

MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Gilson Gabriel Teixeira Varela

Doutorando do Programa de Pós-graduação em engenharia civil e ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, eng.gabriel.tex@gmail.com

Pedro Raimundo

Mestrando do Programa de Pós-graduação em engenharia civil e ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, engpejota@gmail.com

Alisson do Nascimento Lima

Doutorando no Programa de Pós-graduação em engenharia civil e ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, alissonnascimentolim@gmail.com

Carina Silvani

Professora na Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, carinasilvani@gmail.com

RESUMO: Solos expansivos são solos problemáticos que representam um desafio para obras de infraestrutura na construção civil. Esses solos podem apresentar fissuras durante estações secas e expandir-se nas estações úmidas, causando problemas técnicos em infraestruturas como pavimentos rodoviários, aterros, fundações, entre outros. Esses solos são comuns em zonas áridas e semiáridas que favorecem a formação de argilominerais instáveis. Com o intuito de entender a situação dos solos expansivos no Brasil, uma revisão sistemática da literatura foi conduzida, revelando uma falta de pesquisas voltadas para a problemática. A revisão não encontrou concordância entre os resultados de métodos qualitativos e quantitativos, destacando uma inconsistência na classificação desses solos. A análise dos estudos mostrou que os solos expansivos geralmente têm alto teor de grãos finos, sendo classificados como altamente plásticos, embora com fração de argila inativa em alguns casos. A expansão média e a pressão de expansão variaram consideravelmente entre as amostras estudadas, indicando uma grande variabilidade nos parâmetros usados para classificação. Esses resultados ressaltam a necessidade de mais pesquisas e uma abordagem mais uniforme na compreensão e manejo dos solos expansivos.

PALAVRAS-CHAVE: Argilas expansivas, pressão de expansão, argilominerais, variação volumétrica, revisão sistemática da literatura

ABSTRACT: Expansive soils are problematic soils that represent a challenge for infrastructure works in civil construction. These soils can show fissures during dry seasons and expand during wet seasons, causing technical issues in infrastructures such as road pavements, embankments, foundations, and others. These soils are common in arid and semi-arid zones that favor the formation of unstable clay minerals. To understand the situation of expansive soils in Brazil, a systematic literature review was conducted, revealing a lack of research focused on this issue. The review did not find agreement between the results of qualitative and quantitative methods, highlighting an inconsistency in the classification of these soils. The analysis of the studies showed that expansive soils generally have a high content of fine grains, being classified as highly plastic, although with an inactive clay fraction in some cases. The average expansion and expansion pressure varied considerably among the studied samples, indicating great variability in the parameters used for classification. These results underscore the need for more research and a more uniform approach to understanding and managing expansive soils.

KEYWORDS: Expansive clays, expansion pressure, clay minerals, volumetric variation, systematic literature review

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, a mecânica dos solos clássica desenvolveu princípios para descrever o comportamento dos solos. No entanto, esses princípios foram inicialmente estabelecidos considerando o comportamento de solos saturados. Segundo Carvalho et al. (2015), existem solos em condição não saturada que apresentam comportamento mecânico e propriedades físico-químicas diferentes das convencionais. As condições de formação e evolução desses solos ao longo do tempo mostram que é necessário um conceito diferente do utilizado na mecânica dos solos clássica.

A Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS, 2004) destaca esforços recentes para compreender o comportamento de solos não saturados, visando melhorar e aperfeiçoar projetos e construções. Entre esses solos, estão aqueles classificados como solos expansivos, que apresentam variações volumétricas excessivas com o aumento da umidade e retrações drásticas na sua redução, resultando em efeitos prejudiciais nas obras construídas sobre eles ou nas proximidades.

Os solos expansivos originam-se da decomposição de rochas ígneas básicas, como basaltos e diabásios, que permitem o surgimento de argilominerais de estrutura laminar 2:1. Rochas sedimentares e metamórficas também podem promover o surgimento de solos expansivos por meio do intemperismo (Tenório, 2018). A estrutura laminar desses argilominerais instáveis é composta por duas folhas tetraédricas ($\text{Si}(\text{OH})_4$) e uma folha central octaédrica ($\text{Al}_2(\text{OH})_6$) ou ($\text{Mg}_3(\text{OH})_6$), apresentando um comportamento diferenciado na presença de água.

Solos com comportamento expansivo têm sido identificados em todo o mundo, com maior frequência em zonas áridas e semiáridas, onde a variação de umidade é grande e a evaporação excede a precipitação. O comportamento expansivo está associado a dois fatores: extrínseco (climatologia, hidrogeologia, vegetação e ocupação humana) e intrínseco (composição mineralógica, textura e estrutura do solo) (Moraes, 2017).

Devido ao ciclo de expansão e contração, solos expansivos têm representado um problema para obras de engenharia em geral, especialmente obras rodoviárias, onde a instabilidade volumétrica provoca diversos danos à pista de rolamento e aos taludes de corte e aterro. Isso contribui para a redução do nível de segurança e conforto, além de demandar manutenção frequente e maiores investimentos.

Nesse contexto, a revisão sistemática possibilita conectar informações de várias fontes científicas e elaborar um mapeamento de locais com ocorrência de solos expansivos no Brasil. Isso contribui para o melhor entendimento dos fatores que influenciam o fenômeno da expansividade desses solos. Os resultados dessa revisão podem ser usados como indicativo da existência de solos expansivos e suas particularidades, auxiliando na identificação de áreas que requerem intervenções para garantir a execução adequada de obras.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa, recorreu-se ao método de revisão sistemática da literatura, que é um estudo secundário que tem nos estudos primários sua fonte de dados. Neste método, faz-se uso de bancos de dados da literatura que tratam sobre a questão em pauta como fonte e métodos de identificação, seleção e análises sistemáticas, com o objetivo de realizar uma revisão crítica e abrangente da literatura.

O processo de desenvolvimento da revisão foi feito seguindo o modelo de Ferenhof e Fernandes (2016) – Método SystematicSearchFlow (SSF). O método é composto por quatro fases e oito atividades. A base de dados utilizada foi o Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, e as palavras-chave aplicadas foram: “solo expansivo”, “argila expansiva”, “pressão de expansão” e “variação volumétrica do solo”. É importante salientar que entre os resultados obtidos constam obras sem autorização de acesso e anteriores à plataforma Sucupira. Esses dois fatores constituíram um empecilho, impedindo a análise de todos os trabalhos que constavam na plataforma. Nessas circunstâncias, foram selecionados 26 trabalhos acadêmicos, e desses foram mantidos 18 após a leitura dos resumos, pois apesar de apresentarem as palavras-chave, o assunto abordado por eles não se encaixava na temática da investigação.

3 RESULTADOS

3.1 Locais no Brasil que foram identificados com solos expansivos

No universo das bibliografias utilizadas no desenvolvimento desta revisão sistemática, os solos mais estudados foram os de Pernambuco, e dentre os solos de Pernambuco, o solo da localidade de Paulista/PE apareceu com mais frequência nos estudos desenvolvidos. Conforme mostrado na Figura 1, 40% dos trabalhos abordam esse solo. Em sequência, tem-se o solo de Ipojuca/PE com 15% e Cabrobó/PE com 10%.

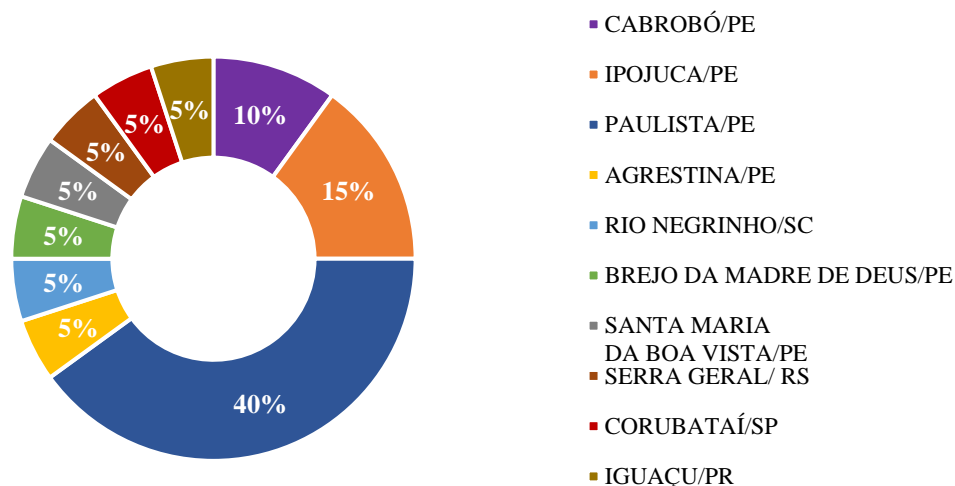


Figura 1: Percentual de estudos desenvolvido por localidade

Curiosamente, das regiões que fazem parte do semiárido brasileiro, cujo clima, segundo Paiva (2016), é propício para a formação de solos expansivos, somente amostras de regiões do estado de Pernambuco foram usadas como objeto de estudo. As outras regiões estudadas são dos estados de São Paulo, Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul, regiões essas que não fazem parte do semiárido brasileiro.

3.2 Método de Identificação de solos expansivos

Entre os métodos de identificação, destacam-se os métodos diretos quantitativos e os indiretos qualitativos.

3.2.1 Métodos diretos – quantitativos

Na Figura 2, são apresentados os métodos diretos quantitativos utilizados nas pesquisas estudadas e suas respectivas percentagens de uso. É importante destacar que vários trabalhos utilizaram mais de um método de classificação.

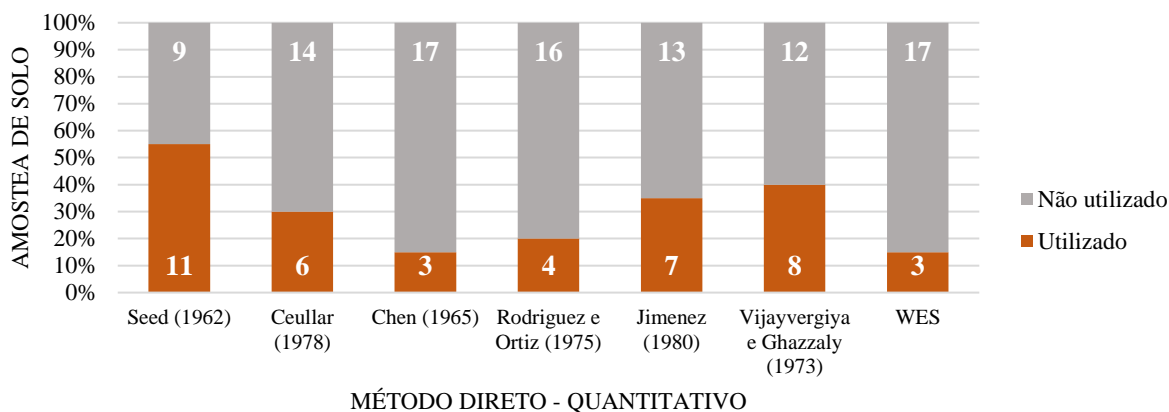


Figura 2: Métodos diretos quantitativos usados nas diferentes amostras estudadas

Os métodos diretos quantitativos mais utilizados são o método de Seed (1962), o método de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), o método de Jimenez (1980) e o método de Ceullar (1978), usados por 55%, 40%, 35% e 30% dos autores, respectivamente. Os métodos menos utilizados são o método de Rodriguez e Ortiz (1975), empregado em pelo menos 20% dos trabalhos, o método de Chen (1965) e o método de WES, utilizado por apenas 15% dos autores.

3.2.2 Métodos indiretos – qualitativos

Na Figura 3, destaca-se a frequência de uso dos métodos indiretos qualitativos nas pesquisas estudadas. Novamente, é importante ressaltar que algumas pesquisas utilizaram mais de uma metodologia.

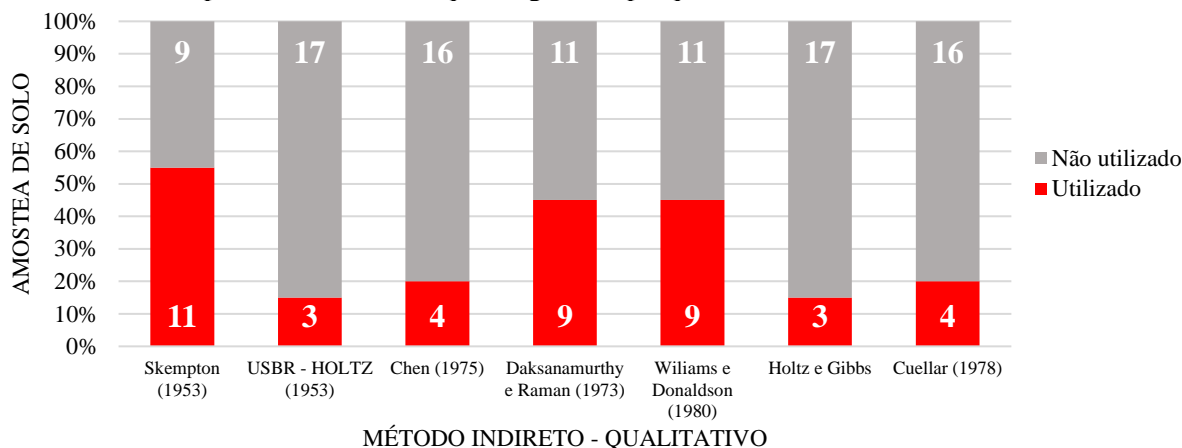


Figura 3: Métodos indiretos qualitativos usados nas diferentes amostras estudadas

Dos sete métodos indiretos qualitativos citados, três são mais usados pelos autores: o método de Skempton (1953), que foi utilizado em 55% dos trabalhos, e os métodos de Daksanamurthy e Raman (1973) e Williams e Donaldson (1980), ambos empregados por 45% dos autores. Entre os métodos menos utilizados estão o método de Cuellar (1978) e Chen (1975), usados somente por 20% dos autores, e os métodos de USBR-Holtz (1953) e Holtz e Gibbs, aplicados por apenas 15% dos autores.

Segundo o critério de USBR – HOLTZ (1953), aproximadamente 25% das amostras apresentam um potencial expansivo muito alto, enquanto cerca de 50% mostram um potencial expansivo alto e cerca de 25% exibem um potencial expansivo médio. Apenas 10% das amostras têm um potencial expansivo baixo. Com base no critério de Cuellar (1978), em torno de 25% das amostras têm um potencial expansivo muito alto, quase 40% têm um potencial expansivo alto e aproximadamente 35% mostram um potencial expansivo médio, com 10% demonstrando um potencial expansivo baixo. De acordo com o critério de Chen (1975), cerca de 25% das amostras são categorizadas como solo de potencial expansivo muito alto, aproximadamente 45% como solo de alto potencial expansivo e cerca de 30% como solo de potencial expansivo médio, com apenas 5% consideradas solo de baixo potencial expansivo. Segundo o critério de Holtz e Gibbs (1956), cerca de 20% das amostras são classificadas como altamente expansivas, aproximadamente 50% como moderadamente expansivas e cerca de 30% como solos de baixa expansividade, com 25% classificados como solo de baixa expansividade. Esses resultados demonstram a variação nos resultados da análise da expansão com base no índice de plasticidade, segundo diferentes métodos de classificação.

3.2.3 Comparativo do método direto e indireto mais usado pelos autores

No decorrer do desenvolvimento do trabalho, foi constatado que, mesmo tratando-se da mesma amostra, por vezes os resultados dos métodos diretos e indiretos não coincidem. Nesse sentido, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos por meio do método direto quantitativo e do método indireto qualitativo mais utilizado pelos autores, com o intuito de verificar a frequência com que os resultados desses métodos coincidem. Os resultados obtidos pelo uso do método direto quantitativo, baseado no critério de Seed (1962), foram confrontados com os resultados obtidos por meio do método indireto qualitativo, baseado no critério de Skempton (1953). Os resultados estão expostos por meio de um gráfico de pizza presente na Figura 4.

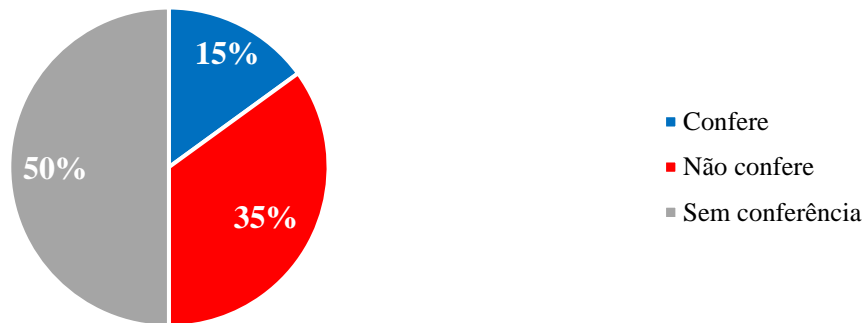


Figura 4: Resultado da correspondência entre o método direto quantitativo baseado no critério de Seed (1962) e o método indireto qualitativo baseado no critério de Skempton (1953)

Dos trabalhos considerados, não foi possível conferir 50% deles, pois os autores não utilizaram um ou outro método. Dentre os que foi possível fazer a comparação, apenas 15% coincidiram nos resultados. Estes dados indicam que, para os solos estudados, os métodos indiretos apresentam baixa eficácia e, portanto, devem ser utilizados com cautela nos solos brasileiros.

3.3. Ensaios utilizados para avaliação dos solos expansivos

Para extrair informações e características das amostras de solo estudadas, cada autor, nas suas respectivas circunstâncias e perspectivas, define uma série de ensaios que julga necessários para atingir seus objetivos de estudo. O uso dos ensaios normalmente depende do objetivo da pesquisa, da estrutura disponível e até mesmo da relevância dos resultados obtidos por meio desses ensaios. Para os estudos de solos expansivos, praticamente todos os autores realizaram ensaios de caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e mecânica das amostras.

3.3.1 Caracterização mineralógica dos solos expansivos

A caracterização mineralógica é importante para entender os argilominerais presentes responsáveis pela expansão. Para a caracterização das amostras de solo, destacam-se três ensaios: o ensaio de difração de raio-X, o ensaio de adsorção de etileno glicol e o ensaio termogravimétrico. Dos três, o mais utilizado é o ensaio de difração de raio-X, presente em 65% dos trabalhos, seguido pelo ensaio termogravimétrico com 35%.

Com os ensaios de caracterização mineralógica, é possível identificar os diferentes minerais que compõem as amostras. Na Figura 6, estão destacados uma lista de argilominerais e suas respectivas identificações nas amostras estudadas em cada trabalho desenvolvido. Devido ao fato de que nem todos os autores realizaram o ensaio de caracterização mineralógica dos solos ao longo da pesquisa, foi possível exibir apenas os argilominerais presentes em 65% das amostras estudadas.

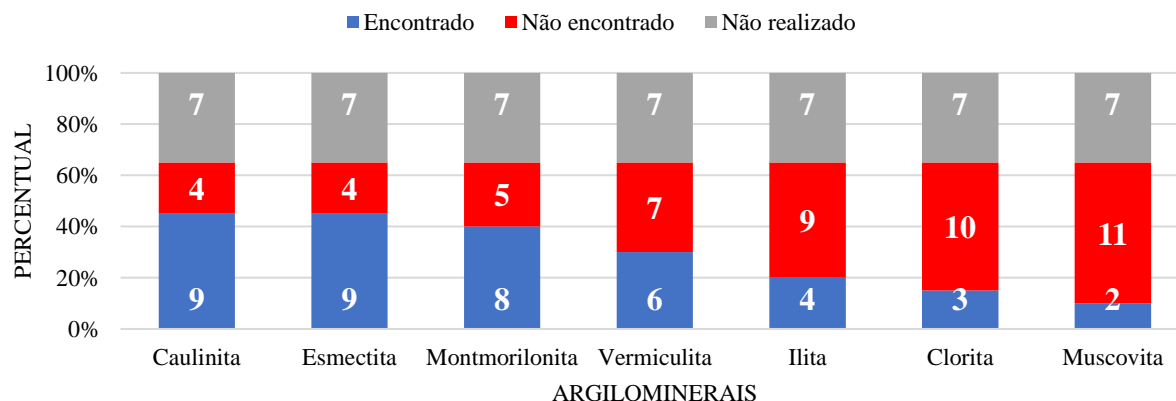


Figura 5: Percentual de argilominerais presentes nas amostras de solo estudados

Entre os argilominerais presentes nas amostras de solos expansivos caracterizadas mineralogicamente, que correspondem a 65% do total, destacam-se a caulinita e a esmeclita, presentes em pelo menos 69% das

amostras. Em seguida, temos a montmorilonita, que aparece em 62% das amostras. A vermiculita foi notada em 46% das amostras, enquanto a illita marcou presença em 31% delas. A clorita aparece em 23% das amostras e, por fim, a muscovita foi notada em 15% das amostras. Dentre esses argilominerais, os responsáveis pela expansividade dos solos são: montmorilonita, illita, vermiculita e clorita.

3.3.2 Caracterização física dos solos expansivos

De acordo com Paiva (2016), todos os solos expansivos possuem uma característica em comum: um elevado percentual de partículas menores que 0,075 mm. Essa afirmação se confirmou, pois a grande maioria das amostras estudadas nos trabalhos apresentou um elevado percentual dessas partículas, com exceção de duas amostras que apresentaram percentuais de 50% e 53%. A média do percentual de partículas menores que 0,075 mm foi de 77,4%, com um desvio padrão de 12,71%.

Os limites de consistência, índice de plasticidade e índice de atividade são parâmetros frequentemente utilizados para determinar o potencial expansivo dos solos. Os métodos indiretos qualitativos baseiam-se nesses parâmetros para identificar solos expansivos. Conforme observado na Figura 6 (a), a maioria das amostras de solo (um total de 35%) possui índice de plasticidade entre 30% e 40%. Com base na Figura 6 (b), constata-se que 95% das amostras estudadas são classificadas como altamente plásticas, enquanto os restantes 5% são classificadas como medianamente plásticas.

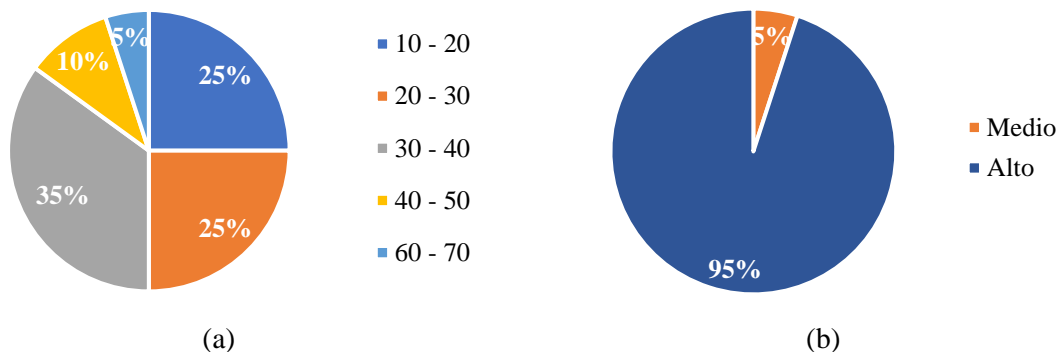


Figura 6: (a) Disposição das amostras em função do Índice de plasticidade; (b) Classificação das amostras em função do Índice de plasticidade

Das amostras de solos estudadas, conforme mostrado na Figura 7 (a) segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), 15% são classificados como solo siltoso de alta compressibilidade, 25% como solo argiloso de baixa compressibilidade e os restantes 60% como solo argiloso de alta compressibilidade. Na Figura 7 (b), observa-se que os percentuais coincidem para a classificação TBR, pois 15% das amostras são classificadas como solo do tipo A-7-5, 25% como solo do tipo A-6 e os remanescentes 60% como solo do tipo A-7-6.

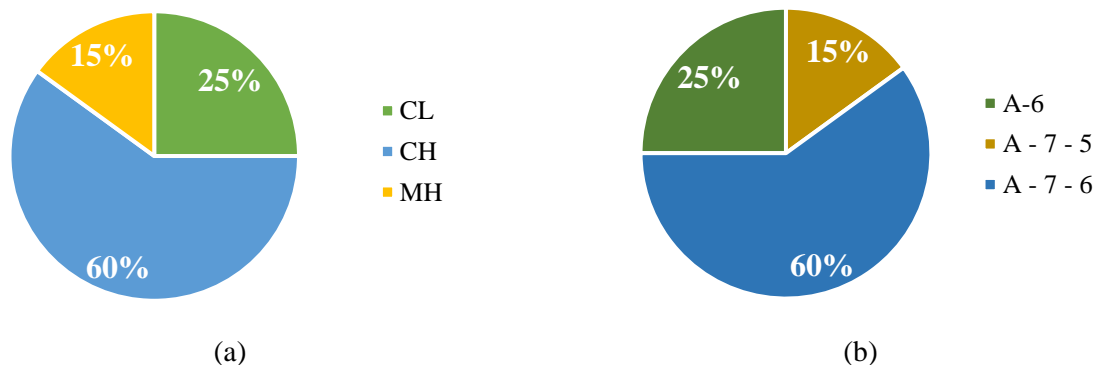


Figura 7: Classificação das amostras segundo SUCS; (b) Classificação das amostras segundo TRB

3.3.3 Caracterização mecânica dos solos expansivos

Para a caracterização mecânica dos solos expansivos, os autores utilizaram diversos ensaios com o objetivo de entender o comportamento desses solos sob diferentes circunstâncias. Dentre todos os trabalhos

avaliados, apenas um não realizou nenhum ensaio de caracterização mecânica. A Figura 8 apresenta os ensaios utilizados pelos autores e as suas respectivas frequências de uso nos trabalhos.

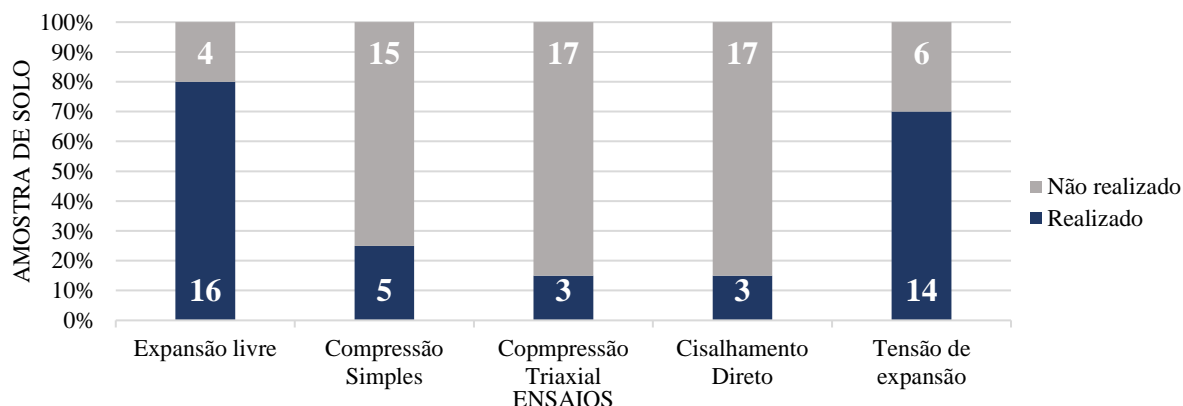


Figura 8: Ensaios de caracterização mecânica usados nas diferentes amostras estudadas

Entre os ensaios de caracterização mecânica, o ensaio de expansão livre se destaca, sendo utilizado para caracterizar 80% das amostras de solo estudadas nos trabalhos. Em seguida, temos o ensaio de tensão de expansão, com 70% dos autores utilizando-o para a caracterização das amostras. O ensaio de compressão simples foi usado em pelo menos 25% dos trabalhos, enquanto o ensaio de compressão triaxial e o ensaio de cisalhamento direto foram utilizados por apenas 15% dos autores no processo de caracterização das amostras. Dentre os ensaios, apenas os de expansão livre e tensão de expansão quantificam a capacidade expansiva dos solos, razão pela qual aparecem com mais frequência nos trabalhos desenvolvidos.

A análise dos resultados do ensaio de expansão livre revelou uma expansão média de 11,7%, com um desvio padrão de 7,7%, e a máxima registrada foi de 27,5%. Quanto à determinação da tensão de expansão, diferentes métodos foram utilizados, incluindo expansão a volume constante (usado em 60% das pesquisas), carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação (45%) e expansão e colapso sob tensão (50%). Alguns autores utilizaram mais de um método na determinação da tensão de expansão, e o resultado é dado pela média dos resultados obtidos por cada método. Os resultados indicaram uma tensão de expansão média de 162 kPa, com um desvio padrão de 75,8 kPa.

4. CONCLUSÕES

A revisão sistemática da literatura, utilizando o Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, revelou uma lacuna significativa nas pesquisas sobre solos expansivos no Brasil. Dos poucos estudos voltados para essa problemática, a maioria se concentra em solos das regiões semiáridas brasileiras, especificamente no estado de Pernambuco. Em relação aos métodos de identificação dos solos expansivos, tanto os diretos quantitativos quanto os indiretos qualitativos mostraram resultados discrepantes para as mesmas amostras, evidenciando a necessidade de padronização. Os ensaios de caracterização física, mineralógica e mecânica das amostras são fundamentais para estudos da capacidade expansiva e para fins de engenharia.

Em termos de granulometria, os solos expansivos estudados apresentam em média 0,5% de pedregulhos, 22,1% de areia, 29,7% de argila e 47,7% de silte. Foi perceptível também que a maioria dos solos expansivos apresentou alto teor de grãos menores que 0,075 mm. A maioria desses solos apresentou um limite de liquidez variando entre 50% e 60%, sendo classificados como altamente plásticos, porém com fração argila classificada como inativa. Segundo o SUCS, a maioria desses solos é classificada como solo argiloso de alta compressibilidade. Já segundo o TRB, a maioria é classificada como solo do tipo A-7-6.

Em relação aos argilominerais, a caulinita esteve presente em pelo menos 69% das amostras, a illita em 31%, a clorita em 23% e a muscovita em 15%. Já os argilominerais expansivos como esmectita estiveram presentes em pelo menos 69% das amostras, montmorilonita em 62% e vermiculita em 46%.

Em relação à capacidade expansiva, os solos estudados apresentaram uma expansão média de 11,7%, com um desvio padrão de 7,7%. As tensões de expansão também apresentaram variação, com uma média de 162 kPa e um valor máximo registrado de 289,3 kPa. Esses resultados ressaltam a complexidade e a importância de uma caracterização precisa dos solos expansivos para o planejamento e execução adequada de obras de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABMS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. (2004) *Solos não saturados*. São Paulo.
- ATAIDE, Stive Osca Falcão. (2017) *Análise do comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com Areia*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- BARBOSA, Felipe Araújo Silva. (2019) *Análise do comportamento hidromecânico e da dinâmica de fissuração de um solo expansivo*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- BARBOSA, Valquiria. (2013) *Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- BEZERRA, André Luis. (2019) *Análise da expansão de um solo no estado natural e compactado com adição de cinza de casca de arroz do Município de Brejo da Madre de Deus – PE*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- CAPUTO, Homero pinto. (1988) *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6ª edição. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- CARVALHO, José Camapum de. (2015) *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 1ª edição. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS).
- FERENHOF, Helio Aisenberg; FERNANDES, Roberto Fabiano. (2016) *Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SSF*. Revista ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina, Florianópolis.
- MARINHO, Rafaella Pereira. (2018) *Melhoramento de solo colapsível e expansivo de Santa Maria da Boa Vista - PE*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- MORAIS, Joanderson James Oliveira. (2017) *Caracterização geotécnica da expansividade de um solo argiloso do Município de Paulista - PE*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- PAIVA, Sergio Carvalho de. (2016) *Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos Municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca - PE e de suas misturas com CAL*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco.
- TENÓRIO, Eduardo Antônio Guimarães. (2018) *Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e CAL*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande.