

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOSCIÊNCIAS

RODRIGO SISTI RIBEIRO LEITE

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO POTENCIALMENTE
EXPANSIVO DE UM SOLO ARGILOSO DA FORMAÇÃO
RESENDE**

Trabalho de Formatura N°: 21/42

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pizzato

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho

São Paulo, 2022

RODRIGO SISTI RIBEIRO LEITE

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO POTENCIALMENTE
EXPANSIVO DE UM SOLO ARGILOSO DA FORMAÇÃO
RESENDE**

Monografia entregue à Comissão de Trabalho de Formatura (CTC), como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geologia pela Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pizzato

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Antônio
Medeiros Marinho

São Paulo, 2022

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos, que me deram todo suporte necessário e estiveram ao meu lado me apoiando durante toda vida, obrigado por tudo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Edilson Pizzato, que sugeriu o tema deste trabalho e esteve disposto a me orientar durante todo seu desenvolvimento.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho pelas conversas e conselhos durante a realização dos ensaios.

Ao grupo Egis Engenharia e Consultoria, pela gentileza de ceder um espaço no laboratório para confecção de parte dos ensaios. Agradeço aos engenheiros civis Diego Nogueira e Paulo Roberto Campos e aos técnicos de laboratório Orlando, Bruno e Gibson.

Ao Prof. Dr. Fábio Ramos Dias de Andrade e ao especialista em laboratório Dr. Flávio Machado de Souza Carvalho, responsáveis pelo Laboratório de Difractometria de Raios-X da USP.

Aos meus amigos e colegas de curso, que estiveram presente durante as realizações dos campos, relatórios, provas e seminários. Em especial aos amigos Emerson, Erílio, Gabriel, Ivan, Jonas, Leticia, Luiz, Marlon, Matheus, Michelli e Thais pela amizade, risadas, companheirismo, discussões e pelos “perrengues” enfrentados juntos durante o curso.

A universidade de São Paulo, em especial aos professores do instituto de geociências da USP (IGc), pelos anos de aprendizado.

RESUMO

Os solos expansivos apresentam como principal característica a variação volumétrica provocada pela alteração de umidade no solo. O fenômeno de expansão observada nestes solos pode provocar diversos problemas, principalmente em obras de engenharia, que se não devidamente considerados na execução dos projetos, provocam prejuízos financeiros e atrasos em obras. Diversos são os fatores que levam a expansão nos solos dito como expansivos, sendo os principais fatores a constituição mineralógica do solo, umidade, estado de tensões e clima. Este trabalho tem como objetivo a caracterização do potencial expansivo de um solo que compõe a Formação Resende localizada dentro da Bacia sedimentar de São Paulo, comumente chamado de “Taguá” pelos geotécnicos e a avaliação de um equipamento experimental para a obtenção da pressão de expansão, através de uma metodologia a volume constante. Para a caracterização do potencial expansivo do solo foi utilizado métodos diretos, que são os métodos que medem quantitativamente a expansão e métodos indiretos, que são aqueles que inferem o potencial expansivo. Os resultados obtidos pelos métodos indiretos comprovaram a presença de argilominerais expansivos no solo como esmectitas, caulinitas e illita, através de ensaios de consistência e granulométrico foi inferido um potencial expansivo de alto a muito alto. Os métodos diretos mostraram valores de pressão de expansão de 736,8 kPa e 1154,32 kPa para amostras indeformadas a umidade de 8,98%. O equipamento experimental utilizado, mostrou-se inadequado para obtenção de dados de pressão de expansão, durante os ensaios não foi registrado variações de pressão para o mesmo material que pelos ensaios convencionais mostraram alto valor de pressão de expansão.

Palavras-chave: Solo expansível. Pressão de expansão. Formação Resende. Geotecnia.

ABSTRACT

Expansive soils have as a main characteristic the volumetric variation caused by the change in soil moisture. The phenomenon of expansion observed in these soils can cause several problems, mainly in engineering works, if not properly considered in the execution of projects, cause financial losses and delays in works. There are several factors that lead to expansion in soils known as expansive, the main factors being the mineralogical constitution of the soil, moisture, state of tension and climate. This work search to characterize the swelling potential of a soil that makes up the Resende Formation located within the São Paulo sedimentary basin, commonly called "Taguá" by geotechnicians and the evaluation of experimental equipment to obtain the swelling pressure through a constant volume methodology. To characterize the swelling potential of the soil, direct methods were used, which are the methods that quantitatively measuring the expansion, and indirect methods, which are those that infer the swelling potential. The results obtained by the indirect methods confirmed the presence of expansive clay minerals in the soil, such as smectites, kaolinites and illite, through consistency and granulometric tests, an swelling potential from high to very high was inferred. Direct methods showed expansion pressure values of 736.8 kPa and 1154.32 kPa for undisturbed samples at 8.98% moisture. The experimental equipment used proved to be inadequate for obtaining swelling pressure data, during the tests, the pressure variations were not recorded for the same material which by conventional tests showed a high value of swelling pressures.

Keywords: Expansive soil. Swelling Pressure. Resend Formation. Geotechnics.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	10
2. METAS E OBJETIVOS	11
3.TRABALHOS PRÉVIOS	11
3.1. Bacia sedimentar de São Paulo	11
3.1.1 Formação Resende	13
3.1.1.1 Taguá	13
3.2 Solos	13
3.2.1 Fase sólida	14
3.2.2 Fase líquida	14
3.2.3 Fase gasosa	14
3.1.2 Solos expansivos	14
3.1.3 Argilominerais	17
3.1.3.1 Grupo das Caulinitas	20
3.1.3.2 Grupo das Esmectitas	21
3.1.3.3 Grupo das Vermiculitas	22
3.1.3.4 Grupo das Micas (Ilita)	22
3.1.3.5 Argilas interestratificados	23
3.1.3 Mecanismos de expansão dos solos expansivos	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1. Coleta das amostras	24
4.2. Métodos de identificação e quantificação da expansividade	27
4.3. Técnicas indiretas	28
4.3.1. Difração de Raio – X	28
4.3.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	30
4.3.3. Limites de Atterbeg	31
4.3.4. Ensaio granulométricos	32
4.3.5. Caracterização do potencial de expansão por parâmetros indiretos	32
4.4 Técnicas diretas	33
4.4.1 Ensaio de Expansão Livre	33
4.4.3 Ensaio edométrico de pressão expansão a volume constante	35
4.4.4 Ensaio experimental de pressão de expansão a volume constante	36
5. RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES	38
5.1. Difração de raios X (DRX)	38

5.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	41
5.3 Ensaio granulométrico	43
5.4 Limites de Atterberg.....	44
5.5 Caracterização do potencial de expansão por parâmetros indiretos	45
5.6. Ensaio <i>de</i> Expansão livre	45
5.7 Ensaio edométrico de pressão expansão direta	45
5.8 Ensaio edométrico de pressão expansão a volume constante	46
5.9 Ensaio experimental de pressão de expansão a volume constante	47
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	47
7. CONCLUSÕES.....	49
8. SUGESTÕES.....	50
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudeste da Bacia de Taubaté.....	12
Figura 2: Estratigrafia e fases tectônicas das bacias sedimentares do Segmento Central do CRS.	12
Figura 3: Fases constituintes do solo.	13
Figura 4: Esquema simplificado dos arranjos de argilominerais do tipo 1:1 e 2:1.	18
Figura 5: Representação da estrutura e folha tetraédrica dos argilominerais.	18
Figura 6: Representação da estrutura e folha octaédrica dos argilominerais.	19
Figura 7: Estrutura de uma caulinita.	21
Figura 8: Estrutura de uma esmectita.	21
Figura 9: Estrutura de uma illita.	22
Figura 10: Estrutura de uma esmectita com moléculas de água e cátions de Na ⁺ entre as camadas TOT.	24
Figura 11: Área de coleta das amostras.	25
Figura 12: Interceptor Tietê 7 (ITi-7).	25
Figura 13: Seção geológica da Linha 6 Laranja do metrô e ponto inferido da coleta das amostras.	26
Figura 14: Armazenamento das amostras.	26
Figura 15: a) Amostra com coloração avermelhada b) Clasto milimétrico de quartzo.	27
Figura 16: Fenômeno de difração de raios X segundo a Lei de Bragg.	29
Figura 17: Tipos de energia emitidas na interação feixe de elétron e amostra.....	31
Figura 18: Classificação da expansibilidade de materiais argilosos. Fonte: Williams & Donaldson.	33
Figura 19: a) Célula edométrica; b) amostra indeformada.	34
Figura 20: Prensa de adensamento da marca Biopdi.....	34
Figura 21: a) Vista lateral da célula desmontada; b) Vista em planta da célula desmontada; c) Peças internas da célula (1- Anel fixador; 2- Suporte interno inferior; 3- Suporte interno superior; 4- Anel de amostra; 5- Tampa d) Célula com o suporte interno inferior e anel de amostra; d) Célula com suporte interno superior; f) Célula montada com o anel de fixação (sem a tampa).	36
Figura 22: Prensa hidráulica da marca Marconi.....	37
Figura 23: Ensaio experimental de pressão de expansão a volume constante.	38
Figura 24: Desenho esquemático teórico da execução do ensaio expansão a volume constante.	38
Figura 25: Amostra destorroadada.	39
Figura 26: Resultado do DRX pelo método em pó.	39
Figura 27: Amostra e material utilizado no método da lâmina de vidro.	40

Figura 28: Resultado do DRX pelo método de lâmina de vidro e glicolagem.	40
Figura 29: Imagem SE (esquerda) e BSE (direita) com ampliação de 180x.	41
Figura 30: Imagem SE e BSE da amostra resolução 1500x.	42
Figura 31: Imagem SE e BSE da amostra resolução 500x.	43
Figura 32: Composição química da amostra por EDS.	43
Figura 33: Gráfico de distribuição granulométrica.	44
Figura 34: resultado da expansão livre.	45
Figura 35: Resultado do Ensaio edométrico de pressão expansão direta.	46
Figura 36: Resultado do Ensaio edométrico de pressão expansão a volume constante.	46
Figura 37: Resultado do Ensaio edométrico de pressão expansão a volume constante pelo equipamento experimental.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades intrínsecas do solo que influenciam no potencial de expansão e contração.	15
Tabela 2: Propriedades extrínsecas do solo que influenciam no potencial de expansão e contração.	16
Tabela 3: Sistemática dos Minerais Argilosos.	20
Tabela 4: Método identificação e quantificação da expansividade dos solos.	28
Tabela 5: Posições referentes aos picos principais (direção <001>) dos argilominerais em condições normais (N), após glicolagem (G), aquecimento (A) e quartzo- α	30
Tabela 6: Métodos de identificação de solos expansivos.	32
Tabela 7: Métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos pela WES.	32
Tabela 8: Dimensões do equipamento em milímetros.	37
Tabela 9: Porcentagem granulométrica do solo.	44
Tabela 10 – Resultado dos Limites de Liquidez e Plasticidade.	44
Tabela 11: Classificação quanto a expansão por parâmetros indiretos.	45

1.INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento expansivo de determinados tipos de rochas e solos vem sendo continuamente estudado durante as últimas décadas. O interesse no desenvolvimento de técnicas capazes de identificar e caracterizar estes materiais está principalmente ligado ao setor de construção civil, que demonstra particular interesse no assunto. Solos expansíveis podem ser responsáveis por diversas complicações em obras de engenharia, devido principalmente à variação volumétrica abrupta ocorridas nestes materiais, que se não devidamente considerados na execução dos projetos, provocam danos e atrasos em obras, além de perdas socioeconômicas.

A ocorrência de solos e rochas com características expansivas é observada em diversas localidades do planeta, no Brasil muitos foram os estudos publicados sobre solos expansivos no Nordeste brasileiro, descrito em trabalhos como de Simões e Costa Filho (1981) e Ferreira (2010), também é possível observar pesquisas de solos expansivos nas regiões Sul, Sudeste e Centro Oeste, descritos nos trabalhos de Vargas (1973), Mahler (1994) e Pereira (2004), neste trabalho será abordado o comportamento potencialmente expansivo de um solo localizado dentro da Bacia de São Paulo, mais especificamente de um solo que compõe a Formação Resende comumente chamado de “taguá” pelos geotécnicos.

O comportamento expansivo dos solos está intimamente ligado a presença de determinados tipos de argilominerais no solo, que tendem a sofrer expansão em função do contato com a água. Os argilominerais que frequentemente são chamados de expansivos, são os do tipo 2:1 como a montmorilonita, vermiculita, esmectita e micas.

A expansibilidade do solo é um processo complexo e depende de diversas variáveis. Os principais fatores que influenciam a expansão nos solos são a composição mineralógica, umidade, estado de tensões e clima.

O solo analisado neste trabalho faz parte da Formação Resende, sendo está formação inserida no contexto geológico da Bacia sedimentar de São Paulo. Para a caracterização do potencial expansivo do solo, foram utilizados métodos diretos, que são aqueles que medem quantitativamente a expansão e métodos indiretos, que inferem o potencial expansivo.

No trabalho também é abordado a utilização de um equipamento experimental para a medição da pressão de expansão, utilizando como base uma metodologia que mede a pressão de expansão a partir de uma metodologia a volume constante.

2. METAS E OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a caracterização da expansividade de um solo pertencente à Bacia sedimentar de São Paulo, mais especificamente da Formação Resende comumente chamado de “taguá”, por meio de métodos diretos e indiretos utilizados para a caracterização da expansividade, os ensaios serão realizados conforme as normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e para os ensaios não normatizados pela ABNT foram utilizadas normas estrangeiras. Além do estudo do provável caráter expansivo do material, foi avaliado um equipamento experimental para uma metodologia de medição da pressão de expansão a volume constante como meio alternativo mais “prático” em relação aos métodos convencionais, uma vez que estes métodos necessitam de longos períodos de ensaio e uma atenção constante a adição de cargas.

3. TRABALHOS PRÉVIOS

3.1. Bacia sedimentar de São Paulo

A Bacia de São Paulo tem uma extensão no seu eixo maior de 75 km na direção ENE e extensão de 25 km no seu eixo menor, apresenta espessuras que atingem até 290 metros e está inserida no contexto geológico do Segmento Central do Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, Sant’Anna, Ferrari, 2004), com seu desenvolvimento durante o Paleógeno, o segmento central abrange quatro bacias sedimentares sendo elas as bacias de São Paulo, Resende, Taubaté e Volta Redonda conforme observado na Figura 1. Sua formação está relacionada a ação de um campo de esforços distensivos de direção NNW-SSE, responsável pela reativação de falhas de antigas zonas de cisalhamento de idade Proterozóica. A individualização das bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda está relacionada às fases de deformação posteriores à instalação do segmento central do Segmento Central do Rift Continental do Sudeste do Brasil

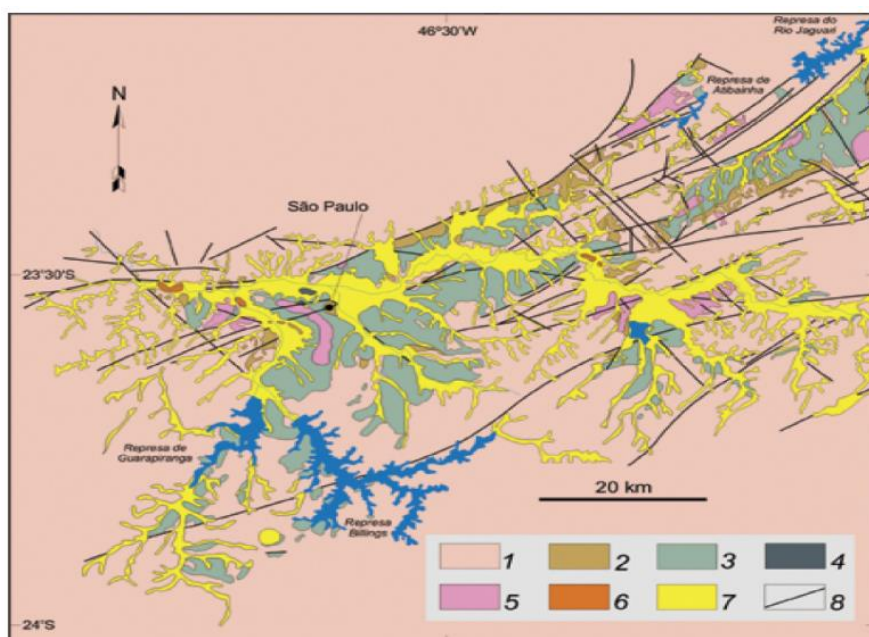


Figura 1 - Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudeste da Bacia de Taubaté: 1- Embasamento Pré-Cambriano; 2- Formação Resende (leques aluviais proximais); 3- Formação Resende (sistema de leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados); 4- Formação Tremembé; 5- Formação São Paulo; 6- Formação Itaquaquecetuba; 7- Sedimentos quaternários; 8- Falhas cenozóicas em parte reativadas do embasamento pré-cambriano. Fonte: Riccomini, Sant'Anna, Ferrari (2004).

O preenchimento sedimentar da Bacia de São Paulo pode ser dividido pelas Formações Resende, Tremembé e São Paulo (Grupo Tremembé) com idade de deposição paleógena e pelas Formações Itaquaquecetuba e Pindamonhangaba de idade de deposição neógena, conforme observado na coluna estratigráfica representada na Figura 2.

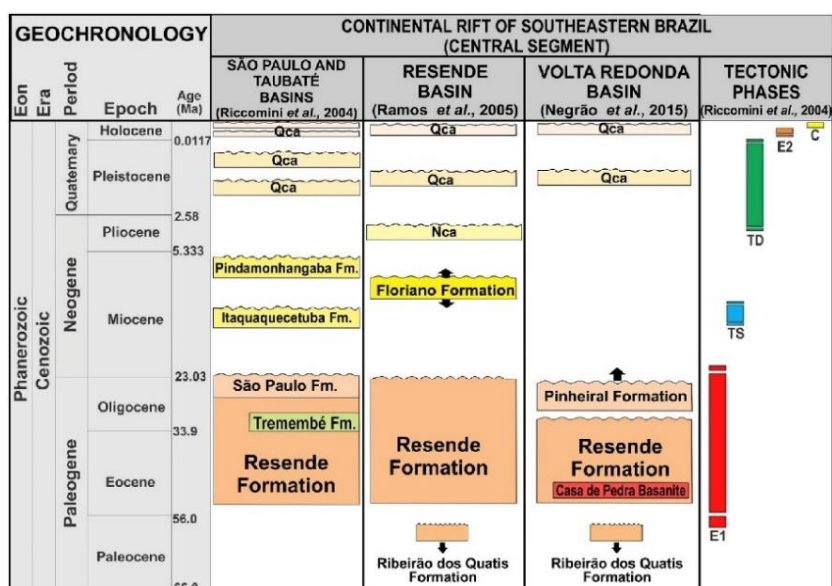


Figura 2: Estratigrafia e fases tectônicas das bacias sedimentares do Segmento Central do CRSB, segundo seus respectivos autores. As seqüências paleogênicas correspondem a estágios rift; As seqüências coluviais e aluviais neógenas e quaternárias (Nca e Qca) correspondem a estágios pós-rifte. Fases tectônicas: E1 - distensão NW-SE; TS - transcorrência sinistral EW; TD - transcorrência dextral EW; E2 - distensão NW-SE; C - compressão EW. Fonte: Negrão et al. 2020.

3.1.1 Formação Resende

A Formação Resende, unidade basal e lateral do Grupo Taubaté foi definida primeiramente por Amador (1975) e compreende a deposições relacionadas a leques aluvionares em posições proximais e de sistemas fluviais entrelaçados nas posições distais. A formação apresenta distribuição generalizada e pode chegar a 80% do preenchimento sedimentar da Bacia de São Paulo (Riccomini e Coimbra, 1992). A Formação Resende é predominantemente composta por conglomerados polimíticos, lamitos e arenitos (Riccomini, 2004), com o aparecimento de esmectitas detríticas (argilomineral expansivo) nas litofácies relacionados a deposições de leques aluviais (Gurgueira, 2013).

3.1.1.1 Taguá

As argilas mais estudadas da Formação Resende são as argilas cinza-esverdeadas conhecidas como “taguá”. Estas argilas encontram-se intercalas com lentes de areia finas, argilosas, muito compactadas e de coloração cinza-esverdeada (Cozzolino, 1980).

Pesquisas sobre o “taguá” indicam que composição granulométrica é predominantemente composta pela fração de finos, superior a 60%. Na carta de Plasticidade situam-se acima da Linha A, com limites de liquidez variando entre 22 e 90% e índice de plasticidade entre 7 e 60%. O índice de atividade variando entre 0,3 e 1,2 (Caldo, 2015).

3.2 Solos

O solo é um material produto da alteração de rochas ou de acúmulo de material sedimentar desagregado transportado, sendo o intemperismo o principal agente formador. A composição granulométrica e mineralógica dos solos está diretamente relacionada com a rocha matriz ou área fonte da qual são formados.

Pode-se analisar o solo como um sistema bifásico (sólido-líquido ou sólido-gás) para solos saturados ou como um sistema trifásico (sólido-líquido-gás) para solos não saturados (Figura 3), sendo o último predominante na natureza.

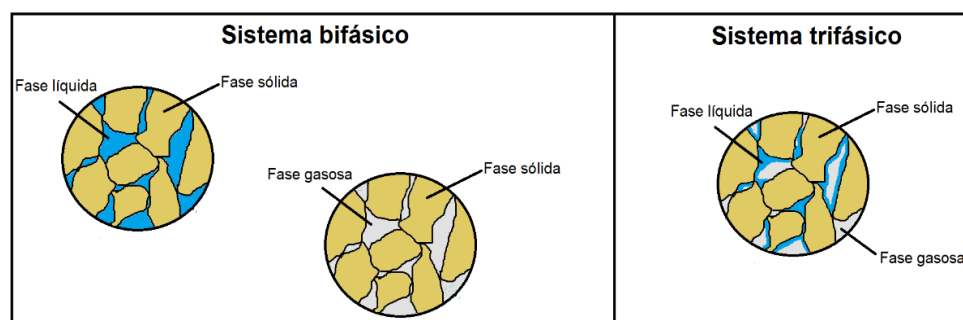


Figura 3: Fases constituintes do solo

3.2.1 Fase sólida

A fase sólida é composta por minerais e matéria orgânica no qual encontram-se de tamanhos e formas variadas. A identificação da composição mineralógica, textura e estrutura é importante para o estudo do comportamento do solo e as forças atuantes.

3.2.2 Fase líquida

Esta fase é composta predominantemente por água e sua interação com as outras fases geram processos complexos. Variações de tensões totais que ocorrem nos processos de carregamento e descarregamento geram variações de pressão que a água exerce nos poros do solo (devido a sua baixa compressibilidade a água tende a resistir a variações de volume). Em contato com determinados tipos de argilominerais pode gerar o fenômeno de expansão.

3.2.3 Fase gasosa

O gás presente na fase gasosa dos solos é predominantemente o ar (N e O₂), além de vapor d'água, que encontram-se preenchendo os espaços vazios não preenchidos pela água. A presença de vapor d'água ocorre devido a evaporação.

Segundo Pinto, (2006) um dos aspectos importantes em relação a presença de ar no sistema, é que a água, na superfície, se comporta como uma membrana. As moléculas de água, em contato com o ar, orientam-se em virtude da diferença de atração química, gerando uma tensão superficial. Devido a esta tensão, a superfície de contato entre a água e o solo nos poros apresenta uma curvatura, indicando diferenças de pressão, denominada tensão de sucção.

3.1.2 Solos expansivos

Pode-se dizer, de certo modo, que solos expansivos são classificados deste modo por apresentarem variações perceptíveis de volume ao serem hidratados. Este comportamento está principalmente relacionado com a sua constituição mineralógica, apresentando em sua composição argilominerais de estrutura laminar que ao serem hidratados, tendem a absorver as moléculas de água entre a estrutura cristalina do mineral e conseqüentemente provocando o processo de variação volumétrica. É importante ressaltar que o processo inverso também ocorre, processos de contração pela perda de água do material. A variação volumétrica dos argilominerais pode ser causada por diversos fatores, tanto mecânico como físico-químicos (Taylor e Smith, 1986). Os principais fatores que influenciam o potencial de expansão nos solos são descritos na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1: Propriedades intrínsecas do solo que influenciam no potencial de expansão e contração.

Fator	Descrição	Referência
Argilominerais	Argilominerais que tipicamente causam variações de volume são as montmorilonita, vermiculitas e algumas camadas mistas de minerais. Illitas e caulinitas são frequentemente não expansivos, mas podem causar variações de volume quando os tamanhos das partículas destes minerais são extremamente pequenos.	Grim (1968); Mitchell (1973,1976); Snethen et al. (1977)
Química da água no solo	A expansão é reduzida pelo aumento da concentração e valência de cátions. Por exemplo, cátions de Mg^{2+} no solo resultam em uma menor expansão do que cátions de Na^{+} .	Mitchell (1976)
Sucção do solo	A sucção do solo é uma variável independente da tensão efetiva, representada pela poro pressão negativa dos solo não saturados. A sucção dos solos está relacionada pela saturação, gravidade, tamanho e forma dos poros, tensão superficial e pelas características elétricas e químicas das partículas do solo e da água.	Snethen (1980); Fredlund e Morgenstern (1977); Johnson (1973); Olsen e Langfelder (1965); Aitchison et al. (1965)
Plasticidade	Em geral, solos que exibem comportamento plástico em largas faixas de umidade e que possuem altos limites de liquidez, têm maior potencial de expansão e de contração. A plasticidade é um indicador do potencial de expansão.	Nelson e Miller (1992)
Textura e estrutura do solo	As argilas floculadas tendem a ser mais expansivas do que as argilas dispersas. Partículas cimentadas reduzem a expansão. Texturas e estrutura são alteradas pela compactação, maior teor de umidade ou remoldagem. Foi demonstrado que a compactação cria estruturas dispersas com menor potencial de expansão do que os solos estaticamente compactado com menor teor de água.	Johson e Snethen (1978); Seed et al. (1962a)
Densidade seca	Elevadas densidades usualmente indicam espaçamentos menores entre partículas, o que pode significar maiores forças repulsivas entre as partículas e maior potencial de expansão	Chen (1973); Komornik e David (1969); Uppal (1965)

Fonte: Nelson e Miller, 1992

Tabela 2: Propriedades extrínseca do solo que influenciam no potencial de expansão e contração.

Fator	Descrição	Referências
1. Condições de umidade inicial	Um solo expansivo ressecado terá uma elevada afinidade por água ou sucção elevada, enquanto o mesmo com elevado teor de umidade diminuirá a sucção. De modo inverso, um perfil de solo úmido perderá umidade mais rápido do que um perfil de solo inicialmente seco.	-
2. 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.	Johnson (1978)
2.1 Clima	A quantidade e variação de precipitação e evapotranspiração influenciam fortemente a umidade e o perfil devido às variações climáticas. Em clima semiárido ocorrem levantamentos periódicos devido aos curtos períodos de chuva.	Holland e Lawrence (1980)
2.2 Água no subsolo	Lençóis rasos de água fornecem uma fonte de umidade e lençóis de águas superficiais contribuem para o aumento da umidade.	-
2.3 Drenagem e fontes de águas superficiais	Estruturas de drenagem superficiais, como por exemplo, tubulações, canaletas, etc. próximas a fundações de casas, podem se tornar uma fonte de água superficial. Vazamento de tubulações pode umidificar o solo até grandes profundidades.	Donaldson (1965)
2.4 Vegetação	Árvores, arbustos e gramas retiram a umidade do solo por transpiração, e tomam dificilmente úmido o solo para os variados tipos de vegetação.	Buchley (1974)
2.5 Permeabilidade	Camadas com elevada permeabilidade particularmente devido a fissuras, de rachaduras na massa do solo. permite uma rápida migração de água e promove uma rápida velocidade de expansão.	Wise e Hudson (1971); De Bruijn (1965)
2.6 Temperatura	Aumentos de temperatura causam a difusão de umidade para áreas mais frias abaixo de pavimentos e edifícios.	Johnson e Stroman (1976); Hamilton (1969)
3. Condições de tensão	-	-
3.1 Histórias de tensão	Um solo sobreadensado 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 laboratórios, mas após um certo número de ciclos, a expulsão não é afetada.	Mitchell (1976); Kassiff e Baker (1971)
3.2 Condições in situ	O estado de tensão inicial no solo pode ser estimado a fim de avaliar as prováveis consequências do carregamento sob a massa de solo e/ou alteração do ambiente inerente a umidade. As tensões efetivas iniciais podem ser grosseiramente determinadas através de amostragem e testes em laboratório, ou por medidas e observações in situ.	-
3.3 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 balanceamento das forças repulsivas entre partículas e reduzindo a expansão.	Holtz (1959)
3.4 Perfil do solo	A espessura e posição de camada potencialmente expansiva influencia consideravelmente no momento do solo. Os maiores movimentos ocorrem em perfis que tem argilas expansivas desde a superfície até a região abaixo da zona ativa. Movimentos menores ocorrem se o solo expansivo for recoberto por material não expansivo ou leito rochoso superficial.	Holland e Lawrence (1980)

Fonte: Nelson e Miller, 1992

É importante ressaltar que nem todos os solos argilosos são expansivos. Os argilominerais são um dos principais constituintes dos solos e a presença da característica de expansão se dá principalmente em solos compostos por determinados tipos de argilominerais, principalmente aos pertencentes do Grupo das Esmectitas (montmorilonita) e do Grupo da Vermiculita (vermiculita).

O comportamento expansivo dos argilominerais em contato com a água causa grande preocupação em obras de engenharia. Quando identificados devem ser estudados, analisados, ensaiados e, se necessário, considerados no projeto, caso contrário, podem causar danos as estruturas com o aparecimento de trincas e rachaduras ou até a destruição da obra.

As perdas econômicas causadas por estes materiais em diversos países durante as últimas décadas chegam aos bilhões de dólares. Segundo as estimativas, as perdas econômicas anuais causadas por solos expansivos superam as perdas anuais causadas por inundações, furacões, terremotos e tornados (Chen, 1975), portanto diversos foram os estudos geotécnicos direcionados a caracterizar e quantificar os processos expansivos.

Tem-se que de forma geral todos os solos são expansivos, em maior ou menor escala, mas costuma-se admitir que apenas solos com variações volumétricas superiores a 1% são classificados como solo expansivo, sendo essa variação decorrente apenas da variação do teor de umidade, sem qualquer alteração de cargas aplicadas no solo (Costa Nunes, 1978 apud Pereira, 2004).

3.1.3 Argilominerais

Os argilominerais fazem parte da classe dos filossilicatos, apresentam alta área específica e normalmente apresentam dimensões menores que 2 μm . São estruturas complexas, constituídos principalmente pela superposição de estruturas octaédricas e tetraédricas que são justapostas em um plano (Pinto, 2006), formando camadas ou folhas.

Os argilominerais podem ser divididos em dois tipos: 1:1 e 2:1 (Figura 4). Nos argilominerais do tipo 1:1 temos que a sua estrutura é formada por uma folha tetraédrica e outra octaédrica (TO) e nos de tipo 2:1 uma folha octaédrica entre duas camadas tetraédricas (TOT).

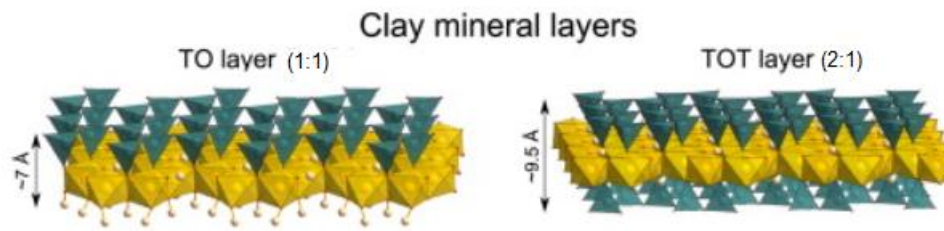


Figura 4: Esquema simplificado dos arranjos de argilominerais do tipo 1:1 e 2:1. Fonte: modificado de Tournassat et al. (2015).

Nas folhas Tetraédrica o cátion predominante é o de silício (Si^{4+}), podendo ser substituído também por cátions de Alumínio (Al^{3+}), que estão quimicamente ligados a quatro átomos de oxigênio. A representação da estrutura tetraédrica é exibida na Figura 5. Pode-se dividir os oxigênios na estrutura em dois tipos “basal” e “apical”, cada oxigênio basal é compartilhado por dois tetraedros e o oxigênio apical fica perpendicular ao plano basal formado pelos oxigênios basais.

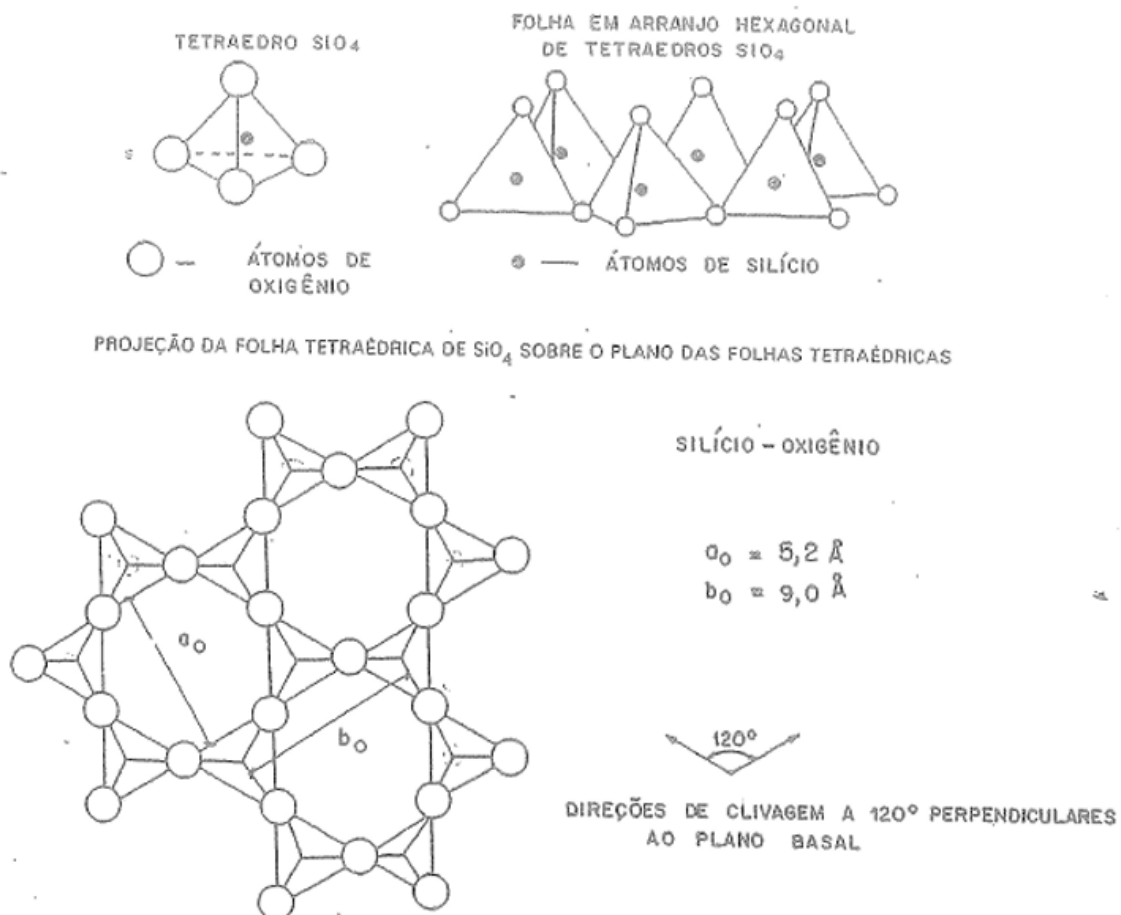


Figura 5: Representação da estrutura e folha tetraédrica dos argilominerais, Santos (1989)

Nas folhas Octaédricas os cátions normalmente presentes na estrutura são o Alumínio (Al^{3+}), Magnésio (Mg^{2+}) ou Ferro (Fe^{2+}), que estão localizados entre planos

de oxigênio ou hidroxilas. A representação da estrutura octaédrica é mostrada na Figura 6.

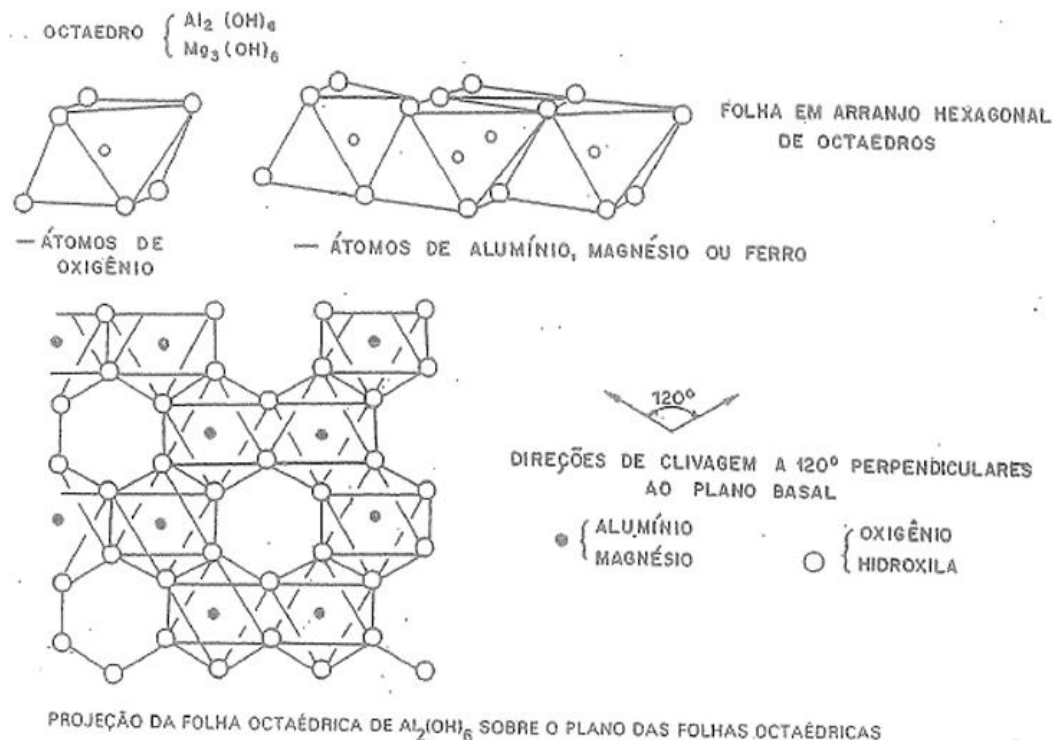


Figura 6: Representação da estrutura e folha octaédrica dos argilominerais, Fonte: Santos (1989)

As folhas octaédricas podem ser divididas entre folhas trioctaédrica ou dioctaédrica. Na folha trioctaédrica o cátion presente na estrutura é um cátion divalente (normalmente Mg^{2+}) e na folha dioctaédrica o cátion presente na estrutura é um cátion trivalente (normalmente Al^{3+}). A diferença entre cada uma destas folhas se dá pelo preenchimento dos sítios octaédricos na estrutura. Na folha trioctaédrica todos os sítios octaédricos estão ocupados, enquanto na folha dioctaédrica apenas 2/3 dos sítios octaédricos estão ocupados.

A composição química dos argilominerais mais comuns é exposto na Tabela 3.

Tabela 3: Sistemática dos Minerais Argilosos.

I-MINERAIS CRISTALINOS					
(A) ESTRUTURA EM CAMADAS					
Tipo ou arranjo das camadas	Grupo (carga elétrica/ fórmula unitária)	Sub-grupo Tri-trioctaédrico Di-dioctaédrico	Espécies		
2:1	Pirofilita – Talco (x~0)	Tri	Talco	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	
		Di	Pirofilita	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	
	Esmectitas (0.2<x<0.6)	Tri	Saponita Hectorita Stevensita	E _{0.33} Mg ₃ (Si _{3.67} Al _{0.33}) O ₁₀ (OH) ₂ ·nH ₂ O E _{0.33} (Mg _{2.67} Li _{0.33}) Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·nH ₂ O 2E _{2x} Mg _{3-x} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	
		Di	Montmorilonita Beideleita Nontronita	E _{0.33} (Al _{1.67} Mg _{0.33}) Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·nH ₂ O E _{0.33} Al ₂ (Si _{3.67} Al _{0.33}) O ₁₀ (OH) ₂ ·nH ₂ O E _{0.33} Fe ³⁺ ₂ (Si _{3.67} Al _{0.33}) O ₁₀ (OH) ₂ ·nH ₂ O	
		Tri	Vermiculita	E _{0.86} (Mg,Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , Al) ₃ (SiAl) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·nH ₂ O	
	Di	Vermiculita	E _{0.86} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·nH ₂ O		
	Micas (x~1)	Tri	Flogopita Biotita Lepidolita	KMg ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂ K (Mg, Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , Mn) ₃ (Si Al) ₃ O ₁₀ (OH) ₂ K(Al, Li) ₃ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	
		Di	Muscovita Paragonita Ilita	K Al ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂ Na Al ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂ K _x (Al, Mg) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·nH ₂ O (x<1)	
	2:1:1	Cloritas (x variável)	Tri	Mg-Clorita (clinocloro) Fe-Clorita (chamosita)	(Mg ₅ Al) (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈ (Fe ²⁺ ,Al)(Si ₃ Al) O ₁₀ (OH) ₈
			Di	Al-Clorita (sudaíta) Al Li-Clorita (cookeíta)	(Mg _{3-x} Al _{2-x})(Si _{4-x} Al _x)O ₁₀ (OH) ₈ (AlLi) (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈
1:1	Caulinita-Serpentina (x~0)	Tri	Mg-Serpentina (antigorita, crisótilo) Mg-Al serpentina(amesita) Fe-serpentina (cronstedita)	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ (Mg ₂ Al) (SiAl) O ₅ (OH) ₄ (Fe ²⁺ , Fe ³⁺)(SiFe ³⁺)O ₅ (OH) ₄	
		Di	Caulinita, diquita, nacrita Haloisita (7A) Haloisita (10A)	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ Al ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₄ ·2H ₂ O	
(B) Estrutura em pseudo-camadas (fitas)					
			Sepiolita Paligorskita	Mg ₂ Si ₁₂ O ₃₀ (OH) ₄ (OH ₂) ₄ 8H ₂ O Mg ₂ Si ₈ O ₂₀ (OH) ₂ (OH ₂) ₄ 4H ₂ O	
II – MINERAIS NÃO CRISTALINOS OU FRACAMENTE CRISTALINOS					
			Alofana Imogolita	1~2 SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·nH ₂ O 1~1.5 SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·2~3H ₂ O	

Fonte: Gomes, 1986 Apud Pereira, 2004.

3.1.3.1 Grupo das Caulinitas

O grupo caulinita inclui os minerais do subgrupo dioctaédricos (caulinita, diquita, nacrita e haloisita) e dos minerais do subgrupo trioctaédricos (antigorita, chamosita, crisótila e cronstedita). É formada pelos argilominerais do tipo 1:1, que é o empilhamento de uma folha tetraédrica com uma folha octaédrica (TO) com espessuras por volta de 7Å. A representação estrutural de uma caulinita pode ser observada na Figura 7.

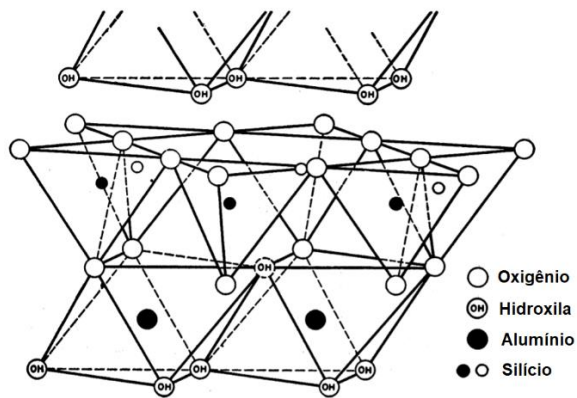


Figura 7: Estrutura de uma caulinita. Fonte: Adaptado de Grim (1962)

Os minerais deste grupo são pouco expansivos, isso ocorre principalmente pela estrutura do mineral ser, quase que totalmente, eletricamente neutra. As substituições isomórficas praticamente não ocorrem ou ocorrem muito pouco, fazendo com que as moléculas de água não sejam adsorvidas entre as camadas do mineral.

3.1.3.2 Grupo das Esmectitas

Os membros do grupo da esmectita incluem os minerais do subgrupo dioctaédricos (montmorilonita, beidelite e nontronita) e os minerais do subgrupo trioctaédricos (hectorita, saponita e estevensita). É formada pelos argilominerais do tipo 2:1, que é o empilhamento de duas folhas tetraédricas com uma folha octaédrica (TOT) com espessuras geralmente entre 14,4 a 15,6 Å, embora outro espaçamento possa ocorrer dependendo da retenção de água e da ocupação intercamada, a representação estrutural de um esmectita pode ser observado na Figura 8.

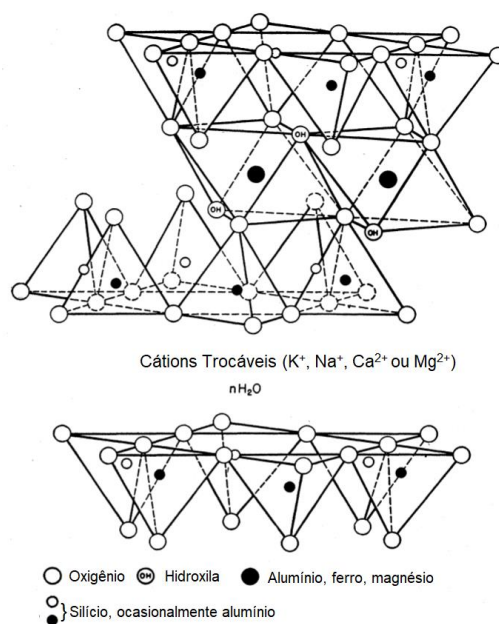


Figura 8: Estrutura de uma esmectita. Fonte: Adaptado de Grim (1962)

Minerais de esmectita têm grandes áreas de superfície específica (10 a 700 m²/g), alta capacidade de troca catiônica e exibem uma alta capacidade de expansão na presença de água.

3.1.3.3 Grupo das Vermiculitas

A vermiculita é um mineral normalmente trioctaédrico de magnésio-ferro-alumínio hidratado de composição variada, formada por duas folhas tetraédricas intercaladas por uma folha octaédrica que contém alumínio e ferro (Grim, 1962).

Segundo Pereira (2004), o grupo da vermiculita possui uma expansão mais limitada que a montmorilonita na presença de água e outras moléculas polares. Segundo Carcedo et al., (1986) apud Pereira (2004), a vermiculita têm uma capacidade expansiva pouco menor que a montmorilonita na presença de cátions bivalentes, sendo que para cátions monovalentes é variável, semelhante no caso do Li⁺, muito inferior para o Na⁺ e inexistente para o K⁺.

3.1.3.4 Grupo das Micas (Ilita)

A ilita é uma mica dioctaédrica do tipo 2:1, sendo composto por duas folhas tetraédricas e uma octaédrica (TOT), possui uma estrutura muito semelhante à da montmorilonita (Figura 9), porém apresenta uma substituição maior de alumínio por silício e suas camadas estão ligadas por cátions monovalentes, normalmente K⁺.

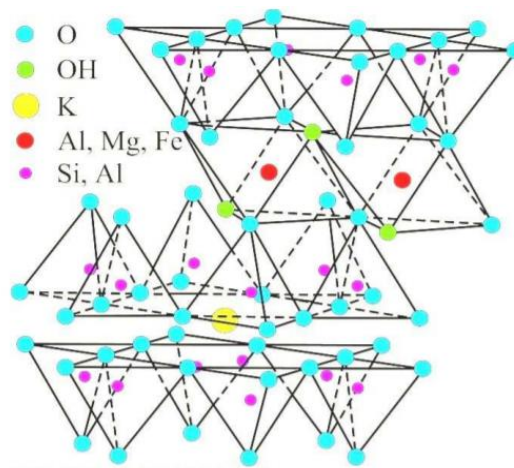


Figura 9: Estrutura de uma ilita Fonte: U. S. GEOLOGICAL SURVEY, 2001

Devido à forte ligação iônica gerada pelos íons K⁺ entre as camadas estruturais, a ilita, não apresenta expansibilidade intracristalina, mas pode apresentar uma certa

sensibilidade a água caso o mineral passe por condições extremas de degradação, eliminando os íons K^+ da estrutura, tornando-a muito plástica (Pereira, 2004).

3.1.3.5 Argilas interestratificados

As argilas interestratificadas são formadas a partir do empilhamento de diferentes tipos de argilominerais, essas argilas são formadas pela remoção ou substituição dos cátions pelo intemperismo. O empilhamento pode ser tanto regular ou ao acaso.

As argilas de camadas interestratificadas incluem as combinações de argilominerais como ilita-vermiculita, ilita-esmectita, clorita-vermiculita, clorita-esmectita, caulinita-esmectita, montmorilonita-clorita entre outros. A presença de argilominerais expansivos como a montmorilonita ou a vermiculita nas argilas interestratificadas pode tornar o solo potencialmente expansivo.

3.1.3 Mecanismos de expansão dos solos expansivos

Como comentado, o fenômeno de expansão ocorre principalmente nos argilominerais do tipo 2:1 (TOT) devido principalmente as substituições isomórficas (cátions trivalentes substituídos por divalentes ou cátions divalentes substituídos por monovalentes nas estruturas do mineral) que geram um desbalanço de cargas na superfície do mineral. O desbalanço de cargas provoca a atração de cátions (normalmente Na^+ ou Ca^{2+}) para manter o equilíbrio eletrostático, esses cátions encontram-se normalmente em solução na água e são incorporados entre as camadas do mineral como observado na Figura 10.

Os principais fatores intrínsecos do solo que levam a expansão são observados na Tabela 1 e os principais fatores extrínsecos ao solo na Tabela 2.

Os mecanismos físico-químicos que determinam a expansibilidade do argilomineral pode ser dividido entre atração superficial das partículas, repulsão osmótica e hidratação dos cátions (Snetchen et al., 1977).

A atração superficial é provocada pela magnitude das forças eletrostáticas das cargas negativas na superfície dos argilominerais. Segundo Presa (1984), a influência deste mecanismo na mudança de volume provém do esforço desenvolvido para neutralizar o desequilíbrio de cargas.

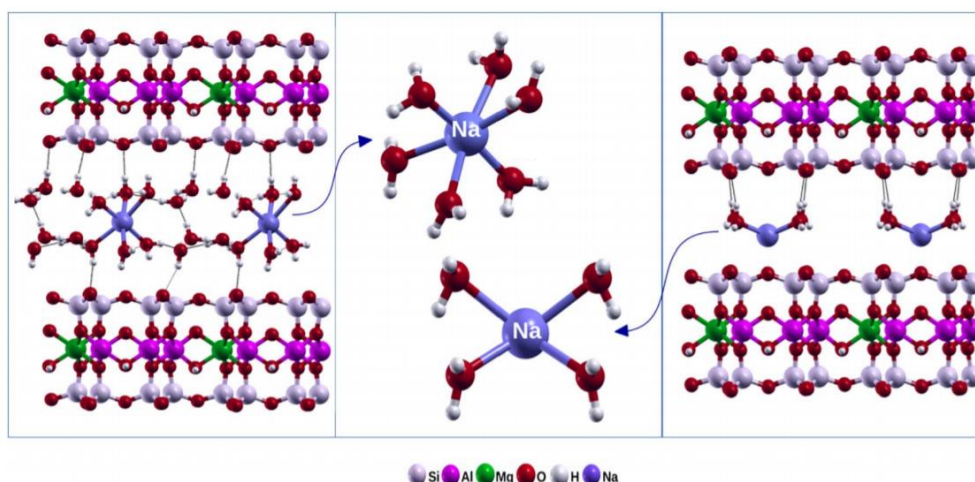


Figura 10: Estrutura de uma esmectita com moléculas de água e cátions de Na⁺ entre as camadas TOT.
Fonte: Adaptado de Fonseca et al (2017)

Segundo Pereira (2004), a repulsão osmótica é um mecanismo importante em condições de umidade e concentração iônicas elevadas. Ocorre com a entrada de moléculas de água entre as camadas dos argilominerais, devido às diferenças da concentração iônica dupla na camada. A maior concentração ocorre junto à superfície do argilomineral e diminui à medida que se afasta da superfície. O contato de água com a finalidade de equilibrar as diferenças de concentrações, resultando num aumento da dupla camada e consequentemente no volume do solo.

A hidratação ocorre devido ao aumento da capacidade de atração de moléculas de água pelos argilominerais, provocada pelos cátions adsorvidos e substituições isomórficas. Este mecanismo influencia na expansibilidade pelo aumento que o raio iônico dos cátions sofrem a medida que vão sendo hidratados, gerando um aumento de volume na massa de solo (Presas, 1984).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Coleta das amostras

As amostras da Formação Resende analisadas neste trabalho foram retiradas de uma obra realizada pela SABESP, o Interceptor Tietê 7 (ITi-7), “um supertúnel de 7,5 km de extensão construído embaixo da Marginal Tietê. Tem 3,4 metros de largura e 2,65 de altura, implantado em profundidade máxima de 18 metros” (SABESP, 2020). Essa obra está localizada próxima a Ponte Casa Verde no Bom Retiro, Marginal Tietê, estação Barra Funda linha 3 vermelha do Metrô, linha 7 Rubi e 8 Diamante da CPTM, no município de São Paulo. A localização da área de coleta pode ser observada na Figura 11. A obra Interceptor Tietê 7 encontra-se a aproximadamente 3,4 Km da estação

Água Branca da futura Linha 6 Laranja do metrô, devido a essa “proximidade”, foi inferido na seção geológica produzida pela Companhia do Metropolitano de São Paulo (CMSP) o provável local de coleta das amostras observada na Figura 13, com premissa da continuidade lateral dos depósitos sedimentares na área.

A coleta das amostras não foi realizada pelo autor deste trabalho e ocorreu durante a visita da obra no ano de 2019, como parte de um trabalho de pós-graduação da Universidade de São Paulo, a Figura 12 mostra o túnel Interceptor Tietê 7, local de coleta das amostras.

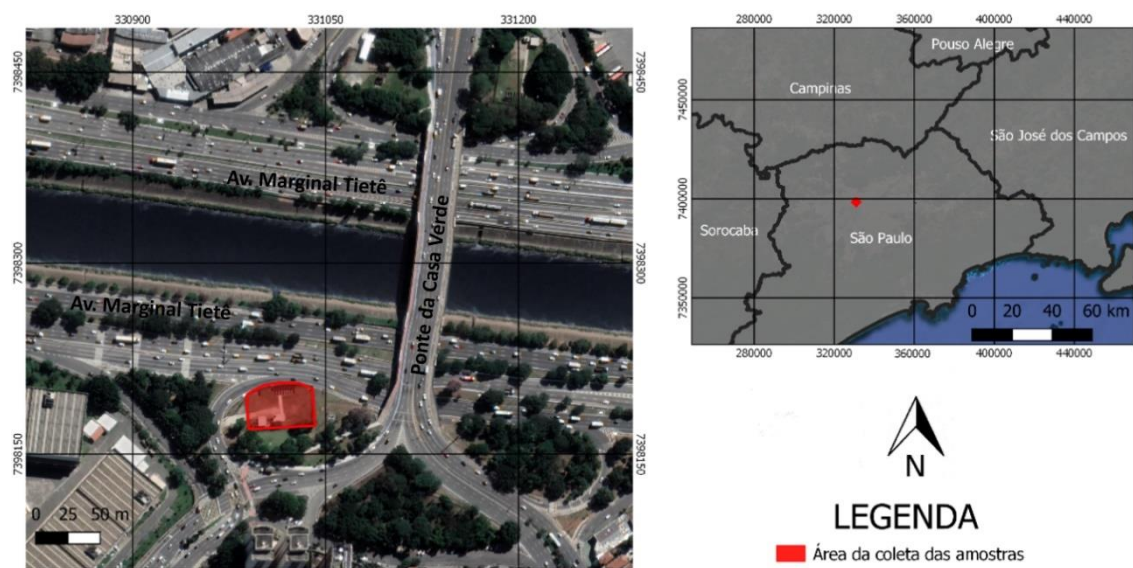


Figura 11: Área de coleta das amostras. Datum: SIRGAS 2000 / UTM ZONE 23S



Figura 12: Interceptor Tietê 7 (ITi-7)

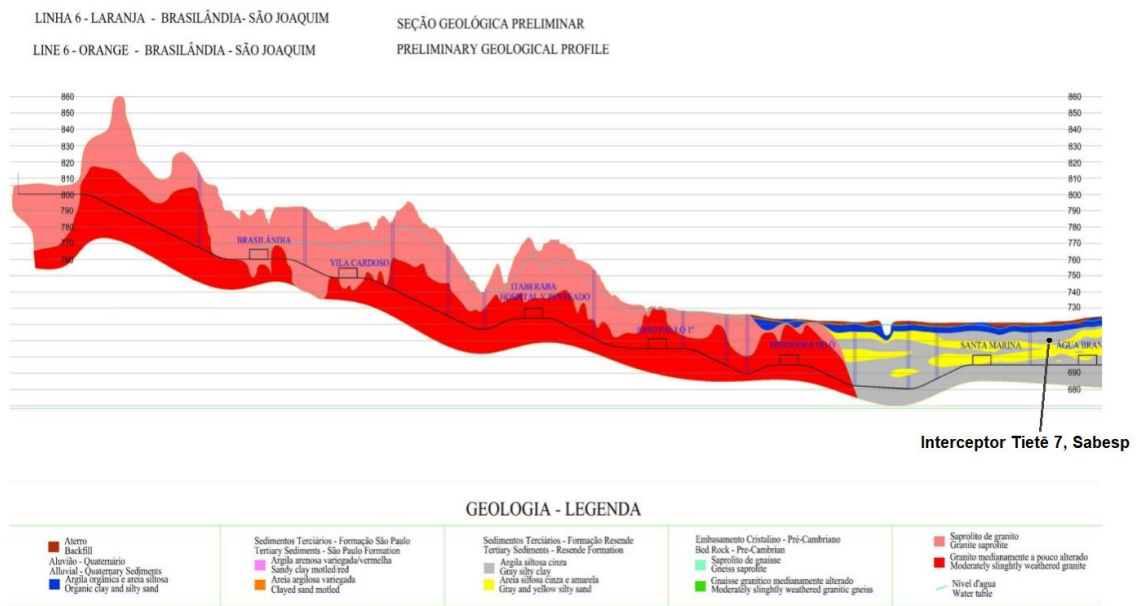


Figura 13: Seção geológica da Linha 6 Laranja do metrô e ponto inferido da coleta das amostras. Fonte: Adaptado de CMSP, 2012.

As amostras foram coletadas e armazenadas em sacos e caixas de plástico como observados na Figura 14. Estas amostras ficaram armazenadas dentro do laboratório de geotecnia do Instituto de Geociências da USP (IGc) do final 2019 a outubro 2021 quando foram retiradas de seus armazenamentos para o início dos ensaios.



Figura 14: Armazenamento das amostras.

Analisando a condição das amostras, observa-se que externamente é possível perceber uma coloração marrom escuro a claro, provavelmente devido à oxidação e perda de umidade para o ambiente. Devido ao longo tempo de armazenamento sem um isolamento apropriado da amostra com o ar ambiente, o solo perdeu umidade e

provavelmente apresenta um teor de umidade próxima a higroscópica. É possível também observar manchas de coloração avermelhada em diversos pontos na amostra indicando uma provável presença de óxido de ferro (Figura 15).

Internamente a amostra apresenta uma coloração cinza homogênea. É possível observar clastos milimétricos de quartzo como observado na Figura 15. A granulometria predominante é fina composta por silte e argila.



Figura 15: a) Amostra com coloração avermelhada b) Clasto milimétrico de quartzo.

A amostra apresenta-se compactada e com resistência mecânica, e ao toque mostra-se ser sedosa, provavelmente devido à alta porcentagem de argilas no material.

4.2. Métodos de identificação e quantificação da expansividade

Muitos foram as metodologias empregadas com a finalidade de caracterizar e quantificar o comportamento expansivo dos solos e rochas, na literatura os métodos de identificação e quantificação podem ser divididos entre técnicas diretas e indiretas. As técnicas indiretas consistem basicamente na descrição das características físicas e mineralógicas do material, inferindo assim um possível potencial expansivo. As técnicas diretas são aquelas que medem quantitativamente as mudanças volumétricas dos materiais expansivos.

Pode-se observar alguns dos principais métodos abordados nas técnicas diretas e indiretas na Tabela 4.

Tabela 4: Método identificação e quantificação da expansividade dos solos.

Métodos	Subdivisão	Base para a definição do critério	Referencias Bibliográficas
Indiretos	Identificativos	Difração de Raio - X Microscopia eletrônica de varredura Análise termo-diferencial adsorção de etileno-glicol Físico-químicos	CARCEDO et al (1986) FINK et al (1971)
	Qualitativos	Granulometria, consistência e índices físicos e classificação geotécnica	Prikonskij, (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)
	Orientados	Geologia, Pedologia; Geomorfologia, Identificação visual.	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 tensão 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: Ferreira (1995)

4.3. Técnicas indiretas

As técnicas indiretas são aquelas que descrevem as características físicas e mineralógicas do material, são métodos capazes de mostrar dados confiáveis para possíveis correlações do comportamento expansivo dos materiais, neste trabalho são utilizados os métodos de Difração de Raio – X, Microscopia eletrônica de varredura (MEV), Limites de Atterberg e Ensaio Granulométricos, além de critérios de correlação do potencial expansivo utilizando parâmetros diretos e indiretos por diversos autores.

4.3.1. Difração de Raio – X

O método de Difração de Raios – X (DRX) é uma ferramenta importante para a identificação mineral, devido a sua praticidade, confiabilidade e rapidez na obtenção de dados. Esta técnica consiste na emissão de feixes de raios - x que incidem sobre um conjunto de planos cristalinos, estes feixes ao passarem pelos planos sofrem o fenômeno de difração, estas difrações podem ser analisadas segundo a Lei de Bragg, que estabelece uma relação entre a difração e as distâncias interplanares da estrutura cristalina dos minerais. Cada mineral apresenta um comportamento característico de difração, sendo possível assim discriminar os minerais presentes nas amostras. A Figura 16 ilustra a relação entre o ângulo de difração e a distância interplanar segundo a lei de Bragg e sua equação (1) é expressa a seguir.

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (1)$$

onde λ corresponde ao comprimento de onda da radiação incidente, “n” à ordem de difração, “d” à distância interplanar para o conjunto hkl (índice de Miller) e θ o ângulo de incidência dos raios X.

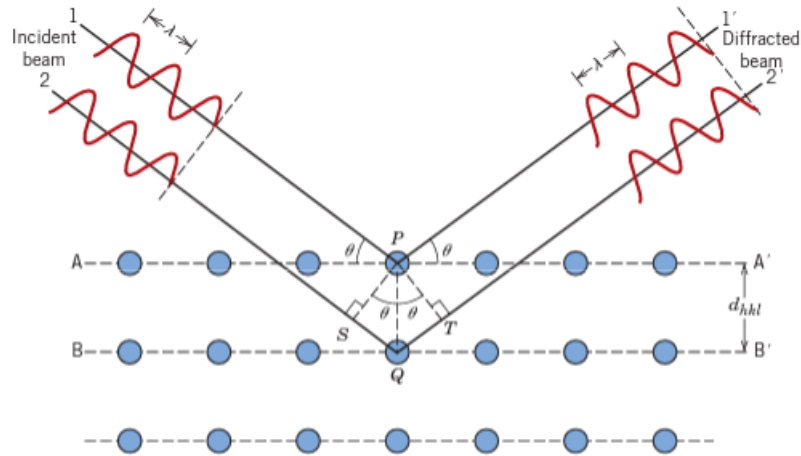


Figura 16: fenômeno de difração de raios X segundo a Lei de Bragg. Fonte Adaptado de Callister e Rethwisch, (2007)

Determinados tipos de argilominerais apresentam distâncias interplanares muito semelhantes, como observado na Tabela 5, a vermicula, montmorilonita e a clorita em condições normais apresentam valores semelhantes de distância interplanar, aproximadamente $14\text{\AA}$, portanto é necessário tomar certos cuidados na preparação das amostras. A presença dos minerais com distância interplanares semelhantes faz com que seja necessário a utilização de técnicas complementares que auxiliam na diferenciação, normalmente utiliza-se as técnicas de solvatação por etilenoglicol ou tratamento térmico que alteram as distâncias interplanares do mineral, as alterações da distância interplanar dos minerais pelas técnicas complementares pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5: Posições referentes aos picos principais (direção <001>) dos argilominerais em condições normais (N), após glicolagem (G), aquecimento (A). Adaptado de U. S. GEOLOGICAL SURVEY, 2001

d(Å) N	d(Å) G	d(Å) A	Argilomineral
7	7	---	Caulinita
10	10	10	Ilita
14	14	14	Clorita
14	17	14	Clorita expansível
12	17	10	Essectita (Montmorilonita – 12 Å)
14	17	10	Essectita (Montmorilonita – 14 Å)
14	14	10	Vermiculita
3,43	3,43	3,43	Quartzo –α
3,22	3,22	3,22	Feldspato
3,01	3,01	3,01	Calcita

Fonte: Nascimento, 2018

Segundo Nascimento (2018), muitos materiais, como os argilominerais, somente podem ser obtidos como um conjunto de pequenos cristais orientados ao acaso. Deste modo, para os ensaios de difração de raios X as amostras devem ser lisas, (não apresentar rugosidade), planas espessas e homogêneas ao longo da profundidade ou espessura.

Moore e Reynolds, (1997) apud Scapin, (2003), recomendam quatro métodos na preparação de amostras orientadas no plano basal <001>¹. Sendo eles método da lâmina de vidro, método do emplast, método de filtragem em sistema “millipore” e método da placa porosa centrifugada.

Neste trabalho foi utilizado o método de lâmina de vidro, que consiste em depositar por meio de conta gota, alíquotas da suspensão sobre superfície de uma lâmina de vidro, com o cuidado de não deixar transbordar, em seguida e secá-la em uma estufa por 1h a 90°C. Esse método é o mais utilizado em ensaios de rotina e apresenta como vantagem a simplicidade na preparação na preparação da amostra, apresentando orientação satisfatória. Normalmente as partículas apresentam-se segregadas sobre a lâmina. O filme de argila é muito fino e para obter-se boa intensidade de difração é recomendada a leitura em ângulos moderados a altos. (Moore e Reynolds, (1997) apud Scapin, (2003))

4.3.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura é um instrumento versátil utilizado em diversas áreas do conhecimento e pode ser muito útil na identificação de minerais

¹ Representação de uma família de direções, por exemplo, [100], [010] e [001] é representada por <100>

menores do que 100 Å (Mitchell, 1993). Segundo Maliska, o aumento máximo conseguido pelo MEV fica entre o microscópio ótico (MO) e o Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) com resoluções na ordem de 2 a 5 nm (20 - 50 Å). O método consiste na emissão de feixes elétrons sobre a superfície do material, gerando diferentes respostas energéticas (Figura 17) que são captadas por detectores que analisam esta interação, gerando imagens de superfície de alta resolução.

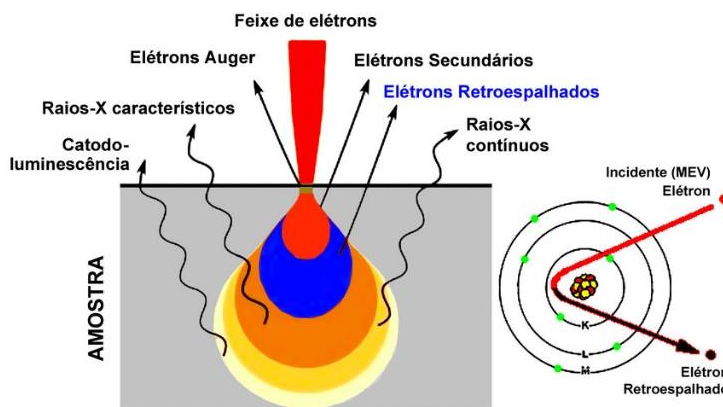


Figura 17: Tipos de energia emitidas na interação feixe de elétron e amostra. (Adaptado de Moraes et al. 2020)

4.3.3. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg ou limites de consistência são métodos capazes de caracterizar o comportamento de determinados tipos de solos, usando como parâmetro um fator de consistência que é definido em função do teor de umidade.

Os limites denominados como Limites de Atterberg são divididos em Limites de Liquidez, Plasticidade e Contração. O limite de contração (LC) corresponde ao teor de umidade que limita a passagem do material do estado sólido ao semi-sólido, o Limite de Plasticidade (LP) corresponde ao teor de umidade que limita a passagem do material do estado semi-sólido ao estado plástico e o Limite de Liquidez (LL) o teor de umidade que limita a passagem do material do estado plástico ao estado líquido.

Segundo Frazão (1981), os valores de limites de consistência permitem uma avaliação quantitativa de potencialidade de expansão. Segundo Nelson e Miller (1992), “solos que exibem comportamento plástico sobre larga variação de umidade e que tem alto limite de liquidez possuem maior potencial de expansão e contração”. A Plasticidade é um indicador do potencial de expansão.

Os ensaios de limites de consistência foram realizados de acordo com as normas da ABNT NBR 6459 (2016) e NBR 7180 (2016).

4.3.4. Ensaios granulométricos

Os ensaios de granulometria foram realizados de acordo com as normas ABNT NBR 7181 (2016) e NBR 6458 (2016). Sendo realizados para uma melhor caracterização do material e utilizados como parâmetro na classificação por métodos indiretos de expansividade.

4.3.5. Caracterização do potencial de expansão por parâmetros indiretos

Diversos foram os autores que criaram classificações de expansibilidade do solo por parâmetros indiretos. Segundo Silva (2018), Chen (1975) caracteriza o potencial baseando-se no Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade. Holtz e Gibbs (1956), usa o Índice de Plasticidade. Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), usa a expansão livre, em porcentagem, para uma tensão de sobrecarga de 10 kPa. Seed et al. (1962) usa como parâmetro o Índice de Plasticidade e Daksanamurthy e Raman (1973) usa o Limite de Liquidez na classificação do potencial expansivo do solo. Na classificação proposta pela WES, classifica-se o potencial de expansão a partir de resultados obtidos no ensaio de expansão livre, Limite de Liquidez, Índice de Plasticidade, os critérios para classificação do potencial expansivo são observados nas Tabela 6 e 7.

Tabela 6: Métodos de identificação de solos expansivos: Chen (1975), Holtz e Gibbs (1956), Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), Daksanamurthy e Raman (1973) e Seed et al. (1962).

Grau de Expansão	Chen (1975)		Holtz e Gibbs (1956)	Vijayvergiya e Ghazzaly (1973)	Daksanamurthy e Raman (1973)	Seed et al. (1962)
	LL (%)	IP (%)	IP (%)	Sp (%)	LL (%)	IP (%)
Baixo	< 30	0 - 15	< 20	< 1	$20 \leq LL \leq 35$	< 10
Médio	30 – 40	10 – 35	12 – 34	1 – 4	$35 < LL \leq 50$	$10 \leq IP \leq 20$
Alto	40 – 60	20 – 55	23 - 45	4 – 10	$50 < LL \leq 70$	$20 < IP \leq 35$
Muito Alto	> 60	> 35	> 32	> 10	$LL > 70$	$IP > 35$

Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Tabela 7: Métodos diretos e indiretos de identificação de solos expansivos pela WES. Adaptado do Manual Técnico Foundations in Expansive Soil, (1983)

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

Fonte: Silva (2018)

Williams e Donaldson (1980), propuseram uma classificação de expansibilidade dos solos, utilizando-se como base os índices de atividade de Skempton (1953), resultando em uma classificação da expansividade do material dividida em expansão baixa, média, alta ou muito alta, esta classificação é representada na Figura 18.

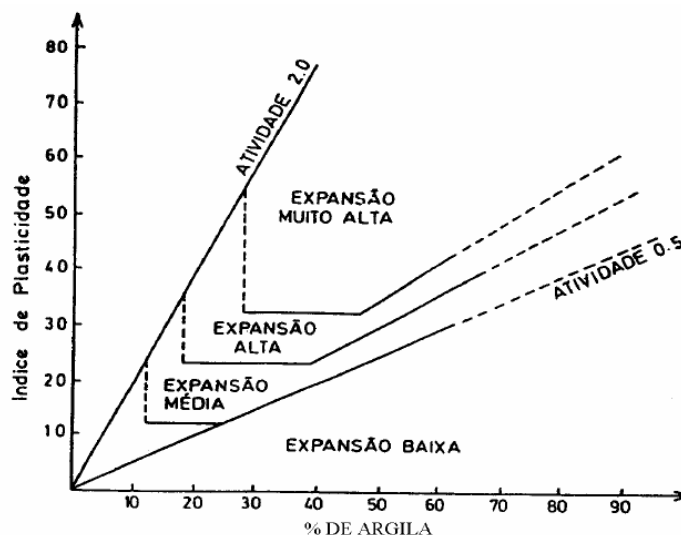


Figura 18: Classificação da expansibilidade de materiais argilosos. Fonte: Williams & Donaldson (1980), apud Pereira (2004).

4.4 Técnicas diretas

Os métodos diretos serão aqueles que medirão quantitativamente o fenômeno expansivo do material. Pressão de expansão é a pressão que o material expansivo exerce, quando a expansão é impedida (Philipponnat, 1991 apud Pereira, 2004). A pressão de expansão é intimamente ligada aos teores de umidade a qual são ensaiadas e pela densidade seca (Sridharan, 1986).

4.4.1 Ensaio de Expansão Livre

Devido aos ensaios de expansão e pressão de expansão não serem normatizados no Brasil, os ensaios foram realizados de acordo com as orientações da norma da American Society for Testing and Materials (ASTM) D4546 (2010).

Para realizar o ensaio de expansão livre, foi utilizada uma célula de adensamento da marca Biopdi observada na Figura 19 (a). Os corpos de prova foram talhados do material indeformado de forma a preencher a totalidade do anel interno da célula, devido à dificuldade em talhar a amostra com alta compactação e resistência, tem-se que a amostra talhada ainda apresentou, em determinadas localidades, pequenos espaçamentos (<0,1mm) entre o anel e a amostra, observados na Figura 19 (b). O anel utilizado possui diâmetro interno de 50 mm e altura de 20 mm, dimensões mínimas recomendadas pela norma americana ASTM D4546 (2010).

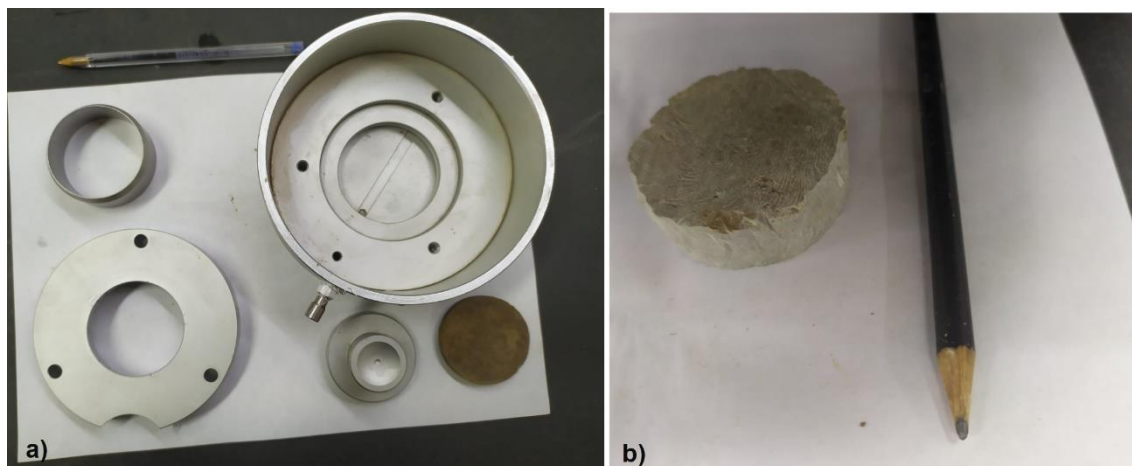


Figura 19: a) Célula edométrica; b) amostra indeformada

Após a inserção da amostra no anel e inseri-la na célula de adensamento é posicionado papeis filtros e pedras porosas nas duas faces da amostra.

Posteriormente a célula edométrica é inserida na prensa de adensamento da marca Biopdi (Figura 20), e pré-adensada com 1 Kpa até sua estabilização, após o pré-adensamento o extensômetro é calibrado para leitura 0 como medição inicial. Posteriormente a célula é inundada com água, ocorrendo a hidratação do material por ambas as faces e iniciada as medições.



Figura 20: prensa de adensamento da marca Biopdi

As medições foram realizadas automaticamente pelo equipamento em intervalos de tempo que obedecem a uma progressão geométrica de razão dois e continuou até que fosse observado a estabilização das leituras.

Os resultados obtidos pelo ensaio são colocados em um gráfico de tempo em escala logarítmica, pelo percentual de expansão. A expansão livre é calculada pela seguinte formula (3):

$$E = (\Delta H/H) \times 100 \quad (3)$$

Onde E = expansão livre uniaxial (%); (ΔH) = Variação de altura da amostra (mm) e H= Altura inicial do corpo de prova (mm)

4.4.2 Ensaio edométrico de pressão expansão direta

Para realizar o ensaio edométrico de pressão de expansão direta, foi utilizada uma célula de adensamento da marca Biopdi. Os corpos de prova foram talhados do material indeformado de forma a preencher a totalidade do anel interno da célula, devido à dificuldade em talhar a amostra com alta compactação e resistência, tem-se que a amostra talhada ainda apresentou, em determinadas localidades, pequenos espaçamentos (<0,1mm) entre o anel e a amostra, observados na Figura 19 (b). O anel utilizado possui diâmetro interno de 50 mm e altura de 20 mm, dimensões mínimas recomendadas pela norma americana ASTM D4546 (2010). Após a inserção da amostra no anel e inseri-la na célula de adensamento é posicionado papeis filtros e pedras porosas nas duas faces da amostra.

Este ensaio é realizado colocando-se uma amostra indeformada na prensa de adensamento e submetendo-a a uma tensão correspondente a do terreno ou a uma tensão pré-definida, calculada de acordo com projeto, após a estabilização a célula é inundada com água até que a amostra expanda até sua estabilização.

A partir da estabilização da expansão do material, adiciona-se sobrecargas sucessivas atuando no topo do corpo de prova, de modo que a amostra volte a altura que tinha antes da expansão. As leituras no extensômetro foram realizadas após a estabilização do material para cada sobrecarga aplicada. Os resultados são plotados em um gráfico de % de expansão por tensão uniaxial aplicada na amostra, sendo a última medição de tensão uniaxial correspondente a pressão de expansão do material.

4.4.3 Ensaio edométrico de pressão expansão a volume constante

Para realizar o ensaio edométrico de pressão de expansão direta, foi utilizada uma célula de adensamento da marca Biopdi. Os corpos de prova foram talhados do material indeformado de forma a preencher a totalidade do anel interno da célula, devido à dificuldade em talhar a amostra com alta compactação e resistência, tem-se que a amostra talhada ainda apresentou, em determinadas localidades, pequenos espaçamentos (<0,1mm) entre o anel e a amostra, observados na Figura 19

(b). O anel utilizado possui diâmetro interno de 50 mm e altura de 20 mm. Após a inserção da amostra no anel e inseri-la na célula de adensamento é posicionado papéis filtros e pedras porosas nas duas faces da amostra.

O ensaio de pressão de expansão a volume constante consiste em confinar a amostra na célula edométrica aplicando uma sobrecarga correspondente a tensão exercida pelo terreno ou uma tensão pré-calculada a partir das particularidades do projeto, após o pré-adensamento da amostra a célula é inundada com água levando a expansão do material.

O ensaio mede a tensão uniaxial necessária para que o material mantenha uma altura constante, para isso aplica-se sucessivas sobrecargas no material. A carga é aumentada a cada 0,01mm de variação na altura do corpo de prova até sua estabilização, a pressão final aplicada no corpo de prova será igual a pressão de expansão do material.

4.4.4 Ensaio experimental de pressão de expansão a volume constante

O ensaio experimental para a determinação de pressão de expansão será realizado usando uma célula semelhante a células normalmente usadas em ensaios de adensamento, a figura e montagem do equipamento confeccionado pode ser observado na Figura 21, as dimensões do equipamento na Tabela 8.

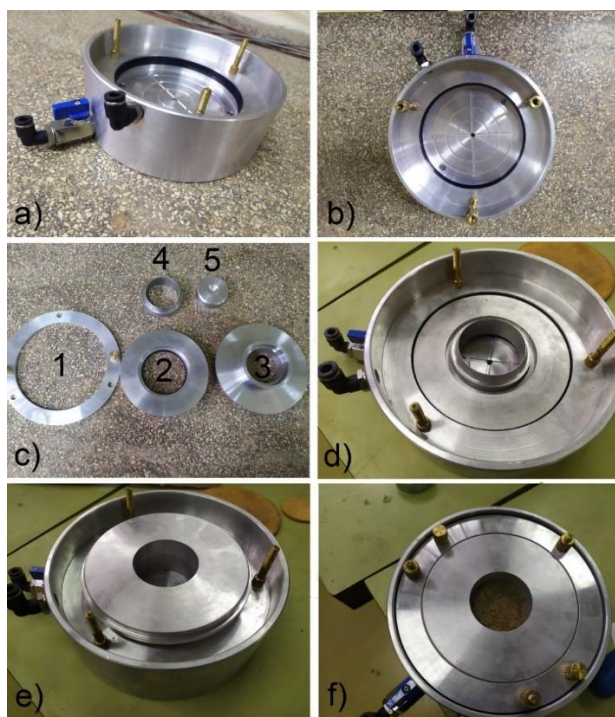


Figura 21: a) Vista lateral da célula desmontada; b) Vista em planta da célula desmontada; c) Peças internas da célula (1- Anel fixador; 2- Suporte interno inferior; 3- Suporte interno superior; 4- Anel de amostra; 5- Tampa d) Célula com o suporte interno inferior e anel de amostra; e) Célula com suporte interno superior; f) Célula montada com o anel de fixação (sem a tampa).

Tabela 8: Dimensões do equipamento em milímetros

Dimensões do equipamento (mm)	Célula	Suporte interno Inferior	Suporte interno superior	Anel de amostra	Tampa	Anel Fixador	Barra Maciça
Diâmetro externo	177,7	122,2	132,1	50,5	48,6	160,8	27,5
Altura externa	64,1	16,4	9,1	20,0	15,9	3,2	186,1
Diâmetro interno	-	51,0	68,4	50,0	-	126,2	-
Altura interna	-	16,4	9,1 + 15	20,0	-	3,2	-
Peso (Kg)	3,25						1,5

Para a caracterização do comportamento expansivo do material as amostras foram preparadas para que apresentem 3 densidades diferentes com três teores de umidade. Para densidades mais elevadas a amostra foi compactada utilizando-se uma prensa hidráulica da marca Marconi (Figura 22).



Figura 22: Prensa hidráulica da marca Marconi

O corpo de prova foi moldado a partir do material destorroado em um almofariz de porcelana, com auxílio de mão de gral recoberto de borracha, a amostra destorroada é hidratada e homogeneizada até a umidade pretendida. Em casos de corpos de prova com densidades mais elevadas o material homogeneizado é compactado por uma prensa hidráulica com pressão máxima de 1 tonelada até a densidade pretendida. Após estes processos o corpo de prova é inserido dentro da célula metálica e posicionada em cima de uma balança digital do modelo LS300 da marca Marte, acopla-se então uma barra maciça, que em sua extremidade inferior está em contato com uma esfera de 15 mm de diâmetro (em contato direto com a tampa da célula) e na extremidade superior apoiada a um suporte fixo que impedira que a amostra sofra expansão. O ensaio experimental pode ser observado na Figura 23.

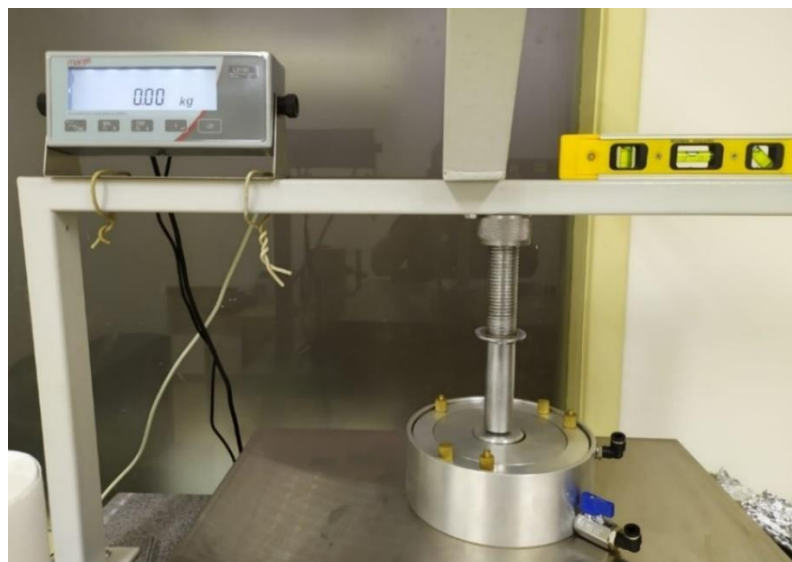


Figura 23: Ensaio experimental de pressão de expansão a volume constante

O corpo de prova posicionado dentro da célula metálica é hidratado, levando a expansão do material, a expansão é impedida devido a barra apoiada no suporte fixo, nesta configuração a pressão de expansão é quantificada pela balança devido às forças atuantes no sistema. Com base na terceira lei de Newton, a pressão provocada pela expansão do corpo de prova exercida na barra gera uma força de mesma intensidade no sentido contrário, que é medido pela balança. Com este procedimento são gerados gráficos de pressão de expansão em relação ao tempo. O desenho esquemático teórico do procedimento pode ser observado na Figura 24.

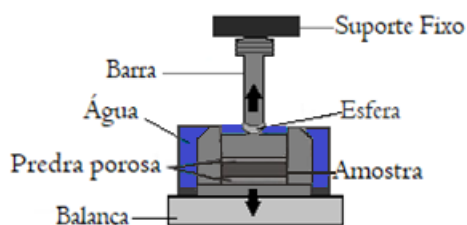


Figura 24: Desenho esquemático teórico da execução do ensaio expansão a volume constante.

A balança digital do modelo LS300 da marca Marte permite a conexão entre a balança e um computador, permitindo medições automáticas em intervalos de tempo pré-definidos. O equipamento foi configurado para registrar medições com intervalos de tempo de 30 segundos.

5. RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES

5.1. Difração de raios X (DRX)

As análises do material foram realizadas no Laboratório de Difractometria de Raios X do NAP-Geoanalítica USP, utilizando o difratômetro Bruker Advance DaVinci

modelo D8 com detector Lynxeye e ótica Twin-Twin, utilizando radiação $K\alpha$ do Cu ($\lambda=1,5406 \text{ \AA}$). A interpretação dos dados foi processada no *software* Suite Diffracplus e nos bancos de dados PDF (ICDD) Versão 2019 e COD (Crystallographic Open Database).

Foram realizadas duas análises por DRX (método do pó e da lâmina de vidro) em amostras do "taguá". Na primeira análise, a amostra foi destorroada e analisada pelo método do pó, sem que ocorresse nenhum tratamento prévio, utilizando-se para destorroar o material uma superfície lisa de ágata como observado na Figura 25.



Figura 25: Amostra destorroada

A Figura 26 ilustra o resultado obtido pelo DRX método em pó:

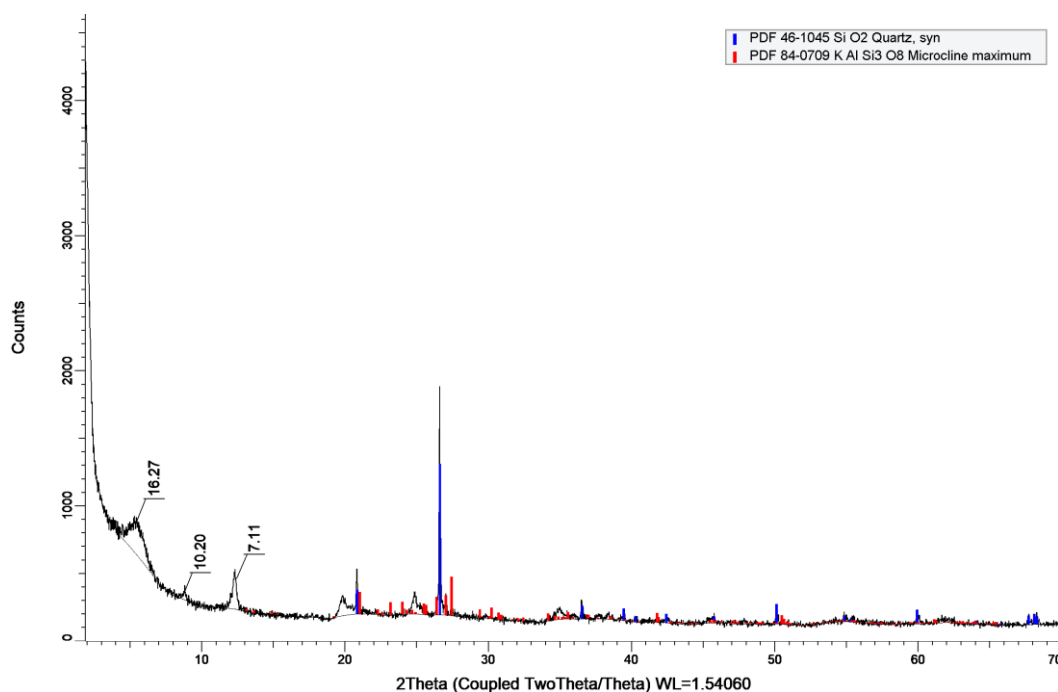


Figura 26: Resultado do DRX pelo método em pó

Analisando o resultado pelo método do pó, pode-se observar a presença de quartzo, feldspato, um pico em $\sim 7\text{\AA}$ representando provavelmente a caulinta, em $\sim 10\text{\AA}$ representando provavelmente a illita e outro argilomineral com pico em $\sim 16\text{\AA}$ representando os argilominerais com picos semelhantes em $\sim 14\text{\AA}$, fazendo que seja necessário a utilização de técnicas complementares como glicolagem e aquecimento.

Na segunda análise pelo método de DRX a amostra foi preparada pelo método de lâmina de vidro para que ocorresse a orientação dos minerais no plano basal $\langle 001 \rangle$ e posteriormente tratado com etilenoglicol. O material destorroado e a lâmina de vidro utilizada na preparação da amostra é observada na Figura 27.



Figura 27: Amostra e material utilizado no método da lâmina de vidro

A Figura 28 ilustra o resultado obtido:

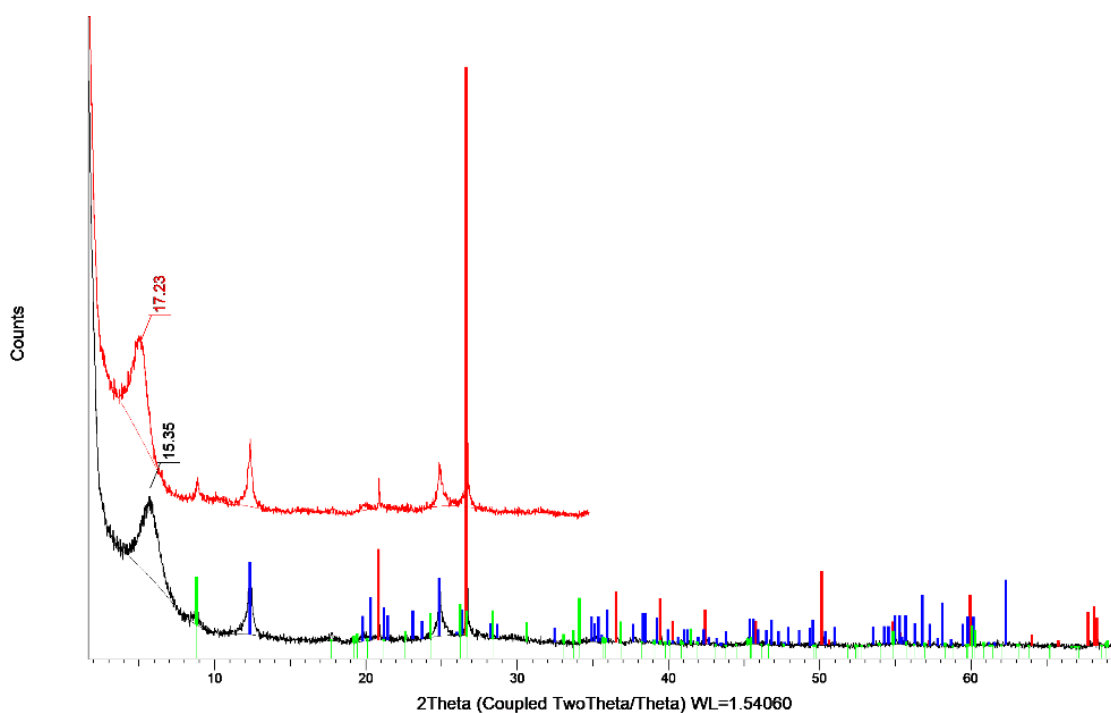


Figura 28: Resultado do DRX pelo método de lâmina de vidro e glicolagem

Analisando o resultado, tem-se um padrão muito semelhante ao observado pelo método do pó, presença de quartzo (linha vermelha vertical nos picos), caulinita (linha azul vertical nos picos), illita (linha verde vertical nos picos) e um argilomineral que apresentou distância interplanar em $\sim 15\text{\AA}$, representando os minerais com distância interplanar semelhante (esmectitas, vermiculitas e clorita). Pelo resultado obtido pela glicolagem (difratômetro em vermelho) verifica-se que a distância interplanar foi alterada de $\sim 15\text{\AA}$ para $\sim 17\text{\AA}$, pela Tabela 5 observa-se que os minerais com este comportamento são as esmectitas (montmorilonita), nota-se também que as distâncias interplanares da illita e caulinita não se alteraram. Devido a técnica de glicolagem não mostrar a ocorrência de vermiculita e clorita o tratamento térmico não foi executado.

5.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens MEV descritas a seguir não foram realizadas e nem acompanhadas durante sua confecção pelo autor deste trabalho, que se limitou apenas a descrever as imagens geradas, as amostras foram analisadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Instituto de Geociências da USP (IGc).

As imagens geradas foram as do tipo elétrons secundários (ES) e elétrons retroespalhados (BSE). As imagens ES são geradas pela interação inelástica com o feixe de elétron (Figura 17), que arranca os elétrons da banda de condução, que são fracamente ligados, gerando imagens da superfície da amostra (Klauss, 2003). As imagens BSE são geradas pela análise dos elétrons retroespalhados que surgem pelas colisões elásticas e inelásticas do feixe incidente com a amostra, gerando um coeficiente denominado BSE (η) (Klauss, 2003), fazendo com que seja possível distinguir diferenças composicionais na amostra.

As imagens MEV do “taguá” podem ser vistas a seguir:

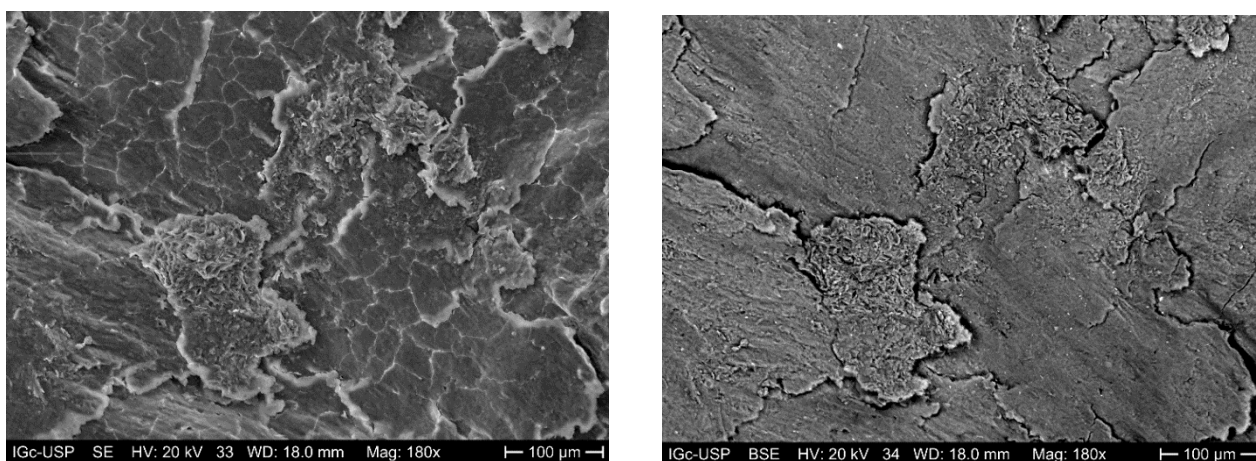


Figura 29: Imagem SE (esquerda) e BSE (direita) com ampliação de 180x

Ao se observar as imagens MEV SE e BSE com o aumento de 180x (Figura 29) é possível observar estruturas em “placas” dos argilominerais, as imagens podem ser divididas em dois “domínios”, um formado pela união dos microagregados de argila e outro composto por placas difusas aparentemente homogênea. Na imagem BSE é possível observar algumas variações de cinza, podendo indicar variações de composição, mas no geral a amostra parece não possuir grandes variações composicionais, as cavidades observadas em torno das placas podem indicar o resultado da expansão e contração dos argilominerais.

Com o aumento de visualização da imagem em 1500x (Figura 30) é possível observar melhor a superfície dos minerais. Observa-se a união dos microagregados de argila que apresentam um arredondamento anguloso e que devido a degradação dos argilominerais pelo intemperismo o formato não é bem definido, não sendo possível diferenciar com precisão o hábito do mineral.

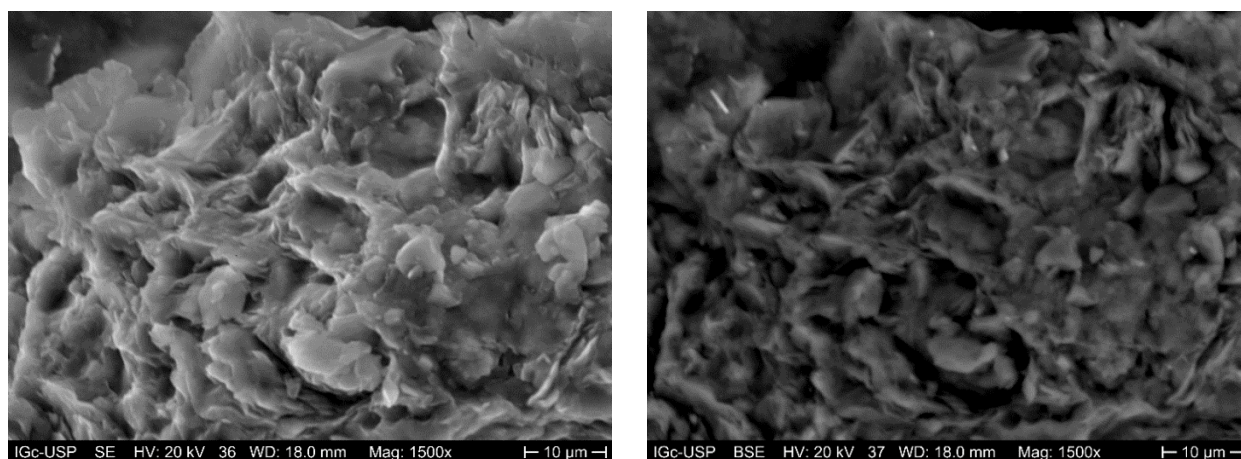


Figura 30: Imagem SE e BSE da amostra resolução 1500x

Ao observarmos a Figura 31 é possível diferenciar duas composições contrastantes, sendo a primeira composição do argilomineral predominante na amostra e a segunda composição de um outro mineral. Ao utilizarmos os dados obtidos por energia dispersiva de raio X (EDS), tem-se que o mineral é formado predominantemente por óxido de ferro (Figura 32), confirmando a presença de ferro oxidado observado na Figura 15 (a). As microanálises de elementos químicos por energia dispersiva de raio – X não foram realizados no material argiloso devido a interferência causada pela superfície irregular dos argilominerais, levando a resultados que não seriam precisos.

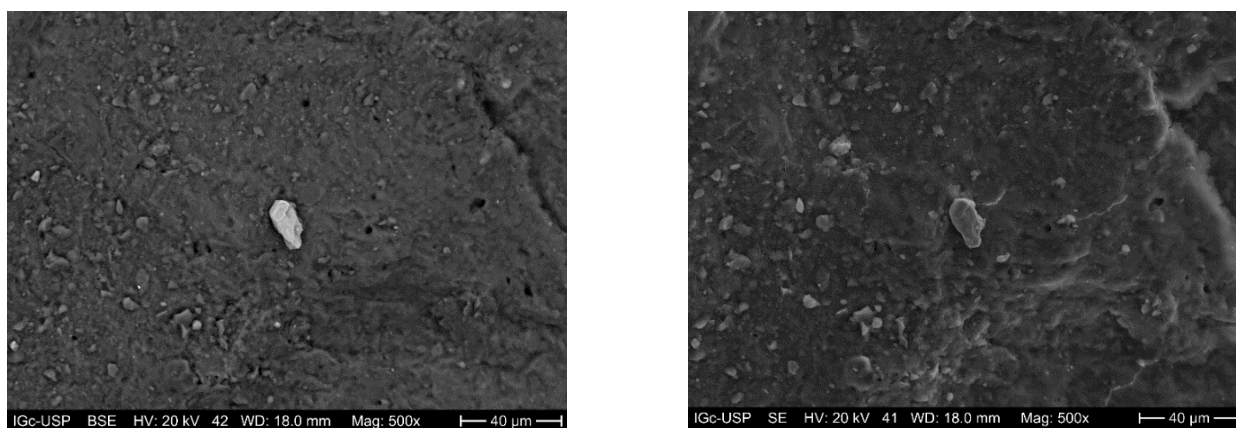


Figura 31: Imagem SE e BSE da amostra resolução 500x

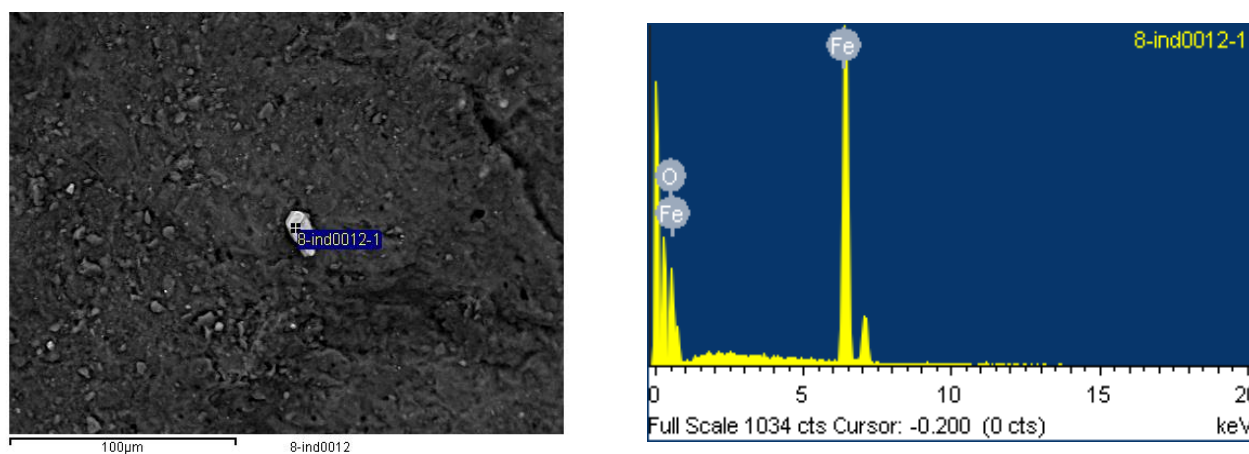


Figura 32: Composição química da amostra por EDS

5.3 Ensaio granulométrico

A curva de distribuição granulométrica gerada a partir dos ensaios granulométricos por peneiramento e sedimentação é representada na Figura 33 e a escala granulométrica na Tabela 09, observando-se o predomínio de material fino, sendo a fração argila correspondente a 81,9% e a fração silte 10,5%. A massa específica real foi de 2,687 g/cm³.

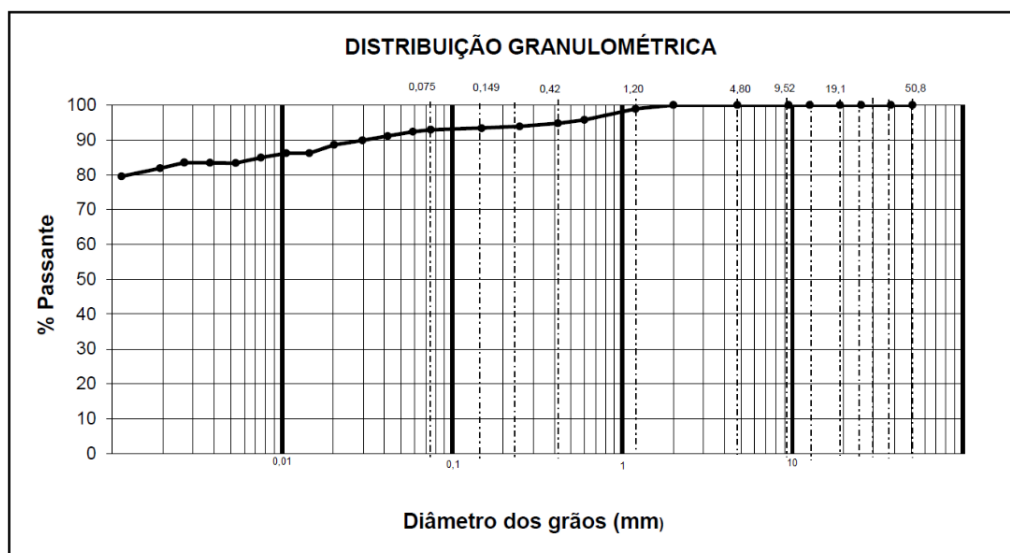


Figura 33: Gráfico de distribuição granulométrica

Tabela 09: Porcentagem granulométrica do solo

Classificação	Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulho
Tamanho (mm)	$A < 0,002$	$0,002 < S < 0,06$	$0,06 < AF < 0,2$	$0,2 < AM < 0,6$	$0,6 < AG < 2,0$	$2,00 < P < 60$
% de material	81,9	10,5	1,3	2,1	4,3	0,0

5.4 Limites de Atterberg

A Tabela 10 mostra os resultados obtidos no ensaio de limite de liquidez e limite de plasticidade.

Tabela 10: Resultado dos Limites de Liquidez e Plasticidade

Limite de Liquidez (LL)

Tara e Solo Úmido (g)	Tara e Solo Seco (g)	Tara (g)	Massa da Água (g)	Massa do Solo Seco (g)	Teor de Umidade (%)	Número de Golpes (Un.)
17,684	13,464	7,470	4,220	5,994	70,4	59
18,330	14,519	9,270	3,811	5,249	72,6	47
22,165	17,049	10,190	5,116	6,859	74,6	37
23,151	17,353	9,810	5,798	7,543	76,9	28
18,831	13,911	7,680	4,920	6,231	79,0	20

Limite de Plasticidade (LP)

Tara e Solo Úmido (g)	Tara e Solo Seco (g)	Tara (g)	Massa da Água (g)	Massa do Solo Seco (g)	Teor de Umidade (%)	Observações
7,979	7,783	6,950	0,196	0,833	23,5	
8,282	8,056	7,180	0,226	0,876	25,8	
11,012	10,800	9,990	0,212	0,810	26,2	
14,440	14,244	13,480	0,196	0,764	25,7	
8,306	8,102	7,270	0,204	0,832	24,5	

Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
77	25	52

5.5 Caracterização do potencial de expansão por parâmetros indiretos

Com os dados obtidos no ensaio granulométrico e nos limites de Atterberg e com base nas classificações abordadas nas tabelas 6 e 7 e da figura 18. Tem-se que a classificação do grau de expansibilidade por parâmetros indiretos é indicada na Tabela 11.

Tabela 11: classificação quanto a expansão por parâmetros indiretos

Classificação	Grau de Expansão
Holtz e Gibbs (1956)	Muito Alto
Chen (1975)	Muito Alto
Seed et al. (1962)	Muito Alto
Daksanamurthy e Raman (1973)	Muito Alto
Williams & Donaldson (1980)	Alto

5.6. Ensaio de Expansão livre

Os resultados obtidos pelo ensaio são ilustrados na Figura 34, o solo apresentou uma expansão relativamente alta, estabilizando em torno de 19,02%, comprovando a expansibilidade do material analisado. O teor de umidade da amostra aumentou de 8,98% para 25,24% ao final do ensaio.

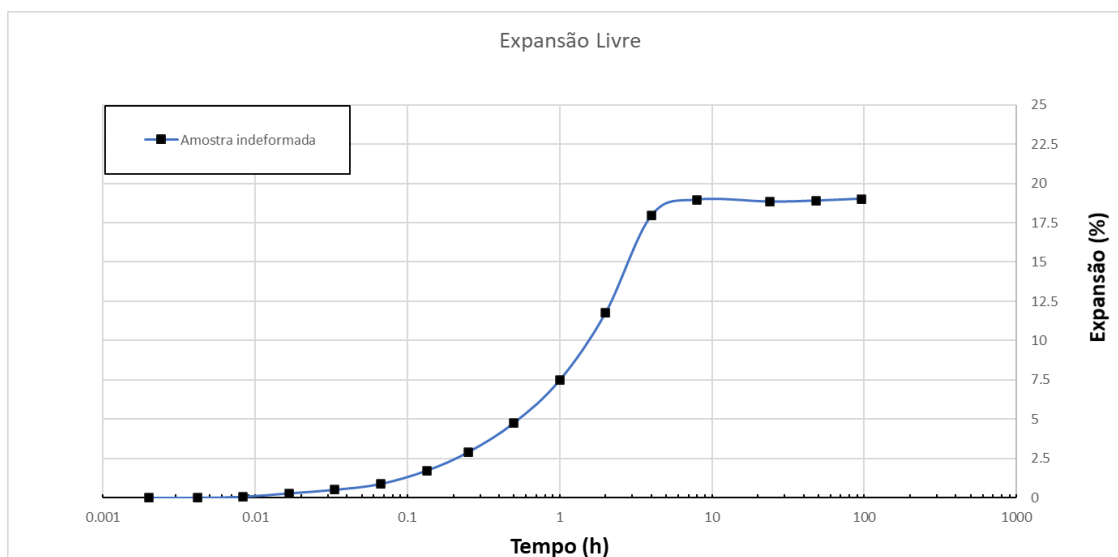


Figura 34: resultado da expansão livre

5.7 Ensaio edométrico de pressão expansão direta

Os resultados obtidos pelo Ensaio edométrico de pressão expansão direta são ilustrados na Figura 35, com valores de pressão de expansão chegando a 736,8 kPa. O teor de umidade da amostra aumentou de 9,02% para 25,19% ao final do ensaio.

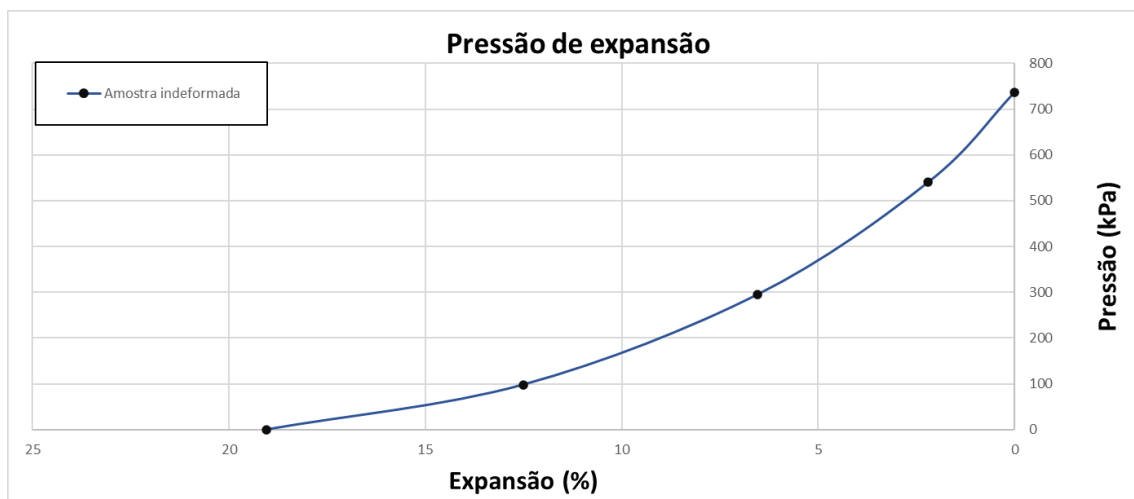


Figura 35: Resultado do Ensaio edométrico de pressão expansão direta

5.8 Ensaio edométrico de pressão expansão a volume constante

Os resultados obtidos pelo Ensaio edométrico de pressão expansão a volume constante são observados no Figura 36, os valores de pressão de expansão chegaram a 1154,32 kPa. Devido a este ensaio ter sido realizado em um laboratório privado as inserções de cargas limitaram-se ao horário comercial da empresa, as cargas foram adicionadas sempre que ocorreu variação de 0,01 mm (0,05%) na altura da amostra, após 6h de ensaio não foi possível continuar a adição de cargas devido ao encerramento do expediente no laboratório, a amostra expandiu 0,12 mm (0,6%) até a retomada do ensaio, adicionando-se sobrecargas até o retorno da altura inicial da amostra.

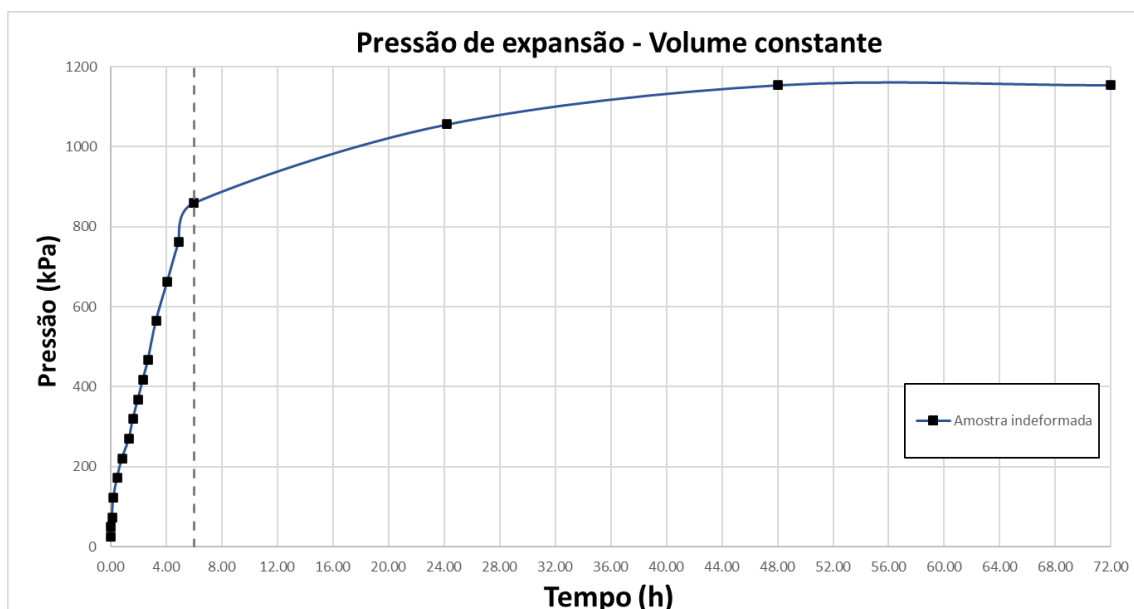


Figura 36: Resultado do Ensaio edométrico de pressão expansão a volume constante

5.9 Ensaio experimental de pressão de expansão a volume constante

Os resultados obtidos pelo ensaio experimental de pressão de expansão a volume constante são observados na Figura 38. Em todos os ensaios as leituras na balança não variaram a partir da hidratação das amostras, mantendo-se um valor constante no período de 96h.

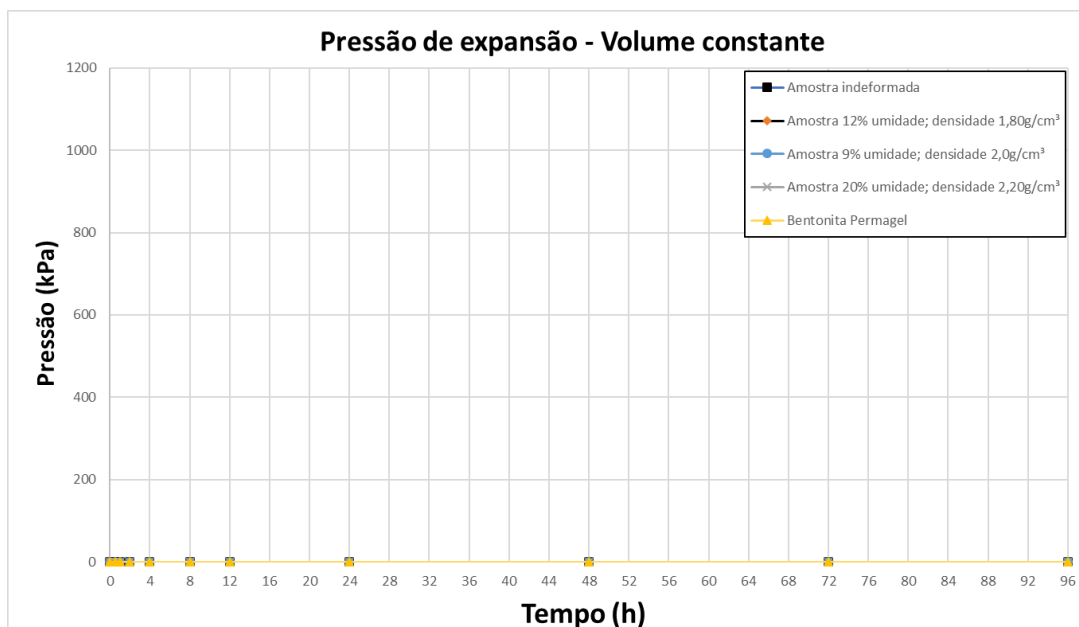


Figura 37: Resultado do Ensaio edométrico de pressão expansão a volume constante pelo equipamento experimental

Para uma melhor caracterização do “Taguá” eram previstos ensaios com corpos de prova que apresentassem três densidades com três variações de umidade para cada densidade, devido aos resultados obtidos e a não variação da pressão, optou-se por encerrar os ensaios com três densidades com três umidades diferentes, devido principalmente ao equipamento se mostrar inadequado para o ensaio.

Utilizou-se também bentonita (material altamente expansivo) da marca permagel, como um teste final para o equipamento, porém os resultados não apresentaram variações de pressão de expansão, as características desta bentonita pode ser observada no trabalho de Jarek et al. (2009).

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os ensaios de identificação de expansividade por métodos indiretos por Difração de Raio – X, Microscopia eletrônica de varredura (MEV), Limites de Atterberg e Ensaios Granulométricos, apresentaram resultados que indicaram o potencial expansivo do solo analisado.

O ensaio granulométrico demonstrou o predomínio da fração argila (81,9%) no solo, mas a presença da fração argila na amostra não é suficiente para classificar o solo como expansivo, analisando em conjunto aos resultados obtidos por difração de raio-x (DRX) que demonstrou a presença de argilominerais expansivos como esmectita (montmorilonita), caulinita e Illita, foi possível indicar uma expansividade do material.

Os resultados de Limites de Atterberg mostraram um solo com característica plástica e com alto limite de liquidez, que segundo Nelson e Miller (1992) indica um alto potencial expansivo do solo. Os limites de Atterberg são um dos principais parâmetros para a classificação indireta do grau de expansibilidade do solo e com base na Tabela 11 o grau de expansividade por métodos indiretos variou de alto a muito alto.

Devido as amostras terem sido armazenadas por aproximadamente dois anos dentro do laboratório de geotecnia da USP, sem acondicionamento apropriado que impedisse a perda de umidade, os resultados obtidos pelos métodos diretos nas amostras indeformadas exibem valores de expansão e pressão de expansão maiores do que o solo indeformado com umidade natural teria, fazendo com que os dados apresentados sejam analisados como uma comprovação da expansibilidade do solo e de seu alto potencial expansivo.

A partir dos resultados obtidos por métodos diretos quantitativos, tem-se que o material apresentou alta expansibilidade e alta pressão de expansão, os resultados de expansão livre mostraram valores em torno de 19% de expansão, valores de pressão de expansão de 736,6 kPa para o ensaio de pressão de expansão direta e 1154,32 kPa para o método a volume constante, este último ainda não sendo possível adicionar cargas a cada variação de 0,01 mm na altura do corpo de prova até a conclusão do ensaio, devido principalmente aos longos períodos de tempo necessário para chegar a estabilização da pressão de expansão, que excedeu o horário comercial do laboratório do qual o material foi ensaiado, sendo este um dos motivos para o teste experimental a volume constante proposto neste trabalho, um equipamento mais “prático” com medições automáticas para chegar a pressão de expansão.

O ensaio experimental de pressão de expansão a volume constante evidenciou que os equipamentos utilizados para o ensaio não foram adequados, a pressão não variou após a hidratação do material, mesmo este apresentando altos valores de pressão de expansão nos ensaios convencionais.

Levantaram-se algumas hipóteses para estes resultados, entre estas hipóteses destacam-se duas em relação ao equipamento. A primeira em relação a barra que liga a tampa da célula ao suporte fixo, no encerramento dos ensaios no momento de

desrosquear a peça em contato com o suporte fixo, as medições na balança subiam bruscamente, com medições passando de 0,00 Kg para valores maiores, normalmente passando das dezenas de quilogramas, mostrando que o material apresentou pressão de expansão, mas esta pressão não é transmitida à balança. Devido a estas circunstâncias sugere-se uma adequação ao equipamento, removendo a barra maciça e criando uma configuração onde a medição é feita diretamente na tampa da célula. A segunda hipótese em relação à balança, em decorrência de variações na pressão, ainda que a balança não possa indicar essas variações mínimas, é possível admitir que o equipamento não possui sensibilidade adequada para o ensaio. Portanto, sugere-se a troca do modelo de balança para um modelo de maior precisão, com duas a três casas decimais.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a caracterização do provável potencial expansivo do solo pertencente a Formação Resente, o “taguá” e a avaliação do equipamento experimental como um meio alternativo aos ensaios convencionais.

Os ensaios realizados revelam que o solo apresenta um grande percentual de finos, com a fração argila predominante no solo. Os dados obtidos pela análise por DRX, confirmaram a presença de argilominerais de comportamento expansivo. O material apresentou comportamento plástico, com alto índice de plasticidade e limite de liquidez. Pela caracterização do potencial de expansão por parâmetros indiretos inferiu-se um potencial expansivo de alto a muito alto.

O material coletado do “taguá”, devido ao acondicionamento inadequado das amostras, perdeu umidade durante o armazenamento, influenciando diretamente nos resultados obtidos, e em decorrência dessa perda de umidade, é possível concluir que os valores de pressão de expansão e expansão apresentados são maiores do que apresentariam se o solo analisado fosse ensaiado a umidade natural. A amostra indeformada com umidade possivelmente próxima a higroscópica apresentou expansão em torno de 19%, valores de pressão de expansão de 736,6 kPa para o ensaio de pressão de expansão direta e 1154,32 kPa para o método a volume constante, comprovando o comportamento expansivo do material.

O equipamento experimental mostrou-se inadequado para a medição da pressão de expansão, sendo necessário ajustes para que o equipamento se torne utilizável para propósito da medição de pressão de expansão.

8. SUGESTÕES

Para melhor caracterização do comportamento expansivo do “Taguá” sugere-se os ensaios e análises por:

- Análise Térmica Diferencial
- Análise Térmica Gravitacional
- Capacidade de Troca de Íons
- Adorção de Azul de Metileno
- Ensaios edométricos múltiplos e duplo
- Determinação da Sucção
- Ensaios de compactação

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2016b. NBR 7181: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 16p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2016c. NBR 6458: Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 14p., Revisada em 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2016d. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 9p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2016e. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 7p.
- American Society for Testing and Materials, 2010, D4546: Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils, 7p. doi: 10.1520/D4546-03
- Amador, E.S., 1975, Estratigrafia e sedimentação na Bacia de Resende – RJ, Rio de Janeiro, Anais da Academia Brasileira de Ciências.
- Callister, W. and Rethwisch, D., 2007, Materials science and engineering: an introduction, 7 a . New York: John Wiley & Sons.
- Companhia do Metropolitano de São Paulo, 2010, Base de dados da campanha de investigação geológico-geotécnica do Projeto Básico da Linha 6-Laranja, São Paulo: CMSP, 2012. 01 DVD-ROM.
- Chen, F. H., 1975, Foundation on expansive soil. Amsterdam: Elsevier. 275p.
- Daksanamurthy, V. e Raman, V., 1973, A simple method of identifying na expansive soil. Soil and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanic na Foundation Engineering, Vol. 13 (1), Pp. 97 – 104.
- Ferreira, S.R.M., 1995, Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação. Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 379p.
- Ferreira, S. R. M., 2010, Volume change behaviour due to moisture variation in vertisoil from a semiarid region in Pernambuco – Brazil,
- Frazão, E.B., 1981, Contribuição à metodologia para determinação da pressão de expansão em solos e rochas [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 71 p.

- Gomes, C. F., 1986, Argilas. O que São e para que servem. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 457 p.
- Gurgueira, M. D., 2013, Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.44.2013.tde-14112013-104040.
- Holtz, W. G. e Gibbs, H. J., 1956, Engineering properties of expansive clays. Transactions of ASCE.
- Jarek, F, Reis, D.M., Mauler, R.S., Barbosa, R.V., Kloss, J.R., 2009, Caracterização de argilas naturais e quimicamente modificadas para desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos, Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, Paraná.
- Klauss, P., 2003, Estudo da obtenção de imagens no microscópio eletrônico de varredura e espectros na microanálise por energia dispersiva. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Catarina. 27 p.
- Maliska, A. M., Microscopia eletrônica de varredura. Disponível em http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf (Acessado em Setembro 2021)
- Mahler, C.F., 1994, “Análise de obras assentes em solos colapsíveis e expansivos”. Dissertação de doutorado. COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro.
- Mitchell, J. K., 1993, Fundamentals of the soil behavior. 2nd ed., Ed John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. 437 p.
- Morais, W. A.; Vasquez, M. T.; Nobre, R. M.; Landgraf, F. J. G., 2020, Proposta de procedimento para estimar a rigidez em metais texturizados pela análise dos dados de EBSD. Unisanta Science and Technology, Santos, v. 9, n. 1, p. 38-49. Disponível em: < <https://periodicos.unisanta.br/index.php/sat/article/view/2471/1791> >.
- Nascimento, R. A., 2018, Caracterização de argilomireral proveniente da região sudeste do estado de São Paulo por difração de raios x: cristais orientados, trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Negrão, A. P., Mello, C. L., Ramos, R. R. C., Sanson, M. de S. R., Louro, V. H. A. Louro, and Bauli P. G., 2020, Tectonosedimentary evolution of the Resende and Volta Redonda basins (Cenozoic, Central Segment of the Continental Rift of Southeastern Brazil), Journal of South American Earth Sciences. doi: 10.1016/j.jsames.2020.102789.

- Nelson, J. D.; Miller, D. J., 1992, Expansive Soils – Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, New York: John Wiley & Sons, Inc., 259p.
- Pereira, E. M., 2004, Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. doi:10.11606/T.18.2004.tde-09052006-144706
- Pinto, C.S., 2006, Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3ªed São Paulo, Oficina de textos, 247p.
- Riccomini, C., Sant'Anna, L. G., and Ferrari, A. L., 2004, Evolução Geológica do rift continental no Sudeste do Brasil, in Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio de Almeida.
- Riccomini C, Coimbra AM., 1992, Geologia da bacia sedimentar. In: Solos da Cidade de São Paulo. São Paulo: Abms/Abef.
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2020, “Sabesp entrega obras que ampliam coleta e tratamento de esgoto de 350 mil pessoas”: <https://bit.ly/2R9kSq9> (acessado Maio 2021)
- Santos, P. S., 1989, Ciência e tecnologia das argilas. 2. ed. rev. ampl. São Paulo, SP: Edgard Blucher Ltda, 500 p
- Scapin, M. A., 2003, Aplicação da difração e fluorescência de raios-X (WDXRF): ensaios de argilominerais. 2003. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. doi:10.11606/D.85.2003.tde-07052007-161852.
- Seed, H. B., Woodward, R. J. e Lundren, R., 1962, Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE, Vol. 88 (SM3). Pp. 53 – 87.
- Simões, P.R.M., Costa Filho, L.M., 1981, Características mineralógicas de solos expansivos do Recôncavo Baiano, In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais, pp.569-588, Rio de Janeiro.
- Skempton, A. W., 1953, The colloidal activity of clay. In: Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation. 3rd., 1953 Zurich, Proceeding. Zurich, v.1. p. 57–61.
- Sridharan, A. Sreepada Rao, and Sivapullaiah, P. V., 1986, SWELLING PRESSURE OF CLAYS., Geotech. Test. J., doi: 10.1520/gtj10608j.

- Taylor, R. K. and Smith, T. J., 1986, The engineering geology of clay minerals: swelling, shrinking and mudrock breakdown, *Clay Miner*, doi: 10.1180/claymin.1986.021.3.01.
- Tournassat, C., Bourg, I. C., Steefel, C. I., and Bergaya, F., 2015, Surface Properties of Clay Minerals, in *Developments in Clay Science*.
- Vargas, M, 1975, Structurally unstable soils in Southern Brazil, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, doi: 10.1016/0148-9062(75)90023-6.
- Vijayvergiya, V. N. e Ghazzaly, O. I., 1973, Prediction of Swelling Potencial for Natural Clays. *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, Hayfa, Vol. 1, pp. 227 - 236.