n. 6, p. 1013-1032, 1992.