



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG**  
**CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS - CTRN**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL - UAEC**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

---

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**SOLOS EXPANSIVOS NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA**

**GILSON GABRIEL TEIXEIRA VARELA**

**CAMPINA GRANDE – PB**  
**2021**

**GILSON GABRIEL TEIXEIRA VARELA**

**SOLOS EXPANSIVOS NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à coordenação do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Dra. Carina Silvani

GILSON GABRIEL TEIXEIRA VARELA

## **Solos expansivos no Brasil: Uma revisão sistemática**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à coordenação do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Dra. Carina Silvani

Aprovando em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

Banca Examinadora

---

Orientadora

---

Examinador Interno

---

Examinador Externo

---

## AGRADECIMENTOS

À Deus, a quem muitas das vezes procurei forças, coragem, calma e sabedoria, para continuar firme perante os desafios que surgiram durante todos esses anos de graduação.

À minha família, que sempre se fez presente em todos os momentos da minha vida, em especial a minha mãe Maria de Lourdes Dias Teixeira Varela, que sempre lutou para garantir o melhor para os seus filhos, que sempre me incentiva a correr atrás dos meus sonhos, e que constantemente me lembra que com fé em Deus, e dedicação é possível contornar todo e qualquer obstáculo.

Aos meus Irmão Natalice Margareth Teixeira Varela, e Wilson Rafael Teixeira Varela, a quem sempre busquei apoio, compreensão, carinho e auxílio.

À minha namorada Gessyelle Catarine da Silva, que sempre me apoiou em todos os momentos, exalando energias positivas e depositando confiança.

À minha orientadora, professora Dra. Carina Silvani, por todo o apoio, suporte, pois graça a sua atenção e disponibilidade, foi possível concluir o TCC nesse período de tempo.

À UFCG e a todos os professores que fizeram parte do meu percurso acadêmico, e aos funcionários da UAEC que sempre dispuseram, sem medir esforços, a nos ajudar.

Ao programa PEC-G, pela oportunidade de graduação fora do País de origem.

Aos meus colegas de curso pela parceria e companheirismo estabelecido nessa jornada acadêmica. E aos meus amigos, que estiveram presentes em diversos momentos felizes e marcantes, que contribuíram para que o percurso acadêmico se torne mais leve.

## RESUMO

Solos expansivos são solos problemáticos que representam um desafio para obras de infraestruturas na construção civil. Em estações secas esses solos podem apresentar fissuras e fendas, devido a sua contração. Já nas estações mais úmidas ao absorver água eles expandem, podendo desestabilizar fundações e até elevar estruturas. Essa expansão se dá por meio de dois mecanismos, os mecânicos e físico-químicos. A combinação desses mecanismos interfere na mudança de volume dos solos expansivos. Normalmente esses tipos de solo são encontrados em zonas áridas e semiáridas, que favorecem a formação de argilominerais instáveis responsável pelo seu caráter expansivo. O Brasil por ter uma região vasta de clima semiárido, territórios com presença de solos expansivos são diversos, no entanto pouco se sabe sobre isso. Com o intuito de rastrear os solos expansivos estudados no Brasil, responder algumas questões específicas de forma objetiva e imparcial e auxiliar na orientação para investigações futura, foi feito uma revisão sistemática da literatura focado em solos expansivos no Brasil, associando um conjunto de estudos disponíveis no catálogo de Teses e Dissertações da CAPES. Com este estudo ficou claro que apesar da problemática dos solos expansivos ser pertinente, muito poucos são as pesquisas voltadas para tal problemática. A maioria das pesquisas se concentra em solos das regiões do estado de Pernambuco que compõe o semiárido brasileiro. Porém, entre as regiões que fazem parte do semiárido brasileiro, somente amostras de regiões do estado de Pernambuco foram usados como objeto de estudos. Além dos solos destes estados foram estudados amostra de solo de regiões como São Paulo, Santa Catarina, e Paraná, e Rio Grande do Sul. Não foi encontrado, para os solos estudados concordância entre os resultados dos métodos indiretos qualitativos e os métodos diretos quantitativos. Os solos expansivos apresentaram, em sua maioria, alto teor de grãos menores que 0,075 mm, foram classificados como altamente plásticos, porém com fração argila classificada como inativa. A expansão média, no ensaio de expansão livre foi de 11,7% e a pressão de expansão média foi de 162 kPa. Percebeu-se também uma variabilidade grande nos parâmetros usados pelos métodos para classificar os solos como expansivos.

**Palavras chaves:** Solos expansivos, argilas expansivas, pressão de expansão, revisão sistemática da literatura

## ABSTRACT

Expansive soils are problematic soils that represent a challenge for infrastructure works in civil construction. In dry seasons, these soils may show cracks, due to their contraction. In the more humid seasons, when they absorb water so they expand, which can destabilize foundations and even raise structures. This expansion takes place through two mechanisms, mechanical and physical-chemical. The combination of these mechanisms directly interferes with the change in volume of expansive soils. Usually, these types of soil are found in arid and semi-arid areas, which favor the formation of unstable clay minerals responsible for their expansive character. Brazil for having a vast region with a semi-arid climate, territories with the presence of expansive soils are diverse, however little is known about this. To track the expansive soils studied in Brazil, answer some specific questions objectively and impartially and guide future research, a systematic review of the literature focused on expansive soils in Brazil was done, associating a set of studies available in the CAPES Theses and Dissertations catalog. With this study it became clear that although the problem of expansive soils is pertinent, very few researchers are focused on this problem. Most research focuses on soils from Pernambuco, that make up the Brazilian semiarid region. However, among the regions that are part of the Brazilian semiarid region, only samples from regions in the state of Pernambuco were used as the object of studies. In addition to the soils of these states, soil samples from regions such as São Paulo, Santa Catarina, and Paraná, and Rio Grande do Sul were studied. No agreement was found for the studied soils between the results of qualitative indirect methods and direct quantitative methods. The expansive soils presented, in their majority, high content of grains smaller than 0,075 mm, were classified as highly plastic, however with clay fraction classified as inactive. The average expansion, in the free expansion test, was 11,7% and the average expansion pressure was 162 kPa. It was also noticed a great variability in the parameters used by the methods to classify the soils as expansive.

**Keywords:** expansive soils, expansive clays, expansion pressure, systematic literature review

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1: Curva de distribuição granulométrica do solo. ....	17
Figura 2. 2: Granulometrias de areias bem graduada e mal graduada.....	18
Figura 2. 3: Curva granulométrica de areia com diferentes coeficientes de curvatura .....	19
Figura 2. 4: Esquema dos estados de consistência, e suas fronteiras. ....	20
Figura 2. 5: Carta de Plasticidade.....	23
Figura 2. 6: Esquema para a classificação pelo Sistema Unificado .....	24
Figura 2. 7: Classificação dos solos finos no Transportation Research Board.....	25
Figura 2. 8: Esquema para a classificação pelo Transportation Research Board .....	26
Figura 2. 9: Unidade e folha tetraédrica .....	28
Figura 2. 10: Unidade e folha octaédrica.....	28
Figura 2. 11: Representação dos principais argilominerais .....	28
Figura 2. 12: Representação da estrutura da montmorilonita (2:1) com penetração da água...	29
Figura 2. 13: Absorção de água por argilominerais: a) adsorção intercrystalina de água num argilomineral do tipo 2:1 pouco expansivo (ilita); b) absorção intracrystalina de água num argilomineral do tipo 2:1 expansivo (motmorilonita). ....	31
Figura 2. 14: Classificação da expansibilidade de materiais argilosos por Williams & Donaldson (1980). ....	39
Figura 2. 15: Fases da Revisão Sistemática proposta por Levy e Ellis .....	47
Figura 2. 16: Processo sistemático para revisão bibliográfica.....	48
Figura 2. 17: Processo geral para revisão bibliográfica.....	49
Figura 2. 18: Representação da etapa de Processamento .....	50
Figura 2. 19: Representação do método SystematicSearchFlow.....	52
Figura 4. 1: Número de publicações ao longo dos anos .....	59
Figura 4. 2: Percentual de trabalhos publicados por estado .....	60
Figura 4. 3: Quantidade de trabalhos sobre solos expansivos supervisionado por cada professor orientador no estado de Pernambuco .....	61
Figura 4. 4: Percentual de estudos desenvolvido por localidade .....	62
Figura 4. 5: Métodos diretos quantitativos usados nas diferentes amostras estudadas .....	63
Figura 4. 6: Métodos indiretos qualitativos usados nas diferentes amostras estudadas .....	64
Figura 4. 7: Resultado da correspondência entre o método direto quantitativo baseado no critério de Seed (1962) e o método indireto qualitativo baseado no critério de Skempton (1953). ....	65

Figura 4. 8: Ensaio de caracterização física usados nas diferentes amostras estudadas .....	66
Figura 4. 9: Percentual de Argila, Areia e Silte presente nas amostras de cada trabalho desenvolvido.....	67
Figura 4. 10: Percentual de partícula menor que 0,075 mm presente nas amostras de cada trabalho desenvolvido.....	69
Figura 4. 11: Disposição em percentagem das amostras em função do Limite de Liquidez....	71
Figura 4. 12: (a) Disposição das amostras em função do Índice de plasticidade; (b) Classificação das amostras em função do Índice de plasticidade.....	72
Figura 4. 13: (a) Disposição das amostras em função do Índice de atividade; (b) Classificação das amostras em função do Índice de atividade .....	73
Figura 4. 14: (a) Classificação das amostras segundo SUCS; (b) Classificação das amostras segundo TRB .....	74
Figura 4. 15: Ensaio de caracterização química usados nas diferentes amostras estudadas ...	75
Figura 4. 16: Ensaio de caracterização mineralógica usados nas diferentes amostras estudadas.....	75
Figura 4. 17: Percentual de argilominerais presentes nas amostras de solo estudados .....	76
Figura 4. 18: Ensaio de caracterização da microestrutura usados nas diferentes amostras estudadas.....	77
Figura 4. 19: Ensaio de caracterização mecânica usados nas diferentes amostras estudadas.	78
Figura 4. 20: Percentual de expansão livre de cada amostra estudado.....	79
Figura 4. 21: Métodos de determinação da tensão de expansão.....	80
Figura 4. 22: Tensão de expansão das amostras estudadas .....	81
Figura 4. 23: Limites de liquidez obtido em cada trabalho desenvolvido usando a amostra do solo de Paulista/PE .....	82
Figura 4. 24: Índice de plasticidade obtido em cada trabalho desenvolvido usando a amostra do solo de Paulista/PE .....	82
Figura 4. 25: Índice de atividade obtido em cada trabalho desenvolvido usando a amostra do solo de Paulista/PE .....	83
Figura 4. 26: Percentual de expansão livre das amostras de solo de Paulista/PE.....	84
Figura 4. 27: Tensão de expansão das amostras de solo de Paulista/PE .....	84



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1: Classificação granulométrica das frações dos solos pela ABNT .....	17
Tabela 2. 2: Terminologia do utilizada pelo Sistema Unificado. ....	22
Tabela 2. 3: Métodos de Identificação de Solos Expansivos. ....	35
Tabela 2. 4: Critérios de USBR – HOLTZ (1953) .....	37
Tabela 2. 5: Critérios de Cuellar (1978).....	37
Tabela 2. 6: Métodos de identificação de solos expansivos de Chen (1975).....	38
Tabela 2. 7: Métodos de identificação de solos expansivos de Holtz Geibbs (1956) .....	38
Tabela 2. 8: Métodos de identificação de solos expansivos por Daksanamurthy e Raman (1973) .....	39
Tabela 2. 9: Critérios de Lambe (1960).....	41
Tabela 2. 10: Potencial de expansão em função do índice de expansão .....	41
Tabela 2. 11: Critérios de Seed et al. (1962). ....	42
Tabela 2. 12: Grau de expansividade Cuellar (1978). ....	42
Tabela 2. 13: Grau de expansividade pelos critérios de Chen (1965). ....	43
Tabela 2. 14: Métodos de identificação de solos expansivos por Vijayvergiya e Ghazzaly (1973) .....	43
Tabela 2. 15: Métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos pela WES ....	43
Tabela 2. 16: Grau de expansividade pelos critérios de Rodriguez e Ortiz (1975). ....	44
Tabela 2. 17: Possíveis danos pelos critérios Jimenez (1980). ....	44

## LISTA DE NOTAÇÕES, ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABMS – Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

*ASTM – American Society for Testing and Material*

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CC – Coeficiente de curvatura

CNU – Coeficiente de não uniformidade

CTC – Capacidade de troca de cátions

D<sub>60</sub> – Diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas

D<sub>10</sub> – Diâmetro abaixo do qual se situam 10% em peso das partículas

D<sub>30</sub> – Diâmetro abaixo do qual se situam 30% em peso das partículas

DRX – Difração de raio-x

FRX – Florescência de raio-x

h – Umidade

IA – Índice de atividade

IC – Índice da consistência

IP – Índice de plasticidade

LC – Limite de consistência

LL – Limite de liquides

LP – Limite de plasticidade

MEV – Microscopia eletrônica de varredura.

NBR – Norma Brasileira

RBS – Revisão Bibliográfica Sistemática

*SSF – Systematic Search Flow*

SUCS – Sistema Unificado de Classificação do Solo

*TBR – Transportation Research Board*

TCC – Trabalho de conclusão de curso

*UCS – Unified Classification System*

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Considerações iniciais .....	13
1.2	Justificativa e importância do tema .....	14
1.3	Objetivos .....	14
1.3.1	Objetivo Geral .....	15
1.3.2	Objetivos específicos .....	15
1.4	Estrutura do trabalho .....	15
2.	REFERENCIAL TEÓRICO .....	16
2.1	Solo .....	16
2.1.1	Granulometria dos solos .....	16
2.1.2	Plasticidade e consistência dos solos .....	20
2.1.3	Classificação do Solo .....	21
2.2	Solo expansivo .....	26
2.2.1	Estrutura dos argilominerais .....	27
2.2.2	Mecanismo de expansão .....	30
2.2.3	Fatores que influenciam na expansão .....	32
2.2.4	Método de identificação de solos expansivos .....	34
2.2.4.1	Métodos Indiretos .....	35
2.2.4.2	Métodos Diretos .....	40
2.3	Revisão sistemática .....	44
2.3.1	Relevância da revisão sistemática .....	45
2.3.2	Critério essencial para uma revisão sistemática .....	46
2.3.3	Modelos para revisão da literatura .....	46
2.3.3.1	Modelo I: Levy e Ellis (2006) .....	46
2.3.3.2	Modelo II: Biolchini et al. (2007) .....	48
2.3.3.3	Modelo III: Conforto, Amaral e Silva (2011) - RBS Roadmap .....	49
2.3.3.4	Modelo IV: Ferenhof e Fernandes (2016) – Método SystematicSearchFlow (SSF) .....	51
3.	MATERIAS E METODOS .....	55
3.1	Fase 1 – Definição do protocolo de pesquisa .....	55
3.1.1	Atividade 1 – Definir a estratégia de busca .....	55
3.1.2	Atividade 2 – Consultar base de dados .....	55
3.1.3	Atividade 3 – Organizar o portfólio bibliográfico .....	56
3.1.4	Atividade 4 – Padronizar a seleção dos artigos .....	56
3.1.5	Atividade 5 – Compor o portfólio de artigos .....	57
3.2	Fase 2 – Análise .....	57
3.3	Fase 3 – Síntese .....	58
3.4	Fase 4 – Escrever .....	58
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	59
4.1	Publicações ao longo dos Tempos .....	59
4.2	Publicação por Estado em que foi realizada a pesquisa .....	60
4.3	Locais no Brasil que foram identificados com solos expansivos .....	61
4.4	Método de Identificação de solos expansivos .....	62
4.4.1	Métodos diretos – quantitativos .....	62
4.4.2	Métodos indiretos – qualitativos .....	63
4.4.3	Comparativo do método direto e indireto mais usado pelos autores .....	64
4.5	Ensaio utilizado para avaliação dos solos expansivos .....	65
4.5.1	Caracterização física .....	65

4.5.1.1	Granulometria dos solos expansivos .....	66
4.5.1.2	Plasticidade e consistência dos solos expansivos .....	70
4.5.1.3	Classificação dos solos Segundo SUCS e TRB .....	74
4.5.2	Caracterização química .....	74
4.5.3	Caracterização mineralógica .....	75
4.5.3.1	Argilominerais presente nos solos expansivos .....	76
4.5.4	Caracterização da microestrutura .....	77
4.5.5	Caracterização mecânica .....	77
4.5.5.1	Expansão Livre .....	78
4.5.5.2	Tensão de expansão .....	79
4.6	Análise dos resultados dos estudos do solo de Paulista/PE .....	81
4.6.1	Características físicas .....	82
4.6.2	Características mecânicas .....	83
5.	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

O solo e o elemento de base da grande maioria das obras de engenharia Civil. É nele que todos os esforços das estruturas são descarregados, sendo assim há uma preocupação na fase de construção em garantir estabilidade do solo, de modo que ele seja capaz de suportar a estrutura, sofrendo deslocamentos mínimos.

A mecânica dos solos clássica vem ao longo dos tempos desenvolvendo princípios para o melhor descrever o comportamento dos solos. Porém esses princípios foram inicialmente estabelecidos com base no comportamento de solos saturados. De acordo com Carvalho, et al. (2015), existem solos em condição não saturada que apresenta comportamento mecânico e propriedades físico-químicas deferente do convencional. As condições de formação e evolução desses solos ao longo do tempo mostram que é preciso um conceito diferente do utilizado na Mecânica dos Solos Clássica. Segundo a Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS, 2004), nas últimas décadas tem sido aplicado esforços no sentido de compreender o comportamento de solos não saturados, com o intuito de melhorar e aperfeiçoar projetos e construções.

De entre os solos não saturados, existem aqueles que são classificados como solos expansivos. Esses solos apresentam variações volumétricas excessivas como o aumento da umidade, e retrações drástica na perda dela. Os solos expansivos originam-se da decomposição de rochas ígneas básicas, basaltos, diabásios, que permitam o surgimento de argilominerais de estrutura laminar 2:1. Rochas sedimentares e metamórficas, também, são capazes de promover o surgimento de solos expansivos, por meio do intemperismo (TENÓRIO, 2018). Tenório (2018) continua destacando que, os solos expansivos apresentam variação volumétrica, que pode chegar a valores superiores a 30%, quando variado o teor de água. Devido a este fato, nas estações secas ele contrai chegando até a provocar fissuras e fendas nos solos e infraestruturas, e nas estações mais úmidas ele expande aumentando de volume a ponto de desestabilizar as fundações, podendo até elevar a estrutura. Por esses motivos tem sido evitado executar obras em terrenos desse tipo. Porém devido ao crescimento populacional, se tornou necessário a expansão territorial, e isso levou a ocupação de regiões problemáticas, sobretudo no ponto de vista geotécnico.

As regiões de solo expansivo constituem um desafio para a engenharia, uma vez que ela ocasiona problemas sérios na segurança da obra. Ele pode comprometer obra a ponto de provocar desabamento de edifícios e tuneis, rachaduras nas estradas e canais, e entre outros problemas. Segundo Morais (2017) essa expansividade está associada a dois requisitos: o extrínseco (climatologia, hidrogeologia, vegetação e ocupação antrópica) e o intrínseco (composição mineralógica, textura e estrutura do solo).

A tomada de medidas com a finalidade de diminuir ou, até mesmo, anular os efeitos da expansividade de um solo, é de grande importância na execução de um projeto, evitando assim, grandes transtornos, ou ações indesejadas emergenciais devido às tensões de expansão (PAIVA, 2016).

## **1.2 Justificativa e importância do tema**

Mas antes de se tomar qualquer medida, se faz necessário o reconhecimento da presença de solos expansivos em determinadas regiões. A existência de solos instáveis, sem o devido conhecimento, pode causar desde pequenos problemas estruturais, até pôr em risco a vida humana (MORAIS, 2017).

Solos com comportamento expansivos já vem sendo identificados em toda parte do mundo. Elas aparecem com mais frequência em zona áridas e semiáridas, pois a variação de umidade é grande, e a evaporação excede a precipitação pluviométrica.

A revisão sistemática sobre esse assunto possibilita conectar informações de várias fontes científicas e elaborar um mapeamento de locais com ocorrência de solos expansivos no Brasil. O resultado dessa revisão pode ser usado como indicativo da existência de solos expansivos e suas particularidades. Dessa forma se torna mais fácil efetuar intervenções necessárias para garantir uma execução adequada de uma determinada obra nas regiões de ocorrência desses solos.

## **1.3 Objetivos**

Neste item serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

### 1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como enfoque realizar uma revisão sistemática da literatura sobre solos expansivos no Brasil através das publicações disponíveis no banco de Teses e Dissertações da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Levantar a localização dos solos expansivos já estudados no Brasil.
- Avaliar os métodos diretos e indiretos de avaliação de expansividade dos solos mais usados pelos pesquisadores brasileiros e a relação entre eles.
- Avaliar os índices físicos e a granulometria dos solos expansivos estudados no Brasil.

### 1.4 Estrutura do trabalho

A estrutura desse trabalho está dividida em cinco itens principais:

- **Introdução:** é retratado de forma breve o conceito de solo em geral, solo expansivos, o desafio que ele representa para a engenharia, e a necessidade do reconhecimento da sua presença em determinadas regiões. Também são apresentados as justificativas e os objetivos do trabalho.
- **Referencial teórico:** é exibido de forma mais detalhada, as noções básicas sobre o solo em geral, conceitos como índices de consistência dos solos, granulometria dos solos, e classificação TRB e UCS, pois são necessários para o melhor entendimento do trabalho. É abordado o conceito de solo expansivo, a sua mineralogia, os fatores e situações que influenciam a sua expansão, e os métodos usados na identificação de solos expansivos. Para finalizar este tópico é retratado o conceito de método de revisões sistemáticas da literatura ou simplesmente revisão sistemática, e os seus diferentes modelos desenvolvidos por autores ao longo dos tempos.
- **Materiais e métodos:** é descrito de forma clara os procedimentos seguidos para a coleta, organização e, análise dos arquivos que foram utilizados como referência para a execução da revisão.
- **Resultados e discussão:** é exposto os resultados da revisão sistemática. Nesse tópico consta os dados obtidos, e os resultados da análise.
- **Conclusão:** expõe as conclusões e as considerações do estudo desenvolvido.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Solo**

A palavra solo é originada do latim *solum*, que significa "superfície do chão". Os engenheiros civis definem os solos como um aglomerado de partículas provenientes da decomposição das rochas, que podem ser escavados facilmente sem emprego de explosivos, e que são utilizados como material de construção ou de suporte para estruturas (SOUSA, 2015).

Do ponto de vista de Santos, et al (2018), o solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta. Contêm matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem, e eventualmente, terem sido modificados por interferências antrópicas.

Ainda, de acordo como Caputo (1988), o solo é composto por materiais que resultam do intemperismo das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. Quando a decomposição se dá por desintegração mecânica, através de agentes como água, temperatura, vegetação e vento, formam-se os pedregulhos e areias (solos de partículas grossas) e até mesmo os siltes (partículas intermediárias), e, somente em condições especiais, as argilas (partículas finas). Por decomposição química entende-se o processo em que há modificação química ou mineralógica das rochas de origem. O principal agente é a água e os mais importantes mecanismos de ataque são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação. As argilas representam o último produto do processo de decomposição.

#### **2.1.1 Granulometria dos solos**

Dependendo do processo de decomposição resultam solos das mais variadas granulometrias. Segundo Pinto (2006), a principal característica que diferencia os solos é o tamanho dos grãos que os compõem. Alguns deles como pedregulhos ou areia possuem grão visíveis ao olho nu, enquanto outros têm grãos tão finos que não se pode visualizar as partículas individualmente. Nesse sentido a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 7181/2016 padronizou a seguinte Escala Granulométrica:



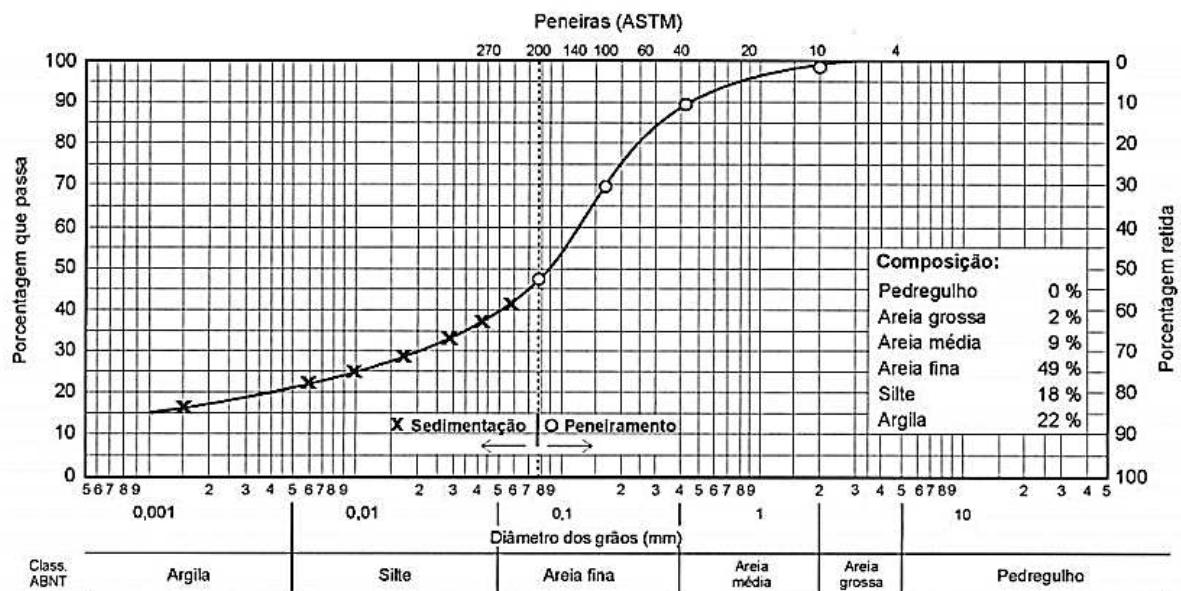
Tabela 2. 1: Classificação granulométrica das frações dos solos pela ABNT

Fração	Limites definidos pela ABNT
Matacão	De 25 cm a 1 m
Pedra	De 7,6 cm a 25 cm
Pedregulho	De 4,8 mm a 7,6 cm
Areia grossa	De 2 mm a 4,8 mm
Areia média	De 0,42 mm a 2 mm
Areia fina	De 0,05 mm a 0,42 mm
Silte	De 0,005 mm a 0,05 mm
Argila	Inferior a 0,005 mm

Fonte: Pinto (2006).

Para determinar a distribuição granulométrica de um solo se faz necessário realizar ensaios laboratoriais como o ensaio de granulometria regida pela ABNT – NBR 7181/2016. A distribuição granulométrica é representada pela curva que indica para cada tamanho de partícula, a percentagem em peso do solo que possui diâmetros maiores ou menores que esta partícula. A classificação granulométrica é realizada por meio dessa curva de distribuição granulométrica, pois permite distinguir diferentes diâmetros das partículas, definindo aquelas que predominam em cada tipo de material. Na Figura 2.1 temos o exemplo de uma Curva de distribuição granulométrica do solo.

Figura 2. 1: Curva de distribuição granulométrica do solo.



Fonte: Pinto (2006)

A partir da Curva granulométrica do solo é possível classificar o solo usando parâmetros como o coeficiente de não uniformidade (CNU), e o coeficiente de curvatura (CC).

**Coefficiente de não uniformidade (CNU)** – com esse coeficiente é determinado se o solo é bem graduado ou não. Segundo Souza (2015), esse coeficiente é usado apenas para solos granulares. A expressão “bem graduado” se refere ao fato de que a existência de grãos com diversos diâmetros confere ao solo, em geral, melhor comportamento sob o ponto de vista da engenharia, uma vez que garante um melhor empacotamento dos grãos. Quanto maior for o CNU, mais bem graduada é o solo. Solos com CNU menores que 2 são chamados de solos uniformes (PINTO, 2006).

A relação usada para expressar essa característica é dado pela Equação (1).

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

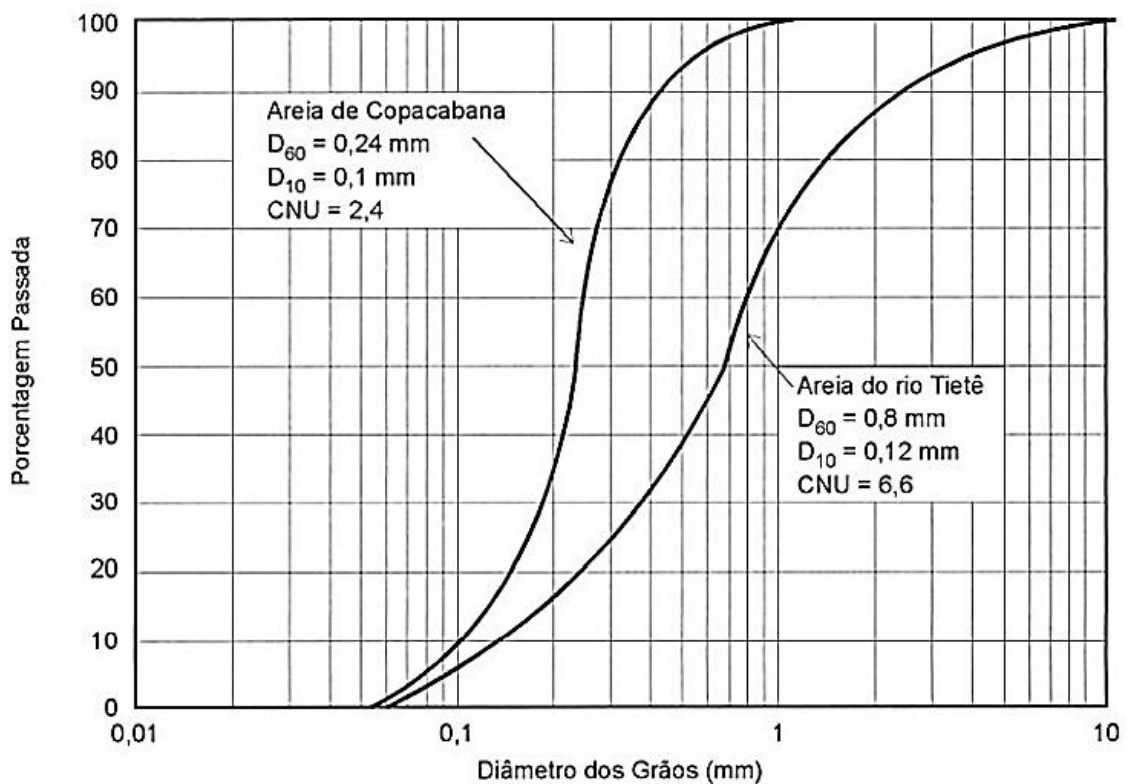
Onde:

$D_{60}$  – diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas;

$D_{10}$  – diâmetro abaixo do qual se situam 10% em peso das partículas.

Na Figura 2.2 temos a curva que representa duas areias, uma bem graduada (areia do rio Tietê) e uma mal graduada (areia de Copacabana).

Figura 2. 2: Granulometrias de areias bem graduada e mal graduada



Fonte: Pinto (2006)

**Coefficiente de curvatura (CC)** – esse coeficiente detecta o formato da curva granulométrica e permite identificar eventuais descontinuidade ou concentração muito elevada de grãos mais grossos no conjunto (PINTO, 2006).

A relação que expressa essa característica é dada pela Equação (2).

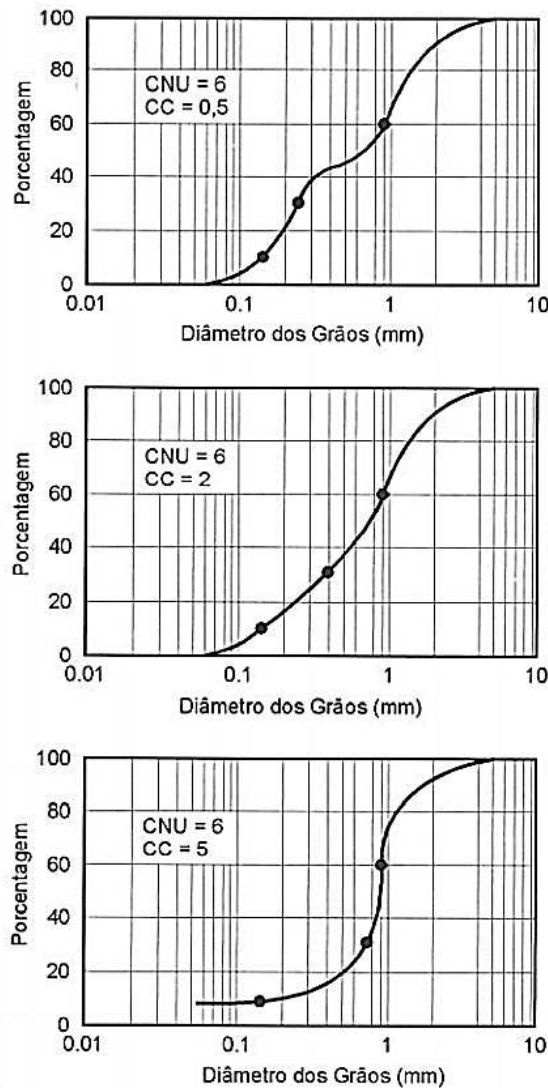
$$CC = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2)$$

Onde:

$D_{30}$  – diâmetro abaixo do qual se situam 30% em peso das partículas.

Na Figura 2.3 estão representados curvas de três areias com  $CNU = 6$  e com diferentes  $CC$ .

Figura 2. 3: Curva granulométrica de areia com diferentes coeficientes de curvatura



Fonte: Pinto (2006)

É considerado que o material é bem graduado quando o CC estiver entre 1 e 3. Quando o CC é menor que 1 a curva tende a ser descontínua, quando é maior que 3 tende a ser muito uniforme na parte central da curva (SOUZA, 2015).

### 2.1.2 Plasticidade e consistência dos solos

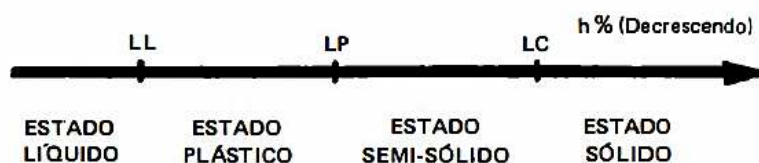
Caputo (1988) relata que ao decorrer dos tempos foi notado que, para os solos cuja textura apresenta uma certa porcentagem de fração fina, só a granulometria não é o suficiente para caracterizá-los, pois esses tipos de solo apresentam propriedades plásticas que variam com o teor de umidade, da forma das partículas e da sua composição química e mineralógica.

Do ponto de vista de Pinto (2006), a quantidade de água ou teor de umidade nos vazios do solo fino influencia no seu comportamento na engenharia, uma vez que dependendo do teor de umidade o solo pode apresentar num estado sólido, num estado plástico, ou até mesmo num estado líquido. Desta forma para caracterizar esses tipos de solo foram criados os Limites de consistência (Limites de Atterberg) e o índice de atividade.

**Limites de consistência (Limites de Atterberg)** – são a nomenclatura dada aos teores de umidade limites entre os estados de consistência. De entre os limites de consistência temos o limite de contração (LC), o limite de plasticidade (LP) e o limite de liquidez (LL).

Quando a umidade de um solo é muito elevada, ele se apresenta como um fluido denso e se diz no estado líquido. À medida que evapora a água, ele se endurece e, para um certo teor de umidade ( $h$ ) = LL (limite de liquidez), perde sua capacidade de fluir, porém pode ser moldado facilmente e conservar sua forma. O solo nesse estado é considerado plástico. Com a contínua perda de umidade, o estado plástico desaparece até que, para  $h$  = LP (limite de plasticidade), o solo se desmancha ao ser trabalhado. Nesse ponto o solo se encontra no estado semissólido. Continuando a secagem, ocorre a passagem gradual para o estado sólido. O limite entre os dois estados é um teor de umidade  $h$  = LC (limite de contração) (CAPUTO, 1988). Na Figura 2.4 temos esquematizado os limites de consistência do solo.

Figura 2. 4: Esquema dos estados de consistência, e suas fronteiras.



Fonte: Caputo (1988)

**Índice de plasticidade (IP)** – como o próprio nome já diz, possibilita a determinação da plasticidade do solo. Resulta da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade do solo (CAPUTO, 1988).

De acordo com Caputo (1988) para:

- $1 < IP < 7$  – solo fracamente plástico;
- $7 < IP < 15$  – solo medianamente plástico;
- $IP > 15$  – solo altamente plástico.

**Índice de consistência (IC)** – de acordo com Caputo (1988), possibilita determinar a porção de umidade da amostra do solo. Ela pode ser calculada por meio da Equação (3).

$$IC = \frac{LL+h}{IP} \quad (3)$$

Caputo (1988) destaca que para:

- $IC < 0$  – argilas muito moles (vasa);
- $0 < IC < 0,5$  – argilas moles
- $0,5 < IC < 0,75$  – argilas médias;
- $0,75 < IC < 1$  – argilas rijas;
- $IC > 1$  – argilas duras.

**Índice de atividade (IA)** – segundo Caputo (1988) é a propriedade através da qual, uma dada fração argilosa presente no solo, transmite ao mesmo, em maior ou menor grau, um determinado comportamento argiloso. Engloba as atividades físicas e químicas decorrentes da carga elétrica negativa cuja intensidade depende principalmente da característica do argilomineral considerado. Esse índice é calculado pela Equação (4).

$$IA = \frac{IP}{\text{fração de argilas (menor que 0,02 mm)}} \quad (4)$$

De acordo com Pinto (2001), para:

- $IA < 0,75$  – argila inativa;
- $0,75 < IA < 1,25$  – argila normal
- $IA > 1,25$  – argila ativa.

### 2.1.3 Classificação do Solo

A diversidade e a diferença de comportamento dos solos levaram ao seu agrupamento, porém este muitas vezes não é possível. A partir dessa tendência surgiram os sistemas de

classificação dos solos. É praticamente impossível estabelecer um único critério para a classificação devido à sua heterogeneidade e a grande variedade de suas aplicações. Os vários sistemas existentes para a classificação de solos procuram posicionar cada solo dentro de um grupo, para o qual determinadas propriedades específicas já estão definidas (SOUZA, 2015). De Entre esses sistemas de classificação temos:

- *USC – Unified Classification System* (Sistema Unificado de Classificação);
- *TRB – Transportation Research Board*

***USC – Unified Classification System (SUCS) – Sistema Unificado de Classificação do Solo)***

Segundo Souza (2015), nesse sistema de classificação todos os solos são identificados pelo conjunto de duas letras, onde a primeira representa o tipo principal do solo e a segunda a dados complementares dos solos. A Tabela 2.2 apresenta a terminologia utilizada no UCS.

Tabela 2. 2: Terminologia do utilizada pelo Sistema Unificado.

G	Pedregulho	Principais tipos
S	Areia	
M	Silte	
C	Argila	
O	Orgânico	
W	Bem graduado	Dados complementares
P	Mal graduado	
H	Alta compressibilidade	
L	Baixa compressibilidade	
Pt	Turfa	

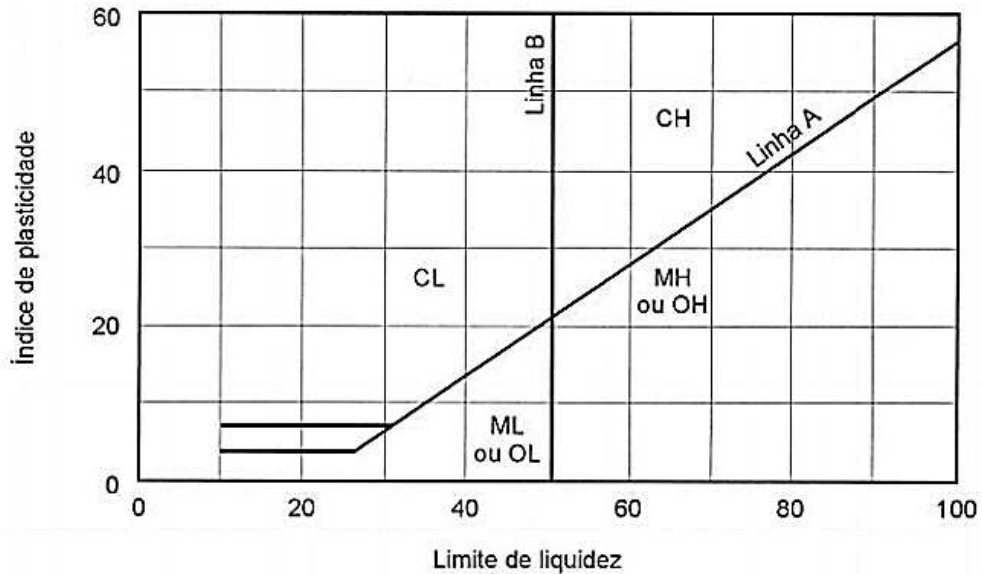
Fonte: Adaptada de Souza (2015)

O tipo principal é definido pelo percentual da fração granulométrica predominante presente. Se o percentual de finos for inferior que 50, o solo será considerado como solo de granulação grosseira, G (Pedregulho) ou S (Areia). Se o percentual de finos for superior a 50, o solo será considerado de granulação fina, M (Silte), C (Argila) ou O (Orgânico) (PINTO, 2006).

Os dados complementares são definidos com base em parâmetros específicos. Para solos granulares são levados em consideração dos fatores como, o coeficiente de não uniformidade (CNU), e o coeficiente de curvatura (CC). Para solos finos são levados em consideração dos fatores como, os limites de consistência, e o índice de plasticidade (IP).

Na Figura 2.5 temos a carta de plasticidade, que apresenta uma relação do índice de plasticidade e do limite de liquidez.

Figura 2. 5: Carta de Plasticidade

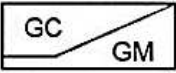

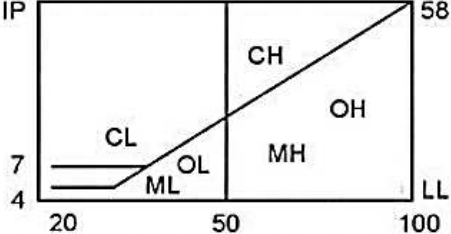


Fonte: Pinto (2006)

Segundo Pinto (2006), para a classificação desses solos finos, basta localizar o ponto correspondente ao par de valores IP e LL na Carta de Plasticidade.

A compressibilidade é uma característica complementar dos solos finos. À medida que aumenta o LL, a compressibilidade do solo também aumenta. Dessa forma o SUCS classifica o solo secundariamente como de alta compressibilidade (H) ou de baixa compressibilidade (L) (PINTO, 2006). Na Figura 2.6 temos ilustrado de forma resumida o esquema para a classificação pelo Sistema Unificado.

Figura 2. 6: Esquema para a classificação pelo Sistema Unificado

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3
		% P #200 > 12	GC GM 
	5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
	S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3
% P #200 > 12		SC SM 	
5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.		
% P #200 > 50	C	CL	
		CH	
	M	ML	
		MH	
	O	OL	
		OH	

Fonte: Pinto (2006)

### ***TRB – Transportation Research Board***

De acordo com Nunes (2010), esse sistema original foi desenvolvido pelos Estados Unidos na década de 20, baseado em trabalhos de TERZAGHI e HOGENTOGLER. Foi publicado pelo *US Public Roads Administration* (atual *AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials*) em 1942. Posteriormente em 1945, foi adotada com alterações, pelo *US Highway Research Board*, que hoje é o *TRB – Transportation Research Board*.

Esse sistema assim como o Sistema Unificado é baseado nos limites de Atterberg. Existem três pontos em que o sistema de classificação se difere da classificação unificada. O primeiro ponto é que o TRB considera a diferença entre solos granulares e finos a partir de 35% passante na peneira nº 200, o segundo é que considera os percentuais passantes das peneiras número 10 e número 40, e o terceiro e último ponto é que não oferece parâmetros qualitativos de graduação e compressibilidade (SOUZA, 2015).

Segundo Pinto (2006) nesse sistema também se inicia a classificação pela constatação da percentagem de material passante na peneira nº 200. Só que são considerados solos de granulação grosseira os que apresentam menos de a 35% passando nesta peneira, diferente da



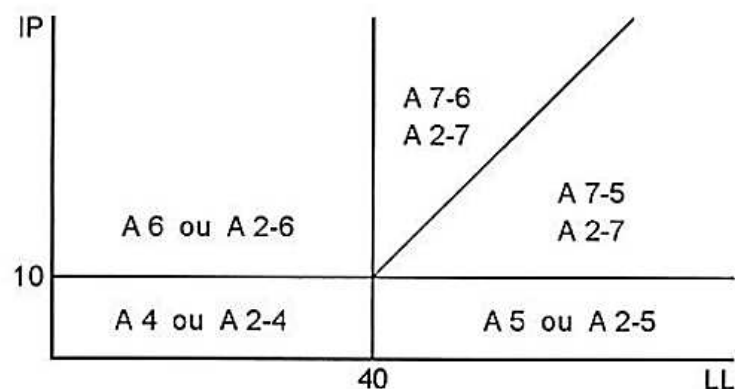
Classificação Unificada que considera menos de 50%. Da mesma forma são considerados solos de granulação fina os que apresentam mais de a 35% passando na peneira nº 200.

Os solos grossos assim como mostrado na são divididos em grupos, onde:

- A-1a – solos grossos, com menos de 50% passado na peneira nº 10, menos de 30% passando na peneira nº 40, e menos de 15% passando na peneira nº 200.
- A-1b – solos grossos, com menos de 50% passado na peneira nº 10, menos de 50% passando na peneira nº 40, e menos de 25% passando na peneira nº 200.
- A-3 – areias finas, com menos de 50% passado na peneira nº 10, mais de 50% passando na peneira nº 40, e menos de 10% passando na peneira nº 200.
- A-2 – são areias em que os finos presentes constituem a característica secundária. São subdivididas em A-2-4, A -2-5, A-2-6, e A-2-7, em função do índice de consistência, conforme mostrados na Figura 2.7.

Os solos finos assim como no SUCS, são subdivididos em função dos índices, de acordo com a figura 2.7. Um solo A-4 se refere de um solo A-2-4 pelo percentual de finos.

Figura 2. 7: Classificação dos solos finos no *Transportation Research Board*



Fonte: Pinto (2006)

Na Figura 2.8 é ilustrado a divisão dos solos em grupos e subgrupos, conforme a *Transportation Research Board*.

Figura 2. 8: Esquema para a classificação pelo *Transportation Research Board*

		% P #10 2,0 mm	% P #40 0,42 mm	% P #200 0,075 mm	IP
% P #200 < 35	A-1a	< 50	< 30	< 15	< 6
	A-1b		< 50	< 25	< 6
	A-3		> 50	< 10	NP
	A-2				
% P #200 > 35	A-4				

Fonte: Pinto (2006)

## 2.2 Solo expansivo

De entre os vários tipos de solos existentes, temos os solos expansivos que são solos cujo volume aumentam quando se encontram na presença de umidade, e contraem quando o teor de umidade reduz (MARINHO, 2018).

Segundo Marinho (2018), solos expansivos são solos não saturados que possuem argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1 principalmente do grupo esmectitas (em especial as montmorilonitas e vermiculitas). Esses solos normalmente são encontrados em zonas áridas e semiáridas pois esses ambientes onde há pouca presença de umidade no solo são propícias para formação de argilominerais instáveis responsável pelo caráter expansivo no solo.

De acordo com Moraes (2017), já foram identificados solos expansivos em todos os continentes do mundo como as Américas (Canadá, EUA, México, Argentina, Venezuela, etc),

África (Marrocos, África do Sul, Gana, etc), Europa (Espanha, França, Turquia, etc), Ásia (China, Índia, etc) e Oceania (Austrália). No Brasil, várias regiões possuem ocorrências: no centro sul, nos estados do Paraná, São Paulo e Santa Catarina; no Nordeste, no norte da Bahia passando por Pernambuco até atingir o Ceará (MORAIS, 2017).

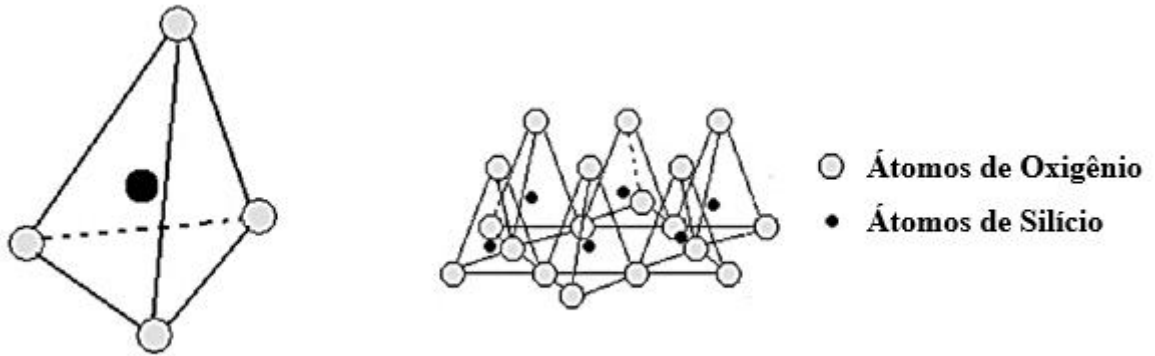
Marinho (2018), destaca 5 principais pontos que caracterizam um solo expansivo:

- Solos não saturados;
- Solos com minerais argílicos, em especial montmorilonita ou vermiculita;
- Contrações e expansões com aparecimento de superfícies de fricção;
- Solos com drenagem baixa e atividade alta, derivados de rochas ígneas, basicamente, basalto, diabásios e gabros e de rochas sedimentares basicamente: folhelhos, margas e calcários;
- Solos em regiões onde a evapotranspiração excede a precipitação, regiões semiáridas de clima tropical e temperado.

### **2.2.1 Estrutura dos argilominerais**

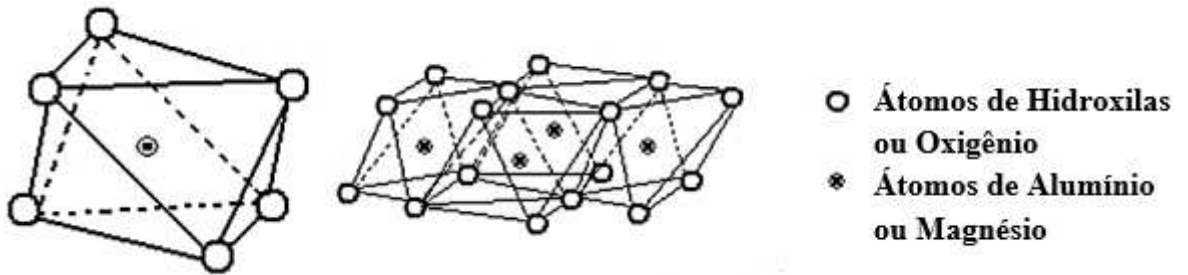
Apesar dos solos expansivos apresentarem argilominerais, nem todos os argilominerais são responsáveis pelo fenômeno de expansão. Os responsáveis pela expansão são aqueles que apresentam estrutura laminar do tipo 2:1 do grupo das vermiculitas e esmectitas, em especial as montmorilonitas. Também se verifica tal fenômeno nos interstratificados de montmorilonita com clorita, illita e vermiculita (CONSTANTINO, 2018). Esses argilominerais apresentam estrutura bastante complexa, tendo comportamento diferente na presença da água. Apresentam uma estrutura laminar composto por duas folhas tetraédricas ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) (Figura 2.9) e um folha central octaédricas ( $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ ) ou ( $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ ) (Figura 2.10). Nas Figuras 2.9 e 2.10 temos a unidade estrutural tetraédrica de silício e oxigênio e a unidade estrutural octaédrica de alumínio e íons hidroxilas respectivamente.

Figura 2. 9: Unidade e folha tetraédrica



Fonte: Adaptado de Paiva (2016)

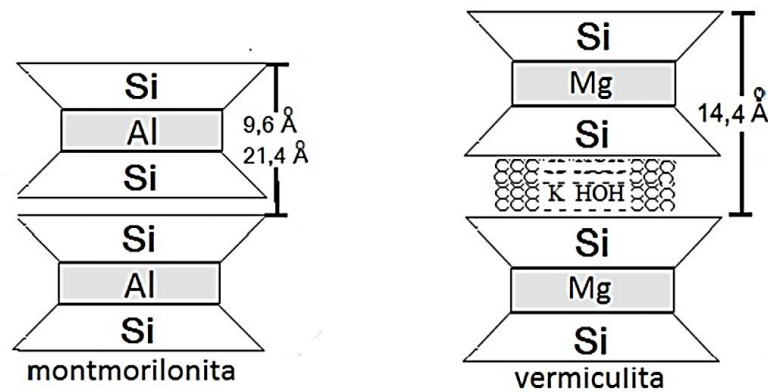
Figura 2. 10: Unidade e folha octaédrica



Fonte: Adaptado de Paiva (2016)

O que determina o grupo dos minerais argílicos, é a sequência das folhas tetraédricas e octaédricas. Na Figura 2.11 temos a representação do grupo das principais argilas expansivas, o grupo esmectita (montmorilonita, e vermiculita) (MARINHO, 2018).

Figura 2. 11: Representação dos principais argilominerais.



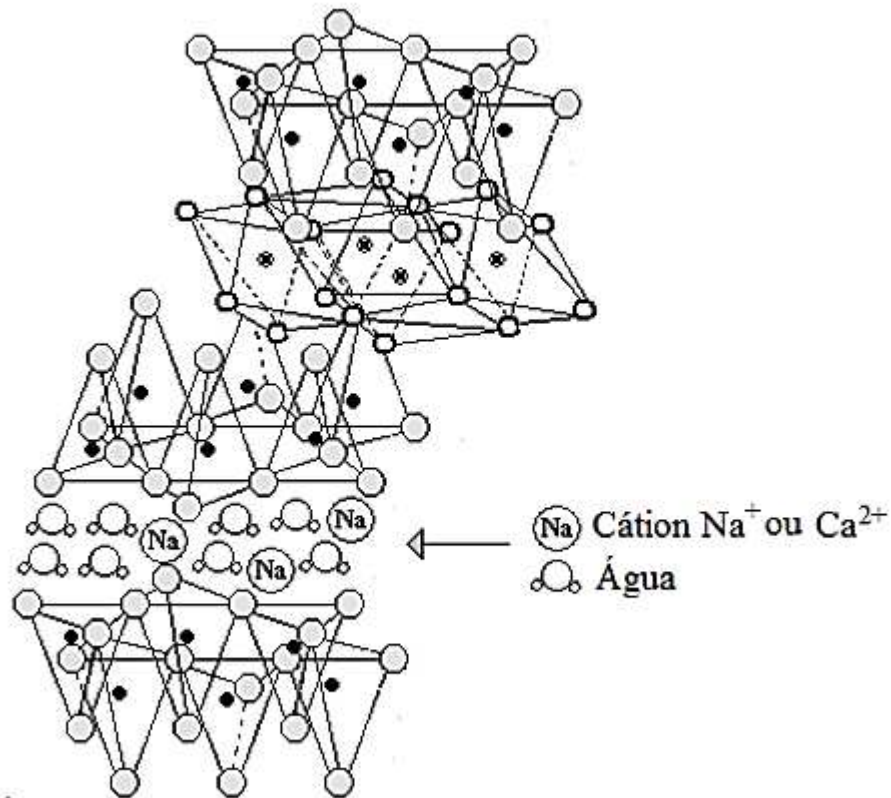
Fonte: adaptado de Marinho (2018)

Assim como pode ser visto na Figura 2.11 as estruturas são encontradas empilhadas camada por camada, unidas por ligações iônicas entre o oxigênio da estrutura tetraédrica, que é representado por um trapézio, com o alumínio / magnésio da octaédrica, que é representado por um retângulo, formando assim uma estrutura do tipo 2:1, mais fixa e não expansiva. Entre tanto quando um pacote desse (estrutura 2:1), se une com um outro, essa ligação se dá por meio de cátions trocáveis (caso das ilitas) ou, apenas por meio das forças de *Van der Walls*, de pequena intensidade (CORRÊA, 2008). As forças de *Van der Walls*, e os cátions trocáveis, proporcionam ligações fracas e que conseguem ser separadas com a adsorção de água ou outro líquido polar (MARINHO, 2018).

Do ponto de vista de Paiva (2016) o comportamento das argilas é determinado pela natureza do cátion presente. Se o cátion for sódio, a argila expande e absorve água, mas se o cátion for cálcio ou magnésio, a argila não expande e a absorção de água é limitada, mantendo as placas unidas por interações eletrostáticas.

Na Figura 2.12 temos uma estrutura de montmorilonita sujeito a infiltração de água, e de cátions livres ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ).

Figura 2. 12: Representação da estrutura da montmorilonita (2:1) com penetração da água



Fonte: Paiva (2016)

### 2.2.2 Mecanismo de expansão

Os mecanismos de expansão podem ser mecânicos ou físico-químicos. A combinação desses mecanismos interfere diretamente na mudança de volume dos solos potencialmente expansivos. A capacidade de expansão depende de condições ambientais, rocha de origem, clima, vegetação, lençol freático, natureza mineralógica, tamanho dos grãos, formação estrutural, permeabilidade, condições de tensões locais e cargas externas aplicadas (ATAIDE, 2017).

A expansão mecânica segundo Paiva (2016), ocorre em resposta às forças de descompressão elástica e estão relacionadas ao fator tempo; na prática, podem ser devidas às escavações feitas pelo homem, à ação dos movimentos tectônicos e a erosão.

Já os mecanismos de expansibilidade físico-químicos segundo Morais (2017), podem ser:

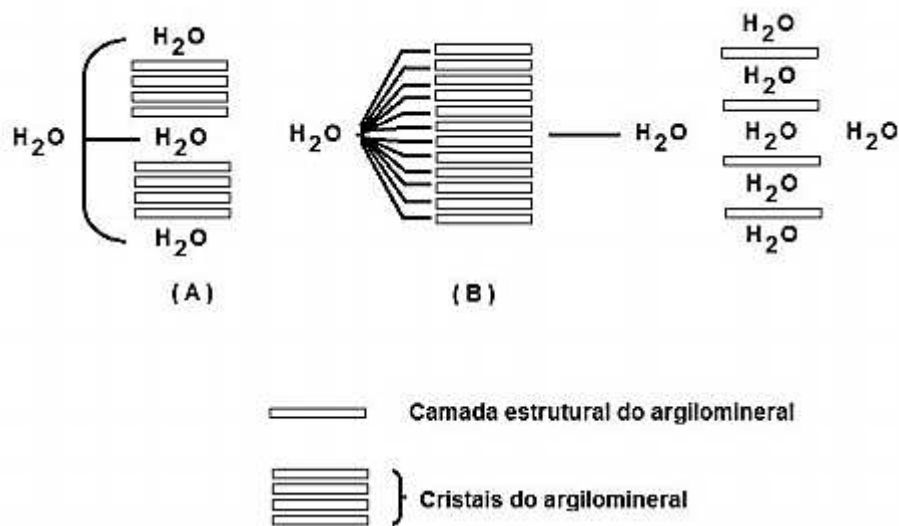
- Intercristalinos (ilita);
- Intracristalinos (montmorilonita, vermiculita);
- Osmóticos

A expansibilidade intercrystalina ocorre quando a absorção de água se faz através das superfícies externas dos cristais dos minerais argilosos e dos vazios entre esses cristais, ou seja, quando é possível a absorção de água no interior dos cristais ou entre as camadas estruturais. A água absorvida forma sucessivas camadas monomoleculares sobre as partículas dos minerais argilosos, afastando as unidades estruturais e as próprias partículas. (MORAIS, 2017). Segundo Morais (2017), a ilita apresenta expansibilidade intercrystalina devido à forte atração eletrostática gerada pelos íons monovalentes  $K^+$  que ligam as camadas estruturais e não permitem a entrada de água.

Já a expansibilidade intracristalina do ponto de vista de Morais (2017), é justificada pelo desequilíbrio entre as forças atrativas que ligam as camadas estruturais (inferiores) e as forças atrativas responsáveis pela absorção de água e depende da natureza cristalográfica do argilomineral. Como nas argilas predominam cargas eletronegativas, quando estas entram em contato com a água, seus íons  $H^+$  são atraídos pelas partículas de argila e ocupam posições entre as lâminas cristalográficas, separando-as para atraí-los. Resultando em “dupla camada” (várias capas de molécula de água fortemente adsorvidas). Existindo cátions trocáveis, cada cátion tende a rodear-se de dipolos de água, em consequência, há um aumento do espaço laminar e,

com isso, do inchamento (MORAIS, 2017). Na Figura 2.13 temos o esquema que representa os dois mecanismos de expansão físico-químico falados anteriormente.

Figura 2. 13: Absorção de água por argilominerais: a) adsorção intercrystalina de água num argilomineral do tipo 2:1 pouco expansivo (ilita); b) absorção intracrystalina de água num argilomineral do tipo 2:1 expansivo (motmorilonita).



Fonte: Ataíde (2017)

No caso da expansibilidade osmótica Morais (2017), frisa que o processo ocorre em duas fases:

- a) Na primeira fase devido a diferença de concentração iônica ocorre a entrada das moléculas de água entre as camadas dos argilomineirais, tendendo a separá-las (interação eletroestática entre as superfícies e os cátions dispersos e a energia de adsorção das moléculas de água).
- b) Na Segunda fase as superfícies das partículas estão já separadas por distâncias superiores a quatro camadas monomoleculares de água, sendo por isso a energia de adsorção já relativamente reduzida, o que permite que a energia de repulsão da dupla camada elétrica se sobreponha. Com a continuação da adsorção de moléculas de água a referida distância tende a aumentar e com ela as forças de repulsão

Morais (2017), complementa o conceito de expansibilidade osmótica afirmando que as argilas em que o cátion trocável é o sódio exibem uma expansibilidade muito maior que aquelas em que esse papel é assumido pelo cálcio. Isto porque os cátions monovalentes, e em fraca concentração, originam pressões de expansão superior devido à formação de duplas camadas elétricas mais extensas.

### 2.2.3 Fatores que influenciam na expansão

A capacidade expansiva do solo é resultado de vários fatores e combinações de eventos, e variam de solo para solo. Esses fatores que propiciam o desencadeamento dos mecanismos de expansão segundo Ataide (2017), são:

- Mineralogia da argila – de acordo com Ataide (2017), os argilominerais que tipicamente causam variações de volume no solo são montmorilonitas, vermiculitas e algumas camadas mistas de minerais. Ilitas e caulinitas não são frequentemente expansivas, mas podem causar variações de volume quando os tamanhos das partículas são extremamente pequenos;
- Química da água no solo – do ponto de vista de Ataide (2017), a expansão é reduzida pelo aumento da concentração e valência de cátion. Por exemplo, cátions de  $Mg^{2+}$  na água do solo resulta em menor expansão do que os cátions de  $Na^+$ ;
- Sucção do solo – segundo Barbosa (2019), o termo sucção está atrelado a capacidade de um solo de reter ou absorver água e conseqüentemente associado a capacidade expansiva do solo. Este parâmetro é de grande importância pois fornece embasamento para prever as propriedades e características de fluxo e da relação resistência deformação dos solos. A sucção do solo está relacionada com o grau de saturação, gravidade, tamanho e forma de poros, tensão superficial, características químicas e elétricas das partículas do solo e da água;
- Plasticidade – da perspectiva de Ataide (2017), em geral, solos que exibem comportamento plástico sobre larga variação de umidade e que tem alto limite de liquidez possuem maior potencial de expansão e de contração, logo a plasticidade é um indicador do potencial de expansão;
- Estrutura e textura do solo – Ataide (2017) explica que, argilas flocculadas tendem ser mais expansivas do que as argilas dispersas. Partículas cimentadas reduzem a expansão. A textura e estrutura são alteradas pela compactação, maior teor de umidade ou remoldagem;
- Densidade Seca – elevada densidade usualmente indica espaçamento menores entre partículas, o que pode significar grandes forças repulsivas entre elas e elevado potencial de expansão.

Além desses fatores algumas situações acabam influenciando a capacidade expansiva do solo. Essas situações segundo Paiva (2016), são:



- Condições de umidade inicial – quanto menor a umidade inicial do solo maior é a capacidade de absorver água e expandir. Um solo expansivo ressecado terá uma elevada afinidade por água ou sucção elevada, enquanto o mesmo com elevado teor de umidade diminuirá o potencial de absorver água e conseqüentemente diminuir o potencial expansivo. De modo inverso, um perfil de solo úmido perderá umidade mais rápido quando exposto à secagem e contrairá mais do que um perfil de solo inicialmente seco;
- Variações de umidade – variações de umidade na parte superior do perfil próximo a zona ativa definem principalmente os levantamentos. É nestas camadas que ocorrerão extensas variações de umidade e volume;
- Clima – a quantidade e variação de precipitação e evapotranspiração influenciam fortemente a umidade e o perfil devido às variações climáticas. Em climas semiáridos ocorrem levantamentos periódicos devido aos curtos períodos de chuva;
- Água do subsolo – lençóis rasos de água fornecem uma fonte de umidade e lençóis de águas superficiais contribuem para o aumento da umidade, logo conseqüentemente contribuem para a expansão;
- Drenagem e fontes de águas superficiais – a presença de estruturas de drenagem superficiais, como por exemplo, tubulações, canaletas, etc, resultar em vazamentos de tubulações, umidificando o solo até grandes profundidades, provocando a sua expansão;
- Vegetação – árvores, arbustos e gramas podem interferir no teor de umidade do solo, afetando a sua capacidade expansiva;
- Permeabilidade – camadas com elevada permeabilidade, particularmente devido a fissuras e rachaduras na massa de solo, permitem uma rápida migração de água e promove uma rápida velocidade de expansão;
- História de tensões – um solo sobre adensado é mais expansivo que um solo com igual índice de vazios, porém normalmente adensado. Pressões de expansão podem aumentar com o envelhecimento de argilas compactas, mas o valor de expansão sob pequenos carregamentos não tem demonstrado ser afetado pelo envelhecimento de argilas compactas. Repetidos ciclos de umedecimento e secagem tendem a reduzir a expansão em amostras de laboratório, mas após um certo número de ciclos, a expansão não é afetada;
- Carregamento – a grandeza de sobrecarga aplicada influi quantitativamente na mudança de volume que ocorrerá, para um dado teor de umidade e densidade. Uma carga externa

aplicada atua para balanceando das forças repulsivas entre partículas e reduzindo a expansão.

- Perfil do solo – a espessura e posição da camada potencialmente expansiva influência consideravelmente no movimento do solo. Os maiores movimentos ocorrem em perfis que tem argilas expansivas desde a superfície até a região abaixo da zona ativa. Movimentos menores ocorrerão se o solo expansivo for recoberto por material não expansivo ou leito rochoso superficial.

#### **2.2.4 Método de identificação de solos expansivos**

De acordo com Paiva (2016), os solos expansivos podem ser identificados por meio de pesquisa no local, verificando vários fatores como topografia, vegetação, sinais de contração no solo, fissuras nas edificações e dados com os moradores da região. Além disso esses solos podem ser identificados por meio de interpretação de ensaios laboratoriais e no uso de métodos de identificação.

Segundo Ataíde (2017), são vários os métodos utilizados na identificação dos solos expansivos, das mais simples as mais complexas, esses métodos podem ser classificados como métodos diretos e métodos indiretos. A Tabela 2.3 apresenta os dois métodos e suas especificações.

Tabela 2. 3: Métodos de Identificação de Solos Expansivos.

Métodos	Subdivisão	Critério	Referência
Indiretos	Identificativos	Difração de raio-X; Microscopia Eletrônica de varredura; Análise termodiferencial; Análise Físico-químicos; Capacidade de troca de Cátions (CTC); Análise por sedimentação Coloidal.	Carcedo et al, (1986) ; Fink et al. (1971).
	Qualitativos	Granulometria; Geomorfologia; Pedologia; Identificação visual.	Priklonskij, (1952); Skempton(1953); Seed et al. (1962); Van Der Merwe (1964); Chen(1965); USBR (1953); Vijayverviya e Ghazzaly (1973); Rodriguez Ortiz (1975); Ranganathan e Satyma(1965).
	Orientativos	Geologia, Pedologia; Geomorfologia; Identificação visual; Baseado no estado do solo (Umidade natural e Saturação); Baseado nas características organolépticas (Aspectos e Estruturas).	Patrick e Snethen (1976); Carcedo et al. (1986); Ferreira (1990 e 1993).
Diretos	Avaliativos	Ensaio de expansão de Lambe; Índices Endométricos.	Lambe (1960).
	Quantitativos	Ensaio de expansão livre e pressão de expansão; Ensaio edométricos simples e duplos; Ensaio edométricos com sucção controlada.	Seed et al., (1960); Chen (1965); Vijayverviya e Ghazzaly (1973); Rodriguez Ortiz (1975); Cuellar (1978) Jimenez Salas (1980); Escario (1967 e 1969); Aitchison et al., (1974); Johnson (1978); Mc Keen, (1980).

Fonte: Paiva (2016).

#### 2.2.4.1 Métodos Indiretos

Os métodos indiretos consistem em identificação mineralógica dos elementos do solo ou correlação com índices físicos, à composição e ao comportamento do solo (PAIVA, 2016).

**Métodos Indiretos – identificativos:** de acordo com Barbosa (2013), estes métodos baseiam-se na identificação da estrutura e dos argilominerais presentes no solo.

Assim como mostrado na Tabela 2.3 o método indireto de identificação segundo Paiva (2016) são:

- a) Composição da fração argilosa e sua textura – determina a percentagem de minerais da rede cristalina expansiva, vermiculita ou montmorilonita que está diretamente relacionada sua quantidade com a intensidade da expansão.
- b) Difração de Raio-X – identifica os minerais argilosos baseado no espectro característico da sua difração por Raio-X.
- c) Microscopia eletrônica – utilizado para identificar os minerais argilosos baseado na dispersão que um feixe de elétrons experimenta ao atravessar o material.
- d) Análise térmico diferencial – analisa as reações de cada espécie mineralógica apresenta em determinada temperatura, identificando as espécies mineralógicas.
- e) Adsorção de etileno glicol – possibilita a determinação do tipo do material argiloso. É feita pela quantidade de adsorção de etileno glicol e glicerina diferentes para cada mineral.
- f) Capacidade de Troca de Cátions – indica as propriedades físico-químicas das argilas, modificando suas propriedades plásticas, pela facilidade de adsorverem cátions pela rede cristalina. A capacidade de expansão é maior nos cátions do grupo dos alcalinos (monovalentes positivos).

**Métodos Indiretos – qualitativos:** de acordo com Barbosa (2013), este baseia-se na porcentagem de argila, de silte, o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Ele deixa claro que não é um critério de identificação com precisão para esses solos especiais, pois o resultado do ensaio pode apresentar uma argila que seria identificada como expansiva e não ser. Assim como os outros métodos esse apresenta os seguintes critérios:

- a) Critérios Priklonski j (1952) – nesse critério a classificação do solo é definida por meio do índice de consistência (IC), sendo o solo classificado como:
  - $IC < 0$  – Solo altamente colapsível
  - $IC \leq 0,5$  – Solo não colapsível
  - $IC > 1$  – Solo expansívelMais detalhes sobre o índice de consistência podem ser encontrados no Item 2.1.2.
- b) Critérios de Skempton (1953) – definiu a atividade coloidal de uma argila com o Índice de Atividade (IA), quanto maior a quantidade de argila mais alto é o potencial de

expansão. Mais detalhes sobre o índice de atividade podem ser encontrados no Item 2.1.2.

- c) Critérios de USBR – HOLTZ (1953) – esse critério, apresentam uma classificação baseada no Índice de Plasticidade (IP) e no limite de contração (LC) e o percentual de coloides menores que 0,001mm, apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2. 4: Critérios de USBR – HOLTZ (1953)

Percentual de Coloides, < 0,001 mm	Índice de Plasticidade (IP)	Limite de Contração (LC)	Grau de Expansividade
> 28	> 35	< 11	Muito alta
20 – 31	25 – 41	7 – 12	Alta
13 – 23	15 – 28	10 – 16	Média
< 15	< 18	> 15	Baixa

Fonte: Paiva (2016)

- d) Critérios de Ranganathan e Satynarayana (1965) – esses critérios relacionam o grau de expansividade em função do índice de consistência (IC).

- IC > 60 – Grau de expansividade muito alta
- 30 < IC < 60 – Grau de expansividade alta
- 20 < IC < 30 – Grau de expansividade média
- IC < 20 – Grau de expansividade baixa

- e) Critérios de Cuellar (1978) – baseados em argilas expansivas da Espanha, relacionam o limite de contração (LC) e o índice de plasticidade (IP), com a expansividade do solo, como apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2. 5: Critérios de Cuellar (1978)

Limite de Contração (LC)	Índice de Plasticidade (IP)	Grau de Expansividade
LC < 10	IP > 35	Muito alta
8 < LC < 11	25 < IP < 35	Alta
11 < LC < 15	15 < IP < 25	Média
LC > 15	IP < 15	Baixa

Fonte: Paiva (2016)

- f) Critério de Chen (1975) – esse critério caracteriza o potencial expansivo baseado no limite de liquidez e índice de plasticidade. Na Tabela temos como funciona o critério.

Tabela 2. 6: Métodos de identificação de solos expansivos de Chen (1975)

Grau de Expansão	Chen (1975)	
	LL (%)	IP (%)
Baixo	< 30	0 – 15
Médio	30 – 40	10 – 35
Alto	40 – 60	20 – 55
Muito Alto	> 60	> 35

Fonte: Adaptado Silva (2018)

- g) O Critério de Holtz e Gibbs (1956) – é semelhante ao critério anterior. Esse usa apenas o índice de plasticidade para a caracterização do solo em termos de expansividade. Na Tabela 2.6 mostramos como funciona o critério.

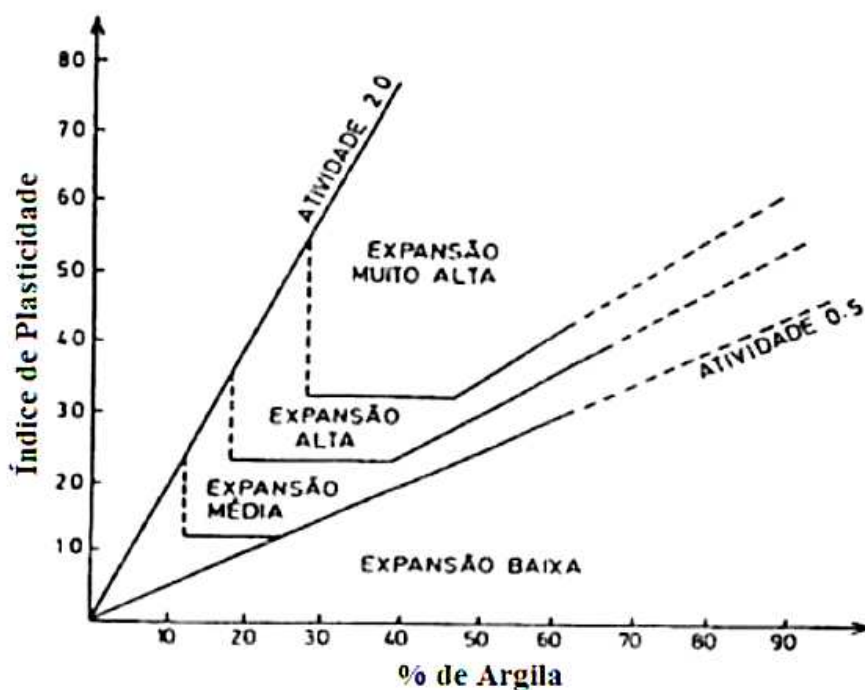
Tabela 2. 7: Métodos de identificação de solos expansivos de Holtz e Gibbs (1956)

Grau de Expansão	Holtz e Gibbs (1956)
	IP (%)
Baixo	< 20
Médio	12 – 34
Alto	26 – 45
Muito Alto	> 32

Fonte: Adaptado Silva (2018)

- h) Critério de Williams e Donaldson (1980) – esse critério faz o uso do gráfico apresentado na Figura 2.14. Esse gráfico relaciona a porcentagem de argila no solo e seu índice de plasticidade, resultando em uma classificação da expansão que pode ser baixa, média, alta ou muita alta.

Figura 2. 14: Classificação da expansibilidade de materiais argilosos por Williams & Donaldson (1980).



Fonte: Silva (2018)

- i) Critério de Dakshanamurthy e Raman (1973) – usa o Limite de Liquidez na classificação do potencial expansivo do solo.

Na Tabela 2.7 é apresentado a classificação segundo esse critério.

Tabela 2. 8: Métodos de identificação de solos expansivos por Dakshanamurthy e Raman (1973)

Grau de Expansão	LL (%)
Baixo	$20 \leq LL \leq 35$
Média	$35 < LL \leq 50$
Alto	$50 < LL \leq 70$
Muito Alto	$LL > 70$

Fonte: Adaptado Silva (2018)

- j) Critério da classificação unificada – baseado nas classificações geotécnicas, os solos expansivos que na maioria dos casos estão nos grupos CL e CH.

**Métodos Indiretos – orientativos:** do ponto de vista de Barbosa (2013), esse método possibilita a orientação com base na pedologia que nos informa aspectos com respeito à porosidade do solo, a mineralogia, o ambiente em que o solo foi formado. Obtendo este mapa

pedológico do solo podemos nos orientar qual o verdadeiro potencial do solo analisado. Esse método usufrui da:

- a) Geologia – conforme Paiva (2016), os solos expansivos gerados sob rochas ígneas básicas, rochas vulcânicas ou rochas sedimentares argilosas. Locais onde a geologia é bem definida os solos expansivos vem sendo muito estudados. Mapas geológicos vêm sendo elaborados com indicações de áreas que apresentam potencialidade de encontrar solos expansivos;
- b) Geomorfologia – segundo Paiva (2016), as condições físicas e químicas onde o intemperismo ocorre é um fator tão importante na formação do argilomineral expansivo como da rocha de origem. A geomorfologia apresenta uma maior precisão na localização de solos expansivos por interpretar o tipo de intemperismo que acontece no solo;
- c) Pedologia – Paiva (2016), afirma que este método foi proposto por Ferreira (1990) baseado nas classes pedológicas e levantamentos de solos relacionando a características de solos potencialmente expansivos;
- d) Identificação visual – consiste no reconhecimento em campo, reconhecimento em obras, reconhecimento em estradas, reconhecimento em taludes.

#### **2.2.4.2 Métodos Diretos**

Os métodos diretos determinam as características de mudança de volume dos solos expansivos através de ensaios mecânicos. Nesses ensaios são medidas as variações de volume de material, sujeitos ou não a sobrecargas (BEZERRA, 2019).

##### **Métodos Diretos – avaliativos**

De acordo com Paiva (2016) esse método engloba o ensaio de expansão de Lambe. Nesse ensaio, uma amostra do solo é tratada, remoldada a textura natural do solo, colocada no anel e carregada com uma tensão nominal de 10 t/m<sup>2</sup>. A amostra é inundada e no final de duas horas, mede-se a pressão alcançada em kPa. Essa pressão é o índice de expansividade ou índice de Lambe. Associando o índice com o potencial expansivo do solo temos os critérios de Lambe (1960), apresentado na Tabela 2.8.



Tabela 2. 9: Critérios de Lambe (1960).

Índice de Lambe (kPa)	Potencial Expansivo
< 80	Não crítico
80 – 150	Marginal
150 – 230	Crítico
> 230	Muito crítico

Fonte: Paiva (2016).

Outro método que se enquadra nesse grupo é o ensaio de expansão livre e o ensaio de expansão em uma dimensão proposto pelas normas da *American Society for Testing and Material* (ASTM) D4829 (2011) e ASTM D4546 (1996) respectivamente.

O ensaio de expansão livre segundo Tenório (2018) consiste na variação da altura que o corpo de prova confinado em um anel rígido sofre ao ser encharcado. Por meio desse ensaio é definido o índice e expansão que é a expansão máxima de um corpo de prova de solo moldado com grau de saturação de 50% e carga de adensamento de 6,9 kPa. Para calcular esse índice é usado a Equação (6)

$$IE = \frac{\Delta H}{H_0} \times 1000 \quad (6)$$

Onde:

IE – índice de expansão;

$\Delta H$  – variação de altura do corpo de prova;

$H_0$  – altura inicial do corpo de prova;

A Tabela 2.9 é utilizado para classificar os solos quanto ao seu potencial expansivo em função do índice de expansão.

Tabela 2. 10: Potencial de expansão em função do índice de expansão

Índice de expansão	Potencial expansivo
0 – 20	Muito baixo
21 – 50	Baixo
51 – 90	Médio
91 – 130	Alto
> 130	Muito alto

Fonte: Tenório (2018).

O ensaio de expansão em uma dimensão de acordo com Tenório (2018) é realizado em prensa de compressão edométrica com corpos de prova possuindo 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura.

Tenório (2018), continua afirmando que o resultado deste ensaio é a curva de deformação do solo antes e após o umedecimento permitindo o cálculo da expansão do solo.

Com isso se torna possível a avaliação do comportamento do corpo de prova quando submetido ao carregamento sem o umedecimento e posterior expansão após o umedecimento.

**Métodos Diretos – quantitativos:** é simulado e quantificado a expansão em função do carregamento, do nível de tensão que está sendo aplicado. A simulação é feita nas duas condições mais comuns de campo: carregar e inundar, ou inundar e carregar. No laboratório pode-se fazer variação de umidade simulando diferentes tensões (BABOSA, 2013).

Esses métodos de acordo com Paiva (2016), englobam critérios de:

- a) Critérios de Seed et al. (1962) – correlacionam a expansão livre, referente à amostra compactada à densidade máxima e umidade ótima, com uma tensão vertical de 7 kPa, com o grau de expansividade do solo. De acordo com Tenório (2018) ele também classifica o solo segundo o grau de expansividade, com base no índice de plasticidade.

A Tabela 2.10 mostra a classificação por meio desse critério.

Tabela 2. 11: Critérios de Seed et al. (1962).

Inchamento livre (%) pressão 7 kPa	IP (%)	Grau de Expansividade
> 25	> 35	Muito alta
5 – 25	$20 < IP \leq 35$	Alta
1 – 5	$10 \leq IP \leq 20$	Média
0 – 1	< 10	Baixa

Fonte: adaptado de Paiva (2016), e Silva (2018).

- b) Critério de Cuellar (1978) – baseado em análises de argilas expansivas, é realizada uma relação entre a tensão de expansão e o inchamento livre da amostra compactada à densidade máxima e umidade ótima, sendo a amostra ressecada ao ar. A partir da Tabela 2.11 é avaliado a expansividade da argila segundo o critério de Couller (1978).

Tabela 2. 12: Grau de expansividade Cuellar (1978).

Pressão de expansão (kPa)	Inchamento livre (1) amostra compactada a densidade máxima e umidade ótima (%)	Inchamento livre (2) amostra ressecada ao ar (%)	Grau de expansividade
> 300	> 10	> 30	Muito alta
125 – 300	5 – 10	20 – 30	Alta
25 – 125	1,5 – 5	10 – 20	Média
< 25	< 1,5	< 10	Baixa

Fonte: Paiva (2016).

- c) Critério de Chen (1965) – os solos expansivos são classificados pelas expansões de amostras indeformadas à pressão vertical de 50 kPa.

Na Tabela 2.12 é expresso a relação e o grau de expansão.

Tabela 2. 13: Grau de expansividade pelos critérios de Chen (1965).

Pressão de Expansão (kPa)	Expansão (tensão de 50 kPa)	Grau de Expansividade
> 1000	> 10	Muito alto
250 – 1000	5 – 10	Alto
50 – 250	1 – 5	Média
< 50	< 1	Baixo

Fonte: Paiva (2016).

- d) Vijayvergiya e Ghazzaly (1973) – esse critério usa a o ensaio de expansão livre, em percentagem para uma tensão de sobrecarga de 10kPa, na determinação do grau de expansividade do solo.

A Tabela 2.13 mostra os critérios referidos na linha d).

Tabela 2. 14: Métodos de identificação de solos expansivos por Vijayvergiya e Ghazzaly (1973)

Grau de Expansão	Potencial expansivo – SP (%)
Baixo	< 1
Médio	1 – 4
Alto	4 - 10
Muito Alto	> 10

Fonte: Adaptado Silva (2018)

- e) Critério de WES – esse critério faz uso de parâmetros como potencial de expansão definidos nos ensaios de expansão livre, limite de liquidez e índice de plasticidade, para determinar o potencial expansivo do solo.

Na Tabela 2.14 é mostrado como funciona o critério.

Tabela 2. 15: Métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos pela WES

Classificação do Potencial de Expansão	Potencial de Expansão (%)	Limite de Liquidez (%)	Índice de Plasticidade (%)
Baixa	< 0,5	< 50	< 25
Médio	0,5 – 1,5	50 – 60	25 – 35
Alto	> 1,5	> 60	> 35

Fonte: Adaptado Silva (2018)

- f) Critérios de Rodriguez (1975) – desenvolvido a partir dos critérios práticos de expansividade de diferentes autores.

Esse critério é apresentado na Tabela 2.15.

Tabela 2. 16: Grau de expansividade pelos critérios de Rodriguez e Ortiz (1975).

Potencial de inchamento SEED	Índice de Lambe	Tensão de expansão	Grau de expansividade
0 – 1,5	< 80	> 30	Baixa
1,5 – 5	80 – 150	30 – 120	Média
5 – 25	150 – 230	120 – 300	Alta
> 25	> 230	> 300	Muito alta

Fonte: Paiva (2016).

g) Critérios de Jimenez (1980) – nesse critério foram classificados possíveis danos que podem acontecer se não tomar precauções especiais. Foram utilizados para essa classificação a pressão de expansão das amostras de solo extraídas no final do verão em Andaluzia na Espanha.

A classificação com base no critério é expressa pela Tabela 2.16.

Tabela 2. 17: Possíveis danos pelos critérios Jimenez (1980).

Tensão de expansão (kPa)	Possíveis danos
> 200	Demolição
100 – 200	Danos graves
50 – 100	Fissuras importantes
20 – 50	Fissuras pequenas
< 20	Sem danos

Fonte: Paiva (2016)

### 2.3 Revisão sistemática

Antes de falar sobre a revisão sistemática se faz necessário falar sobre a revisão da literatura, que é definido segundo Ferenhof e Fernandes (2016), como a base para a identificação do atual conhecimento científico. Parte-se dela para identificar hiatos a serem explorados em determinados assuntos.

Existem três formas de revisão da literatura:

- Revisão narrativa;
- Revisão sistemática;
- Revisão integrativa.

De entre esses três métodos de revisão, para desenvolver esse trabalho foi recorrido ao método de revisão sistemática da literatura. Nesse sentido nas próximas linhas é abordado de forma clara e detalha a revisão sistemática, com o intuito de promover um melhor entendimento do sistema usado no processo de elaboração dessa pesquisa.

A revisão sistemática da literatura ou simplesmente revisão sistemática é um estudo secundário que têm nos estudos primários sua fonte de dados. Faz-se o uso de bancos de dados da literatura que trata sobre dada questão como fonte e métodos de identificação, seleção e análises sistemáticos, com o objetivo de se realizar uma revisão crítica e abrangente da literatura.

Do ponto de vista Falavigna (2018) a revisão sistemática é um tipo de revisão que se propõe a responder uma pergunta específica de forma objetiva e imparcial. Busca coletar toda a evidência empírica que se encaixa em critérios de elegibilidade pré-definidos, com o objetivo de responder uma questão específica. Utiliza métodos sistemáticos que são selecionados com o objetivo de minimizar vieses, assim fornecendo resultados mais confiáveis, com os quais conclusões podem ser feitas e decisões tomadas.

Esta modalidade de estudo são frequentemente desenvolvidos nas academias em artigos científicos, dissertações, e TCC's, com o intuito de interpretar dados e expandir os conhecimentos em referenciais teóricos. Ela auxilia na orientação de investigações futuras especialmente quando há assuntos conflitantes e resultados pouco satisfatórios.

Falavigna (2018) deixa claro que a revisões sistemática podem possuir grau de qualidade variável, dependendo do método utilizado e da experiência no uso dessas metodologias do grupo que conduziu a revisão. Falavigna (2018) continua afirmando que, os aspectos principais de uma revisão sistemática de boa qualidade são:

- Desenvolvimento e publicação de protocolo a priori;
- Busca ampla de artigos, com estratégia de busca sensível (grande gama de termos), em diferentes bases de dados, com busca adicional por estudos não publicados;
- Avaliação da qualidade dos estudos incluídos;
- Busca, seleção e extração de dados por dois pesquisadores independentes;
- Uso adequado de técnicas meta-analíticas para análise dos resultados.

### **2.3.1 Relevância da revisão sistemática**

Do ponto de vista de Gadelha, et al. (2012), devido ao facto de usufruir de bancos de dados para reunir materiais semelhantes de vários autores e realizar uma análise estatística, a revisão sistemática acaba solucionando controvérsias em estudos com estimativas divergentes. Ela também permite generalizar dados, aumentando a validade externa dos estudos, além de garantir uma análise mais consistente de subgrupos.

As revisões sistemáticas são úteis, pois associam um conjunto de estudos relevantes sobre um determinado assunto, e por vezes acaba respondendo perguntas não abordadas pelos estudos individualmente, e identificando a necessidade de planejamento de estudos maiores e definitivos, auxiliando na orientação para investigações futuras (GADELHA et al, 2012).

De acordo com Sampaio e Mancini (2006) ao viabilizarem, de forma clara e explícita, um resumo de todos os estudos sobre determinada intervenção, as revisões sistemáticas nos permitem incorporar um espectro maior de resultados relevantes, ao invés de limitar as nossas conclusões à leitura de somente alguns artigos.

### **2.3.2 Critério essencial para uma revisão sistemática**

Segundo Donato (2019) existem quatro critérios essenciais para uma revisão sistemática:

- Deve ser exaustiva – toda a literatura relevante na área deve ser incluída.
- Deve ser seguida uma metodologia rigorosa – definir a questão de investigação, escrever um protocolo, pesquisar a literatura, recolher e fazer a triagem e a análise de literatura. Todo o processo também deve ser cuidadosamente documentado.
- É importante que a estratégia de pesquisa seja rigorosamente desenvolvida com alta sensibilidade para encontrar todos os potenciais artigos relevantes e efetuar essa pesquisa em várias bases de dados e em outros recursos.
- Pelo menos duas pessoas devem estar envolvidas, especialmente para triagem de artigos e extração de dados.

### **2.3.3 Modelos para revisão da literatura**

De acordo com Ferenhof e Fernandes (2016), na literatura há alguns modelos que apresentam a forma de como realizar o processo de revisão da literatura. Uns seguem o viés da revisão sistemática, outros da revisão integrativa.

A seguir são apresentadas aos quatro modelos que se destacam quando se trata de revisão sistemática da literatura.

#### **2.3.3.1 Modelo I: Levy e Ellis (2006)**

Descrevem a revisão sistemática como um processo. A entrada, é composta pelas informações preliminares ao processamento. No processamento há um conjunto de etapas que

descrevem como será conduzida a Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS). Trata-se de um documento que descreve o processo, técnicas e ferramentas que serão utilizadas. Por fim, têm-se as saídas, onde são apresentados os relatórios e síntese dos resultados. Na Figura 2.14 podemos ver o esquema explicativo do modelo em questão.

Figura 2. 15: Fases da Revisão Sistemática proposta por Levy e Ellis



Fonte: Conforto, Amaral e Silva (2011).

### **Vantagens**

De acordo com os Ferenhof e Fernandes (2016), este modelo apresenta as seguintes vantagens:

- a) O processamento é detalhado em seis etapas;
- b) À medida que o conhecimento sobre o assunto aumenta, os ciclos são realizados de modo mais eficiente;
- c) Ciclo é repetido quantas vezes forem necessárias até que os objetivos da pesquisa bibliográfica sejam alcançados;

- **Desvantagens**

Já em relação as desvantagens os autores apontaram apenas a não existência de descrição detalhada de cada etapa que compõe o protocolo.

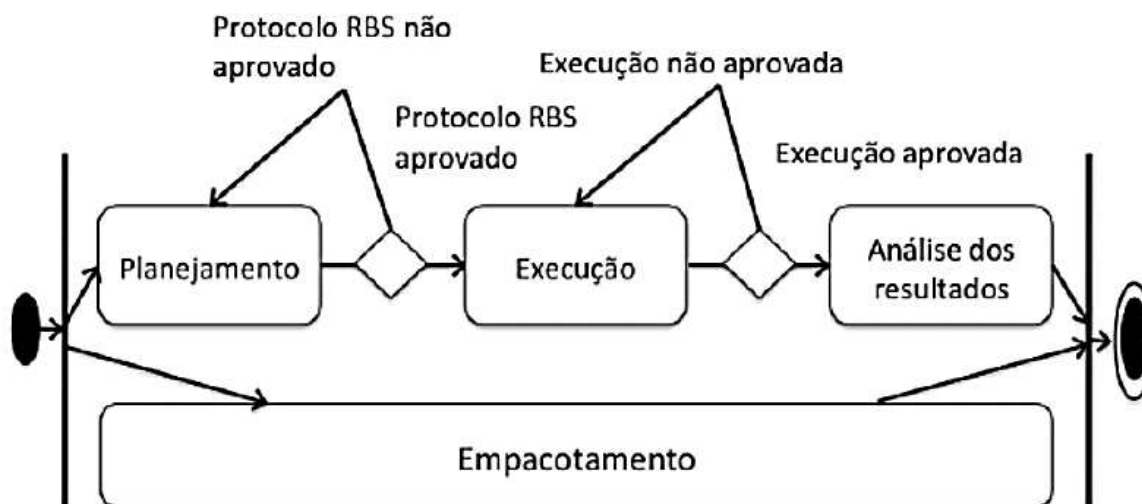
### 2.3.3.2 Modelo II: Biolchini et al. (2007)

Descrevem o processo de condução da revisão sistemática composto pelas seguintes fases:

- 1) Planejamento;
- 2) Execução;
- 3) Análise dos resultados.

De acordo com Conforto, Amaral e Silva (2011) os autores não enfatizam a necessidade de conduzir a revisão bibliográfica em ciclos iterativos. Na fase de planejamento é desenvolvido um protocolo com base nos objetivos da revisão. Nele, há um breve detalhamento de como a busca deve ser realizada, apresentando a questão central de pesquisa, objetivos, palavras-chave, diretrizes de busca e o método de execução. É na execução que os artigos são identificados, selecionados e avaliados segundo o protocolo. Por fim, há a análise dos resultados, onde é feita a extração e compilação. Na Figura 2.15 temos o esquema que representa o modelo.

Figura 2. 16: Processo sistemático para revisão bibliográfica



Fonte: Conforto, Amaral e Silva (2011).

- **Vantagens**

No que tange as vantagens deste processo Ferenhof e Fernandes (2016) destacam as seguintes:

- a) Definição de um protocolo, como alguns detalhes, como a questão central de pesquisa, objetivos e palavras-chave;
- b) Há um ponto de avaliação após a primeira e segunda fase. Os resultados devem ser avaliados e, se reprovados, deve-se retornar à fase de execução.



- **Desvantagens:**

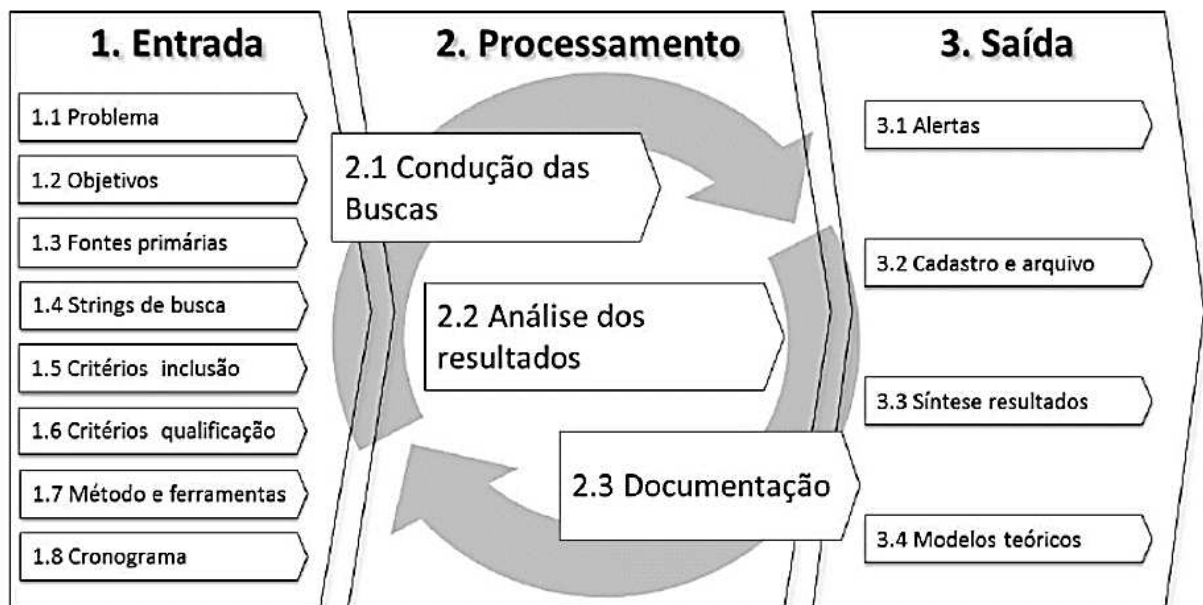
Em relação as desvantagens Ferenhof e Fernandes (2016) citaram o fato de que o modelo não deixa explícito a necessidade de realizar ciclos iterativos de busca, análise e compreensão, negligenciando o aprendizado do pesquisador e não reaproveitando o conhecimento adquirido durante as buscas de artigos, leitura e compreensão dos textos.

### 2.3.3.3 Modelo III: Conforto, Amaral e Silva (2011) - *RBS Roadmap*

Conforto, Amaral e Silva (2011) destacam que o *RBS Roadmap* está organizado em fases e etapas. São um total de 15 etapas distribuídas em 3 fases (Entrada, Processamento e Saída).

**1ª Fase – entrada:** é definido o problema de pesquisa que é o ponto de partida, objetivos a partir do qual é possível definir critérios para inclusão dos artigos no estudo, as fontes primárias que podem ser artigos periódicos ou bases de dados. Também são definidas as diretrizes de busca, a qual é composta pelas palavras-chave e termos referentes a pesquisa. Em seguida, são definidos os critérios de inclusão e de qualificação, seguidos pelos métodos e ferramentas e finalmente pela definição de um cronograma para execução da pesquisa. A Figura 2.16 demonstra o modelo para condução da revisão sistemática

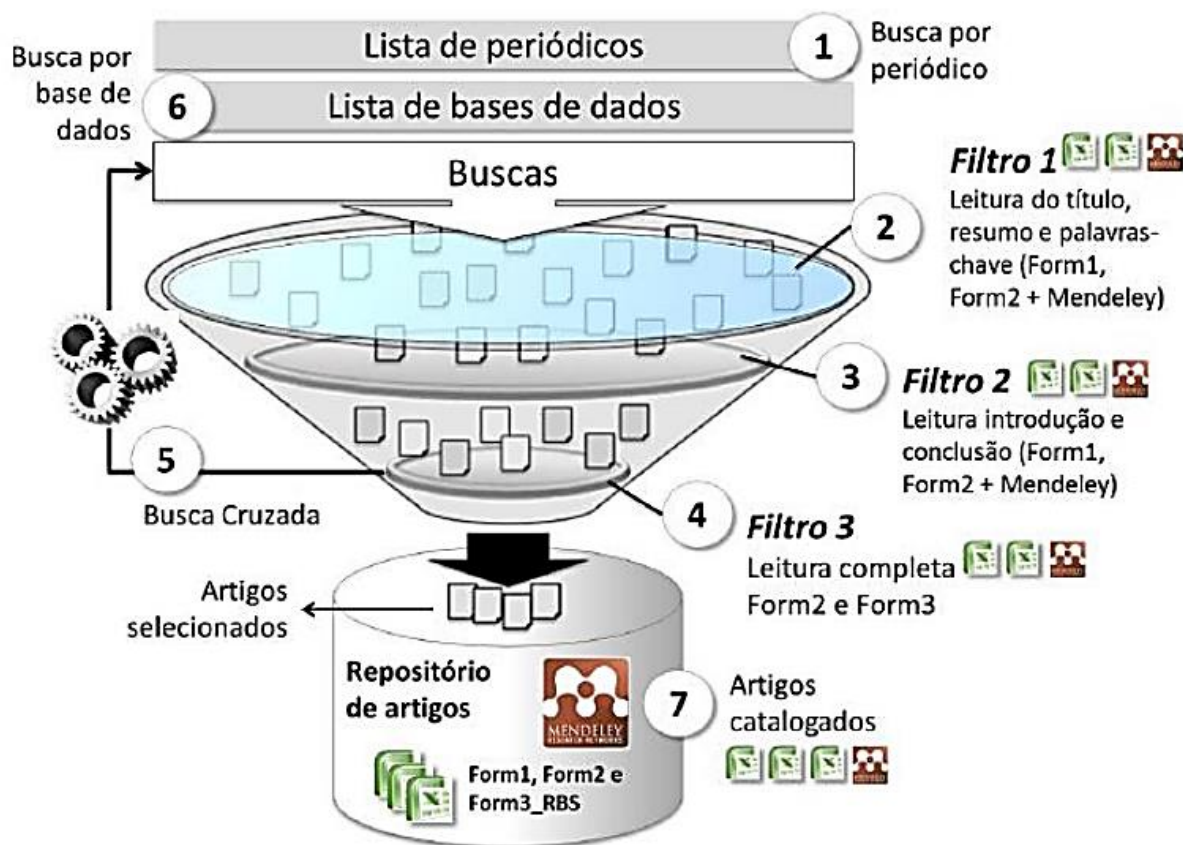
Figura 2. 17: Processo geral para revisão bibliográfica



Fonte: Conforto, Amaral e Silva (2011).

**2ª Fase – Processamento:** as etapas de busca, análise dos resultados e documentação de acordo com Conforto, Amaral e Silva (2011), seguem um processo iterativo contendo 7 passos. A Figura 2.17 ilustra de forma clara esse processo.

Figura 2. 18: Representação da etapa de Processamento



Fonte: Conforto, Amaral e Silva (2011).

Na Etapa 2.1 são realizadas as buscas, compreende os passos 1, 5 e 6. Na Etapa 2.2, é realizada a leitura e análise dos resultados, ou seja, os filtros de leitura, passos 2, 3 e 4. Na Etapa 2.3, é realizada a documentação e arquivamento dos artigos selecionados nos filtros, bem como os resultados das buscas e filtros de leitura, seguindo os passos 2, 3, 4 e 7.

Conforto, Amaral e Silva (2011) continuam afirmando que na etapa 2.3 as informações documentadas são: quantidade de artigos encontrados por periódico, quantidade de artigos excluídos, quantidade de artigos encontrados na busca cruzada, etc. Esses dados são importantes para refinar as buscas e posteriormente serão úteis para argumentação teórica e embasamento da síntese da teoria sobre o assunto pesquisado.

**3ª Fase – Saída:** Nessa etapa há a criação de alertas dos principais periódicos identificados, armazenamento e compartilhamento das referências, síntese e resultados, onde

são criados os relatórios. Encerrando com os modelos teóricos e definição das hipóteses que é o resultado da revisão.

- **Vantagens:**

De acordo com Ferenhof e Fernandes (2016) esse método apresenta as seguintes vantagens:

- a) Há uma definição detalhada de como é a etapa de processamento, inclusive apresentando formulários para a análise dos dados;
- b) Definição de filtros;
- c) Definição de alertas;

- **Desvantagem:**

A respeito das desvantagens Ferenhof e Fernandes (2016), aponta as seguintes:

- a) Viés do pesquisador quanto aos periódicos escolhidos;
- b) Definição de mais de uma pergunta para a revisão sistemática, ou seja, é um equívoco quanto ao procedimento de revisão sistemática, na visão de Ferenhof e Fernandes (2016);
- c) Não detalha o uso dos operadores lógicos;
- d) Definição de alertas limitada aos periódicos.

#### **2.3.3.4 Modelo IV: Ferenhof e Fernandes (2016) – Método *SystematicSearchFlow (SSF)***

Segundo Ferenhof e Fernandes (2016) esse método foi desenvolvido com o intuito de sistematizar o processo de busca ou buscas à base de dados científicas a fim de garantir a repetibilidade e evitar viés do pesquisador. Ele é composto por 4 fases e 8 atividades, conforme pode ser observado na Figura 2.18.

Figura 2. 19: Representação do método *SystematicSearchFlow*



Fonte: Autor

### **Fase 1:** Definição do protocolo de pesquisa

Esta primeira fase abrange a elaboração de um conjunto de regras e parâmetros de configuração do processo de pesquisa. Ela é composta por composta por cinco atividades:

- 1) Definir a estratégia de busca – consiste na estratégia de busca, abrangendo um conjunto de procedimentos que definem os mecanismos da pesquisa e a recuperação de informações online.;
- 2) Consultarem base de dados – o pesquisado, por meio de uma interface computacional, de acordo com a estratégia formulada, parametriza a busca (*query*) e a executa nas bases previamente selecionadas;
- 3) Organizar o portfólio bibliográfico – se destina a organizar as bibliografias, separando as respostas de cada uma das buscas, por meio de um software organizador de bibliografias e referências, automatizando e agilizando o processo de procura, filtro, contagem, armazenagem, inserção no texto como citação e como referência bibliográfica.;
- 4) Padronizar a seleção dos artigos – nesta fase ocorre a leitura dos títulos, resumos (abstract) e palavras-chaves de cada artigo, levando à escolha daqueles que estejam alinhados com o tema da busca.

- 5) Compor o portfólio de artigos – Esta atividade envolve a leitura de todos os artigos na íntegra, permitindo, em sequência, mais uma filtragem para excluir os que não demonstraram aderência à temática sob investigação.

### **Fase 2: Análise**

Destina a consolidar os dados. Segundo Ferenhof e Fernandes (2016) as análises ajudam a estabelecer relações e significância entre os termos da busca, identificando de forma sistemática um conjunto de fatores relevantes à pesquisa.

Nesta fase é realizada a combinação de alguns dados, como por exemplo, os artigos, os diários e os autores mais citados, o ano em que houve mais publicações sobre o tema de pesquisa, definição dos constructos estudados, pontos fracos e fortes acerca do objeto de estudo, dentre outros (FERENHOF e FERNANDES, 2016).

### **Fase 3: Síntese**

Nesta fase, como base nos resultados obtidos na fase anterior é gerado novos conhecimentos sobre o assunto da pesquisa sobre forma de relatórios.

De acordo com Ferenhof e Fernandes (2016) utiliza-se como base, a Matriz do Conhecimento, uma ferramenta desenvolvida por Ferenhof e Fernandes (2014) a qual se destina a extrair e organizar os dados oriundos da análise dos artigos. Ele ainda continua dizendo que não existe um modelo padrão para a construção da matriz de conhecimento, a combinação dos dados e análise fica ao encargo da criatividade e da interpretação de cada pesquisador acerca dos dados analisados ao longo do processo de revisão de forma sistemática, lembrando que o foco é o objetivo da busca.

### **Fase 4: Escrever**

Na fase 4, é consolidado todos os resultados por meio da escrita científica. Do ponto de vista do Ferenhof e Fernandes (2016) para tal deve-se resgatar o objetivo da revisão de literatura, bem como o resultado da análise e síntese e, mediante a matriz do conhecimento e dos relatórios fundamentar a escrita dos resultados.

- **Vantagens:**

De acordo com Ferenhof e Fernandes (2016) esse método traz as seguintes vantagens:

- a) Auxilia no mapeamento de um portfólio de artigos ao tema pesquisado;

- b) Proporciona a sistematização do conhecimento científico, tornando-o possível de ser replicado;
- c) Possibilita a análise e a síntese do conhecimento existente na literatura científica, permitindo a obtenção de informações que possibilitem aos leitores avaliar a pertinência dos procedimentos empregados na elaboração da produção científica.

### **3. MATÉRIAS E MÉTODOS**

Assim como frisado anteriormente no Item 2.2.2, Donato (2019) deixa claro que existem quatro critérios essenciais para uma revisão sistemática. Mas como se trata de um trabalho de caráter individual (TCC – Trabalho de Conclusão de Curso), o quarto critérios não foi possível ser cumprido.

Dessa forma foi seguido com a definição da metodologia, onde de entre os Modelos de Revisão sistemática abordados no Item 2.2.3, foi decidido usar o Método *Systematic Search Flow (SSF)* do Ferenhof e Fernandes (2016). Essa escolha se deu devido ao facto do método se mostrar ser muito completo e detalhado, tornando o processo de coleta e seleção dos dados mais fácil e sistemático. A forma com ele define cada etapa, e orienta as execuções permite que todo o processo seja compreendido e aplicado de melhor forma possível.

Sendo assim foi aplicados o método SSF respeitando as quatro fases e as oito atividades.

#### **3.1 Fase 1 – Definição do protocolo de pesquisa**

A Fase 1 foi composta por cinco atividades essenciais.

##### **3.1.1 Atividade 1 – Definir a estratégia de busca**

Foi definido o tema a ser trabalhado na pesquisa: Ocorrência de solos expansivos no Brasil. Visando identificar os locais da ocorrência de solos expansivos no Brasil que foram abordados em trabalhos científicos, bem como as principais características desses solos.

Na interface de busca foi feito o uso do operador logico aspas (“”) com o intuito de que o interpretador das bases de dados trate os termos com sendo um só (ex: “solo expansivo”, “argila expansiva”, “pressão de expansão” e “variação volumétrica de solo”).

##### **3.1.2 Atividade 2 – Consultar base de dados**

Nessa atividade foi utilizado dados de produções científicas brasileiras baseadas em dissertações e teses disponíveis no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). A CAPES é um órgão de mais importante de fomento à pesquisa no Brasil, e seu banco de dados reuni as teses e dissertações defendidas no Brasil.

### **3.1.3 Atividade 3 – Organizar o portfólio bibliográfico**

Seguindo com a atividade 3 foi analisado a necessidade definir o intervalo de publicação. Optou-se por utilizar todos as publicações no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, desde sua criação, pois o tipo de solo de uma região não sofre alterações consideráveis no período de 34 anos.

### **3.1.4 Atividade 4 – Padronizar a seleção dos artigos**

Na atividade 4 foi feito o filtro dos documentos por meio do título, palavras chaves, e resumo de modo a obter resultados alinhados com o tema. Esse filtro foi feito diretamente na plataforma digital automatizada disponibilizado pela CAPES.

Foram utilizados os seguintes filtros:

- Palavras-chaves: solo expansivo, argila expansiva, pressão de expansão e variação volumétrica do solo
- Grande área de conhecimento: Engenharias, Ciências Agrárias
- Área de conhecimento: Engenharia Civil, Ciências do Solo
- Área de avaliação: Engenharia I, Ciência Agrárias
- Área de concentração: Geotecnia, Tecnologia Ambiental

Após a aplicação dos filtros foi apresentado na plataforma um total de 46, onde 21 foi usando a palavra-chave “solo expansivo”, 12 foi usando a palavra-chave “argila expansiva”, e 13 foi usando a palavra-chave pressão de expansão. Não foram obtidas nenhum resultado usando a palavra-chave variação volumétrica do solo. Destaca-se entre esses resultados materiais sem autorização de acesso, e anteriores a plataforma sucupira. Esses dois fatores se constituíram um empecilho, impedindo a análise de todos os trabalhos que constavam na plataforma. Nessas circunstâncias dos 21 resultados obtidos usando a palavra-chave “solo expansivo” apenas 13 eram posteriores à plataforma sucupira, e desses 13, apenas 9 tinha autorização de acesso. Dos restantes 4 que não apresentavam autorização para acesso foi possível encontra 3 em outros repertórios. Dos 8 trabalhos anteriores a plataforma sucupira, foi encontrado apenas 2 deles em um outro repertorio. Logo puderam ser utilizados nesta revisão apenas 14 trabalhos.

Dos 12 resultados obtidos usando a palavra-chave “argila expansiva” 8, eram anteriores à plataforma sucupira, e desses 8, apenas 3 foram encontrados em outros repertórios. Dos 4



trabalhos posteriores à plataforma sucupira, 3 apresenta autorização de acesso. Assim nesta pesquisa foram utilizados 6 trabalhos

Dos 13 resultados obtidos usando a palavra-chave “pressão de expansão”, 9 eram anteriores à plataforma sucupira, e desses 9, apenas 2 foram encontrados em outros repertórios. Dos 4 trabalhos posteriores à plataforma sucupira, 3 apresentaram autorização de acesso, e 1 não apresentava autorização de acesso, mas foi possível acessá-lo por meio de um outro repertório. Desta forma 6 trabalhos foram utilizados nessa revisão sistemática.

Resumindo de um total de 46 resultados encontrados foi possível acessar somente 26 deles. Foi feito o download e a leitura dos resumos dos trabalhos acessados, a fim de incluir apenas os que se mostraram intimamente relacionados com o assunto da busca. Com a leitura foi constatado que alguns trabalhos estavam repetidos, pois foram apresentados como resultado para palavra-chave diferentes. Além disso como a leitura dos resumos também foi concluído que alguns trabalhos apesar de apresentar as palavras-chaves, o assunto abordado por eles não se encaixava na temática da investigação. Dessa forma das 26 produções científicas, somente 18 foram mantidas após a leitura dos resumos.

### **3.1.5 Atividade 5 – Compor o portfólio de artigos**

Após efetuar a leitura de todos os trabalhos na íntegra, foi feita mais uma filtragem, mas, no entanto, nenhuma das produções selecionadas anteriormente foram excluídos, pois todos demonstraram aderência à temática da investigação. Sendo assim de todos os documentos disponíveis na base de dados da CAPES apenas 18 deles foram usados nesse processo de revisão sistemática.

## **3.2 Fase 2 – Análise**

Nessa fase foi feita uma organização, combinação, e agrupamento dos dados levantados com o auxílio do *Software Excel*. Dessa forma foi possível consolidar as informações em mãos sobre o assunto. Esses dados agrupados por:

- Título
- Autor
- Orientador
- Ano de publicação;
- Região que foi realizado a pesquisa;

- Estado que foi realizada a pesquisa;
- Regiões no Brasil que foram identificados com solos expansivos;
- Granulometrias dos solos expansivos;
- Limites de consistência dos solos expansivos;
- Índice de plasticidade dos solos expansivos;
- Índice de consistência dos solos expansivos;
- Índice de atividade dos solos expansivos;
- Tipo de solo Segundo SUCS e *TRB*;
- Argilominerais presente nos solos expansivos;
- Percentagem de expansão dos diferentes solos expansivos;
- Pressão de expansão dos diferentes solos expansivos;
- Ensaio realizados pelos autores;
- Métodos de identificação de solos expansivos.

### **3.3 Fase 3 – Síntese**

Nessa penúltima fase foi condensado os conhecimentos adquiridos através dos dados coletados e organizados, sob forma de gráficos e tabelas que permitem extrair novos conhecimentos a partir dos resultados apresentados pelas pesquisas anteriores.

### **3.4 Fase 4 – Escrever**

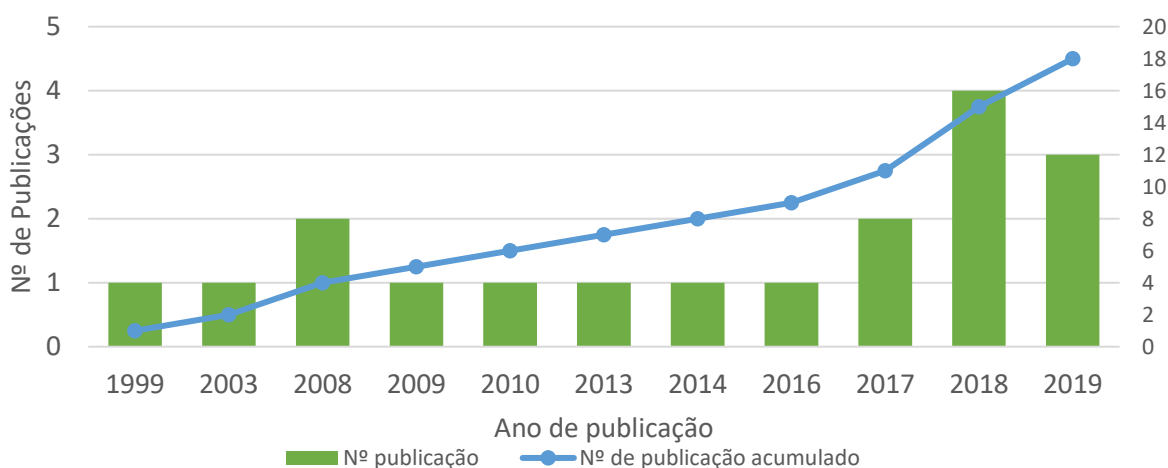
Nessa última fase, mediante as tabelas e gráficos elaboradas na fase anterior, foi realizada escrita científica sobre o tema estudado, expondo as tendências e lacunas presentes nos periódicos escolhidos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Publicações ao longo dos Tempos

Nos seus 20 anos de existência o banco de teses e dissertações da CAPES, se destaca como o maior acervo de publicações científicas do País, uma vez que o Portal de Periódicos conta com mais de 49 mil títulos que são acessados por mais de 400 IES (Instituição de Ensino Superior) (gov.br, 2020). Mas quando o assunto é voltado a solos expansivos pode ser notado pela Figura 4.1 que temos um valor abaixo de 20 publicações disponíveis, número que pode ser considerado muito baixo especialmente considerando os problemas gerados por esse tipo de solo.

Figura 4. 1: Número de publicações ao longo dos anos



Fonte: Autor (2021)

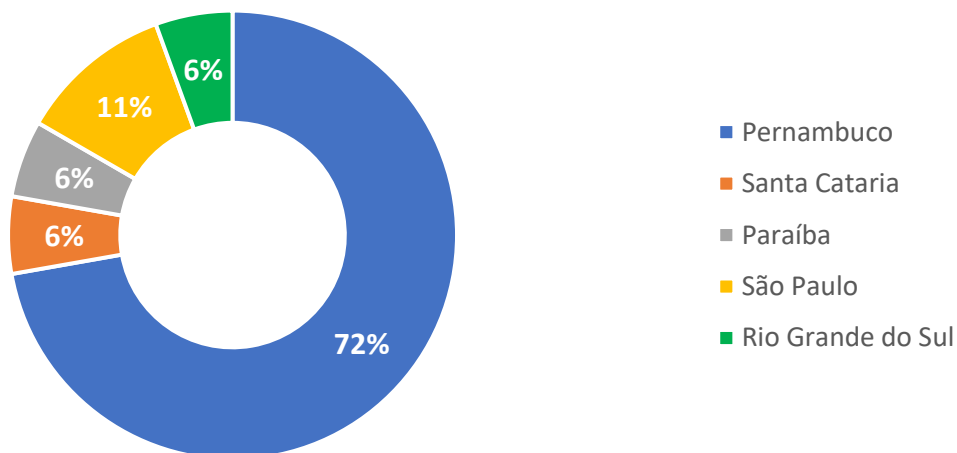
Entre os anos em que ocorreram publicações retratando questões relacionadas a solos expansivos, se destaca o ano de 2018 em que teve um total de 4 publicações (máximo até então). A partir da linha de frequência acumulada da Figura 4.1, pode se notar que nos últimos anos teve um leve aumento de número de publicações que abordam assuntos relacionados a solos expansivos.

A ocorrência de solos expansivos já vem sendo notado já há um bom tempo, e em várias partes do mundo, tanto que de acordo com Morais (2017), já foram identificados em todos os continentes do mundo. Mas no Brasil apesar das ocorrências, a preocupação em desenvolver estudos sobre, e o interesse em desenvolver métodos ou técnicas de tratamento eficazes para esse tipo de solo é ainda muito reduzido.

#### 4.2 Publicação por Estado em que foi realizado a pesquisa

Alguns pesquisadores de várias partes do país vêm abordando assuntos relacionados a solos expansivos ao longo dos anos. Na Figura 4.2 encontra-se destacado o percentual de trabalhos sobre solos expansivos publicados em cada estado.

Figura 4. 2: Percentual de trabalhos publicados por estado



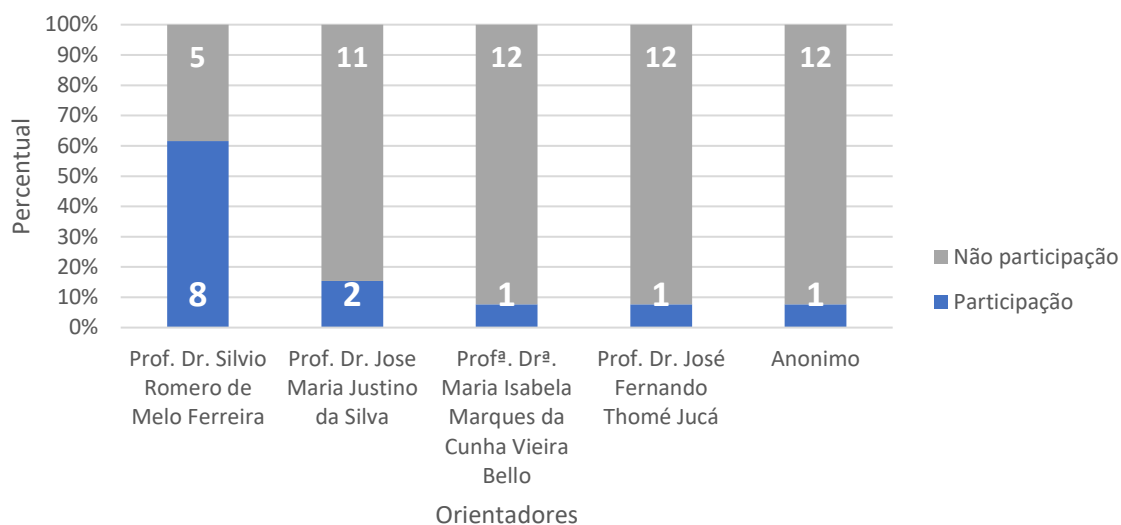
Fonte: Autor (2021)

De entre os 27 estados e 1 distrito federal, apenas 5 estados apresentaram publicações que retrata temáticas relacionados a solos expansivos. E de entre esses 5, o Pernambuco se destaca com uma contribuição de 72% em trabalhos publicados.

Pode-se dizer que o estado de Pernambuco apresentar um maior percentual de trabalhos publicados devido ao fato desse assunto ser mais próximo da realidade deles, uma vez que o interior do próprio estado de Pernambuco faz parte da região de clima semiárido do país. Clima esse que segundo Paiva (2016), é propício para a formação de solos expansivos. Devido a esse facto existem várias localidades dentro do estado que enfrenta problemas devido à presença marcante de solos expansivos.

Além disso, nota-se que a influência do orientador contribuiu e muito para que haja trabalhos voltados a questão de solos expansivos, pois assim como mostrado na Figura 4.3, dos 13 trabalhos publicados pelo estado de Pernambuco 8 deles foram desenvolvidos sob a supervisão do orientador Professor Doutor Silvio Romero de Melo Ferreira (currículo lattes disponível em: <http://lattes.cnpq.br/8035357058902261>). Esse professor desenvolve suas pesquisas na Universidade de Pernambuco e possui uma linha pesquisa voltado para solos expansivos e colapsáveis.

Figura 4. 3: Quantidade de trabalhos sobre solos expansivos supervisionado por cada professor orientador no estado de Pernambuco



Fonte: Autor (2021)

O professor Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira se encontra na posição de orientador em 62% dos trabalhos desenvolvidos no estado de Pernambuco. Em seguida aparece o professor Dr. Jose Maria Justino da Silva que orientou 15% dos trabalhos publicados em Pernambuco sobre solos expansivos. Com ambos 8% de trabalhos orientados encontra-se o professor Dr. José Fernando Thomé Jucá, e Drª. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello.

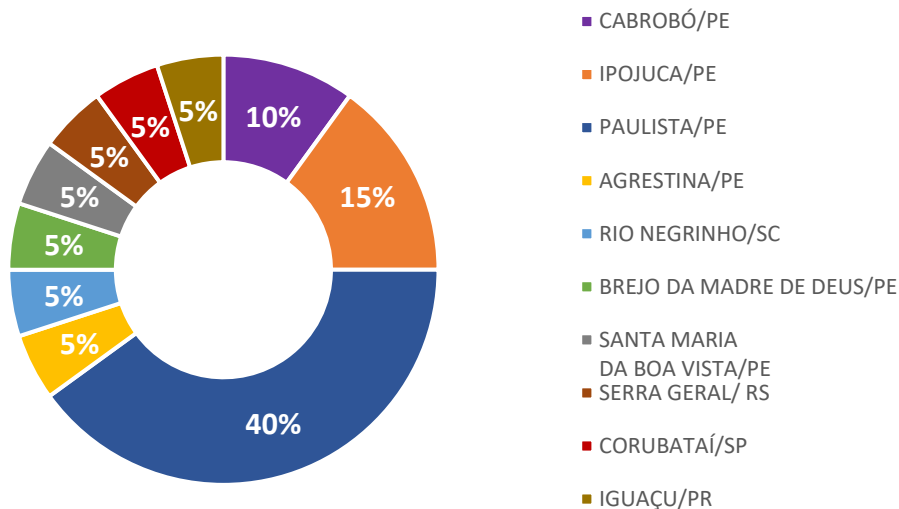
#### 4.3 Locais no Brasil que foram identificados com solos expansivos

No universo das bibliografias utilizadas no desenvolvimento dessa revisão sistemática, os solos mais estudados foram os do Pernambuco, e de entre os solos de Pernambuco, o solo da localidade de Paulista/PE apareceu com mais frequência nos estudos desenvolvidos, pois assim como mostrado na Figura 4.4, 40% dos trabalhos abordam esse solo.

Na Figura 4.3 mostrada anteriormente, encontra-se destacado os orientadores e a quantidade de trabalho orientado por eles. Dos trabalhos orientados pelo professor Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira 50%, estudaram as amostras do solo de Paulista/PE.

Todos os trabalhos orientados pelo professor Dr. José Fernando Thomé Jucá e pelo professor Dr. Jose Maria Justino da Silva, também envolveram solos de Paulista/PE. Esse solo também já foi estudado em trabalhos desenvolvidos no estado de Paraíba, com a orientação das professoras Dsc. Carina Silvani e Dsc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena.

Figura 4. 4: Percentual de estudos desenvolvido por localidade



Fonte: Autor (2021)

Seguido do solo de Paulista/PE, temos o solo de Ipojuca/PE com 15% e Cabrobó/PE com 10%. Era de se espera que a maioria dos solos estudados seria de localidades pertencentes ao estado de Pernambuco, pois é o estado que mais mostrou interesse em desenvolver trabalhos de pesquisa voltado a questão de solos expansivos.

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

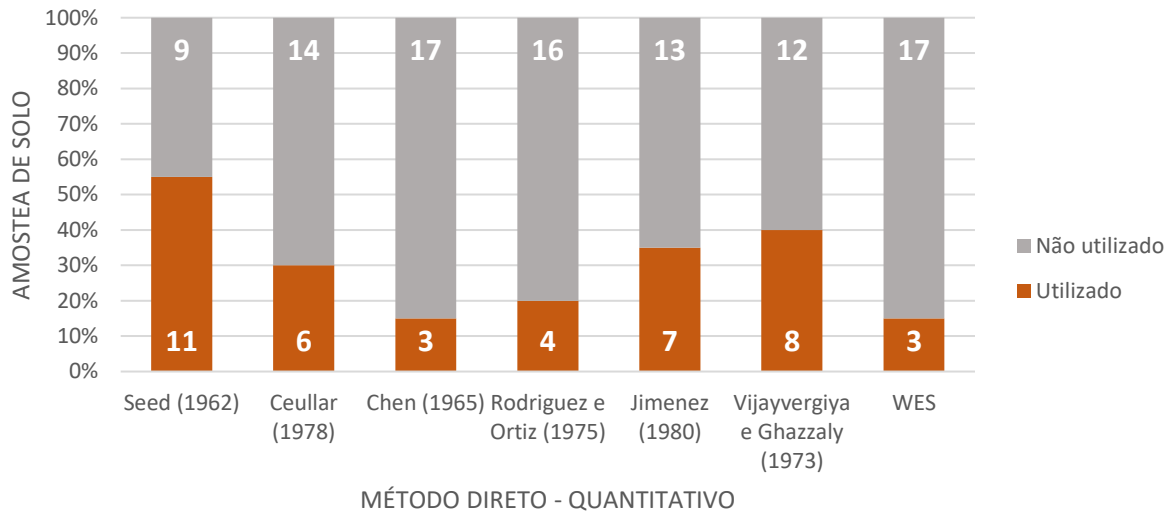
#### 4.4 Método de Identificação de solos expansivos

De entre os métodos de identificação se destacam os métodos diretos quantitativos e os métodos indiretos qualitativos.

##### 4.4.1 Métodos diretos – quantitativos

Na Figura 4.5 são apresentados os métodos diretos quantitativos utilizados nas pesquisas estudadas e suas percentagens de uso. Destaca-se que vários trabalhos utilizaram mais que um método de classificação.

Figura 4. 5: Métodos diretos quantitativos usados nas diferentes amostras estudadas



Fonte: Autor (2021)

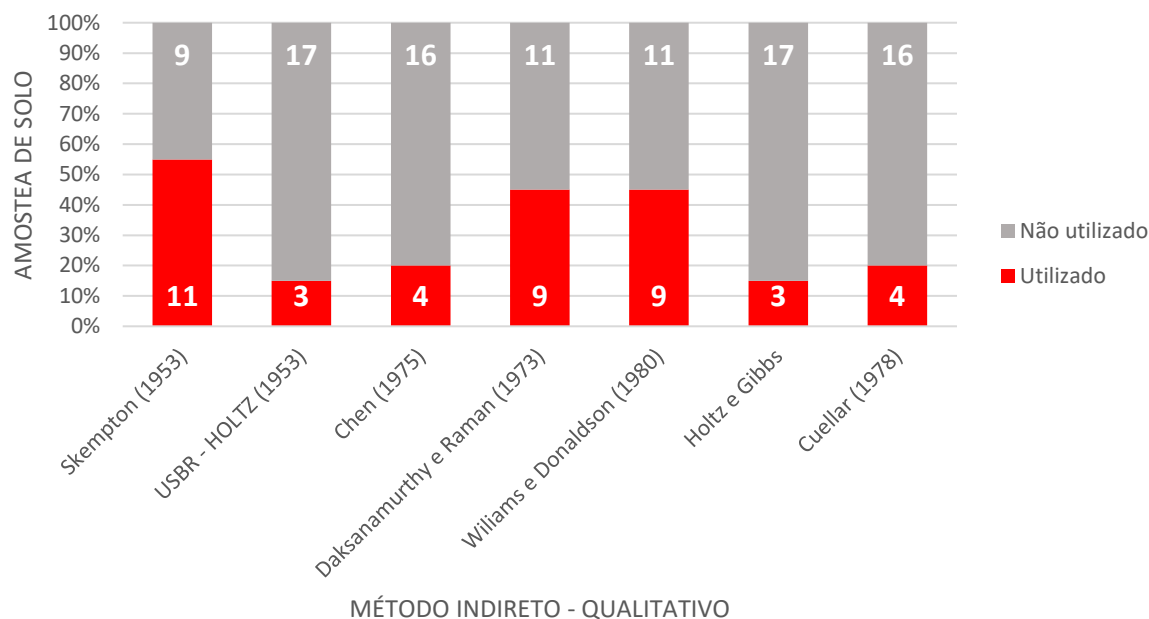
Os métodos diretos quantitativos mais usados são, o método de Seed (1962), o método de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), o método de Jimenez (1980) e o método de Ceullar (1978). Esses métodos foram usados por 55%, 40%, 35%, e 30% dos autores respectivamente.

Os métodos menos usados são, o método de Rodriguez e Ortiz (1975) usado em pelo menos 20% dos trabalhos, o método de Chen (1965), e o método de WES usado somente 15% dos autores.

#### 4.4.2 Métodos indiretos – qualitativos

Na Figura 4.6 é destacado a frequência do uso dos métodos indiretos qualitativos nas pesquisas estudadas. Novamente destaca-se que algumas pesquisas utilizaram mais que uma metodologia.

Figura 4. 6: Métodos indiretos qualitativos usados nas diferentes amostras estudadas



Fonte: Autor (2021)

Dos sete métodos indiretos qualitativos citados, três são mais usadas pelos autores. O método de Skempton (1953) que foi usado em 55% dos trabalhos, e o método de Daksanamurthy e Raman (1973), e Williams e Donaldson (1980), que ambos foram usados por 45% dos autores.

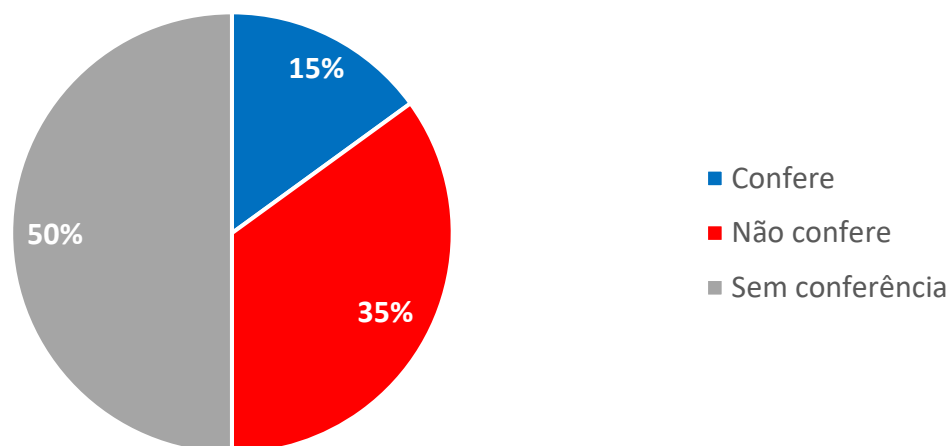
Dos métodos menos usados temos o método de Cuellar (1978), e Chen (1975), que foram usados somente por 20% dos autores, e o método de Usbr-Holtz (1953), e Holtz e Gibbs que foram usados apenas por 15% dos autores.

#### 4.4.3 Comparativo do método direto e indireto mais usado pelos autores

No decorrer do desenvolvimento do trabalho foi constatado que mesmo se tratando de uma mesma amostra por vezes os resultados dos métodos diretos e indiretos não coincidem. Nesse sentido foi feito a comparação entre os resultados obtidos por meio do método direto quantitativo e do método indireto qualitativo mais usado pelos autores, com o intuito de saber com que frequência os resultados desses métodos coincidem. Os resultados obtidos pelo uso do método direto quantitativo baseado no critério de Seed (1962), foi conferido com os resultados obtidos por meio do método indireto qualitativo baseado no critério de Skempton (1953). Os resultados foram expostos por meio do gráfico pizza presente na Figura 4.7.



Figura 4. 7: Resultado da correspondência entre o método direto quantitativo baseado no critério de Seed (1962) e o método indireto qualitativo baseado no critério de Skempton (1953).



Fonte: Autor (2021)

Foi notável que não foi possível conferir 50% dos trabalhos, pois em alguns trabalhos os autores não usaram um ou outro método. Dentre os que foi possível fazer a comparação apenas 15% coincidiram nos resultados. Logo estes dados indicam que para os solos estudados os métodos indiretos apresentam baixa eficácia, logo devem ser utilizados com cuidado nos solos brasileiros.

#### 4.5 Ensaios utilizados para avaliação dos solos expansivos

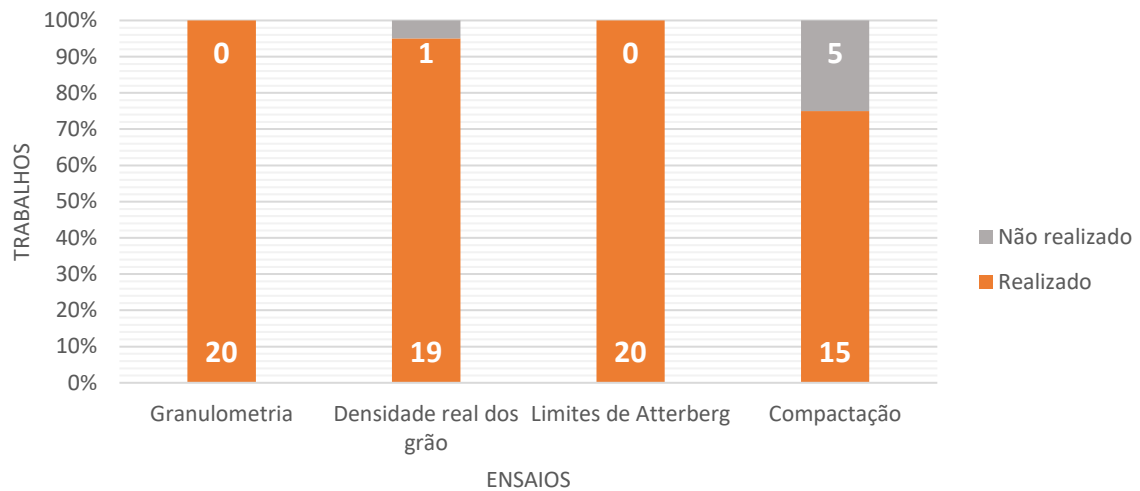
Para extrair informações e características das amostras de solo estudado, cada autor nas suas respectivas circunstâncias e perspectiva define uma serie de ensaios que ele julga necessário para atingir o seu objetivo de estudo. O usufruto dos ensaios normalmente depende do objetivo da pesquisa, da estrutura disponível, e até mesmo da relevância dos resultados obtidos por meio desses ensaios.

Para os estudos de solos expansivos praticamente todos os autores desenvolveram ensaios de caracterização física, química, mineralógica, da microestrutura do solo, e mecânica das amostras.

##### 4.5.1 Caracterização física

A Figura 4.8 mostras que se tratando caracterização física das amostras, a grande maioria dos autores fazem o uso de quatro principais ensaios: ensaio de granulometria, ensaio de densidade real dos grãos, ensaio de limites de Atterberg, e ensaio de compactação.

Figura 4. 8: Ensaio de caracterização física usados nas diferentes amostras estudadas



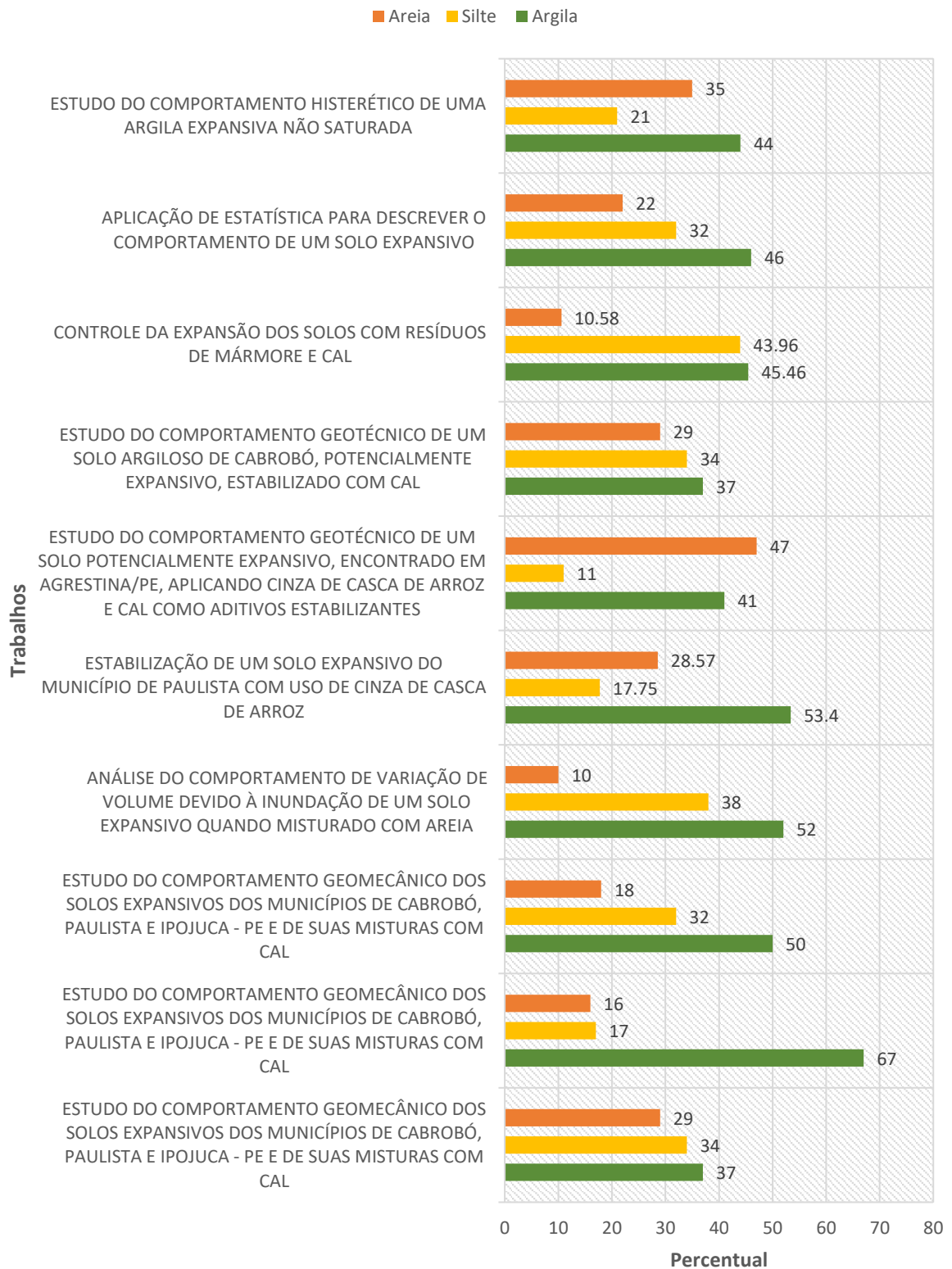
Fonte: Autor (2021)

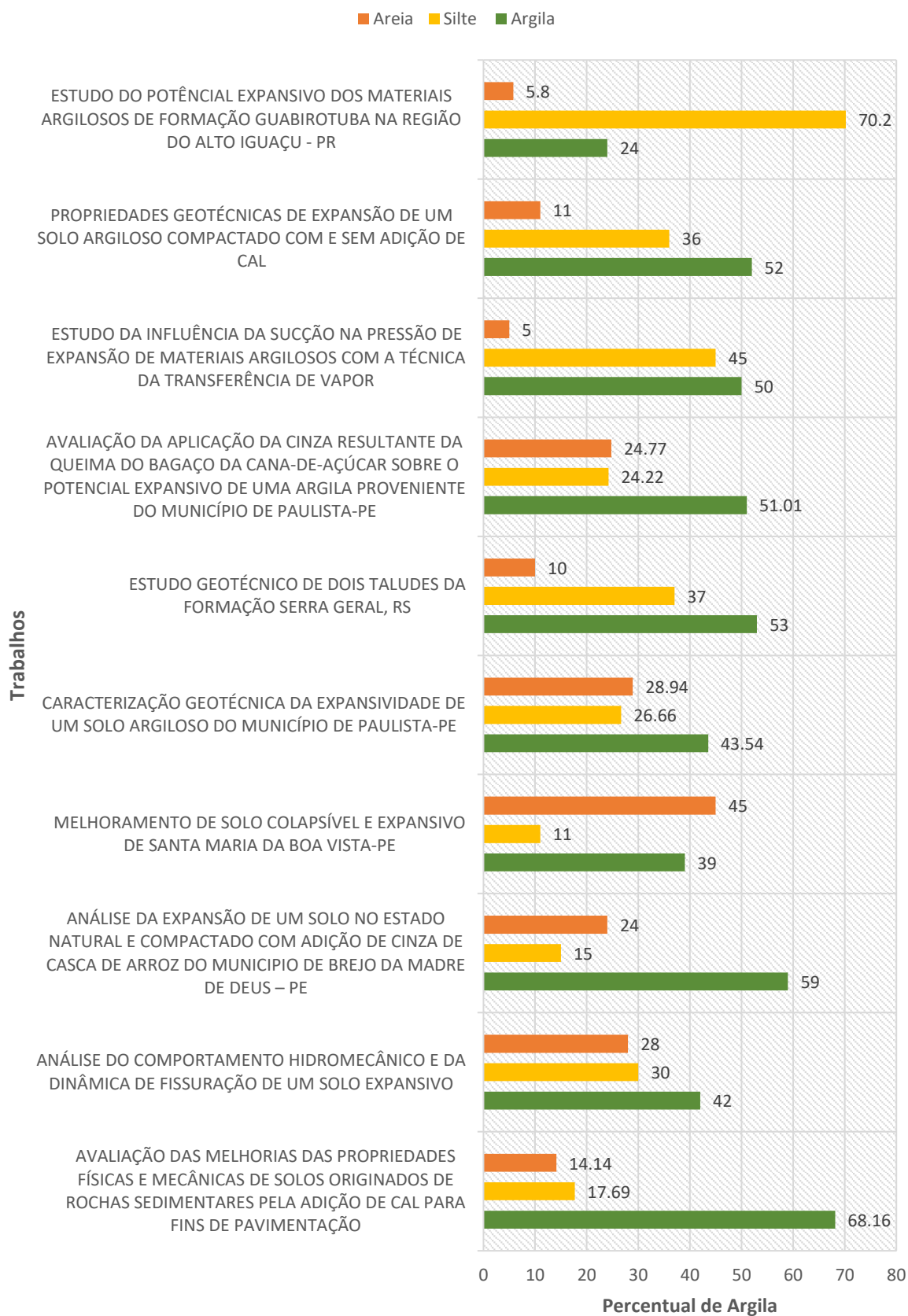
Dos quatro ensaios, dois deles, por serem ensaios mais simples com material disponível na maioria dos laboratórios, foram usados em 100% dos trabalhos: o ensaio de granulometria e o ensaio de limites de Atterberg. O ensaio de densidade real dos grãos foi usado em 95% desses trabalhos, e o de compactação foi usado apenas em 75% dos trabalhos.

#### 4.5.1.1 Granulometria dos solos expansivos

Relativamente a granulometria, os solos expansivos estudados em cada trabalho apresentaram valores variados. No que tange a percentual de pedregulhos, a grande maioria das amostras não apresentaram percentual algum desse material. Dessa forma a média do percentual de pedregulhos presentes nas amostras de solo expansivo estudado foi um valor ínfimo de 0,5% com um desvio padrão de 1,21%. Já no caso de percentual de areia não se pode dizer o mesmo, uma vez que a média desses percentuais foi um valor considerável de 22,1% com um desvio padrão de 12,06%. Para o teor de argila a média dos percentuais foi de 29,7%, com um desvio padrão de 14,08%. De entre as frações dos solos expansivos estudados a fração que apresentou um maior percentual foi a silte com uma média de 47,7% e um desvio padrão de 10,31%. O percentual de areia, silte, e argila presente em cada amostra estudado pode ser conferido na Figura 4.9.

Figura 4. 9: Percentual de Argila, Areia e Silte presente nas amostras de cada trabalho desenvolvido

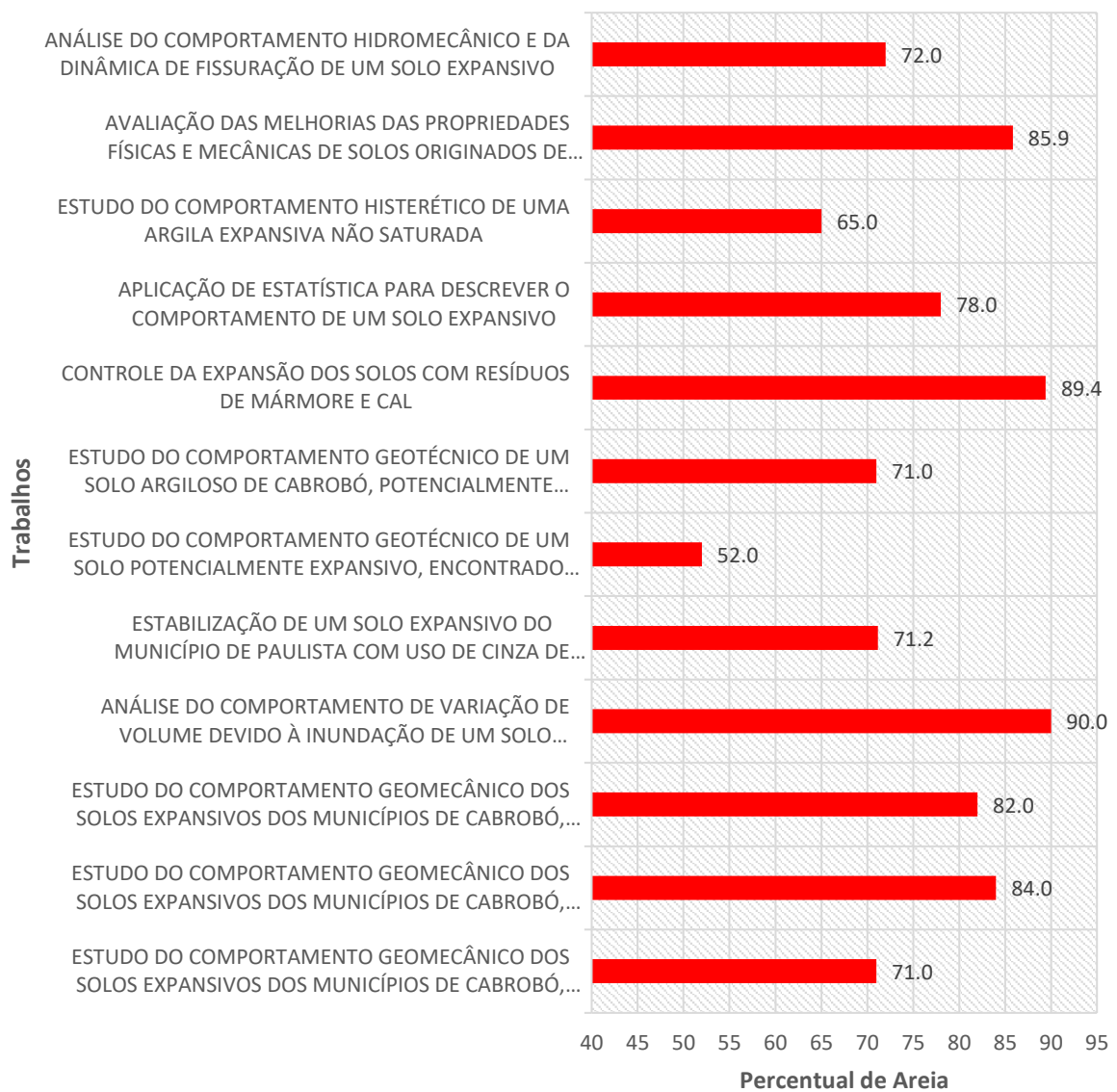


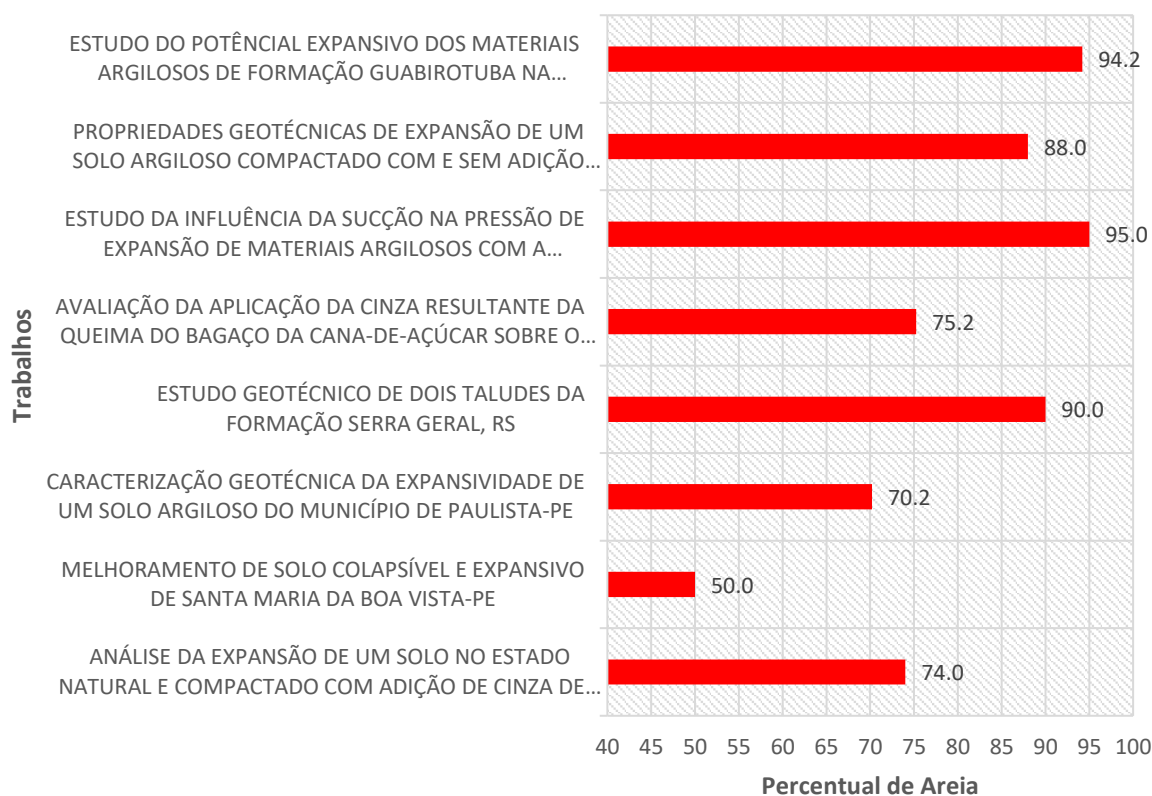


Fonte: Autor (2021)

De acordo com Paiva (2016), todos os solos expansivos possuem uma característica, que é um elevado percentual de partículas menores que 0,075 mm. Essa afirmação se confirmou, pois, a grande maioria das amostras estudadas nos trabalhos apresentaram elevado percentual de partículas menores que 0,075 mm, com exceção de duas amostras que apresentaram um percentual de 50% e 53%. Na Figura 4.10, encontra-se destacado o percentual de partículas menores que 0,075 mm de cada amostra estudado. A média das partículas menores que 0,075 mm foi de 77,4%, com um desvio padrão de 12,71%.

Figura 4. 10: Percentual de partícula menor que 0,075 mm presente nas amostras de cada trabalho desenvolvido





Fonte: Autor (2021)

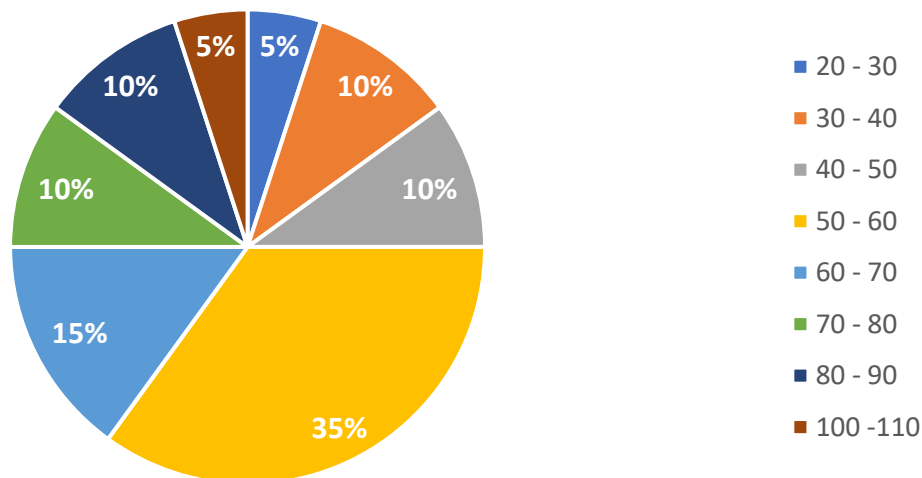
#### 4.5.1.2 Plasticidade e consistência dos solos expansivos

Os limites de consistência, o índice de plasticidade e o índice de atividade são parâmetros muito usados por diversos estudiosos como forma de determinar o potencial expansivo dos solos. De entre os métodos de identificação, temos os métodos indiretos qualitativos que fazem o uso de um conjunto de critérios na identificação de solos expansivos com base nesses parâmetros.

#### Limites de Liquidez dos solos expansivos

Nota-se a partir da Figura 4.11 que a grande maioria dos solos expansivos estudados apresentam um limite de liquidez variando de 50% a 60%.

Figura 4. 11: Disposição em percentagem das amostras em função do Limite de Liquidez



Fonte: Autor (2021)

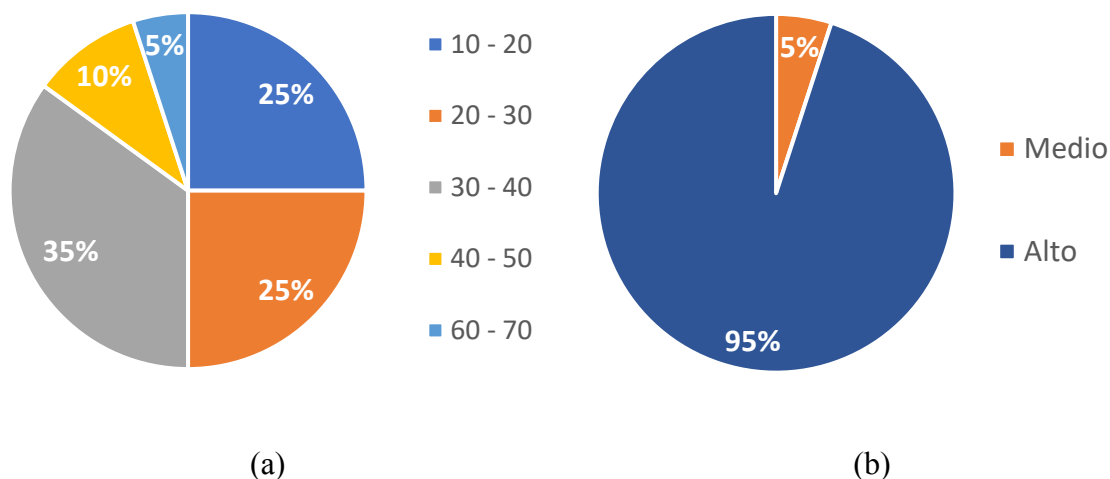
Segundo o critério de Chen (1975), abordado no Item 2.2.4.1 alinha f), 40% dos solos estudados apresentam um grau de expansão muito alto, 45% desses solos entram na classe dos solos de alto grau de expansão, 10% fazem parte da classe dos solos de médio grau de expansão, e apenas 5% fazem parte dos solos de baixo grau de expansão. Com isso se torna notável o potencial expansivo desses solos, segundo este critério, pois um total de 85% dos solos estudados apresenta um alto ou muito alto grau de expansividade, enquanto apenas.

Usando o critério de Daksanamurthy e Raman (1973) retratado no Item 2.2.4.1 alinha i), 25% dos solos apresentam um grau de expansividade muito alto, 50% exibem um grau alto de expansividade e os restantes 25% apresentam um grau médio à baixo de expansividade.

### **Índice de Plasticidade dos solos expansivos**

Pode ser observado através da Figura 4.12 (a) que maioria das amostras de solo (um total de 35%) apresentam um índice de plasticidade entra 30% a 40%. E com base na Figura 4.12 (b) pode-se constatar que 95% das amostras estudadas é classificada como altamente plásticas, e os restante 5% são classificadas como mediamente plásticas. No Item 2.1.2 encontra-se retratado a questão da classificação dos solos segundo o índice de plasticidade.

Figura 4. 12: (a) Disposição das amostras em função do Índice de plasticidade; (b) Classificação das amostras em função do Índice de plasticidade



Fonte: Autor (2021)

Segundo o critério de USBR – HOLTZ (1953) abordado no Item 2.2.4.1 alinha c), por volta de 25% das amostras podem ser caracterizadas como solo de potencial expansivo muito alto, em torno de 50% das amostras podem ser enquadrados no grupo de solo com o potencial expansivo alto, e por volta de 45% mostra um potencial expansivo médio. Apenas 10% das amostras podem ser categorizadas como solo de baixo potencial expansivo.

Também com base no critério de Cuellar (1978) apresentado no Item 2.2.4.1 alinha e), aproximadamente 25% das amostras apresentam um potencial expansivo muito alto, quase 40% exibem um potencial expansivo alto, e por volta de 30% mostra um potencial expansivo médio. Contudo 10% mostraram um potencial expansivo baixo.

Tendo em conta o critério de Chen (1975) abordado no Item 2.2.4.1 alinha f), em torno de 25% das amostras pode ser categorizado como solo de potencial expansivo muito alto, aproximadamente 70% das amostras enquadram na categoria de solo de alto potencial expansivo, por volta de 75% dessas amostras são consideradas como solo de potencial expansivo médio. Somente 5% entram na categoria de solo de baixo potencial expansivo.

Já de acordo com o critério de Holtz e Gibbs (1956) retratado no Item 2.2.4.1 alinha g), 30% das amostras podem ser consideradas como altamente expansivas, 60% podem ser categorizadas como altamente expansivas, e 75% podem ser enquadradas na categoria de solos



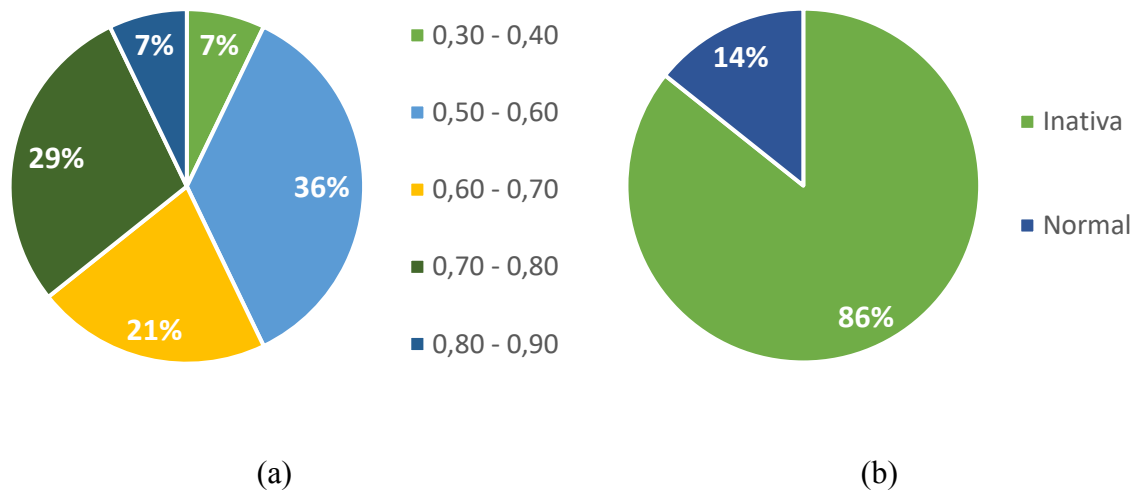
de baixa expansividade. No entanto 25% das amostras podem ser classificadas como solo de baixa expansividade.

Estes resultados nos permitem observar que a análise da expansão com base no índice de plasticidade apresenta resultados diferentes quando diferentes métodos de classificação são aplicados.

### Índice de atividade dos solos expansivos

Por meio da Figura 4.13 (a) pode-se observar que amostras cujo índice de atividade varia de 0,5 a 0,6 apareceram com maior frequência entre as amostras estudadas (um total de 36%), seguidas de amostras cujo índice de atividade varia de 0,7 a 0,8 que constituem um total de 29% das amostras estudadas. Já nas Figura 4.13 (b) se pode notar que a grande maioria das amostras (um total de 86%) se mostram ser inativas. Apenas 14% dessas amostras apresenta um nível de atividade normal. No Item 2.1.3 foi abordado a questão da caracterização do solo em função do índice de atividade.

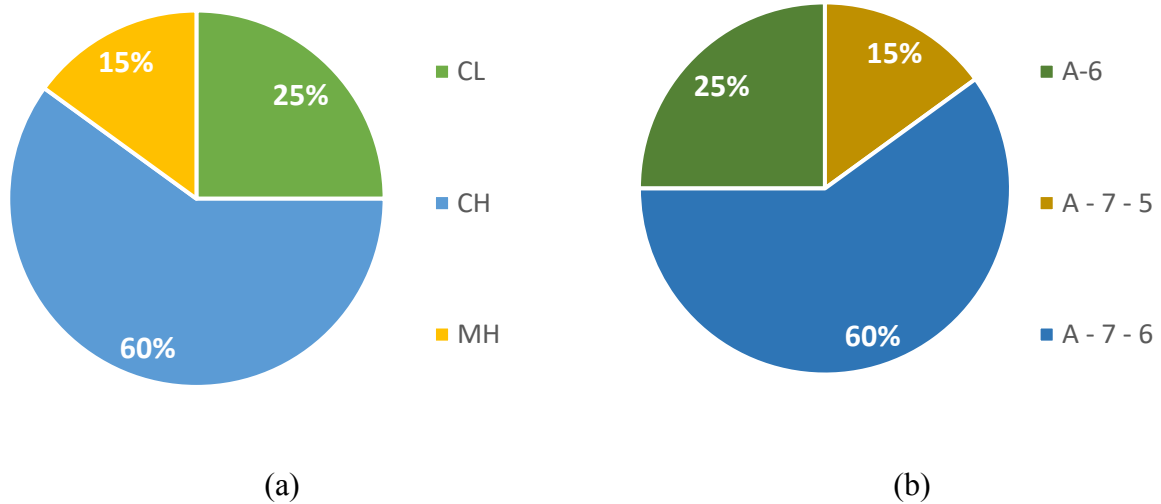
Figura 4. 13: (a) Disposição das amostras em função do Índice de atividade; (b) Classificação das amostras em função do Índice de atividade



Fonte: Autor (2021)

#### 4.5.1.3 Classificação dos solos Segundo SUCS e TRB

Figura 4. 14: (a) Classificação das amostras segundo SUCS; (b) Classificação das amostras segundo *TRB*



Fonte: Autor (2021)

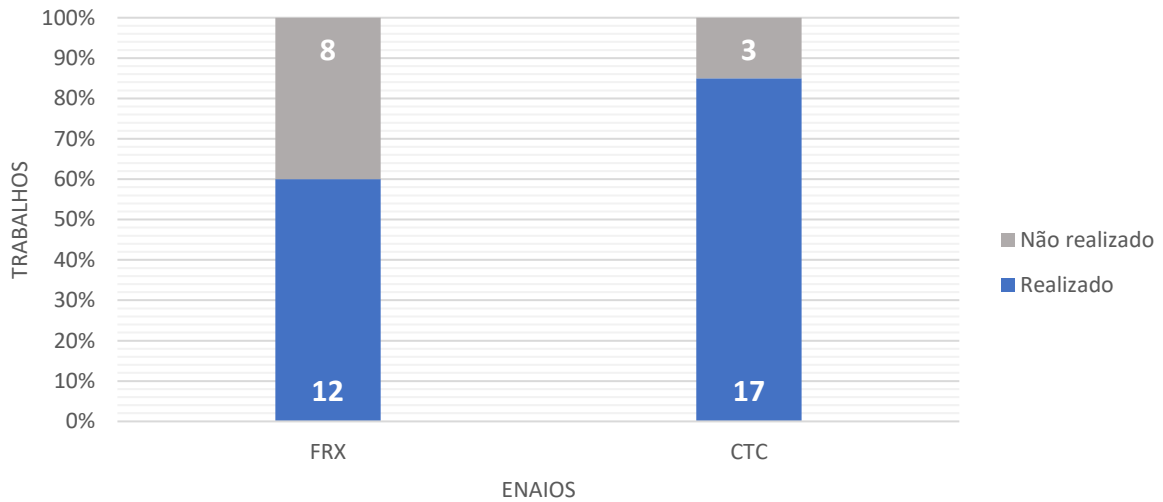
Das amostras de solos estudados, assim como mostrado na Figura 4.14 (a), segundo SUCS, 15% são classificados como solo siltoso de alta compressibilidade, 25% são classificados como solo argiloso de baixa compressibilidade, e os restantes 60% são classificados como solo argiloso de alta compressibilidade.

Na Figura 4.14 (b) se pode notar que os percentuais coincidiram para a classificação TBR, pois 15% das amostras são classificadas como solo do tipo A-7-5, 25% dessas amostras são classificadas como solo do tipo A-6, e os remanescentes 60% são classificadas como solo do tipo A-7-6.

#### 4.5.2 Caracterização química

Dos ensaios químicos se destacam dois. O ensaio de espectrometria de fluorescência de raio-X, e o ensaio de capacidade de troca catiônica. Na Figura 4.15 é possível ver os ensaios e as suas respectivas frequências de uso nos trabalhos.

Figura 4. 15: Ensaio de caracterização química usados nas diferentes amostras estudadas



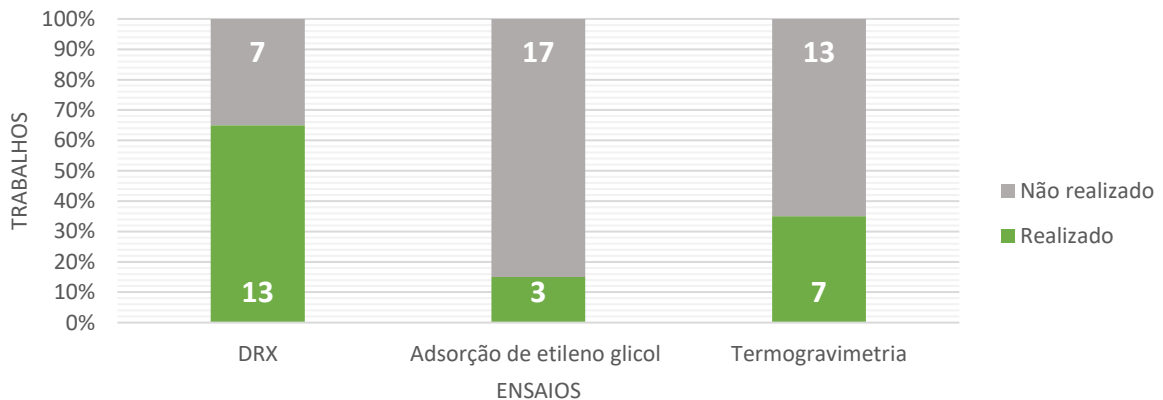
Fonte: Autor (2021)

De entre os dois ensaios é o da capacidade de troca catiônica que é usado com mais frequência, pois ele foi usado em 85% dos trabalhos, enquanto o ensaio de espectrometria de fluorescência de raio-X foi usado apenas em 60%.

#### 4.5.3 Caracterização mineralógica

Para a caracterização mineralógica das amostras de solo se destacarem três ensaios. O ensaio de difração de raio-X, ensaio de adsorção de etileno glicol, e o ensaio de termogravimétrica. Na Figura 4.16 encontra-se expostos esses ensaios e as suas respectivas frequências de uso nos trabalhos.

Figura 4. 16: Ensaio de caracterização mineralógica usados nas diferentes amostras estudadas



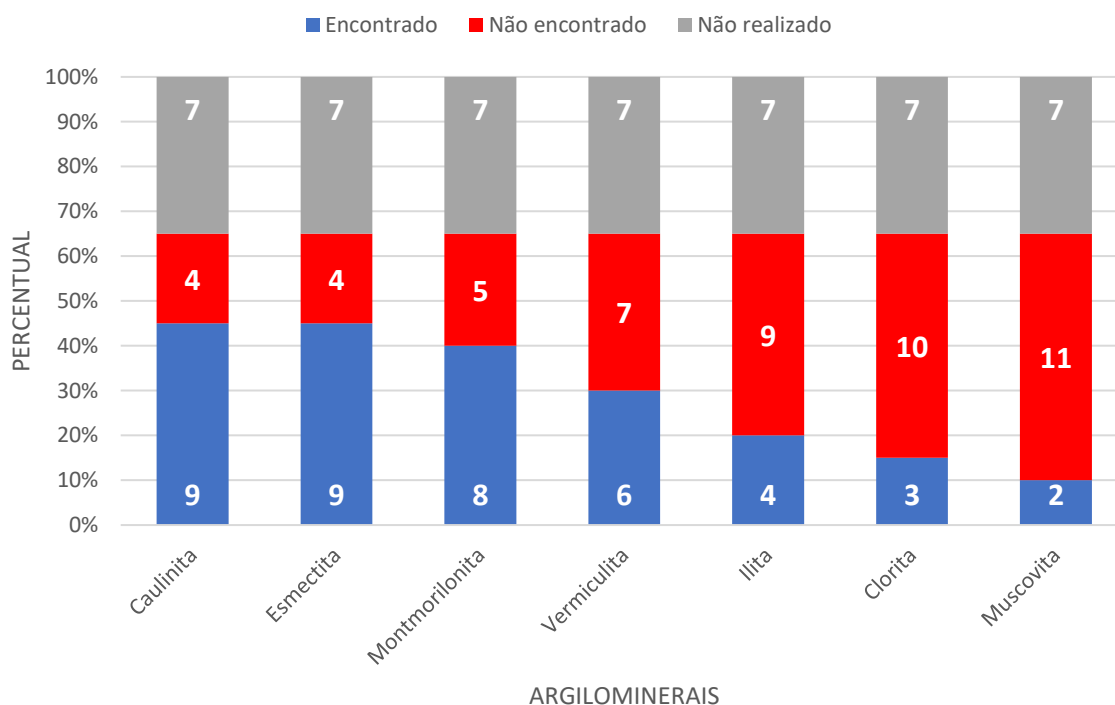
Fonte: Autor (2021)

Dos três ensaios o mais usado é o ensaio de difração de raio-X com um percentual de 65% de presença nos trabalhos, seguido do ensaio de termogravimétrica com 35%. O ensaio menos usado é o de absorção de etileno glicol que foi usado por apenas 15% dos autores. A caracterização química é importante para o entendimento dos argilominerais presentes responsáveis pela expansão.

#### 4.5.3.1 Argilominerais presente nos solos expansivos

Com os ensaios de caracterização mineralógica se pode perceber os diferentes minerais que compõem as amostras. Na figura 4.17 se encontram destacados uma lista de argilominerais e as suas respectivas aparições em amostras estudados em cada trabalho desenvolvido. Dado ao fato de que nem todos os autores desenvolveram o ensaio de caracterização mineralógico dos solos ao longo do trabalho de pesquisa, só foi possível exibir os argilominerais presentes em 65% das amostras estudadas.

Figura 4. 17: Percentual de argilominerais presentes nas amostras de solo estudados



Fonte: Autor (2021)

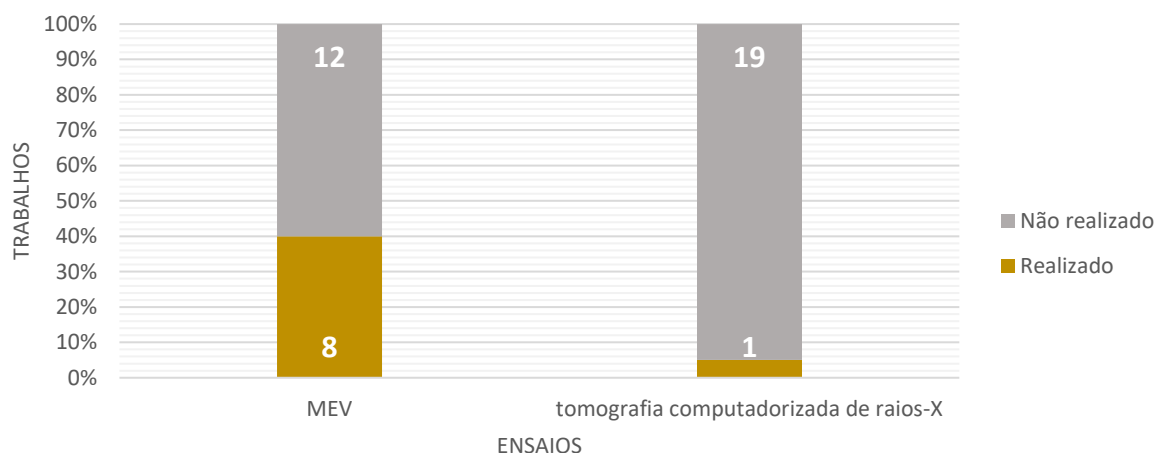
De entre os argilominerais presentes nas 65% amostras de solos expansivos caracterizado minerologicamente, se destacam a caulinita e a esmectita que se mostraram presentes em pelo menos 69% das amostras. De seguinte temos a montmorilonita que aparecem

em 62% das amostras. A vermiculita por sua vez foi notada em apenas 46% das amostras. Já a illita marcou presença em somente 31% das amostras. A clorita aparece em 23% das amostras. E por fim temos a muscovita que só foi notado em 15% das amostras. Desses argilominerais os responsáveis pela expansividade dos solos são: a montmorilonita, a illita, a vermiculita e a clorita. Mas detalhes sobre os argilominerais estão destacados no Item 2.2.1.

#### 4.5.4 Caracterização da microestrutura

Dos ensaios de microestrutura do solo se destacam apenas dois. O ensaio de microscopia eletrônica de varredura, e o ensaio de tomografia computacional de raio-X. Na Figura 4.18 encontram-se destacados os ensaios e as suas respectivas frequências de uso nos trabalhos.

Figura 4. 18: Ensaios de caracterização da microestrutura usados nas diferentes amostras estudadas



Fonte: Autor (2021)

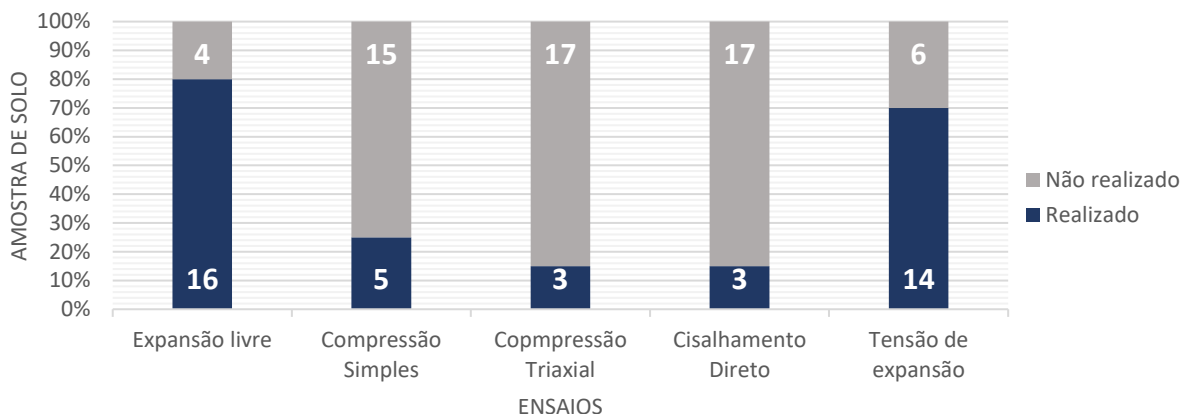
De entre os dois ensaios o mais usado é o da microscopia eletrônica de varredura, pois ele foi usado em 40% dos trabalhos, enquanto o ensaio de tomografia computacional de raio-X foi usado apenas em 5% deles.

#### 4.5.5 Caracterização mecânica

Para a caracterização mecânica dos solos expansivos os autores fizeram o uso de vários ensaios diferentes com intuito de entender o comportamento desses solos nas mais diversas circunstâncias. De entre todos os trabalhos apenas um não desenvolveu nenhum ensaio de

caracterização mecânica. A Figura 4.19 apresenta os ensaios usados pelos autores e as suas respectivas frequências de uso nos trabalhos.

Figura 4. 19: Ensaio de caracterização mecânica usados nas diferentes amostras estudadas



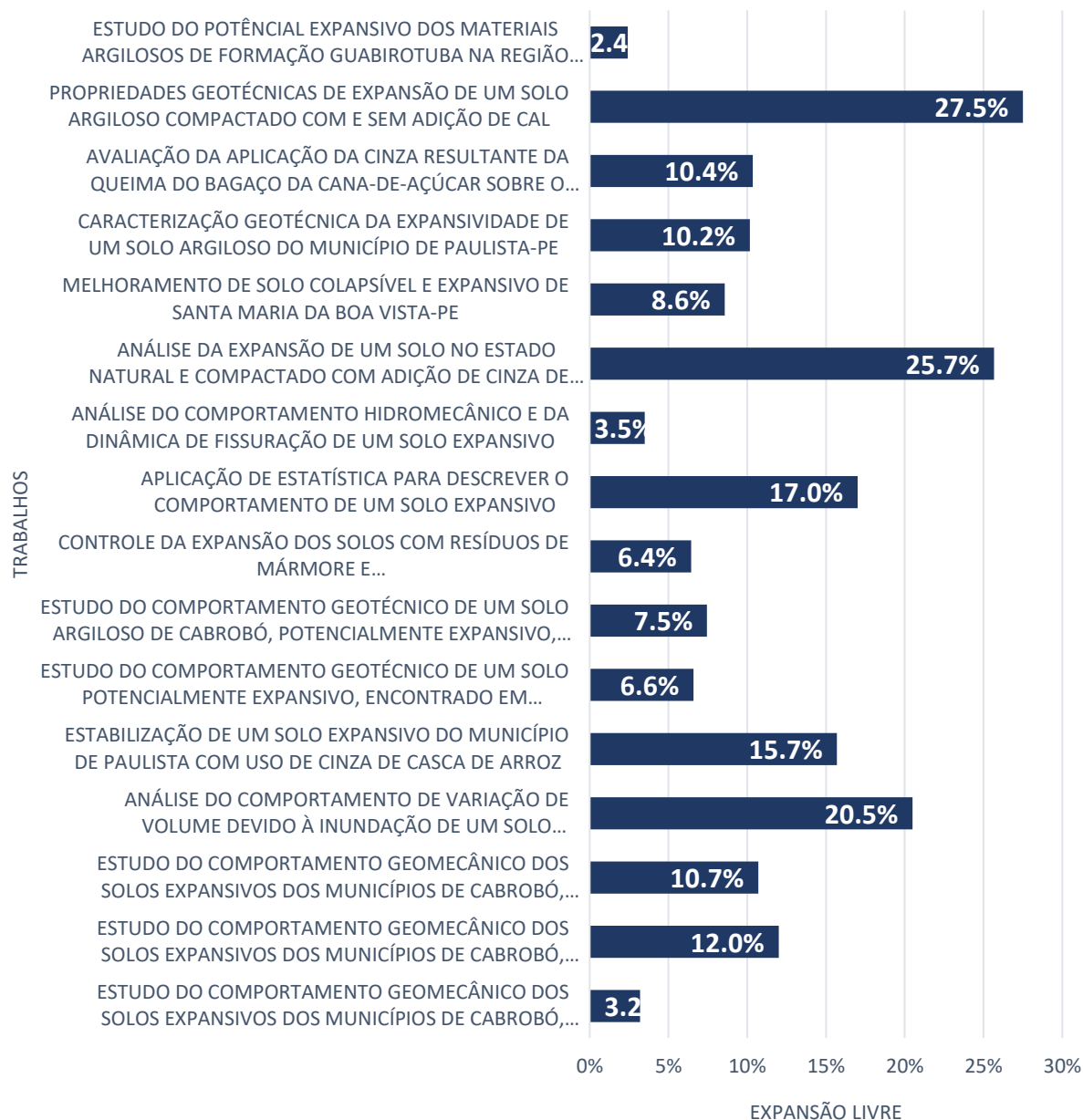
Fonte: Autor (2021)

Dos ensaios de caracterização mecânica, o ensaio de expansão livre se destaca dos demais, pois foi usado para caracterizar 80% das amostras de solo estudados nos trabalhos. Em seguida temos o ensaio de tensão de expansão, que também se destaca com 70% dos autores o usando para a caracterização das amostras. O ensaio de compressão simples por sua vez foi usado em pelo menos 25% dos trabalhos. Já o ensaio Compressão triaxial, e o ensaio de Cisalhamento direto, foram usados por apenas 15% dos autores no processo de caracterização das amostras. Dentre os ensaios, apenas os ensaios de expansão livre e o ensaio de pressão de expansão quantificam a capacidade expansiva dos solos, por esse motivo aparecem com mais frequência nos trabalhos desenvolvidos.

#### 4.5.5.1 Expansão Livre

Com os resultados obtidos nos 80% das pesquisas, foi desenvolvido gráfico com o percentual de expansão de cada amostra estudado nos trabalhos de pesquisa. Esse gráfico encontra-se apresentado na Figura 4.20.

Figura 4. 20: Percentual de expansão livre de cada amostra estudado



Fonte: Autor (2021)

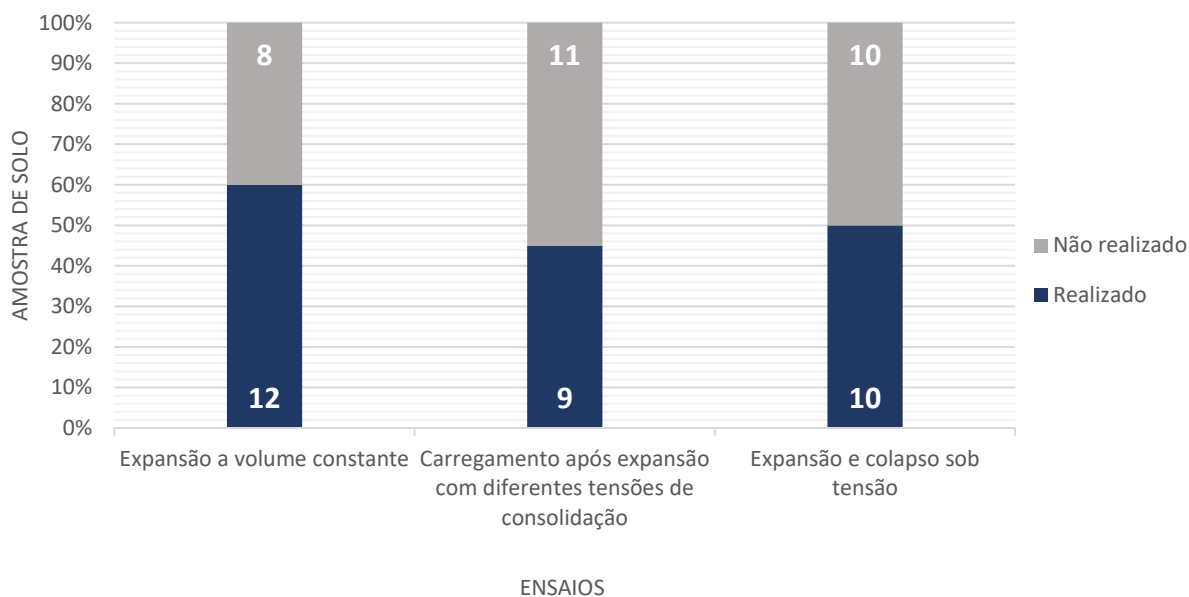
Analisando os resultados da expansão livre, foi possível constatar que esses solos apresentam uma expansão média de 11,7% com um desvio padrão de 7,7%. A expansão livre máxima registrado pelos autores foi de 27,5%.

#### 4.5.5.2 Tensão de expansão

A determinação da tensão de expansão segundo Barbosa (2013), é feito através de diferentes métodos envolvendo diferentes trajetórias de tensão. De entra esses métodos os que

mais se destacam nos trabalhos de pesquisa são: Expansão a volume constante, Carregamento após expansão com diferentes tensões verticais de consolidação, e Expansão e colapso sob tensão. Na Figura 4.21 é apresentado esses métodos e as suas respectivas frequências de uso nos trabalhos.

Figura 4. 21: Métodos de determinação da tensão de expansão



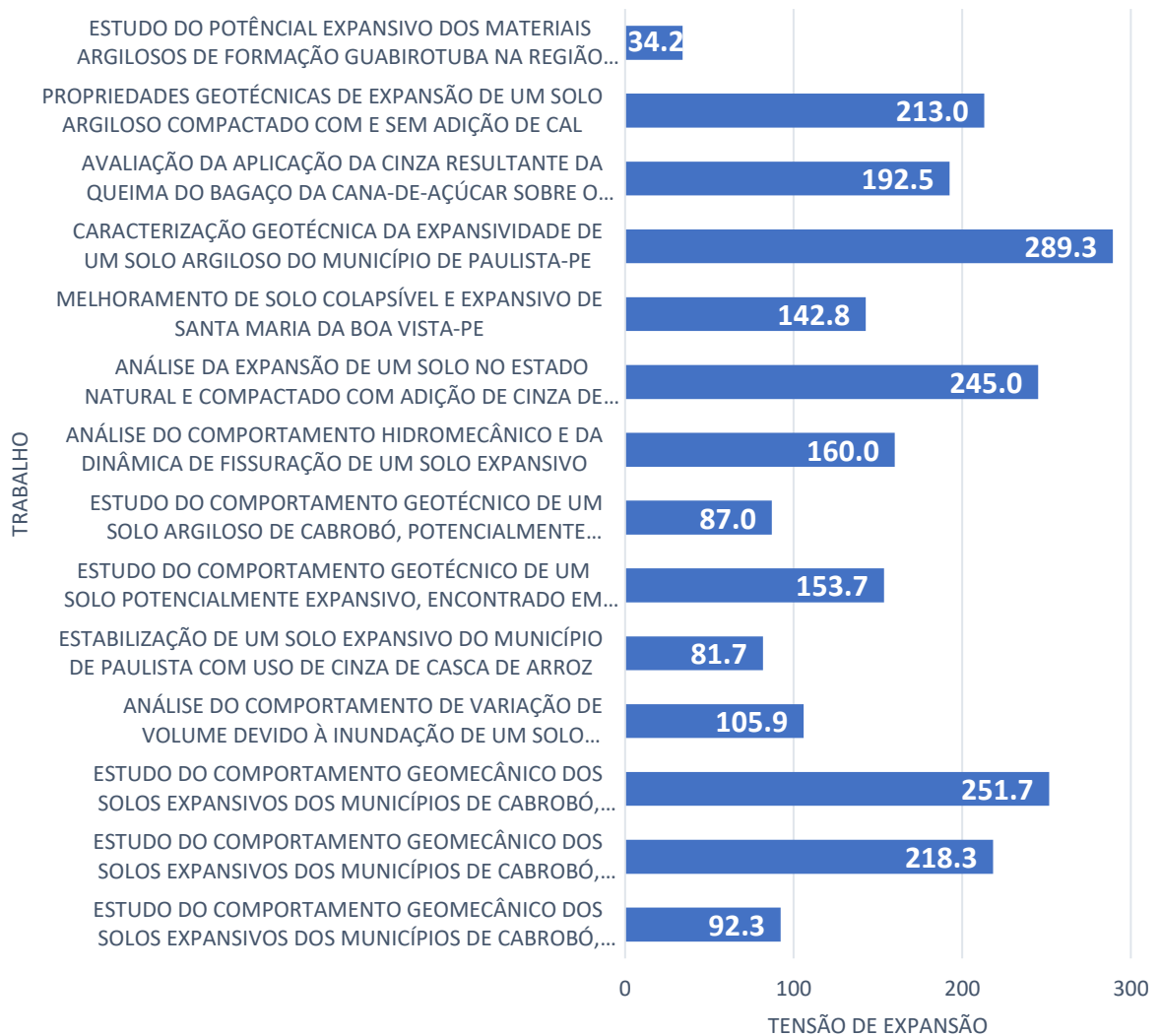
Fonte: Autor (2021)

De entre os métodos tem-se o método de expansão a volume constante que foi usado em 60% das pesquisas, em seguida aparece o método de expansão e colapso atingindo um total de 50% de uso nas pesquisas. Como 45% de uso nos trabalhos de pesquisa tem-se o método de carregamento após expansão com diferentes tensões de consolidação. Além desses três métodos que se destacam o método de Roa at al (1988) e o ensaio de Justos at al (1984), que foram ambos usados por somente 10% dos autores.

Alguns autores fazem o uso de mais de um método na determinação da tensão de expansão, e o resultado final é dado pelo cálculo da média dos resultados obtidos por meio de cada método. Na Figura 4.22 está indicado o resultado da tensão de expansão de cada amostra estudado.



Figura 4. 22: Tensão de expansão das amostras estudadas



Fonte: Autor (2021)

Observando os resultados da tensão de expansão, foi possível constatar que esses solos apresentam uma tensão de expansão média de 162 kPa com um desvio padrão de 75,8 kPa.

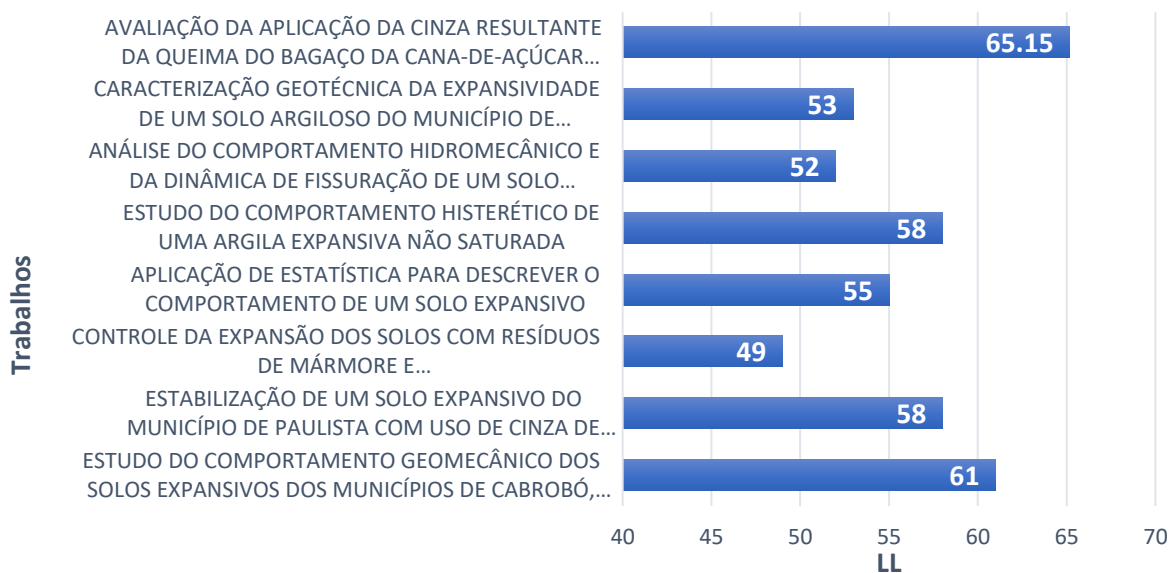
#### 4.6 Análise dos resultados dos estudos do solo de Paulista/PE

De todas as amostras estudadas 40% é constituído por amostras do solo de Paulista/PE. Por esse motivo foi feito a comparar os resultados obtidos por cada autor, com a intenção de entender com variam os resultados. Essa análise foi feita focando nos dados de caráter físico e mecânico dos amostra de solo.

#### 4.6.1 Características físicas

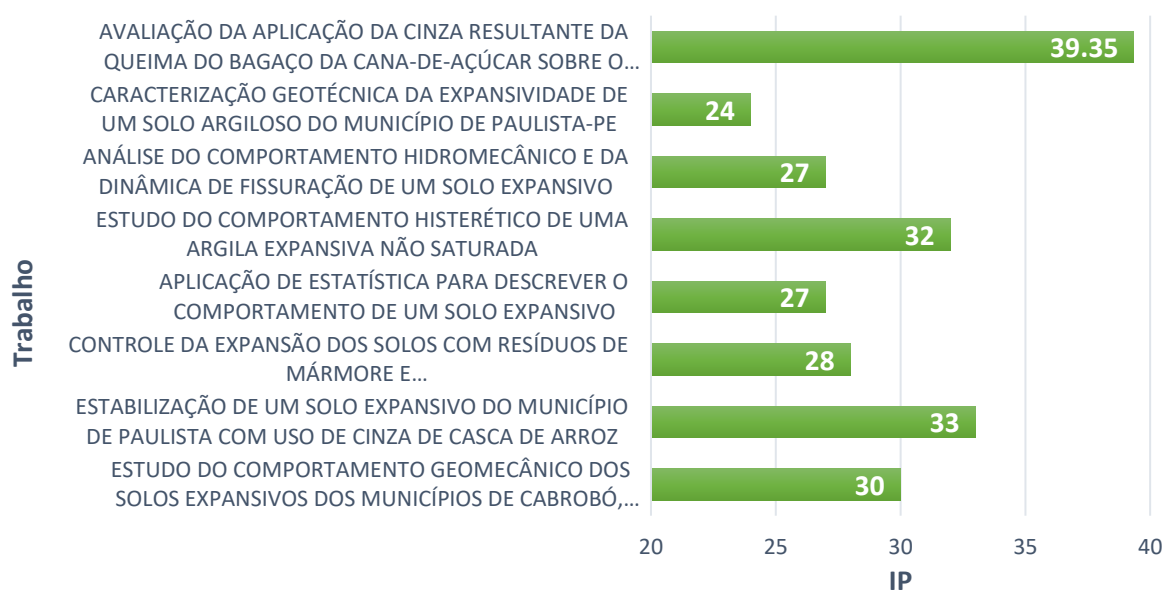
Nas Figura 4.23, 4.24, e 4.25 são comparados os valores do limite de liquidez, índice de plasticidade e índice de atividade respectivamente. O intuito dessa análise é comparar os resultados, entender com esses resultados variam, e decifrar os motivos para tal.

Figura 4. 23: Limites de liquidez obtido em cada trabalho desenvolvido usando a amostra do solo de Paulista/PE



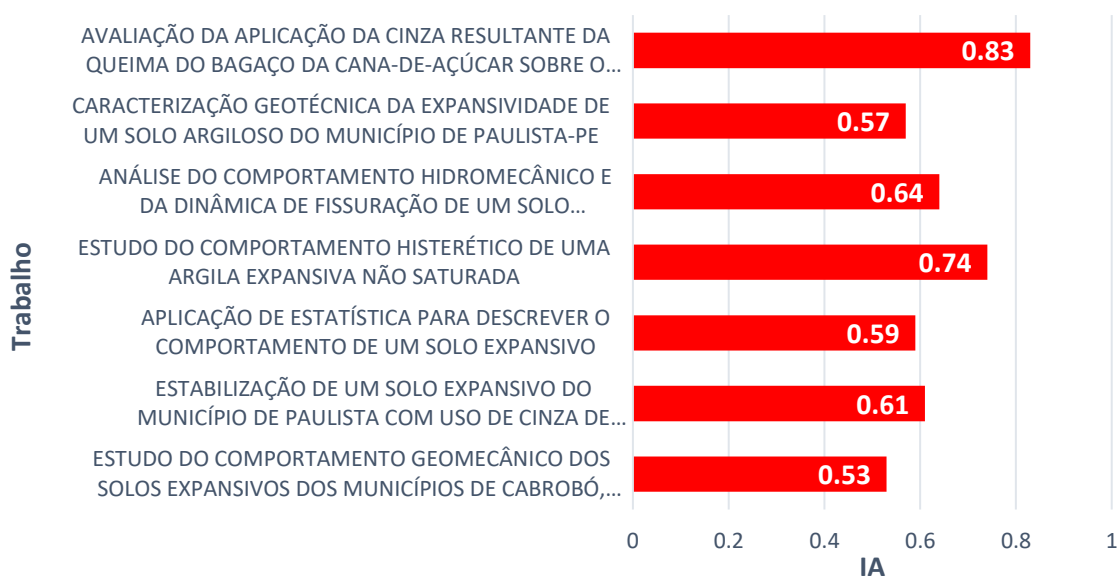
Fonte: Autor (2021)

Figura 4. 24: Índice de plasticidade obtido em cada trabalho desenvolvido usando a amostra do solo de Paulista/PE



Fonte: Autor (2021)

Figura 4. 25: Índice de atividade obtido em cada trabalho desenvolvido usando a amostra do solo de Paulista/PE



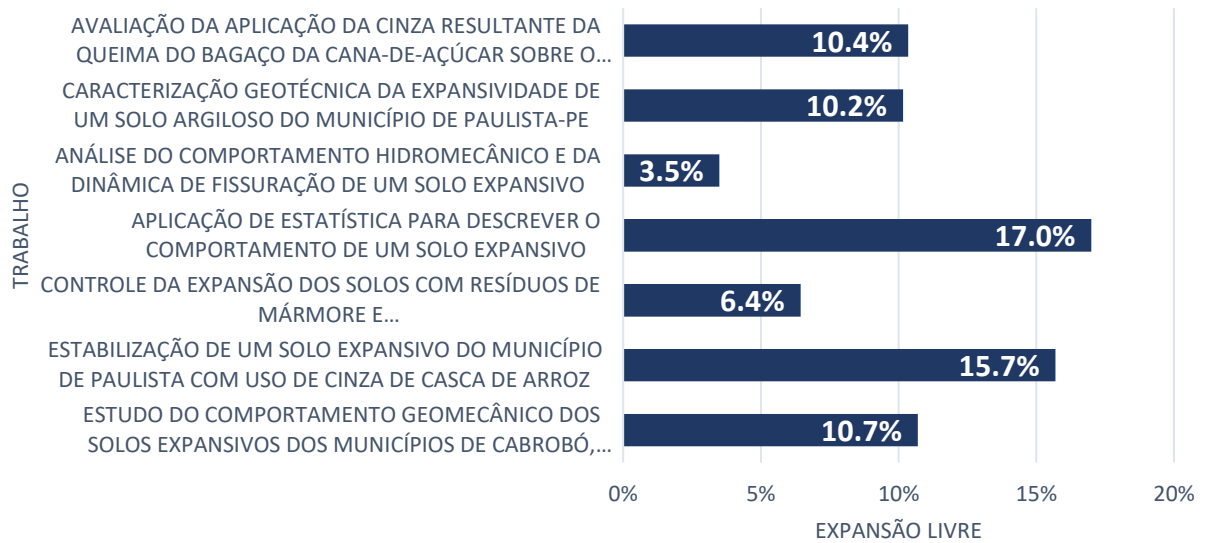
Fonte: Autor (2021)

Foi possível constatar que a média do limite de líquidos das amostras de solo de Paulista/PE é de 56,4% com um desvio padrão de 5,2%. Para o índice de plasticidade essa média é de 30% com um desvio padrão de 4,8%. Já o índice de atividade apresentou uma média de 0,64 com um desvio padrão de 0,11. Apesar de serem ensaios simples, dependem muito da percepção e experiência de quem os desenvolvem. Nesse sentido acredita-se que esses desvios padrão alto foi devido a fatores humanos.

#### 4.6.2 Características mecânicas

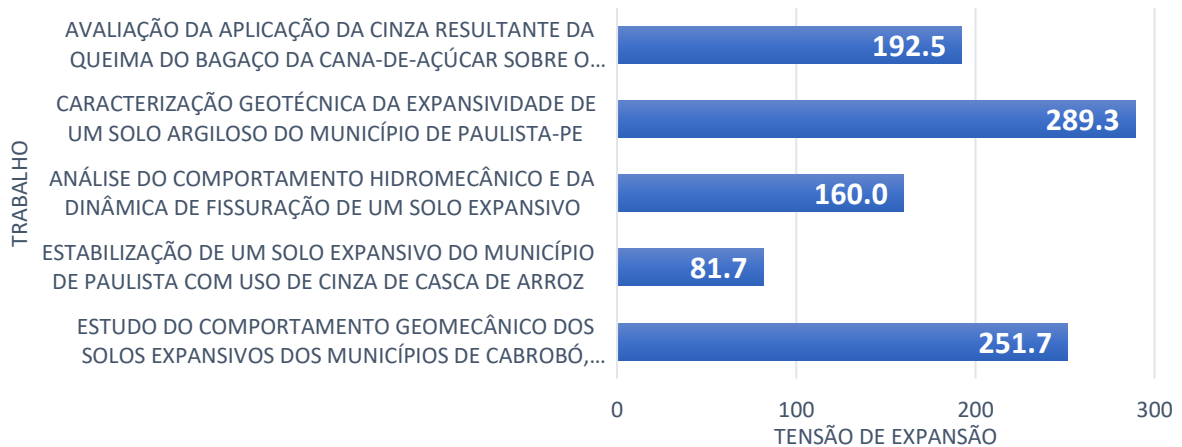
Nas Figura 4.26, e 4.27 são apresentados os valores da expansão livre das amostras, e tensão de expansão das amostras respectivamente. Pretende-se efetuar a comparação dos resultados, com o intuito entender com esses relatados variam, e compreender os motivos para tal variação.

Figura 4. 26: Percentual de expansão livre das amostras de solo de Paulista/PE



Fonte: Autor (2021)

Figura 4. 27: Tensão de expansão das amostras de solo de Paulista/PE



Fonte: Autor (2021)

Por meio dos trabalhos de pesquisa que desenvolveu ensaios de caracterização mecânica dos solos de Paulista/PE foi possível notar que o solo de Paulista/PE apresenta uma expansão média de 10,5% com um desvio padrão de 5%, e uma tensão de expansão de 195 kPa e um desvio padrão de 80,9 kPa. Esses ensaios são mais complexos, pois dependem muito do estado de conservação, e do preparo da amostra indeformada. Nesse sentido acredita-se que esses desvios padrão alto foi devido a uma provável alteração das características de campo da amostra no processo de desenvolvimento dos ensaios.

## 5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do método de revisão sistemática da literatura, tendo como base de dados o Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, foi possível observar que apesar da problemática dos solos expansivos ser pertinente, são poucas as pesquisas voltadas para essa temática desenvolvidas no Brasil. Dos poucos estudos, a maioria se concentra em solos das regiões do estado de Pernambuco que compõe o semiárido brasileiro. Entre as regiões que fazem parte do semiárido brasileiro, somente amostras de regiões do estado de Pernambuco foram usados como objeto de estudos. Além das amostras de solo de regiões de Pernambuco foram estudados amostra de solo de regiões como São Paulo, Santa Catarina, e Paraná, e Rio Grande do Sul, regiões esses que nem fazem parte do semiárido brasileiro.

Em relação aos métodos de identificação dos solos expansivos destaca-se os métodos diretos quantitativos, e os métodos indiretos qualitativos. Por serem métodos de identificação de solos expansivos se espera que se tratando da mesma amostra de solo, os resultados obtidos seriam os mesmos independentemente do método usado. No entanto isso não se procede, logo para os solos estudados, os métodos indiretos qualitativos foram considerados de baixa eficácia. Foi percebido também a necessidade da padronização desses métodos, pois cada um deles faz uso de critérios diferentes, o que acabam resultando em uma caracterização diferente para mesma amostra de solo.

Se tratado de estudo da capacidade expansiva dos solos e da caracterização deles para fins de engenharia civil, os ensaios de caracterização física, mineralógica, e mecânica das amostras, se mostraram de extrema relevância. Relativamente a granulometria, os solos expansivos estudados apresentam uma média 0,5% de pedregulhos, 22,1% de areia, 29,7% de argila, e 47,7% de silte. Foi perceptível também que os solos expansivos apresentaram, em sua maioria, alto teor de grãos menores que 0,075 mm. A maioria desses solos apresentaram um limite de liquidez variando de 50% a 60%, e são classificados como solos de altamente plásticas, porém com fração argila classificada como inativa. Segundo SUCS a maioria desses solos são classificados como solo argiloso de alta compressibilidade. Já segundo *TRB* a maioria são classificadas como solo do tipo A-7-6.

Em relação aos argilominerais, a caulinita, a illita, a clorita, e a muscovita se mostraram presentes em pelo menos 69%, 31%, 23%, e 15% das amostras respectivamente. Já os argilominerais expansivos como a esmectita, a montmorilonita, e a vermiculita se mostraram

presentes em pelo menos 69%, 62%, e 46% das amostras respectivamente. Relativamente a capacidade expansiva, os solos expansivos estudados pelos autores apresentam uma expansão média de 11,7% com um desvio padrão de 7,7%. O máximo registrado pelos autores foi um percentual de expansão de 27,5%. Esses solos também apresentam uma tensão de expansão média de 162kPa com um desvio padrão de 75,8kPa. A tensão de expansão máxima registrado foi de 289,3kPa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS, **Solos não saturados**. São Paulo, 2004.
- ATAIDE, Stive Osca Falcão. **Análise do comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com Areia**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- BARBOSA, Felipe Araújo Silva. **Análise do comportamento hidromecânico e da dinâmica de fissuração de um solo expansivo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2019.
- BARBOSA, Valquiria. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2013.
- BEZERRA, André Luis. **Análise da expansão de um solo no estado natural e compactado com adição de cinza de casca de arroz do Município de Brejo da Madre de Deus – PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2019.
- CAPUTO, Homero pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6ª edição. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1988.
- CARVALHO, José Camapum de. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1ª edição. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), 2015.
- CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, Sérgio Luis da. **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos**. 8º Congresso brasileiro de gestão e desenvolvimento de produto – CBGDP 2011, set. 2011.
- CONSTANTINO, Camila de Souza. **Estabilização de um solo expansivo do Município de Paulista com uso de cinza de casca de arroz**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2018.
- CORRÊA, Juliana Francisca. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

DOITYTEAM. Revisão sistemática: Aprenda de uma vez sobre esse processo. **Doity**, 2018. Disponível em: <https://blog.doity.com.br/revisao-sistemica-aprenda-de-uma-vez-sobre-esse-processo/>. Acesso em: 17 de dezembro de 2020.

Redação CCS/CAPES. Portal de Periódicos tem recorde de acessos. **gov.br**, 14/12/2020. Disponível em: <https://www.gov.br/capes/pt-br/assuntos/noticias/portal-de-periodicos-tem-recorde-de-acessos>. Acesso em: 19 de abril de 2021.

DONATO, Helena; DONATO, Mariana. **Etapas na Condução de uma Revisão Sistemática**. Revista Científica da Ordem dos Médicos: Acta Médica Portuguesa, 2019.

DRUMOND, Magno Augusto Motta Macieira. **Avaliação da aplicação da cinza resultante da queima do bagaço da cana-de-açúcar sobre o potencial expansivo de uma argila proveniente do município de Paulista-PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

FALAVIGNA, Maicon. O que são revisões sistemáticas?. **HTANALYZE**,2018. Disponível em: <https://www.htanalyze.com/blog/o-que-sao-revisoes-sistematicas/>. Acessado em 17 de dezembro de 2020.

FERENHOF, Helio Aisenberg; FERNANDES, Roberto Fabiano. **Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SSF**. Revista ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

GADELHA, Carlos Augusto Grabois, et al. **DIRETRIZES METODOLÓGICAS: elaboração de revisão sistemática e metanálise de ensaios clínicos randomizados**. 1ª edição. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2012.

JUNIOR, Miguel Angel Mello Silva. **Propriedades geotécnicas de expansão de um solo argiloso compactado com e sem adição de cal**. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambienta.

MARINHO, Rafaella Pereira. **Melhoramento de solo colapsível e expansivo de Santa Maria da Boa Vista - PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

MORAIS, Joanderson James Oliveira. **Caracterização geotécnica da expansividade de um solo argiloso do Município de Paulista - PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

NUNES, Marcus Soares. **Fundamentos de mecânica dos solos**. 15ª edição. Belo Horizonte, BH: Instituto Politécnico – IPUC, 2010.



PAIVA, Sergio Carvalho de. **Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos Municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca - PE e de suas misturas com CAL.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

PAIVA, William de. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 2009.

PERAZZOLO, Lilian. **Estudo geotécnico de dois taludes da formação Serra Geral, RS.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 2003.

PEREIRA, Eliana Martins. **Estudo do potencial expansivo dos materiais argilosos da formação Guabirotuba na região do Iguaço – PR.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 1999.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3ª edição. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2006.

SAMPAIO, R.F.; MANCINI M.C. **Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica.** Revista Brasileira de Fisioterapia, 2006.

SANTOS, Gerson Marques dos. **Estudo do comportamento histerético de uma argila expansiva não-saturada.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos; et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5ª edição. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SILVA, Jayne Araújo. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal como aditivos estabilizantes.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

SOUZA, Jéssica Siqueira de. **Mecânica dos solos.** Brasília, DF: NT editora; 2015.

SOUZA, Rafaela Faciola Coelho de. **Estudo da influência da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com a técnica da transferência de vapor.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2014.

TENÓRIO, Eduardo Antônio Guimarães. **Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e CAL.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2018.