

## Melhoramento de um Solo Expansivo com Resíduo de Construção e Demolição

### *Improvement of an Expansive Soil with Construction and Demolition Waste*

Rafaella Pereira Marinho<sup>1</sup>; Silvio Romero de Melo Ferreira<sup>2</sup>; Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Recife/PE, Brasil.  
rafaellapmarinho@outlook.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0372-7637>

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Recife/PE, Brasil.  
silvio.mferreira@ufpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5760-1494>

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Recife/PE, Brasil.  
isabelamcvbello@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3072-7836>

**Resumo:** Os solos expansivos aumentam de volume quando submetidos ao acréscimo de umidade e sofrem contração quando perdem umidade. As construções executadas sobre solos expansivos podem apresentar várias manifestações patológicas. Este artigo apresenta um estudo sobre melhoramento de um solo expansivo localizado em Santa Maria da Boa Vista-PE, misturado com 10%, 20% e 30% de resíduo de construção e demolição (RCD), em relação à massa da amostra seca. Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica no solo e nas misturas, ensaios químicos e microestrutural no solo, e caracterização física e química no RCD. O solo apresentou 8,58% de expansão “livre”, tratando-se, de um solo com alto grau de expansividade, e com a possibilidade de danos graves, devido à sua tensão de expansão (81,25 kPa pelo Método do Volume Constante). A mistura com 30% de RCD reduziu a tensão de expansão para 20 kPa e a expansão “livre” para 0,90%. Com isso, a adição de RCD ao solo mostrou-se eficiente na estabilização da expansão.

**Palavras-chave:** Solos problemáticos; Estabilização de solos; Agregados.

**Abstract:** Expansive soils increase in volume when subjected to an increase in moisture and contract when they lose moisture. Construction carried out on expansive soils can present various pathological manifestations. This article presents a study on the improvement of an expansive soil located in Santa Maria da Boa Vista-PE, mixed with 10%, 20% and 30% construction and demolition waste (CDW), in relation to the mass of the dry sample. Physical and mechanical characterization tests were carried out on the soil and mixtures, chemical and microstructural tests on the soil, and physical and chemical characterization of the CDW. The soil showed 8.58% "free" expansion, making it a soil with a high degree of expansion and the possibility of serious damage due to its expansion stress (81.25 kPa by the Constant Volume Method). The mixture with 30% CDW reduced the expansion stress to 20 kPa and the "free" expansion to 0.90%. Thus, the addition of CDW to the soil proved to be efficient in stabilizing expansion.

**Keywords:** Problematic soils; Soil stabilization; Aggregates.

## 1. Introdução

Os solos são de grande importância para a Construção Civil, visto que, é sobre eles que as edificações estão assentadas. Alguns solos podem apresentar problemas, dentre eles, têm-se os solos expansivos, que aumentam de volume quando submetidos ao acréscimo de umidade e sofrem contração quando perdem umidade. Tal fenômeno tende a se repetir ciclicamente por variações sazonais de umidade ou de sucção do solo (FERREIRA; VILAR, 2023).

A variação volumétrica dos solos expansivos é influenciada pela presença de interstratificado de montmorilonita com clorita, ilita e vermiculita. A montmorilonita, desde a condição de seca até a saturação completa, possui um potencial de variação de volume 50 vezes maior do que a caulinita. A distribuição das partículas de argila, porosidade, orientação mineralógica, cimentação, perfil estratigráfico, espessura do solo, descontinuidade, estado tensional são outros fatores que influenciam no processo de expansão do solo (CHEN, 1988; FERREIRA; FERREIRA, 2009; MARQUES *et al.*, 2014).

Em períodos chuvosos, apresentam consistência mole, pegajosidade, microrrelevo, adensamento causado pelo pisoteio de máquinas e animais durante o pastejo e práticas agrícolas e em edificações de pequeno porte fissuras, trincas e rachaduras nas edificações, além da impermeabilização superficial do solo provocado pelo impacto da chuva (COLLARES *et al.*, 2008; FLEUREAU *et al.*, 2015). Em períodos secos, apresentam consistência dura, elevada resistência, formando aglomerados internos, fissuras e trincas superficiais (AL-RAWAS *et al.*, 2006; YUAN *et al.*, 2016). Quando o solo é utilizado para estruturas de engenharia, como canais de irrigação e agrovilas, atenção especial é necessária na implantação das estruturas devido à modificação inevitável da interação entre a água e o solo no campo (AL-RAWAS *et al.*, 2006; FERREIRA; VILAR, 2023).

Os solos expansivos ocorrem em todo mundo e são comuns em regiões semiáridas de clima tropical e temperado, onde a evapotranspiração excede a precipitação (CHEN, 1988 e FLEUREAU *et al.*, 2015). Em Pernambuco, os solos expansivos foram encontrados em Carnaíba, Afrânio, Petrolina, Cabrobó, Salgueiro, Serra Talhada, Petrolândia, Ibimirim, Pesqueira, Nova Cruz, Paulista, Cabo, Olinda, Recife, Cedro, Inajá, São Francisco, Suape, Itaparica, Agrestina, Brejo da Madre de Deus, Bonito e Santa Maria da Boa Vista (CONSTANTINO, 2018).

A identificação de solos expansivos é realizada através de métodos diretos e indiretos (SCHREINER, 1987; FERREIRA, 1995). Os métodos indiretos utilizam a identificação mineralógica, os índices físicos, os limites de consistência ou parâmetros ligados à textura, composição e comportamento dos solos, enquanto os métodos diretos são baseados na medida da expansão induzida ao solo (Expansão “livre”) ou tensão necessária para impedi-la (Tensão de expansão). Ensaio de Expansão “Livre” utilizam pequenas sobrecargas antes da inundação. Seed *et al.* (1962) e Vijayvergiya e Ghazzaly (1973) consideram sobrecargas de 7 kPa e 10 kPa, respectivamente. A Tabela 1 indica o grau de expansividade dos solos quanto à expansão “livre” pelas propostas dos autores mencionados e a Tabela 2 indica os possíveis danos nas edificações qualificados pelos valores das tensões de expansão na proposto por Jimenez Salas (1980).

*Tabela 1 – Classificação do grau de expansividade do solo.*

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

*Fonte: Autores (2025).*

As construções executadas sobre os solos expansivos podem apresentar vários problemas a Construção Civil como fissuras ou fendas nos solos (durante os períodos de seca), fissuras diagonais embaixo das janelas e portas, rupturas nos pavimentos, etc (FERREIRA, 1995). Uma das técnicas utilizadas para reduzir a expansividade desse solo é a substituição parcial por solos granulares modificando a sua granulometria. Constantino *et al.* (2018) adicionaram areia nas proporções 10%, 20%, 30% e 50% ao solo expansivo de Paulista – PE e Stive (2017) adicionou areia nas proporções 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 75% ao solo expansivo de Ipojuca-PE para reduzir a expansividade.

Um outro problema que a Construção Civil enfrenta diz respeito à geração dos seus resíduos, comumente chamados de resíduos de construção e demolição (RCD). De acordo com a Abrelpe (2021), em 2020, foram coletadas pelos municípios cerca de 47 milhões de toneladas de RCD e no Nordeste foram coletadas 9.046.890 toneladas/ano.

*Tabela 2 – Possíveis danos pelo Critério Jimenez Salas (1980)*

Tensão de Expansão	Possíveis Danos
>200	Demolição
Entre 100 e 200	Danos Graves
Entre 50 e 100	Fissuras Importantes
Entre 20 e 50	Fissuras Pequenas
<20	Sem Danos

*Fonte: Jimenez Salas (1980).*

O presente artigo apresenta uma análise do comportamento de variação de volume devido à mudança de umidade em um solo expansivo do município de Santa Maria da Boa Vista, Pernambuco, com e sem adição de RCD visando reduzir a expansão do solo e o reaproveitamento de RCD.

## 2. Materiais e Métodos

O solo expansivo foi coletado em um terreno no município de Santa Maria da Boa Vista-PE, localizado há 08°48'28" de latitude sul e 39°49'32" de longitude oeste, na região da bacia do rio São Francisco e do rio Pontal. Este município apresenta clima semiárido, com verões quentes e úmidos, os invernos mornos e secos e as primaveras muito quentes e secas (Figura 1). Este solo foi identificado por Marinho (2018), distante aproximadamente 40 m de um solo colapsível, conforme mostrado na Figura 2. Em 1987, já havia sido encontrado solo colapsível em um terreno onde foram construídas 1856 unidades habitacionais, sendo identificados por Ferreira (1988), Ferreira e Teixeira (1989), Vargas et al., (1989) e Ferreira (1990).



*Figura 1 – Localização da cidade de Santa Maria da Boa Vista.*

*Fonte: Cunha et al. (2012).*

O programa experimental consistiu inicialmente na coleta das amostras de solo e caracterização física do RCD, do solo e das misturas de solo-RCD. Próximo aos furos de sondagens F4 foram coletadas 30 kg de amostras de solos deformada e indeformada (Figura 2). Em uma usina recicladora na cidade do Recife foram coletados aproximadamente 75 kg de RCD.

Nas amostras do solo e do RCD foram realizados ensaios de granulometria (NBR 7181/2016) e densidade real dos grãos (NBR 6508/1984). Partículas sólidas do RCD retidas na peneira Nº 100 foram adicionadas ao solo expansivo (SE) nas proporções em peso de 10 %, 20 % e 30%, constituindo assim as misturas 90%SE10%RCD, 80%SE20%RCD, 70%SE30%RCD. Em todas as amostras e misturas foram realizados os ensaios de Limite de liquidez (NBR 6459/2016), Limite de Plasticidade (NBR 7180/2016), Limite de Contração (NBR 7183/1982), Expansão “livre” com sobrecarga de 10 kPa e Tensão de Expansão. No solo foi realizado Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV e os ensaios químicos foram utilizados caracterização do solo e do RCD.

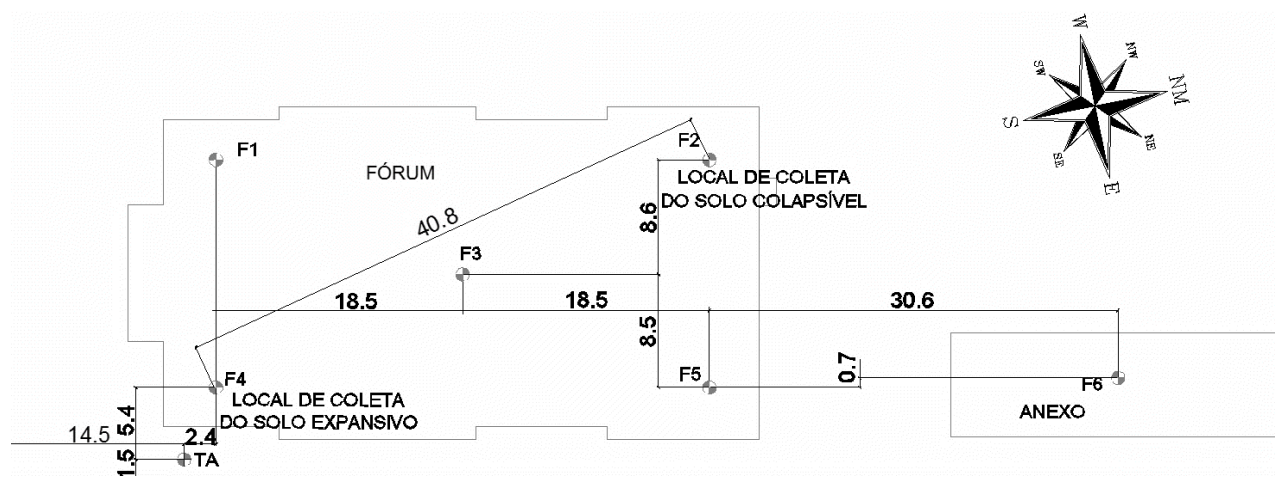


Figura 2 – Localização dos furos de sondagem e de coleta do solo.

Fonte: Adaptado de Oliveira Júnior (2016).

Os ensaios de compactação foram conduzidos com a energia Proctor Normal, visando determinar a umidade ótima de compactação e a massa específica seca aparente máxima do solo e das misturas solo-RCD. Esses dados serviram para preparar os corpos de prova (CP) para ensaios mecânicos e químicos, conforme diretrizes das normas técnicas da ABNT.

Os ensaios químicos foram realizados no Laboratório de Análises Químicas da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), utilizando a metodologia do Manual de Métodos de Análises da Embrapa (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A determinação dos óxidos dos solos foi realizada através do ensaio de espectrometria de Fluorescência de Raios-x (FRX) na Universidade Federal de Pernambuco.

Os ensaios para a caracterização microestrutural foram realizados no Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) da UFPE e as microestruturas do solo foram analisadas através da Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.

A expansibilidade do solo e das misturas com RCD foi avaliada por meio de ensaio de Expansão “livre” e Tensão de Expansão em amostras do solo indeformada e nas amostras compactadas do solo com adição de RCD nas proporções de 10%, 20% e 30%, dois corpos de prova foram utilizados, na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo das misturas. Nos ensaios de Expansão “Livre” as amostras indeformadas do solo expansivo e as amostras compactadas das misturas de solo expansivo com RCD foram moldadas em anéis de aço inoxidável com altura de 20,00 mm e área de 40 cm<sup>2</sup> e foram submetidas a tensão de 10 kPa. A expansão do solo foi acompanhada até sua estabilização.

A Tensão de Expansão do solo foi determinada por 6 (seis) métodos, são eles: Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação (8 CPs); Expansão e Colapso sob Tensão (6 CPs); Volume constante (1 CP); Edométrico Duplo (2 CPs); no Método de Rao *et al.* (1988) (1 CP) e no Método de Justo *et al.* (1984) (7 CPs). Nas misturas de solo-RCD, as tensões de expansão foram determinadas apenas pelo Método de Volume Constante (1 CP para cada mistura).

### 3. Resultados e discussão

### 3.1 Caracterização Física

Na Figura 3a são apresentadas as curvas granulométricas do solo e do RCD. Pode-se verificar que o solo é formado por 39% de argila, 11% de silte, 45% de areia e 5% de pedregulho, pertencendo ao Grupo CL (argilas de baixa plasticidade) e A-6 (solos argilosos), pelas classificações do Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS e Transportation Research Board - TRB, respectivamente. As duas taxonomias classificaram o solo como argiloso considerando apenas a distribuição dos grãos: 50% são grãos grossos (areia e pedregulho) e 50% são grãos finos (areia fina, silte e argila). O RCD é constituído por 12% de argila, 10% de silte, 77% de areia e 1% de pedregulho, sendo classificado como SM (areia siltosa) e A-2-4 (pedregulho ou areia siltosa ou argilosa), pelas classificações da SUCS e TRB, respectivamente. As misturas 90%SE10%RCD, 80%SE20%RCD e 70%SE30%RCD foram classificadas como SC (areias argilosas) e A-2-4 (pedregulhos ou areias siltosas ou argilosas) pelas classificações SUCS e TRB, respectivamente (Figura 3b).

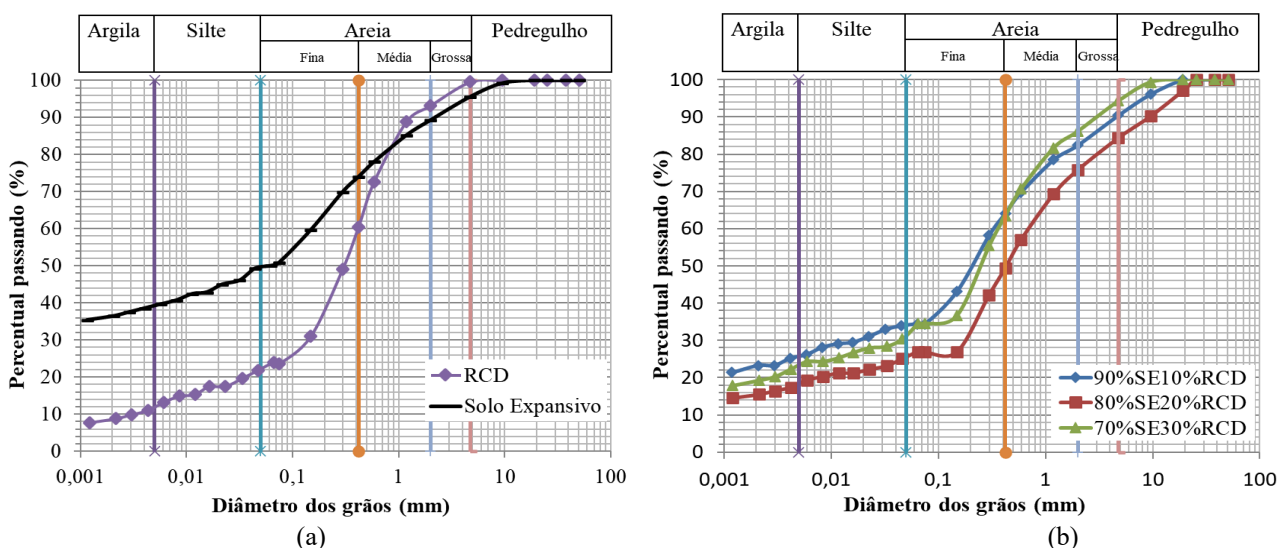


Figura 3 – Curvas granulométricas: (a) do solo e RCD; (b) das misturas solo-RCD.

Fonte: Autores (2025).

Os resultados dos ensaios de consistência realizados no solo, no RCD e nas misturas solo-RCD estão apresentados na Tabela 3. A adição do RCD ao solo modifica a caracterização física do solo, pois há diminuição dos percentuais de argila e silte e aumento nos percentuais de areia e pedregulho. Os Limites de Liquidez e o Índice de Plasticidade diminuíram, isso se deve à diminuição dos percentuais de argila à medida que se acrescenta RCD.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de Limites de Consistência.

Ensaio (%)	Solo	RCD	Misturas solo-RCD		
			90%SE-10%RCD	80%SE-20%RCD	70%SE-30%RCD
LL	28	NL*	23	22	22
LP	16	NP**	14	15	16
IP	12	-	9	7	6
CC	17	NC***	14	14	14

\*NL = Não Líquido; NP\*\* = Não Plástico; NC\*\*\* = Não apresentou contração.

Fonte: Autores (2025).

As curvas de compactação do solo e misturas solo-RCD são apresentadas na Figura 4a. Para o solo, a umidade ótima e peso específico seco aparente máxima foram 12,50% e 19,25 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente. Esses valores são mais típicos em solos granulares, devido principalmente ao fato deste solo ter praticamente o mesmo percentual de finos e grossos (50%). Quanto ao RCD, os valores correspondentes foram 13,69% e 19,00 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente. Nas misturas solo-RCD houve

uma pequena redução no peso específico aparente seco máximo e um aumento na umidade ótima, sendo mais expressivo os resultados da mistura de 90%SE10%RCD, que apresentou valores de umidade ótima de 13,70% e peso específico seco aparente máximo de 18,40 kN/m<sup>3</sup> (Figura 4b).

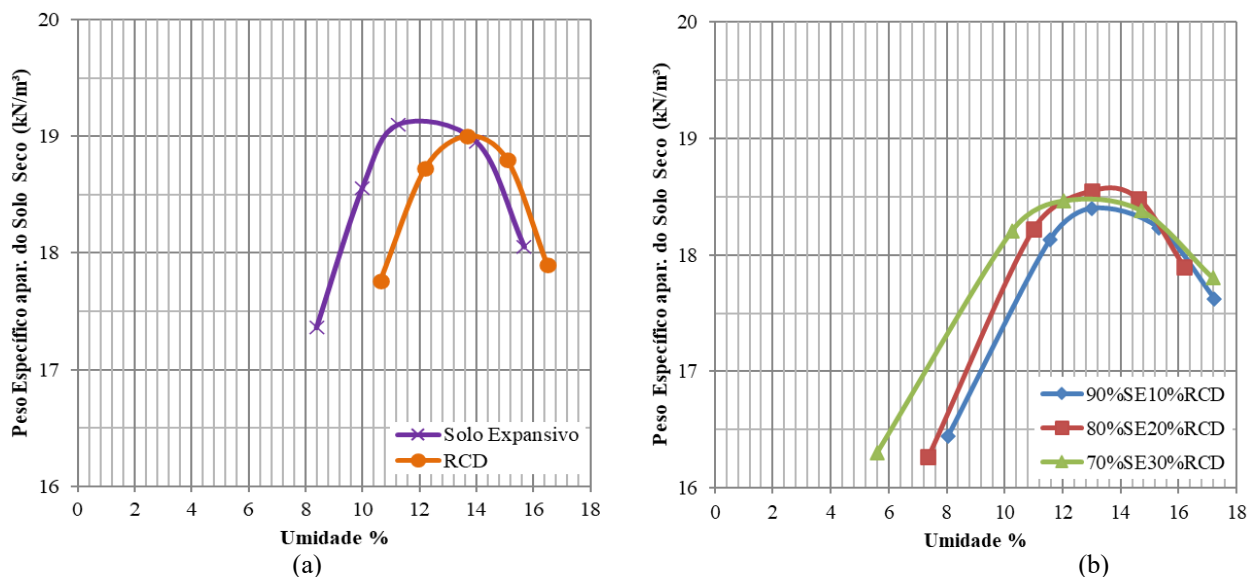


Figura 4 – Curvas de compactação: (a) do solo e do RCD; (b) das misturas solo-RCD.

Fonte: Autores (2025).

### 3.2 Caracterização Química

Os valores de pH e  $\Delta$ pH obtidos para o solo e para o RCD, bem como a classificação das amostras, são apresentados na Tabela 4. A variação entre o pH em água e o pH em KCl ( $\Delta$ pH = pH (KCl) – pH (água)) está relacionada à presença de argilominerais em processo de intemperização e à presença de alumínio trocável ( $H^+$ ,  $Al^{3+}$ ), responsável pela floculação do argilomineral (PAIVA, 2016). Para todas as amostras ensaiadas verifica-se um  $\Delta$ pH negativo indicando que os solos têm predominância de argilas silicatadas, segundo a classificação de Kiehl (1979) apud Moraes (2017). O solo apresenta uma capacidade de troca catiônica de 29,54 cmolc/kg e o RCD de 22,67 cmolc/kg. Teixeira et al. (2017) utiliza como referência 27 cmolc/kg para distinguir valores altos de CTC dos valores baixos. Com base nos valores encontrados nas amostras, o solo apresenta valores altos de CTC e o RCD apresenta baixa capacidade de troca catiônica.

Tabela 4 – Valores do pH e  $\Delta$ pH para o solo expansivo e RCD.

Determinações	Amostras		Classificação do pH (GUIMARÃES, 2002)	
	Solo	RCD	Solo Expansivo	RCD
pH em água	5,87	7,45	Moderadamente ácido	Alcalino
pH em KCl	3,62	5,52	Extremamente ácido	Moderadamente ácido
pH em CaCl <sub>2</sub>	4,70	4,99	Ácido	Ácido
$\Delta$ pH	-2,25	-1,93	Solo Expansivo	RCD

Fonte: Autores (2025).

Todas as amostras de solo possuem valores de CTC acima de 20 cmolc/kg, significando que elas devem apresentar altos teores de montmorilonitas, segundo Buol et al. (1997). O valor de matéria orgânica foi inferior a 5%, portanto, nenhuma amostra é rica em matéria orgânica, conforme Teixeira et al. (2017). As amostras de solo e de RCD apresentam percentual de saturação e base (V) superior a 50%, o que os caracteriza como solos eutróficos. Os valores de saturação com sódio (n) são inferiores a 15%, portanto possuem baixa saturação com sódio. A condutividade elétrica do extrato de saturação é baixa no solo expansivo e RCD (577,4; 196,0 e 1318,0  $\mu$ S/cm/25°C).



### 3.3 Caracterização Microestrutural

As eletromicrografias do solo foram obtidas através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Figura 5). A matriz do solo indeformado apresenta uma textura fina, compacta, preponderante de argilas silicatadas. Os grãos de quartzo são permeados pelas frações de siltes e argilas (Figura 5a). É observada a presença de montmorilonita e uma grande quantidade de poros aplanados, fruto da expansão e contração típicas de argilas expansivas (Figura 5b). A Cavidade “Vugh” também ocorre, sendo predominante do tipo interconectada.

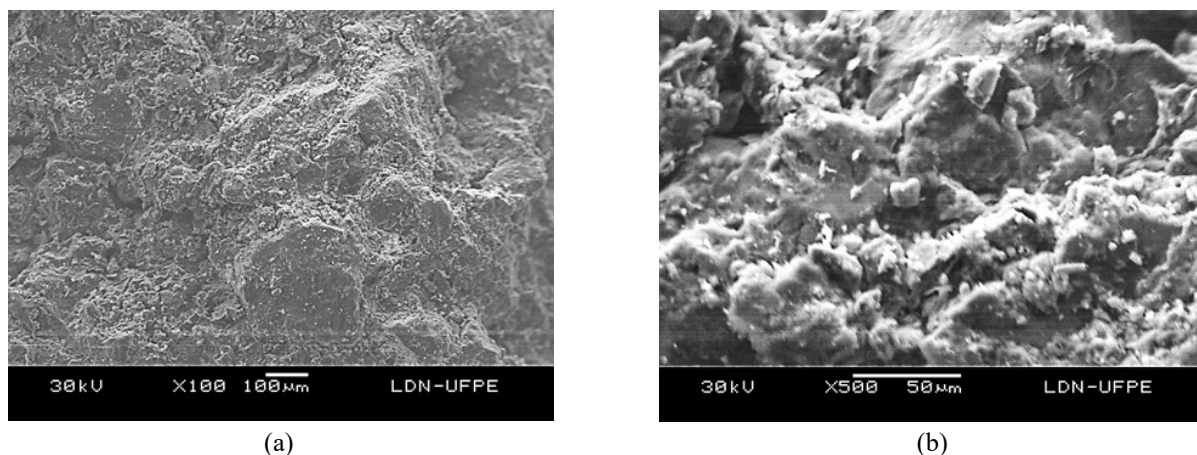


Figura 5 – Eletromicrografias do solo expansivo compactado na condição indeformado: (a) Textura fina, compacta, preponderante de argilas silicatadas e poros aplanados; (b) Os grãos de quartzo permeados pelas frações de siltes e argilas, presença de montmorilonita e cavidade predominante do tipo interconectada.

Fonte: Autores (2025).

### 3.4 Caracterização da Expansividade

Os valores das expansões “livres” ( $El = 100\Delta h/h_0$ ), sob tensão de consolidação de 10 kPa, e da Tensão de Expansão pelo Método a Volume Constante tanto do solo quanto das misturas solo-RCD, encontram-se na Tabela 5. O solo apresentou 8,58% de expansão “livre”, que de acordo com o critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), trata-se de um grau de expansividade alto. Ao adicionar RCD ao solo, o grau de expansividade passa a ser baixo para as três misturas.

Tabela 5 – Valores da Expansão “Livre” com sobrecarga de 10 kPa e da Tensão de Expansão pelo Método a Volume Constante em amostras de solo e das misturas de solo-RCD.

Amostras	Expansão “Livre” kPa (%)	Tensão de Expansão (kPa)
Solo	8,58	81,25
90%SE10%RCD	0,90	26,25
80%SE20%RCD	0,63	23,75
70%SE30%RCD	0,62	20,00

Fonte: Autores (2025).

Os valores da tensões de expansão determinados por vários métodos na argila compactada coletada da Barreira LaPaz de Arahá em Serilla (DELGADO, 1986) e em solos indeformados de Pesqueira-PE (SILVA; FERREIRA, 2007), Petrolândia-PE (FERREIRA; FERREIRA, 2009), Cabrobó-PE (BARBOSA, 2013), Paulista-PE (ARAÚJO et al., 2020) e do solo expansivo de Santa Maria da Boa Vista-PE obtidos no presente artigo são apresentados na Tabela 6. As diferenças nos valores da tensão de expansão está associada à trajetória de tensão seguida na sua determinação antes e depois da inundação. A ordem em que o solo é carregado e inundado ou inundado e carregado ou ainda inundado e carregado simultaneamente para impedir a expansão influencia significativamente no valor da tensão de expansão além da própria

heterogeneidade do processo de formação do solo. Os valores da média, desvio padrão e coeficiente de variação da tensão de expansão estão fortemente influenciados pela trajetória de tensão e formação do solo.

*Tabela 6 – Valores da tensão de expansão obtidos em diferentes solos e métodos.*

	<b>Método de Tensão de Expansão</b>	<b>Tensão de Expansão (kPa)</b>					
		<b>Servilha - Espanha Delgado (1986)</b>	<b>Pesqueira-PE Silva e Ferreira (2007)</b>	<b>Petrolândia- PE, Ferreira e Ferreira (2009)</b>	<b>Cabrobó-PE Barbosa (2013)</b>	<b>Paulista-PE Ferreira <i>et al.</i> (2020)</b>	<b>Santa Maria da Boa Vista-PE Autores (2025)</b>
1	Carregamento após expansão	260	168	333	90	145	242
2	Expansão e colapso sob tensão	150	365	239	100	213	105
3	Volume constante	193	110	242	87	169	81
4	Edométrico Duplo	290	180	308	-	-	320
5	Rao et al. (1988)	--	140	330	120	-	120
6	Justo et al. (1984)	200	310	277	80	-	220
-	Média	218	212	271	95	176	181
-	Desvio Padrão	56	101	42	15,1	34	94
-	Coeficiente de Variação %	27	46	19	7	16	43

*Fonte: Autores (2025).*

As Figuras 6b, 6c, 6d, 6e e 6f mostram os resultados dos métodos de determinação de tensão de expansão. As deformações de expansão diminuem com o tempo à medida que as tensões verticais de inundação aumentam (10, 20, 80, 160, 320 kPa), ocorrendo colapso a 640 kPa. (Figura 6a). Na realidade, durante o processo de deformação devido a inundação com o tempo o que é avaliado é a resultante dos processos de deformação. Após a estabilização das deformações de expansão, o solo é comprimido em estágio de tensão até retornar a deformação nula (Figura 6b).

Os valores médios da tensão de expansão obtido no método 1 (Carregamento após expansão com diferentes sobrecargas), no método 2 (Expansão e colapso sob tensão), no método 3 (Volume constante) e no método 4 (Edométrico duplo) foram de 242 kPa, 105 kPa, 81 kPa e 320 kPa, respectivamente (Figuras 6b, 6c, 6d e 6e). No método 5 (Rao et al., 1988) e no método 6 (Justo et al., 1984) o valor médio da tensão de expansão é 220 kPa e 220 kPa. A sua determinação depende tanto da curva de inundação sob tensão quanto da curva de carregamento em umidade constante (Figura 6f). O estado de tensão inicial do solo (índice de vazios, tensão vertical aplicada e sucção) influencia a variação de volume quando inundado. Comportamento semelhante foi reportado por Delgado (1986), Schreiner (1987) e Ferreira; Vilar (2023).

De acordo com o critério de Jimenez Salas (1980), o solo indeformado é classificado com possíveis danos graves as edificações, considerando ao valor médio da tensão de expansão (181,38 kPa). No solo compactado na umidade ótima e peso específico seco máximo, o valor da Tensão de Expansão pelo Método do Volume Constante é 81,25 kPa, sendo classificado pelo mesmo critério com possíveis danos de fissuras importantes. Após a adição de RCD ao solo houve redução nos valores das Tensões de Expansão, e as misturas de solo-RCD são classificadas com possíveis danos de fissuras pequenas.

A adição de RCD ao solo expansivo de Santa Maria da Boa Vista-PE e a adição de areia aos solos expansivos de Ipojuca-PE (STIVES, 2017) e de Paulista-PE (CONSTANTINO, 2018) diminuíram a Expansão “Livre” (Figura 7a) e a Tensão de Expansão, (Figura 7b). Embora os solos expansivos mencionados sejam de diferentes locais, com diferentes valores de Expansão “Livre” e Tensões de Expansão quando compactados e com diferentes materiais adicionados, é pertinente fazer algumas comparações do efeito da adição de materiais granulares aos solos expansivos. Considerando apenas a adição de 30% de areia observa-se que há uma redução de 31% (Figura 7c) e 55% (Figura 7d) nos valores da Expansão “Livre” e da Tensão de Expansão do solo de Ipojuca-PE respectivamente; há uma redução de 18% (Figura 7c) e 67% (Figura 7d) nos valores da Expansão “Livre” e Tensão de Expansão do solo de Paulista-PE respectivamente. Considerando a mesma porcentagem de 30% de RCD ao solo expansivo de Santa Maria da Boa Vista-PE há uma redução de 93% (Figura 7c) e 75% (Figura 7d) nos valores da Expansão “Livre” e Tensão de Expansão, respectivamente.



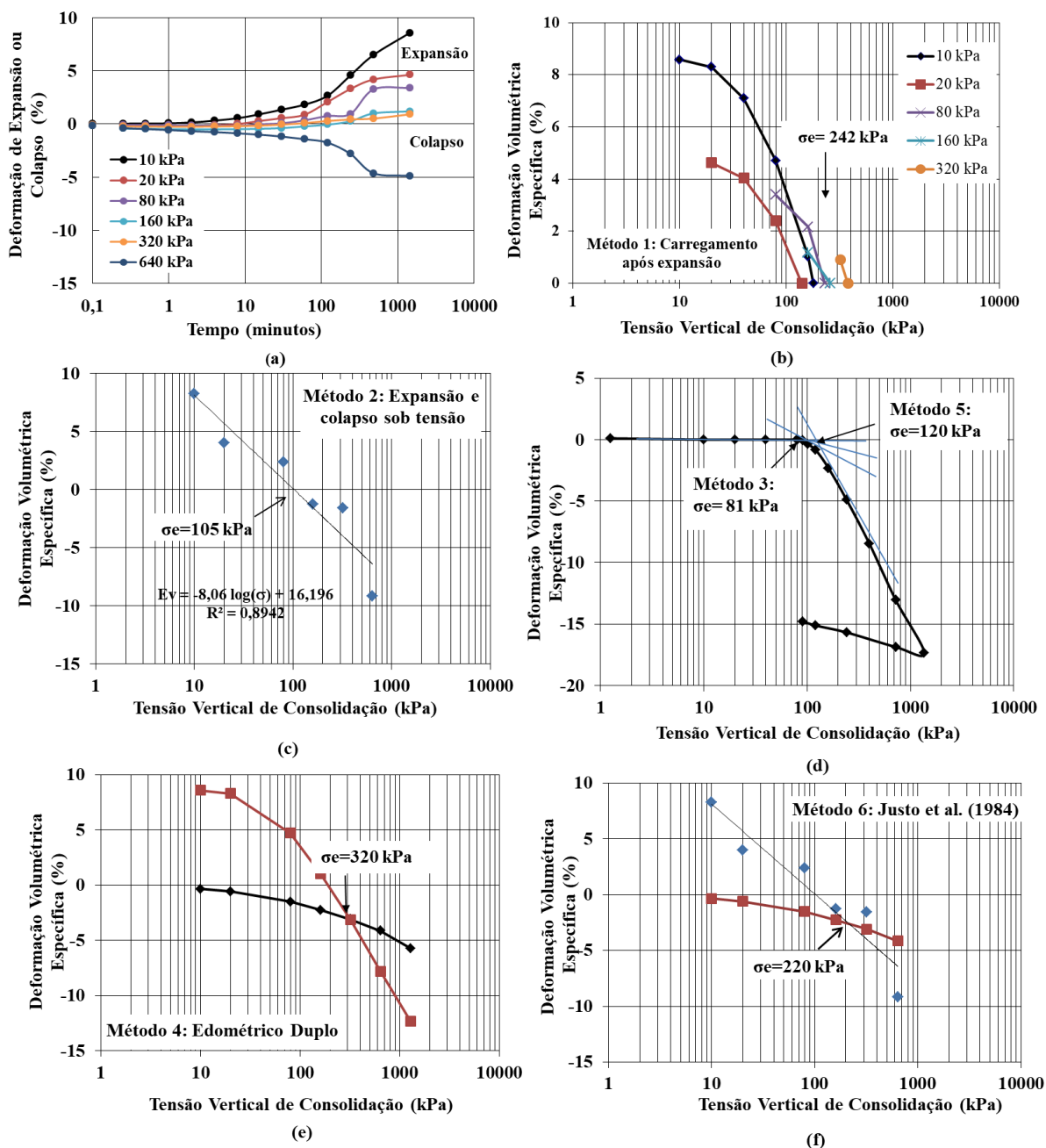


Figura 6 – Métodos de determinação de tensão de expansão: (a) Ensaio de expansão e colapso sob tensão; (b) Método do Carregamento após expansão; (c) Método da Expansão e colapso sob tensão; (d) Método do volume constante e Método de Rao et al (1988); (e) Método do Edométrico duplo; (f) Método de Justo et al (1984).

Fonte: Autores (2025).

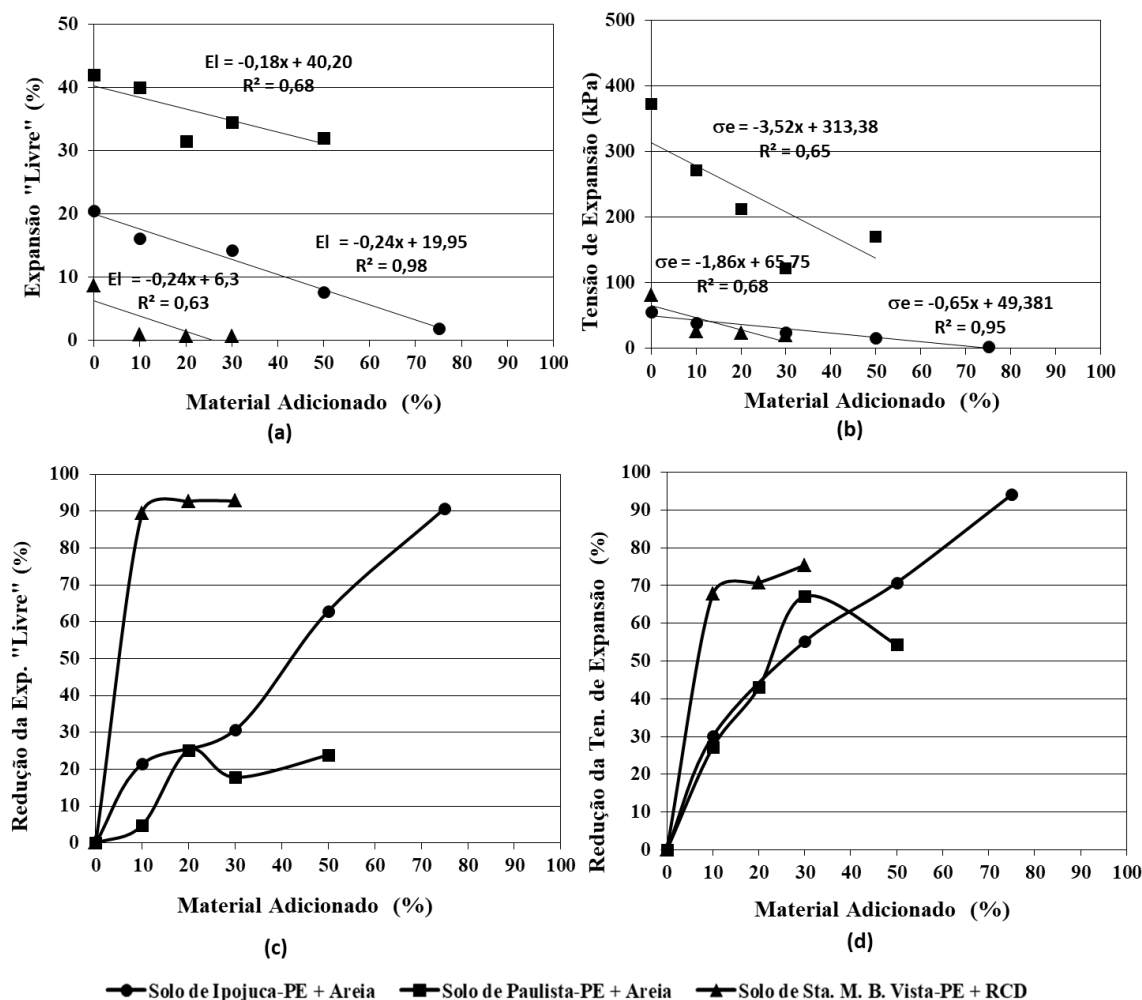


Figura 7 – Valores da Expansão "Livre" (a), Tensão de Expansão (b), Redução da Expansão "Livre" (c) e Redução da Tensão de Expansão em solos expansivos e em misturas desses solos com RCD e com areia.

Fonte: Autores (2025).

A comparação realizada não implica que, de forma geral, a adição de RCD aos solos expansivos, promova uma maior redução na Expansão "Livre" e Tensão de Expansão do que a adição de areia para um mesmo percentual adicionado. Há muitos fatores influentes (origem e formação do solo, mineralogia, quantitativo de argilominerais presentes no solo, estado de tensão, etc) no processo da mistura e na interação com o material granular adicionado. Os resultados indicam um grande potencial da adição de RCD para reduzir a variação de volume de solo expansivo, além de contribuir para mitigação de passivos ambientais por meio de sua aplicação no melhoramento de solos. É importante destacar que a adição de material granular (inerte) a um solo expansivo não modifica a composição mineralógica do argilomineral. A redução da expansão está associada à diminuição da fração de argilominerais na mistura para um mesmo volume compactado e sob a mesma energia de compactação.

#### 4. Considerações finais

O solo foi classificado como CL (Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade) e A-6 (solos argilosos), pelas classificações do SUCS e do TRB, respectivamente.

A expansão "livre" do solo puro foi de 8,58%, que segundo o critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), trata-se de um alto grau de expansividade. Ao adicionar RCD ao solo, o grau de expansividade passou a ser baixo para as três misturas.

A maior redução do valor de expansão “livre” ocorre ao adicionar 30% de RCD ao solo expansivo, apresentando um valor 0,62%, resultando em uma redução de 93% do valor de expansão “livre” do solo.

Conforme o critério de Jimenez Salas (1980), o solo foi classificado com possíveis danos graves considerando o valor médio de sua tensão de expansão (181,38 kPa) e considerando apenas o valor da tensão de expansão pelo Método do Volume Constante (81,25 kPa) foi classificado com possíveis danos de fissuras importantes. Após a adição de RCD ao solo houve redução nos valores das tensões de expansão, classificando as misturas de solo-RCD com possíveis danos de fissuras pequenas. A mistura com 30% de RCD reduziu a tensão de expansão para 20 kPa, configurando uma redução de 75,38% no valor da tensão de expansão pelo Método do Volume Constante. Com isso, é possível verificar a eficiência no melhoramento do solo expansivo por meio de compactação e substituição por RCD na proporção de 30%.

A avaliação da expansividade de um solo é de grande importância, especialmente nas regiões Semiáridas como é o caso de Santa Maria da Boa Vista-PE, pois as construções executadas sobre esses solos podem apresentar vários problemas nas estruturas e fundações, que podem ser evitados através da realização do melhoramento do solo.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao engenheiro civil Rômulo Oliveira por disponibilizar as plantas de locação dos furos de sondagens, os perfis de sondagens e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio ao projeto com processo nº 408102/2023-3.

### Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

\_\_\_\_\_. NBR 6459: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 6508: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7180: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 7181: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 7183: Determinação do limite e relação de contração de solos. Rio de Janeiro, 1982.

Abrelpe - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021*. São Paulo. 54 f, 2021. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2021/>>. Acesso em: 25 de Julho de 2023.

Al-Rawas, A. A., Goosen, M. F. A. and Al-Rawas G. A. GEOLOGY, *Classification and distribution of expansive soils and rocks*. In: Al-Rawas AA, Goosen MFA, editors. *Expansive soils: Recent advances in characterization and treatment*. London: Taylor & Francis Group; p. 3-14, 2006.

Stive, O. F. A., *Análise do comportamento da variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE, p. 117. 2017 .

Barbosa, V.. *Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal*. Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, p.111, 2013.

Buol, S. W.; Hole, F. D.; McCracken, F. D.; Southard, R. J., *Soil Genesis and Classification*. 2.th.ed. Ames: Iowa State University, 527p, 1997.

Chen, F. H. *Foundations on expansive soils*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co, 1988.

- 
- Collares, G. L., Reinert, D. J., Reichert, J. M. e Kaiser, D. R. *Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo*. Rev Bras Cienc Solo. 32:933-42. 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300003>
- Constantino C. S. (2018). Estabilização de um solo expansivo do município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 100f.
- Constantino, C. S. ; Silva, T. C. R. ; Silva, L. V. P.; Ferreira, S. R. M. . *Comportamento geomecânico de um solo expansivo no município de Paulista no estado de Pernambuco com a adição de cal, areia e cinza de casca de arroz*. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, Salvador - BA, 2018.
- Cunha, T. J. F.; Oliveira Neto, M. B. de; Giongo, V.; Teixeira, A. H. De C.; Araujo Filho, J. C. de; SILVA, M. S. L. da; SA, I. B.; TAURA, T. A. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Solos do Município de Santa Maria da Boa Vista: Margem Esquerda do Rio São Francisco*, Estado de Pernambuco, Petrolina. 62 p, 2012.
- 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*, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, Espanha, 1986.
- Ferreira, S. R. M. *Solos Especiais – Colapsáveis, Dispersivos e Expansivos*. Relatório Anual do CNPq, Recife-PE, 156p, 1988.
- Ferreira, S. R. M. *Geology and Pedology Related to Collapsible Soils in Pernambuco*. Proc. Of the 6th IAGE Congress. Balkema, Amsterdam, pp. 617- 621, 1990.
- Ferreira, S. R. M. *Colapso e Expansão em Solos Naturais não Saturados Devidos à Inundação. Rio de Janeiro, 1995, 379 p*. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, Rio de Janeiro-RJ, 1995.
- Ferreira, S. R. M. e Ferreira, M. G.V. X. *Mudanças de volume devido a variação de teor de umidade em um Vertissolo no semiárido de Pernambuco*. Rev Bras Cienc Solo. 33:779-91, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400004>.
- Ferreira, S.R.M.; Araújo, A.G.D.; Barbosa, F.A.S.; Silva, T.C.R.; e Bezerra, I.M.L. *Analysis of changes in volume and propagation of cracks in expansive soil due to changes in water content*. Revista Brasileira de Ciências do Solo. 2020;44:e0190169. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190169>
- Ferreira, S. R. M. e Vilar, O. M. E. *Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. p. 560-596, 2023. <https://doi.org/10.4322/978-65-992098-3-3.cap17>.
- Fleureau J. M., Wei X, Ighil-Ameur, L., Hattab. M. and Bicalho, K.V. *Experimental study of the cracking mechanisms of clay during drying*. In: 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering; Nov 15-18; Buenos Aires, Argentina. Amsterdam: IOS Press; 15. p. 2101-8, 2015.
- Guimarães, J. E. P. (2002). *A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil*. 2ª ed. Recife: Editora Universitária da UFPE.
- Jimenez, S. J. A. *Cimentaciones em terrenos expansivos o colasables*. in: Geotecnia Y Cimentos 111, Vol. 1, ED. Rueda, Madrid.PP533-650, 1980.
- Justo Alpañes, J. L.; Delgado, A. E Ruiz, J. *The influence of stress-path in the collapse –swelling of soils at the laboratory*. Proceedings 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide, pp. 67-71, 1984.
- Marinho, R. P. *Melhoramento de solo colapsível e expansivo de Santa Maria da Boa Vista-PE*. Recife, 2018, 114 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2018.

- Marques, F.A, Souza, R.A.S, Souza, J. E. S, Lima, J. F. W., e Souza Júnior V. S. *Caracterização de Vertissolos da ilha de Fernando de Noronha*, Pernambuco. Rev Bras Cienc Solo. 38:1051-65, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400002>.
- Morais, J. J. O. *Caracterização Geotécnica da expansividade de um solo argiloso do município de Paulista-PE*. Recife, 2017, 127f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- Oliveira Júnior, R. F. *Planta de Locação dos Furos de Sondagem, Teste de absorção dos solos e Fotografias do local de coleta das amostras*, 2016. 02 de ago. 2018. Enviado às 11:35. Mensagem para: rafaella-marinho@hotmail.com.
- Paiva, S. C. *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, Recife, 168 f, 2016.
- Rao, R. R., Rahardjo, H. E Fredjund, D. G. *Close from Heave Solutions for Expansive Soils*. Journ. Geotech. Eng. A.S.C.E. Vol. 114, nº 5, pp. 573-588, 1988.
- Schreiner, H. D. *State of the art review on expansive soils*. Imperial College, London, 1987.
- Seed, H. B.; Woodward, R. J.; Lundgren, R. *Prediction of Swelling Potencial for Compacted Clays*. Proc. ASCE, J. Soil Mechanics and Foundations Division, V.88, sm 3, pp 53-87, 1962.
- Silva, M. J. R.; Ferreira, S. R. M.. *Estudo da variação volume de um solo expansivo de Pesqueira/PE*. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Salvador: ABMS, 2007. v. 1. p. 159- 164.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. *Manual de métodos de análise de solo*. 3ª edição. Brasília-DF: EMBRAPA. 574p, 2017.
- Vargas, M.; Gonçalves, H. H.; Santos, N. B.; Marinho, F. A. M. *Expansive Soils in Brazil. Supplementary Contributions by the Brazilian Society for Soil Mechanics*. 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro-RJ, pp. 77-81, 1989.
- Vijayvergiya, V. N. e Ghazzaly, O. I. *Prediction of Swelling Potencial for Natural Clays*. Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils, Hayfa, Vol. 1, pp. 227-236, 1973.
- Yuan, S., Liu, X., Sloan, S. W. and Buzzi, O. P. *Multi-scale characterization of swelling behaviour of compacted Maryland clay*.ActaGeotech. 11:789-804, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0457-5>.