



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RUTH MARIA DA SILVA SANTOS

ANÁLISE DAS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA COM AS CURVAS
GRANULOMÉTRICAS EM SOLOS EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS

Recife
2023

RUTH MARIA DA SILVA SANTOS

ANÁLISE DAS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA COM AS CURVAS
GRANULOMÉTRICAS EM SOLOS EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia

Orientador (a): Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

Recife
2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4/1502

S237a

Santos, Ruth Maria da Silva.

Análise das curvas de retenção de água com as curvas granulométricas em solos expansivos e colapsíveis. / Ruth Maria da Silva Santos. – 2023.
123 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.

Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Curva de retenção. 3. Solos colapsíveis. 4. Solos expansivos. 5. Métodos de ajuste. 6. Métodos de previsão. 7. Análise estatística. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (orientador). II. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2024-82

RUTH MARIA DA SILVA SANTOS

**ANÁLISE DAS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA COM AS CURVAS
GRANULOMÉTRICAS EM SOLOS EXPANSIVOS E COLAPSÍVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em 26/10/2023

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira – UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Analice França Lima Amorim (examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Stela Fucale (examinadora externa)
Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Pedro Eugênio Silva de Oliveira (examinador externo)
Universidade de Pernambuco

Á Deus autor da minha vida, ao meu esposo que esteve ao meu lado em todos os momentos, aos meus pais que são minha base.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter permitido que eu chegasse até aqui.

Ao meu esposo Maykon Douglas, meu companheiro em todos os momentos, que me apoia e me incentiva a avançar, sempre me mostrando meu potencial.

Aos meus pais Cicero e Percilia, minha base que com todo sacrifício trabalhando de servente de pedreiro e empregada doméstica investiram em mim e sempre me incentivaram a crescer e lutar por uma vida melhor.

Aos meus irmãos Daniel, Marta e Betania meus melhores amigos, cúmplices e incentivadores.

As minhas amigas Eliza Gabriela, Inez Prazeres, Kayelle Lima e Sulamita Gleice por todo apoio, por estar ao meu lado sempre partilhando as dificuldades e alegrias dessa caminhada tornando o caminho mais leve. A minha amiga Rayane Gabriella que me incentivou, a me inscrever no mestrado, no momento que estava desesperançada.

Ao meu orientador Silvio Romero, não tenho palavras para descrever minha gratidão pela sua vida, mesmo antes de ser oficialmente meu orientador já estava me ajudando e me direcionando nessa trajetória do mestrado que é bastante desafiadora, agradeço por ter aceitado me orientar e ter acreditado no meu potencial, agradeço pela paciência e disposição em sempre me ajudar diante de tantas adversidades que se levantaram e me fizeram por diversas vezes pensar em desistir, se não fosse pelo seu apoio, eu afirmo com toda certeza não teria finalizado essa etapa da minha vida. Ao senhor professor Silvio minha eterna gratidão, obrigada por ser esse profissional incrível, sua vida reflete o exemplo de Cristo.

Ao professor Pedro Oliveira pelas orientações e por sempre estar disposto a ajudar não apenas com orientações técnicas, mas incentivando a acreditar no melhor da vida e da engenharia.

Ao Ilton pelo apoio no início da pesquisa, dando algumas diretrizes para o desenvolvimento do estudo.

Aos colegas do mestrado Rafaella, Otavio, Hanna, Jeovana, por dividirem um pouco dessa caminhada.

Aos funcionários da secretaria da Pós-Graduação de Engenharia Civil da UFPE, pela atenção e suporte.

A CAPES pelo apoio financeiro através das bolsas de estudo. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Nos solos não saturados, compreender a distribuição, retenção e liberação de água em diferentes condições é importante. A relação solo-água pode ser descrita pela curva de retenção, que é fundamental para entender o comportamento hídrico do solo e muito importante em várias áreas, como agricultura, geologia e engenharia geotécnica. Existe na literatura diversas propostas de equações de ajuste e de previsão da curva de retenção do solo que são comumente utilizadas para estimar essa importante relação. Essa pesquisa tem como objetivo avaliar a adequação das propostas de ajustes e previsão, além de fazer uma análise estatística dos índices obtidos nos ajustes, como também das propriedades físicas dos solos estudados. Foram analisadas curvas de retenção de água de solos colapsíveis e expansivos obtidas a partir da literatura e ajustadas pelas propostas por Van Genuchten (1980) e Gitirana Jr. e Fredlund (2004) e prevista pela proposta de Mohammadi e Vanclooster (2012) a partir da distribuição granulométrica dos solos. Os ajustes realizados foram comparados com os dados experimentais para se verificar qual proposta representa melhor esses pontos. Foi conduzida uma análise estatística das características físicas dos solos obtidos nos trabalhos consultados e dos dados extraídos dos ajustes e previsões das curvas de retenção. Essa análise foi realizada utilizando o programa ORANGE que possibilitou identificar a influência das variáveis estudadas na identificação dos solos colapsíveis e expansivos. O ajuste de Van Genuchten (1980) foi preciso ao descrever as curvas unimodais dos solos colapsíveis e expansivos, mas não conseguiu capturar adequadamente a forma bimodal nas curvas em ambos os solos. Já o método proposto por Gitirana e Fredlund (2004) teve um bom desempenho tanto nos solos unimodais quanto nos bimodais, sejam eles colapsíveis ou expansivos. O método de Mohammadi e Vanclooster (2012) foi eficaz ao prever a curva de retenção em solos arenosos e siltosos, nos demais solos a forma característica das curvas de retenção não foram bem representadas, para esse método o coeficiente de determinação R^2 não se mostrou uma medida estatística representativa. Os solos expansivos exibiram valores mais elevados de percentual de argila, Limite de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP) em comparação com os solos colapsíveis. Por outro lado, os solos colapsíveis apresentaram valores superiores de índice de vazios, índices de ajuste de Van Genuchten (1980) e Gitirana e Fredlund (2004), bem como inclinação das curvas de retenção e curvas granulométricas em relação aos solos expansivos.

Palavras-chave: curva de retenção; solos colapsíveis; solos expansivos; métodos de ajuste; métodos de previsão; análise estatística.

ABSTRACT

In unsaturated soils, it is important to understand the distribution, retention and release of water under different conditions. The soil-water relationship can be described by the retention curve, it is fundamental to understanding the water behavior of the soil and very important in several areas, such as agriculture, geology and geotechnical engineering. There are several proposals in the literature for adjustment and prediction equations for the soil retention curve that are commonly used to estimate this important relationship. This research aims to evaluate the adequacy of adjustment and forecast proposals, in addition to carrying out a statistical analysis of the indices obtained in the adjustments, as well as the physical properties of the soils studied. Water retention curves of collapsible and expansive soils obtained from the literature and adjusted by the proposals of Van Genuchten (1980) and Gitirana Jr. and Fredlund (2004) and predicted by the proposal of Mohammadi and Vanclooster (2012) were demonstrated based on the granulometric distribution of soils. The adjustments made were compared with the experimental data to verify which proposal best represents these points. A statistical analysis was carried out of the physical characteristics of the soils obtained in the works consulted and of the data extracted from the adjustments and variations of the retention curves. This analysis was carried out using the ORANGE program, which made it possible to identify the influence of scientific variables in the identification of collapsible and expansive soils. Van Genuchten's (1980) fit was accurate in describing the unimodal curves of collapsible and expansive soils, but failed to adequately capture the bimodal shape of the curves in both soils. The method proposed by Gitirana and Fredlund (2004) performed well in both unimodal and bimodal soils, whether collapsible or expansive. The method by Mohammadi and Vanclooster (2012) was effective in predicting the retention curve in sandy and silty soils, in other soils the characteristic shape of the retention curves were not well represented, for this method the coefficient of determination R^2 did not prove to be an representative statistical measure. Expansive soils exhibited higher values of clay percentage, Liquidity Limit (LL) and Plasticity Index (PI) compared to collapsible soils. On the other hand, collapsible soils presented higher void index values, adjustment indices from Van Genuchten (1980) and Gitirana and Fredlund (2004), as well as the slope of retention curves and granulometric curves in relation to expansive soils.

Keywords: retention curve; collapsible soils; expansive soils; adjustment methods; forecasting methods; statistical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço hídrico.	17
Figura 2 – Representação das fases do solo não saturado.	19
Figura 3 – Estrutura dos solos granulares.....	21
Figura 4 – Modos de associações de partículas em suspensões de argila: a) Dispersos e defloculados, b) agregados, mas defloculados, c) floculação borda a face, mas disperso, d) floculado de ponta a ponta, mas disperso, e) floculado e agregado de ponta a ponta, f) de ponta a ponta floculado e agregado, e g) borda a face e borda a borda floculada e agregada.	22
Figura 5 – Distribuição dos diâmetros dos poros: a) distribuição trimodal, b) distribuição bimodal, c) distribuição unimodal solo bem graduado e d) distribuição unimodal solo uniforme.	23
Figura 6 – Tipos de graduação dos solos grossos.....	24
Figura 7 – Estados e limites de consistência	26
Figura 8 – Parâmetros de uma curva de retenção	27
Figura 9 – Parâmetros da Curva de retenção bimodal.....	28
Figura 10 – Alguns formatos típicos de curvas de retenção.....	29
Figura 11 – Problema ocasionado por solo colapsível	33
Figura 12 – Exemplos de curva de retenção de solos colapsíveis	34
Figura 13 – Problemas ocasionados por solos expansivos	35
Figura 14 – Exemplos de curva de retenção de solos expansivos	35
Figura 15 – Fluxogramas das pesquisas realizadas dos solos expansivos e colapsíveis.	39
Figura 16 – Planilha utilizada no ajuste de Van Genuchten (1980)	42
Figura 17 – Planilha utilizada no ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) para solos unimodais	43
Figura 18 – Planilha utilizada no ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) para solos bimodais ..	44
Figura 19 – Planilha utilizada na previsão da curva de retenção pela proposta de Mohammadi e Vanclooster (2012)	45
Figura 20 – Curvas granulométricas dos solos colapsíveis - a) CL, b) CL-ML, MH, ML, ML-MH, c) SC, SC-SM, SM, SP, SP-SM.	47
Figura 21 – Classificação pelo critério de Jennings e Knight (1975).....	51
Figura 22 – Grau de colapsibilidade dos solos	51
Figura 23 – Curvas granulométricas dos solos expansivos –a) CH, b) CH e CL, c) MH.	52
Figura 24 – Classificações do grau de expansão relacionada ao Limite de Liquidez (LL) e ao Índice de Plasticidade (IP)*.....	56

Figura 25 – Comparativo entre os 3 critérios de classificação de expansividade dos solos estudados.....	57
Figura 26 – Ajustes e previsão das curvas de retenção unimodais dos solos colapsíveis.	59
Figura 27 – Ajustes e previsão das curvas de retenção bimodais dos solos colapsíveis.	62
Figura 28 – Ajustes e previsão das curvas de retenção unimodal dos solos expansivos.....	67
Figura 29 – Ajustes e previsão das curvas de retenção bimodal dos solos expansivos.....	71
Figura 30 – Correlação entre a inclinação da curva de retenção e da curva granulométrica nos (a) solos expansivos e (b) colapsíveis estudados.....	76
Figura 31 – Índice de vazios dos solos expansivos e colapsíveis estudados.....	77
Figura 32 – (a) Peso específico real dos grãos e (b) limite de plasticidade dos solos expansivos e colapsíveis.....	77
Figura 33 – (a) Limite de liquidez, (b) percentual de argila e (c) índice de plasticidade dos solos colapsíveis e expansivos.....	78
Figura 34 – (a) Variação do índice n , (b) do índice α e (c) do índice d nos solos colapsíveis e expansivos.....	79
Figura 35 – (a) Inclinação da curva de retenção e (b) inclinação da curva granulométrica dos colapsíveis e expansivos.	80
Figura 36 – (a) Correlação entre o índice n e a inclinação da curva de retenção nos solos colapsíveis, (b) Correlação entre o índice n e a inclinação da curva granulométrica nos solos colapsíveis.....	81
Figura 37 – (a) Correlação entre o índice n e a inclinação da curva de retenção nos solos expansivos, (b) Correlação entre o índice n e a inclinação da curva granulométrica nos solos expansivos.....	82
Figura 38 – Variação do potencial de colapso com: (a) percentual de argila e (b) percentual de areia.....	85
Figura 39 – Variação do potencial de colapso dos solos unimodais e bimodais.....	87
Figura 40 – Variação do (a) índice de vazios e do (b) peso específico das partículas solidas dos solos colapsíveis unimodais e bimodais	88
Figura 41 – Variação do (a) limite de liquidez e do (b) percentual de argila dos solos colapsíveis unimodais e bimodais	89
Figura 42 – Variação do (a) índice de plasticidade e (b) limite de plasticidade dos solos colapsíveis unimodais e bimodais	90
Figura 43 – Variação do (a) índice n e do (b) índice α e do (c) índice d dos solos colapsíveis unimodais e bimodais	91

Figura 44 – (a) Inclinação da curva de retenção e (b) inclinação da curva granulométrica dos colapsíveis unimodais e bimodais	92
Figura 45 – Análise do grau de expansividade e percentual de argila: (a) Critério de Daksanamurthy & Raman (1973) e (b) Seed et al. (1962)	94
Figura 46 – Análise do grau de expansividade pelo critério de Chen (1965) e o percentual de argila.	95
Figura 47 – Análise do grau de expansividade e percentual de areia: (a) Critério de Daksanamurthy & Raman (1973), (b) Seed et al. (1962) e (c) Chen (1965).	96
Figura 48 – Variação da expansão livre nos solos unimodais e bimodais.	97
Figura 49 – Análise da variação da tensão de expansão dos solos unimodais e bimodais.	97
Figura 50 – Variação do (a) índice de vazios e do (b) peso específico das partículas solidas dos solos expansivos unimodais e bimodais	98
Figura 51 – Variação do (a) limite de liquidez e do (b) percentual de argila dos solos expansivos unimodais e bimodais	99
Figura 52 – Variação do (a) índice de plasticidade e do (b) limite de plasticidade dos solos expansivos unimodais e bimodais	100
Figura 53 – Variação do (a) índice n , do (b) índice α e do (c) índice d dos solos expansivos unimodais e bimodais	101
Figura 54 – (a) Inclinação da curva de retenção e (b) inclinação da curva granulométrica dos solos expansivos unimodais e bimodais.	102
Figura 55 – Características físicas do expansivo bimodal de Cabrobó-PE.	106
Figura 56 – Características físicas do solo colapsível bimodal de Brasília-DF.	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Equações de ajuste para a curva de retenção	30
Quadro 2 – Características dos solos expansivos e colapsíveis utilizadas neste estudo.....	40
Quadro 3 – Interpretação do coeficiente de correlação (a) e coeficiente de determinação (b)	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas dos solos colapsíveis.	49
Tabela 2 – Classificação de colapsibilidade pelo critério de Jennings & Knight (1975).	50
Tabela 3 – Características físicas dos solos expansivos.	54
Tabela 4 – Capacidade de expansão dos solos estudados.	55
Tabela 5 – Índices e coeficientes de determinação utilizados nos ajustes e previsão dos solos colapsíveis com curva unimodal.	61
Tabela 6 – Índices e coeficientes de determinação utilizados nos ajustes e previsão dos solos colapsíveis com curva bimodal.	65
Tabela 7 – Índices e coeficientes de correlação utilizados nos ajustes dos solos expansivos unimodais.	70
Tabela 8 – Índices e coeficientes de determinação utilizados nos ajustes e previsão dos solos expansivos bimodais.	73
Tabela 9 – Resumo das características físicas e dos índices de ajuste dos solos expansivos e colapsíveis.	83
Tabela 10 – Resumo das características físicas e dos índices de ajuste dos solos colapsíveis unimodais e bimodais.	93
Tabela 11 – Resumo das características físicas e dos índices de ajuste dos solos expansivos unimodais e bimodais.	103

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA.....	14
1.2	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	15
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	17
2.1	SOLOS NÃO SATURADOS	17
2.2	CURVA DE RETENÇÃO.....	26
2.3	AJUSTES E PROPOSTA DE PREVISÃO DE CURVAS DE RETENÇÃO.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	ESTRATÉGIA DE PESQUISA UTILIZADA.....	36
3.2	ANÁLISE DOS DOCUMENTOS	37
3.3	EXTRAÇÃO DE DADOS E ELABORAÇÃO DOS ARQUIVOS SUPORTE PARA REALIZAR OS AJUSTES	40
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SOLOS E DOS RESULTADOS DOS AJUSTES.....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS COLAPSÍVEIS ESTUDADOS	47
4.2	CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS EXPANSIVOS ESTUDADOS.....	52
4.3	AJUSTES E PREVISÃO DAS CURVAS DE RETENÇÃO DOS SOLOS COLAPSÍVEIS	58
4.3.1	Ajuste e previsão das curvas de retenção unimodal dos solos colapsíveis.....	58
4.3.2	Ajuste e previsão da curva de retenção bimodal dos solos colapsíveis.	61
4.4	AJUSTES E PREVISÃO DAS CURVAS DE RETENÇÃO DOS SOLOS EXPANSIVOS.	66
4.4.1	Ajuste e previsão da curva de retenção unimodal dos solos expansivos.....	66
4.4.1	Ajuste e previsão da curva de retenção bimodal dos solos expansivos	71
4.5	ANÁLISE DOS DADOS EXTRAÍDOS	75
4.5.1	Análise comparativa entre os solos colapsíveis e os expansivos	75
4.5.2	Análise comparativa dos solos colapsíveis unimodais e bimodais.....	84
4.5.3	Análise comparativa dos solos expansivos unimodais e bimodais.....	94
4.5.4	Análise das características físicas entre um solo expansivo bimodal e um solo colapsível bimodal.....	104
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108

5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
	REFERÊNCIAS	111
	APÊNDICE A –ANÁLISES ESTATÍSTICAS EM FUNÇÃO DOS SOLOS	
	COLAPSÍVEIS E EXPANSIVOS ESTUDADOS.....	118
	APÊNDICE B –ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS SOLOS	
	COLAPSÍVEIS EM FUNÇÃO DO TIPO DA CURVA DE RETENÇÃO	120
	APÊNDICE C –ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS SOLOS	
	EXPANSIVOS EM FUNÇÃO DO TIPO DA CURVA DE RETENÇÃO	122

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

Os solos não saturados podem apresentar variações volumétricas quando sofrem mudanças de umidade, essas variações podem ser tanto redução que são chamados de solos colapsíveis (colapso estrutural ou deformação oriunda da redução de sucção), quanto de aumento de volume chamados de solos expansivos (expansão estrutural mineralógica), sendo assim compreender a distribuição, retenção e liberação de água é fundamental no estudo desses solos. A curva de retenção é a relação entre a quantidade de água do solo e a sucção, segundo Fredlund (2002) e Fredlund (2006) apud Junior et al. (2015) é uma relação chave para a implementação da mecânica dos solos não saturados na prática da engenharia. Dependendo do material as curvas de retenção podem apresentar formatos diferentes que são influenciados por diversos fatores físicos e eletroquímicos. As curvas se dividem em dois grupos: unimodais (aquelas que apresentam um único trecho de dessaturação, típicos de materiais altamente plásticos) e bimodais (apresentam dois trechos de dessaturação).

A curva de retenção de água no solo é muito útil nos meios científicos, como por exemplo na rotina de produtores agrícolas, pois em paralelo ao seu conhecimento é possível prever outras particularidades dos solos como a porosidade drenável, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, condutividade hidráulica não saturada e balanço hídrico, verificando desta forma a variação de armazenamento de água no solo, (NASCIMENTO, 2009).

Considerar a sucção como uma nova variável de estado de tensão é fundamental para entender o desempenho geotécnico de muitas obras civis. Aterros aplicados na construção de rodovias, terraplenagem, barreiras capilares e barragens de terras, entre outros tipos de estruturas, podem permanecer não saturados ao longo de sua vida útil. Por exemplo, os movimentos de massa em encostas, podem estar associados somente a mudanças no perfil de absorção do solo. Portanto, a estabilidade dos taludes pode ser melhorada com o aprimoramento dos estudos sobre o estado não saturado do solo. Desta forma, o conhecimento do comportamento geomecânico (resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade) de diversas obras poderá ser melhor compreendido considerando os fundamentos teóricos da mecânica dos solos não saturados, (MASSOCCO, 2017).

Vários pesquisadores sugeriram equações para simular a curva de retenção do solo dentre eles pode se destacar Gardner (1856); Brooks e Corey (1964); Brutsaert (1966); Van

Genuchten (1980); Fredlund e Xing (1984), Gitirana Jr. e Fredlund (2004). Outros propõem a previsão da curva através da distribuição granulométrica como exemplo Arya e Paris (1981); Arya e Dierolf, (1989); Aubertin et al. (2003); Mohammadi e Vanclooster (2012). Estimar essa relação é de grande valia em planejamentos de obras, norteando tomadas de decisões iniciais ao desenvolvimento de projetos, entre outras utilidades, além de serem utilizadas em modelos de comportamento do solo.

Na literatura é possível encontrar diversos estudos que abordam o uso das equações de ajustes, dentre eles está a pesquisa de Gercovich e Sayão (2002) que avaliaram o desempenho de quatro equações de ajuste em onze solos brasileiros; Wang S. et al (2021) que comparou o desempenho de quatro tipos de equações de ajuste das curvas de retenção em quatro tipos de solos; Souza Júnior et al. (2021) realizou uma comparação estatística entre equações de ajuste da curva de retenção em um solo de cobertura de aterro sanitário; Galvão et al. (2020) realizou a comparação entre duas equações de ajuste da curva de retenção em uma amostra de solo; Costa et al. (2008) comparou o ajuste realizado através de duas propostas num latossolo vermelho-amarelo; Wang C. et al. (2021) realizou a comparação do desempenho de três métodos de previsão da curva de retenção baseado na distribuição do tamanho das partículas. A avaliação da adequação dessas propostas é de suma importância, e essa análise deve ser realizada de maneira contínua para validar e aprimorar os métodos de ajustes da curva de retenção existentes.

Esta pesquisa buscou realizar uma comparação entre duas propostas de ajuste e uma proposta de previsão a partir da granulometria da curva de retenção de solos colapsíveis e expansivos extraídos da literatura, como também realizou uma análise estatística dos índices desses ajustes em conjunto com as características físicas dos 60 solos estudados de diversas partes do mundo.

1.2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.

Analisar as curvas de retenção de água de solos colapsíveis e expansivos obtidas a partir da literatura e ajustadas pelas propostas por Van Genuchten (1980) e Gitirana Jr. e Fredlund (2004) e prevista pela proposta de Mohammadi e Vanclooster (2012) a partir da distribuição granulométrica dos solos e realizar a análise estatísticas dos índices desses ajustes e das características físicas dos solos estudados.

Os objetivos específicos são:

- Coletar dados da literatura de curvas de retenção de solos colapsíveis e expansivos, relacionadas com as características físicas e geomecânicas;
- Realizar os ajustes e a previsão da curva de retenção dos solos colapsíveis e expansivos;
- Comparar o desempenho das propostas de ajustes e de previsão da curva de retenção na representação dos dados experimentais dos solos estudados;
- Realizar a análise estatística dos índices de ajustes das propostas utilizadas e das características físicas dos solos;
- Associar o formato da curva de retenção com outras características físicas dos solos, como MEV, ensaios de quantificação de potencial de expansividade e colapsibilidade, curvas de distribuição e frequência dos grãos em dois solos com comportamento bimodal.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos da seguinte maneira:

Capítulo 1 - (Introdução): Exploração da importância do tema abordado, delimitação dos objetivos gerais e específicos da pesquisa.

Capítulo 2 - (Revisão bibliográfica): Apresentação dos conceitos necessários para compreender e desenvolver a pesquisa, incluindo tópicos como solos não saturados, solos colapsíveis e expansivos, curvas de retenção, bem como ajustes e previsões de curvas de retenção propostos na literatura. Esses elementos são fundamentais para o entendimento e progresso da pesquisa.

Capítulo 3 - (Materiais e métodos): Descrição das estratégias e critérios utilizados na seleção dos estudos incluídos neste trabalho, juntamente com as ferramentas desenvolvidas e aplicadas durante a pesquisa para alcançar os objetivos estabelecidos.

Capítulo 4 - (Análise e discussões): Apresentação dos resultados dos ajustes e previsões das curvas de retenção, análise das características físicas e dos índices dos ajustes dos solos, estabelecendo conexões com outras pesquisas disponíveis na literatura.

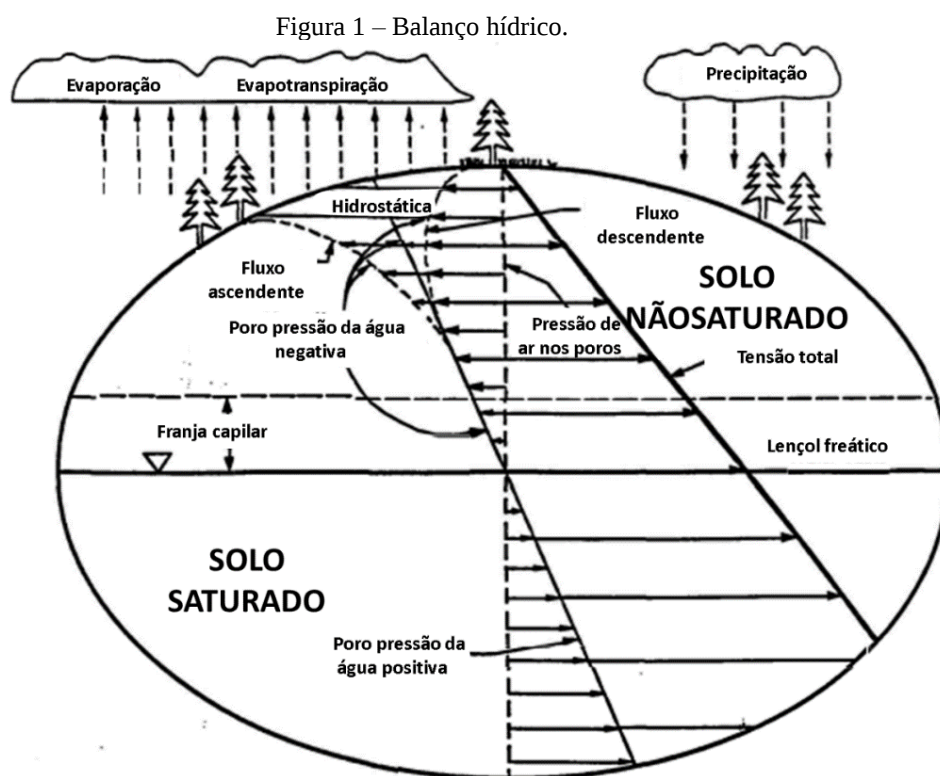
Capítulo 5 - (Considerações finais): Resumo das conclusões derivadas do desenvolvimento do estudo em questão.

Por fim são apresentados as referências e os apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 SOLOS NÃO SATURADOS

O solo não saturado é definido como o solo cujos vazios não estão completamente preenchidos por água, são resultado de um conjunto de fatores, dentre os quais se destacam: a proximidade com a superfície do terreno, submetido à evaporação; os gradientes de carga hidráulica que determinam o regime de fluxo, especialmente o gradiente correspondente à carga altimétrica; a posição do lençol d'água, muitas vezes profundo. Pode-se considerar que outro fator primordial para o estabelecimento de uma condição predominantemente não saturada do solo é o balanço hídrico ao longo do ano. Regiões áridas e semiáridas, assim como regiões com períodos chuvosos limitados a uma época específica do ano, são submetidas a condições atmosféricas que promovem a não saturação do solo, (Figura 1).



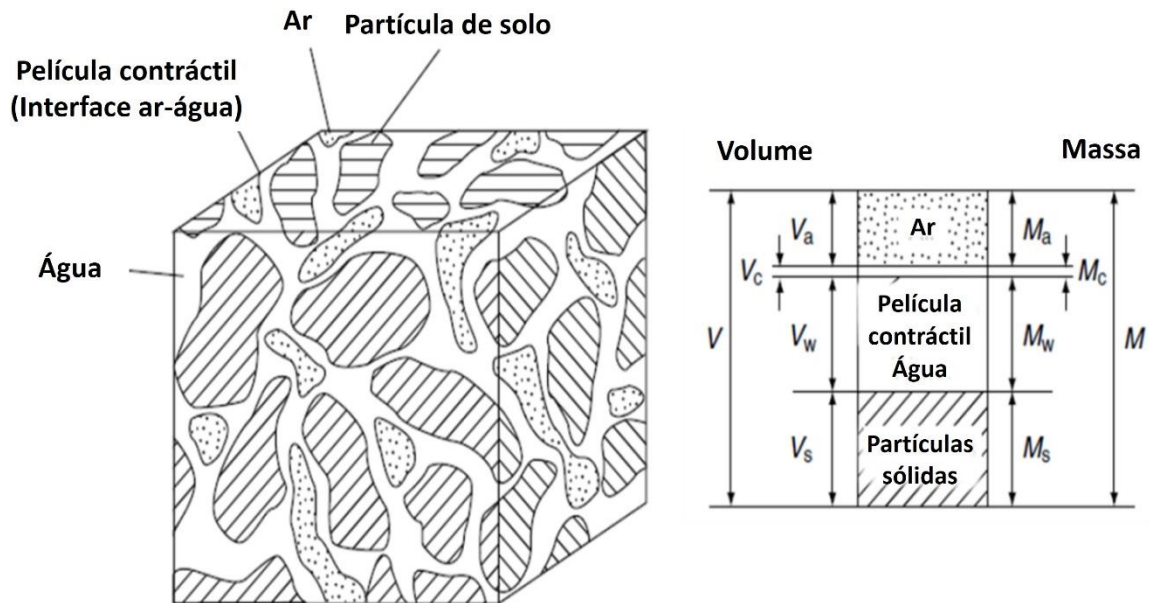
Fonte: Clifton, Wilson e Barbour (1999, p. 145)

Dependendo do foco a ser considerado e do problema a ser solucionado o solo não saturado é composto por três fases (partículas sólidas, água, ar) ou quatro fases: partículas

sólidas, água, ar e película contrátil. Segundo Fredlund e Rahardjo (1993) a fase sólida é constituída por partículas sólidas e água adsorvida; já a fase líquida é composta de água livre, ar e sais dissolvidos, a fase gasosa por ar livre e por vapor de água e a película contrátil é a interface entre a água livre e o ar livre. Fredlund e Rahardjo (1993) ainda afirma que película contrátil precisa ser reconhecida como uma fase do solo, devido às suas propriedades e ao seu papel no comportamento do mesmo, uma de suas características é a possibilidade de exercer uma tensão superficial nos materiais contíguos, fazendo com que a interface ar-água se comporte como uma membrana elástica. O comportamento mecânico do solo sofre interferência dessa membrana, no momento em que ela interage com as partículas sólidas, quando a fase gasosa é contínua. A partir do momento que o solo apresentar água intersticial ou bolhas de ar oclusas, o meio multifásico não é mais um meio contínuo e o solo não saturado pode ser analisado como um sistema bifásico, contanto que o fluido que preencha os poros seja compressível.

Sendo assim o solo não saturado apresenta um comportamento bifásico, uma fase é formada pelas partículas de solo e a película contrátil que entram em equilíbrio deformando-se quando submetidas a variações de esforços de tensão e a outra é formada pelo ar e água que fluem nos poros do solo quando submetidas a um gradiente de tensão. Se tratando de massa e volume o solo não saturado é considerado trifásico, pois o volume da película contrátil é muito pequeno e sua massa pode ser considerada como parte da massa de água e por fim considerando o estado de tensão de um sistema multifásico contínuo a película contrátil tem que ser considerada como uma fase independente (Figura 2).

Figura 2 – Representação das fases do solo não saturado.



Fonte: Ng e Menzies (2007, p. 21).

A continuidade das fases fluidas no solo não saturado varia à medida que o solo for submetido à variação de grau de saturação. A transição da condição de continuidade das fases do solo deve ser bem compreendida, pois existem importantes implicações com respeito ao comportamento do solo. É importante observar que o grau de saturação que corresponde à passagem de condição contínua para descontínua pode depender também da textura do solo, assim como da distribuição de poros. É fundamental para o estudo do solo não saturado entender a condição de continuidade das fases e os aspectos referentes à influência da textura.

Barden (1965) descreve as fases do solo em função o grau de saturação:

- $S < 50\%$ - a água presente no solo está aderida a estrutura por forças capilares e o ar é contínuo. Durante a consolidação do solo apenas o ar flui.
- $50\% < S < 90\%$ - a água ainda não flui significativamente no solo, os vazios de ar ainda são contínuos e o ar permanece sendo o único a fluir no solo.
- Valores próximos à umidade ótima - o ar e a água fluem simultaneamente e/ou separadamente.
- $S > 90\%$ - o ar está ocluso e não flui sozinho, pode ocorrer do ar se unir com a água dos poros livres formando um fluido compressível homogêneo, mas em sua maioria o ar será estático, preso na estrutura.
- $S > 95\%$ - o ar presente está preso na estrutura e a água que flui no solo será razoavelmente incompressível.

Segundo Lloret (1982) a deformabilidade do solo não saturado está relacionada diretamente com a intensidade da deformabilidade da estrutura sólida do solo e da mistura ar-água. Em função do grau de saturação ele classifica a deformabilidade em três fases:

- $S < 0,7$ – o volume de ar nos poros é grande e a deformabilidade da mistura ar-água é controlada pelo ar, logo a sua rigidez é quase nula. Sendo assim a deformação do solo é dirigida pela estrutura sólida.
- $0,7 < S < 0,9$ – a deformabilidade da mistura ar-água se equipara a da estrutura sólida. O efeito da estrutura sólida ainda é importante no comportamento do solo.
- $S > 0,9$ - a mistura ar-água é mais rígida que a estrutura sólida, sendo assim a deformabilidade da mistura controla grande parte do comportamento do solo.

O comportamento do solo não saturado é interpretado em função de duas variáveis de estado de tensão independentes, sendo conveniente a separação das tensões totais e da poropressão de água. Tem-se, assim, a tensão total líquida, $(\sigma - u_a)$ e a sucção matricial, $(u_a - u_w)$. A sucção total é composta por sucção matricial relacionada à estrutura do solo e osmótica essa última está relacionada com a concentração de sais no solo e é frequentemente desprezada sob o argumento de que suas variações são pequenas e o impacto dessas variações em problemas típicos de engenharia não é relevante.

A infiltração de água no solo produz variações no estado do solo, ou seja, nas tensões (totais líquidas e sucção matricial) e nos índices físicos, como a umidade e o grau de saturação. O solo sofre essas alterações ao longo do ano, devido às variações sazonais da condição atmosférica. As mudanças de umidade e sucção matricial em trajetórias de molhagem provocam variações na resistência ao cisalhamento do solo (geralmente diminuição) e podem causar variações volumétricas. As variações volumétricas podem ser tanto de redução (colapso estrutural ou deformação oriunda da redução da sucção) quanto de aumento de volume (expansão estrutural ou mineralógica). De forma geral, os principais problemas de deslocamento ou deformação provocados pela infiltração de água no solo podem ser classificados em: problemas associados com solos colapsíveis e problemas associados com solos expansivos.

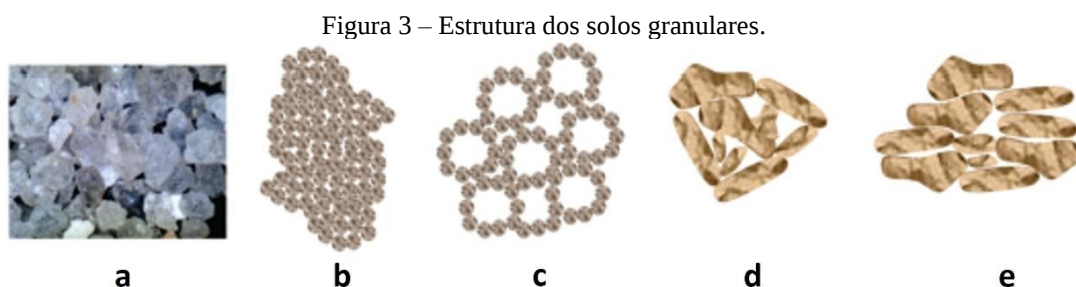
Segundo a (EMBRAPA, 2022) a estrutura do solo é o arranjo estabelecido pela ligação das partículas primárias do solo entre si por substâncias diversas encontradas no solo, como matéria orgânica, óxidos de ferro, alumínio, carbonatos, sílica, etc. Este arranjo dá origem aos agregados que são unidades estruturais separadas entre si por superfícies de fraquezas.

A estrutura interfere diretamente no comportamento mecânico e hidráulico do solo e está dividida em macroestrutura que diz respeito à observação do todo e microestrutura que é a parte do arranjo estrutural dos grãos e partículas e dos próprios agregados. Os microporos estão presentes no interior dos agregados e os macroporos compreendem os vazios entre os agregados (SILVA et al 2020).

Segundo Ferreira (1995) do ponto de vista morfológico, o que se observa no campo é a macroestrutura (avaliação qualitativa). Em todo tipo de solo a macro e a microestrutura são importantes para definir as propriedades e o comportamento do solo sendo relevante conhecer o papel de cada uma delas (LOPERA 2016).

Os solos podem ter a estrutura proveniente da origem ou imposta por intervenções humanas como, por exemplo, a compactação processo mecânico cujo objetivo fundamental é o aumento do peso específico aparente seco do solo, por meio de maior aproximação da partícula, com a diminuição do seu índice de vazios (OLIVEIRA e FERREIRA, 2012).

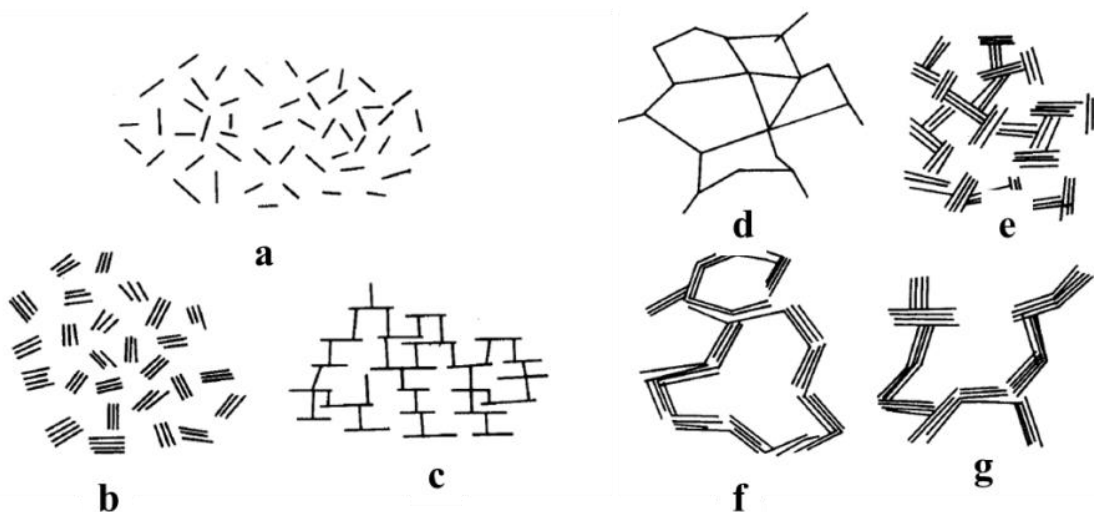
Os solos granulares são geralmente constituídos de arranjos de grãos únicos, a Figura 3 apresenta os tipos de estruturas que os solos granulares comumente podem apresentar, as partículas são relativamente equidimensionais, em geral a estrutura é do tipo simples (Figura 3a e 3b), em casos específicos pode ser alveolar (Figura 3c), quando apresentam partículas lamelares, a estrutura é simples, porém os grãos podem estar distribuídos aleatoriamente (Figura 3d) ou de modo orientado (Figura 3e). Durante o processo de compactação, ou em decorrência de outra energia externa os grãos tendem a se orientar, essa acomodação dos grãos afeta o comportamento hidromecânico dos solos granulares, mas nos solos não saturados granulares a água nos poros geralmente atuará por capilaridade. (CARVALHO et al. 2015).



Fonte: Carvalho et al. (2015, p. 67).

Os solos argilosos possuem estrutura composta por associações de partículas que podem variar de floclada a orientada. As formas de partículas mais comuns nesses solos são em placas, onde o comprimento e a largura são muito maiores que a espessura. (Figura 4)

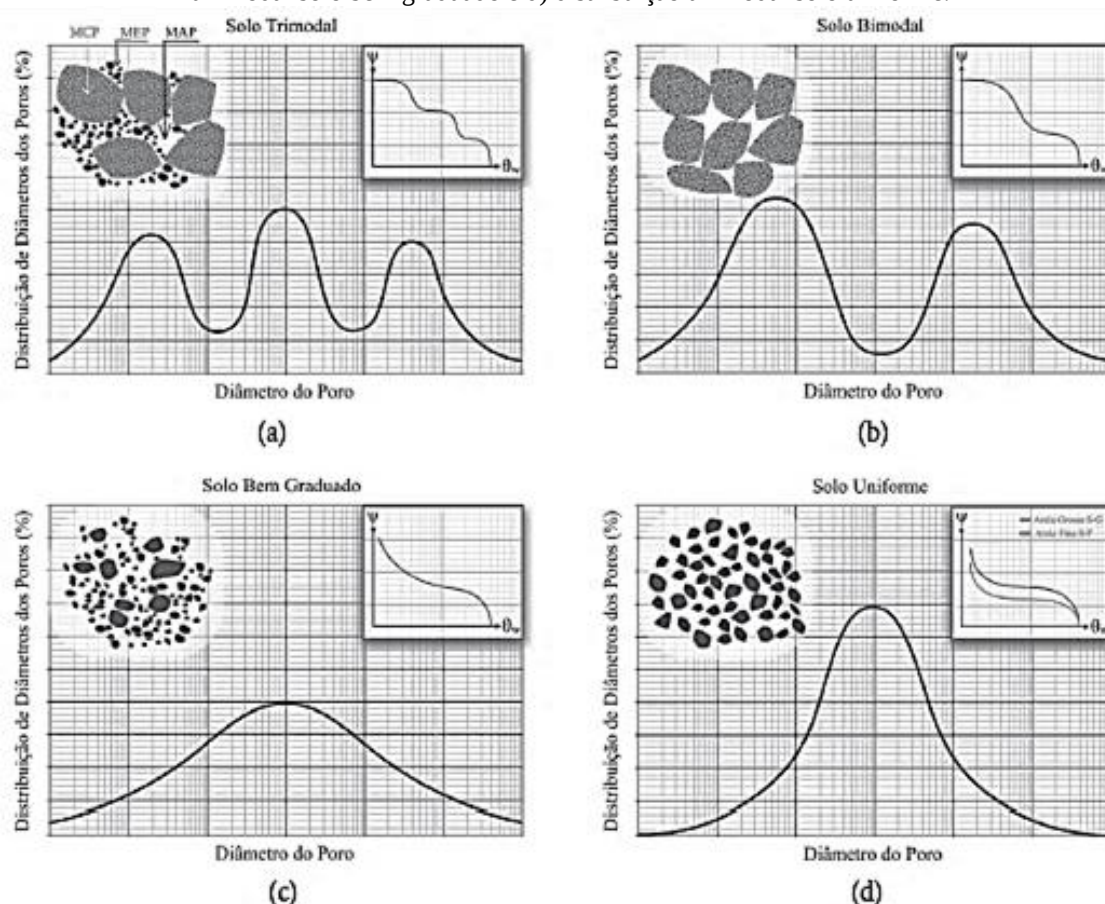
Figura 4 – Modos de associações de partículas em suspensões de argila: a) Dispersos e defloculados, b) agregados, mas defloculados, c) floclação borda a face, mas disperso, d) floclado de ponta a ponta, mas disperso, e) floclado e agregado de ponta a ponta, f) de ponta a ponta floclado e agregado, e g) borda a face e borda a borda floclada e agregada.



Fonte: Mitchell e Soga (2005, p. 110) adaptado de John Wiley & Sons.

Como consequência da origem e formação, os solos apresentam aglomeração de partículas com presença de microporos em seu interior e macroporos entre eles. Entre os micros e macroporos dependendo do solo, ocorre uma distribuição de poros mais ou menos graduada que pode ocasionar poros intermediários, conhecidos como mesoporos. Em relação à distribuição de poros os solos em geral são classificados como unimodais, possuem apenas uma faixa de poros mais frequente, e bimodais, possui duas faixas de poros predominantes, existe ainda a distribuição trimodal onde predomina a presença de micro, meso e macroporos (Figura 5).

Figura 5 – Distribuição dos diâmetros dos poros: a) distribuição trimodal, b) distribuição bimodal, c) distribuição unimodal solo bem graduado e d) distribuição unimodal solo uniforme.



Fonte: Cavalcante et al. (2015, p. 540).

Os solos tropicais em geral apresentam uma estrutura formada por agrupamento de grãos e isso interfere diretamente no seu comportamento, logo ao estudá-los não se pode levar em consideração apenas o comportamento das partículas de forma individual. Esses solos possuem as propriedades e os comportamentos influenciados por aspectos físicos, químicos e mineralógicos associados à estrutura que é composta pelos grupamentos estruturais, que possuem macro e microporos em sua constituição.

A observação da microestrutura pode ser realizada por meio da Microscopia ótica (MO) e por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O MEV é uma técnica que possibilita estudar a microestrutura e confirmar a presença de minerais específicos a partir das características morfométricas dos solos.

A tomografia computadorizada (TC), também é uma técnica que permite estudar a estrutura do solo, a imagem da seção transversal ou fatia de um corpo é obtida através de um equipamento externo controlado por um computador, de onde são emitidas partículas com energia suficiente para atravessar o material que será estudado gerando múltiplas projeções,

essa energia pode ser raios X, raios gama e ondas ultrassônicas. A TC indica a quantidade de radiação absorvida por cada partícula do material analisado, e essa absorção é proporcional a densidade do material, esses resultados são expressos por meio de uma imagem.

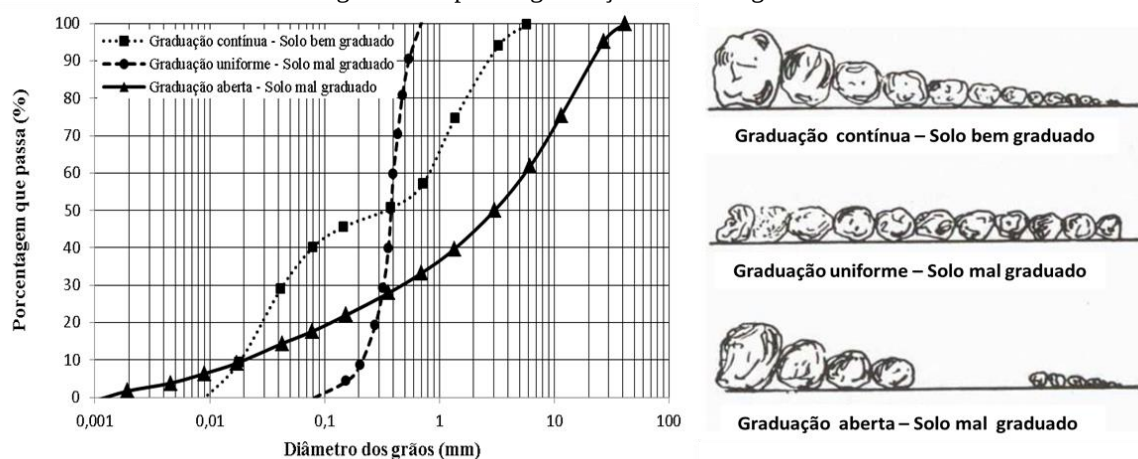
Os solos são originados da decomposição química ou desintegração mecânica de rochas que sofreram intemperismo ou meteorização, pode ser diferenciado inicialmente pela dimensão das suas partículas, alguns possuem grãos visíveis a olho nu, como exemplo as areias e pedregulhos, fração grossa do solo outros possuem partículas tão finas que não podem ser vistas individualmente como exemplo às argilas e os siltes, fração fina do solo.

A separação das frações do solo é realizada através da análise granulométrica, nos solos grossos a distribuição granulométrica é obtida pelo processo de peneiramento, já os solos finos essa distribuição é obtida através da sedimentação. A partir do ensaio de granulometria é traçada a curva granulométrica do solo que relaciona o diâmetro equivalente dos grãos e sua respectiva porcentagem passante. Por meio dessa análise é possível determinar a classificação do solo em relação a sua textura e identificar os tipos de graduação do solo.

Os tipos de graduação dos solos grossos (Figura 6), são descritos a seguir:

- Uniforme – possuem partículas de um único tamanho,
- Bem graduada – apresenta uma ampla faixa de distribuição de partículas;
- Aberta – quando ocorre a ausência de uma ou mais faixas de tamanho

Figura 6 – Tipos de graduação dos solos grossos



Fonte: Adaptado de Pinheiro et al. (2006, p.35)

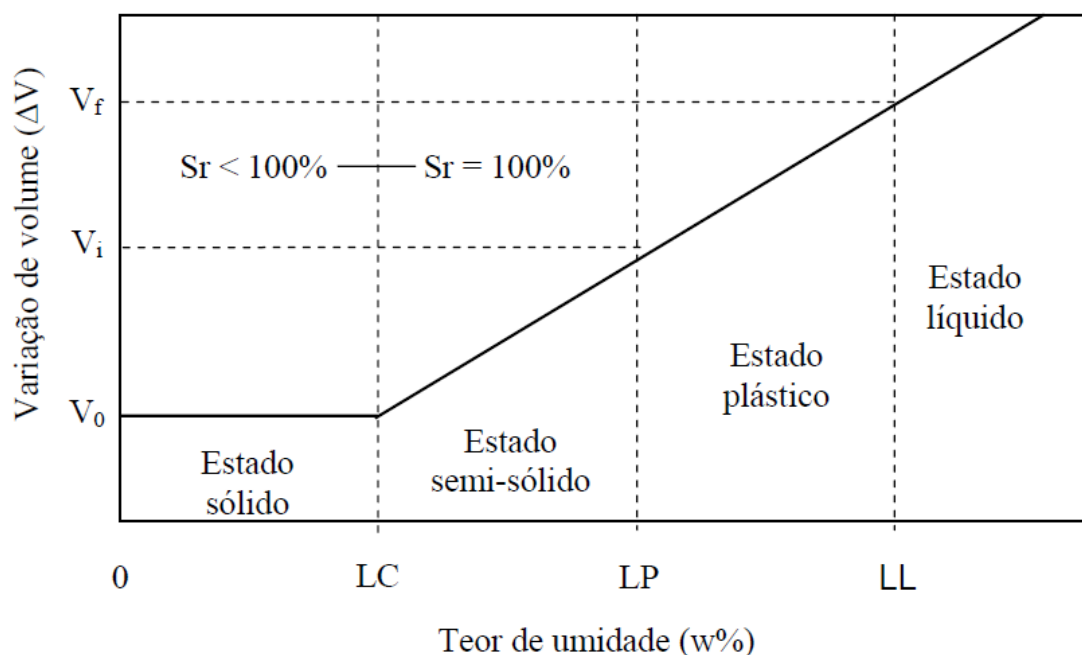
Essa característica pode ser expressa através do coeficiente de não uniformidade que representa a distribuição do tamanho das partículas que compõe o solo, valores próximos de 1 indicam que a curva granulométrica é mais verticalizada sendo caracterizado como um solo mal graduado, ou seja, tem uma variação pequena de diâmetros; quanto maior o valor desse coeficiente, maior a suavização da inclinação da curva granulométrica e maior é a variação de diâmetros e o solo é caracterizado como bem graduado. O coeficiente de curvatura indica o formato da curva granulométrica do solo, em geral os solos granulares são bem graduados quando apresentam um coeficiente de curvatura entre 1 e 3. Porém em se tratando de solos não saturados, deve-se atentar ao fato de que comumente a estrutura desses solos são compostas por aglomerações de torrões e agregações e não apenas pelas partículas individualizadas do solo, isso pode comprometer a correta aplicação desses conceitos. Esses coeficientes são obtidos da curva granulométrica solo por meio de formulações que utilizam os diâmetros das peneiras que correspondem a 10%, 30% e 60% das partículas passantes; conforme equações a seguir:

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$CC = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

A curva granulométrica pode não ser suficiente para explicar o comportamento dos solos finos, pois diversos fatores como composição mineralógica, umidade, estrutura e até grau de saturação podem interferir no comportamento deles, devido a esses fatores a presença da água nesses solos tem grande influência em seu comportamento e por isso se faz necessário realizar ensaios que analisam o comportamento do solo na presença da água. Os ensaios propostos pelo Engenheiro químico Atterberg, quantificam de forma indireta o comportamento dos solos na presença de água, esses ensaios foram padronizados por Arthur Casagrande e em função da quantidade de água presente nos solos pode ser definido os estados de consistência do mesmo (Figura 7).

Figura 7 – Estados e limites de consistência



Fonte: Pinheiro et al. (2006, p.43)

O solo argiloso pode assumir diferentes estados, como líquido, plástico, semissólido ou sólido, dependendo do teor de umidade presente. Os limites de consistência (LL, LP e LC) separam esses estados, por outro lado, os solos arenosos podem variar seu estado de fofo a compacto e a esse estado físico chama-se compactidade.

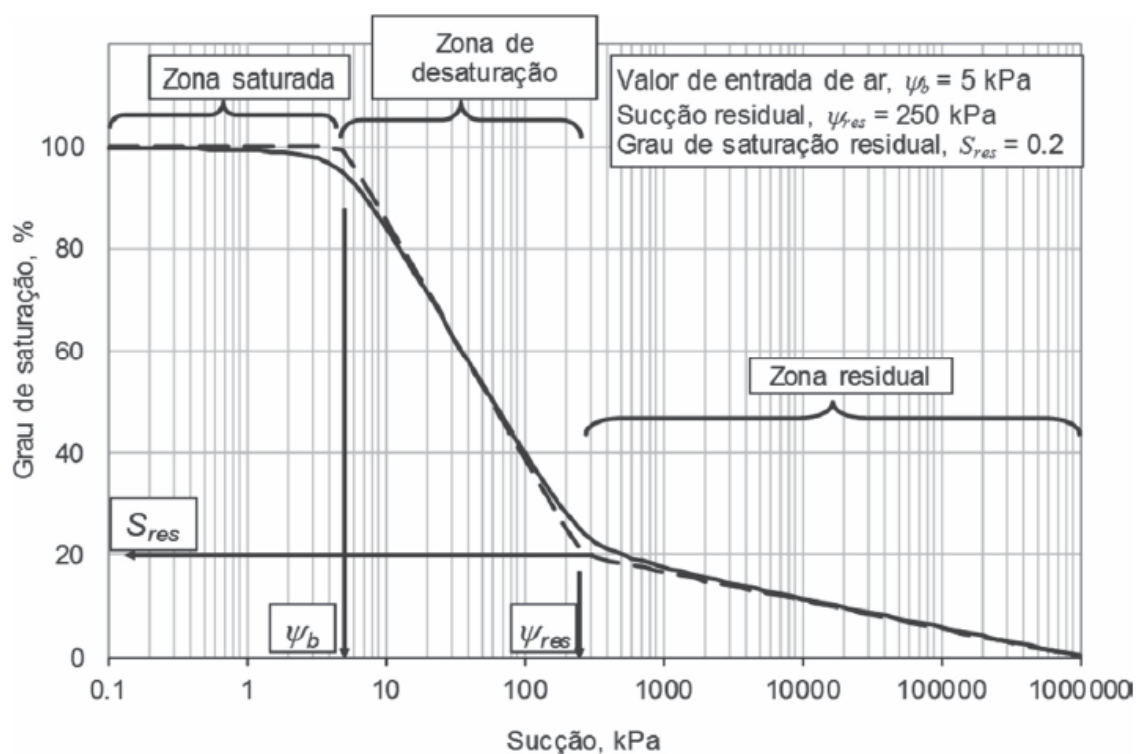
2.2 CURVA DE RETENÇÃO

Nos solos não saturados faz-se necessário compreender a distribuição, retenção e liberação de água nas diversas situações as quais o solo pode estar sujeito. Esse comportamento da água no solo pode ser de ordem mecânica quando a água se move no solo devido à alteração no estado de tensão externo ou de ordem ambiental devido a infiltrações ou evaporações. A atuação da água nesses solos pode ser representada pela curva de retenção de água, que consiste na relação entre a quantidade de água presente no material poroso e a energia necessária para remover essa água. Segundo Silva et al. (2020) a curva de retenção de água é influenciada pela estrutura do solo, mas depende, em igual grau, de sua composição química e mineralogia, onde atuam os efeitos osmótico, capilar e de forças de adsorção do solo. Esta energia é dividida em sucção osmótica e matricial, o somatório das duas formam a sucção total. Porém em geral na sucção matricial é considerado apenas o efeito da capilaridade, desprezando o efeito das forças de adsorção que é muito relevante na maioria das argilas.

A curva de retenção de água pode ser representada de várias maneiras relacionadas às diferentes formas de se apresentar a quantidade de água armazenada no solo e de expressar a sucção. A curva pode ser representada em termos de grau de saturação, teor de umidade volumétrico, grau de saturação efetivo. Comumente é dividida em três trechos (Figura 8):

- **Valor da entrada de ar:** corresponde ao intervalo de sucção para o qual o material se encontra completamente saturado até o valor de sucção conhecido como entrada de ar.
- **Sucção residual:** corresponde ao intervalo de sucção para o qual o solo sofre drenagem em termos de fluxo de água líquida, sob efeito de aumento da sucção.
- **Grau de saturação residual:** corresponde àquela quantidade de água armazenada nos poros do material em condição relativamente menos livre do que a água drenada na forma de fluxo líquido.

Figura 8 – Parâmetros de uma curva de retenção

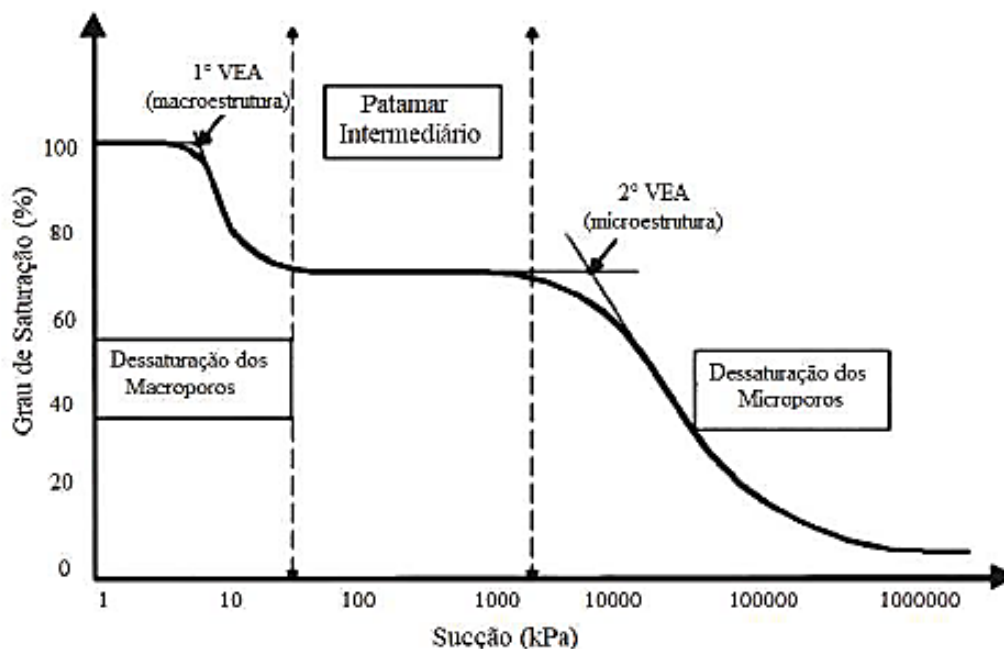


Fonte: Gitirana Junior et al. (2015, p. 217)

Dependendo do material as curvas de retenção podem apresentar formatos diferentes que são influenciados por diversos fatores físicos e eletroquímicos. As curvas se dividem em dois grupos: unimodal, aquelas que apresentam um único trecho de desaturação típicos de materiais altamente plásticos e o bimodal que apresentam dois trechos de desaturação. A curva bimodal apresenta dois valores de entrada de ar, o primeiro relativo a uma família de poros de

maiores dimensões e o segundo relativo à família de poros menores dimensões, conforme Figura 9.

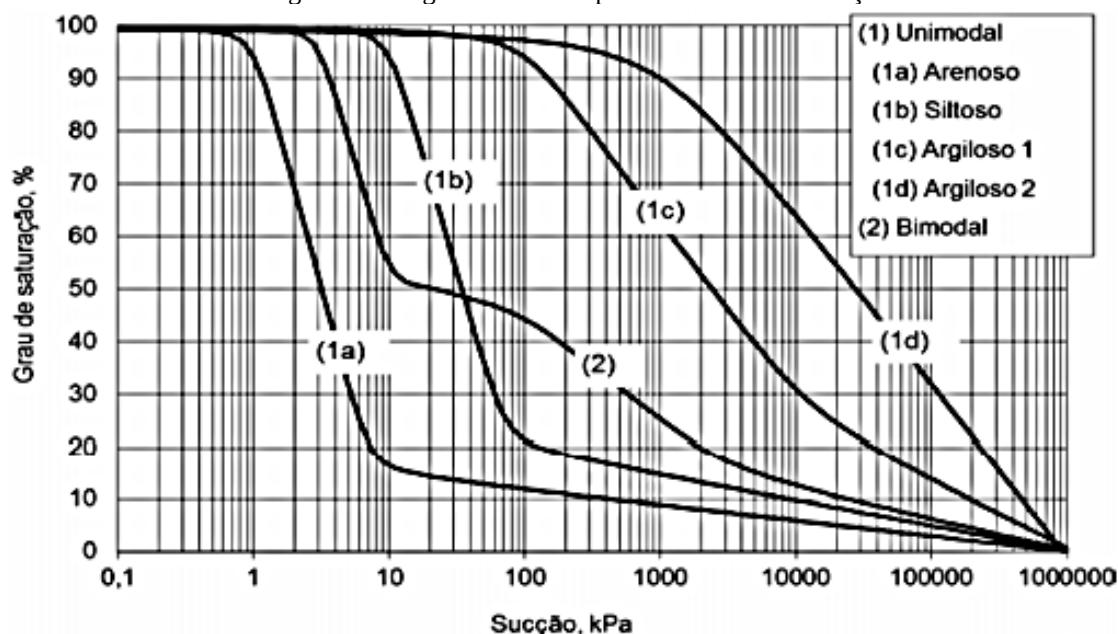
Figura 9 – Parâmetros da Curva de retenção bimodal



Fonte: Feuerharmel et al., 2005 apud Silva et al. (2020, p 104)

A Figura 10, apresenta alguns formatos típicos de curvas de retenção, o primeiro grupo que é das curvas unimodais são assim chamadas devido ao fato de a primeira derivada dessas curvas apresentarem um formato de sino único, semelhante àqueles de distribuições de frequência unimodais apresentados na Figura 5c e 5d, no grupo de curvas unimodais a maioria dos solos apresentados possuem os 3 parâmetros descritos anteriormente na Figura 8, porém na curva 1d, o solo não apresenta grau de saturação residual aparente, esse comportamento é típico de alguns materiais altamente plásticos. Já no segundo grupo o de curvas bimodais, são da mesma forma assim chamados, pois a primeira derivada tem o aspecto de uma distribuição de poros bimodal (Figura 5b), esses solos bimodais podem ser resultado de vários processos genéticos, como exemplo, materiais com distribuições granulométricas descontínuas, estruturas com micro e macroporos compostos por agregações físicas devido ao processo de intemperismo, entre outros.

Figura 10 – Alguns formatos típicos de curvas de retenção.



Fonte: Modificado de Gitirana Jr. e Fredlund, 2004 apud Gitirana Junior et al. (2015, p. 218)

Também é possível encontrar materiais que apresentam curvas com vários trechos de desaturação, chamados de multimodais, o formato das curvas pode não seguir padrões pré-definidos, sendo regido por diversos fatores, tais como, a distribuição de tamanho de poros, mineralogia, dentre outros.

A curva granulométrica possui uma relação significativa com a curva de retenção no que se diz respeito aos materiais granulares, pois a distribuição granulométrica está diretamente relacionada com a distribuição de poros do solo e consequentemente com a curva de retenção. Porém ao se tratar de solos argilosos a distribuição granulométrica não é suficiente para avaliar a distribuição de tamanho de poros, pois esses solos possuem outros mecanismos de retenção, logo essa relação não apresenta um bom desempenho para esses solos. Na literatura é possível encontrar propostas de previsão de retenção a partir da granulometria do solo, porém com limitações na previsão de solos de textura fina.

2.3 AJUSTES E PROPOSTA DE PREVISÃO DE CURVAS DE RETENÇÃO

Na literatura é possível encontrar diversas equações de ajuste da curva de retenção de água nos solos, a Quadro 1 apresenta algumas dessas equações:

Quadro 1 – Equações de ajuste para a curva de retenção

Autor	Equação	Índice de ajuste
Gardner (1956)	$\theta_d = 1/(1 + a_g \psi^{n_g})$	a_g, n_g
Brooks e Corey (1964)	$\theta_d = 1$ $\psi < \psi_b$ $\theta_d = 1 (\psi/a_c)^{-n_c}$ $\psi \geq \psi_b$	a_c, n_c, ψ_b
Brutsaert (1966)	$\theta_d = 1/(1 + (\psi/a_r)^{n_r})$	a_r e n_r
Van Genuchten (1980)	$\theta_d = 1/(1 + a_s \psi^{n_s})^{m_s}$	a_u, n_u, m_u
McKee e Bumb (1984)	$\theta_d = 1$ $\psi < \psi_b$ $\theta_d = \exp((a_z - \psi)/n_z)$ $\psi \geq \psi_b$	a_z, n_z, ψ_b
McKee e Bumb (1987)	$\theta_d = 1/(1 + \exp((\psi - a_e)/n_e))$	a_s e n_s
Fredlund e Xing (1994)	$\theta_d = C(\psi) * (1/(\ln(e + (\psi/a_f)^{n_f})))^{m_f}$ $C(\psi) = \frac{-\ln(1 + \psi/\psi_{res})}{\ln(1 + (\frac{10^6}{\psi_{res}}))} + 1$	$a_f, n_f, m_f, \psi_{res}$
Gitirana Jr. e Fredlund (2004)	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi/\sqrt{\psi_b \psi_{res}})^d} + S_2$	$\psi_b, \psi_{res}, S_{res}, a$

θ - umidade volumétrica; Ψ - sucção; Ψ_b - valor de entrada de ar; Ψ_{res} - sucção residual; a, n, e m - parâmetros de ajuste; S1 e S2 - parâmetros da curva.

Fonte: Adaptado Junior et al. (2012)

Brooks e Corey (1964) sugeriram uma das primeiras equações de ajuste para a curva de retenção, a qual continua sendo uma proposta ainda bastante utilizada. A equação é constante para sucções inferiores ao valor de entrada de ar e é assumida como uma função exponencial decrescente para sucções maiores do que o valor de entrada de ar. (ARAÚJO, 2017).

Fredlund e Xing (1994) propuseram uma nova equação de ajuste, baseada na distribuição do tamanho dos poros no solo. Tendo-se essa distribuição, é possível determinar a curva de retenção. O fator de correção $C(\psi)$ presente na equação foi indicado para que o método resultasse na sucção máxima (10^6 kPa) quando o conteúdo de água fosse zero. Essa equação apresenta bons ajustes da curva de retenção para toda a gama de valores de sucção. (JUNIOR et al. 2012).

Dentre os diversos ajustes presentes na literatura esse trabalho vai utilizar os propostos por Van Genuchten (1980), Gitirana Jr. e Fredlund (2004).

Existem também na literatura métodos físico-empíricos de previsão da curva de retenção de água dos solos que relacionam a distribuição granulométrica com suas propriedades físicas e distribuição do tamanho dos poros. É importante destacar que esses métodos utilizam hipóteses simplificadoras para descrever a geometria das partículas e dos poros dos solos.

O primeiro método físico-empírico foi o de Arya e Paris (1981) que utilizaram dados da curva granulométrica do solo, a densidade relativa e a densidade das partículas. Os autores observaram que a curva de retenção na maioria das vezes apresenta uma forma parecida com a distribuição granulométrica e a partir disso desenvolveram um método para prever a curva de retenção do solo. A proposta de Mohammadi e Vanclooster (2012) utilizado neste trabalho está baseado em Arya e Paris (1981).

A equação proposta por Van Genuchten (1980) é apresentada na Equação (1) e o índice m é calculado pela Equação (2):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s + \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot s)^n]^m} \quad (1)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

Onde: θ – Umidade volumétrica; θ_s – Umidade volumétrica de saturação; θ_r – Umidade volumétrica residual; s – sucção; α – Índice de ajuste; m – Índice de ajuste; n – Índice de ajuste.

Gitirana Jr. e Fredlund (2004) propõem duas equações para representar as curvas de retenção, uma para as curvas unimodais e outra para as bimodais. Os índices de ajuste escolhidos são os valores de entrada de ar, a sucção residual, o grau de saturação residual e um índice que controla a suavidade das curvas.

A Equação (3) foi proposta para as curvas unimodais e a Equação (4) para as bimodais:

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_b \psi_{res}})^d} + S_2 \quad (3)$$

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{b1} \psi_{res1}})^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{res1} \psi_{b2}})^{d_2}} + \frac{S_3 - S_4}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_{b2} \psi_{res2}})^{d_3}} + S_4 \quad (4)$$

Onde: S é o grau de saturação; ψ a sucção matricial; ψ_{res} a sucção residual e ψ_b o valor de entrada de ar.

Mohammadi e Vanclooster (2012) propõe um método de estimar a curva de retenção de água no solo baseado na distribuição do tamanho da partícula (curva granulométrica). Os autores dividem a curva granulométrica em n frações de tamanhos diferentes e consideram que as partículas do solo são esféricas, utilizam como dados de entrada a umidade de saturação e o índice de vazios. Esse método subestima a umidade, quando em altas sucções, essa tendência foi atribuída a dessorção incompleta da água residual que reveste as partículas do solo ou a água

retida dentro das partículas não esféricas que possuem uma alta energia superficial. O método é descrito matematicamente pelas equações Equações (5), (6) e (7).

$$\theta_j = \theta_{sat} \sum_{j=1}^{j=i} p_j \quad (5)$$

$$s_j = \frac{5,43 \cdot 10^{-5}}{R_j} \xi \quad (6)$$

$$\xi = \frac{1,9099}{1+e} \quad (7)$$

Onde: θ_j – Umidade volumétrica de uma dada fração da curva granulométrica; θ_{sat} – Umidade volumétrica de saturação; p_j – Massa que passa em cada fração “j” da curva granulométrica; i – número de frações em que a curva granulométrica foi dividida, s_j – sucção da fração “j” da curva granulométrica; ξ – coeficiente de empacotamento das partículas; e – índice de vazios; R_j – Raio da fração “j” da curva granulométrica.

Clemence e Finbarr (1981) na Convenção anual da ASCE em 1976 definiram os solos colapsíveis ou metaestáveis, como solos não saturados que experimentam um rearranjo radical de partículas e grande redução de volume quando inundados com ou sem carga adicional, um refinamento dessa definição é proposto por Ferreira (2008), onde o caso de aumento de saturação sem que haja o aumento de umidade é considerado, logo os solos colapsíveis são definidos como solos não saturados que experimentam um radical rearranjo de partículas e grande redução de volume quando a sucção é reduzida com ou sem carga adicional.

Um fator importante no comportamento dos solos colapsíveis é a estrutura, esses solos apresentam estrutura metaestável que possui uma resistência temporária entre suas partículas. Por consequência do aumento do grau de saturação, ocorre à redução da resistência ao cisalhamento nos grãos do solo que pode ser devido à redução da sucção mátrica, perdas das ligações cimentantes ou redução da resistência dos torrões, quando a sollicitação atuante é superior a essa resistência, a estrutura do solo se reordena, provocando assim, o colapso. (Figura 11)

Figura 11 – Problema ocasionado por solo colapsível

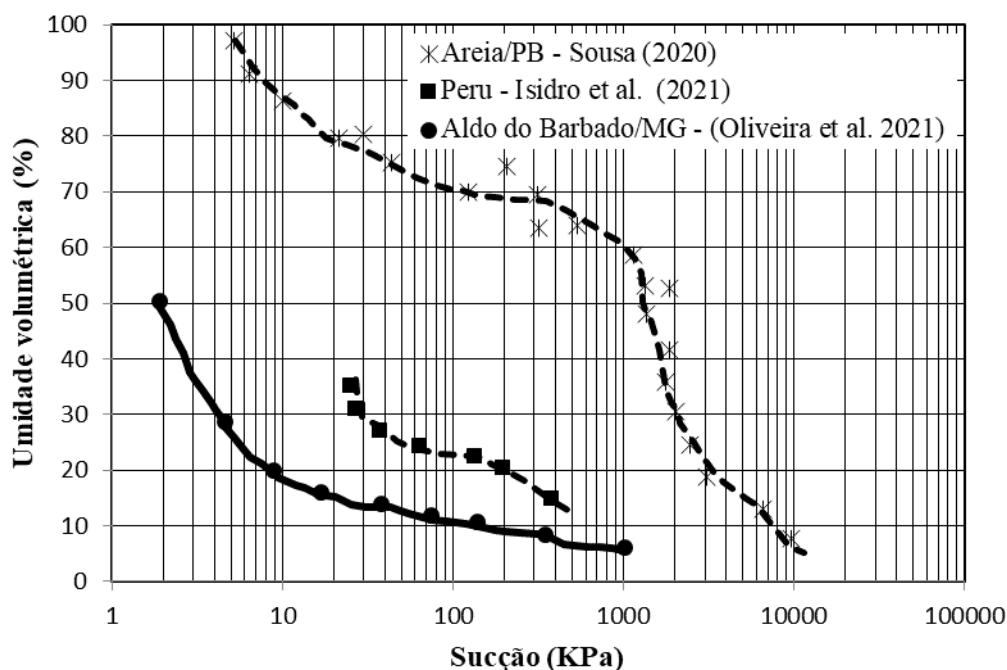


Fonte: Grouting (2015)

Diversos fatores exercem influência na disponibilidade de água no solo. A estrutura do solo é um deles, uma vez que determina a organização das partículas presentes.

Os macroporos desempenham um papel fundamental na aeração e na facilidade de absorção de água, os solos de textura arenosa contêm uma quantidade maior de macroporos, resultando em uma capacidade menor de retenção de umidade (EMBRAPA 2002). Em geral as curvas de retenção em solos arenosos são mais acentuadas e o ponto de entrada de ar pode variar de 0,2 kPa a 7,5 kPa, segundo Gerscovich (2001). A Figura 12 apresenta algumas curvas de solos colapsíveis que apresentam comportamento similar aos descritos anteriormente.

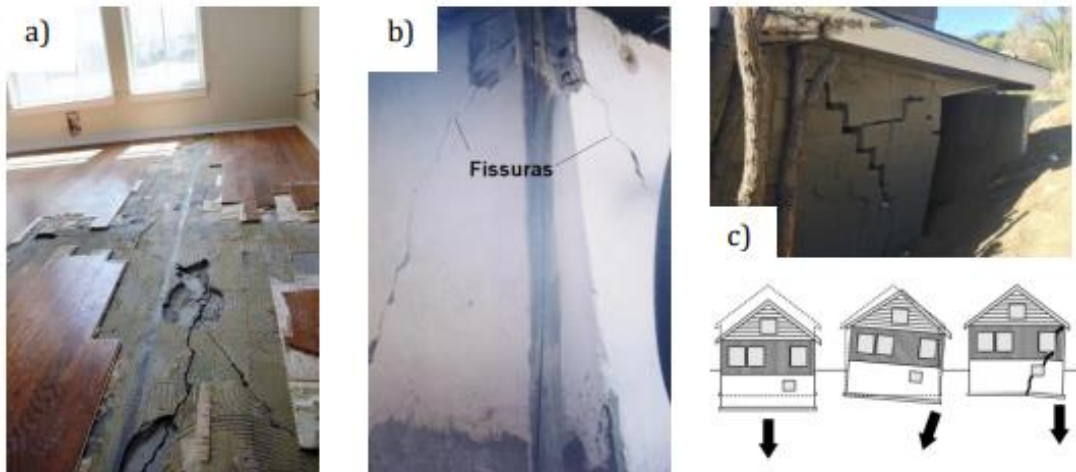
Figura 12 – Exemplos de curva de retenção de solos colapsíveis



Fonte: Sousa (2020), Isidro et al. (2021) e Oliveira et al. (2021)

Para definir um solo expansivo se faz necessário considerar algumas propriedades do solo. Ferreira (1995) apresenta alguns termos fundamentais para a definição de um solo expansivo, o primeiro é a expansividade intrínseca que é a capacidade de um argilomineral de absorver água, essa propriedade é resultante da composição mineralógica e quantidade de argila, que interagem com a água. O solo só apresenta essa propriedade se sofrer a interferência de dois tipos de fatores: os intrínsecos, ou seja, próprios do solo, tais como, a composição mineralógica, textura e estrutura, que tornam o solo suscetível a sofrer instabilidade volumétrica e os extrínsecos, como a climatologia, hidrogeologia, vegetação, ocupação antrópica que são responsáveis por transferir a umidade de um ponto a outro no solo. Ao apresentar essa propriedade o solo sofre expansão que é definida como a mudança de volume resultante da mudança de umidade ou sucção; em relação ao colapso esse fenômeno é mais complexo, pois além de ocorrer o aumento de volume pelo umedecimento, ocorre posterior redução por secagem, e esse ciclo se repete por diversas vezes em função da variação sazonal de umidade ou sucção a qual o solo está submetido. (Figura 13)

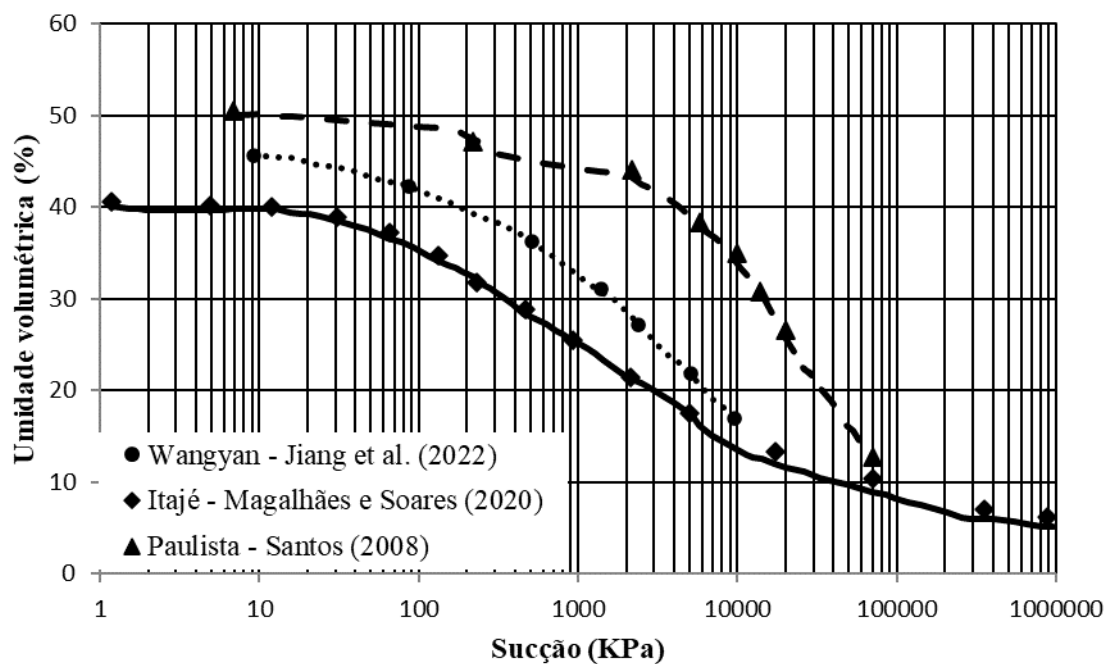
Figura 13 – Problemas ocasionados por solos expansivos



Fonte: a) Collier (2010), b) Justino da Silva (2001), c) Hearn e Fleener (2017) apud Moraes (2017, p 18.)

A textura do solo é um dos fatores que exercem influência na capacidade de retenção de água. Os solos argilosos são ricos em microporos, o que lhes permite reter mais umidade. Essa característica é muito importante na curva de retenção dos solos argilosos, pois o ponto de entrada de ar tende a aumentar e a inclinação da curva torna-se menos acentuada. Segundo Gerscovich (2001) espera-se que o ponto de entrada de ar varie a partir de 7 kPa em solos finos, é possível identificar esse comportamento nas curvas de retenção dos solos expansivos apresentadas na Figura 14.

Figura 14 – Exemplos de curva de retenção de solos expansivos



Fonte: Jiang et al. (2022), Magalhães e Soares (2020) e Santos (2008)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de compreender e aplicar os ajustes da curva de retenção desenvolvidos por Van Genuchten (1980), Gitirana Jr. e Fredlund (2004), como também a proposta desenvolvida por Mohammadi e Vanclooster (2012) para prever a curva de retenção de água do solo por meio a curva granulométrica, foi realizado uma busca pelos artigos originais dos autores onde foram apresentadas e aplicadas as metodologias utilizadas nesse estudo.

3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA UTILIZADA

Foi utilizado como instrumento orientador para iniciar as pesquisas dos trabalhos acadêmicos o Banco de Dados de Solos Especiais - BANDASE, que teve início com o trabalho de Ferreira em 1990 e desde então vem sendo atualizado pelo Grupo de Pesquisa de Solos Não Saturados (GÑSat) da Universidade Federal de Pernambuco, através de uma pesquisa bibliográfica abrangente em diversas fontes acadêmicas, como artigos de jornais, revistas, conferências, simpósios, monografias, dissertações, teses, livros e outras fontes técnicas. É um arquivo do Planilhas Google armazenado no Google Drive e consiste em duas bases de dados: dos solos colapsíveis e dos solos expansivos, no período consultado o BANDASE possuía 259 solos expansivos e 267 solos colapsíveis.

As duas bases de dados compilam informações similares tanto para os solos expansivos quanto para os solos colapsíveis, os campos que diferem são aqueles referentes aos ensaios específicos para a análise de expansão e de colapso, a seguir as informações compiladas:

- Identificação dos documentos;
- Localização;
- Distribuição granulométrica;
- Índices físicos;
- Limites de consistência;
- Ensaio de compactação;
- Caracterização química;
- Ensaio de classificação quanto ao colapso e expansão.

O BANDASE foi utilizado apenas para a busca de arquivos que possuíssem as características necessárias para ser incluído neste estudo.

Dando sequência as pesquisas foram utilizadas como fontes de busca para os documentos acadêmicos usados neste estudo o Portal de Periódicos CAPES, Google Acadêmico e Repositórios de Universidades como o da UFPE, UNESP, UNB, USP, UNICAMP, entre outros. As palavras chaves utilizadas na busca foram: *Solo colapsível*, *Curva característica*, *Curva de retenção*, *Solo expansivo*, *Sucção*, combinadas pelos operadores booleanos “E” e “OU”. As palavras foram utilizadas tanto no idioma português quanto no inglês.

Como pré-requisito para este estudo, foi estabelecido que os documentos se enquadrariam nas categorias de Artigos, Teses e Dissertações. Foi realizada uma seleção cuidadosa dos artigos que atendiam aos critérios essenciais para a pesquisa em questão.

3.2 ANÁLISE DOS DOCUMENTOS

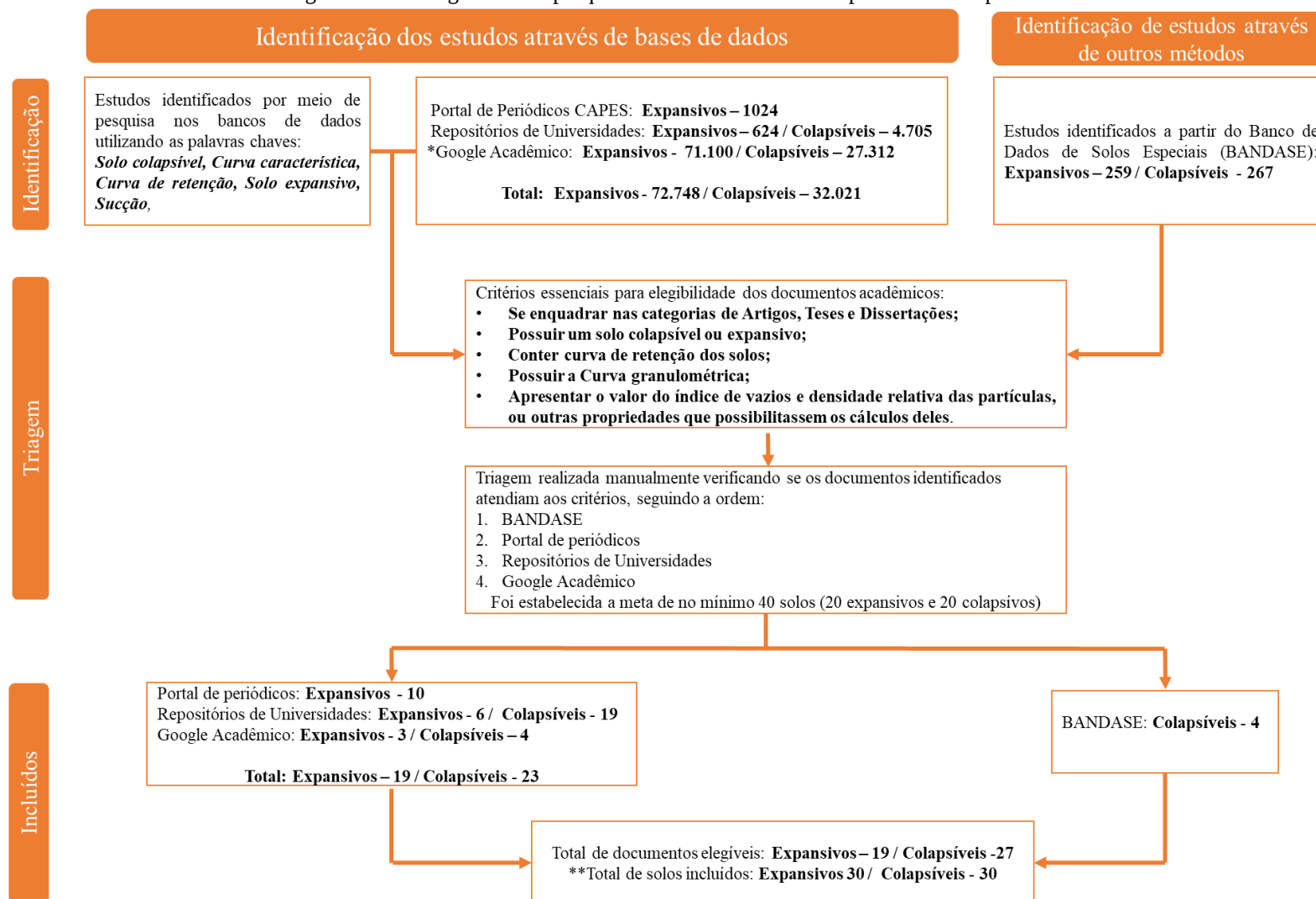
Os critérios essenciais para os documentos acadêmicos serem elegíveis para a pesquisa estão descritos a seguir:

1. Ser um solo colapsível ou expansivo;
2. Conter curva de retenção dos solos;
3. Possuir a Curva granulométrica;
4. Apresentar o valor do índice de vazios e densidade relativa das partículas, ou outras propriedades que possibilitassem os cálculos deles.

Foram identificados inicialmente um total de 72.748 arquivos de solos expansivos e 32.021 arquivos de solos colapsíveis, o que ocasionou um número alto de resultados obtidos foi a plataforma do Google Acadêmico com um resultado muito grande de arquivos selecionados a partir das palavras chaves utilizadas. Esses arquivos foram consultados progressivamente e ao atingir o limite de 30 solos para cada categoria a triagem foi encerrada. É importante salientar que mesmo diante dessa alta quantidade de arquivos identificados através das palavras chaves, houve grande dificuldade de encontrar documentos acadêmicos que apresentassem todos os critérios essenciais para este estudo, pois as palavra chaves identificavam apenas o tipo de solo e as curvas de retenção, os demais critérios foram avaliados manualmente, consultando artigo por artigo e realizando um checklist das demais propriedades, vale ressaltar também que muitos artigos eram repetidos.

Alguns dos documentos separados para este estudo apresentaram mais de uma amostra de solo, por isso a quantidade de artigos elegíveis é inferior a quantidade de solos obtidos. Foram selecionados solos de diversas partes do mundo, tais como, Brasil, China, Jordânia, Estados Unidos, Catalunha, Portugal, Austrália, Canadá, Iraque, essa diversidade de locais favorece as análises estatísticas, pois ajuda a garantir que a amostra estudada seja representativa da população ou fenômeno que está sendo estudado. Isso é muito importante para que as conclusões obtidas sejam aplicáveis ao contexto real. O fluxograma das pesquisas realizadas está apresentado na Figura 15:

Figura 15 – Fluxogramas das pesquisas realizadas dos solos expansivos e colapsíveis.



*A análise dos documentos foi feita progressivamente até completar o total de 30 solos.

Fonte: A autora (2023)

3.3 EXTRAÇÃO DE DADOS E ELABORAÇÃO DOS ARQUIVOS SUPORTE PARA REALIZAR OS AJUSTES

Foi elaborada uma planilha com os dados extraídos dos trabalhos acadêmicos selecionados para serem utilizados nesta pesquisa, as informações coletadas estão descritas no Quadro 2. O MEV de dois solos (um expansivo e um colapsível) também foi coletado. A inclinação das curvas de retenção (C%) e a inclinação das curvas granulométricas (i%) dos solos foram calculadas para incluir nas análises realizadas posteriormente

Quadro 2 – Características dos solos expansivos e colapsíveis utilizadas neste estudo.

Dados extraídos dos trabalhos consultados		Dados gerados a partir dos trabalhos consultados
Área de ocorrência do solo		
Fonte		
Percentual de pedregulho - Ped. (%)		
Percentual de areia - Areia (%)		
Percentual de silte - Silte (%)		
Percentual de argila - Argila (%)		
Peso específico real dos grãos - ρ_s (kN/m ³)		
Índice de vazios - e		
Limite de liquidez - LL (%)		
Limite de plasticidade - LP (%)		
Índice de plasticidade - IP (%)		
Classificação SUCS		Classificação TBR
Curva granulométrica		Inclinação da curva granulométrica
Curva de retenção e seu formato (unimodal ou bimodal)		Inclinação da curva de retenção
Potencial de colapso e de expansão		
Expansão livre e tensão de expansão		
MEV		

Fonte: A autora (2023)

Para extrair os dados dos ensaios de granulometria e da curva de retenção dos solos fornecidos pelos autores das pesquisas, foi utilizado a ferramenta *WebPlotDigitizer* que permite a extração de pontos dos gráficos a partir de imagens, e posteriormente foi realizado a reprodução dos mesmos no *Excel* onde foram relacionados com os resultados dos ajustes das curvas de retenção proposto por Van Genuchten (1980), Gitirana Jr. e Fredlund (2004), como também o método de previsão da curva de retenção a partir da granulometria proposto por Mohammadi e Vanclooster (2012).

A medida estatística utilizada para avaliar o desempenho dos ajustes foi o coeficiente de determinação, representado como R^2 , essa métrica estatística quantifica a proporção da oscilação em uma variável dependente (ou variável de resposta) que pode ser explicada pelas variáveis independentes (ou variáveis explicativas) em um modelo de regressão. Em termos mais simples, ele oferece uma medida de quão bem os valores previstos pelo modelo se aproximam dos valores reais da variável dependente. Foi feita uma pesquisa na literatura em busca de uma classificação qualitativa do R^2 para avaliar o desempenho dos ajustes realizados, porém não foi identificado na literatura uma categorização para R^2 . Portanto foi utilizado a proposta de Shimakura (2006) que apresentou uma interpretação qualitativa do coeficiente de correlação (R), que foi adaptado para o R^2 . (Quadro 3).

Quadro 3 – Interpretação do coeficiente de correlação (a) e coeficiente de determinação (b)

a	Valor de R (+ ou -)		Interpretação	b	Valor de R^2 (+ ou -)		Interpretação
	0,00	0,19	Correlação muito fraca		0,00	0,03	Ajuste muito fraco
	0,20	0,39	Correlação fraca		0,04	0,15	Ajuste fraco
	0,40	0,69	Correlação moderada		0,16	0,48	Ajuste moderado
	0,70	0,89	Correlação forte		0,49	0,79	Ajuste forte
	0,90	1,00	Correlação muito forte		0,80	1,00	Ajuste muito forte

Fonte: Adaptado de Shimakura (2006)

Com base nos artigos dos autores dos métodos de ajuste e previsão da curva de retenção utilizados neste estudo, foram criadas 4 planilhas no *Excel*.

Os dados de entrada utilizados na planilha criada para o ajuste a partir da proposta de Van Genuchten (1980) foram: densidade relativa das partículas sólidas (δ), peso específico aparente seco (ρ_d), índice de vazios (e), umidade de saturação (θ_s); umidade residual (θ_r) e os pontos experimentais da curva de retenção, essas informações foram obtidas a partir dos trabalhos consultados já os índices de ajustes (α , n e m) foram sugeridos inicialmente a partir do próprio artigo de Van Genuchten (1980) onde ele apresenta alguns índices utilizados nos ajustes de curvas estudadas por ele no artigo, os valores foram ajustados manualmente e por fim foi feito um ajuste fino com a ferramenta *Solver* do *Excel*. O R^2 foi calculado utilizando a umidade volumétrica extraída dos trabalhos consultados e a umidade volumétrica calculada a partir do ajuste realizado (Figura 16).

Figura 19 – Planilha utilizada na previsão da curva de retenção pela proposta de Mohammadi e Vanclooster (2012)

MOHAMMADI E VANCLOOSTER (2012)* Previsão da Curva característica a partir da distribuição granulométrica								
CÁLCULO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA								
$\theta_j = \theta_{sat} \sum_{j=1}^i p_j$			θ_j – Umidade volumétrica de uma dada fração da curva granulométrica; θ_{sat} – Umidade volumétrica de saturação; p_j – Massa que passa em cada fração "j" da curva granulométrica; i – Número de frações em que a curva granulométrica foi dividida					
CÁLCULO DA SUCÇÃO								
$s_j = \frac{5,43 \times 10^{-5}}{R_j} \xi$ $\xi = \frac{1,9099}{1 + e}$			s_j – sucção da fração "j" da curva granulométrica; ξ – coeficiente de empacotamento das partículas; e – índice de vazios; R_j – Raio da fração "j" da curva granulométrica.					
DADOS DE ENTRADA								
Obs.: Preencher apenas as células em cinza								
Índice de vazios (e)		Não usar o valor em percentual						
Umidade volumétrica de Saturação								
ξ	1,91							
Obs.: Ao preencher o valor da massa não usar em percentual.								
ENSAIO DE GRANULOMETRIA			CURVA DE RETENÇÃO		DADOS DO ENSAIO		REGRESSÃO	
Diâmetro (mm)	Massa que passa	% que passa	Umidade Volumétrica MV (%)	Sucção MV (kPa)	Umidade Volumétrica (%)	Sucção (kPa)	R ²	
50,8								
38,1								
25,4								
19,1								
9,5								
4,8								
2								
1,2								
0,6								
0,42								
0,25								
0,15								
0,075								
0,05								
0,04								
0,005								
0,004								
0,003								
0,0015								
Referência								
*MOHAMMADI, M. H.; VANCLOOSTER, M. Predicting the Soil Moisture Characteristic Curve from Particle Size Distribution with a Simple Conceptual Model. Vadose Zone Journal, 2012.								

Fonte: A autora (2023)

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SOLOS E DOS RESULTADOS DOS AJUSTES

A fim de verificar um comportamento ou tendência dos solos colapsíveis e expansivos, foi realizado uma análise dos dados obtidos nos documentos consultados e dos dados extraídos dos ajustes e previsão das curvas de retenção. Para isso foi utilizado *ORANGE*, um programa que realiza mineração de dados e aprendizado de máquina por meio de scripts Python e programação visual. Esse aplicativo foi utilizado principalmente na elaboração dos gráficos utilizados nessa pesquisa, de onde foi possível visualizar alguns comportamentos dos solos expansivos e colapsíveis relacionados com as curvas de retenção dos solos.

As análises foram conduzidas em três etapas distintas. Inicialmente, realizou-se uma comparação entre solos expansivos e solos colapsíveis. Em seguida, foi efetuada uma comparação entre os solos expansivos, distinguindo aqueles que demonstraram um comportamento bimodal na curva de retenção daqueles com comportamento unimodal. O mesmo procedimento foi adotado para os solos colapsíveis, diferenciando entre aqueles com comportamento unimodal e bimodal. Por fim, estabeleceu-se uma associação entre a curva de retenção e outras características físicas, como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), curva granulométrica, potencial de colapso e expansão, em dois solos que exibiram comportamento bimodal na curva de retenção, sendo um deles colapsível e o outro expansivo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram coletadas as características físicas e dados sobre as curvas de retenção de água de um total de 60 solos, sendo que metade deles (30) são solos colapsíveis e a outra metade (30) são solos expansivos. Esse estudo envolveu a análise das propriedades desses solos e sua resposta aos processos de colapso e expansão relacionando com o comportamento da curva de retenção desses solos.

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS COLAPSÍVEIS ESTUDADOS

A Figura 20 apresenta as curvas granulométricas dos solos colapsíveis sendo 17 de textura fina e 13 granulares, as curvas foram agrupadas por faixa granular em três gráficos.

Figura 20 – Curvas granulométricas dos solos colapsíveis - a) CL, b) CL-ML, MH, ML, ML-MH, SC, SC-SM, SM, SP, SP-SM.

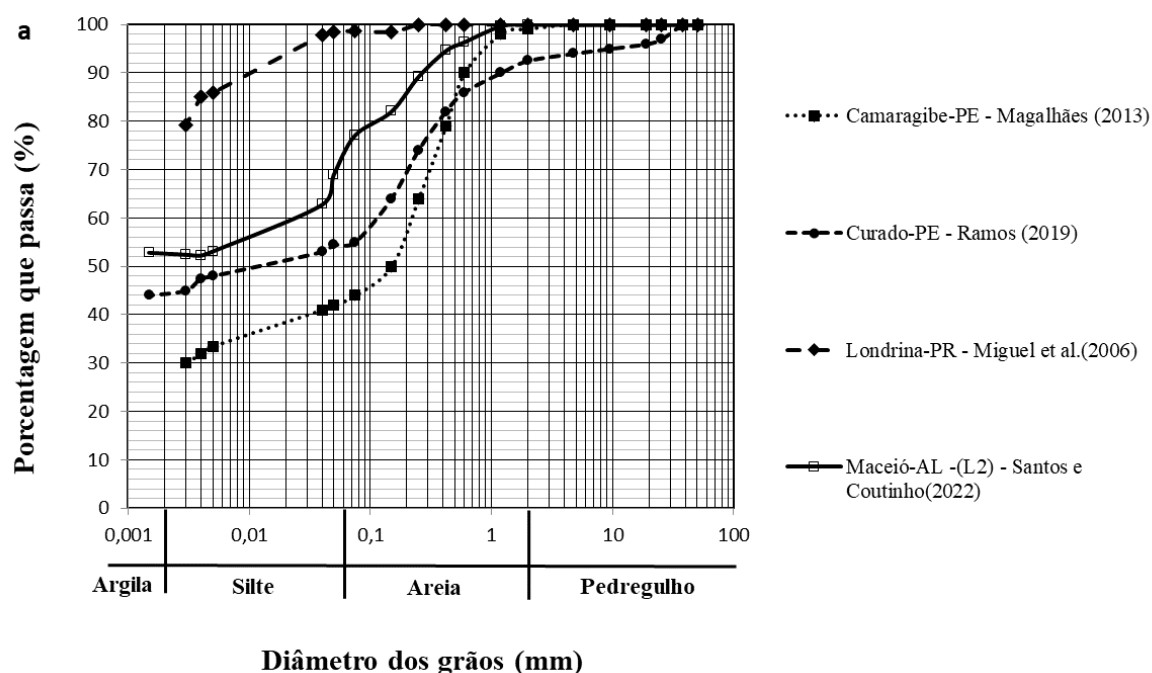
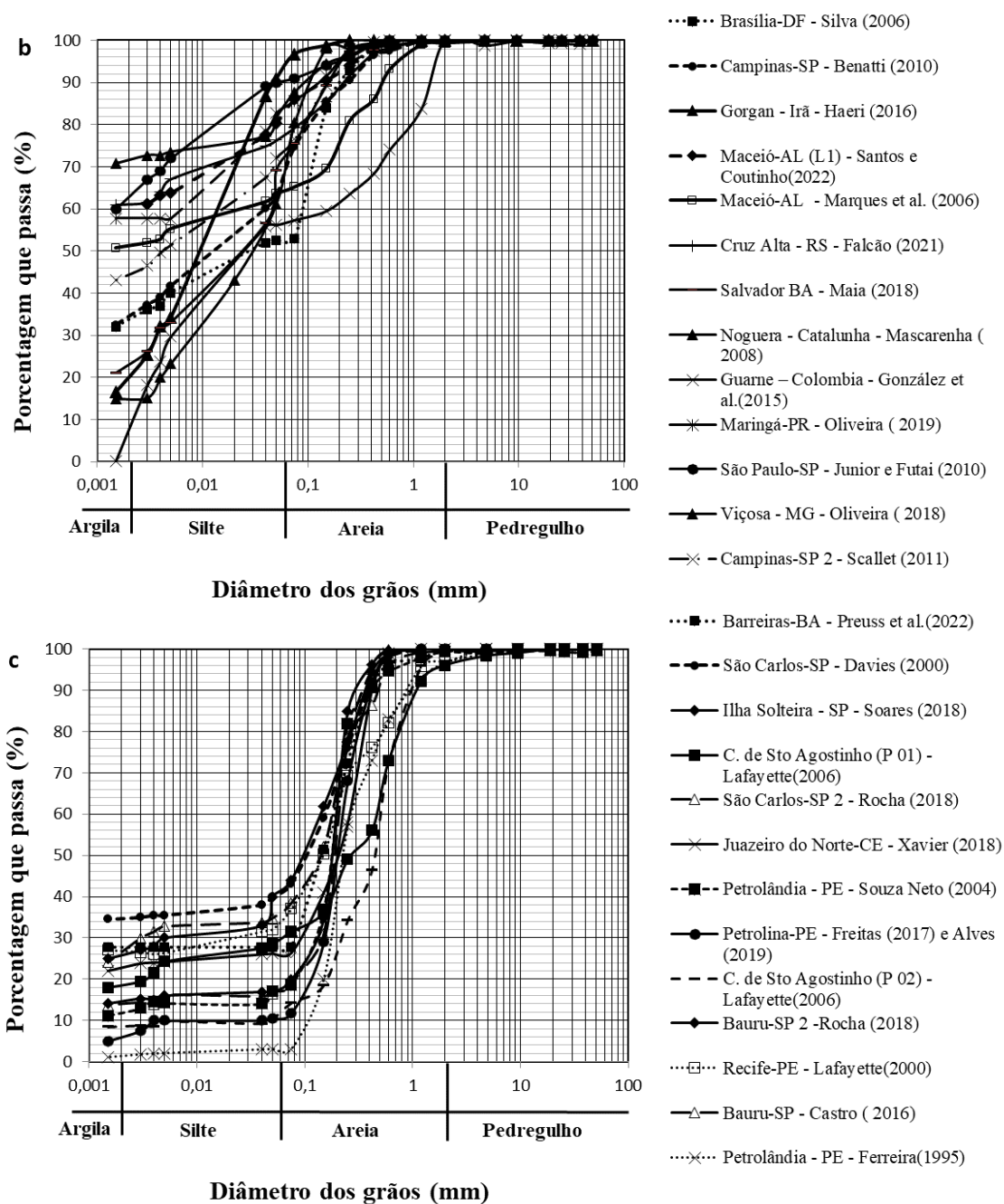


Figura 20 – Curvas granulométricas dos solos colapsáveis - a) CL, b) CL-ML, MH, ML, ML-MH, c) SC, SC-SM, SM, SP, SP-SM. (continuação).



Fonte: A autora (2023)

Dos 30 solos colapsáveis estudados 22 apresentaram limite de liquidez inferior a 50%, apenas 3 dos solos foram não líquidos e os demais tinham limite de liquidez superior a 50%. O limite de plasticidade variou entre 5% e 45%, 4 solos foram classificados como não plástico e apenas 1 não teve o valor informado pelo autor. O índice de vazios variou de 0,59 a 1,9, o peso específico das partículas sólidas variou de 25,58 a 32,6 kN/m³ (Tabela 1).

Tabela 1 – Características físicas dos solos colapsáveis.

Área de estudo	Fonte	Ped. (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	ps (kN/m ³)	e	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS	TBR	Formato CR	Método de determinação da CR
Maceió -AL (L1)	Santos e Coutinho (2022)	1	29,5	21,5	48	26,5	1,1	35	28	7	ML	A-4	Bimodal	Papel filtro
Maceió -AL (L2)	Santos e Coutinho (2022)	1,9	46,6	5	46,5	26,5	1,1	40	22	18	CL	A-6	Bimodal	Papel filtro
Maceió -AL	Marques et al. (2006)	0	37,3	7,9	54,9	26,3	1,2	48	28	20	ML	A-7-6	Bimodal	Papel filtro
Barreiras-BA	Preuss et al. (2022)	0	70,1	29,9	0	26,8	0,7	25	15	10	SC	A-2-4	Bimodal	Papel filtro
Salvador BA	Maia (2018)	0	29	51	20	26,5	0,7	46	29	17	ML	A-7-6	Bimodal	Papel filtro
Noguera - Catalunha	Mascarenha (2008)	0	39	46	15	26,5	0,7	22	15	7	CL-ML	A-4	Unimodal	SMI, WP4, edômetro com sucção controlada e papel filtro
Guarne – Colombia	González et al. (2015)	0	44	46	10	28	1,2	58	20	38	MH	A-7-6	Unimodal	Papel filtro
Juazeiro do Norte-CE	Xavier (2018)	0,1	73,9	0,5	25,5	26,3	0,8	18	11	7	SC-SM	A-2-5	Unimodal	Papel filtro
Brasília-DF	Silva (2006)	0	55,4	11,8	32,8	26,7	1,6	39	31	8	ML	A-2-4	Bimodal	Papel filtro
Gorgan - Irã	Haeri (2016)	0	10	65	25	27,2	0,8	33	24	9	ML	A-5	Unimodal	-
Viçosa - MG	Oliveira (2018)	0	18	11	71	27,4	1,6	82	44	38	MH	A-7-5	Unimodal	Mesa de sucção e câmara de pressão de Richards)
Cabo de Santo Agostinho-PE (P 01)	Lafayette (2006)	1	70	5	24	26,8	0,9	28,6	18,9	9,7	SC	A-2-4	Unimodal	Método de Haimes, papel filtro e câmara de pressão de Richards
Cabo de Santo Agostinho -PE (P 02)	Lafayette (2006)	1	88	1	10	26,5	0,8	NL	NP	-	SM	A-1-B	Unimodal	Método de Haimes, papel filtro e câmara de pressão de Richards
Camaragibe-PE	Magalhães (2013)	0	58	10	32	25,6	0,8	31	18	13	CL	A-6	Bimodal	Papel filtro
Curado-PE	Ramos (2019)	8	39	9	44	26,5	0,9	39,7	23,5	16,2	CL	A-6	Bimodal	Papel filtro
Petrolândia - PE	Ferreira (95)	0	94	2	4	26,4	0,6	NL	NP	-	SP-SM	A-3/ A-2-4	Unimodal	Membrana de pressão e dessecador a vácuo com soluções de NaCl e H2SO4
Petrolândia - PE	Souza Neto (2004)	0	84	2	14	26,4	0,6	16	12	4	SM	A-3	Unimodal	Papel filtro
Petrolina-PE	Freitas (2017) e Alves (2019)	0	91	2	7	26,3	0,7	NL	NP	-	SM	A-3	Unimodal	Papel filtro, membrana de pressão e dessecador
Recife-PE	Lafayette (2000)	2	64	6	28	26,4	0,9	23,3	5	18,3	SM	A-6	Unimodal	Membrana de pressão e dessecador a vácuo, com soluções de NaCl e H2SO4
Londrina-PR	Miguel et al. (2006)	0	7	12	81	30,2	1,9	61	45	16	CL	A-7-5	Bimodal	Câmara de pressão de Richards
Maringá-PR	Oliveira (2019)	0	8	30	62	32,6	1,9	56	39	17	MH	A-7-5	Bimodal	Papel filtro
Cruz Alta - RS	Falcão (2021)	0	22	16	62	28	1,4	50	32	18	ML	A-7-6	Bimodal	Papel filtro
Bauru -SP	Castro (2016)	0	80,2	5,8	14	26,5	0,8	15,5	-	-	SP	A-2-4	Bimodal	-
Bauru -SP 2	Rocha (2018)	0	80	6	14	26,8	0,8	20,5	NP	-	SM	A-2-4	Bimodal	Placa de sucção e câmara de pressão de Richards
Campinas-SP	Benatti (2010)	0	26	27	47	30,6	1,7	47,9	35,4	12,5	ML	A-7-5	Bimodal	Papel filtro
Campinas-SP 2	Scallet (2011)	0	25	31	44	30,6	1,7	48	35	13	ML-MH	A-7-5	Bimodal	Papel filtro
Ilha Solteira - SP	Soares (2018)	0	61	12	27	26,2	1	21	13	8	SC	A-3	Bimodal	Placa de sucção (funil de placa porosa), câmara de pressão de Richards e papel filtro
São Carlos-SP	Davies (2000)	0	60	5	35	26,7	1,1	38	20	18	SC	A-2-6	Unimodal	Câmara de pressão de Richards e papel filtro
São Carlos-SP 2	Rocha (2018)	0	63	10	27	27,5	0,9	41	23	18	SC	A-7-6	Unimodal	Placa de sucção e câmara de pressão de Richards
São Paulo -SP	Junior e Futai (2010)	0	10	23	67	27,1	1,3	63	41	22	MH	A-7-5	Bimodal	Placa de sucção, placa de pressão e papel filtro.

ps - Peso específico das partículas solidas, e- índice de vazios LL- Limite de liquidez, LP – Limite de plasticidade, IP – Índice de plasticidade.

Fonte: A autora (2023)

Para classificar os solos de acordo com o potencial de colapso foi considerando o critério de Jennings e Knight (1975) para a tensão de 200 kPa. Os autores das pesquisas dos solos de Brasília-DF e Barreiras-BA, forneceram apenas o potencial de colapso nas tensões de 50 e 100 kPa respectivamente, os valores foram considerados na classificação para quantificar o nível de colapsabilidade desses solos (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação de colapsabilidade pelo critério de Jennings & Knight (1975)

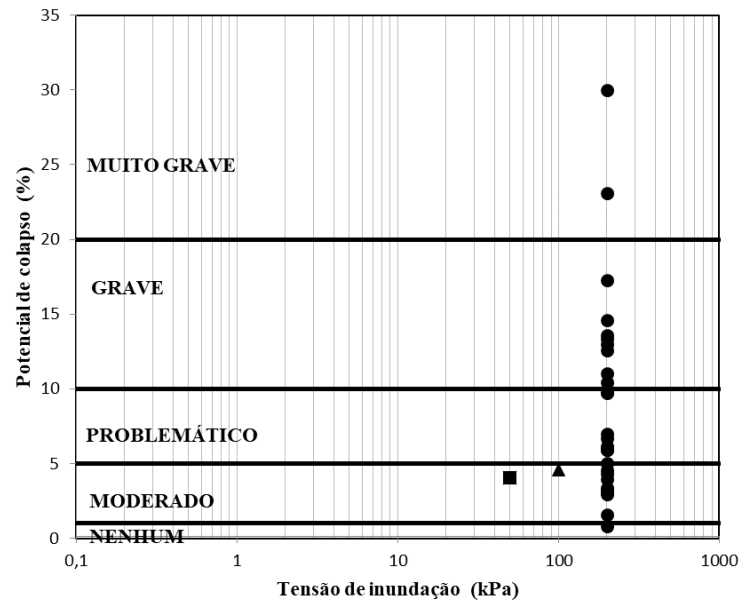
Área de estudo	Fonte	Tensão de inundação (kPa)	Potencial de colapso máximo (%)	Gravidade do problema
Maceió -AL (L1)	Santos e Coutinho (2022)	200	12,58	Grave
Maceió -AL (L2)	Santos e Coutinho (2022)	200	2,93	Moderado
Maceió -AL	Marques et al. (2006)	200	13,6	Grave
Barreiras-BA	Preuss et al. (2022)	100	4,58*	Moderado
Salvador BA	Maia (2018)	200	7	Problemático
Noguera - Catalunha	Mascarenha (2008)	200	5	Moderado
Guarne – Colômbia	González et al. (2015)	200	0,81	Nenhum
Juazeiro do Norte-CE	Xavier (2018)	200	10,41	Grave
Brasília-DF	Silva (2006)	50	4,07*	Moderado
Gorgan - Irã	Haeri (2016)	200	11	Grave
Viçosa - MG	Oliveira (2018)	200	23,07	Muito Grave
Cabo de Santo Agostinho--PE (P 01)	Lafayette (2006)	200	5,89	Problemático
Cabo de Santo Agostinho-PE (P 02)	Lafayette (2006)	200	6,15	Problemático
Camaragibe-PE	Magalhães (2013)	200	17,28	Grave
Curado-PE	Ramos (2019)	200	13,37	Grave
Petrolândia - PE	Ferreira (1995)	200	3,97	Moderado
Petrolândia - PE	Souza Neto (2004)	200	6	Problemático
Petrolina-PE	Freitas (2017) e Alves (2019)	200	4,54	Moderado
Recife-PE	Lafayette (2000)	200	13	Grave
Londrina-PR	Miguel et al. (2006)	200	14,62	Grave
Maringá-PR	Oliveira (2019)	200	3,22	Moderado
Cruz Alta - RS	Falcão (2021)	200	9,8	Problemático
Bauru -SP	Castro (2016)	200	5,9	Problemático
Bauru -SP 2	Rocha (2018)	200	9,7	Problemático
Campinas-SP	Benatti (2010)	200	4,3	Moderado
Campinas-SP 2	Scallet (2011)	200	3,06	Moderado
Ilha Solteira - SP	Soares (2018)	200	3,35	Moderado
São Carlos-SP	Davies (2000)	200	6,66	Problemático
São Carlos-SP 2	Rocha (2018)	200	1,6	Moderado
São Paulo -SP	Junior e Futai (2010)	200	30	Muito Grave

*Solos com tensões diferentes de 200kPa.

Fonte: A autora (2023)

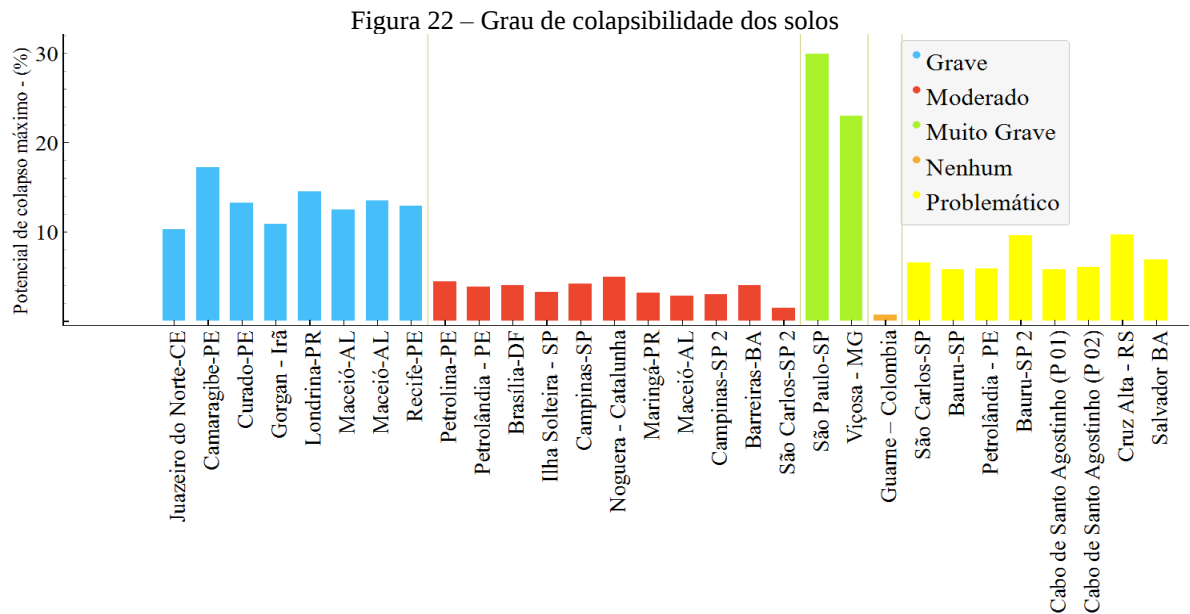
Os solos analisados foram classificados pelo critério de Jennings e Knight (1975) entre problemas de “Moderado a “Grave” como demonstrado no gráfico representado na Figura 21.

Figura 21 – Classificação pelo critério de Jennings e Knight (1975)



Fonte: A autora (2023)

Como é possível observar na Figura 22, a classificação que predominou na análise foi “Moderado” com 11 solos, seguida de “Grave” e “Problemático” ambas com 8 solos, “Muito grave” tinha apenas 2 solos e 1 dos solos foi classificado pelo critério como “Nenhum”.



Fonte: A autora (2023)

4.2 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS EXPANSIVOS ESTUDADOS

Os solos expansivos apresentaram uma textura fina, 27 dos 30 solos foram categorizados como argila e 3 como silte. As distribuições granulométricas desses solos estão ilustradas na Figura 23.

Figura 23 – Curvas granulométricas dos solos expansivos –a) CH, b) CH e CL, c) MH.

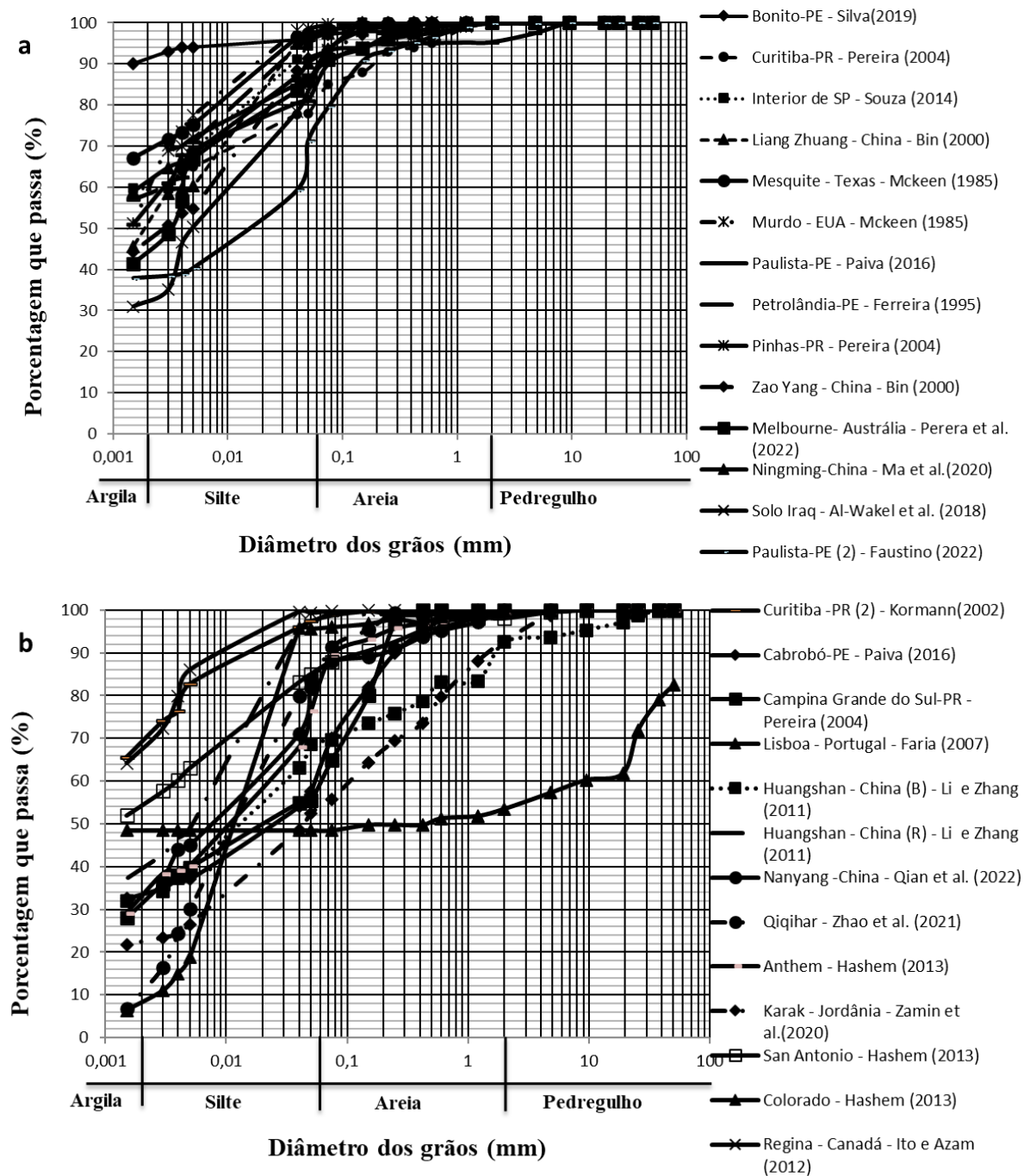
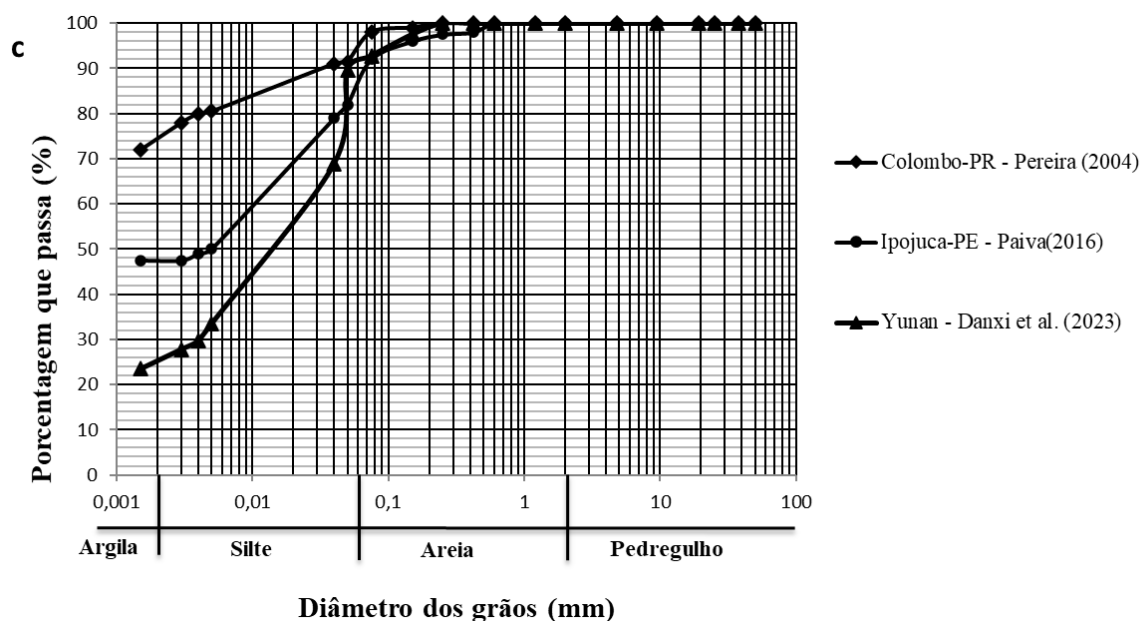


Figura 23 – Curvas granulométricas dos solos expansivos –a) CH, b) CH e CL c) MH (continuação).



Fonte: A autora (2023)

O limite de liquidez variou entre 37% e 218%, enquanto o limite de plasticidade entre 15,6% a 58%. Em todos os solos, o Índice de Plasticidade (IP) atingiu valores iguais ou superiores a 15%, o que os classificou como solos altamente plásticos. Quanto ao Índice de Vazios, este variou de 0,53 a 1,57, e o peso específico das partículas sólidas oscilou entre 25,5 e 30,1 kN/m³, conforme indicado na Tabela 3.

A avaliação da capacidade de expansão dos solos foi realizada pelos autores por meio de diversos métodos disponíveis na literatura. (Tabela 4), tais como expansão livre e tensão de expansão, ensaios edométricos duplos e simples, índice expansivo (ASTM,2003).

Tabela 3 – Características físicas dos solos expansivos.

Área de estudo	Fonte	Ped. (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	ρ_s (kN/m ³)	e	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS	TBR	Formato CR	Método de determinação da CR
Anthem - Arizona	Hashem (2013)	0	11	57	32	27,23	0,68	48	21	27	CL	A-7-6	Unimodal	Células de placa de pressão de oedometro 1-D e papel filtro
Melbourne- Australia	Perera et al. (2022)	0	8,8	24,2	67,1	26,1	0,79	52,3	18,4	33,9	CH	A-7-6	Unimodal	WP4
Regina - Canadá	Ito e Azam (2012)	0	0,69	26,96	72,35	27,5	1,05	82,8	30,1	52,7	CH	A-7-5	Bimodal	Extrator de placa de pressão e WP4-T
Huangshan (B) - China	Li e Zhang (2011)	7,5	23,9	34,4	34,2	25,53	0,73	40,4	15,6	24,8	CL	A-7-6	Unimodal	Extrator de placa de pressão
Huangshan (R)- China	Li e Zhang (2011)	0	3,05	53,98	42,97	30,13	0,9	42,1	15,6	26,5	CL	A-7-6	Unimodal	Extrator de placa de pressão
Nanyang -China	Qian et al. (2022)	0,15	16,43	46,65	36,77	27,4	0,96	45,1	25,3	19,8	CL	A-7-6	Bimodal	Translação de eixo, papel filtro e dessecador a vácuo
Ningming-China	Ma et al. (2020)	0	9,76	25,47	64,77	28,5	0,9	218	58	160	CH	A-7-5	Unimodal	Dessecador a vácuo
Liang Zhuang - China	Bin (2000)	0	3	43	54	27,29	0,71	63,5	27,3	36,2	CH	A-7-6	Unimodal	Extrator de placa de pressão volumétrica convencional e unidimensional, aparelho triaxial modificado para realizar medições sob tensão isotrópica
Qiqihar - China	Zhao et al. (2021)	0	18	70	12	26,8	0,71	42,8	22,4	20,4	CL	A-7-6	Unimodal	Translação de eixo e dessecador a vácuo
Yunan - China	Danxi et al. (2023)	0	10,3	61,87	27,83	26,4	0,62	80,6	44,8	35,8	MH	A-7-5	Unimodal	Tensiômetro e WP4C
Zao Yang - China	Bin (2000)	0	7	44	49	27,3	0,97	61,5	25,5	33	CH	A-7-6	Unimodal	Placa de pressão volumétrica convencional e unidimensional, aparelho triaxial modificado para realizar medições sob tensão isotrópica
Colorado - EUA	Hashem (2013)	0	1	50	49	27,78	0,83	65	23	42	CH	A-7-6	Unimodal	Células de placa de pressão de oedometro 1-D e papel filtro
Murdo - EUA	McKeen (1985)	0	1,31	28,47	51,26	27,2	0,83	77	31	46	CH	A-7-5	Unimodal	-
San Antonio - EUA	Hashem (2013)	0	10	35	54	27,95	0,89	66	24	42	CH	A-7-6	Unimodal	Células de placa de pressão de oedometro 1-D e papel filtro
Solo Iraq	Al-Wakel et al. (2018)	0	16,6	48,4	35	28,6	0,59	65,4	27,3	38,1	CH	A-7-6	Unimodal	Tensiômetro
Karak - Jordânia	Zamin et al. (2020)	10	39	28	23	26,2	1,57	52	18	34	CH	A-7-6	Unimodal	Sensores e tensiômetros
Bonito-PE	Silva (2019)	0	4	2	94	25,84	1,2	91	33	58	CH	A-7-6	Unimodal	Papel filtro e dessecador de vidro com soluções de NaCl e H2SO4
Cabrobó-PE	Paiva (2016)	0	29	34	37	26,06	1,19	37	18	19	CL	A-6	Bimodal	Papel filtro
Paulista-PE	Paiva (2016)	0	18	32	50	26,14	1	61	31	30	CH	A-7-6	Bimodal	Papel filtro
Paulista-PE (2)	Faustino (2022)	0	31	31	38	26,7	1,51	52,6	21,8	30,8	CH	A-7-6	Unimodal	Papel filtro
Petrolândia-PE	Ferreira (1995)	0	6	22	72	27,12	0,79	66	28	38	CH	A-7-5	Unimodal	Membrana de pressão e dessecador a vácuo com soluções de NaCl e H2SO4
Ipojuca-PE	Paiva (2016)	0	16	17	67	26,26	0,8	81	44	37	MH	A-7-6	Bimodal	Papel filtro
Lisboa - Portugal	Faria (2007)	17,4	29,03	5,05	48,51	27,47	0,53	37	22	15	CL	A-6	Unimodal	Psicrômetros e WP4
Campina Grande do Sul-PR	Pereira (2004)	0	35,4	34,6	30	26,53	0,77	42	23,9	18,1	CL	A-7	Unimodal	Câmara de pressão de Richards e papel fitro
Colombo-PR	Pereira (2004)	0	1,4	23,6	75	26,76	1,29	100	44,5	55,5	MH	A-7	Unimodal	Câmara de pressão de Richards e papel fitro
Curitiba -PR	Pereira (2004)	0	15,3	26,7	58	26,82	1,14	86	31,5	54,5	CH	A-7	Unimodal	Câmara de pressão de Richards e papel fitro
Curitiba -PR (2)	Kormann (2002)	0	3	27	70	26,5	0,74	75	34	41	CH	A-7-5	Unimodal	Papel filtro
Pinhas-PR	Pereira (2004)	0	8,2	24,8	67	26,74	1,56	83	35,4	47,6	CH	A-7	Unimodal	Câmara de pressão de Richards e papel fitro
Interior de SP	Souza (2014)	0	5	45	50	26,9	0,84	76	32	44	CH	A-7	Unimodal	Papel filtro e dessecador a vácuo
Mesquite - Texas	McKeen (1985)	0	2,65	25,66	71,69	26,4	0,88	83,4	30,2	53,2	CH	A-7-5	Unimodal	-

ρ_s -Peso específico real dos grãos, e- índice de vazios LL- Limite de liquidez, LP – Limite de plasticidade, IP – Índice de plasticidade

Fonte: A autora (2023)

Tabela 4 – Capacidade de expansão dos solos estudados.

Área de estudo	Fonte	Expansão livre - (%)	Tensão de expansão	Carreg. após expansão c/diferentes tensões - (kPa)	Expansão e colapso sob tensão - (kPa)	Volume constante -(kPa)	Seed et al. (1962)	Chen (1965)	Daksanamurthy & Raman (1973)	Índice expansivo (ASTM,2003)
Anthem - Arizona	Hashem (2013)	-	115	-	-	-	Alto	Alto	Médio	-
Melbourne- Australia	Perera et al. (2022)	-	-	-	-	-	Alto	Alto	Alto	-
Regina - Canadá	Ito e Azam (2012)	-	-	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Muito alto	-
Huangshan (B) - China	Li e Zhang (2011)	-	-	-	-	-	Alto	Alto	Médio	56
Huangshan (R)- China	Li e Zhang (2011)	-	-	-	-	-	Alto	Alto	Médio	30
Nanyang -China	Qian et al. (2022)	59*	-	-	-	-	Médio	Alto	Médio	-
Ningming-China	Ma et al. (2020)	370*	-	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Muito alto	-
Liang Zhuang - China	Bin (2000)	-	-	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Alto	-
Qiqihar - China	Zhao et al. (2021)	67*	-	-	-	-	Alto	Alto	Médio	-
Yunan - China	Danxi et al. (2023)	-	-	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Muito alto	-
Zao Yang - China	Bin (2000)	-	-	-	-	-	Alto	Muito alto	Alto	-
Colorado - EUA	Hashem (2013)	-	250	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Alto	-
Murdo - EUA	McKeen (1985)	-	-	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Muito alto	-
San Antonio - EUA	Hashem (2013)	-	180	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Alto	-
Solo Iraq	Al-Wakel et al. (2018)	-	120	-	-	-	Alto	Muito alto	Médio	-
Karak - Jordânia	Zamin et al. (2020)	-	-	-	-	-	Alto	Alto	Alto	-
Bonito-PE	Silva (2019)	9,9 - (10 kPa)	-	544	860	371	Muito alto	Muito alto	Muito alto	-
Cabrobó-PE	Paiva (2016)	3,2 - (10kPa)	-	90	100	87	Médio	Médio	Médio	-
Paulista-PE	Paiva (2016)	10,7 - (10kPa)	-	300	180	275	Alto	Muito alto	Alto	-
Paulista-PE (2)	Faustino (2022)	11,2 (1 kPa)	101,7	-	-	-	Alto	Alto	Alto	-
Petrolândia-PE	Ferreira (1995)	9,8 (10kPa)	271,3	333	239	242	Muito alto	Muito alto	Alto	-
Ipojuca-PE	Paiva (2016)	12,0 - (10kPa)	-	190	220	245	Alto	Muito alto	Muito alto	-
Lisboa - Portugal	Faria (2007)	2,9 (25 kPa)	-	-	-	-	Médio	Médio	Médio	-
Campina Grande do Sul-PR	Pereira (2004)	-	11,1	-	-	-	Médio	Alto	Médio	-
Colombo-PR	Pereira (2004)	-	0	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Muito alto	-
Curitiba -PR	Pereira (2004)	-	0	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Muito alto	-
Curitiba -PR (2)	Kormann(2002)	3*	-	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Muito alto	-
Pinhas-PR	Pereira (2004)	-	4,2	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Muito alto	-
Interior de SP	Souza (2014)	-	342,2	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Muito alto	-
Mesquite - Texas	McKeen (1985)	-	-	-	-	-	Muito alto	Muito alto	Muito alto	-

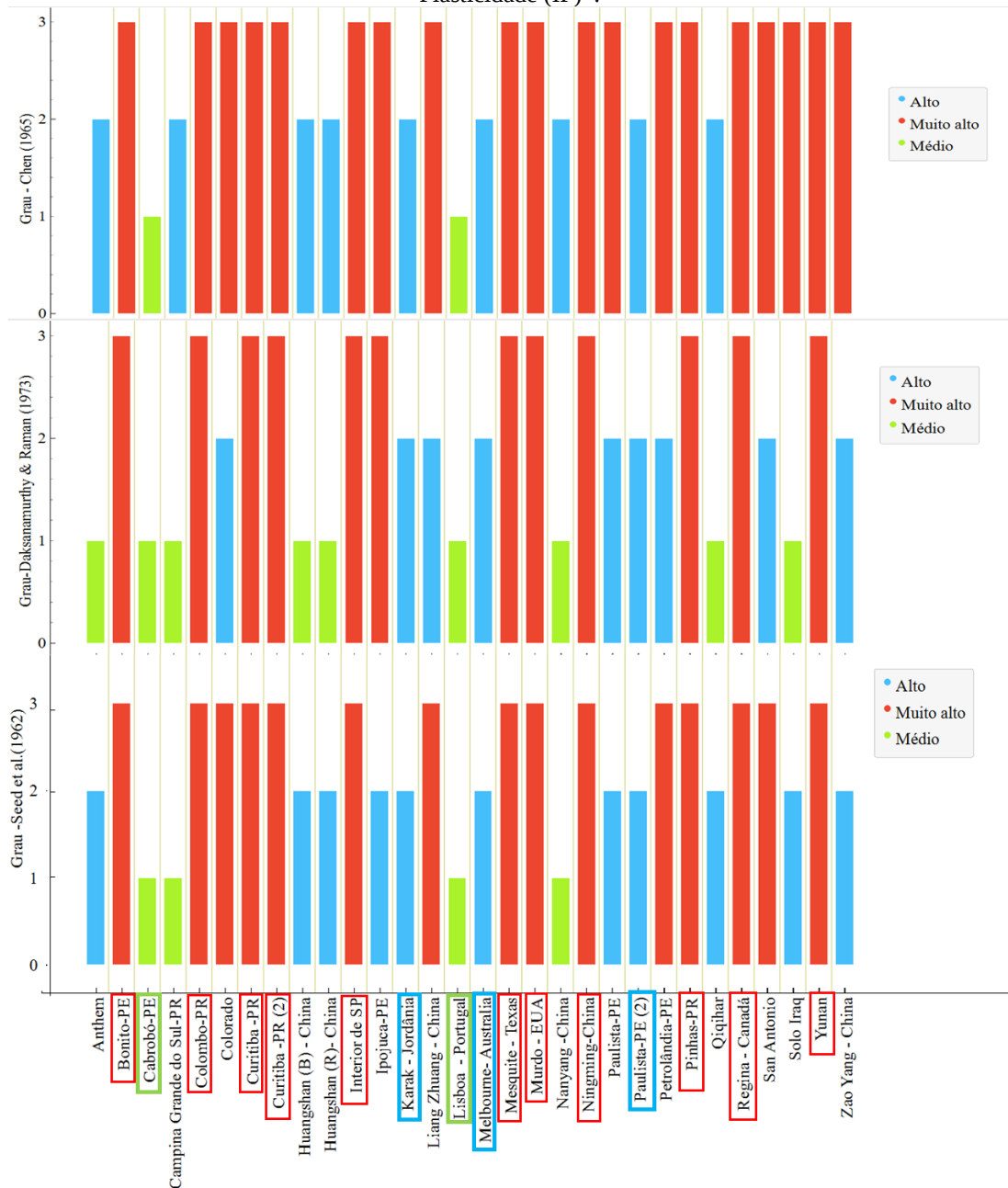
*O autor não informou a tensão utilizada.

Fonte: A autora (2023)

Com o intuito de uniformizar um parâmetro para a análise da expansividade dos solos, foi utilizado dois critérios baseados no Limite de Liquidez (LL): Chen (1965) e Daksanamurthy & Raman (1973) e um baseado no Índice de Plasticidade (IP): Seed et al. (1962).

Dentre os solos estudados 16 obtiveram a mesma classificação nos três critérios proposto de análise, porém os critérios de Chen (1965) e Seed et al. (1962) foram os que mais tiveram classificações em comum, como é possível verificar na Figura 24.

Figura 24 – Classificações do grau de expansão relacionada ao Limite de Liquidez (LL) e ao Índice de Plasticidade (IP)*.

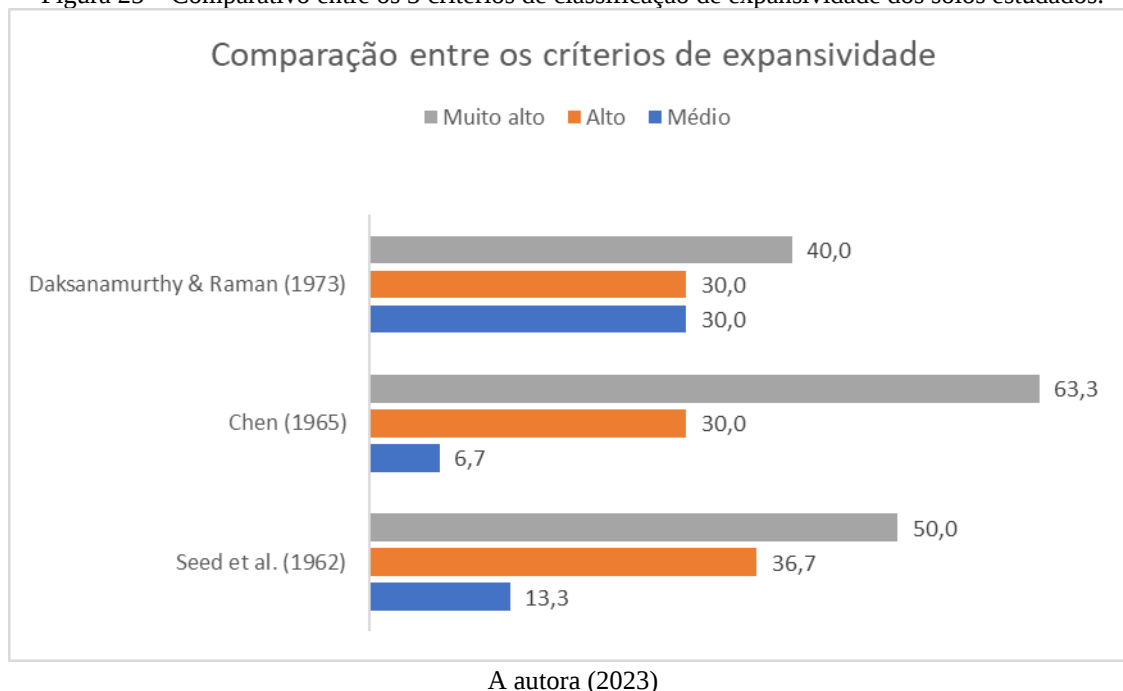


*Os solos destacados apresentaram a mesma classificação nas três análises propostas.

Fonte: A autora (2023)

Os três critérios apresentaram maiores percentuais de ocorrência no grau de expansividade “Muito alto” seguido do grau de expansividade “Alto” e por fim “Médio”, apenas no critério de Daksanamurthy & Raman (1973) o grau de expansividade “Alto” e “Médio” coincidiram. Nos três critérios o percentual classificado como “Alto” foi cerca de 30% (Figura 25).

Figura 25 – Comparativo entre os 3 critérios de classificação de expansividade dos solos estudados.



4.3 AJUSTES E PREVISÃO DAS CURVAS DE RETENÇÃO DOS SOLOS COLAPSÍVEIS

São apresentados os dados experimentais da relação entre umidade e sucção, juntamente com as curvas ajustadas de acordo com as propostas de Van Genuchten (1980) e Gitirana e Fredlund (2004), assim como a previsão da curva obtida com base nos dados granulométricos propostos por Mohammadi e Vanclooster (2012) para esses solos específicos. Além disso, são fornecidos os índices dos ajustes das curvas e os coeficientes de determinação associados a esses ajustes.

4.3.1 Ajuste e previsão das curvas de retenção unimodal dos solos colapsíveis

Os ajustes realizados pelas propostas de Van Genuchten (1980) e Gitirana e Fredlund (2004) nos solos colapsíveis com comportamento unimodal nas curvas de retenção (Figuras 26a até 26m), apresentaram boas estimativas dos dados experimentais, bem como o formato da curva foi bem representado.

Já a previsão das curvas de retenção pelo método de Mohammadi e Vanclooster (2012), em geral não apresentou um bom ajuste com os dados experimentais, com exceção dos solos das Figuras 26a, 26c, 26d, 26j em que é possível observar que tanto o formato da curva quanto os valores de sucção e umidade volumétrica foram bem ajustados, é importante salientar que esses solos foram classificados como areia pelo sistema SUCS. O fato de a proposta de previsão da curva de retenção a partir da granulometria ter apresentados melhores ajustes para os solos arenosos pode ser atribuído ao fato desses solos apresentarem partículas em formatos mais subarredondados ou arredondados, aproximando-se da simplificação feita pelos autores que consideraram as partículas do solo esféricas em sua formulação. Além disso, o solo arenoso tem baixa capacidade de retenção de água, ou seja, ocorre uma grande variação de umidade, em pequenas variações de sucções, isso faz com que esses solos apresentem um melhor ajuste a esta proposta segundo os autores; entretanto a proposta apresenta limitações para altas sucções, essa tendência foi atribuída a dessorção incompleta da água residual que reveste as partículas do solo ou a água retida dentro das partículas não esféricas que possuem uma alta energia superficial.

Figura 26 – Ajustes e previsão das curvas de retenção unimodais dos solos colapsíveis.

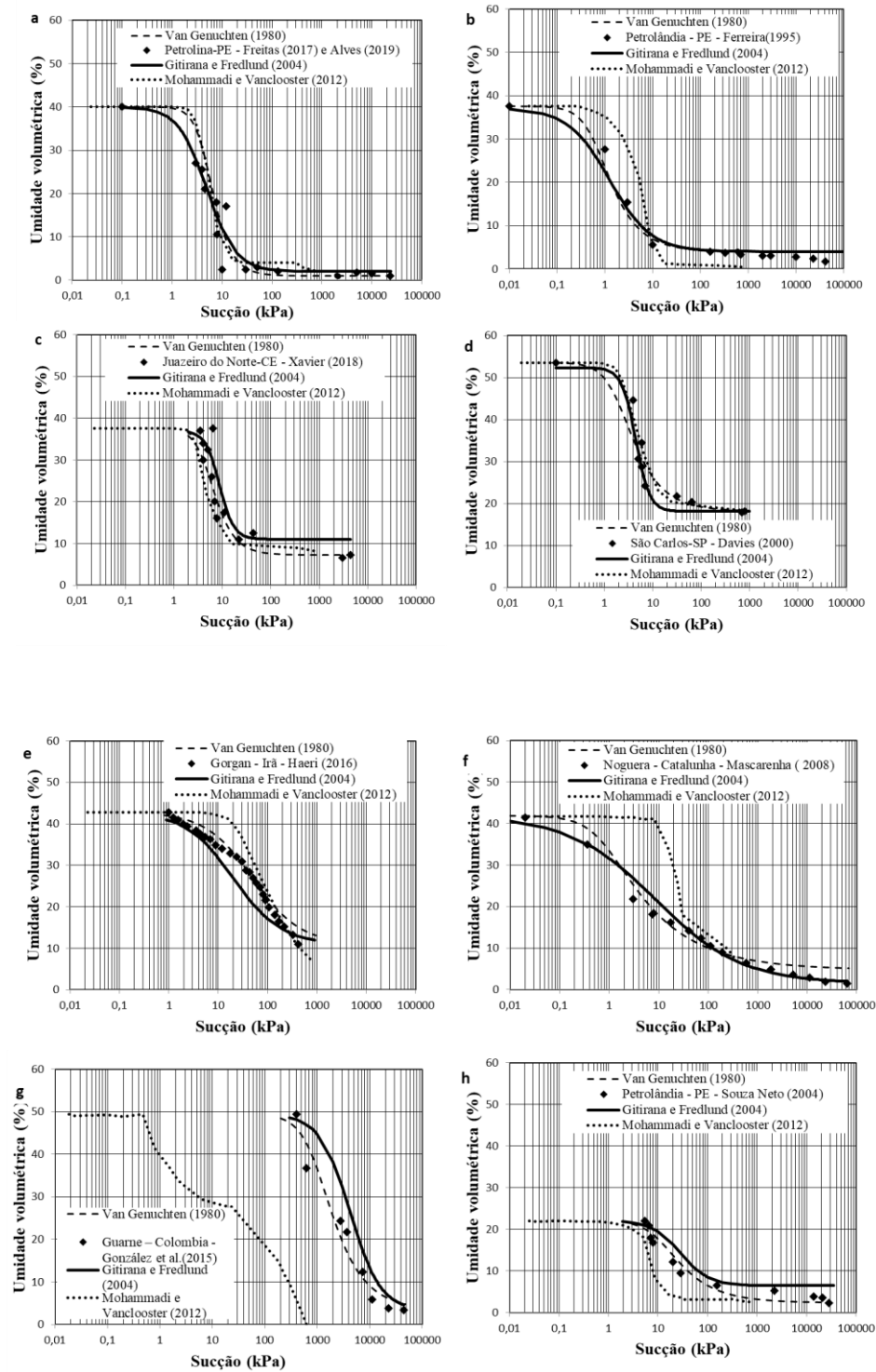
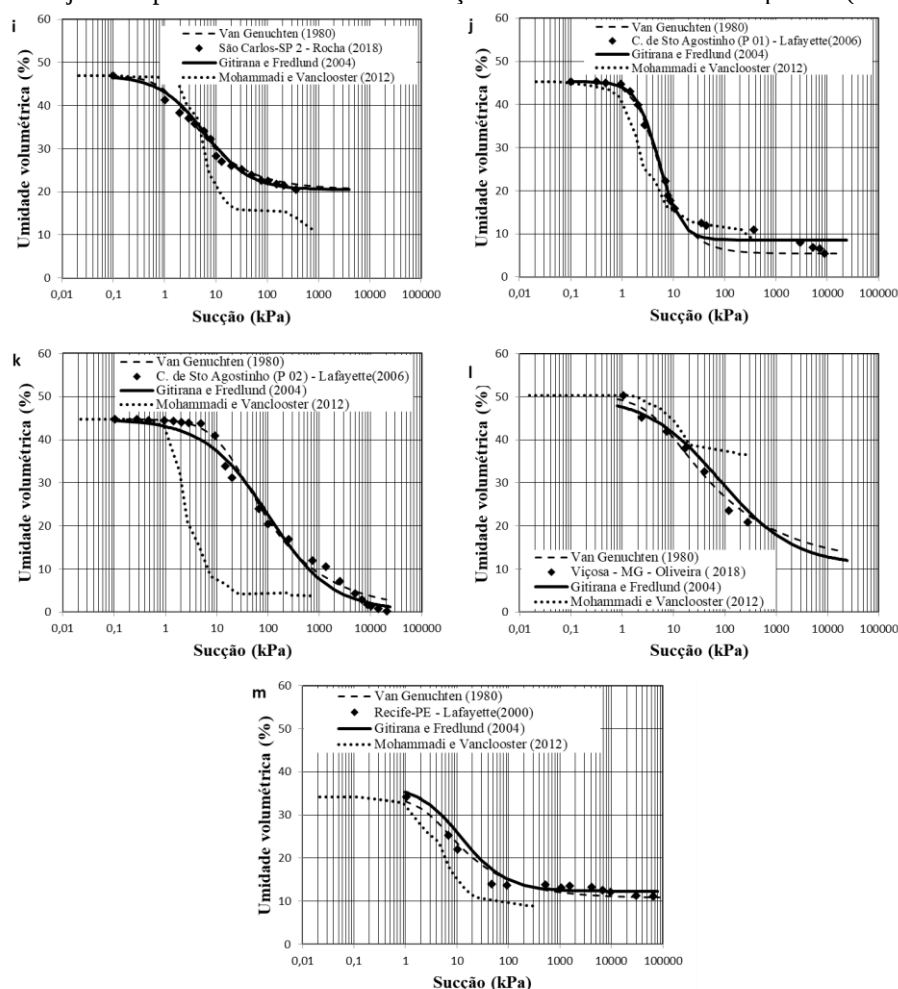


Figura 26 – Ajustes e previsão das curvas de retenção unimodais dos solos colapsíveis (continuação)



Fonte: A autora (2023)

O ajuste proposto por Van Genuchten (1980) apresenta coeficiente de determinação (Tabela 5) variando de 0,84 (Juazeiro do Norte-CE) a 0,99 (São Carlos 2, CBO 1, CBO 2 e Viçosa-MG); no ajuste proposto por Gitirana e Fredlund (2004) a variação é de 0,83 (Juazeiro do Norte-CE) a 0,99 (São Carlos 2, CBO 1, CBO 2 e Viçosa-MG), de acordo com a classificação proposta por Shimakura (2006) (Quadro 3b – Materiais e métodos) para os coeficientes de determinação, os dois métodos apresentaram um “ajuste muito forte”, já o método de Mohammadi e Vanclooster (2012) apresenta coeficientes de correlação variando entre 0,76 (Gorgan - Irã) a 0,99 (Guarne – Colombia), se enquadrando na categoria de “ajuste forte” a “muito forte”. Para esse método o coeficiente de determinação não ofereceu precisão na avaliação das previsões das curvas de retenção, tornando-se inadequado como um indicador representativo para a análise. Gerscovich (2001) identificou um comportamento similar ao relatado anteriormente, segundo a autora em algumas simulações, foi notada uma discrepância constante entre as curvas experimentais e as curvas previstas, sendo assim, mesmo quando o

coeficiente de determinação (R^2) estava próximo de 1, o ajuste não refletia uma alta qualidade de previsão (Tabela 5).

Tabela 5 – Índices e coeficientes de determinação utilizados nos ajustes e previsão dos solos colapsíveis com curva unimodal.

Ajustes	Van Genuchten (1980)						Gitirana e Fredlund (2004)						Mohammadi e Vanclooster (2012)
Índices	θ_r	θ_s	α	n	m	R^2	S1	S2	ψ_b	ψ_{res}	d	R^2	R^2
Nogueira - Catalunha - Mascarenha (2008)	0,048	0,419	1,300	1,400	0,286	0,98	100,8	3,6	0,001	64052	0,5	0,98	0,94
Guarne – Colombia - González et al. (2015)	0,033	0,494	0,001	1,900	0,474	0,95	90,6	6,1	403,0	44780	1,5	0,95	0,99
Juazeiro do Norte-CE - Xavier (2018)	0,072	0,375	0,200	2,500	0,600	0,84	85,7	25,5	3,500	22	2,9	0,83	0,89
Gorgan - Irã - Haeri (2016)	0,110	0,428	0,020	0,900	1,000	0,98	97,0	24,9	0,98	420	0,9	0,98	0,76
Viçosa-MG - Oliveira (2018)	0,108	0,503	0,200	1,300	0,231	0,99	81,7	17,5	0,90	7333	0,6	0,99	0,82
Cabo de Santo Agostinho-PE (P 01) – Lafayette (2006)	0,055	0,453	0,300	2,100	0,524	0,99	95,6	18,0	0,003	8752	2,0	0,99	0,96
Cabo de Santo Agostinho -PE (P 02) – Lafayette (2006)	0,003	0,447	0,060	1,400	0,286	0,99	99,3	0,7	0,50	20519	0,7	0,99	0,95
Petrolândia - PE- Ferreira (1995)	0,040	0,376	1,500	1,900	0,474	0,98	100,0	10,8	0,01	160	1,0	0,98	0,97
Petrolândia - Souza Neto (2004)	0,023	0,221	0,091	1,700	0,412	0,95	58,8	17,1	5,4	155	1,5	0,94	0,96
Petrolina-PE -Freitas (2017) e Alves (2019)	0,010	0,400	0,200	2,700	0,630	0,89	95,6	4,8	0,10	250	1,5	0,92	0,93
Recife-PE – Lafayette (2000)	0,108	0,343	0,300	1,500	0,333	0,96	79,3	26,3	0,001	153004	1,0	0,96	0,94
São Carlos-SP - Davies (2000)	0,181	0,535	0,500	1,900	0,474	0,90	100,0	34,6	0,10	200	3,0	0,94	0,92
São Carlos 2 - Rocha (2018)	0,205	0,469	0,600	1,560	0,359	0,99	100,1	43,7	0,10	361	1,0	0,99	0,85

θ_r – Umidade volumétrica residual; θ_s – Umidade volumétrica de saturação; α , m, n – Índices de ajuste de Van Genuchten (1980); S - grau de saturação; ψ_b - valor de entrada de ar e ψ_{res} -sucção residual; d – Índice de ajuste de Gitirana e Fredlund (2004); R^2 – Coeficiente de determinação.

Fonte: A autora (2023)

4.3.2 Ajuste e previsão da curva de retenção bimodal dos solos colapsíveis.

Os solos colapsíveis apresentaram curvas de comportamento bimodal bem definidas (Figuras 27a até 27q), os ajustes em geral apresentaram boa concordância com os dados experimentais. O ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) foi o que melhor representou os dados, é possível observar que o formato da curva ajustada acompanha muito próximo os dados experimentais e os patamares são bem representados, o que já era esperado, pois os autores apresentaram uma equação especificamente para este tipo de curva.

No método de Van Genuchten (1980), ao comparar as curvas ajustadas com os dados experimentais, pode-se notar que o formato das curvas bimodais não foi adequadamente representado. Os platôs (patamares) não são bem evidenciados, apesar de os coeficientes de determinação apresentarem valores consideravelmente elevados (conforme mostrado na Tabela 6).

Já o método de Mohammadi e Vanclooster (2012) nos solos das Figuras (27a,27b,27f, e 27h) representou bem as curvas de retenção, esses solos são classificados como areia e silte pelo SUCS, nos demais solos houve uma diferença expressiva quando comparados aos dados experimentais e em todos os solos é possível notar a limitação para altas sucções, esse mesmo comportamento foi observado nos solos expansivos descritos a seguir, que apresentam textura fina predominantemente argilosa, a estrutura desses solos são formadas por partículas não esféricas, e possuem alta capacidade de retenção de água devido ao efeito de capilaridade e das forças de adsorção; essas características justificam a ineficiência da proposta para esses solos, pois são exatamente contrárias as simplificações adotadas pelos autores.

Figura 27 – Ajustes e previsão das curvas de retenção bimodais dos solos colapsíveis.

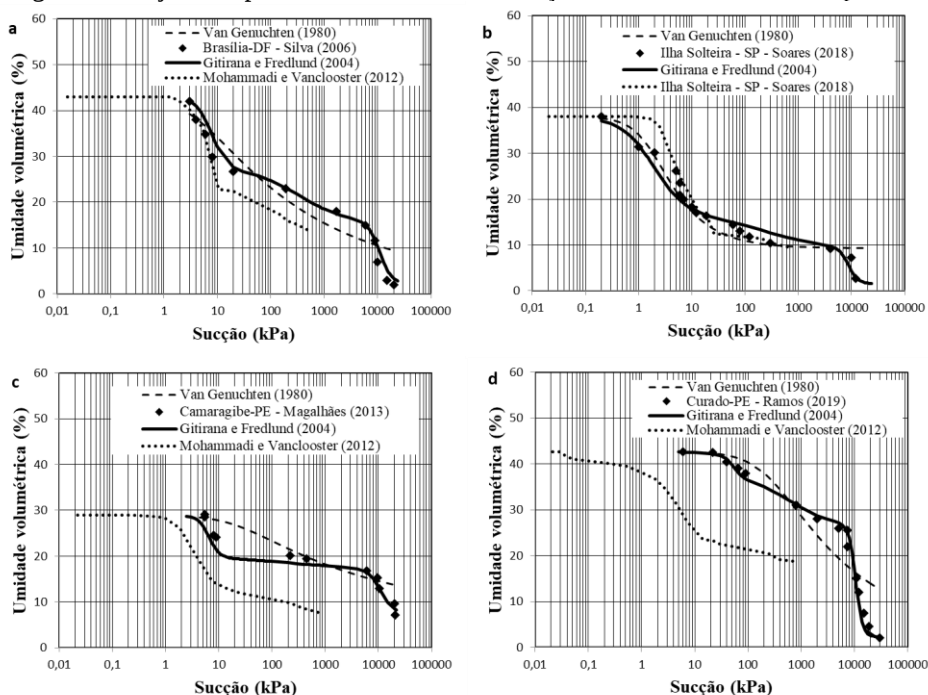


Figura 27 – Ajustes e previsão das curvas de retenção bimodais dos solos colapsáveis. (continuação)

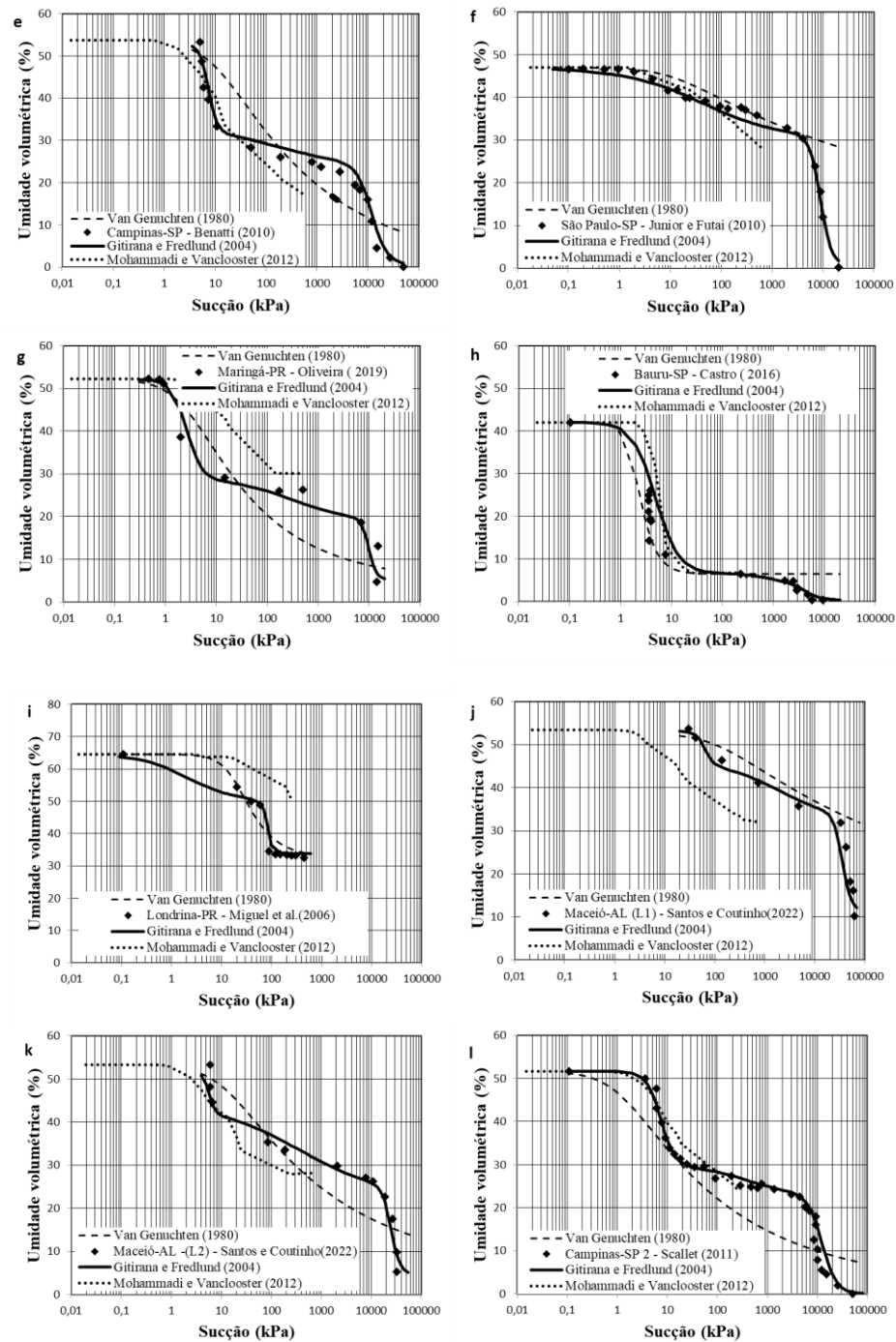
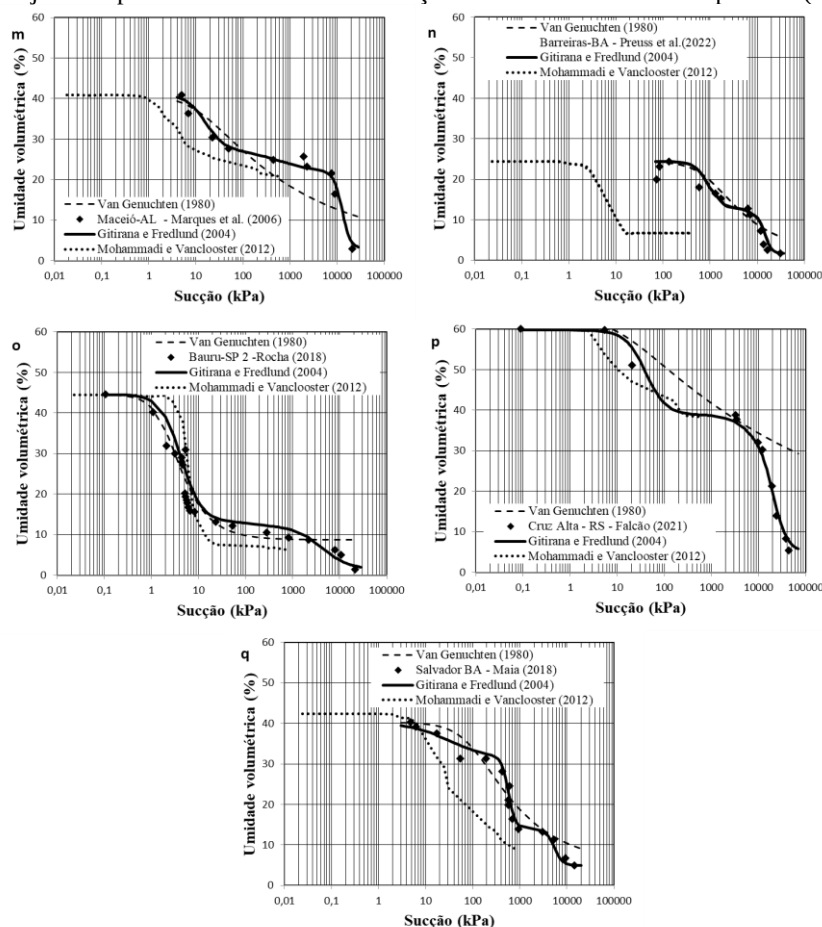


Figura 27 – Ajustes e previsão das curvas de retenção bimodais dos solos colapsíveis. (continuação)



Fonte: A autora (2023)

Na proposta de Van Genuchten (1980) o valor do coeficiente de determinação variou de 0,73 “ajuste forte” em (Maceió–Marques) a 0,94 “ajuste muito forte” em (Salvador/BA), apesar dos valores de coeficientes relativamente altos como mencionado anteriormente o formato das curvas não foram bem representados pelo ajuste. O método de Gitirana e Fredlund (2004) apresentou coeficiente de determinação entre 0,91 (Bauru/SP) a 0,99 (Brasília/DF, Camaragibe/PE, Curado/PE, Campinas/SP, Campinas 2/SP, Cruz Alta/RS), ambos se enquadram na categoria de “ajuste muito forte”, essa proposta foi o que melhor representou o formato das curvas bimodais.

A proposição de Mohammadi e Vanclooster (2012) apresentou coeficientes de correlação variando entre 0,77 “ajuste forte” em (Bauru-SP) a 0,98 “ajuste muito forte” em (Ilha Solteira – SP), o coeficiente de determinação mais uma vez não se mostrou eficiente na avaliação da previsão proposta por Mohammadi e Vanclooster (2012), pois tomando como exemplo o solo de Bauru-BP é possível verificar visualmente uma boa previsão dos pontos experimentais, porém o coeficiente de determinação foi relativamente baixo (Tabela 6).

Tabela 6 – Índices e coeficientes de determinação utilizados nos ajustes e previsão dos solos colapsáveis com curva bimodal.

Ajustes	Van Genuchten (1980)						Gitirana e Fredlund (2004)												* MV (2012)
Índices	θ_r	θ_s	α	n	m	R ²	S1	S2	S3	S4	ψ_{b1}	ψ_{res1}	ψ_{b2}	ψ_{res2}	d1	d2	d3	R ²	R ²
Maceió-AL (L1) - Santos e Coutinho (2022)	0,10	0,53	0,01	1,10	0,09	0,88	103	89	61	20	30	139	32964	38934	5,0	0,7	5,0	0,96	0,79
Maceió-AL (L2) - Santos e Coutinho (2022)	0,05	0,53	0,09	1,20	0,17	0,84	102	85	43	6	5	7	18804	32263	8,0	0,5	5,0	0,96	0,83
Maceió-AL - Marques et al. (2006)	0,03	0,41	0,09	1,20	0,17	0,73	75	50	39	5	5	50	7599	21247	2,2	1,0	5,0	0,97	0,94
Barreiras-BA - Preuss et al. (2022)	0,02	0,24	0,001	1,50	0,33	0,92	58	30	27	4	136	6305	7048	30719	3,0	6,0	6,0	0,94	0,96
Salvador-BA - Maia (2018)	0,05	0,40	0,01	1,40	0,29	0,94	100	78	35	12	6	164	2000	14482	1,0	6,0	5,0	0,98	0,97
Brasília-DF - Silva (2006)	0,02	0,43	0,28	1,20	0,17	0,91	70	45	25	3	3	20	6000	20000	3,0	1,0	4,0	0,99	0,94
Camaragibe-PE - Magalhães (2013)	0,07	0,29	0,05	1,17	0,15	0,88	64	44	37	16	6	8	6000	20700	4,4	0,5	3,7	0,99	0,89
Curado-PE - Ramos (2019)	0,02	0,43	0,004	1,28	0,22	0,86	90	80	55	4	32	90	4000	28000	5,0	1,0	7,0	0,99	0,91
Londrina-PR - Miguel et al. (2006)	0,33	0,65	0,05	2,00	0,50	0,93	99	76	75	51	0,1	39	58	121	0,9	5,0	10,0	0,98	0,93
Maringá-PR - Oliveira (2019)	0,05	0,52	0,40	1,30	0,23	0,90	80	45	29	7	0,5	15	6914	13987	3,0	0,7	6,0	0,97	0,92
Cruz Alta-RS - Falcão (2021)	0,06	0,63	0,10	1,10	0,09	0,83	98	64	52	8	1	3242	9753	43783	2,0	2,0	3,0	0,99	0,92
Bauru-SP - Castro (2016)	0,07	0,42	0,50	3,00	0,67	0,84	98	15	11	1	0,1	230	1685	9425	1,9	2,0	2,5	0,91	0,77
Bauru -SP 2 - Rocha (2018)	0,09	0,45	0,46	1,92	0,48	0,91	103	30	28	3	1	24	818	21166	2,0	2,0	1,5	0,92	0,86
Campinas-SP - Benatti (2010)	0,001	0,54	0,10	1,22	0,18	0,85	86	54	36	0,2	5	11	2800	50000	5,0	0,5	3,0	0,99	0,89
Campinas-SP 2 - Scallet (2011)	0,02	0,52	0,90	1,20	0,17	0,84	82	47	37	0,001	1	55	3015	50920	3,0	1,0	3,0	0,99	0,97
Ilha Solteira - SP - Soares (2018)	0,09	0,38	0,60	1,70	0,41	0,90	76	33	18	3	0,2	19	4000	19000	1,4	0,8	5,0	0,96	0,98
São Paulo-SP - Junior e Futai (2010)	0,12	0,47	0,10	1,10	0,09	0,80	82	81	53	0,2	0,01	1	4000	20000	1,0	0,6	4,0	0,98	0,91

θ_r – Umidade volumétrica residual; θ_s – Umidade volumétrica de saturação; α , m, n – Índices de ajuste de Van Genuchten (1980); S - grau de saturação; ψ_b - valor de entrada de ar e ψ_{res} -sucção residual; d₁, d₂ e d₃ – Índice de ajuste de Gitirana e Fredlund (2004); R² – Coeficiente de determinação.

* Mohammadi e Vanclooster (2012)

Fonte: A autora (2023)

Resumindo, nos solos unimodais os ajustes realizados pelos métodos de Van Genuchten (1980) e Gitirana e Fredlund (2004) apresentaram resultados semelhantes, com altos coeficientes de correlação e uma boa representação da forma das curvas de retenção. No entanto, nos solos bimodais, o método de ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) mostrou resultados superiores, Bonder (2008) observou o mesmo resultado em sua pesquisa ao comparar a proposta de Gitirana e Fredlund (2004) e Fredlund e Xing (1994) em um solo de estrutura bimodal. O método de Van Genuchten não conseguiu representar adequadamente os platôs característicos das curvas bimodais, segundo Pimentel et al. (2022) essa proposta não é adequada para solos com distribuição bimodal de poros e confirmado aqui no presente trabalho.

No que diz respeito a previsão da curva de retenção a partir da granulometria, os solos colapsíveis arenosos e siltosos foram os que melhor se ajustaram ao método proposto por Mohammadi e Vanclooster (2012), nos demais solos colapsíveis a forma característica das curvas de retenção não foram bem representadas. Foi observada uma defasagem constante entre as curvas experimentais e as curvas previstas. mesmo quando o coeficiente de determinação (R^2) era próximo de 1, bem como o inverso um coeficiente de determinação relativamente baixo, mas com uma boa representatividade dos pontos experimentais da curva. Salientando que o coeficiente de determinação na proposta de Mohammadi e Vanclooster (2012) foi calculado relacionando os dados experimentais da sucção com os dados de sucção obtidos a partir da distribuição granulométrica.

4.4 AJUSTES E PREVISÃO DAS CURVAS DE RETENÇÃO DOS SOLOS EXPANSIVOS.

4.4.1 Ajuste e previsão da curva de retenção unimodal dos solos expansivos

Dos solos expansivos, 25 apresentaram curva de retenção unimodal (Figuras 23a até 23y). Os ajustes realizados com o método de Van Genuchten (1980) e o método de Gitirana e Fredlund (2004) foram eficazes na representação dos dados experimentais em todos esses 25 solos. Por outro lado, a previsão da curva proposta por Mohammadi e Vanclooster (2012) foi representativa apenas nos solos destacados nas Figuras 28a, 28c, 28f, 28g, 28n e 28v.

Figura 28 – Ajustes e previsão das curvas de retenção unimodal dos solos expansivos

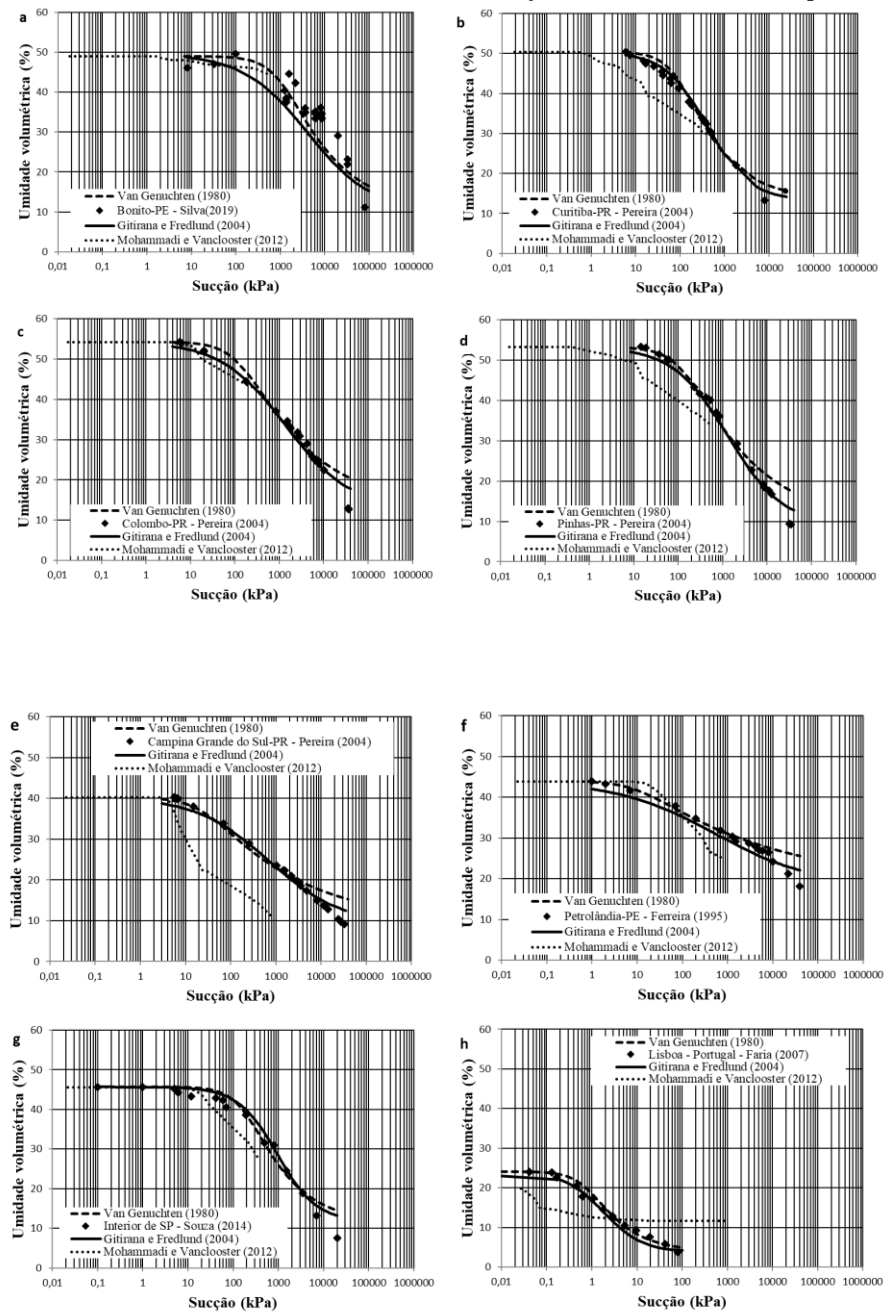


Figura 28 – Ajustes e previsão das curvas de retenção unimodal dos solos expansivos (continuação)

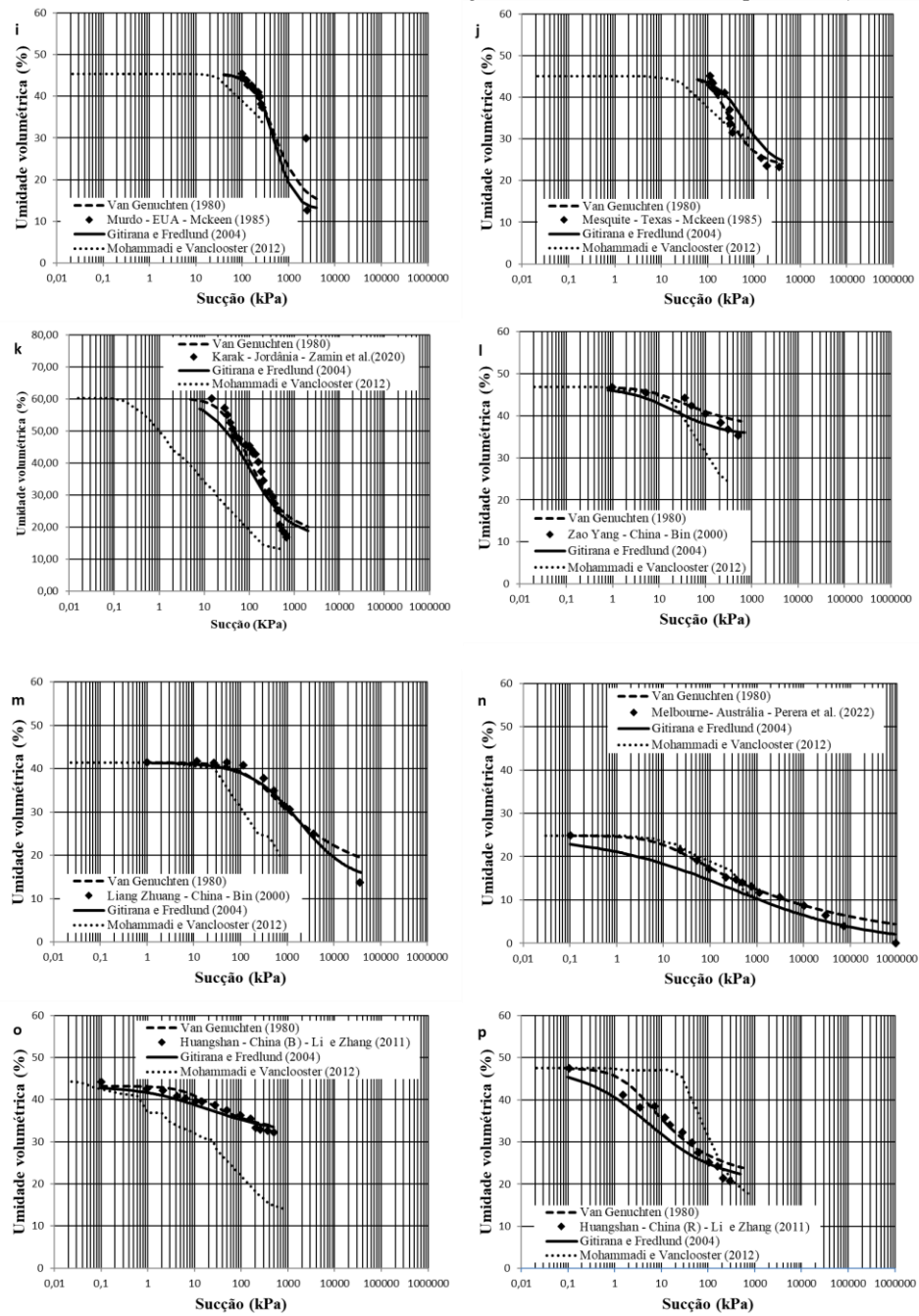
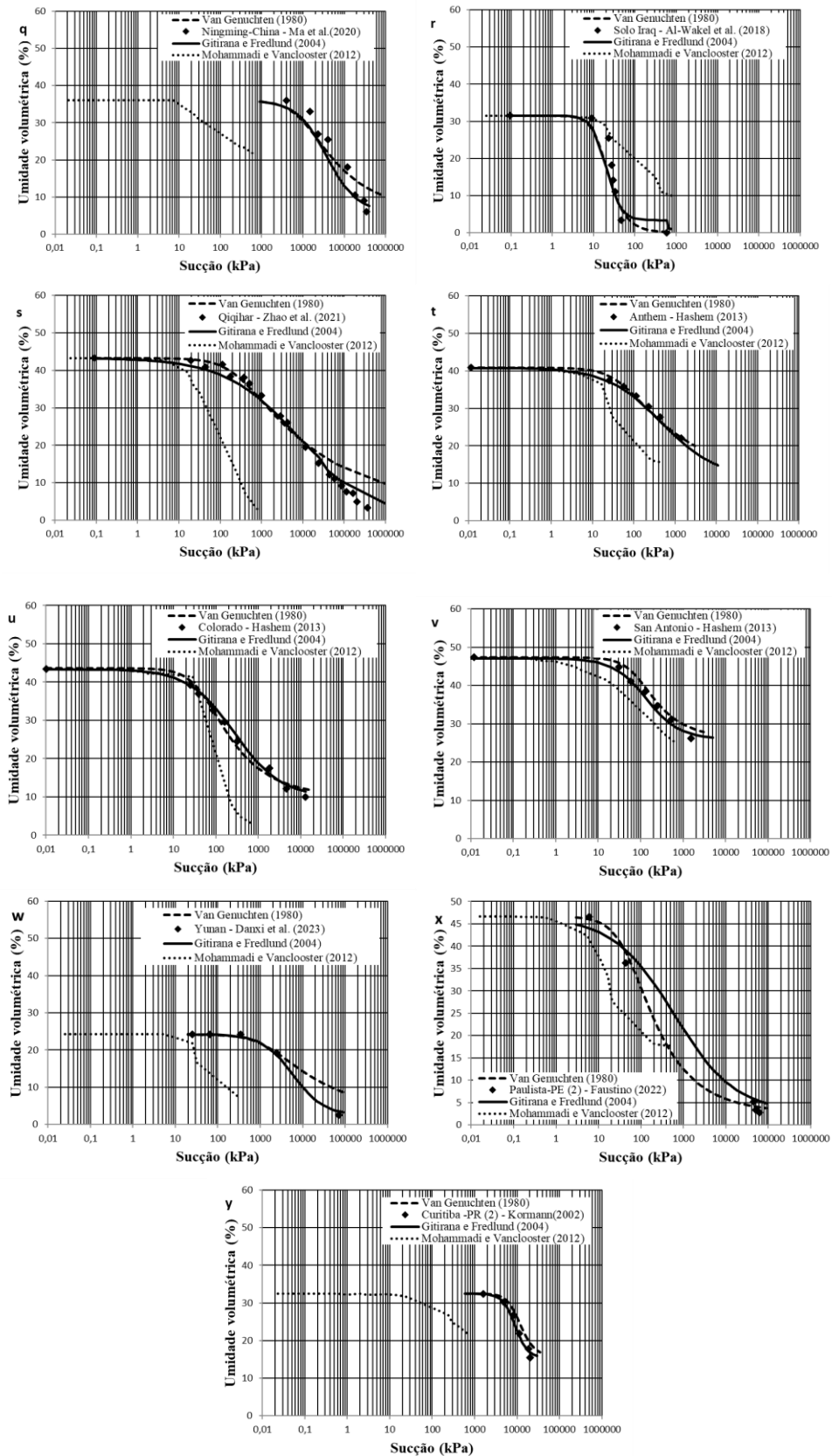


Figura 28 – Ajustes e previsão das curvas de retenção unimodal dos solos expansivos (continuação)



Fonte: A autora (2023)

O coeficiente de determinação obtido pelo método de Van Genuchten (1980) variou de 0,80 (Bonito-PE) a 1,00 (Paulista-PE 2), já no ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) o coeficiente foi 0,80 (Bonito-PE) a 1,00 (Yunan), ambos os ajustes se enquadraram na categoria de “ajuste muito forte” e representaram bem o formato da curva. No método de Mohammadi e Vanclooster (2012) o coeficiente de determinação foi de 0,51 (Bonito-PE) e 1,00 (San Antonio), variando de “ajuste forte” a “ajuste muito forte” o formato da curva foi bem representado em alguns solos conforme mencionado anteriormente, porém a limitação para altas sucções podem ser observadas em todos os ajustes (Tabela 7).

Tabela 7 – Índices e coeficientes de correlação utilizados nos ajustes dos solos expansivos unimodais.

Ajustes	Van Genuchten (1980)						Gitirana e Fredlund (2004)						*MV (2012)
Índices	θ_r	θ_s	α	n	m	R ²	S1	S2	ψ_b	ψ_{res}	d	R ²	R ²
Anthem - Arizona - Hashem (2013)	0,11	0,41	0,02	1,30	0,23	0,98	101	28	7	32490	0,65	0,99	0,92
Melbourne- Austrália - Perera et al. (2022)	0,0000004	0,25	0,10	1,15	0,13	0,98	100	0,001	0,1	926634	0,30	0,97	0,69
Huangshan (B) - China - Li e Zhang (2011)	0,32	0,44	0,10	1,50	0,33	0,95	103	76	1	498	0,60	0,95	0,96
Huangshan (R) - China - Li e Zhang (2011)	0,21	0,48	0,40	1,40	0,29	0,94	101	44	0,1	299	0,60	0,93	0,94
Ningming-China - Ma et al. (2020)	0,06	0,36	0,0001	1,43	0,30	0,94	76	13	4000	350000	1,20	0,95	0,90
Liang Zhuang - China - Bin (2000)	0,14	0,41	0,01	1,30	0,23	0,97	100	33	100	35775	0,80	0,99	0,72
Qiqihar - Zhao et al. (2021)	0,03	0,43	0,004	1,22	0,18	0,98	103	8	110	364369	0,50	0,99	0,95
Yunan - China - Danxi et al. (2023)	0,02	0,24	0,00	1,30	0,23	0,99	63	6	500	70650	1,20	1,00	0,88
Zao Yang - China - Bin (2000)	0,35	0,47	0,10	1,30	0,23	0,92	95	72	1	507	0,80	0,85	0,97
Colorado - EUA - Hashem (2013)	0,10	0,44	0,02	1,50	0,33	0,98	96	22	6	12734	0,80	0,99	0,97
Murdo - EUA - McKeen (1985)	0,13	0,45	0,003	2,00	0,50	0,84	100	28	100	2532	2,00	0,84	0,61
San Antonio - EUA - Hashem (2013)	0,26	0,47	0,01	1,70	0,41	0,98	100	55	12	1513	1,10	0,98	1,00
Solo Iraq - Al-Wakel et al. (2018)	0,0005	0,32	0,06	2,50	0,60	0,90	85	9	9	47	2,50	0,88	0,81
Karak - Jordânia - Zamin et al. (2020)	0,17	0,60	0,02	1,70	0,41	0,93	99	28	15	674	1,00	0,95	0,76
Bonito-PE - Silva (2019)	0,10	0,49	0,001	1,40	0,29	0,80	91	19	210	81070	0,60	0,80	0,51
Paulista-PE (2) - Faustino (2022)	0,03	0,47	0,02	1,50	0,33	1,00	77	5	6	61369	0,60	0,99	0,66
Petrolândia-PE - Ferreira (1995)	0,18	0,44	0,10	1,15	0,13	0,95	100	41	7	40000	0,40	0,97	0,84
Lisboa - Portugal - Faria (2007)	0,04	0,24	1,20	1,60	0,38	0,98	70	11	0,04	80	1,00	0,99	0,99
Campina Grande do Sul-PR - Pereira (2004)	0,09	0,40	0,04	1,22	0,18	0,97	93	21	15	32556	0,54	0,99	0,79
Colombo-PR - Pereira (2004)	0,13	0,54	0,01	1,30	0,23	0,95	96	23	50	37016	0,60	0,98	0,84
Curitiba -PR - Pereira (2004)	0,13	0,50	0,01	1,50	0,33	0,98	94	25	21	8070	0,90	0,99	0,65
Curitiba -PR (2) - Kormann (2002)	0,16	0,32	0,0001	3,00	0,67	0,99	77	37	4000	20160	3,00	0,98	0,77
Pinhas-PR - Pereira (2004)	0,09	0,53	0,01	1,30	0,23	0,98	87	15	50	34744	0,70	0,99	0,87
Interior de SP - Souza (2014)	0,11	0,46	0,01	1,50	0,33	0,97	100	26	46	20000	1,00	0,99	0,81
Mesquite - Texas - McKeen (1985)	0,23	0,45	0,01	2,10	0,52	0,97	97	50	114	3436	1,40	0,91	0,97

θ_r – Umidade volumétrica residual; θ_s – Umidade volumétrica de saturação; α , m, n – Índices de ajuste de Van Genuchten (1980); S – grau de saturação; ψ_b – valor de entrada de ar e ψ_{res} –sucção residual; d – Índice de ajuste de Gitirana e Fredlund (2004); R² – Coeficiente de determinação.

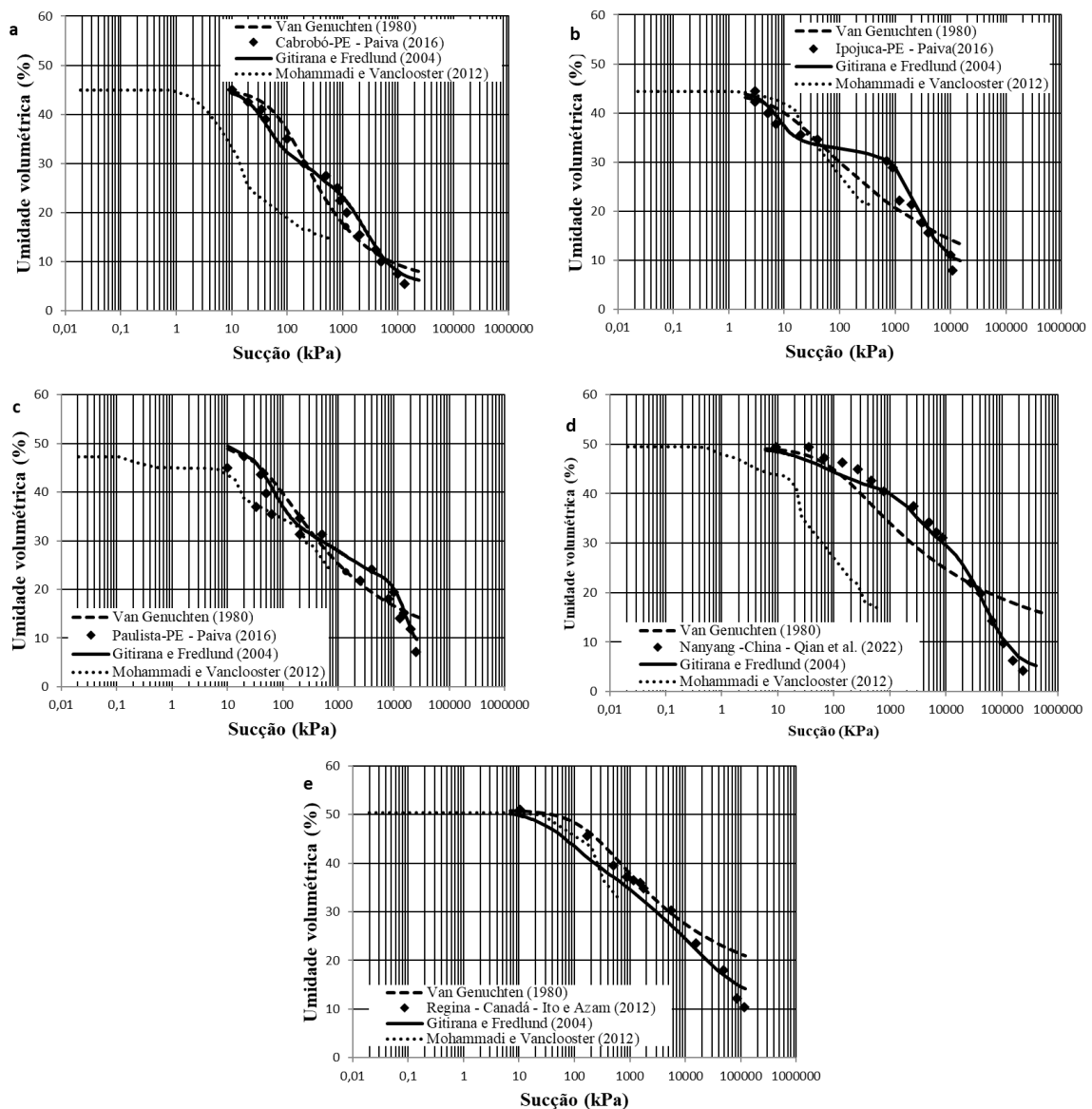
* Mohammadi e Vanclooster (2012)

Fonte: A autora (2023)

4.4.1 Ajuste e previsão da curva de retenção bimodal dos solos expansivos

No solo expansivo com comportamento bimodal (Figura 29a até 29e) o ajuste de Van Genuchten (1980) assim como nos solos colapsíveis bimodais não representou bem o formato das curvas, apesar de apresentar um coeficiente de determinação alto, já o ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) acompanhou bem o formato da curva. O método de Mohammadi e Vanclooster (2012), não se mostrou eficiente, pois tanto os valores de umidade e sucção, quanto o formato da curva não foram bem representados, conforme mencionado anteriormente devido as limitações do método para solos de textura fina.

Figura 29 – Ajustes e previsão das curvas de retenção bimodal dos solos expansivos



Fonte: A autora (2023)

Os coeficientes de determinação variaram para o ajuste de Van Genuchten (1980) entre 0,87 (Nanyang -China) e 0,96 (Regina-Canadá, Cabrobó-PE) para o ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) de 0,96 (Paulista-PE) a 0,99 (Cabrobó-PE, Nanyang -China), apesar de as duas propostas apresentarem valores de coeficientes altos, se enquadrando na categoria de “ajuste muito forte” (0,80-1,00), o formato da curva foi melhor representado pelo método de Gitirana e Fredlund (2004). A previsão da curva por meio da granulometria proposto por Mohammadi e Vanclooster (2012), apresentou coeficientes consideravelmente altos, 0,71 (Paulista-PE) e 0,98 (Cabrobó-PE), classificados na categoria de “ajuste forte” e “ajuste muito forte” respectivamente, porém o formato da curva não é bem representado (Tabela 8).

Em suma os ajustes da curva de retenção dos solos expansivos unimodais e bimodais pelos métodos de Van Genuchten (1980) e Gitirana e Fredlund (2004) apresentaram comportamento similar aos descritos nos solos colapsíveis.

O método de previsão da curva por Mohammadi e Vanclooster (2012), também apresentou um comportamento similar aos solos colapsíveis, porém pode-se ressaltar a limitação da proposta para solos de textura fina, onde a retenção de água é maior que nos solos arenosos, ressaltando assim a limitação da proposta para altas sucções.

Tabela 8 – Índices e coeficientes de determinação utilizados nos ajustes e previsão dos solos expansivos bimodais

Ajustes	Van Genuchten (1980)						Gitirana e Fredlund (2004)													Mohammadi e Vanclooster (2012)
Índices	θr	θs	α	n	m	R²	S1	S2	S3	S4	ψb1	ψres1	ψb2	ψres2	d1	d2	d3	R²	R²	
Regina - Canadá - Ito e Azam (2012)	0,13	0,51	0,01	1,25	0,20	0,96	99,44	72,49	67,95	20,20	10,54	885,73	1758,00	116862,97	1,10	2,00	0,80	0,98	0,97	
Nanyang -China - Qian et al. (2022)	0,09	0,49	0,01	1,20	0,17	0,87	100,97	82,57	63,51	8,54	8,00	780,38	10000,00	234008,03	1,00	2,00	1,50	0,99	0,87	
Cabrobó-PE - Paiva (2016)	0,06	0,45	0,01	1,50	0,33	0,96	82,82	55,21	50,61	10,12	10,00	200,00	500,00	13000,00	2,00	3,50	1,50	0,99	0,98	
Paulista-PE - Paiva (2016)	0,08	0,50	0,02	1,29	0,22	0,91	100,00	66,00	41,00	15,00	20,00	200,00	10000,00	25000,00	2,00	1,00	4,00	0,96	0,71	
Ipojuca-PE - Paiva (2016)	0,01	0,44	0,09	1,17	0,15	0,89	100,00	78,00	68,00	20,25	1,50	40,00	700,00	10800,00	2,50	0,60	2,00	0,98	0,97	

Fonte: A autora (2023)

A partir dos ajustes realizados, foi possível observar a eficácia na prática das equações numéricas na representação das curvas de retenção de água no solo. O ajuste proposto por Van Genuchten (1980) mostrou-se altamente eficaz para ambos os tipos de solos (colapsíveis e expansivos). No entanto, é importante destacar que, em casos de curvas de retenção bimodais, apesar de apresentar coeficientes de correlação satisfatórios, esse ajuste não conseguia representar adequadamente o formato das curvas. Isso é uma desvantagem em comparação com o método de Gitirana e Fredlund (2004), que oferece uma equação específica para curvas bimodais, proporcionando uma representação mais precisa dos formatos das curvas.

O método de Gitirana e Fredlund (2004) demonstrou igual eficiência na previsão das curvas de retenção de água nos solos colapsíveis e expansivos quando comparado ao ajuste de Van Genuchten (1980). No entanto, como mencionado anteriormente, apresentou alto desempenho no ajuste das curvas bimodais, visto que possui uma equação para aplicação nesses tipos de solos.

Por outro lado, é importante observar que a proposta de previsão de Mohammadi e Vanclooster (2012) não conseguiu representar adequadamente o formato das curvas de retenção quando comparado com os ajustes numéricos utilizados nesta pesquisa, devido a algumas limitações da proposta citadas anteriormente, outro ponto a destacar como limitação da proposta é que o valor da sucção calculada está condicionado ao raio da fração que é um valor fixo para cada diâmetro das peneiras do ensaio de granulometria e ao índice de vazios que apresentou uma variação de 0,526 a 1,90 nos 60 solos estudados, sendo assim os valores de sucção calculados pela proposta apresentaram pequenas variações com os valores mínimos e máximos entre 0,014 kPa – 476 kPa para o solo com índice de vazios de 1,90 e 0,027 kPa – 906 kPa para os solos que apresentaram índice de vazios de 0,53, além de apresentar o valor constante de 19 pontos, condicionados as quantidades de frações que está dividida a curva granulométrica. Mas vale ressaltar que essa proposta é uma ferramenta muito útil para se estimar a curva de retenção principalmente em solos arenosos que apresentam baixa retenção de água.

Em resumo, a escolha entre os diferentes métodos de ajuste de curvas de retenção de água no solo depende das características específicas do solo em questão, especialmente se as curvas são bimodais ou não. Cada método tem suas vantagens e limitações, e é importante considerar esses fatores ao selecionar o método mais adequado para uma determinada aplicação.

4.5 ANÁLISE DOS DADOS EXTRAIDOS

4.5.1 Análise comparativa entre os solos colapsíveis e os expansivos

Algumas análises foram realizadas nos solos estudados visando encontrar comportamentos que possam auxiliar no estudo dos solos colapsíveis e expansivos, durante as análises foram retiradas dos gráficos as outliers para melhor visualização do trecho onde houve a concentração de dados, porém ao fim de cada análise tem uma tabela resumo onde é possível verifica os valores das outliers.

Dos 60 solos estudados entre colapsíveis e expansivos 63,33%, ou seja, 38 solos apresentaram comportamento unimodal na curva de retenção dos 22 solos bimodais 17 eram colapsíveis e 5 expansivos. Os solos bimodais variaram de argila a areia pela classificação SUCS, apresentaram duas faixas de graduação predominantes, com valores de percentual passante superiores ou igual a 20%. Segundo Cavalcante et al. (2015) é importante destacar que as duas faixas não necessariamente terão a mesma altura ou relevância, e a intensidade relativa entre elas dependerá do grau de intemperismo que o solo sofreu ao longo do tempo, em alguns casos, mesmo quando há duas faixas, elas podem se aproximar, tornando difícil distingui-las claramente, em alguns solos foi possível observar esse comportamento.

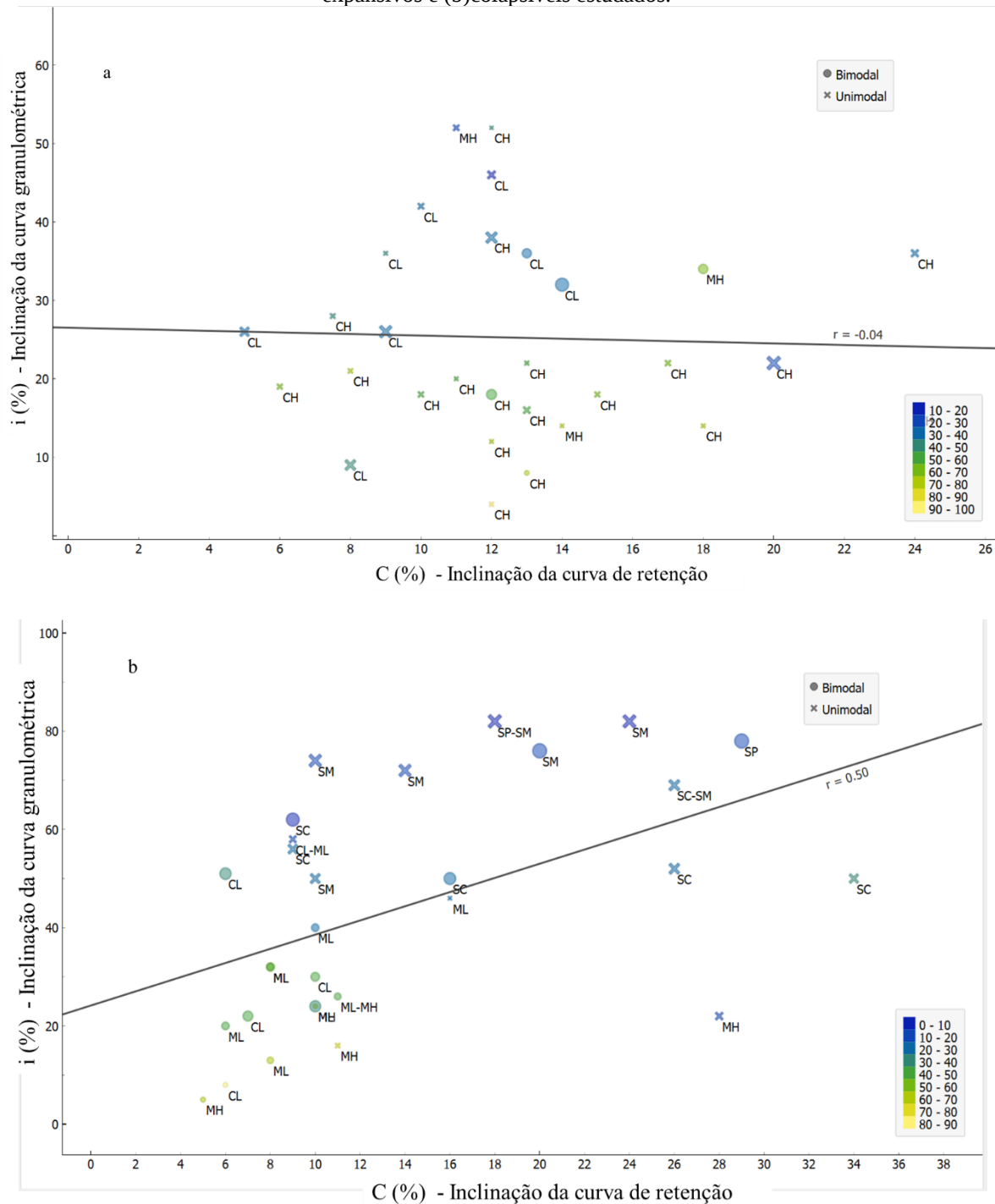
A inclinação das curvas de retenção dos solos foi comparada com a inclinação da curva granulométrica. Na Figura 25 o gráfico correlaciona as duas variáveis com o percentual de argila, definido pela escala de cor e o percentual de areia definido pelo tamanho dos marcadores, outra análise possível de ser verificada no gráfico é o tipo de curva de retenção (unimodal ou bimodal) e a classificação SUCS de cada amostra.

Nos solos expansivos, não houve nenhuma correlação entre as inclinações das curvas, como é possível verificar na Figura 30a através do coeficiente de correlação (r); nesses solos houve a predominância da classe argila. A plasticidade desses solos e sua história de tensão influenciam as características de retenção, a presença de minerais argilosos no solo introduz um comportamento de variação de volume à medida que a umidade diminui, o que torna mais complexo o uso da curva granulométrica para prever a curva de retenção (MARINHO, 2005).

Nos solos colapsíveis (Figura 30b) o coeficiente de correlação foi 0,5. Segundo a proposta de Shimakura (2006) apresentada no Quadro 2a, essa é uma correlação moderada. Essa correlação pode ser devido ao fato de quase metade dos solos colapsíveis, especificamente 13

solos foram classificados como areia pelo SUSC, segundo Marinho (2005) existe uma conexão sólida entre a curva de retenção e a curva granulométrica, especialmente em materiais granulares, como as areias. Assim como a distribuição granulométrica indica o nível de uniformidade dos grãos presentes em um material, a curva de retenção revela a uniformidade dos poros no mesmo material.

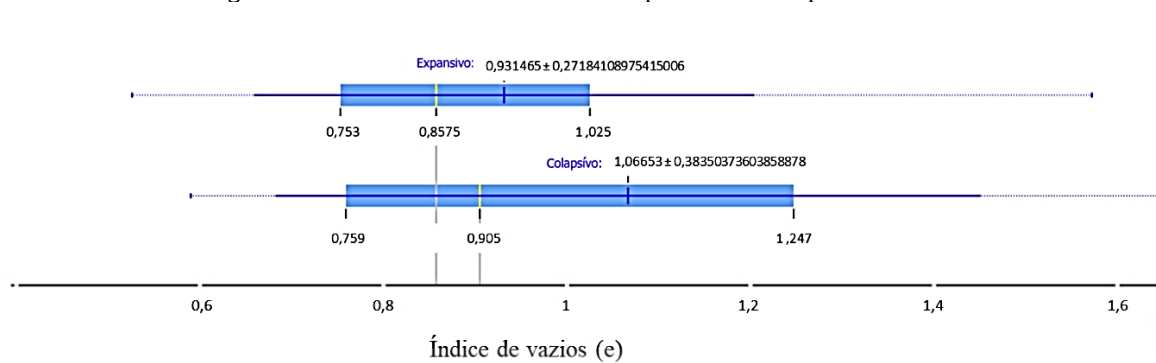
Figura 30 – Correlação entre a inclinação da curva de retenção e da curva granulométrica nos (a) solos expansivos e (b) colapsíveis estudados.



Fonte: A autora (2023)

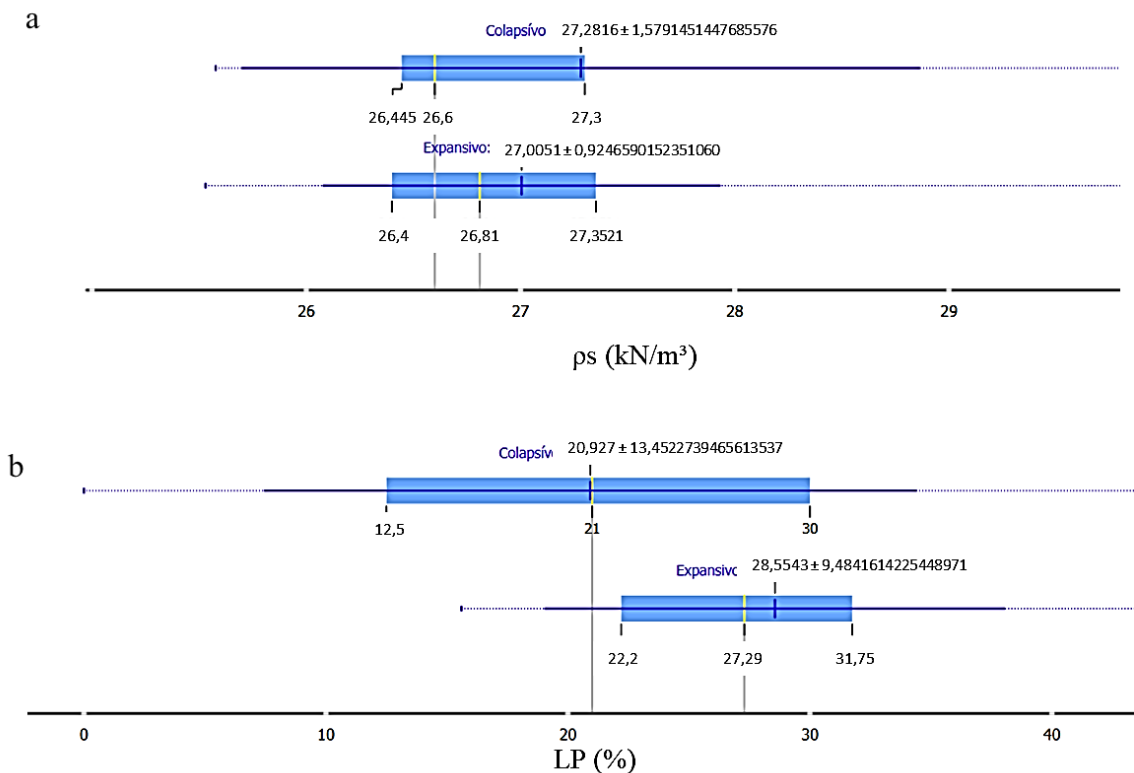
Através da análise comparativa das propriedades físicas dos solos foi possível observar que os solos colapsíveis apresentaram índice de vazios maiores que os solos expansivos (Figura 31); os valores do peso específico real dos grãos (Figura 32a) e do limite de plasticidade (Figura 32b) coincidiram para ambos os solos, já o limite de liquidez (Figura 33a), o percentual de argila (Figura 33b) e o índice de plasticidade (Figura 33c) em geral foram maiores para os solos expansivos.

Figura 31 – Índice de vazios dos solos expansivos e colapsíveis estudados



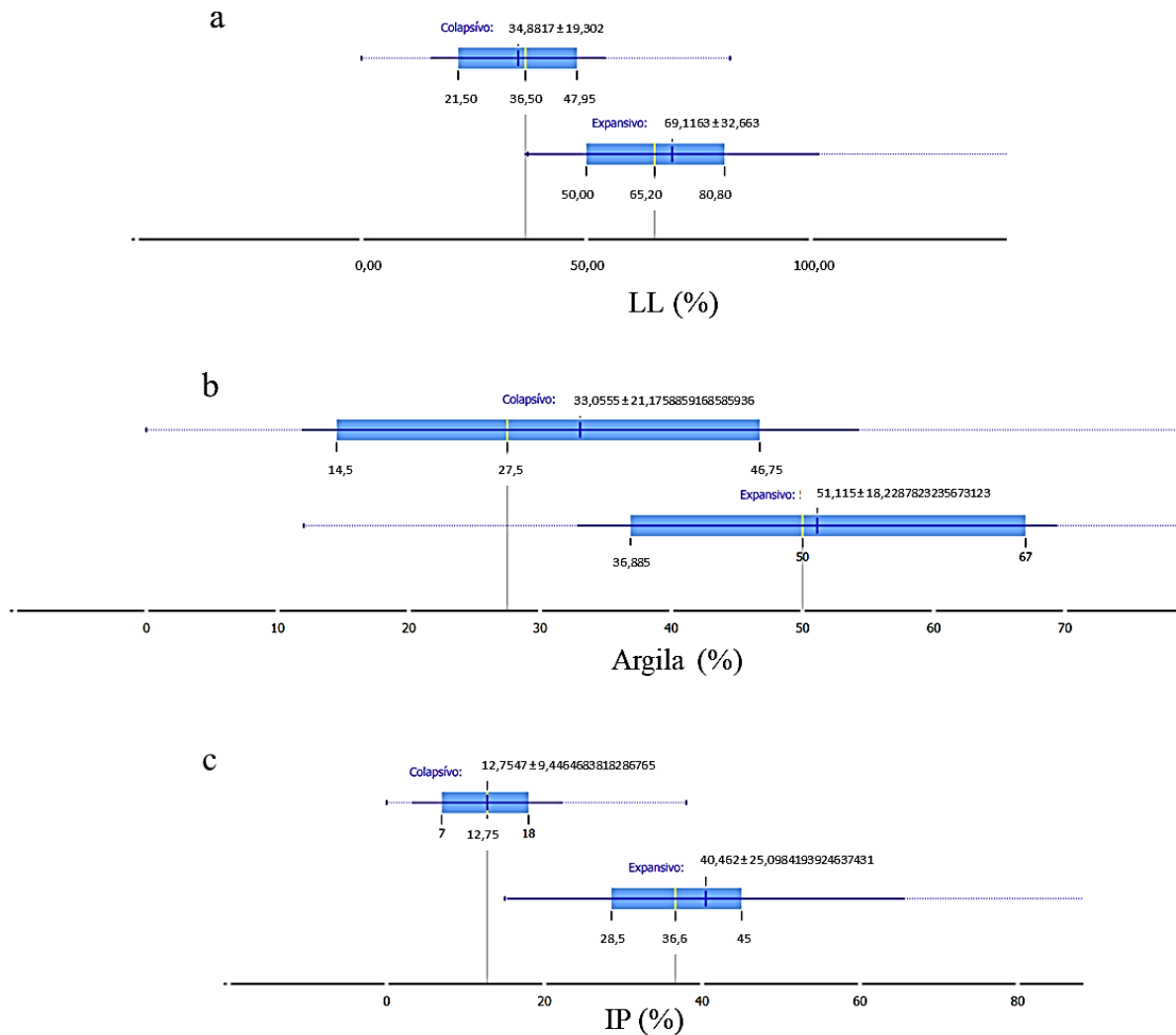
Fonte: A autora (2023)

Figura 32 – (a) Peso específico real dos grãos e (b) limite de plasticidade dos solos expansivos e colapsíveis



Fonte: A autora (2023)

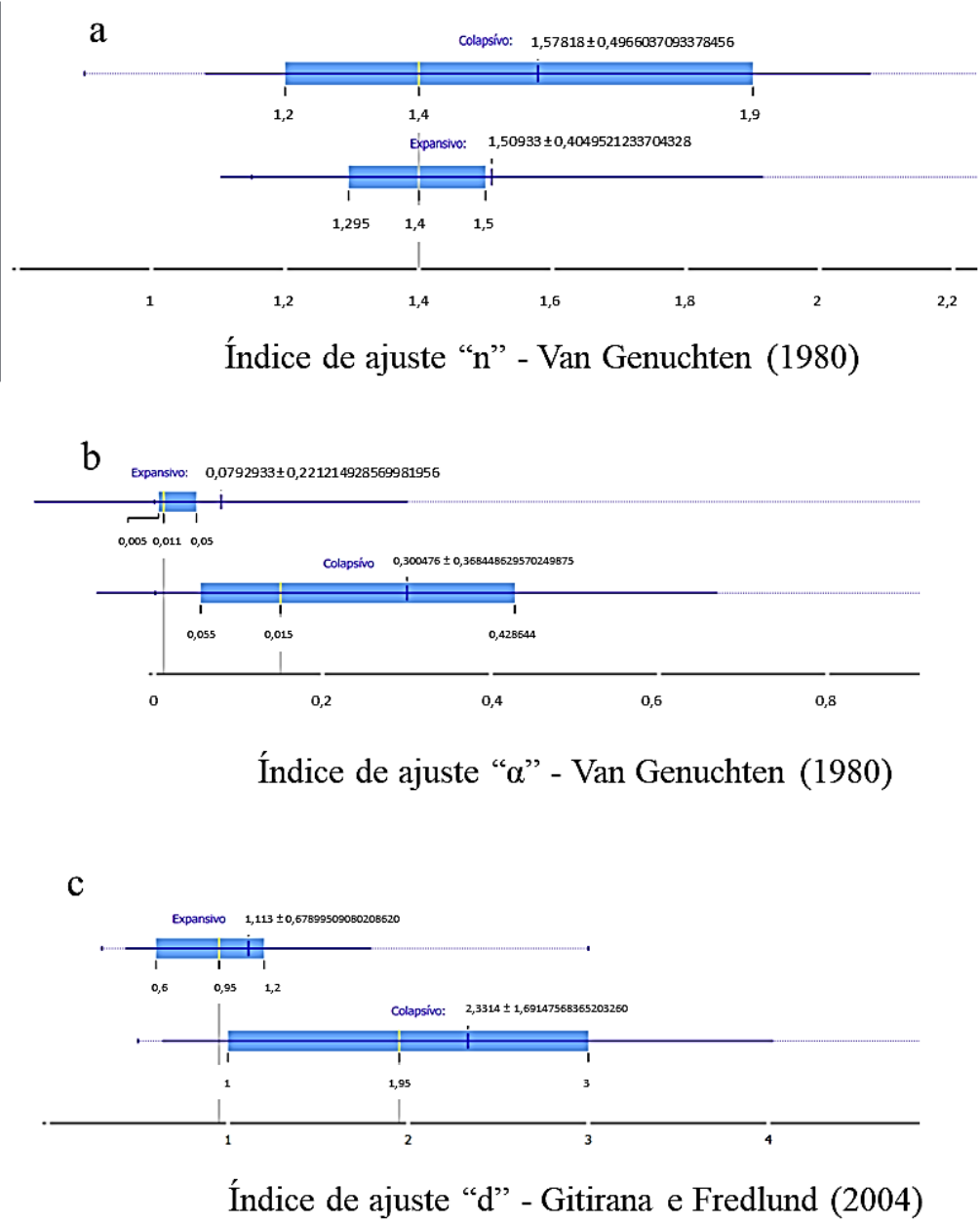
Figura 33 – (a) Limite de liquidez, (b) percentual de argila e (c) índice de plasticidade dos solos colapsíveis e expansivos



Fonte: A autora (2023)

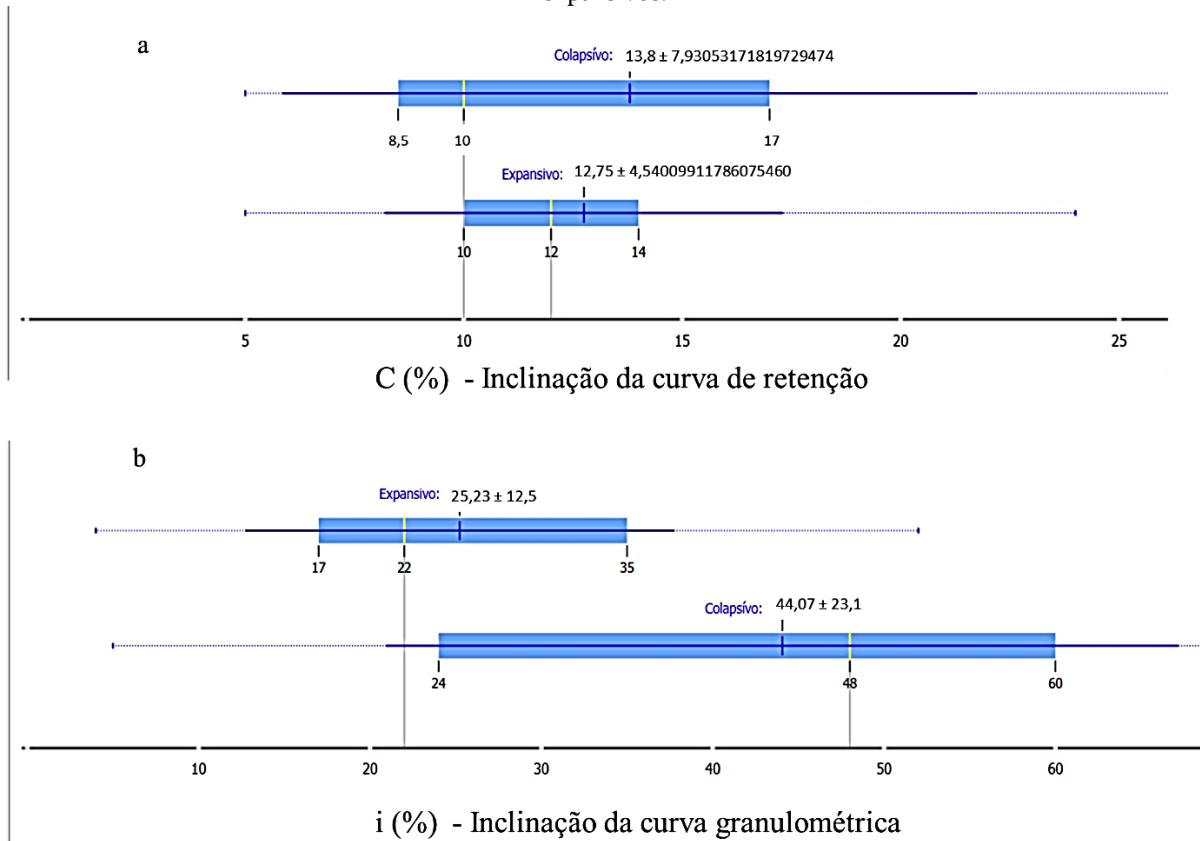
Ao comparar os índices de ajuste dos métodos de Van Genuchten (1980) foi possível observar que em geral foram maiores para os solos colapsíveis do que para os solos expansivos, segundo o autor o índice n é função crescente da inclinação da curva, ou seja quanto maior a inclinação maior o índice n , os solos colapsíveis por se tratarem em sua maioria de solos arenosos e siltosos apresentaram inclinação maior que nos solos expansivos que eram predominantemente argilosos, o índice α está relacionado inversamente com a pressão de entrada de ar, logo quanto maior o valor de α menor será o valor de entrada de ar, o que pode ser confirmado nos solos estudados onde em geral o ponto de entrada de ar é maior nos solos expansivos que em sua maioria foram classificados como solos argilosos. (Figura 34a e 34b), o índice de Gitirana e Fredlund (2004) também foi maior nos solos colapsíveis (Figura 34c), o mesmo pode ser observado na inclinação das curvas de retenção e granulométrica (Figura 35).

Figura 34 – (a) Variação do índice *n*, (b) do índice *α* e (c) do índice *d* nos solos colapsáveis e expansivos.



Fonte: A autora (2023)

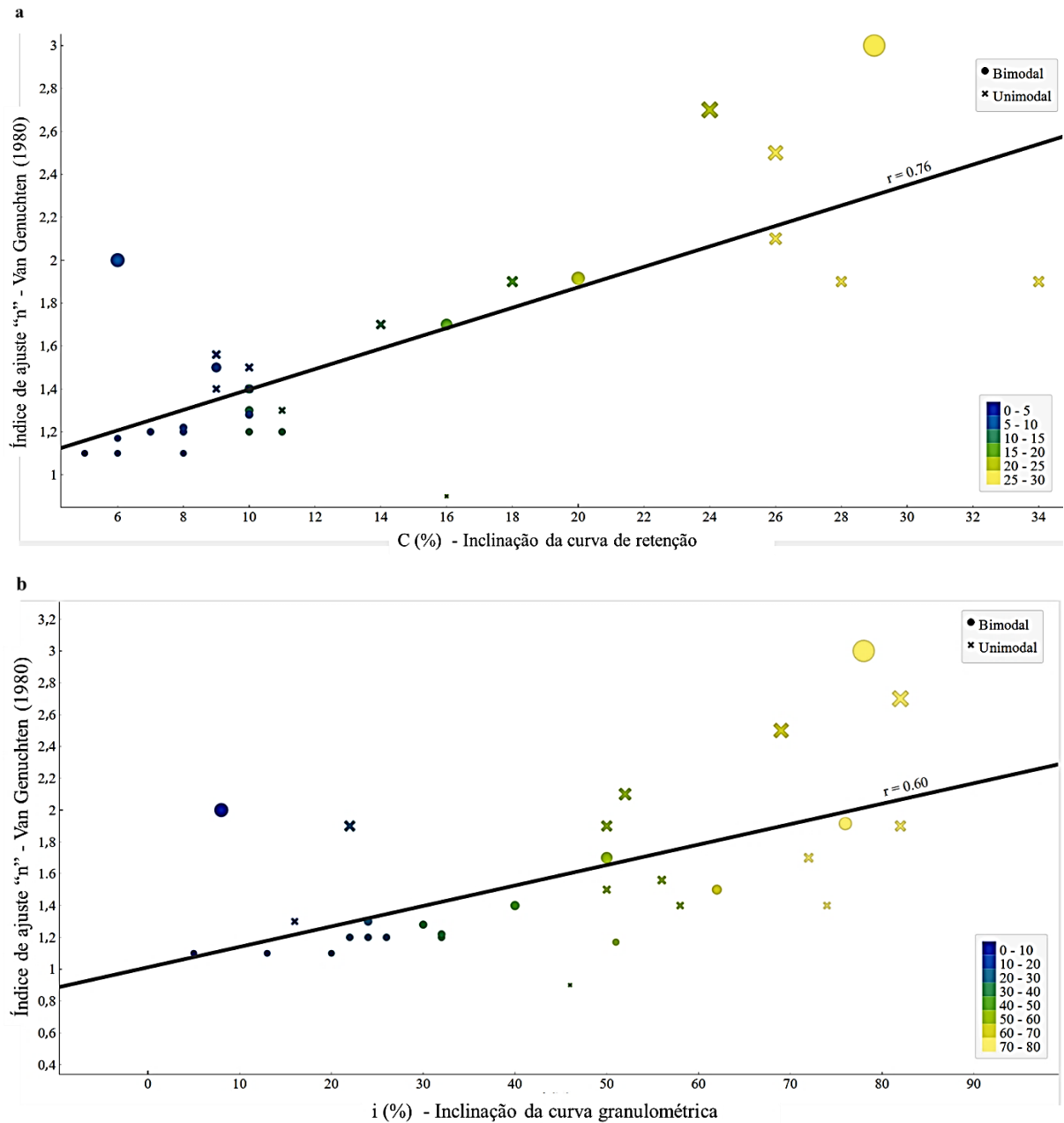
Figura 35 – (a) Inclinação da curva de retenção e (b) inclinação da curva granulométrica dos colapsíveis e expansivos.



Fonte: A autora (2023)

O índice n do método proposto por Van Genuchten (1980) apresentou uma certa correlação com a inclinação da curva de retenção (Figura 36a) e a inclinação da curva granulométrica (Figura 36b) dos solos colapsíveis, os valores dos coeficientes foram 0,70 “correlação forte” e 0,60 “correlação moderada” respectivamente.

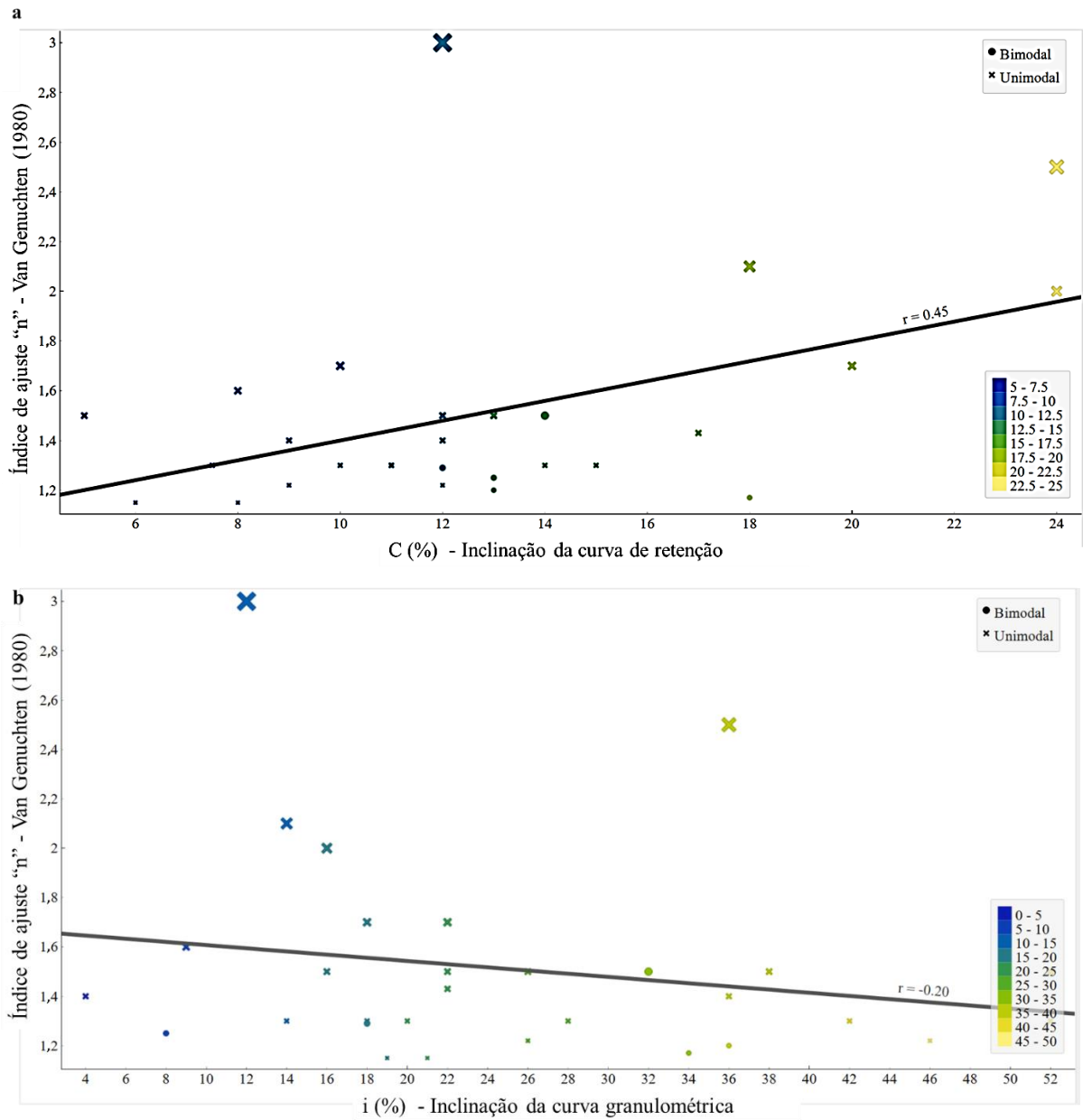
Figura 36 – (a) Correlação entre o índice n e a inclinação da curva de retenção nos solos colapsíveis, (b) Correlação entre o índice n e a inclinação da curva granulométrica nos solos colapsíveis.



Fonte: A autora (2023)

Nos solos expansivos o coeficiente de correlação do índice n com a inclinação da curva de retenção foi de 0,45 “correlação moderada” (Figura 37a), já com a inclinação da curva granulométrica foi -0,20 “correlação fraca” (Figura 37b).

Figura 37 – (a) Correlação entre o índice n e a inclinação da curva de retenção nos solos expansivos, (b) Correlação entre o índice n e a inclinação da curva granulométrica nos solos expansivos.



Fonte: A autora (2023)

A Tabela 9 apresenta um resumo das características físicas e índices de ajustes dos solos colapsíveis e expansivos analisados:

Tabela 9 – Resumo das características físicas e dos índices de ajuste dos solos expansivos e colapsíveis.

Características físicas	Tipo do solo	Outliers		Média	Concentração de dados			
		Mínimo	Máximo		1º quartil	Mediana	3º quartil	Comportamento identificado
Argila (%)	Expansivo	12	94	51,11	36,88	50	67	Maior nos solos expansivos
	Colapsível	0	81	33,05	14,5	27,5	46,75	
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	Expansivo	25,53	30,13	27	26,4	26,81	27,35	Valores coincidem
	Colapsível	25,577	32,6	27,28	26,45	26,6	27,3	
Índice de vazios (e)	Expansivo	0,526	1,572	0,9314	0,753	0,85	1,025	Maior nos solos colapsíveis
	Colapsível	0,59	1,9	1,066	0,759	0,905	1,247	
Limite de liquidez (%)	Expansivo	37	218	69,11	50	65,2	80,8	Maior nos solos expansivos
	Colapsível	0	82	34,88	21,5	36,5	47,95	
Limite de plasticidade (%)	Expansivo	15,6	58	28,55	22,2	27,29	31,75	Valores coincidem
	Colapsível	0	45	20,927	12,5	21	30	
Índice de plasticidade (%)	Expansivo	15	160	40,46	28,5	36,6	45	Maior nos solos expansivos
	Colapsível	0	38	12,75	7	12,75	18	
α	Expansivo	0,0001	1,2	0,0792	0,005	0,011	0,05	Maior nos solos colapsíveis
	Colapsível	0,001	1,5	0,3	0,055	0,15	0,4285	
n	Expansivo	1,15	3	1,509	1,295	1,4	1,5	Maior nos solos colapsíveis
	Colapsível	0,9	3	1,578	1,2	1,4	1,9	
d	Expansivo	0,3	3	1,11	0,6	0,95	1,2	Maior nos solos colapsíveis
	Colapsível	0,5	8	2,3314	1	1,95	3	
C (%)	Expansivo	5	24	12,75	10	12	14	Maior nos solos colapsíveis
	Colapsível	5	34	13,8	8,5	10	17	
i (%)	Expansivo	4	52	25,23	17	22	35	Maior nos solos colapsíveis
	Colapsível	5	82	44,07	24	48	60	

Fonte: A autora (2023)

4.5.2 Análise comparativa dos solos colapsíveis unimodais e bimodais

O potencial de colapso pelo critério de Jennings e Knight (1975) em geral foi diretamente proporcional ao percentual de argila, apenas nos níveis de classificação “problemático” e “moderado” houve uma inversão nos níveis, pois o grau moderado apresentou um valor limite maior de percentual de argila em relação ao grau problemático (Figura 38a). Ao relacionar o potencial de colapso com o percentual de areia no grupo de dados considerados não foi possível identificar nenhuma linha de comportamento (Figura 38b).

Figura 38 – Variação do potencial de colapso com: (a) percentual de argila e (b) percentual de areia

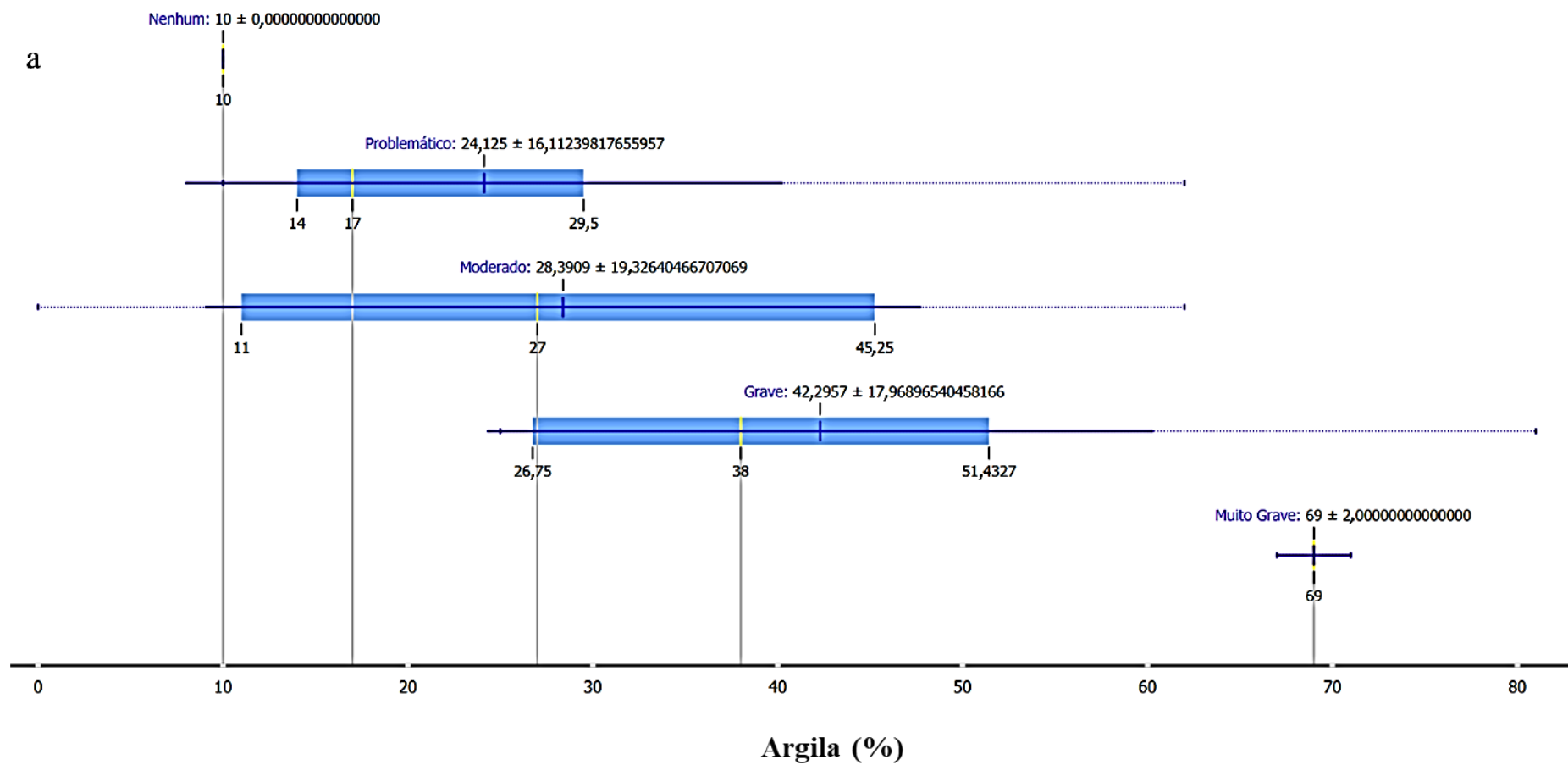
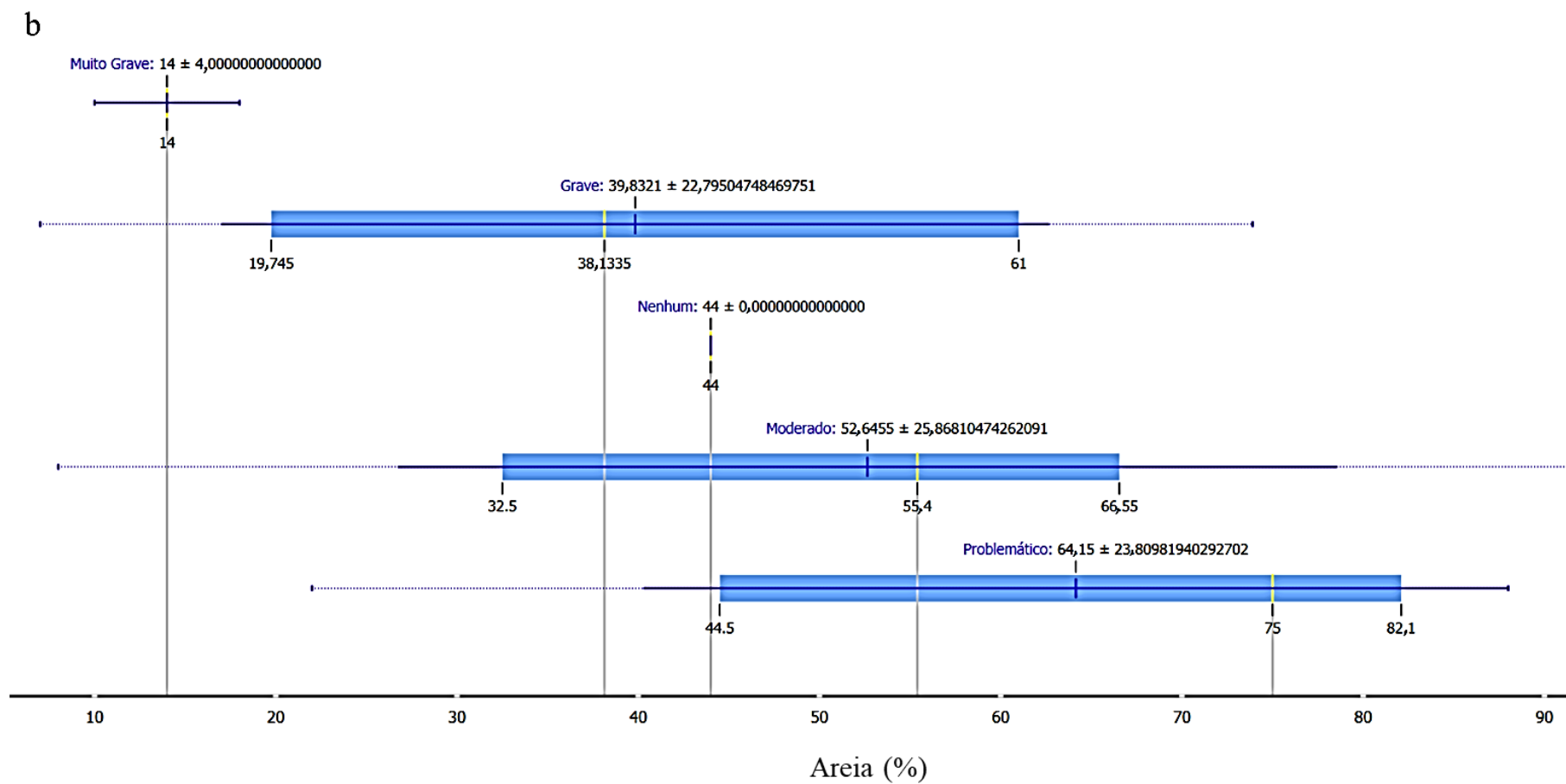


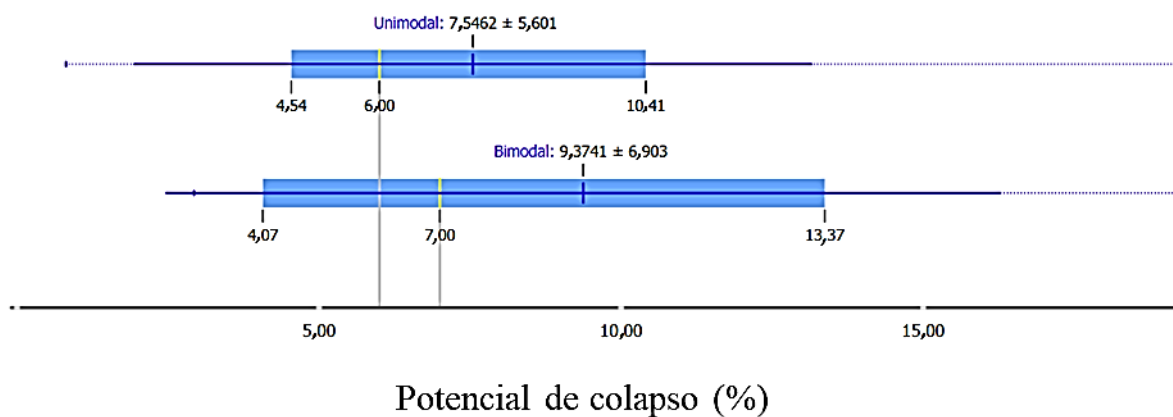
Figura 35 – Variação do potencial de colapso com: (a) percentual de argila e (b) percentual de areia (continuação).



Fonte: A autora (2023)

O potencial de colapso dos solos unimodais se concentrou de 4,54% a 10,41%, já os solos bimodais variaram de 4,07% a 13,37%, com mediana de 7,00% ou seja 50% das amostras tiveram potencial de colapso superior a 7% (Figura 39).

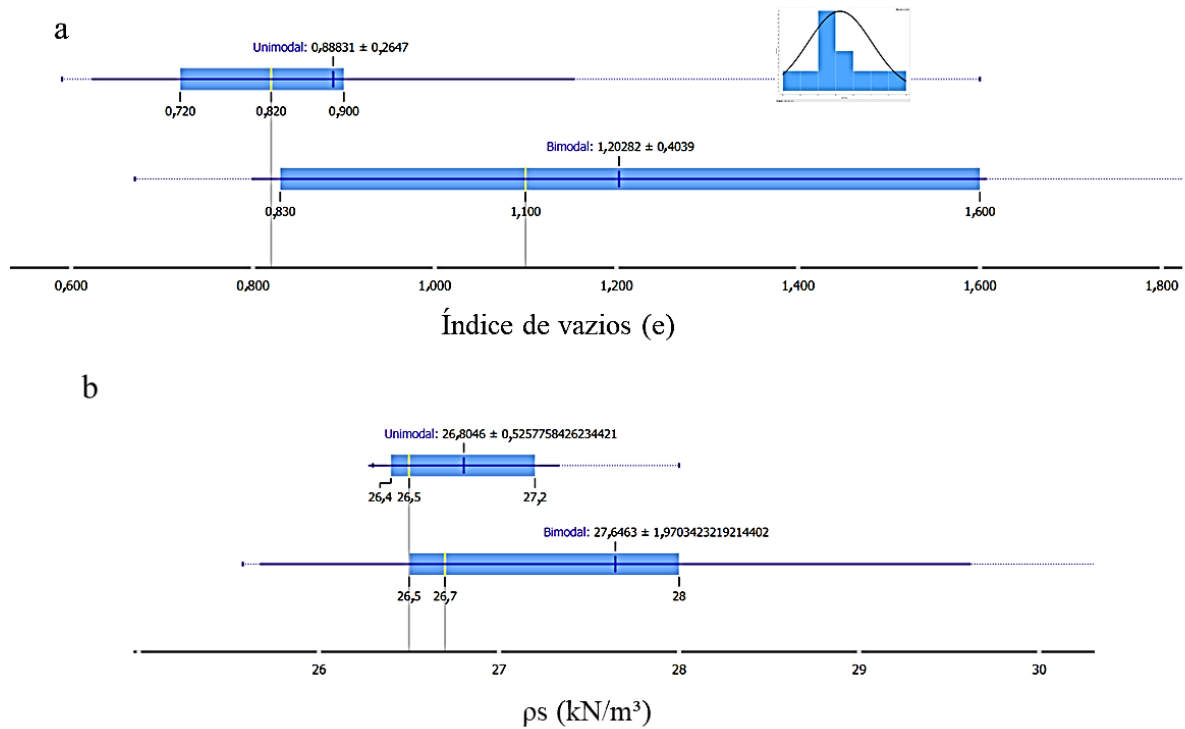
Figura 39 – Variação do potencial de colapso dos solos unimodais e bimodais



Fonte: A autora (2023)

Os índices de vazios dos solos unimodais tiveram uma concentração de valores menor que os solos bimodais, ou seja, em geral os solos unimodais apresentaram índice de vazios menores que os bimodais (Figura 40a). Já o peso específico das partículas sólidas coincidiram entre os solos bimodais e unimodais (Figura 40b).

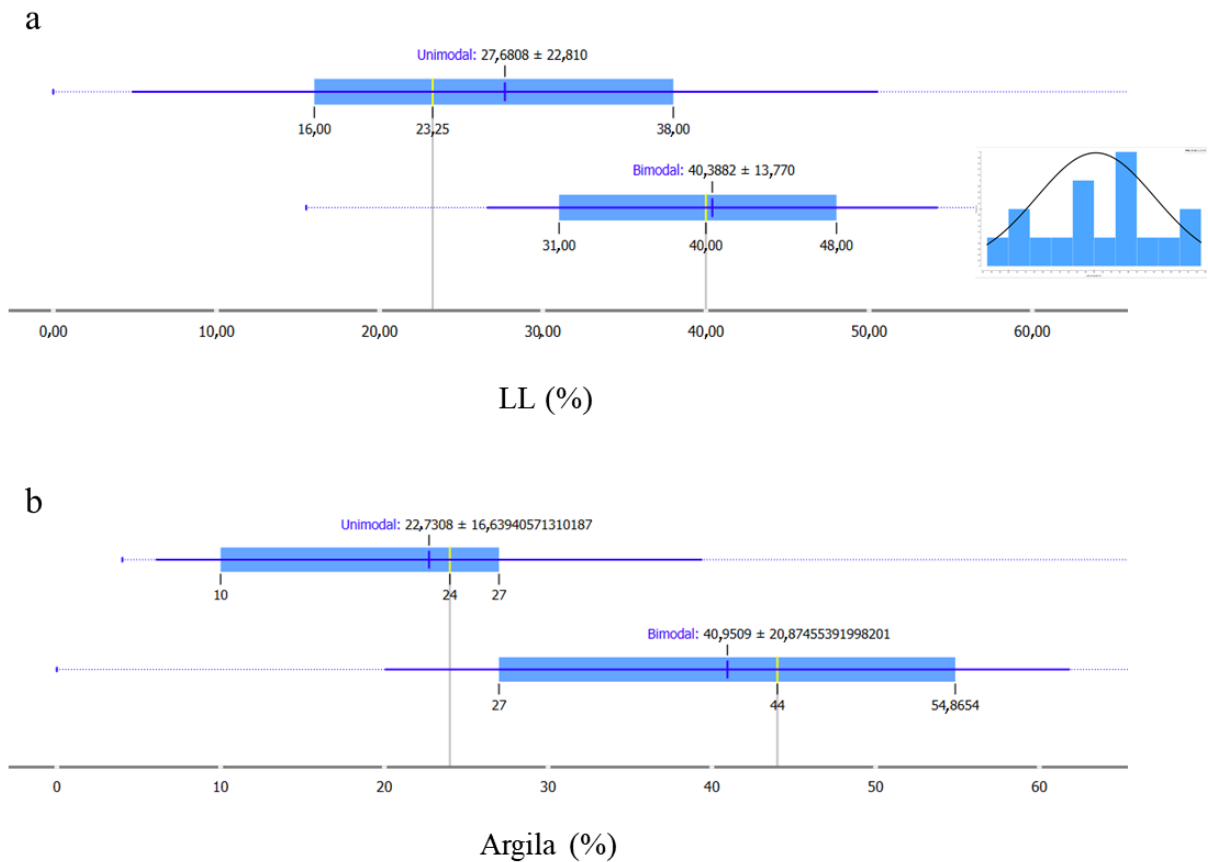
Figura 40 – Variação do (a) índice de vazios e do (b) peso específico das partículas sólidas dos solos colapsíveis unimodais e bimodais



Fonte: A autora (2023)

Para o limite de liquidez metade das amostras dos solos unimodais estavam concentradas acima de 23,25%, já nos solos bimodais metade das amostras estavam concentradas acima de 40% e apresentou uma distribuição normal (Figura 41a). Já o percentual de argila foi maior para os solos bimodais que para os solos unimodais (Figura 41b).

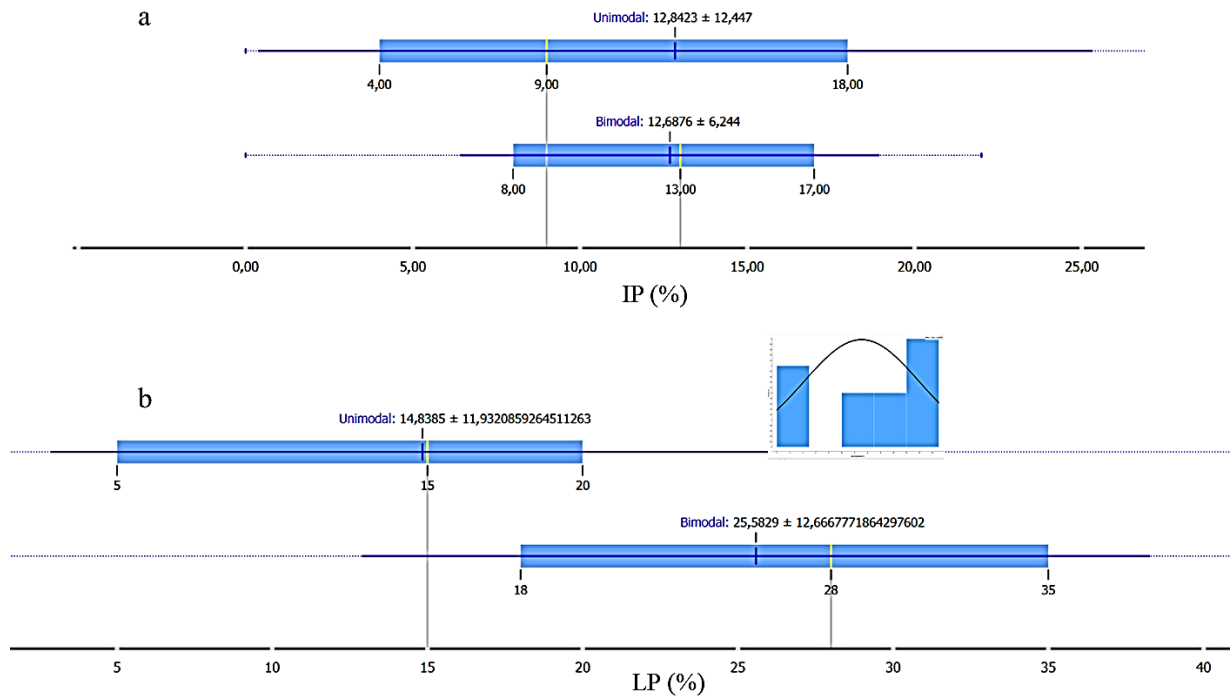
Figura 41 – Variação do (a) limite de liquidez e do (b) percentual de argila dos solos colapsíveis unimodais e bimodais



Fonte: A autora (2023)

Os solos unimodais variaram de fracamente plásticos a altamente plásticos, já os solos bimodais estavam concentrados entre medianamente plásticos a altamente plásticos (Figura 42a). O limite de plasticidade foi maior para os solos bimodais (Figura 42b).

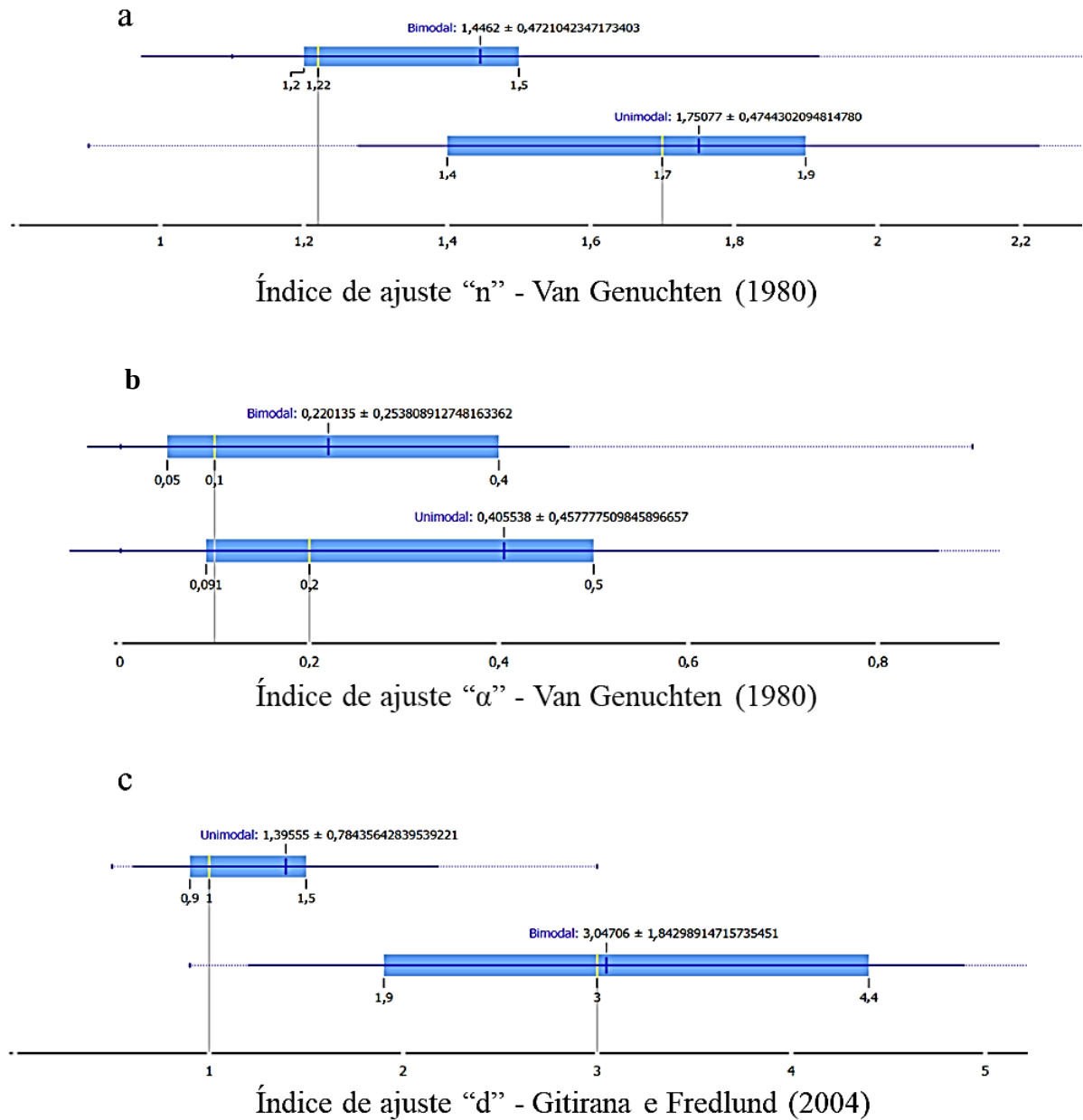
Figura 42 – Variação do (a) índice de plasticidade e (b) limite de plasticidade dos solos colapsáveis unimodais e bimodais



Fonte: A autora (2023)

O índice n de Van Genuchten (1980) apresentou valores maiores para os solos unimodais (Figura 43a), já o índice α coincidiu entre os solos unimodais e bimodais, porém os solos unimodais apresentaram limite de valores superior aos solos bimodais (Figura 43b). O índice d do ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) apresentou concentração de valores maiores para os solos bimodais, (Figura 43c).

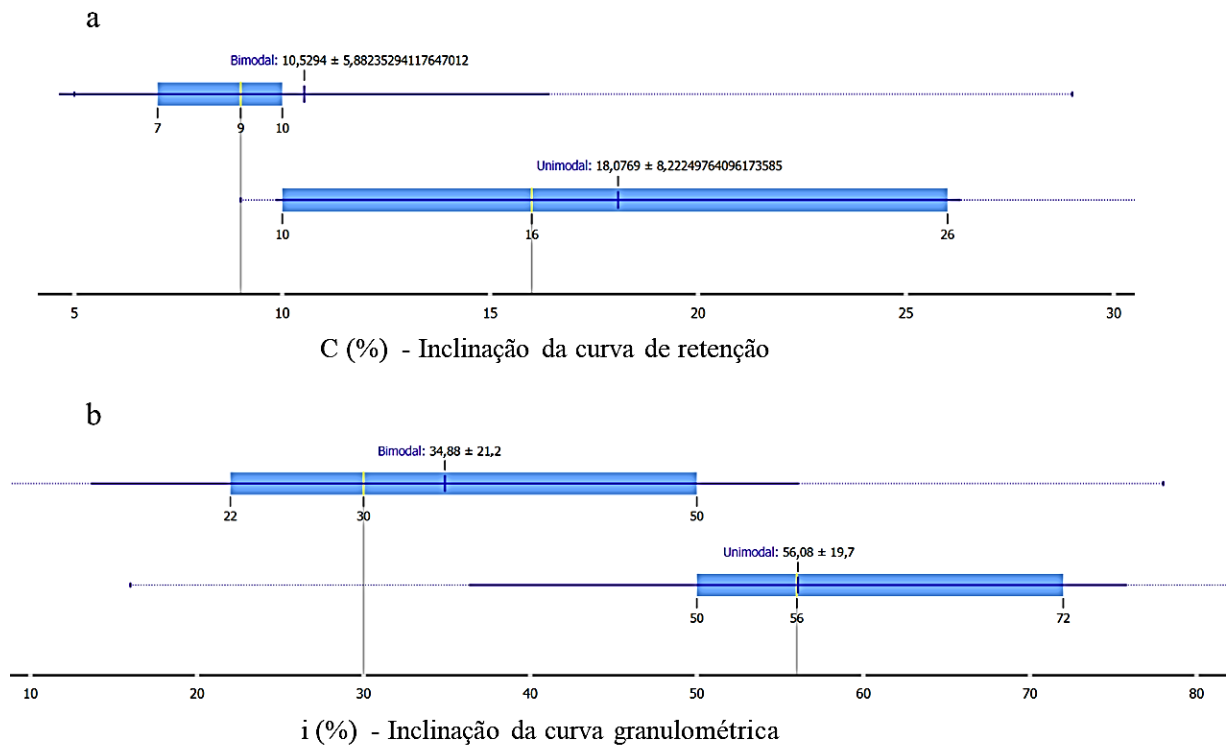
Figura 43 – Variação do (a) índice n e do (b) índice α e do (c) índice d dos solos colapsáveis unimodais e bimodais



Fonte: A autora (2023)

A inclinação da curva de retenção (Figura 44a) e a inclinação da curva granulométrica foi superior para os solos unimodais (Figura 44b).

Figura 44 – (a) Inclinação da curva de retenção e (b) inclinação da curva granulométrica dos colapsíveis unimodais e bimodais



Fonte: A autora (2023)

A Tabela 10 apresenta um resumo das características físicas e índices de ajustes dos solos colapsíveis unimodais e bimodais analisados:

Tabela 10 – Resumo das características físicas e dos índices de ajuste dos solos colapsíveis unimodais e bimodais.

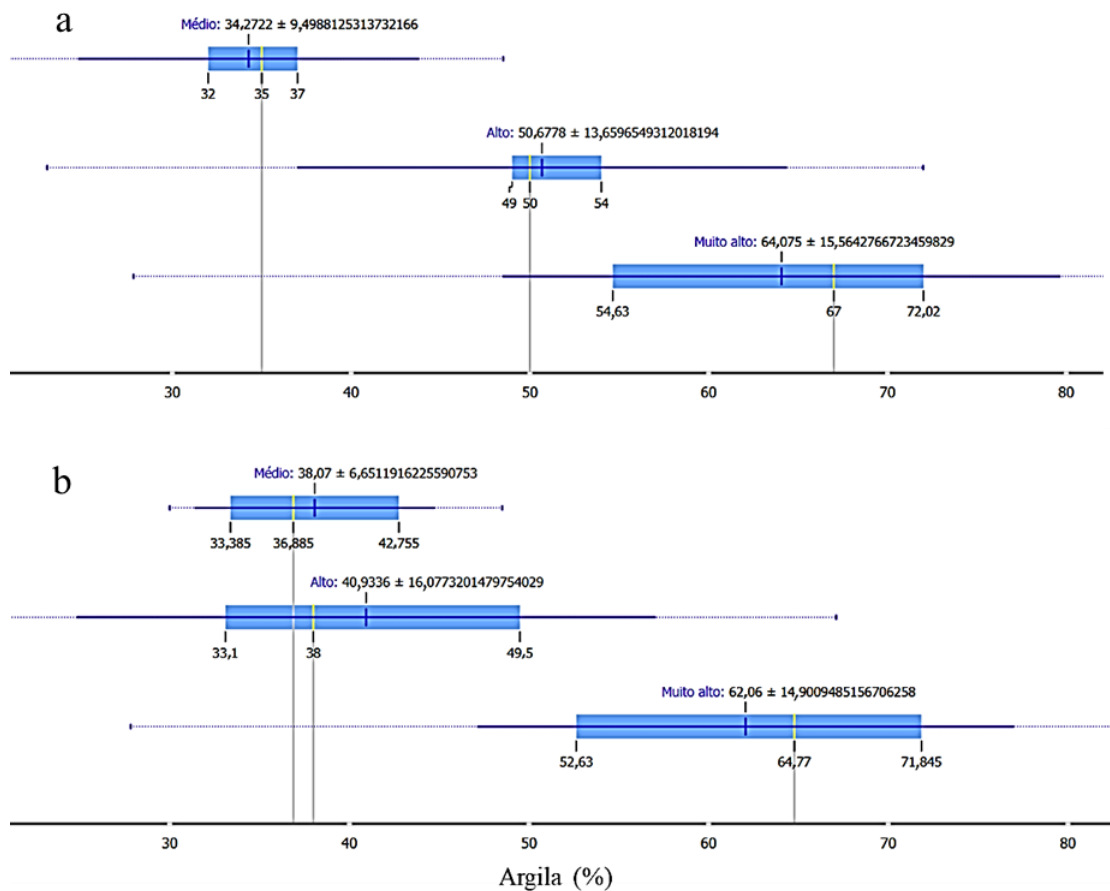
Características físicas	Tipo do solo	Outliers		Média	Concentração de dados			
		Mínimo	Máximo		1º quartil	Mediana	3º quartil	Comportamento identificado
Argila (%)	Unimodal	4	71	22,73	10	24	27	Maior nos solos bimodais
	Bimodal	0	81	40,95	27	44	54,86	
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	Unimodal	26,3	28	26,8	26,4	26,5	27,2	Valores coincidem
	Bimodal	25,57	32,6	27,64	26,5	26,7	28	
Índice de vazios (e)	Unimodal	0,59	1,6	0,888	0,72	0,82	0,9	Maior nos solos bimodais
	Bimodal	0,67	1,9	1,202	0,83	1,1	1,6	
Limite de liquidez (%)	Unimodal	0	82	27,68	26	23,25	38	Maior nos solos bimodais
	Bimodal	15,5	63	40,388	31	40	48	
Limite de plasticidade (%)	Unimodal	0	44	14,84	5	15	20	Maior nos solos bimodais
	Bimodal	0	45	25,58	18	28	35	
Índice de plasticidade (%)	Unimodal	0	38	12,84	4	9	18	Valores coincidem
	Bimodal	0	22	12,68	8	13	17	
α	Unimodal	0,001	1,5	0,405	0,091	0,2	0,5	Valores coincidem
	Bimodal	0,001	0,9	0,22	0,05	0,1	0,4	
n	Unimodal	0,9	2,7	1,75	1,4	1,7	1,9	Maior nos solos unimodais
	Bimodal	1,1	3	1,446	1,2	1,22	1,5	
d	Unimodal	0,5	3	1,395	0,9	1	1,5	Maior nos solos bimodais
	Bimodal	0,9	8	3,047	1,9	3	4,4	
C (%)	Unimodal	9	34	18,08	10	16	26	Maior nos solos unimodais
	Bimodal	5	29	10,52	7	9	10	
i (%)	Unimodal	16	82	56,08	50	56	72	Maior nos solos unimodais
	Bimodal	5	78	34,88	22	30	50	
Potencial de colapso (%)	Unimodal	0,81	23,07	7,54	4,54	6	10,41	Maior nos solos bimodais
	Bimodal	2,93	30	9,37	4,07	7	13,37	

Fonte: A autora (2023)

4.5.3 Análise comparativa dos solos expansivos unimodais e bimodais

Ao comparar o percentual de argila dos solos expansivos com a classificação do grau de expansividade proposto por Daksanamurthy & Raman (1973), é possível observar como esperado, que o potencial de expansão aumenta com o percentual de argila (Figura 45a) o mesmo comportamento foi observado para o critério de Seed et al. (1962), Figura (45b).

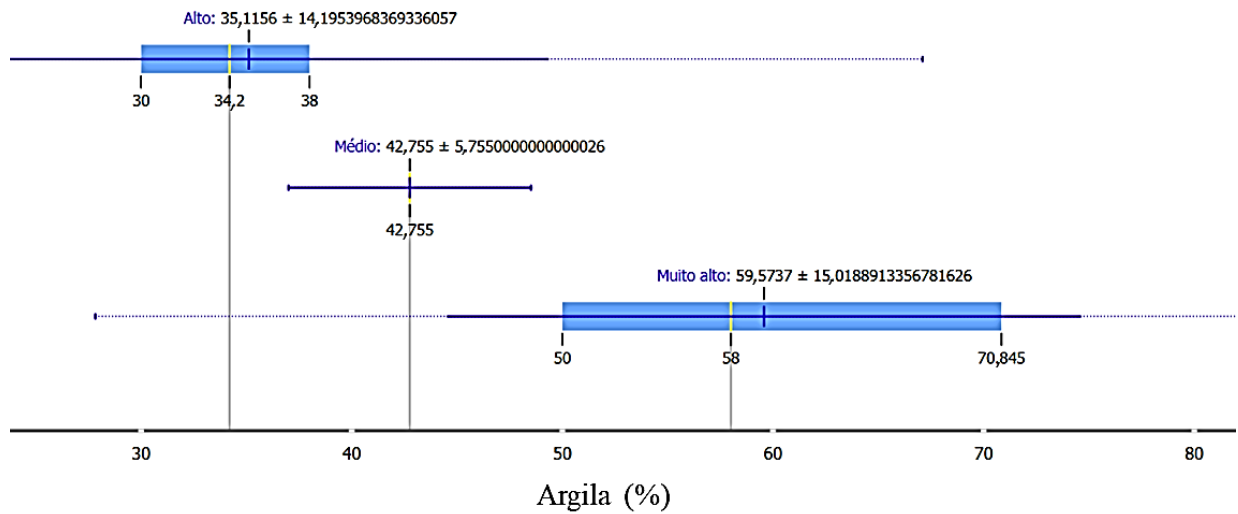
Figura 45 – Análise do grau de expansividade e percentual de argila: (a) Critério de Daksanamurthy & Raman (1973) e (b) Seed et al. (1962)



Fonte: A autora (2023)

Já o critério de Chen (1965) não apresentou um comportamento diretamente proporcional ao percentual de argila como os critérios anteriores, as amostras classificadas com alto grau de expansão apresentaram percentual de argila menor que as amostras com grau médio de expansividade (Figura 46).

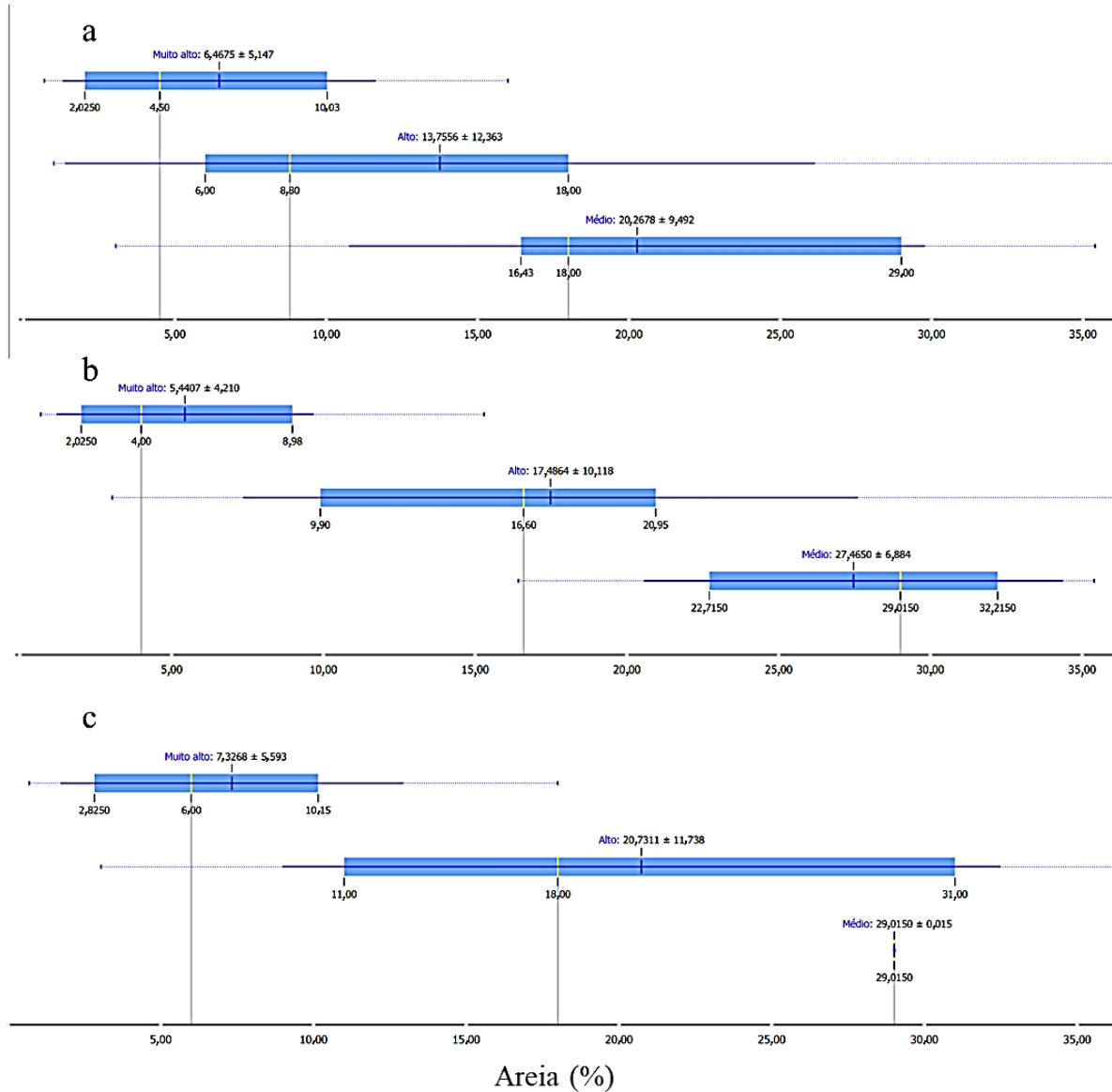
Figura 46 – Análise do grau de expansividade pelo critério de Chen (1965) e o percentual de argila.



Fonte: A autora (2023)

Correlacionado o percentual de areia com os critérios de Daksanamurthy & Raman (1973) (Figura 47a)., Seed et al. (1962) (Figura 47b). e Chen (1965) (Figura 47c)., foi verificado um comportamento inversamente proporcional entre o percentual de areia e os critérios citados, ou seja, quanto maior o percentual de areia menor a grau de expansibilidade dos solos estudados.

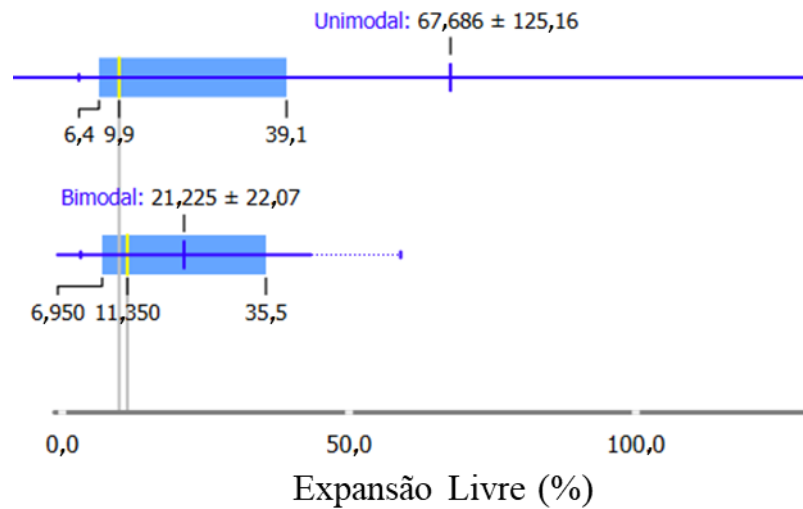
Figura 47 – Análise do grau de expansividade e percentual de areia: (a) Critério de Daksanamurthy & Raman (1973), (b) Seed et al. (1962) e (c) Chen (1965).



Fonte: A autora (2023)

Dos 30 solos expansivos estudados 11 apresentaram como medida da expansividade a expansão livre, nesses solos os valores coincidiram para os solos unimodais e os solos bimodais, porém os solos unimodais apresentaram uma faixa mais ampla de valores (Figura 48).

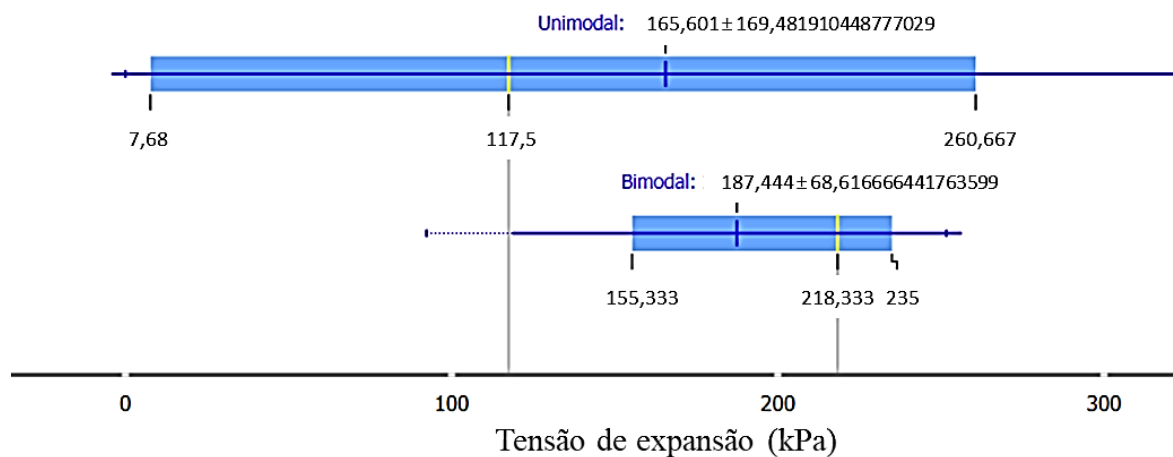
Figura 48 – Variação da expansão livre nos solos unimodais e bimodais.



Fonte: A autora (2023)

Do restante dos solos, 13 tiveram a expansividade medida através da tensão de expansão, determinada por meio dos diversos métodos presentes na literatura, conforme Tabela 4, para os solos que apresentaram mais de um método na determinação da tensão de expansão foi considerada a média dos valores para a análise. O comportamento observado para a tensão de expansão foi similar ao da expansão livre, os intervalos de valores coincidem, porém os solos unimodais apresenta uma faixa mais ampla de valores (Figura 49).

Figura 49 – Análise da variação da tensão de expansão dos solos unimodais e bimodais.

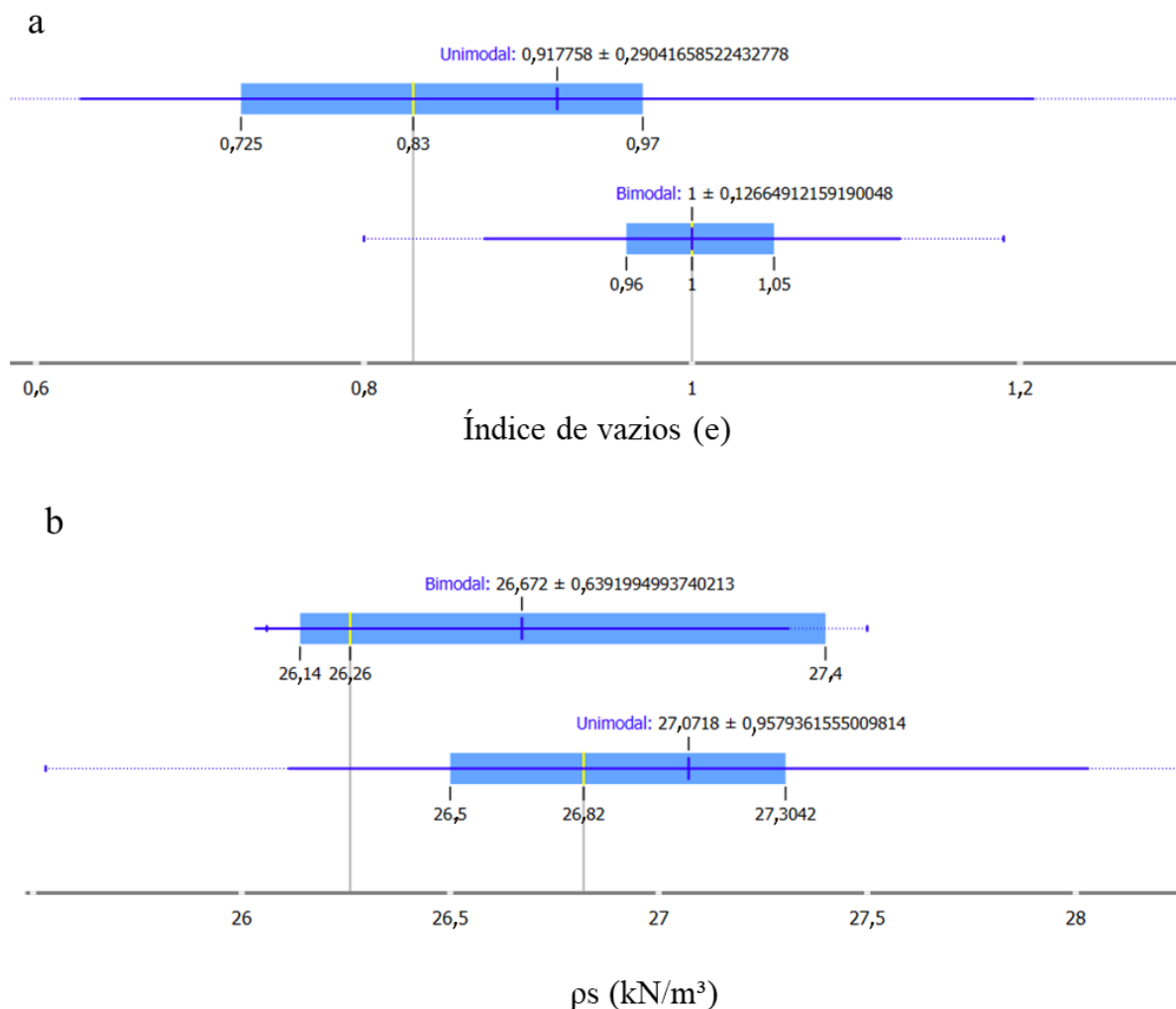


Fonte: A autora (2023)

O índice de vazios dos solos expansivos com comportamento unimodal na curva de retenção estavam concentrados entre 0,725 e 0,9 a mediana das amostras foi de 0,827, já nos solos bimodais a concentração das amostras variaram de 0,96 a 1,05, metade das amostras estava abaixo de 1 e a outra metade apresentaram índice de vazios maior que 1. (Figura 50a).

Na Figura 50b o intervalo de concentração do peso específico das partículas das amostras unimodais e bimodais coincidiram, porém é possível observar uma maior dispersão nos dados dos solos unimodais com um intervalo inferior menor que 26 e o superior maior que 30.

Figura 50 – Variação do (a) índice de vazios e do (b) peso específico das partículas solidas dos solos expansivos unimodais e bimodais



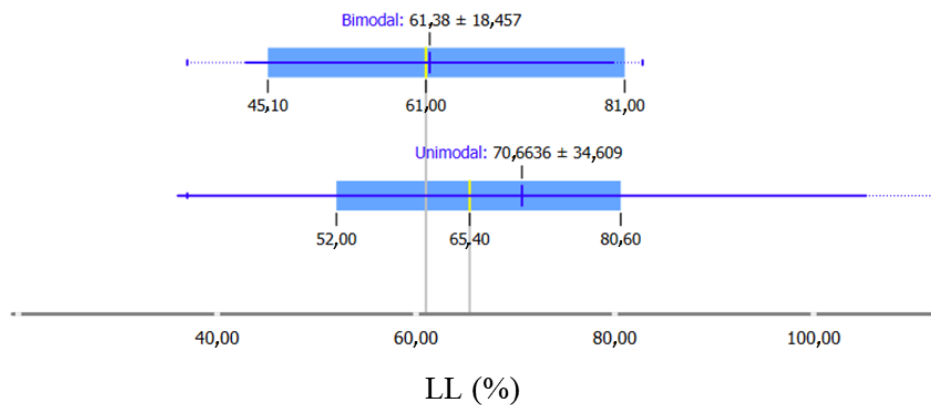
Fonte: A autora (2023)

O limite de liquidez dos solos expansivos unimodais e bimodais também coincidiram os intervalos de variação da concentração de amostras, porém houve uma dispersão maior nos solos unimodais onde o valor máximo das amostras foi maior que 200% (Figura 51a).

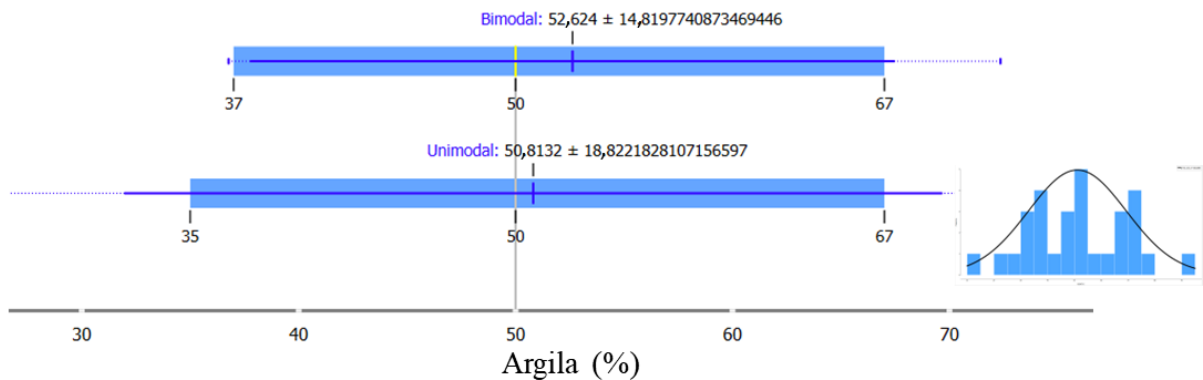
Os solos expansivos unimodais apresentaram uma distribuição normal no percentual de argila, onde o valor da média foi de 50,21% e a mediana foi 50%, nos solos bimodais a distribuição foi assimétrica positiva, onde a mediana foi 50% e a média 52,60% (Figura 51b).

Figura 51 – Variação do (a) limite de liquidez e do (b) percentual de argila dos solos expansivos unimodais e bimodais

a



b

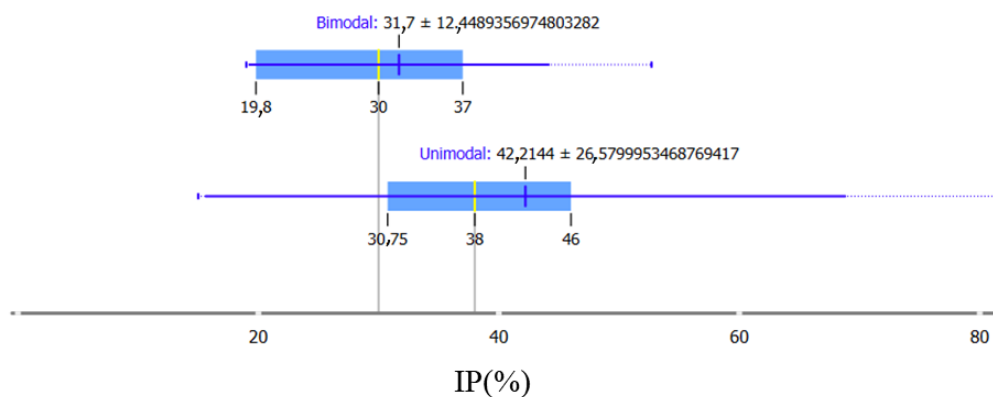


Fonte: A autora (2023)

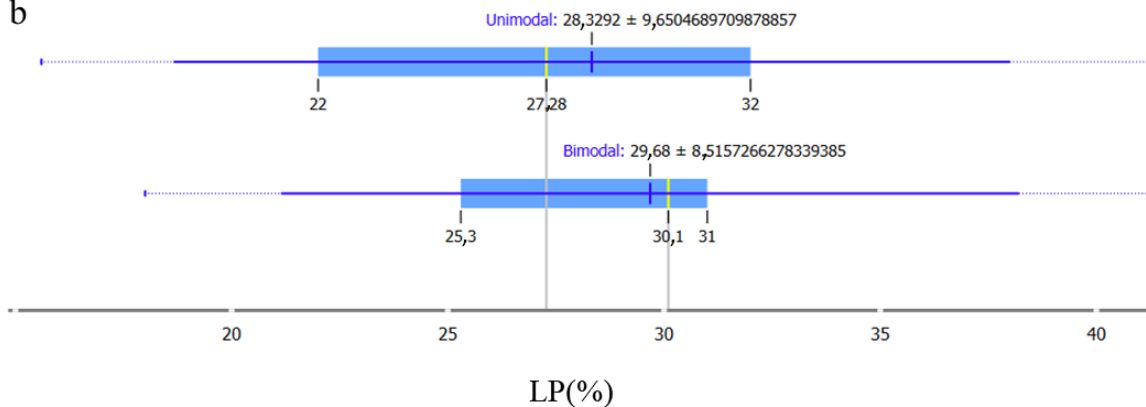
O índice de plasticidade dos solos unimodais foram superiores aos solos bimodais (Figura 52a), já o limite de plasticidade coincide para ambos os solos (Figura 52b).

Figura 52 – Variação do (a) índice de plasticidade e do (b) limite de plasticidade dos solos expansivos unimodais e bimodais

a



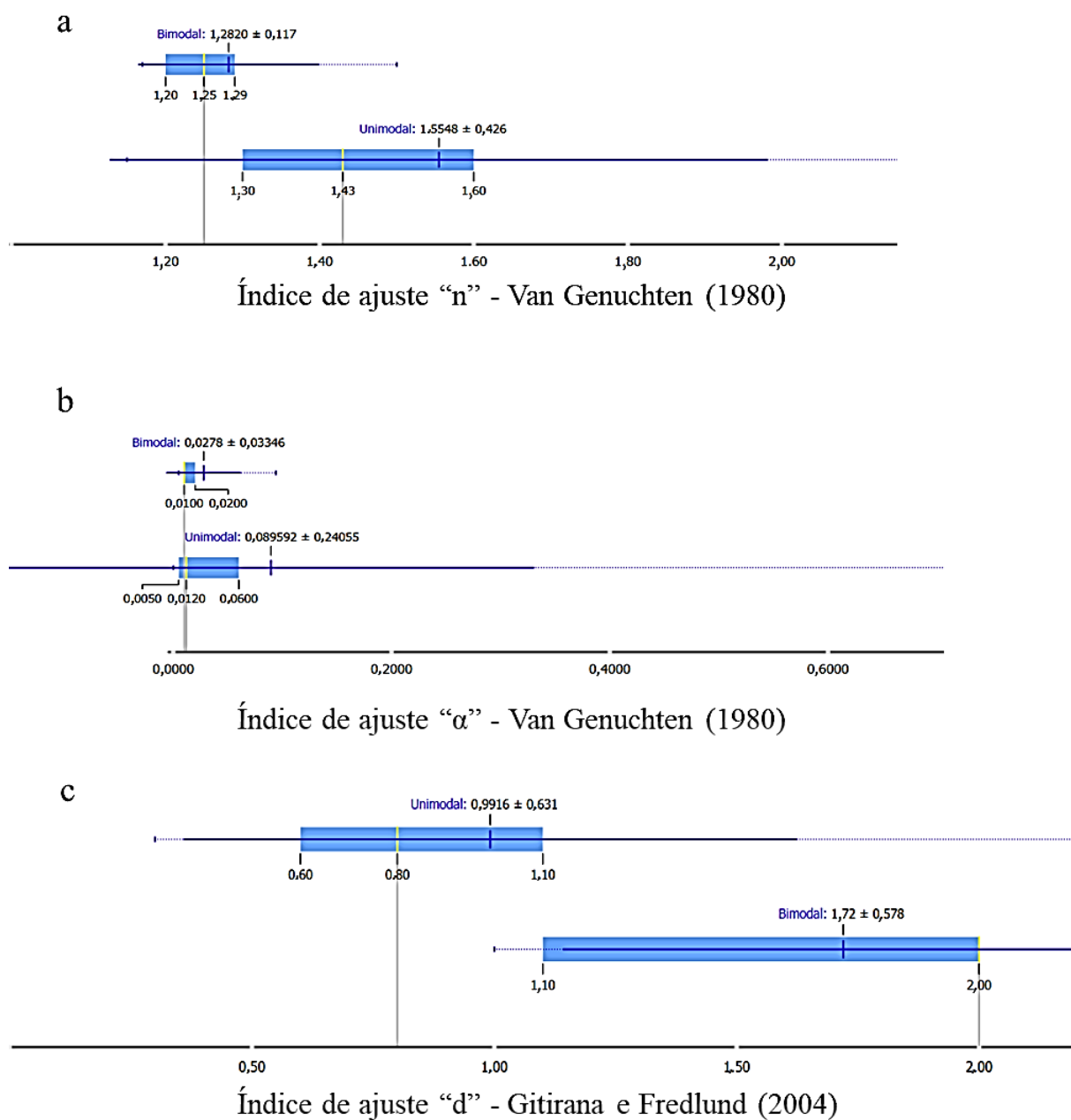
b



Fonte: A autora (2023)

Os valores do índice n do método proposto por Van Genuchten (1980) para os solos expansivos unimodais foi superior ao valor dos solos bimodais, as amostras apresentaram valores entre 1,30 e 1,50 para os unimodais e 1,20 a 1,29 para solos bimodais (Figura 53a). Já o valor de α nos solos unimodais estavam concentrados entre 0,005 e 0,06 mediana 0,0120, nos solos bimodais a maioria das amostras variaram entre 0,01 e 0,02 (Figura 53b). O índice d do ajuste de Gitirana e Fredlund (2004) nos solos unimodais apresentou maior concentração de amostras no intervalo de 0,6 a 1,10, já nos solos bimodais foi de 1,10 a 2,00. (Figura 53c).

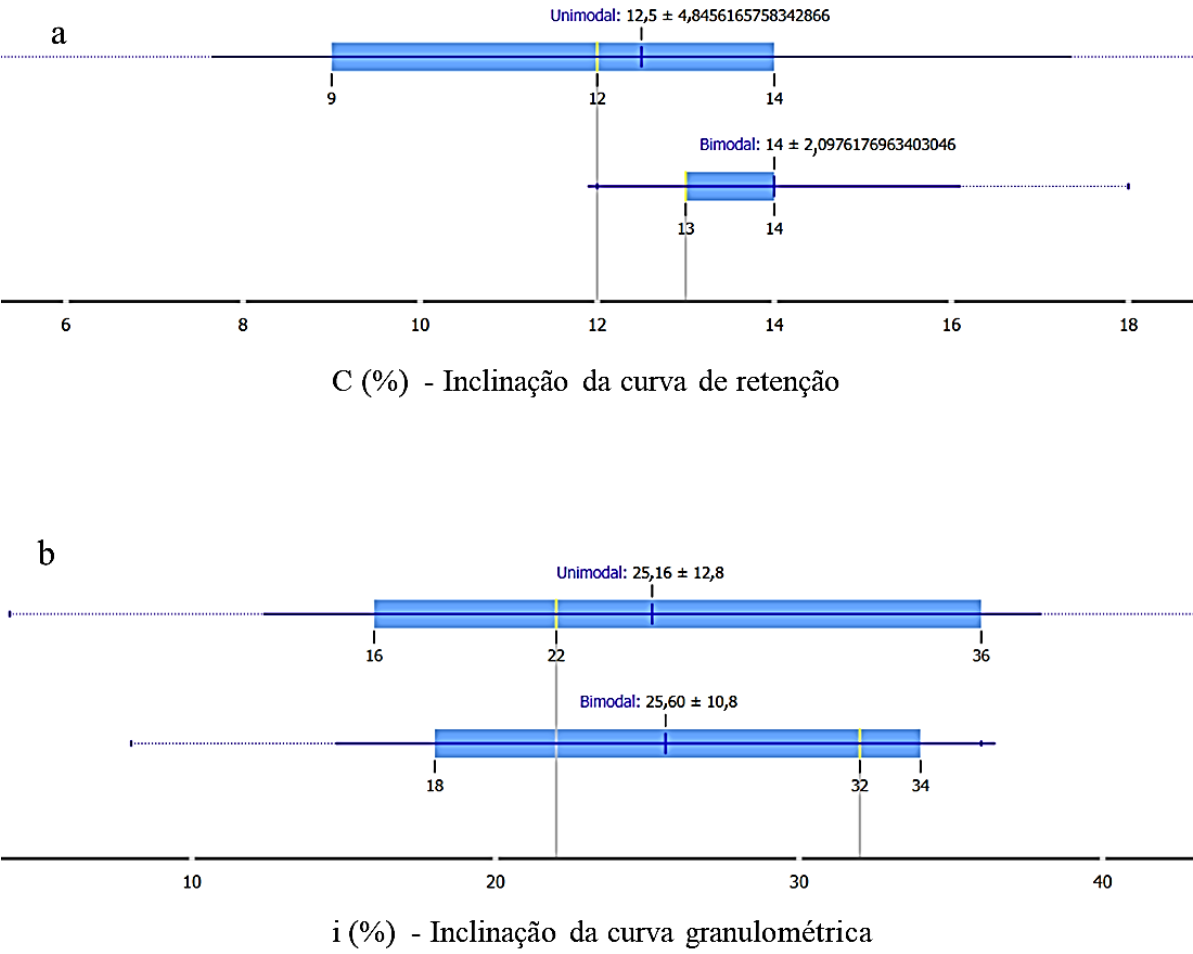
Figura 53 – Variação do (a) índice n , do (b) índice α e do (c) índice d dos solos expansivos unimodais e bimodais



Fonte: A autora (2023)

A inclinação da curva de retenção dos solos unimodais apresentou uma maior dispersão em relação aos solos bimodais (Figura 54a), os valores da inclinação da curva granulométrica coincidiram para os dois solos (Figura 54b).

Figura 54 – (a) Inclinação da curva de retenção e (b) inclinação da curva granulométrica dos solos expansivos unimodais e bimodais.



Fonte: A autora (2023)

A Tabela 11 apresenta um resumo das características físicas e índices de ajustes dos solos expansivos unimodais e bimodais analisados.

Tabela 11 – Resumo das características físicas e dos índices de ajuste dos solos expansivos unimodais e bimodais.

Características físicas	Tipo do solo	Outliers		Média	Concentração de dados			Comportamento identificado
		Mínimo	Máximo		1º quartil	Mediana	3º quartil	
Argila (%)	Unimodal	12	94	50,81	35	50	67	Valores coincidem
	Bimodal	36,77	72,35	52,624	37	50	67	
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	Unimodal	25,53	30,13	27,07	26,5	26,82	27,3	Valores coincidem
	Bimodal	26,06	27,5	26,67	26,14	26,26	27,4	
Índice de vazios (e)	Unimodal	0,526	1,572	0,917	0,725	0,83	0,97	Maior nos solos bimodais
	Bimodal	0,8	1,19	1	0,96	1	1,05	
Limite de liquidez (%)	Unimodal	37	218	70,66	52	65,4	80,6	Valores coincidem
	Bimodal	37	82,8	61,38	45,1	61	81	
Limite de plasticidade (%)	Unimodal	15,6	58	28,32	22	27,28	32	Valores coincidem
	Bimodal	18	44	29,68	25,3	30,1	31	
Índice de plasticidade (%)	Unimodal	15	160	42,21	30,75	38	46	Maior nos solos unimodais
	Bimodal	19	52,7	31,7	19,8	30	37	
α	Unimodal	0,0001	1,2	0,089	0,005	0,012	0,06	Maior nos solos unimodais
	Bimodal	0,005	0,094	0,0278	0,01	0,01	0,02	
n	Unimodal	1,15	3	1,5548	1,3	1,43	1,5	Maior nos solos unimodais
	Bimodal	1,17	1,5	1,282	1,2	1,25	1,29	
d	Unimodal	0,3	3	0,9916	0,6	0,8	1,1	Maior nos solos bimodais
	Bimodal	1	2,5	1,72	1,1	2	2	
C (%)	Unimodal	5	24	12,5	9	12	14	Valores coincidem
	Bimodal	12	18	14	13	13	14	
i (%)	Unimodal	4	52	25,16	16	22	36	Valores coincidem
	Bimodal	8	36	25,6	18	32	34	
Expansão livre (%)	Unimodal	3	370	67,68	6,4	9,9	39,1	Valores coincidem
	Bimodal	3	59	21,23	6,95	11,35	35,5	
Tensão de expansão (kPa)	Unimodal	0	592	165,6	7,68	117,5	260,667	Valores coincidem
	Bimodal	92	252	187,44	155,33	218,33	218,33	

Fonte: A autora (2023)

4.5.4 Análise das características físicas entre um solo expansivo bimodal e um solo colapsível bimodal

Foi realizado uma análise comparativa das características físicas de dois solos estudados que apresentaram comportamento bimodal, um expansivo: Cabrobó – PE – Paiva (2016) e o outro colapsível: Brasília – DF – Silva (2006).

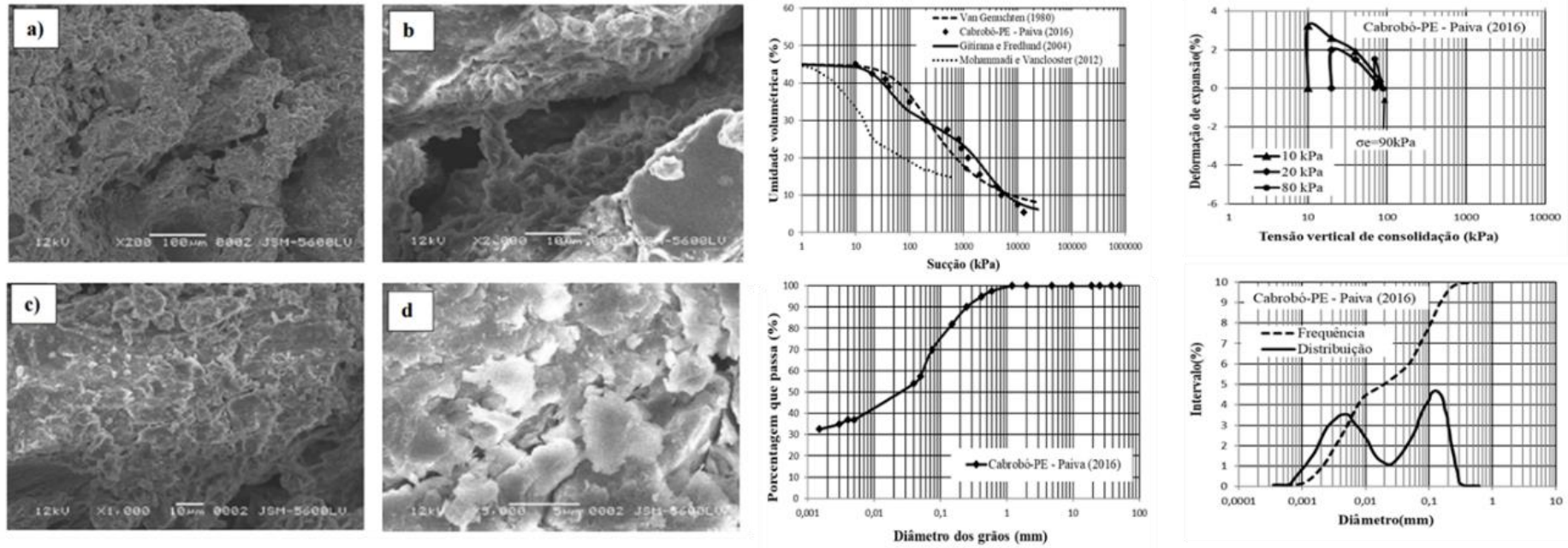
O solo expansivo (Figura 55) apresentou uma textura fina, com 37% de argila, 34% de silte e 29% de areia, foi classificado como argila de baixa compressibilidade (CL) pelo SUCS. A densidade real dos grãos foi 2,606, a distribuição de frequência dos grãos foi uniforme, na curva de frequência foi possível observar um comportamento bimodal, com dois picos distintos. o Limite de Liquidez de 37% e um Índice de Plasticidade de 19%. Além disso, foi observada uma macroestrutura prismática formada por blocos angulares e subangulares robustos. A microestrutura foi caracterizada por uma organização contínua, resultante da união de microagregados compostos por um plasma argiloso. Existe uma considerável presença de poros achatados, que resultam das típicas expansões e contrações observadas em argilas de alta atividade. Além disso, são identificadas cavidades do tipo "Vugh", sendo predominante o tipo interconectado (PAIVA, 2016).

Com esse panorama de características do solo é possível analisar o comportamento do solo por vários ângulos, o MEV apresenta imagens dos poros presentes na estrutura do solo, e identificados nas curvas de distribuição e frequência. Nota-se uma similaridade da curva de retenção com a curva de distribuição, a expansão do solo é quantificada pelo ensaio de carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação e o valor encontrado foi de 90 kPa.

No solo colapsível (Figura 56) o apresenta 55,4% de areia, 11,8% de silte e 32,8% de argila, foi classificado como silte de baixa plasticidade pelo Sistema Unificado a densidade real dos grãos foi de 2,67 o limite de liquidez foi 39 e o índice de plasticidade 8%. A estrutura macroporosa e aberta (P) do solo é claramente identificada, assim como a presença de microconcreções de argila em diversos tamanhos, especialmente em grãos de areia (MA). Também se observam algumas microconcreções de tamanho de grãos de silte (MS). Essas microconcreções apresentam formas menos arredondadas e estão envolvidas por agregados de argila ou silte. Além disso, estão interligadas, contribuindo para a estrutura metaestável do solo, por meio de pontes de argila (PA) e contrafortes de argila (CA), (SILVA 2006). Da mesma

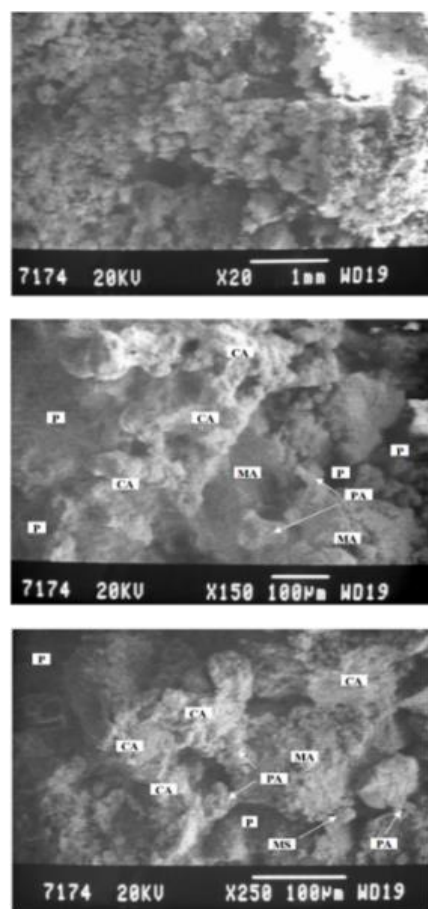
forma que no solo expansivo, o panorama das características desse solo, mostram a importância da análise integrada dessas propriedades, o MEV apresenta a imagem da estrutura onde é possível identificar os poros presente nesse solo, a granulometria apresenta a predominância de duas faixas de partículas do solo, típicas de comportamento de curva de retenção bimodal.

Figura 55 – Características físicas do expansivo bimodal de Cabrobó-PE.

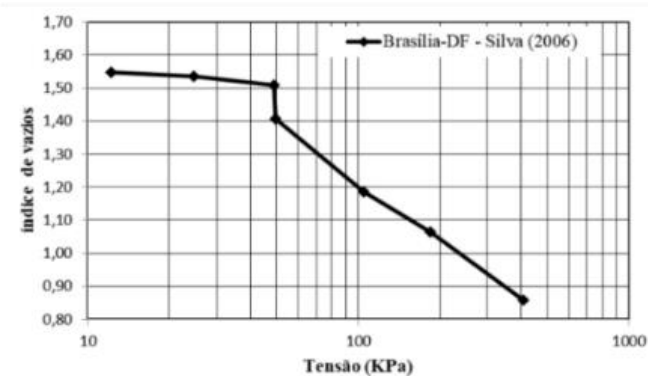
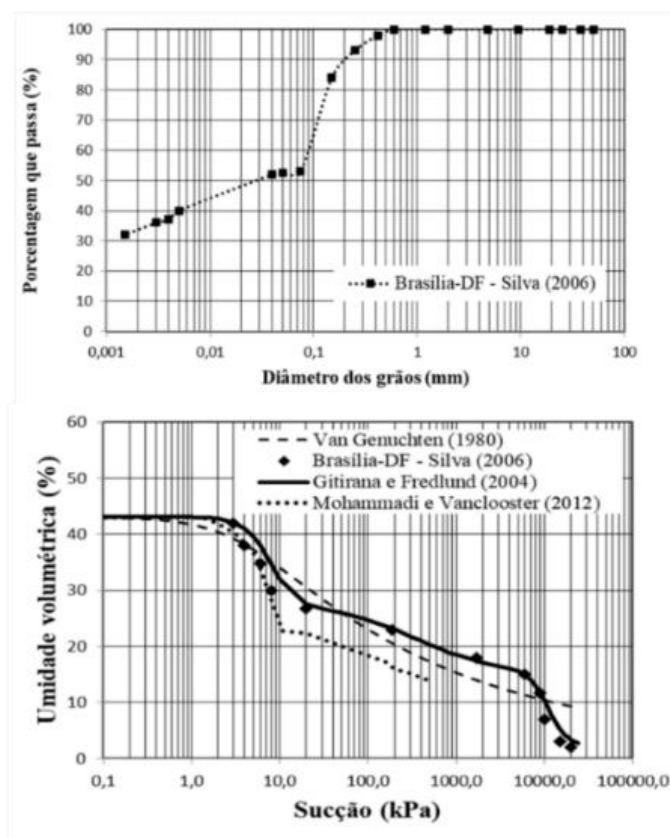


Fonte: Adaptado de Paiva (2016)

Figura 56 – Características físicas do solo colapsível bimodal de Brasília-DF.



(P) -estrutura macroporosa ;
 (MA) -microconcreções de argila;
 (MS)-microconcreções de silte
 (PA)- pontes de argila
 (CA)- contrafortes de argila.



Fonte: Adaptado de Silva (2006)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ajuste de Van Genuchten (1980) representou bem o comportamento das curvas unimodais dos solos colapsíveis e expansivos, porém para os solos bimodais ele não representa adequadamente a forma da curva de retenção.

O método proposto por Gitirana e Fredlund (2004) demonstrou um desempenho muito bom, os coeficientes de determinação dos ajustes variaram de 0,80 a 1,00, representou bem o formato das curvas tanto unimodais quanto bimodais nos solos expansivos e colapsíveis.

A proposta de previsão proposto por Mohammadi e Vanclooster (2012) mostrou limitações na representação das curvas de retenção tanto para solos colapsíveis quanto expansivos. Essas limitações se tornaram evidentes nos trechos de altas sucções, que são comuns em solos de textura fina. O coeficiente de determinação variou de 0,51 a 1, se encaixando nas categorias de “ajuste forte” e “ajuste muito forte”. Ficou claro, porém que o coeficiente de determinação não é uma medida estatística representativa para avaliar, proposta, pois foram observadas várias discrepâncias entre o coeficiente de determinação e a forma real da previsão das curvas de retenção nos solos estudados. No entanto, é importante mencionar que o método ainda é uma ferramenta útil para estimar a curva de retenção, especialmente em solos arenosos, onde a retenção de água é baixa.

Nos solos colapsíveis, observou-se que os índices de vazios foram maiores em comparação aos solos expansivos. O peso específico dos grãos e o limite de plasticidade foram semelhantes em ambos os tipos de solo. Por outro lado, nos solos expansivos, o limite de liquidez, o percentual de argila e o índice de plasticidade foram maiores em comparação com os solos colapsíveis.

Os índices de ajuste dos métodos de Van Genuchten (1980) e Gitirana e Fredlund (2004) foram maiores para os solos colapsíveis do que para os solos expansivos, o mesmo comportamento foi observado na inclinação das curvas de retenção e das curvas granulométricas.

O índice n do método proposto por Van Genuchten (1980) apresentou uma certa correlação com a inclinação da curva de retenção e da curva granulométrica dos solos colapsíveis, com coeficientes de correlação de 0,70 e 0,60 respectivamente. Nos solos

expansivos, o coeficiente de correlação com a capacidade de sucção foi de 0,45, já com a inclinação da curva granulométrica foi -0,20.

Nos solos colapsíveis, foi observado que o potencial de colapso, conforme o critério de Jennings e Knight (1975), geralmente estava diretamente relacionado com o percentual de argila. Ou seja, quanto maior o potencial de colapso, maior era o teor de argila presente no solo. Os valores de potencial de colapso geralmente se assemelharam tanto nos solos com curvas unimodais quanto nos solos com curvas bimodais, embora os solos bimodais tenham apresentado uma faixa de valores mais ampla.

Nos solos colapsíveis unimodais, foi observado que o índice de vazios era menor do que nos solos colapsíveis bimodais. O peso específico das partículas sólidas e o índice de plasticidade foram semelhantes em ambos os tipos de solos. No entanto, o limite de liquidez, o limite de plasticidade e o percentual de argila foram maiores nos solos colapsíveis bimodais.

Nos solos expansivos, observou-se uma relação direta entre o percentual de argila e o potencial de expansão, pelo critério proposto por Dakshanamurthy & Raman (1973) e pelo critério de Seed et al. (1962). Isso significa que quanto maior o teor de argila, maior é o potencial de expansão desses solos, de acordo com esses critérios. Por outro lado, o critério de Chen (1965) não apresentou uma relação direta entre o percentual de argila e o potencial de expansão, as amostras classificadas com alto grau de expansão de acordo com o critério de Chen apresentaram um percentual de argila menor do que as amostras classificadas com grau médio de expansividade. No entanto, os três critérios mostraram um comportamento inversamente proporcional em relação ao percentual de areia, ou seja, quanto maior o teor de areia, menor é o potencial de expansão.

A capacidade de expansão dos solos medida tanto pela expansão livre quanto pela tensão de expansão apresentou comportamento semelhantes, onde os valores coincidiram tanto para os solos unimodais quanto para os bimodais, mas os solos unimodais mostraram uma faixa mais ampla de valores.

Nos solos expansivos, observou-se que o índice de vazios era maior nos solos bimodais em comparação com os solos unimodais. O peso específico das partículas sólidas, o limite de liquidez, o percentual de argila e o limite de plasticidade foram semelhantes em ambos os tipos de solo. No entanto, o índice de plasticidade foi maior nos solos expansivos unimodais.

Em relação aos parâmetros da proposta de Van Genuchten (1980) e Gitirana e Fredlund (2004), o índice "n" de Van Genuchten foi maior para os solos colapsíveis e expansivos unimodais do que para os bimodais, enquanto o índice " α " foi similar para os solos colapsíveis

(unimodais e bimodais) e maior nos solos expansivos unimodais em relação aos solos expansivos bimodais. Por outro lado, o índice "d" de Gitirana e Fredlund foi maior nos solos colapsíveis e expansivos bimodais em relação aos bimodais. Os valores da inclinação da curva de retenção e da inclinação da curva granulométrica foram maiores nos solos colapsíveis unimodais do que nos bimodais e semelhantes nos solos expansivos unimodais e bimodais.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar o ajuste e previsão das curvas de retenção de solos colapsíveis e expansivos por meio de outros métodos de ajuste.
- Adicionar outras variáveis na análise e verificar como elas afetam as propriedades de retenção de água desses solos. Compreender esses fatores adicionais pode fornecer uma visão mais abrangente.
- Realizar análises numéricas com o objetivo de desenvolver métodos de ajustes para simular o comportamento das curvas de retenção dos solos expansíveis e colapsíveis a partir de parâmetros de fácil acesso no estudo desses solos, através de métodos estatísticos avançados ou técnicas de aprendizado de máquina para melhorar a precisão das previsões e ajustes.

REFERÊNCIAS

- ALVES, I. S. (2019) **Análise microestrutural e numérica de um solo colapsível antes e após o colapso**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 116p.
- AL-WAKEL, S.F.A. (2018). **Investigating of the behavior of pile groups under the effect of suction potential of unsaturated expansive soil**. Journal of Engineering and Sustainable Development (Online) 2018.4 (2018): 57-73. Web.
- ARAUJO, A.G. et al. (2017) **Aplicação de modelos de ajustes de curvas características solo água em solos tropicais**. Anápolis: Revista Mirante, vol. 10, n. 5.
- ARYA, L. M., & Paris, J. F. (1981). **A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data**. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:1023-1030.
- AZAM, M. I. S. (2013). **Engineering properties of a vertisolic expansive soil deposit**. Elsevier, Engineering Geology 152 (2013) 10–16
- BARDEN, L. (1965). **Consolidation of Compacted and Unsaturated Clay**. Geotechnique, vol. 15, n 3,00 p. 267-286.
- BENATTI, J.C.B. (2010) **Colapsibilidade com sucção controlada de um solo coluvionar e laterítico de Campinas/SP**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.185p.
- BIN, W. (2000). **Stress effects on soil-water characteristics of unidaturate expansive soils**. Masters dissertation, Universidade of Science e technology, Department of Civil, 335p.
- BONDER, B. H. (2008) **Curvas de Retenção de Água de um Solo Coluvionar de Campinas Obtidas Mediante Técnicas de Laboratório e de Campo**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.152p.
- BURGOS, P. C. e CONCIANI, W. (2015). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. p. 182-204.
- CARVALHO, J.C. et al. (2015). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. p. 39-78.
- CASTRO, A P. A. (2016). **Influência da compactação no colapso de um solo arenoso / Ana Patrícia Aranha de Castro**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação, Universidade Estadual de Paulista, Faculdade de Engenharia Bauru, 116 p.
- CAVALCANTE, A. L. B. et al. (2015). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. p. 531-553.
- CLEMENCE, S. P. e FINBARR, A. O. (1981). **Design considerations for collapsible soils. (1981)**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 18(4), 65. doi:10.1016/0148-9062(81)91226-2

- CLIFTON, A.W., WILSON, G.W., e BARBOUR, S.L. (Editors). (1999) **The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics: Fredlund Volume**. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada. 735 p.
- COSTA, W. A. et al. (2008). **Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo-vermelho-amarelo**. Revista Brasileira De Ciência Do Solo, 32(2), 515–523. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200006>
- DANXI, S. et al. (2023). **Three-Dimensional Soil–Water Characteristics Model of Expansive Soil Considering Swelling Effect**. International Journal of Geomechanics 23.8 (2023): International Journal of Geomechanics, 2023, Vol.23 (8). Web.
- DAVIES, G.I. (2000) **Análise e modelagem do comportamento colapsível de um solo arenoso**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 168p.
- EMBRAPA (2002). **Água disponível do solo: algumas características físicas do solo importantes para quantificação**. Documentos, 67. Porto Velho: Embrapa-CPAF Rondônia.
- EMBRAPA (2022). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs/propriedades-do-solo>.
- FALCÃO, P.R. (2021). **Avaliação do impacto da inundação na resistência e Deformabilidade de um solo laterítico e colapsível: estudo Experimental e numérico**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 229p.
- FARIA, F.X.C.C.L. (2007). **Influência da Molhagem após Compactação no Comportamento de um Aterro da Auto-Estrada A10 (BRISA)**. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior técnico Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 95p.
- FAUSTINO, O. W. C. (2022). **Análise do comportamento hidromecânico e o processo de formação de fissuras de solo expansivo reforçado com fibras do coco verde**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 129p.
- FERREIRA, S. R. M. (1995) **Colapso e Expansão de Solos Naturais Não Saturados Devidos à Inundação**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 379p.
- FERREIRA, S. R. M. e VILAR, O. M. (2015). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. p. 415-436.
- FERREIRA, S. R. M. **Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil**. In: VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 2008, Salvador :EDUFBA, 2008. v. 2. p. 593-619.
- FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. (1993). **Soil mechanics for unsaturated soil**. John Wiley & Sons, New York, 517 p.
- FREITAS, M. L. R. A. (2017) **Comportamento geomecânico de um solo colapável de Petrolina - PE avaliado por meio de ensaios de campo e laboratório**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 145p.

- GALVÃO, I.M. et al. (2020). **Comparação de modelos usados para representar a curva de retenção de água no solo**. XXIX CONIRD – Congresso Nacional de irrigação e drenagem / INOVAGRI Meeting Virtual 2020 (VI INOVAGRI International Meeting).
- GERSCOVICH, D.M.S. (2001). **Equações para modelagem da curva característica aplicada a solos brasileiros**. 4o Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ABMS, Porto Alegre, RS, 1: 76-92.
- GERSCOVICH, D. M.S. e Sayão, A. S. F. J. (2002). **Evaluation of the Soil-Water Characteristic Curve Equations for Soils form Brazil**. Proceeding of Third International Conference on Unsaturated Soils – UNSAT2002, Recife. Vol. 1, p. 295-300.
- GITIRANA JR, G. F. N.e Fredlund,dlund, D. G. (2004) **Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, p 209-212.
- GONZÁLEZ, Y.V. (2014). **Geotechnical behavior of a tropical residual soil contaminated with soap solution**. Dyna, Universidad Nacional de Colombia.
- GROUTING. **Solos colapsáveis e expansivos**. ENGERAUT-Equipe de projetos, 2015, 20p.
- HAERI, S.M. (2016). **Hydro-mechanical behavior of collapsible soils in unsaturated soil mechanics contexto**. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Japanese Geotechnical Special Publication.
- HASHER, E.B (2013). **Volume Change Consideration in Determining Unsaturated Soil Properties for Geotechnical Applications**. Dissertação de Doutorado, Arizona State University, 456p.
- ISIDRO, M. (2021). **Soil water characteristic curve parameters of collapsible sand in Lambayeque**, Peru MATEC Web of Conferences 337, 01005 (2021) PanAm-UNSAT 2021.
- JIANG, P. et al. (2022). **Development Characteristics and Sensitivity Analysis of Expansive Soil Slope**. Geofluids 2022 (2022): 1-24. Web.
- JUNIOR, G.F.N.G. CARVALHO, J. C. FERREIRA, S. R. M. e MASCARENHA, M.M.A. (2012). **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais**. Brasília: Faculdade de Tecnologia. p. 157-181.
- JUNIOR, G.F.N.G. et al. (2012). **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais**. Brasília: Faculdade de Tecnologia. p. 269-286.
- JUNIOR, G.F.N.G. MARINHO, F.A.M. e SOTO, M. A. A. (2015). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. p. 205-229.
- JUNIOR, I.R. e Futai, M. M. (2010). **Estudo de Caso de um Melhoramento de Solos Colapsíveis com Compactação**. COBRAMSEG, ABMS.
- LAFAYETTE, K. P.V. (2000). **Comportamento geomecânico de solos de uma Topossequência na formação barreiras em uma encosta na Área urbana do Recife – PE**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 137p.
- LAFAYETTE, K. P.V. (2006). **Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo**

- Agostinho/PE.** Tese de Doutorado Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 391p.
- LI, J.H., e ZHANG, L.M. (2011). **Study of Desiccation Crack Initiation and Development at Ground Surface.** Elsevier, Engineering Geology 123.4 (2011): 347-58. Web.
- LLORET, A. (1982). **Comportamiento Deformacional del Suelo no Saturado Bajo Condiciones Drenadas y No Drenadas.** Tesis doctoral Universidade Politécnica de Barcelona, 717p.
- LOPERA, J.F.B. (2016). **Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados.** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-272A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183p.
- KORMANN, A.C.M. (2002). **Comportamento geomecânica da formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, 429p.
- MA, T. et al. (2020). **Microstructural Evolution of Expansive Clay during Drying–wetting Cycle.** Acta Geotechnica 15.8 (2020): 2355-366. Web.
- MAIA, E. C. **Estudo geotécnico e análise da estabilidade da encosta localizada na Ladeira do Pilar- comércio pertencente ao Município do Salvador-BA.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 237p.
- MAGALHÃES, J. S. L. A. (2013). **Estudo de estabilidade da encosta Alto do Padre Cícero no município de Camaragibe-PE.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 107p.
- MAGALHÃES, P.R.F. e SOARES, A.B. (2020). **Uso de argilas expansivas em camadas de impermeabilização de coberturas de aterros sanitários no Nordeste do Brasil.** Eng Sanit Ambient, v.26 n.6, Universidade Federal do Ceará – Fortaleza (CE), Brasil.
- MARINHO, F.A. M. (2005). **Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados.** Texto apresentado para o Concurso de Livre-Docência na especialidade "Geomecânica" do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 201p.
- MARQUES, R.F. (2006). **Caracterização Geotécnica de um Perfil de Solo Não Saturado da Formação Barreiras da Cidade de Maceio-Al.** XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- MASCARENHA, M. M. A. (2008) **Influência da microestrutura no comportamento hidro-mecânico de uma argila siltosa não saturada incluindo pequenas deformações.** Tese de Doutorado em Geotecnia-Universidade de Brasília, Brasília, 180p.
- MASSOCCO, N. S. (2017). **Determinação dos parâmetros geotécnicos de solos residuais com ênfase na mecânica dos solos não saturados.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 238 p.
- MCKEEN, R. G. (1985). **Validation of procedures for pavement design On expansive soils.** Departamento de Transportes dos EUA. University of New Mexico Albuquerque, 91p.

- MITCHELL, J.K e SOGA, K. (2005). **Fundamentals of Soil Behavior**. 3rd ed. USA, 558p.
- MOHAMMADI, M. H. e Vanclooster M. (2011). **Predicting the Soil Moisture Characteristic Curve from Particle Size Distribution with a Simple Conceptual Model**. Vadose Zone Journal, vol 10, p .594-602.
- MORAIS, J. J. O. (2017) **Caracterização geotécnica da expansividade de um solo argiloso do município de Paulista-PE**. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 127p.
- MIGUEL, M.G. et al. (2006). **Curvas Características de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR**. Revista de ciência & tecnologia • V. 12, Nº 24 – pp. 63-74.
- NASCIMENTO, P.S. (2009). **Análise do uso da curva de retenção de água no solo determinada por diferentes métodos em planilha de manejo de irrigação**. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em ciências agrárias, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 88p
- NG, C. W. W e MENZIES, B. **Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering**. Reino Unido: Taylor & Francis e-Library, 2007.
- OLIVEIRA, A.F.F. e Ferreira, S.R. M (2012). **Formas da curva de compactação em solos expansivos**. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- OLIVEIRA, A. (2019). **Resistência e compressibilidade de solo argiloso tropical residual evoluído de basalto**. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá 191p.
- OLIVEIRA, N.M. (2018). **Efeito da estrutura na compressibilidade de um solo residual maduro não saturado**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 61p.
- OLIVEIRA, N.M. (2021). **Influência da Estrutura na Curva Característica de Retenção e no Comportamento Colapsível de um Solo Tropical**. Anuário do Instituto de Geociências Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PAIVA, S. C. Paiva. (2016) **Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista-PE e de suas misturas com cal**. Tese de Doutorado Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 191p.
- PEREIRA, E. M. (2004) **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 253p.
- PERERA, S. T. A. M. et al. (2022). **Effect of Crushed Glass on the Mechanical and Microstructural Behavior of Highly Expansive Clay Subgrade**. Elsevier, Case Studies in Construction Materials 17 (2022): E01244. Web.
- PIMENTEL, L.G. et al. (2022). **Ajuste de equações de retenção de água em Latossolos Amarelos muito argilosos da Amazônia Central**. Workshop de Simulação de Fluxos de Água e Solutos no Solo Embrapa Solos e Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- PINHEIRO, R.J.B. et al. (2006) **Notas de aula - Mecânica dos solos**, 231p.

- PREUSS, M.S. (2022) **Estudo da colapsividade de um solo superficial da cidade de Barreiras -BA**. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- QIAN, J. (2022). **Experimental and Modeling Study of Water-retention Behavior of Fine-grained Soils with Dual-porosity Structures**. Acta Geotechnica 17.8 (2022): 3245-258. Web.
- RAMOS, M. C. L.S. (2019) **Estudo geológico-geotécnico e análise da estabilidade de uma encosta localizada no bairro do Curado II no município de Jaboatão dos Guararapes – PE**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 196p.
- ROCHA, B.P (2018). **Caracterização Geotécnica de solos tropicais não saturados por meio de ensaios de campo**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia 272p.
- SANTOS, G. M. **Estudo do comportamento histerético de uma argila expansiva não-saturada**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 119p.
- SANTOS, J.C. e COUTINHO, R.Q. (2022). **Geological and Geotechnical Characterization of Soils from the Barreiras Formation in a Subarea of Study in Maceio, Alagoas State, Brazil**. Springer, Geotech Geol Eng.
- SCALLET, M.M. (2011). **Comportamento de estacas escavadas de pequeno diâmetro em solo laterítico e colapsível da região de Campinas/SP**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 167p.
- SHIMAKURA S. E (2006). **Interpretação do coeficiente de correlação**. Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html>. Acesso em: 06 out. 2023.
- SILVA, F.C. et al. (2020) **Determinação da curva característica e a influência dos macros e microporos em um perfil de solos residual**. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, nº 149, p. 101-128.
- SILVA, J. D. (2006). **Estudo da colapsibilidade da argila porosa de Brasília pelo fluxo de contaminantes**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 141p.
- SILVA, T. C. R. (2019) **Avaliação do comportamento hidromecânico e do processo de propagação de fissura de solo expansivo do município de Bonito - PE**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 164p.
- SOARES, F. V.P. (2018) **Previsão de recalques por colapso de sapatas assentes em solo natural e compactado**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 170p.
- SOUZA JÚNIOR, A. et al. (2022). **Comparação estatística entre as equações de ajuste da curva de retenção de água em solo de cobertura de aterro sanitário**. Águas Subterrâneas, 35(3), e–30073. <https://doi.org/10.14295/ras.v35i3.30073>
- SOUZA, M.N.M. (2020) **Caracterização química, mineralógica e geotécnica de solos do município de Areia – PB**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, 167p.

SOUZA NETO, J.B. (2004). **Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso).** Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação de Engenharia Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ),432p.

SOUZA, R. F. C. (2014) **Estudo da influência da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com técnica da transferencia de vapor.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da USP, 242p.

VAN GENUCHTEN, M. T. (1980) **A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.** Soil Science Society of America Journal,vol 44,p. 892-898.

WANG, C. et al. (2021) **Improved prediction of water retention characteristic based on soil gradation and clay fraction.** Elsevier, Geoderma 404 (2021) 115293.

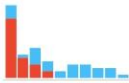
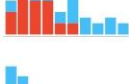
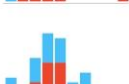
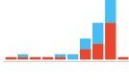
WANG, S. et al. (2021) **The effects of fitting parameters in best fit equations in determination of soil-water characteristic curve and estimation of hydraulic conductivity function.** Elsevier, Rhizosphere 17 (2021): 100291.Web.

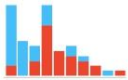
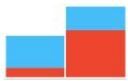
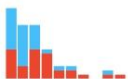
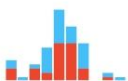
XAVIER, J. M. (2018) **Estudo do comportamento geotécnico de um solo colapsível voltado para fundações superficiais.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, 176p.

ZAMIN, B. et al. (2020). **Field-Obtained Soil-Water Characteristic Curves of KPK Expansive Soil and Their Prediction Correlations.** Advances in Civil Engineering, Volume 2020 13p.

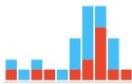
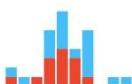
ZHAO, G. et al. (2021) **Evolution of Soil-water and Shrinkage Characteristics of an Expansive Clay during Freeze-thaw and Drying-wetting Cycles.** Elsevier, Cold Regions Science and Technology 186 (2021): 103275. Web.

APÊNDICE A – ANÁLISES ESTATÍSTICAS EM FUNÇÃO DOS SOLOS COLAPSÍVEIS E EXPANSIVOS ESTUDADOS

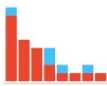
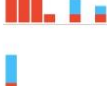
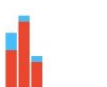
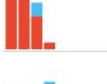
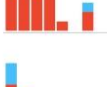
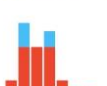
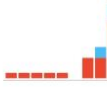
Feature Statistics						Sun Oct 08 23, 00:23:39			
	Name	Distribution	Mean	Mode	Median	Dispersion	Min.	Max.	Missing
N	Areia (%)		31.113	10	22.95	0.878648	0.69	94	0 (0 %)
N	Argila(%)		42.0853	14	43.485	0.516167	0.00	94	0 (0 %)
N	C (%)		13.275	12	11.5	0.488357	5	34	0 (0 %)
N	d		1.7222	1	1.1	0.827748	0.3	8	0 (0 %)
N	i(%)		34.65	22	29	0.60	4	82	0 (0 %)
N	Indice de plasticidade (%)		26.6083	0.00	19.9	0.882588	0.00	160	0 (0 %)
N	Indice de vazios (e)		0.998999	0.71	0.885	0.339526	0.526	1.9	0 (0 %)
N	Limite de liquidez (%)		51.9990	0.00	48.00	0.6120	0.00	218.00	0 (0 %)
N	Limite de plasticidade (%)		24.7407	0.00	24	0.495034	0.00	58	0 (0 %)
N	n		1.54376	1.3	1.4	0.294352	0.9	3	0 (0 %)
N	Pedregulho (%)		0.8345	0.00	0.00	3.4323	0.00	17.41	0 (0 %)
N	Peso específico real dos grãos (kN/m3)		27.1434	26.5	26.75	0.0479427	25.53	32.6	0 (0 %)
N	R2 - Gitirana Jr. e Fredlund (2004)		0.960274	0.99	0.977374	0.0451201	0.79812	1	0 (0 %)
N	R2- Mohammadi e Vanclooster (2012)		0.876054	0.514315	0.914713	0.120903	0.514315	1	0 (0 %)
N	R2-Van Genuchten (1980)		0.925698	0.732205	0.944852	0.0647974	0.732205	0.99548	0 (0 %)

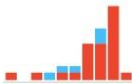
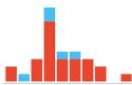
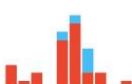
N	Silte (%)		25.6363	2	25.565	0.703892	0.5	70	0 (0 %)
C	Tipo de Cr		Unimodal			0.657			0 (0 %)
C	Tipo do solo		Colapsivo			0.693			0 (0 %)
N	α		0.189885	0.1	0.055	1.70304	0.0001	1.5	0 (0 %)
N	θ_r		0.0954105	0.1	0.0802224	0.85358	3.61236e-06	0.353051	0 (0 %)
N	θ_s		0.438463	0.220627	0.4462	0.206372	0.220627	0.645981	0 (0 %)
N	ψ_{b1}		167.909	0.1	5.43724	4.26977	0.001	4000	0 (0 %)
N	ψ_{res1}		40829.2	200	590.783	3.26763	0.51	926634	0 (0 %)



N	R2-Mohammadi e Vanclooster (2012)		0.90861	0.756022	0.924195	0.067619	0.756022	0.989414	0 (0 %)
N	Silte (%)		17.0122	2	10.5	0.97133	0.5	65	0 (0 %)
C	Tipo de Cr		Bimodal			0.684	0 (0 %)		
N	α		0.300476	0.1	0.15	1.22622	0.001	1.5	0 (0 %)
N	θ_r		0.0722712	0.001	0.0534	0.929853	0.001	0.325431	0 (0 %)
N	θ_s		0.443028	0.220627	0.438	0.213913	0.220627	0.645981	0 (0 %)
N	ψ_{b1}		21.508	0.1	0.85	3.4912	0.001	403.01	0 (0 %)
N	ψ_{res1}		10347.5	0.51	157.621	2.89432	0.51	153004	0 (0 %)



Feature Statistics							Mon Oct 09 23, 18:42:22		
	Name	Distribution	Mean	Mode	Median	Dispersion	Min.	Max.	Missing
N	Areia (%)		12.7940	3.00	9.88	0.8437	0.69	39.00	0 (0 %)
N	Argila(%)		51.115	49	50	0.356623	12	94	0 (0 %)
N	C (%)		12.75	12	12	0.356086	5	24	0 (0 %)
N	d		1.1130	0.60	0.95	0.6101	0.30	3.00	0 (0 %)
N	Expansão livre - (%)		50.791		10.7	2.031	2.9	370.0	19 (63 %)
N	i(%)		25.23	18	22	0.49	4	52	0 (0 %)
N	Indice de plasticidade (%)		40.462	42	36.6	0.620296	15	160	0 (0 %)
N	Indice de vazios (e)		0.931465	0.526	0.8575	0.291843	0.526	1.572	0 (0 %)
N	Limite de liquidez (%)		69.1163	37.00	65.20	0.4726	37.00	218.00	0 (0 %)
N	Limite de plasticidade (%)		28.5543	15.6	27.29	0.332144	15.6	58	0 (0 %)
N	n		1.5093	1.30	1.40	0.2683	1.15	3.00	0 (0 %)
N	Pedregulho (%)		1.1687	0.00	0.00	3.1956	0.00	17.41	0 (0 %)
N	Peso específico real dos grãos (kN/m3)		27.0051	26.4	26.81	0.0342401	25.53	30.1305	0 (0 %)
N	R2 - Gitirana Jr. e Fredlund (2004)		0.957817	0.99	0.979971	0.0533129	0.79812	1	0 (0 %)
N	R2-Mohammadi e Vanclooster (2012)		0.843497	0.514315	0.870737	0.152482	0.514315	1	0 (0 %)

N	R2-Van Genuchten (1980)		0.946713	0.79588	0.965477	0.048983	0.79588	0.99548	0 (0 %)
N	Silte (%)		34.2603	2.00	31.50	0.4421	2.00	70.00	0 (0 %)
N	Tensão de expansão (kPa)		169.97		120	0.911399	0.00	591.673	15 (50 %)
C	Tipo de Cr			Unimodal		0.451			0 (0 %)
N	Índice expansivo (ASTM,2003)		43		43	0.30	30	56	28 (93 %)
N	α		0.079293	0.0200	0.0110	2.789830	0.0001	1.2000	0 (0 %)
N	θ_r		0.11855	0.091	0.105	0.739144	3.61236e-06	0.353051	0 (0 %)
N	θ_s		0.433897	0.240571	0.450357	0.197622	0.240571	0.602	0 (0 %)
N	ψ_b		314.311	6	13.28	3.14876	0.0413334	4000	0 (0 %)
N	ψ_{res}		71311	200	10401.7	2.54139	40	926634	0 (0 %)

