

Avaliação da Propriedade de Expansão Livre de um Solo Expansivo Submetido a Ciclos Sucessivos de Umidade

Larissa da Silva Oliveira

MSc. Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe - UFS, São Cristóvão-SE, Brasil, loliveira.engenharia@gmail.com

Erinaldo Hilário Cavalcante

DSc. Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe - UFS, São Cristóvão-SE, Brasil, erinaldo@ufs.br

RESUMO: Uma amostra indeformada de solo argiloso, da região metropolitana de Aracaju-SE, teve sua caracterização geotécnica, química e mineralógica realizada para avaliação do seu potencial de expansão. Constatada a presença de argilominerais altamente expansivos, a expansão livre da amostra foi analisada durante oito sucessivos ciclos de umidade. Isto é, a amostra foi saturada e deixada expandir livremente e depois ressecada, em temperatura controlada, até atingir a umidade inicial de ensaio e novamente saturada. O objetivo desse trabalho consistiu em verificar se a propriedade de expansão livre da amostra se mantinha constante ou sofria algum tipo de alteração com o aumento do número de ciclos de umidade. Como resultados, verificou-se que o potencial de expansão da amostra é muito alto e seu grau de atividade, analisado pelo ensaio de adsorção de azul de metileno, muito ativo. A análise mineralógica evidenciou a presença de argilominerais instáveis, como esmectita e montmorilonita. A amostra apresentou uma expansão livre de 47,8%, no primeiro ciclo, a uma sobrecarga de 0,5 kPa. Nos sucessivos ciclos de umidade, observou-se uma diminuição do percentual de expansão livre da amostra, que chegou ao oitavo ciclo com 63% de redução do valor inicial. Como conclusão, nota-se que os ciclos de umidade influenciam a propriedade de expansão livre do solo expansivo e que apenas um ciclo de umidade não é capaz de representar com fidedignidade o comportamento de expansão do solo expansivo.

PALAVRAS-CHAVE: Solo não Saturado, Solo Expansivo, Ciclagem de Umidade.

ABSTRACT: An undisturbed sample of clayey soil, from the metropolitan region of Aracaju-SE, had its geotechnical, chemical and mineralogical characterization carried out to evaluate its swelling potential. Once the presence of highly expansive clay minerals was confirmed, the free swelling of the sample was analyzed during eight successive moisture cycles. That is, the sample was saturated, allowed to expand freely, and then dried at a controlled temperature until it reached the initial test moisture and was saturated again. The objective of this work was to verify whether the free swelling property of the sample remained constant or underwent some type of change with the increase in the number of moisture cycles. As a result, it was found that the swelling potential of the sample is very high, and its degree of activity, as analyzed by the methylene blue adsorption test, is very active. The mineralogical analysis showed the presence of unstable clay minerals, such as smectite and montmorillonite. The sample showed a free swelling of 47.8%, in the first cycle at an overload of 0.5 kPa. In successive moisture cycles, a decrease in the percentage of free swelling of the sample was observed, which reached the eighth cycle with a 63% reduction in the initial value. In conclusion, it is noted that moisture cycles influence the free swelling property of expansive soil and that only one moisture cycle is unable of reliably representing the expansion behavior of expansive soil.

KEYWORDS: Unsaturated Soil, Expansive Soil, Moisture Cycling.

1 INTRODUÇÃO

O solo expansivo é um solo não saturado, tipicamente argiloso, com forte presença de argilominerais expansivos, tais como a montmorilonita e esmectita. Sua principal característica é a predisposição à variação volumétrica decorrente de variação de umidade. Quando umedecido, o solo expansivo apresenta elevado

valor de expansão; quando ressecado, se contrai. Por conta disso, o solo expansivo é responsável por causar diferentes tipos de danos às edificações construídas sobre ele, sendo, por esse motivo, considerado mundialmente um solo problemático (Oliveira; Costa, 2018). *In situ*, o solo expansivo é exposto a ciclos bem definidos de umedecimento e secagem, provocados respectivamente por estações chuvosas e período de estiagem. Desta forma, é de se esperar que a variação volumétrica do solo expansivo seja influenciada por esses ciclos de umidade.

Conforme Tripathy, Rao e Fredlund (2002), os ensaios de expansão livre cíclicos em solos expansivos mostraram que o potencial de expansão pode reduzir ou mesmo aumentar por um fator de dois quando comparado com o primeiro ciclo de umidade. Segundo Al-Taie *et al.* (2020), solos expansivos apresentam valores mais elevados de expansão livre após o segundo ciclo de umidade, alterando o grau de expansão de “moderado” para “muito alto”. Já de acordo com Rao e Rao (2010) e Al-Homouli *et al.* (1995), o solo expansivo sofre fadiga a cada ciclo, o que resulta em valores de expansão livre menores. Ambas as pesquisas, contudo, relatam encontrar uma condição de equilíbrio, onde após determinado ciclo de umidade, o valor de expansão livre deixa de apresentar significativas alterações.

Desta forma, é possível afirmar que na literatura há evidências de que os ciclos de umedecimento são diretamente responsáveis pelas variações nos valores de expansão livre de solos expansivos. Assim sendo, o objetivo desse trabalho consistiu em verificar se a propriedade de expansão livre de um solo potencialmente expansivo se mantinha constante ou sofria algum tipo de alteração com o aumento de ciclos de umidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Amostragem

A amostra de solo estudada nesta pesquisa foi coletada da cidade de Nossa Senhora do Socorro, município pertencente ao território da Grande Aracaju, localizado no centro-leste do estado de Sergipe (Figura 1). As coordenadas geográficas do ponto de coleta são 10°53'26,7" S, 37°07'01,5" W. O solo foi retirado de uma extensão horizontal de 10 m, a uma profundidade média de um metro abaixo da superfície do terreno. A amostragem (deformada e indeformada) foi realizada durante a estação seca, época em que se observavam facilmente inúmeras fissuras de contração, uma característica comum a solos expansivos.



Figura 1. Localização da cidade de Nossa Senhora do Socorro-SE.

2.2 Caracterização da Amostra

Para caracterizar e classificar a amostra do solo objeto da presente pesquisa foram realizados os ensaios de laboratório listados na Tabela 1 (ensaios de caracterizações geotécnica, química e mineralógica).

Tabela 1. Ensaios de caracterização geotécnica, química e mineralógica realizados.

Ensaio	Abreviatura	Procedimento Empregado
Análise granulométrica	-	ABNT NBR 7181/2016
Densidade real dos grãos	D ₂₀	DNER-ME 093/1994
Limite de liquidez	LL	ABNT NBR 6459/2016
Limite de plasticidade	LP	ABNT NBR 7180/2016
Limite de contração	LC	DNER-ME 087/1994
Potencial de hidrogênio	pH	Embrapa (2019)
Teor de matéria orgânica	MO	Embrapa (2009)
Capacidade de troca de cátions	CTC	Embrapa (2009)
Adsorção de Azul de Metileno	-	Fabbri (1994)
Difração de raios-X	DRX	Jackson (1979)

2.3 Ensaio de Expansão Livre Cíclico

Após a classificação da amostra como potencialmente expansiva, esta teve sua expansividade avaliada pelo ensaio de expansão livre de forma cíclica. O corpo de prova empregado no ensaio foi moldado em anel metálico de 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura. A etapa de confecção do corpo de prova contou com auxílio de serra mármore (Figura 2a) e esmerilhadeira (Figura 2b), dada a elevada rigidez do material e consequente dificuldade de confecção manual. Adotou-se como método de ensaio os procedimentos descritos na norma americana ASTM D4546/2014, com as devidas adaptações necessárias.

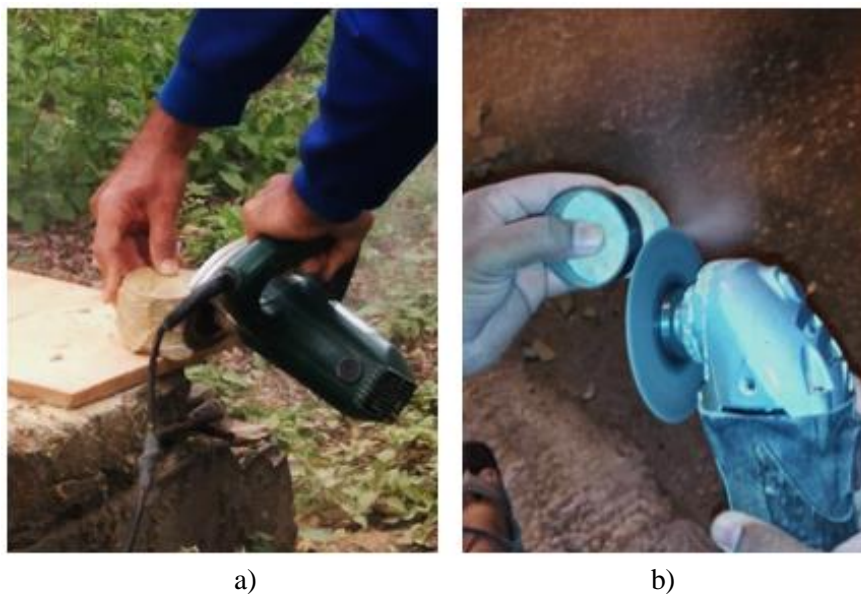


Figura 2. Confecção do corpo de prova: (a) corte com serra mármore; (b) acabamento com esmerilhadeira.

Conforme o esquema ilustrado na Figura 3, o corpo de prova foi posicionado em uma cápsula metálica, entre discos de papéis filtros e pedras porosas. Sobre este, um cabeçote foi adicionado, aplicando uma sobrecarga de 0,50 kPa à amostra. No cabeçote, por sua vez, foi posicionado um deflectômetro para aferir as variações verticais de altura do corpo de prova ao longo do experimento. O conjunto, por fim, foi posicionado em uma câmara de secagem, apresentada na Figura 4a, confeccionada exclusivamente para esse ensaio. A câmara de secagem consiste em uma caixa térmica de poliestireno expandido, duas lâmpadas halógenas incandescentes, um termostato e um termômetro higrometro.

Legenda:

1. Pedra porosa
2. Cabeçote
3. Nível d'água
4. Deflectômetro

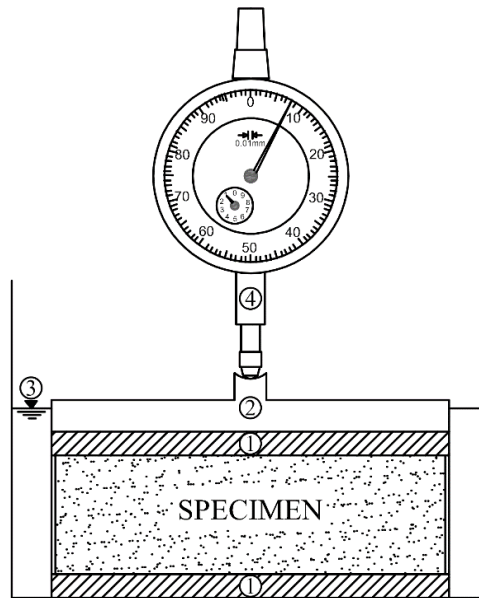


Figura 3. Configuração de ensaio.

O ensaio iniciou-se com a completa saturação do corpo de prova (Figura 4b), através da adição de água destilada à cápsula metálica. As aferições da variação de altura do corpo de prova foram realizadas nos intervalos de tempo determinados pela ASTM D4546/2014. Estabilizados os valores de leitura de expansão, a água responsável por manter o corpo de prova saturado foi removida da cápsula metálica com o emprego de seringas. Em seguida, a câmara de secagem foi ligada na temperatura de 35 °C (reprodução da temperatura de secagem *in situ*). Desta forma, o corpo de prova foi deixado para secar (Figura 4c) até que o conjunto retornasse à massa inicial, onde novamente o corpo de prova era saturado e um novo ciclo de umidade iniciado. Ao todo, a propriedade de expansão livre da amostra foi avaliada em oito ciclos sucessivos de umidade.

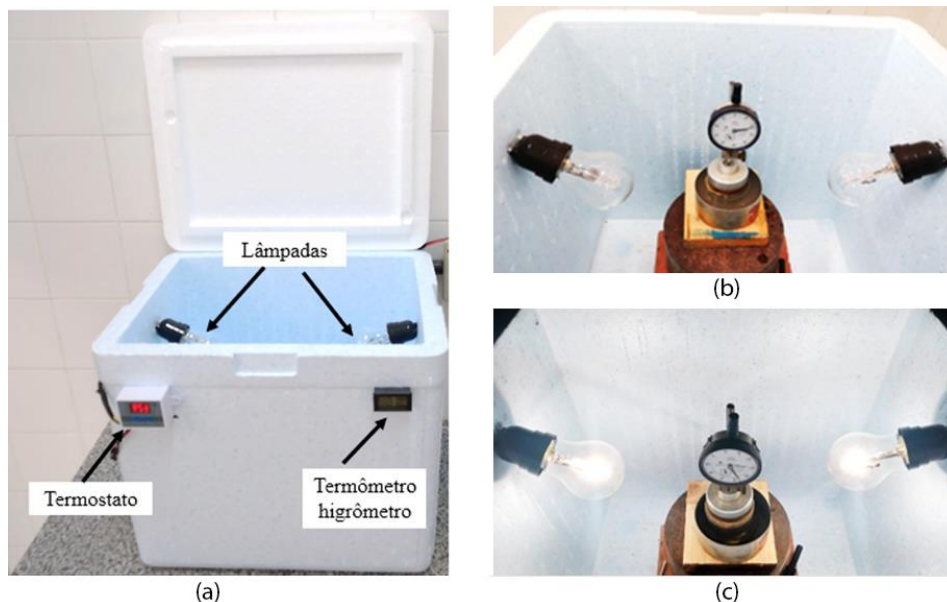


Figura 4. Fases do ensaio de expansão livre cíclico: (a) câmara de secagem; (b) fase de saturação; (c) fase de secagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de caracterização geotécnica e química da amostra.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica e química.

Propriedade	Abreviatura	Valor	Unidade
Pedregulho*	-	0,10	%
Areia*	-	12,50	%
Silte*	-	41,01	%
Argila*	-	45,39	%
Densidade real	D ₂₀	2,679	-
Umidade	W	5,26	%
Limite de liquidez	LL	72	%
Limite de plasticidade	LP	26	%
Limite de contração	LC	14	%
Índice de plasticidade	IP	46	%
Índice de contração	IC	1,45	-
Classificação da SUCS**	-	CH	-
Potencial de hidrogênio em KCl***	pH	5,42	-
Matéria orgânica	MO	3,56	g/dm ³
Capacidade de troca de cátions total	CTC total	34,6	cmolc/dm ³
Superfície específica	S	196	m ² /g
Coefficiente de atividade	CA	153,5	10 ⁻³ g/g
Grau de atividade	-	Muito ativo	-
Índice de Skempton	IA	1,00	-

*Classificação conforme a ABNT NBR 6502 (2022).

** Sistema Unificado de Classificação de Solos.

*** Cloreto de potássio.

Conforme a composição granulométrica da amostra, o solo foi classificado pela ABNT NBR 6502 (2022) como argila siltosa com pouca areia. A análise dos limites de Atterberg permitiu classificar o solo como altamente plástico. O índice de consistência, de 1,45, caracterizou o solo como uma argila dura. Enquanto a classificação adotada pelo SUCS foi de argila inorgânica de alta plasticidade. Segundo os parâmetros adotados pelos autores Chen (1965), Seed *et al.* (1962), Dakshanamurthy e Raman (1973), o solo possui um potencial de expansão muito alto.

O solo foi classificado como pobre em matéria orgânica, ao mesmo tempo que seu pH ácido pressupõe a presença de argilas silicatadas e indica a elevada capacidade de reter cátions. Esta última foi comprovada na análise de CTC total que apresentou o valor de 34,6 cmolc/dm³. Valores dessa magnitude, segundo a Embrapa (2015), são indicativos da presença de argilominerais de estruturas 2:1.

Do ensaio de adsorção de azul de metileno obtiveram-se os seguintes resultados: superfície específica (S) de 196 m²/g e coeficiente de atividade (CA) de 153,5 x 10⁻³g/g. Com consequência, por esses parâmetros, o grau de atividade da fração fina do solo recebeu a classificação de muito ativo; o que difere do índice de atividade de argila de Skempton, igual a 1, equivalente a uma atividade normal da fração de argila.

O ensaio de difração de raios-X foi realizado em duplicata. O ensaio 1, indicado pelo difratograma da Figura 5a, evidenciou a presença de argilominerais expansivos pertencentes ao grupo da esmectita, além de apontar a presença de argilominerais dos grupos mica e caulinita. As distâncias basais do ensaio 2, difratograma da Figura 5b, também indicou a presença de grupos de argilominerais expansivos como o da montmorilonita e da mica expansiva, além de apontar a presença do grupo da caulinita.

Observa-se, portanto, que para o solo em análise, o índice de atividade de Skempton mostrou-se ineficiente para classificar a atividade da fração de argila presente no solo. Uma justificativa para esse fato são as limitações existentes nos ensaios de limites de Atterberg, visto que estes são realizados com a fração de solo que passa na peneira de malha n.º 40 (0,42 mm), na qual é comum a existência de material inerte. Em contrapartida, infere-se que o ensaio de adsorção de azul de metileno classificou de forma mais fidedigna a fração de argila do solo em questão.

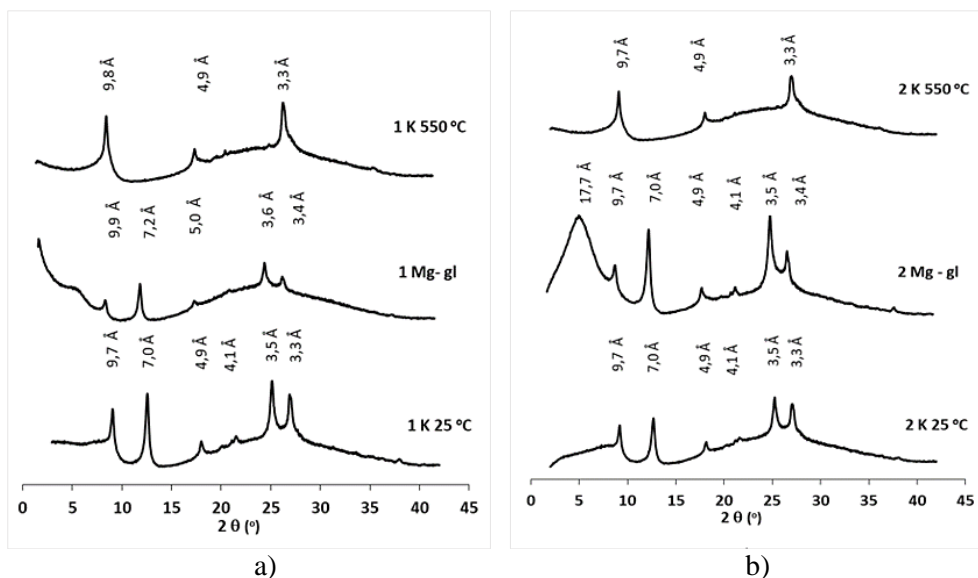


Figura 5. Difratomogramas de raios-X: (a) difratograma do ensaio 1; (b) difratograma do ensaio 2.

A Figura 6 exibe o gráfico de expansão livre *versus* tempo encontrado como resultado do ensaio de expansão livre cíclico. Os valores de expansão livre observados nos oito ciclos de umidade realizados foram notoriamente elevados e classificaram o solo com grau de expansão muito alto. Valores dessa magnitude já eram esperados dada a constatação da presença de grupos de argilominerais altamente expansivos, como os da montmorilonita e da esmectita, indicados no ensaio de DRX.

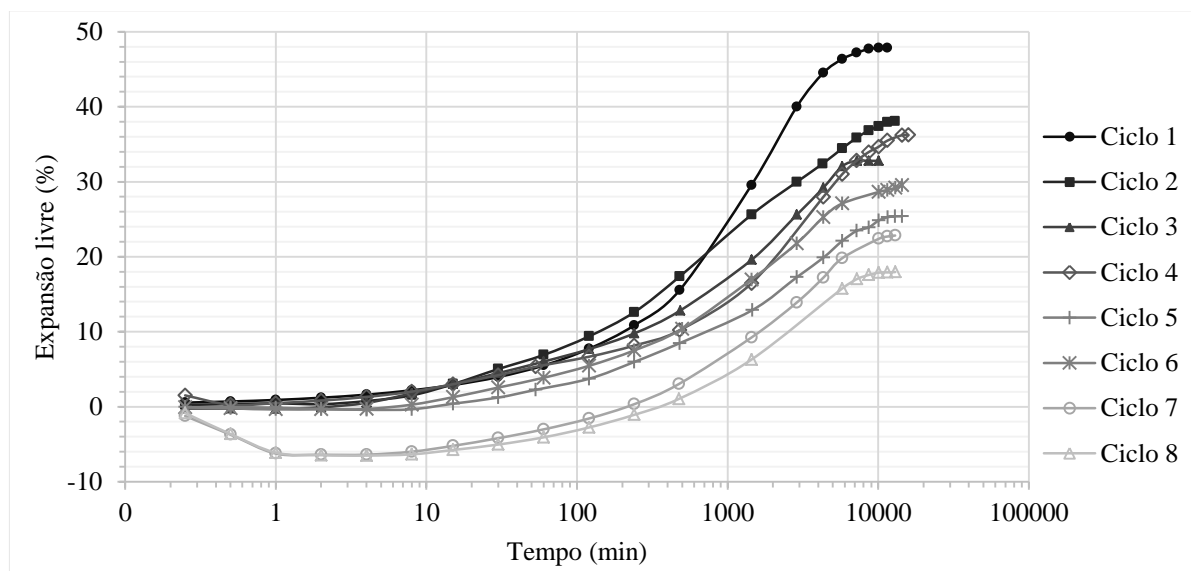


Figura 6. Curvas de expansão livre.

A Figura 7 exibe os valores de expansão livre e os percentuais de redução observados para cada ciclo de umidade. No ciclo 1, o valor de expansão livre foi 47,84%. No ciclo 2, foi observada uma redução de 20% no percentual de expansão livre da amostra. Em comparação com o ciclo 1, todos os oito ciclos de umidade apresentaram reduções significativas nos valores de expansão livre. Como descrito por Rao e Rao (2010), a amostra de solo parece sofrer uma espécie de “fadiga” a cada novo ciclo de umidade. A maior redução observada, porém, foi a do último ciclo, visto que, em comparação com o primeiro, a expansão livre reduziu 62% do seu valor. Infere-se ainda que a redução não se deu de forma gradual ao número de ciclos, pois os ciclos 4 e 6 apresentaram percentuais de expansão livre maiores que os ciclos anteriores. Essa intercorrência, entretanto, pode estar atrelada ao novo estado de sucção da amostra naqueles ciclos. Não

obstante, a tendência constatada é de diminuição do percentual de expansão livre com o aumento do número dos ciclos de umidade; não apresentando, até o número de ciclos de umidade avaliados, o indicativo de condição de equilíbrio.

Entende-se, no entanto, que essa previsão de novas reduções está baseada nas condições de ensaio trabalhadas nessa pesquisa; onde a amostra após ser umedecida foi ressecada até seu estágio inicial de umidade. Todavia, é de se esperar que, caso a amostra seja seca a uma umidade inferior à inicial, e com isso induzida a uma sucção maior do que ela já apresentava, seu percentual de expansão livre aumente.

Cabe ainda salientar que apesar da presente pesquisa não avaliar a repetibilidade de seus resultados, estes corroboram com os encontrados pelos autores Al-Homoud *et al.* (1995), Basma *et al.* (1996), Tripathy, Rao e Fredlund (2002), Rao e Rao (2010) e Al-Omari, Ibrahim e Al-Bayati (2010), o que por sua vez, validam o comportamento observado.

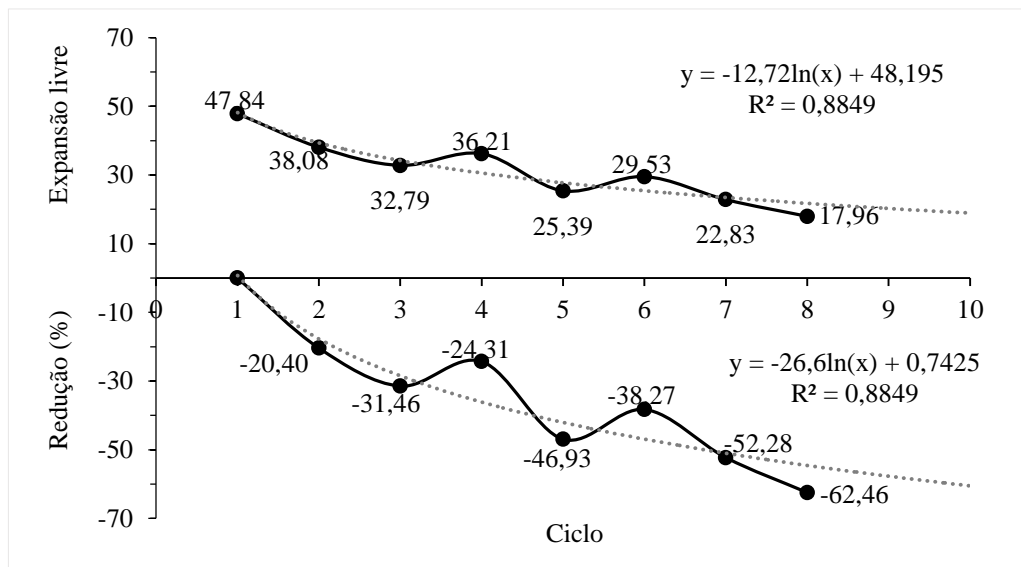


Figura 7. Percentuais de redução da expansão livre a cada ciclo.

4 CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado nessa pesquisa, infere-se que a amostra de solo trabalhada trata-se de uma argila inorgânica de alta plasticidade, com elevado potencial de expansão e presença marcante de argilominerais instáveis, como a montmorilonita e a esmectita. O percentual de expansão livre encontrado, para uma sobrecarga de 0,5 kPa, foi de 47,87%; um valor considerado elevado e capaz de acarretar pressões adicionais a estruturas construídas sobre esse solo e ocasionar danos estruturais.

Observou-se, contudo, que cada vez que a mesma amostra de solo era ressecada e novamente umedecida, com a realização de um novo ciclo de umidade, sua propriedade de expansão livre sofria significativas reduções de valores. No entanto, mesmo após oito consecutivos ciclos de umidade, ainda se observou um percentual de expansão livre alto. Ainda cabe ressaltar que as reduções percebidas estão associadas à secagem da amostra ao valor inicial de umidade. Desta forma, não se espera que o mesmo comportamento seja evidenciado em amostras ressecadas a umidade inferior e sucção superior às iniciais. Assim, à vista do exposto, conclui-se que os ciclos de umedecimento são responsáveis por influenciar a propriedade de expansão livre do solo expansivo e que apenas um ciclo de umidade não é capaz de representar com fidedignidade o comportamento de expansão do solo expansivo *in situ*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Homoud, A. S. *et al.* (1995). Cyclics welling behavior of clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 121, p. 562-565.

- Al-Omari, R. R; Ibrahim, S. F; Al-Bayate, I. K. (2010). *Effect of potassium chloride on cyclic behavior of expansive clays*. International Journal of Geotechnical Engineering. v. 4:2, p. 231-239.
- Al-Taie, A. *et al.* (2020). Effect of Expansão-contração Cycles on Volumetric Behavior of Compacted Expansive Clay Stabilized Using Lime. *Int. J. Geomech*, 20(11):04020212.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6502. *Rochas e solos – Terminologia*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2014). ASTM D4546: *Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils*.
- Basma, A. A. *et al.* (1996). *Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays*. Applied Clay Science, v. 11, p. 211-227.
- Chen, F. H. (1965). The Use of Piers to Prevent the Uplifting of Lightly Loaded Structures Founded on Expansive Soils. *Proceedings, First International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils*, Texas A&M University, College Station, Tex. p. 152-171.
- Dakshnamurthy, V., Raman, V. (1973). A Simple Method of Identifying an Expansive Soil. *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 13, n. 1, p. 97-104.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 087. *Solo – determinação dos fatores de contração*.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 093. *Solo – determinação da densidade real*.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2009). *Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes*. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2015). *Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos*. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042994/1/Doc206.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2022.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2019). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF.
- Fabrizi, G. T. P. (1994). *Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos/USP.
- Jackson, M. L. (1979). *Soil Chemical Analysis – Advanced course*. Madison, Prentice-Hall.
- Oliveira, L. S., Costa, S. C. F. E. (2018). Caracterização de um Solo Tipo Massapê para Verificação do seu Potencial Expansivo. In: *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*.
- Rao, A., Rao, M. (2010). Behavior of expansive soils under stabilized fly ash cushions during cyclic wetting and drying. *International Journal of Geotechnical Engineering*, v. 4:1, p. 111- 118.
- Seed, H. B., *et al.* (1962). Study of Swell and Swell Pressure Characteristics of Compacted Clays. *Highway Research Board Bulletin*, n. 313, p.12-39.
- Tripathy, S., Rao, K. S. S., Fredlund, D. G. (2002). Water content – void ratio swell–shrink paths of compacted expansive soils. *Can. Geotech. J.*, v. 39, p. 938-959.