

Capítulo 8

TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Silvio Romero de Melo Ferreira
Joaquim Teodoro Romão de Oliveira
Yamile Valencia González

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão abordadas as principais técnicas de amostragem e os métodos de preparação de amostra e corpos de prova para ensaios em solos não saturados. Não serão abordados, aqui, métodos ou técnicas de ensaios, mas apenas a preparação das amostras para os ensaios.

1.1 Definição dos objetivos e necessidades da amostragem de solo

A realização de ensaios de laboratório em solos não saturados exige a coleta prévia de amostras de boa qualidade do terreno a ser estudado. Por esse motivo, neste item, serão abordados assuntos referentes a tipos de amostras.

Hvorslev (1949) considera a seguinte classificação para os diferentes tipos de amostras, de uma maneira geral:

- 1) Amostras não representativas.
- 2) Amostras representativas.
- 3) Amostras indeformadas.

Algumas características desses tipos de amostras são resumidas a seguir:

- 1) Amostras não representativas:
 - Solos de várias camadas misturados.
 - Alguns componentes do solo removidos.
 - Materiais estranhos dentro da amostra.
- 2) Amostras representativas:
 - Estrutura do solo destruída.
 - Variação na umidade ou nos índices de vazios.
 - Sem variação nos constituintes do solo.

3) Amostras indeformadas:

- Sem destruição (amolçamento) da estrutura do solo.
- Sem variação na umidade, nos índices de vazios e na composição química.

Ainda segundo Hvorslev (1949), as amostras não representativas não são adequadas para ensaios de laboratório, permitindo, apenas, uma classificação preliminar das variações das camadas do terreno e indicando em quais profundidades amostras representativas ou indeformadas devem ser obtidas. Atualmente, essas amostras não são mais consideradas úteis para uso em investigações geotécnicas. As amostras representativas seriam adequadas apenas para realização de ensaios de classificação, enquanto que as amostras indeformadas seriam indicadas para todos os tipos de ensaios de laboratório, principalmente os ensaios de resistência, de deformabilidade e permeabilidade.

A Norma ASTM D4220/D4220M-14 classifica as amostras coletadas em 4 grupos, a saber:

- Grupo A - Amostras em que apenas a identificação visual geral do perfil é necessária.
- Grupo B - Amostras para realização de ensaios de caracterização.
- Grupo C - Amostras intactas para realização de ensaios de expansão, adensamento, condutividade hidráulica, cisalhamento ou qualquer ensaio que necessite de corpos de prova intactos.
- Grupo D - Amostras de solos que são frágeis ou altamente sensíveis necessárias para a realização dos ensaios citados no Grupo C.

1.1.1 Objetivos da amostragem

Segundo CETESB (1999), citando Byrnes (1994) e USEPA (1989), as seguintes ações devem ser efetuadas para a definição dos objetivos da amostragem:

- Identificar e envolver o grupo de pessoas (engenheiros, geólogos, químicos, estatísticos) que farão parte do programa de amostragem ou que utilizarão os dados levantados.
- Realizar uma avaliação preliminar, incluindo levantamento e avaliação de informações já existentes e uma visita de reconhecimento ao local.
- Desenvolvimento de um modelo conceitual para a área.

Logicamente, é importante lembrar que cada caso é um caso diferente e que as etapas acima podem ser minimizadas e/ou ampliadas em função do tipo e do porte do empreendimento, bem como das condições geológico-geotécnicas do terreno. Apenas amostras representativas e/ou indeformadas devem ser coletadas. O objetivo principal é coletar amostras que representem, da melhor maneira possível, as condições de campo.

1.1.2 Necessidades da amostragem de solo

Nessa etapa, devem ser especificada a utilização e os tipos de dados necessários para serem atingidos os objetivos propostos. Com tal finalidade, devem ser estipulados os critérios que determinarão a adequação dos dados levantados. Deve-se ficar atento para, entre outros aspectos, os usos, os tipos e a qualidade dos dados obtidos (CETESB, 1999).

Também, nessa etapa, é importante utilizar o bom senso de engenharia para aumentar a profundidade dos dados em função da obra e do subsolo.

1.1.3 Recomendação prática de condições de amostragem e ensaios de laboratório

Um dos pontos chave para elaboração de um programa de ensaios de laboratório para uma obra geotécnica é a definição dos tipos, das condições de ensaios e da amostra a serem solicitados. Com o objetivo de contribuir para esse aspecto prático, decidiu-se resumir algumas recomendações para realização de ensaios de laboratório em solos, em função da obra geotécnica. Certamente, devem ser levados em consideração os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais para uma definição final e ter consciência de que cada caso é um caso único, evitando-se generalizações. Tomando-se como base a experiência dos autores, com as devidas ressalvas anteriores, a Tabela 1 apresenta as recomendações mínimas consideradas adequadas de um caso típico de obra. Essa tabela, entretanto, deve ser tomada apenas como referência em termos qualitativos e não como verdade absoluta. Ela pode e deve ser adaptada em função das peculiaridades do projeto. Os quantitativos devem ser definidos em função da espessura das camadas e do porte da obra.

Tabela 1 – Recomendações práticas de ensaios e condições de amostragem em solos não saturados (Adaptado de Oliveira, 2005)

Obra Geotécnica	Tipo de solo	Ensaios recomendados	Condições da amostra
Fundação	Solo co-lapsível ou expansivo	• Caracterização completa • Colapso ou expansão livre • Tensão de expansão	ndeformada (bloco ou amostrador tubular) ou compactada
Barragem de terra	Argiloso	• Caracterização completa • Compactação • Permeabilidade • Adensamento • Triaxial UU, CU e CD	Compactada nas condições do ensaio de compactação atentando-se para a similaridade metodológica
Estrutura de contenção	Argiloso-arenoso	• Caracterização completa • Cisalhamento direto	Indeformada (bloco, amostrador tubular ou caixa de cisalhamento)
Estabilização de taludes	Corte	• Caracterização completa • Cisalhamento direto	Indeformada (bloco, amostrador tubular ou caixa de cisalhamento), atentando-se, no caso de maciços, com xistossidade para a orientação de partículas em relação ao talude de corte quando de ensaios de cisalhamento direto.
	Aterro	• Caracterização completa • Compactação • Cisalhamento direto	Compactada nas condições do ensaio de compactação, deve-se atentar para a orientação da amostra em relação às solicitações.

* Obs.: Caracterização completa inclui os ensaios de peneiramento, sedimentação, limites de liquidez e plasticidade, deve-se atentar para a orientação da amostra em relação às solicitações.

1.1.4 Erros associados à amostragem e preparação do solo

Existem dificuldades para se obterem amostras indeformadas completamente representativas do solo em campo. Essas dificuldades compreendem, dentre outros, a retirada e o transporte de amostras. Adicionalmente, a preparação dos corpos de prova para os ensaios, assim como a própria técnica de ensaio, pode dar lugar ao solo se submeter a esforços muito diferentes dos existentes ou que passarão a atuar *in situ*. Essa variação, muitas vezes, inevitável do sistema de esforços, com frequência modifica o comportamento do solo, em especial daqueles com composição siltosa e argilosa formada por partículas lamelares. Segundo Lambe, *et al.* (1960), a extração, o transporte e a preparação das amostras geralmente as submete a deformações que alteram a estrutura do solo.

No contexto dos solos não saturados, embora sendo, em geral, mais difícil a avaliação, faz-se necessário considerar o impacto de tais modificações na própria sucção. Por exemplo, a expansão do solo quando do alívio de tensões gera um aumento da porosidade que termina afetando a sucção atuante. É verdade que a recompressão posterior quando da execução dos ensaios pode restabelecer ou mesmo tornar a porosidade menor do que aquela em que se encontrava o solo em campo, mas isso não significa necessariamente que a sucção venha a ser a mesma, pois surgirá certa histerese. Essas colocações mostram a importância de se buscar preservar ao máximo o estado do solo amostrado.

Segundo a EMBRAPA (2006), três tipos de erros estão associados à amostragem: a) a amostragem em si; b) a escolha dos locais; c) os erros analíticos. Um quarto fator indutor de erro pode aqui ser considerado: o relativo à orientação da amostra em relação à situação de campo e aos ensaios que serão realizados, pois, dependendo do solo, ela é indutora de anisotropia. No que concerne aos erros apontados pela EMBRAPA (2006) tem-se:

i - Erros de amostragem: ocorrem porque não é possível analisar a totalidade da área, e as amostras coletadas podem representar apenas um pequeno subgrupo. Aumentando-se o número de pontos de amostragem, amplia-se a representatividade, diminuindo-se o impacto do erro de amostragem.

ii - Erros de seleção dos locais: derivam da retirada de amostras não representativas da área. O erro de seleção pode ser reduzido com um bom plano de amostragem e aqui se inclui o registro da orientação da amostra em relação à geomorfologia local e aos próprios planos estratigráficos quando presentes.

iii - Erros analíticos: podem resultar da manipulação, do recipiente de coleta, da estocagem, do preparo e da técnica analítica. No caso dos solos não saturados, fatores como desidratação ou hidratação do solo requerem cuidado, pois, por exemplo, os solos tropicais profundamente intemperizados podem ter a estabilidade dos agregados neles presentes afetada pelo processo de desidratação ou pela hidratação usando fluido com características distintas daquela de campo. Já nos solos pouco intemperizados contendo argilo-minerais expansivos, a hidratação do solo com fluido distinto daquele presente em campo vai influir, com fundamento nos estudos apresentados em Grim (1962), nas propriedades e nos comportamento dos solos. Outro aspecto relevante diz respeito à necessidade de se considerar o impacto da temperatura nas propriedades e nos comportamento dos solos não saturados, pois ela afeta a própria curva característica (Lima, 2018).

No caso dos solos residuais tropicais, a presença de junções entre partículas, seja por cimentação ou agregação, dá um componente de resistência e rigidez que pode ser destruído facilmente por perturbações durante a amostragem e preparação da amostra. Outra característica dos solos residuais tropicais que pode ser afetada pela manipulação inadequada das amostras para os ensaios é o índice de vazios. As mudanças na relação de vazios podem, por exemplo, dar resultados pouco representativos em ensaios de resistência, adensamento, permeabilidade e sucção.

Os solos residuais tropicais são solos que geralmente se encontram em estado não saturado, umidade difícil de conservar no processo de amostragem e durante a estocagem, podendo ser responsável por perturbações da amostra e do comportamento durante os ensaios de laboratório, por isso, é importante que a umidade seja conservada o mais próximo da umidade *in situ*. Cabe aqui uma sugestão quando da amostragem com retirada de blocos indeformados: além da preocupação com o registro da profundidade e orientação da amostra, como, geralmente, os blocos ao serem retirados são envoltos por parafina, recomenda-se que a ela seja adicionada 30% a 50% de vaselina, dependendo das variações térmicas a que o bloco será submetido. A vaselina objetiva eliminar a rigidez e o trincamento da parafina após o resfriamento e ao submeter o bloco de amostra a movimentações. Em geral, esses blocos são armazenados em câmara úmida, no entanto, como a parafina os isola da condição atmosférica, o aspecto relevante a ser considerado torna-se apenas a temperatura, que deve ser estável e preferencialmente compatível com o campo.

No caso das amostras deformadas, a secagem das amostras, mesmo que a temperaturas ambientes, pode, dependendo do solo, afetar as propriedades e o comportamento do solo, como exemplifica Camapum de Carvalho (2022) ao se referir ao argilomineral haloisita em estado hidratado. A secagem pode mudar a estrutura e o comportamento físico-químico do solo. Adicionalmente, deve-se evitar, no caso de solos agregados, a quebra das agregações durante o processo de destorroamento, lembrando que um agregado não é um torrão e tal quebra irá afetar as propriedades e comportamento do solo. Embora Huat *et al.* (2012), no caso geral, recomendem, para facilitar o destorroamento, que se encharque a amostra durante a noite antecedente a essa etapa, cabe destacar que, no caso de solos menos intemperizados com presença de argilominerais expansivos, isso vai interferir em seu estado de hidratação, impactando em suas propriedades e comportamento (Camapum de Carvalho e Gitirana Jr, 2021).

O exposto neste subitem coloca em evidência a importância de se ter cuidado quando da amostragem e do próprio tratamento a ser dado às amostras nas fases de estocagem e de preparação para os ensaios, pois suas propriedades e comportamento podem ser modificados de modo prejudicial ao projeto de engenharia e à própria execução da obra, como exemplificado em Camapum de Carvalho (2022).

1.2 Levantamento e avaliação de informações já existentes do local

Quando se prevê a execução de uma obra como etapa inicial na realização do estudo geotécnico, deve-se avaliar toda a documentação técnica disponível sobre o local. Vale salientar que essa etapa preliminar não dispensa a execução dos trabalhos de campo e posteriores estudos mais detalhados de laboratório e de campo.

Os estudos preliminares compreendem, fundamentalmente, o uso de:

- Cartas como as topográficas, geológicas, geomorfológicas, climatológicas, hidrogeológicas e de uso e ocupação do solo.
- Fotografias aéreas e imagens de satélites.
- Informações existentes sobre a área de interesse como relatórios técnicos e artigos.

As cartas topográficas ainda constituem-se em uma base fundamental para qualquer tipo de estudo geotécnico porque apresentam em detalhe as inclinações do terreno e os limites naturais da área, permitindo localizar a zona de trabalho adequadamente e apontando as possibilidades de se subdividir o terreno de acordo com o tipo, tamanho e riscos do empreendimento. Elas são, também, aliadas das cartas geomorfológicas, relevantes para a avaliação prévia dos locais com potencial de maior ou menor concentração de umidade ou de maior ou menor nível d'água freático.

As cartas geológicas contêm informação das formas que caracterizam o relevo, aspecto de vital importância na detecção de zonas de instabilidade. As formas fazem referência à litologia e à estrutura do estrato rochoso da região, que consiste na classificação dos materiais segundo sua origem, composição mineralógica, estratigrafia e sistema de falhas ou fraturas produzidas pelos movimentos tectônicos.

Nas cartas geomorfológicas, representam-se os processos que atuam modificando as condições iniciais, como a intemperização, sedimentação e erosão do relevo, a origem dos processos geomorfológicos e sua sequência cronológica, com especial distinção entre as formas ativas e inativas. A geomorfologia assume particular importância nos estudos em que se consideram os efeitos da não saturação do solo (Jesus, 2013).

As informações sobre precipitações, formas de drenagem, ações das ondas e correntes, posição do lençol freático, fluxo subterrâneo, umidade relativa e ação das geleiras são contidas nas cartas climatológicas e hidrogeológicas. Nas regiões tropicais, é fundamental conhecer as características da drenagem, porque elas têm um efeito importante na alteração da microestrutura dos solos. No que tange a questão dos solos não saturados, é, ainda, relevante estabelecer, nas cartas climatológicas, a condição de insolação e as direções preferencias dos ventos, pois eles assumem grande influência sobre sua condição de hidratação. O solo encontra-se em permanente interação com a atmosfera, e esses dois elementos são fundamentais no processo de equilíbrio solo-atmosfera.

Ainda sobre as cartas, assume relevância a de uso e de ocupação do solo por estabelecer os limites geográficos dos estudos a serem realizados.

As fotografias aéreas e as imagens de satélites são uma poderosa ferramenta para avaliar o terreno, inclusive o uso e a ocupação do solo, podendo cobrir grandes áreas de forma rápida e relativamente econômica. Em todas as pesquisas, pode ser conveniente examinar as imagens em diferentes épocas para se conhecer e definir antecedentes e a potencial evolução do terreno.

A Tabela 2 resume, de forma geral, a informação do local que deve ser recopilada e avaliada na etapa preliminar de um estudo geotécnico.

Tabela 2 – Fatores básicos que devem ser recopilados e avaliados na etapa preliminar

Fator	Parâmetro	Classificação
Topográfico	Localização	Posição
		Limites
		Altura
		Declividade
		Extensão
Geológico	Morfologia	Relevo relativo e forma em planta
		Ângulo da inclinação
		Forma do perfil
	Composição e estrutura	Tipo de roca
		Mineralogia
		Estratigrafia
		Produtos de alteração
		Falhas, fraturas, juntas e superfícies de estratificação
		Precipitação anual e variação da precipitação
		Variação da temperatura
Ambiental	Clima	Condição de insolação
		Umidade relativa
		Evapotranspiração
	Hidrologia e hidrogeologia	Rios/correntes
		Fluxo subterrâneo
		Lençol freático
	Vegetação	Tipo e porcentagem de cobertura
	Catástrofes	Terremotos, tsunamis, avalanches, subsidências, etc.
Atividade humana	Atividade humana	Construções, minerações, áreas se empréstimo, áreas agrícolas

Após o levantamento da documentação existente e a análise das diferentes cartas, fotografias e imagens, recomenda-se realizar um reconhecimento em campo que permita a verificação e avaliação das informações obtidas, assim como a identificação de caminhos e vias de acesso para as explorações *in situ*.

Em continuidade, prossegue-se com a etapa de estudo da “viabilidade do projeto”, na qual se define a alternativa técnica e economicamente mais viável para a execução da obra. Nessa etapa, podem-se efetuar investigações em campo, as quais contemplem ensaios *in situ*, sondagens e ensaios geofísicos, que permitam complementar as informações já existentes e efetuar uma espacialização dos resultados obtidos na fase inicial. Nessa fase, obtém-se uma caracterização geológico-geotécnica preliminar das diferentes alternativas (é por isso que os ensaios complementários não são de tipo definitivo), descreven-

do-se os problemas ou as particularidades típicas dos solos tropicais da zona de interesse e que dão lugar a certas dificuldades que devem ser consideradas, com a finalidade de se poder identificar a melhor alternativa técnica e econômica para a realização do projeto. Finalmente, tem-se a etapa do “projeto básico”, na qual se estabelecerá o cronograma e os custos da alternativa selecionada (Pereira *et al.*, 1998).

1.3 Programa de amostragem

A informação obtida na etapa preliminar permite que se decida o tipo mais apropriado de investigação de campo e de laboratório adicional, indispensável na caracterização geotécnica de cada estrato do subsolo. A NBR 8036/1983 da ABNT regulamenta as exigências mínimas com relação ao número, à localização e à profundidade da sondagem ou de poços de simples reconhecimento. O número e localização definitiva das amostragens se definem em função do tipo, da etapa e dos fatores econômicos da obra, em conjunto com as características do entorno geológico e geomorfológico. A técnica de amostragem a ser adotada dependerá da finalidade, do tipo de solo, das condições e dos equipamentos disponíveis.

Os objetivos da exploração do subsolo compreendem a obtenção da natureza do solo e da estratigrafia do perfil; a retirada de amostras de tipo deformadas e/ou indeformadas para a identificação visual e para ensaios de laboratório; se necessário, a definição da profundidade e a natureza do leito rochoso; a realização de ensaios *in situ*; a determinação da posição do lençol freático e das condições de drenagem, assim como a definição de particularidades que possam acarretar em problemas para o empreendimento. É importante, em especial, para o estudo dos solos não saturados, que se atente para o efeito sazonal sobre a posição do lençol freático e a umidade do solo. Aqui, assumem particular importância a geologia estrutural e hidrogeologia, assim como a geomorfologia do terreno.

A descrição do solo deve conter informação da cor dos elementos em geral (esta pode ser um indicativo de mudanças químicas ou mineralógicas nos solos tropicais); a umidade (fazendo referência a seco ao ar, pouco úmido, úmido, muito úmido e saturado); a textura (tamanho e forma das partículas de solo); a estrutura (disposição das partículas e os vazios); e a composição peculiar (matéria orgânica, concreções, agregações, variações significativas de umidade e consistência do solo, etc.). A identificação genética deve conter informações geológicas (principalmente, grau de intemperização dos estratos) e informações pedológicas (para os solos transportados e residuais). Quanto à identificação geotécnica, esta deve fazer referência a propriedades como consistência, permeabilidade, resistência e rigidez dos materiais. Cabe lembrar, aqui, que, nos perfis de intemperismo tropical, muitas vezes, informações como cor e textura e limites de consistência são insuficientes para caracterizar o solo quanto ao seu comportamento (Santos *et al.*, 2005).

Para o conhecimento das propriedades geotécnicas do subsolo, existem os métodos diretos, semidiretos e indiretos de exploração. Os métodos diretos compreendem as sondagens a trado, a percussão e rotativa e os poços ou trincheiras de inspeção como sendo as técnicas mais comuns no programa de exploração. Os métodos semidiretos compreendem ensaios *in situ*, ensaios que se relacionam às propriedades e comportamentos dos solos

como o ensaio de cone (CPT), piezocone (CPTU) ou cone sísmico (SCPTU), o ensaio de palheta, os ensaios pressiométricos e dilatométricos, e de permeabilidade. Ensaio geofísicos (resistividade, sísmica, geoacústica, gravidade, penetração de radar e raios gama) constituem os métodos indiretos.

É comum que, nas fases iniciais, sejam usados os métodos mais simples, como as sondagens a trado, que permitem identificar os solos e a espessura dos estratos. Quando se requer mapear o perfil de solo e obter blocos de amostras indeformadas, são realizados os poços e as trincheiras de exploração. Conforme se vai avançando nas investigações e, dependendo das necessidades do projeto, é necessário aumentar o número de sondagens e sua profundidade, recorrendo-se a métodos como as sondagens à percussão, que permitem, além de obter amostras deformadas, encontrar o valor do índice de resistência à penetração ao longo da profundidade de exploração, de uma forma rápida e relativamente econômica, e as sondagens rotativas, que permitem a identificação da litologia e das estruturas geológicas, assim como da caracterização geotécnica dos materiais e das descon-tinuidades (Pereira *et al.*, 1998).

2. TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM

2.1 Equipamentos de amostragem

Neste item, serão abordados os principais equipamentos de amostragem em solos não saturados.

A amostragem em solos não saturados pode ser realizada a partir de sondagens à percussão (SPT), sondagens a trado, programa de amostragem utilizando-se amostradores tubulares e escavando-se poços e/ou trincheiras. Essa amostragem pode ser superficial ou em subsuperfície.

As seguintes normas brasileiras referentes ao tema apresentam os equipamentos principais utilizados para amostragem, a saber:

- ABNT NBR 9604/2016 – Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo, com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas.
- ABNT NBR 9603/2015 – Sondagem a Trado.
- ABNT NBR 9820/1997 – Coleta de Amostras Indeformadas de Solos de Baixa Consistência em Furos de Sondagem.

Vale a pena citar, ainda, algumas normas americanas relativas ao assunto, tais como:

- ASTM D1452-09.
- ASTM D7015-13.

A Figura 1 apresenta dois tipos de trados citados pela norma ASTM D1452-09, que são muito utilizados em amostragem superficial: a) Cavador e b) Trado-Concha (ou trado cavadeira, segundo a ABNT NBR-9603/2015).

São utilizados os seguintes materiais para a coleta de amostras indeformadas do tipo bloco: pá, picareta, enxada, alavanca, espátula, faca, facão, caixa de madeira, prego, parafuso, arame, martelo pedológico, chave de fenda, placa fina de aço, papel filme, pa-

pel alumínio, talagarça parafina, aquecedor, recipiente para liquefação da parafina, panela, pincel e serragem.

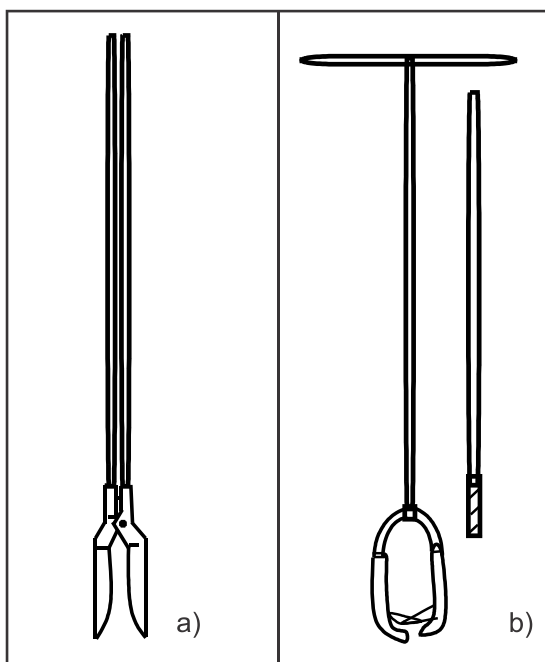


Figura 1 - Trados utilizados em perfuração e amostragem de solo:
a) Cavador e b) Trado-Concha (adaptado de ASTM D1452-09 e ABGE, 2013)

2.2 Amostragem de solos superficiais

2.2.1 Coleta de amostras indeformadas e deformada

A NBR 9604/2016 da ABNT – Abertura de Poços e Trincheiras de Inspeção em Solo com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas – descreve os procedimentos básicos da coleta de deformadas e indeformadas do tipo bloco. A Figura 2, extraída de Santiago (2009), apresenta esquematicamente as etapas para coleta de amostras indeformadas do tipo bloco.

a) Local de obtenção das amostras:

A escolha do local de coleta das amostras varia de acordo com a finalidade do programa de investigação: identificação e caracterização das unidades de mapeamento projetos de fundações e irrigações, poluição ambiental de solo, estabilidade de talude, etc. A escolha do local deve ser representativa das unidades pedológicas, geológicas e geotécnicas. Por isso, a escolha do local só deve ser feita após o reconhecimento da área. O local de coleta das amostras deve está georreferenciado e referenciado ao projeto.

b) Geometria do poço:

Embora não exista regra para estabelecer a área ideal e o tamanho do poço, as suas dimensões dependem das variações das camadas e profundidade a ser investigada. É recomendado que tenha dimensão de 1,50 m de largura e 1,20 m de comprimento e a profundidade é variável. A quantidade e a profundidade de coleta de cada amostra devem estar associadas ao objetivo do programa de investigação a ser realizado. Para profundidades maiores do que 2,0 m, é necessário fazer escoramento das paredes do poço. Nesse caso, as paredes do poço deve ter uma inclinação de 1:10 em relação à vertical, e a área do poço na superfície deverá ser maior do que 1,50 m X 1,20 m em função da profundidade a ser atingida. É recomendado que, em cada profundidade, sejam retirados dois blocos.



Figura 2 – Moldagem dos blocos: (a) Início da escavação do poço com área de 1,30 m X 1,30 m; (b) Escavação do poço na profundidade 1,20 m; (c) Moldagem de duas amostras na mesma cota; (d) Amarração com fita adesiva do tecido de algodão; (e) Bloco pronto para transporte (Santiago, 2009)

a) Procedimento de coleta de amostra indeformada do tipo bloco:

i) Escavar manualmente o poço com seção definida por meio de picareta, enxada e pá até a profundidade desejada para a moldagem do bloco.

ii) Coletar amostras deformadas a cada metro, horizonte ou camada representativa com as respectivas identificações em saco plástico e de lona em quantidade suficiente para a realização dos ensaios planejados.

iii) O bloco deve ter formato cúbico, com arestas de 0,30 m a 0,40 m, moldado com espátula ou faca, sendo o topo e as laterais envolvidas, nessa ordem, por papel filme, pa-

pel alumínio, talargça e parafina, que devem ter espessura de 1,5 cm para proteger e manter a umidade do solo.

iv) A base do bloco pode ser cortada com fio de arame de aço (para solos menos resistentes), com espátulas, facas ou facões (para solos mais resistentes). Deve-se evitar vibração ou choque para cortar a base do bloco; no caso de solos com lamelaridade e orientação de partículas deve ser realizada a identificação dos lados, do topo e da base do bloco.

v) O bloco de solo deve ser colocado em uma caixa de madeira de formato cúbico com arestas 0,35 m (para o bloco de 0,30 m de aresta) ou 0,45 m (para o bloco de 0,40 m de aresta), com indicação de topo. Em solos menos resistentes e granulares com baixa umidade, é recomendado colocar uma chapa fina de aço na base do bloco para auxiliar na movimentação da base do bloco para cima.

vi) Com a base do bloco voltada para cima, dentro da caixa de madeira, será feita a regularização da base, com o auxílio de uma espátula e, posteriormente, serão envolvidos com papel filme, papel alumínio, telargça e parafina.

vii) Os espaços vazios entre o bloco e a caixa de madeira devem ser preenchidos com serragem.

viii) As etiquetas de identificação devem ser colocadas no topo do bloco e da caixa, contendo informações como: local, data da coleta, número do bloco, profundidade, obra e coordenadas geográficas. Deve-se colocar, na caixa de madeira, o símbolo de frágil.

ix) Fixar à tampa a caixa de madeira por meio de parafusos e chaves de fenda.

x) Transportar o bloco com cuidado para não haver choques, vibrações e perda de umidade.

2.3 Amostragem de solo de subsuperfície

2.3.1 Tubulares

Neste item, serão abordados os principais tipos de amostradores tubulares que podem ser utilizados em solos não saturados. A seguir, será feita uma descrição dos amostradores tubulares Shelby aberto e pistão estacionário.

Hvorslev (1949) comenta que um amostrador de tubo aberto, bastante simples, foi introduzido por Mohr (1936). Consistia de um tubo metálico inoxidável de parede fina da marca “Shelby” que é acoplado a uma cabeça de amostragem e às hastes de sondagem. A Figura 3a apresenta esse amostrador. Aperfeiçoamentos posteriores consistiram na colocação de uma sapata de corte. A amostra é preservada e transportada para o laboratório no próprio tubo.

Um amostrador de parede fina, ainda segundo Hvorslev (1949), pode ser arbitrariamente definido como sendo o tubo de amostragem com a espessura da parede menor do que 2,5% do seu diâmetro. A principal vantagem desse tipo de amostrador seria a simplicidade operacional. Ele possui, na cabeça de amostragem, aberturas para saída da água, além de válvula de proteção contra formação de coluna de água (Figura 3a).

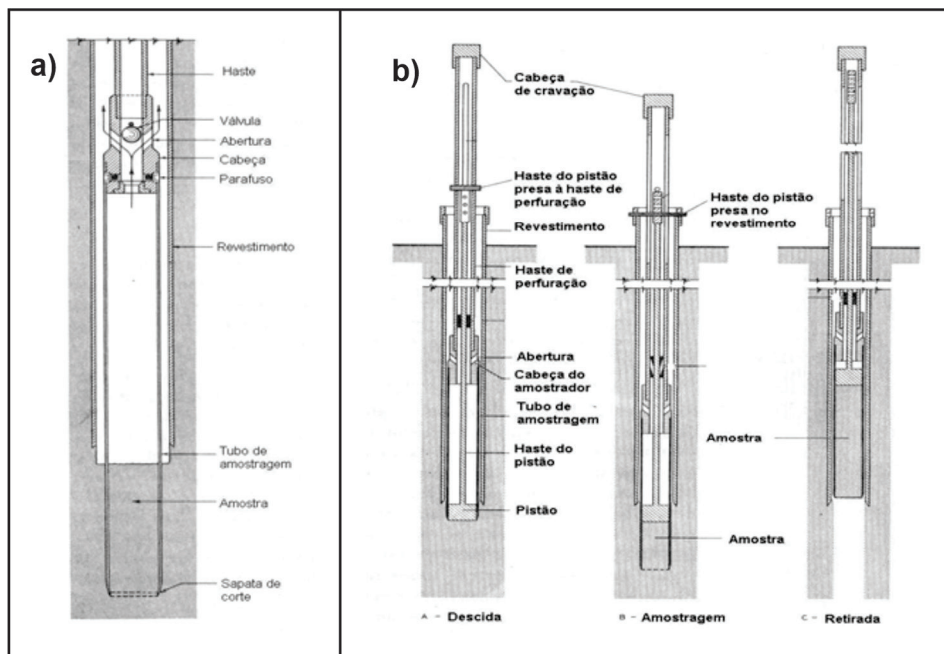


Figura 3 – Amostradores: a) Amostrador tubo aberto (Shelby) de parede fina (Hvorslev, 1949), muito utilizado na prática geotécnica nordestina, b) Amostrador dotado de pistão estacionário (Olsson, 1925 citado por Hvorslev, 1949)

A Norma Brasileira de Amostragem de Solos Coesivos em Furos de Sondagem (NBR 9820/1977) prescreve que o diâmetro mínimo recomendado deve ser igual a 100 mm, aceitando-se, em casos excepcionais, 75 mm. Infelizmente, muitas vezes, essa recomendação não é atendida na prática rotineira de amostragem, o que prejudica a qualidade da amostra coletada e, consequentemente, a confiabilidade dos resultados dos ensaios de laboratório. Outros critérios da geometria do amostrador também devem ser atendidos para se enquadrarem na referida Norma, tais como: relação de folga interna e índice de área. Para maiores detalhes, ver ABNT NBR 9820/1977 e Oliveira (2002).

Outro tipo de amostrador tubular utilizado é o pistão estacionário. Um amostrador de pistão, segundo Hvorslev (1949), é um amostrador em que a extremidade inferior do tubo de amostragem é fechada com um pistão. A grande vantagem desse tipo de amostrador é que o pistão impede a entrada de solo amolgado da base do furo dentro do tubo. Ele é apresentado esquematicamente na Figura 3b.

Justino da Silva (2001) e Justino da Silva e Rolim (2002) apresentam um processo simples para extração de amostra indeformada tipo Shelby em uma argila expansiva não saturada e fissurada do litoral Pernambucano, no município de Paulista-PE. Os autores projetaram uma prensa, na qual a reação do terreno à cravação do amostrador é suportada por uma viga metálica treliçada, presa, por braçadeiras, a dois tirantes. As Figuras 4 a 5 ilustram o procedimento adotado.

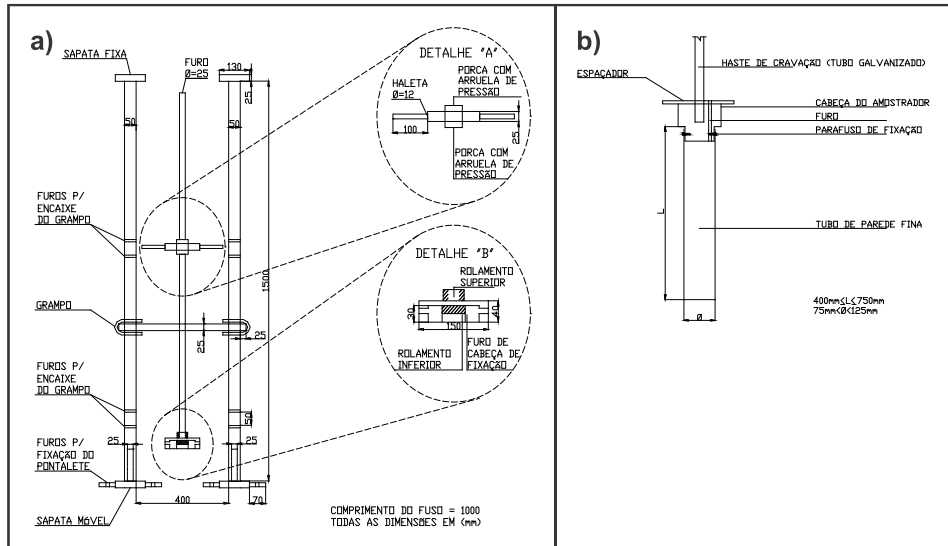


Figura 4 a) Prensa manual utilizada na cravação do amostrador,
b) Conjunto de amostragem (Justino da Silva e Rolim, 2002)

2.3.2 Outros

Existem outros sistemas de amostragem, como as sondagens helicoidais, cujo uso limita-se a solos relativamente moles e coesivos, sendo de difícil operação em solos duros e cimentados. Esse sistema permite definir o perfil estratigráfico com precisões maiores que $\pm 0,5$ m na localização dos diferentes níveis atravessados, de maneira contínua. Existem dois tipos de trado, o trado helicoidal espiral e o trado helicoidal com haste oca.



Figura 5 Processo estático para extração de amostra indeformada tipo Shelby, utilizando uma prensa manual (Justino da Silva e Rolim, 2002)

O tipo de amostra que se obtém com o trado espiral é de tipo deformada e requer mão de obra intensa, porque o solo se adere aos elementos perfurantes. Especificamente esse tipo de amostrador se limita ao uso em solos que não sofram colapso e a profundidades menores de 6 m. Os diâmetros do trado variam de 4 a 8 polegadas.

No caso do trado com haste oca, obtém-se amostras indeformadas ou pouco deformadas até profundidades de 40 m. Não é fácil seu uso em siltes e areias fofas abaixo do lençol freático. Nesses casos, é necessário equilibrar a pressão da coluna de água com introdução de água pelo orifício da haste.

O funcionamento do trado helicoidal com haste oca é simples: ao longo no interior do trado helicoidal, instala-se uma barra central, que termina ao final do trado com uma broca pequena. Essa barra gira junto com o trado helicoidal quando se perfura. Para a coleta da amostra, retira-se a barra central e coletam-se as amostras (Figura.6).

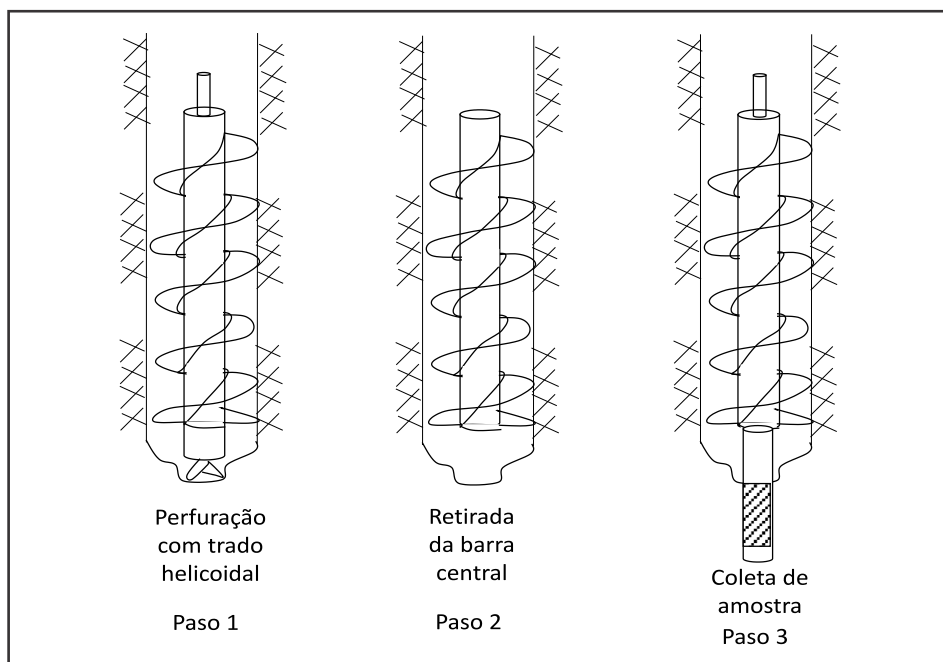


Figura 6 - Extração de amostra com trado helicoidal de haste oca

3. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS E DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS

Os solos tropicais, a mineralogia e a microestrutura têm uma ampla influência nas propriedades e comportamento de engenharia, o que os diferencia dos solos sedimentares formados em regiões de clima temperado e frio para os quais foram definidos os procedimentos de ensaios normalizados. É por isso que a preparação das amostras de solos tropicais exige certos cuidados e análises complementários.

Faz-se necessário, na preparação de amostras e corpos de prova para a realização de ensaios geotécnicos, que se leve em consideração fatores como a distribuição de poros e a presença de agregados no solo. A distribuição de poros é relevante, porque pode dar indicativos de que o solo não se comportará segundo os modelos tradicionais, e a presença de agregados é um indicativo da sensibilidade estrutural do solo a tratamentos como a secagem prévia devido ao fato de que, geralmente, eles são constituídos por diferentes minerais com propriedades térmicas distintas.

3.1 Caracterização física

A preparação das amostras para a caracterização física segue as seguintes recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 6457/2016 – Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização

ABNT NBR 7181/2016 – Análise granulométrica – procedimento.

ABNT NBR 6508/2016 – Determinação da massa específica.

ABNT NBR 6459/2016 – Determinação do limite de liquidez.

ABNT NBR 7180/2016 – Determinação do limite de plasticidade.

ABNT NBR 7182/2016 – Ensaio de compactação.

Na caracterização física, um dos cuidados que se deve ter na fase de preparação das amostras para os diferentes ensaios e que, geralmente, não se conhece, é com relação à distribuição de poros e à mineralogia e composição dos agregados e microagregados.

A secagem prévia do solo na fase de preparação de amostras causa alteração no estado físico dos minerais por efeito da desidratação e variações térmicas; por exemplo, no caso de o solo conter haloisita hidratada, ela se desidratará, irreversivelmente, na secagem, alterando os limites Atterberg e superestimando o valor do peso específico dos grãos (Gs), o que pode conduzir a um erro na determinação da porcentagem de fração argila e do índice de vazios, além de provocar a existência de diferenças entre o estado do solo em laboratório e no campo, por exemplo. Nesse caso específico, a curva de compactação de laboratório oferecerá uma umidade ótima menor do que aquela que se terá no campo, onde o solo não é submetido à secagem ou, pelo menos, à secagem em níveis semelhantes aos de laboratório.

Adicionalmente, no processo da secagem, quando os microagregados e agregados contêm, em seus interiores, minerais com diferentes coeficientes de dilatação térmica, pode ocasionar o surgimento de microfissuras, que possibilita sua quebra ou, pelo contrário, pode ocorrer o fortalecimento das cimentações, agregando as partículas ou melhorando a estabilidade dos agregados já existentes. No caso da quebra, por exemplo, na curva granulométrica, as amostras com pré-secagem exibem maior conteúdo de finos que as amostras ensaiadas na umidade natural. Quando ocorre a agregação das partículas, formam-se partículas de tamanhos maiores, que permanecem unidas, mesmo ao se reumedecer o solo, por exemplo, alguns solos argilosos podem tomar o aspecto de areias ou siltes ao secar-se, apresentando uma plasticidade menor (Fookes, 2004), mas a secagem pode, ainda, apenas conferir estabilidade às agregações.

Quanto à desagregação dos solos tropicais, esta deve ser realizada com muito cuidado, devido à fragilidade de certas cimentações que se encontram comumente neles presentes. É por isso que a separação das partículas deve limitar-se a uma simples pressão dos dedos para se evitar a quebra dos agregados. Os efeitos desses agentes cimentantes podem ser observados a partir dos ensaios de granulometria com e sem o uso de um dispersante (defloculante). Com o defloculante, obtém-se a distribuição individualizada dos grãos, e, sem o defloculante, a granulometria real do solo no campo, cabendo lembrar que, se o solo passou por secagem prévia, esta pode ter sido afetada. A diferença nos resultados pode indicar um potencial de instabilização estrutural dos agregados diante da presença de certas águas (Figura 7). É por isso que, nesse tipo de solos, pode ser preferível colocá-los durante à noite no agente dispersante que exercer pressão para separar as partículas. Destaca-se, ainda, que o agente separador ou desagregador do solo deve estar relacionado à finalidade do estudo, por exemplo, se ele se destina à avaliação de um local para implantação de lagoas de estabilização, recomenda-se o uso de defloculantes químicos, porém, se a finalidade é a construção rodoviária, o melhor seria o uso de ultrassom, compatibilizando a desagregação com os riscos de desagregação no campo. No entanto, se a finalidade for a definição do percentual de agregados, fundamental nas análises de distribuição de poros nos solos, o ideal será fazer a junção entre os dois mecanismos de desagregação, o químico (uso de defloculante) e o físico (uso do ultrassom).

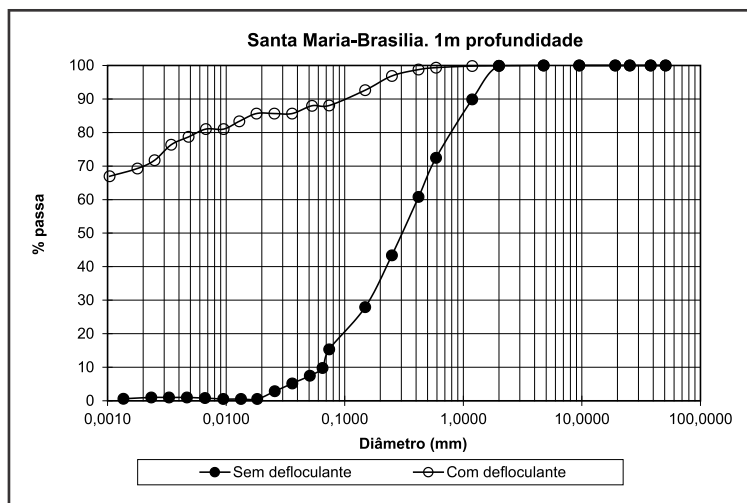


Figura 7 – Resultados granulometria com e sem defloculante

Como tratamento geral, mesmo que se disponha de informações específicas, é melhor a prevenção e supor que todos os solos tropicais são afetados pela secagem, embora estejam secos ao ar. Em consequência, os ensaios de classificação devem ser realizados com os solos em sua umidade natural, a menos que se possa estabelecer que a secagem não tem efeitos significativos nos resultados dos ensaios. Isso pode ser feito realizando-se alguns ensaios com e sem secagem prévia para efeitos comparativos.

É importante destacar que, em solos Saprolíticos com agentes cimentantes, o ensaio de compactação com reuso do material, como especifica a ABNT NBR 7182/2016, a adição da água e a aplicação da energia de compactação pode levar à mudança da granulometria do solo para cada ponto de umidade e peso específico aparente seco obtido na curva de compactação. Nesse caso, é recomendado realizar o ensaio de compactação sem reuso da amostra do solo. Em campo, a amostra é compactada sem reuso.

Ainda, é importante destacar que, nos solos com matéria orgânica, os ensaios de limite de liquidez e plasticidade sejam realizados sem a secagem prévia do material. A primeira determinação da amostra é feita na umidade natural, adicionando ou dessecando água para se obter os demais determinações sem a secagem prévia.

3.2 Caracterização química

Para a caracterização química do solo, é importante se obter as seguintes determinações: pH em água, pH em KCl, pH em CaCl_2 , carbono orgânico, matéria orgânica, cálcio e magnésio ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) trocável, cálcio (Ca^{2+}) trocável, trocável, sódio (Na^+) trocável, potássio (K^+) trocável, acidez e alumínio ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) extraível, hidrogênio extraível (H^+), percentagem de ferro no extrato sulfúrico (Fe_2O_3) e alumínio (Al_2O_3), sílica no extrato sulfúrico (SiO_2), água no extrato de saturação, condutividade elétrica no extrato de saturação e sais solúveis. Os materiais e métodos são descritos no Teixeira *et al.*, (2017).

A preparação das amostras de solo para caracterização química dos solos tem o seguinte procedimento:

- i. Coletar, protocolar e identificar a localização de cada ponto de amostra coletado e depositar as amostras em bandejas, espalhadas e destorroadas com as mãos ou com auxílio de almofariz, suavemente.
- ii. Guardar em local seco e ventilado, o tempo necessário para a amostra secar ao ar.
- iii. Pesar e anotar a massa da amostra que vai ser preparada.
- iv. Destorrear a amostra seca, separando-se a fração grosseira com um rolo de madeira com cuidado para não quebrar as pedras.
- v. Passar o material destorreado em peneira de 2 mm, separando-se a terra fina da fração grosseira do solo.

Paiva (2008) elaborou, de forma sistemática e ilustrada, cada uma das etapas do procedimento para obter a determinação química.

3.3 Caracterização mineralógica

A composição mineralógica dos solos tropicais tem um papel relevância no seu comportamento. É por isso que a caracterização mineralógica ou identificação dos minerais presentes no solo é relevante. Os métodos mais frequentemente usados são a difração de raio-X, a análise termodiferencial e a microscopia ótica.

a) Difração de raios-X:

A difração de raio-X é uma análise que permite identificar o mineral argílico. Consiste na utilização de um aparelho (difratômetro), que faz incidir um feixe de raio-X monocromático sobre o cristal de elétron. Esse feixe difratado pode ser medido por um detector de raio-X, que é centralizado estrategicamente para produzir um perfil de difração ou difratograma. No registro gráfico (difratograma), são apresentados picos que representam as distâncias interplanares entre as bases formadas pelos planos cristalinos do mineral. Os picos assim obtidos estão relacionados a vários ângulos de um goniômetro e, através desses ângulos, o espalhamento cristalográfico dos minerais são calculados pela lei de Bragg (Equação 1). Dois minerais distintos não possuem exatamente as mesmas distâncias interatômicas nas três dimensões. Os ângulos de difração determinados caracterizarão os diferentes tipos de minerais. Para a identificação de cada mineral, utiliza-se o pico primário ($n = 1$ na equação de Bragg), entretanto, o pico secundário de um mineral ($n > 1$) pode coincidir com o primário de outro. Assim, antes de realizar o ensaio e obter o difratograma, é necessário preparar as amostras adequadamente para não haver dificuldades na interpretação dos resultados.

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (\text{Eq. 1})$$

λ = comprimento de onda do feixe de raio-X monocromático empregado na radiação

O valor do comprimento de onda da radiação incidente, mais frequente nos equipamentos que é 0,154 nm.

n = número inteiro representa ordem de difração do plano considerado.

d = distância interplanar.

θ = ângulo de Bragg ou de incidência do feixe de raio-X.

A preparação da amostra do solo para análise mineralógica por difração de raio-X, requer a separação das frações do solo, areia do silte + argila e silte da argila. Paiva (2015) apresenta, de forma didática e ilustrada, a preparação das amostras e lâminas que serão, aqui, descritas de forma mais simplificada.

i. Separação da fração areia por peneiramento:

Pré-tratamento da amostra (se necessário) – proceder à dispersão com solução de carbonato de sódio (Na_2CO_3) pH = 9,5 (2g de Na_2CO_3 para 18 L de água destilada), corrigir o pH com potenciômetro. Para se remover a areia do solo, por peneiramento úmido, utiliza-se a peneira de malha 400 (0,053 mm), apoiando em um funil e deste, escoando-se para uma proveta de 1000 mL, ficando, na suspensão, silte e argila.

ii. Separação da fração silte e argila por sedimentação:

Completa o volume da proveta para 1000 mL com a solução de Na_2CO_3 pH = 9,6. Homogeneizar com agitador magnético e deixar em repouso por 8 horas, tempo necessário para as partículas com diâmetro menor que 0,002 mm se sedimentarem a uma distância de 10 cm do volume da suspensão. As partículas com diâmetro maior que 0,002 mm estarão traspondo o limite de 10 cm de profundidade da proveta. Decorridas as 8 horas, retirar, por sucção, até a profundidade de 10 cm iniciais da massa líquida. Posteriormente,

te, é transportado para um Becker de 1000 mL. Repetir esse procedimento até que, nos 10 cm de suspensão, estejam completamente limpos e livre de argila, ficando os sedimentos decantados no Becker (argila) e na proveta (silte). Separar a argila por centrifugação, reservando a argila para preparar as lâminas.

iii. Preparação das lâminas para análise mineralógica da argila:

Antes da preparação das lâminas, as amostras são saturadas com magnésio e potássio.

A saturação com magnésio (Mg) e a preparação da lâmina tem o seguinte procedimento:

a) Efetuar uma lavagem com solução 10 normal de cloreto de magnésio (MgCl_2). Colocar uma alíquota da argila ($\pm 0,5$ g) em um tubo de ensaio, adicionar ± 5 mL da solução de MgCl_2 10 normal e agitar por 5 min com um agitador; em seguida, centrifugar e separar a argila da solução.

b) Efetuar uma lavagem com solução 1 normal de cloreto de magnésio (MgCl_2).

No tubo da lavagem anterior (1) após a separação, adicionar ± 5 mL da solução de MgCl_2 1 normal e agitar por 5 min com um agitador; em seguida, centrifugar separando a argila da solução.

c) Efetuar duas lavagens com solução 1 normal de acetato de magnésio ($\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) pH=7. No tubo da lavagem anterior (b) após a separação, adicionar ± 5 mL da solução de ($\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) pH=7 e agitar por 5 min com um agitador; em seguida, centrifugar e separar a argila da solução. Efetuar essa lavagem por duas vezes. Retirar o excesso das soluções e repetir o processo para cada lavagem.

d) Efetuar uma lavagem com solução 50% de etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) ou metanol (CH_3OH). No tubo da lavagem anterior (c) após a separação, adicionar ± 5 mL da solução 50% de etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) ou metanol (CH_3OH) agitar por 5 min com um agitador e, em seguida, centrifugar e separar a argila da solução.

e) Efetuar três ou mais lavagens com solução 95% de etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) e proporções variadas de acetona (CH_3COCH_3) se tiver problema de flocular. No tubo da lavagem anterior (d) após a separação, adicionar ± 5 mL da solução 95% de etanol e agitar por 5 min com um agitador e, em seguida, centrifugar e separar a argila da solução. Efetuar essa lavagem por três ou mais vezes.

f) Verificar se a argila ainda apresenta cloreto (Cl^-) das soluções anteriores, colocando algumas gotas da solução de nitrato de prata (AgNO_3) 1,0% na solução de lavagem anterior, após a separação da argila. Ficando turvo, confirma a presença de cloreto pela formação do cloreto de prata (AgCl), então, repetir mais algumas lavagens com etanos até que a solução permaneça hialina.

g) Efetuar uma lavagem com solução 10% de glicerol em etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$). Agitar por 5 min e preparar uma lâmina, tendo o cuidado de formar uma camada bem delgada na lâmina de vidro.

h) Colocar algumas gotas da suspensão na extremidade da lâmina e efetuar um esfregaço com outra lâmina para formar uma película da argila bem delgada. Deixar secar naturalmente dentro de um dessecador com sílica gel ou cloreto de cálcio. Identificar a lâmina.

A saturação com potássio (K) e a preparação da lâmina têm o seguinte procedimento:

- a) Efetuar cinco lavagens com solução 1,0 normal de cloreto de potássio (KCl). Colocar uma alíquota da argila ($\pm 0,5$ g) em um tubo de ensaio, adicionar ± 5 mL da solução de KCl 1,0 normal e agitar por 5 min com um agitador; em seguida, centrifugar por 10 min, separando a argila da solução. Efetuar essa lavagem por cinco vezes. Retirar o excesso das soluções.
- b) Efetuar uma lavagem com água. No tubo da lavagem anterior (1) após a separação, adicionar ± 5 mL de água, agitar por 5 min com um agitador, em seguida, centrifugar por 10 min, separando a argila da água.
- c) Efetuar cinco lavagens com metanol a 99% com acetona se tiver problema de floculação. No tubo da lavagem anterior (b) após a separação, adicionar ± 5 mL de metanol a 99% com acetona, agitar por 5 min com um agitador; em seguida, centrifugar por 10 min, separando a argila da solução. Efetuar essa lavagem por cinco vezes se apresentar problema de floculação.
- d) Verificar se a argila ainda apresenta cloreto (Cl^-) das soluções anteriores, colocando algumas gotas da solução de nitrato de prata (AgNO_3) 1,0% na solução de lavagem anterior, após a separação da argila. Ficando turvo, confirma a presença de cloreto pela formação do cloreto de prata (AgCl), então, repetir mais algumas lavagens com metanol até que a solução permaneça hialina.
- e) Preparar três lâminas com a suspensão da argila com potássio.

Preparar três lâminas com a suspensão da argila com água ou metanol, tendo o cuidado de formar uma camada bem delgada na lâmina de vidro. Colocar algumas gotas da suspensão na extremidade da lâmina e efetuar um esfregaço com outra lâmina para formar uma película da argila bem delgada. Deixando secar naturalmente dentro de um dessecador com sílica gel ou cloreto de cálcio. Identificar a lâmina.

1) A primeira lâmina, secar na temperatura ambiente e guardar, no dissecador identificado, a lâmina.

2) A segunda lâmina, após seca, colocar em uma mufla e aquecer até uma temperatura de 300°C por duas horas; deixar a mufla esfriar naturalmente até a temperatura ambiente e colocar, no dissecador identificado, a lâmina.

3) A terceira lâmina, após seca, colocar em uma mufla e aquecer até uma temperatura de 550°C por duas horas; deixar a mufla esfriar naturalmente até a temperatura ambiente e colocar, no dissecador identificado, a lâmina.

As lâminas assim preparadas são levadas ao difratômetro, e é obtido o registro gráfico (difratograma), com indicação dos picos que representam as distâncias interplanares, em que os minerais podem ser identificados a nível de grupo, usando-se as reflexões de primeira ordem, de acordo com Jackson (1979) e Dixon e Weed (1989). A Figura 8 apresenta de forma esquemática a estrutura cristalina dos principais argilominerais.

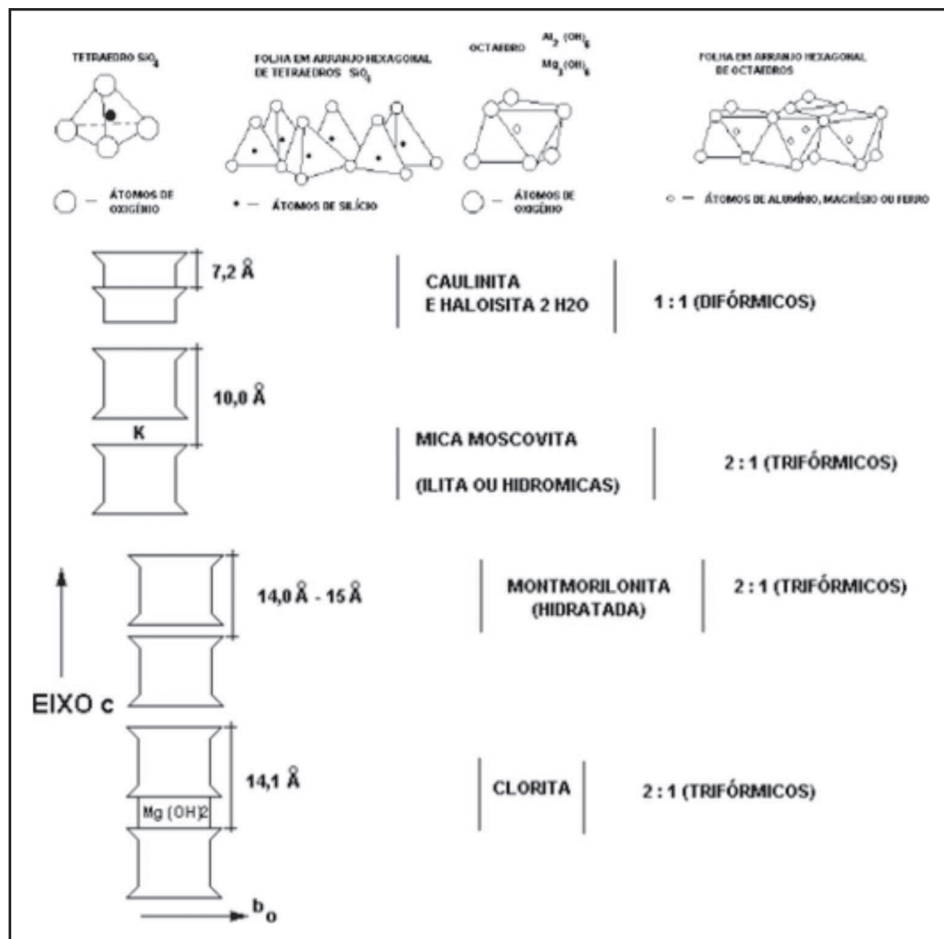


Figura 8 - Representação esquemática da estrutura cristalina dos principais argilominerais (adaptado de Souza Santos, 1989)

b) Análise Térmica Diferencial (ATD) e Termogravimétrica (ATG):

A termografia (TG) é uma técnica termoanalítica empregada no estudo de substâncias que se decompõem por aquecimento (enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de temperatura), dando origem a compostos voláteis. A termogravimetria permite um detalhamento por meio de registro da variação de massa da amostra (perda ou ganho) em função da temperatura (T) ou tempo (t). A termografia derivada (DTG) fornece a derivada primeira da curva termogravimétrica, em função do tempo ou da temperatura.

As análises térmicas diferencial e termogravimétrica são instrumentos de grande aplicação no estudo de argilas como método de identificação de argilominerais e suas misturas. As transformações endo ou exotérmicas, quando ocorrem, aparecem como deflexões em sentidos opostos na curva termodiferencial. A ATG consiste, também, no

aquecimento da argila à taxa constante, porém, nesse caso, está ligada a uma balança na qual são registradas variações de sua massa em função da temperatura.

O equipamento de ensaio é constituído, basicamente, por uma microbalança, um forno, um programador de temperatura e um computador. E procede-se ao seguinte procedimento:

- estabelecer, no programa de computador, interligado ao equipamento, as temperaturas inicial e final da análise e a velocidade de variação de temperatura;
- colocar o cadinho vazio no equipamento, para zerar a massa desse recipiente;
- retirar o cadinho do equipamento e colocar a amostra;
- colocar a amostra (1,0 g de solo sem receber nenhum tratamento prévio) e o cadinho no equipamento e acionar o comando para executar a leitura;
- tendo completado o ciclo de temperatura, pré-estabelecido, retira-se o cadinho com o que restou da amostra e efetua-se a limpeza desse recipiente.

As informações são gravadas no computador, que gera uma curva de TG e DTG. Hoje, há livros, atlas e fichas que permitem a identificação da maioria dos argilomineerais e minerais conhecidos. A posição, a forma e a intensidade dos picos endo e exotérmico dos termogramas possibilita a identificação bastante precisa desses argilomineerais puros.

c) Microscopia Ótica:

A Microscopia Ótica (MO) permite observar e analisar o arranjo dos agregados (esqueleto, plasma e fundo matricial), suas relações e grau de preservação face às adições e perdas. Propicia uma contribuição importante nas deduções dos processos pedológicos. O estudo da micromorfologia do solo através da MO consiste na observação de lâmina através de equipamentos ópticos. Essa técnica vem avançando através da análise qualitativa e quantitativa da microestrutura do solo e porosidade através da análise de imagens por meio digital.

A preparação das amostras para a observação na Microscopia Ótica (MO) requer um conjunto de procedimentos que envolvem secagem, impregnação de resina, colagem, cortes polimento e observação.

i) *Secagem* – As amostras indeformadas ou compactadas do solo são moldadas em caixas metálicas (Kubiena) de formato cúbico com dimensões (0,11 a 0,10 m X 0,05 a 0,06 m X 0,03 a 0,05 m, mais frequentes). A secagem pode ser realizada por meio de desidratadores com aplicação de pequenos vácuo e até haver constância de peso. Esse processo é mais lento, entretanto, provoca menores contrações em solos com argilominerais expansivos. Pode-se colocar, também, amostras em estufa a 40°C, por um período, e verificar ocorrência de constância de peso após sucessivas pesagens. O tempo requerido é superior a 72 horas.

ii) *Impregnação com resina* – Após a secagem, as amostras são impregnadas com resinas de poliéster, segundo metodologia descrita por Jongerius e Heintzberger (1963). A impregnação pode ser feita por vácuo e submersão. Nas mostras de estrutura sensível é aconselhável evitar o vácuo.

iii) *Cortes e polimentos* – A mostra impregnada com a resina é colocada para endurecer, cortada em máquina com serras diamantadas e polidas em uma das faces. O bloco de solo endurecido é colado em lâmina de vidro com dimensões de 110 x 75 x 1,2 mm (mais frequentes) e levado à prensa para fixação por 12 horas, sendo cortado na máquina para ficar com espessura de 2,0 mm. A amostra do solo é polida na máquina, com abrasivos de óxido de alumínio de diâmetros: 25, 9,5, e 5,0 mm, e limpada em aparelho de ultrassom, para ficar com espessura de 25 a 30 mm. Complementando, a amostra é polida à mão com abrasivo de 5,0 mm, levada ao ultrassom para limpeza completa e coberta com uma lamínula de vidro para que a seção delgada ficasse protegida (Murphy, 1986).

iv) *Observação das lâminas* – Utiliza-se microscópio petrográfico. As terminologias usadas nas descrições micromorfológicas podem ser de Brewer (1976), Brewer e Pawluk (1975) e Bullock *et al.* (1985). Para adaptação dos termos para o português, pode-se utilizar as sugestões de Lima *et al.* (1985), Stoops (1986), Santos *et al.* (1991) e Luz *et al.* (1992).

v) *Obtenção e observação das micrografias* – Para a obtenção das micrografias, utiliza-se uma câmara fotomicrográfica com controle de exposição automático, acoplado ao microscópio petrográfico. Para a legenda das micrografias, podem-se utilizar abreviações, como: XPL, para nicóis cruzados; PPL, quando apenas o analisador foi inserido; e GP, quando se utiliza placa de gesso.

4. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A microestrutura pode ser observada através da Microscopia Ótica - MO (descrita no item 3.3 C), por meio de Microscopia Eletrônica de Varedura - MEV e Tomografia Computadorizada - TC.

a) Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Nos solos tropicais, não é possível pensar nas partículas de solo de maneira individual, devido aos agrupamentos que apresentam, formando grãos agregados que refletem no comportamento físico e mecânico do solo. É por isso que a microscopia eletrônica de varredura (MEV) se torna uma técnica altamente valiosa por sua distância e profundidade focal que permite estudar a microestrutura e confirmar a presença de minerais específicos a partir das características morfométricas dos solos.

No MEV, um feixe de elétrons de alta energia, incide na superfície da amostra, onde ocorre uma interação, e parte do feixe é refletido e coletado pelo detector. As imagens são obtidas a partir das interações inelásticas de elétrons secundários e pelas interações elásticas entre os elétrons retroespalhados com a amostra. O MEV utiliza mais as imagens obtidas por elétrons secundários, fornecendo imagens de maior resolução com impressão tridimensional, facilitando a interpretação, e as imagens por BSE apresentam contraste de composição presentes nas amostras.

O MEV permite observar amostras ampliadas em muitas vezes, com boa resolução de imagem. Essa técnica, quando acoplada a um analisador de energia dispersa (EDS), contribui para identificar a constituição química do mineral, permitindo uma análise mais detalhada dele. Enquanto o MEV propicia nítidas imagens, o EDS permite a identificação mineral.

Para observar a microestrutura dos solos no MEV, é necessário que os solos tenham baixa umidade (praticamente seco) e que a microestrutura esteja preservada. Entretanto, a técnica requer um conjunto de operações que envolvem secagem, corte, superfície de observação pouco acidentada e uniformidade na metalização da superfície a observar. Os efeitos desses procedimentos devem ser reduzidos para se ter uma superfície de observação com menor perturbação possível (McGown e Collins, 1975); Ferreira, 1995).

A preparação das amostras para serem observadas no MEV requer um conjunto de procedimentos.

i) *Secagem prévia* – Por meio de dessecador e submetidas a um pequeno vácuo. Pesquisagens devem ser realizadas até obter constância de peso. Em se tratando de solos expansivos, esse processo deve ser lento para evitar contração no solo.

ii) *Preparação da superfície de observação* – Pequenos instrumentos cortantes, pinças e outros pontiagudos auxiliam nas fragmentações sucessivas das amostras, procurando-se deixar, sempre, a superfície de observação sem toque dos instrumentos. A forma final dos corpos de prova deve aproximar-se de um cubo com “arestas” que variam de 7 a 10 mm.

iii) *Metalização das amostras* – A metalização pode ser realizada por meio de uma película de ouro, grafite ou outro condutor, para se evitar carregamento eletrostático e propiciar uma boa condução do feixe de elétrons. As amostras devem ser fixadas utilizando-se fita dupla fase 3M ou com tinta de prata a um suporte de alumínio de formato cilíndrico (adequado ao equipamento) e apropriado ao microscópio. O suporte de alumínio que apoia as amostras é colocado dentro de uma campânula de vácuo. Em algumas amostras, após as primeiras observações, pode ser necessário fazer uma segunda ou terceira metalização, o que permite maior poder de resolução.

iv) As superfícies das amostras são observadas em Microscópio Eletrônico de Varredura com máquina fotográfica acoplada ao equipamento.

b) Tomografia Computadorizada - TC

Tomografia Computadorizada (TC) utilizada inicialmente para fins médicos. Petrovic *et al.* (1982), Hainsworth & Aylmore (1983) e Crestana *et al.* (1985) utilizaram a tecnologia na determinação da densidade do solo, distribuição espacial do conteúdo de água, retenção e movimento da água no solo (Costa, 2016). A TC consiste na obtenção de imagens, múltiplas projeções, a partir de emissão de partículas com energia suficiente para atravessar material em estudo. As partículas podem ser: raios gama, ondas ultrassônicas e raio-X (que terá mais detalhes neste capítulo). Materiais densos, quando atravessados pelo feixe de fótons, absorvem mais radiação. Essa absorção de radiação (radiodensidade) é computada pelo detector, que fica atrás do corpo de prova, e traduzida para uma imagem (Cavalcante *et al.*, 2015). A imagem obtida em escala de cinza é convertida para a escala de Hounsfield (HU). Essa escala atribui o valor de 0 para o ar e o valor de 1000 para a água. As projeções são obtidas em várias posições angulares igualmente espaçadas, que são combinadas em softwares para a construção de uma imagem 3D. Por meio do uso de programas de tratamento de imagens, é feita a reconstrução do volume escaneado, que permite a análise das imagens e a obtenção das características internas do objeto de forma quantitativa e qualitativa, não destrutiva e em três dimensões (3D). A Figura 9 ilustra a descrição do processo da TC.

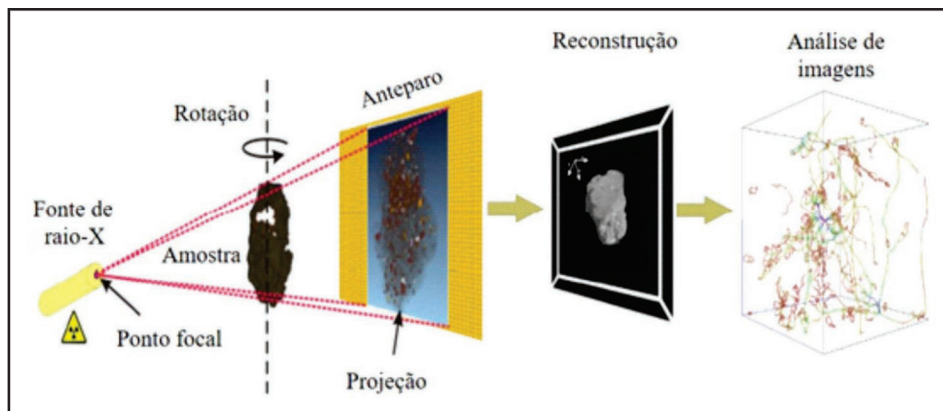


Figura 9 – Sistema de funcionamento do tomógrafo e subsequente reconstrução de imagens. (Peth *et al.*, 2010)

Amostras de solo podem ser compactadas ou indeformadas, moldadas em tubo de PVC com diâmetro e altura de 75 mm ou em anéis de aço inoxidável de ensaios de adensamento com índices físicos iniciais determinadas. Após a preparação, a mostra deve ser fixada na base metálica específica do TC. Definir os parâmetros de escaneamento para o processo de aquisição de imagens (por exemplo: tensão de 160 kV, corrente de 180 μ A e filtro de cobre com espessura igual a 0,5 mm) e iniciar o escaneamento. A captura das imagens ocorre de forma automática e, ao fim do ensaio, todas elas são transferidas para um servidor do laboratório. A Figura 10 mostra um microtomógrafo de terceira geração do tipo NIKON XT H 225 ST, do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. Os raios X são criados entre um filamento de tungstênio (cátodo mostrado nas Figura 10 (a), (b) e (c)) e um alvo de tungstênio (ânodo mostrado na Figura 10 (d) em voltagens de até 225 kV e correntes de até 2 mA. O detector desse dispositivo possui 1918 x 1534 sensores, o que dá uma resolução espacial de (50x50x50 mm³).

As imagens geradas pela tomografia são compiladas e analisadas por software. Referências sobre o software e sua utilização são explicados de forma bastante detalhada por Costa (2016). A imagem na forma de escala de cinza é posteriormente convertida para a escala de Hounsfield (HU) pelo software VGStudio. O tratamento das imagens na escala HU pode ser feito com o programa computacional ImageJ 1.50 (Rueden *et al.*, 2017), no qual as imagens são segmentadas em duas fases (binarizadas) e, posteriormente, calculados os volumes dos poros.

A TC é um método não destrutivo, mas tem certas limitações físicas, como citado por Cnudde e Boone (2013), a dependência do operador para a análise das imagens 3D a partir da reconstrução de dados, os efeitos de discretizações e possíveis artefatos de imagem. Beledelli (2012) cita outros tipos de artefatos que podem surgir nas imagens obtidas no ensaio de tomografia de raios X, tais como: artefatos de movimento; artefatos gerados por materiais muito densos; artefato de ruído; artefato de dispersão e artefato de extinção.

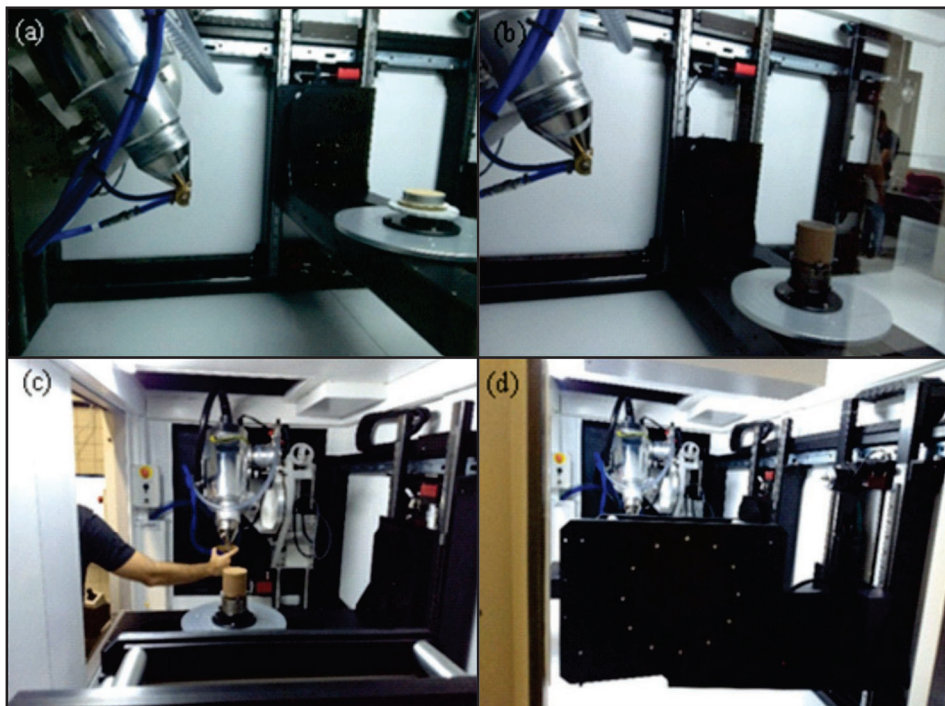


Figura 10 – Detalhes do interior do microtomógrafo: (a) emissor de raio-x em amostra de ensaio edométrico; (b) emissor de raio-x em amostra com diâmetro de 75 mm; (c) instalação do filtro de cobre; (d) receptor de raio-x posterior ao corpo de prova (Alves, 2019)

Peth *et al.* (2010) estudaram amostras de solo preparadas em laboratório, que foram colocadas em cilindro plástico (Plexiglas) de 50 mm de diâmetro e escaneadas em três diferentes condições: i) condição inicial de homogeneidade, ii) após saturação, e iii) após subsequente secagem. Observaram um rearranjo de partículas acompanhado por uma reestruturação do espaço poroso quando alteradas as tensões hidráulicas. Isso ficou aparente a partir do fechamento de poros relacionados à estrutura do solo e à formação de novos poros.

As aplicações do equipamento na mecânica dos solos não saturados são várias, dentre as quais se pode destacar o cálculo das seguintes propriedades: densidade, porosidade, condutividade hidráulica, quebra das partículas e a curva de retenção (Al Mahbub; Haque, 2016). Costa *et al.* (2018) realizaram o procedimento de tomografia computadorizada de raios X em Neossolo Regolítico Eutrófico (NRe), tipo de solo encontrado no agreste pernambucano. Na reconstrução das imagens obtidas no processo de escaneamento das amostras, foi possível identificar 28% de porosidade, da qual 27% são vazios interagregados, ou seja, são poros com grande conectividade, responsáveis pelo fluxo rápido de água no solo; e 1% de vazios intra-agregados, que são poros menores, com pequena conectivi-

dade ou isolados, responsáveis por um fluxo mais lento de água e pelo seu armazenamento. Machado (2019) analisou a microestrutura de perfis de solo Neossolo Regolítico Distrófico do Município de São João/PE em quatro diferentes profundidades, tendo constatado, em geral, maior porosidade para as camadas da superfície, além de ter observado que a porosidade diminui, inicialmente, a partir da superfície e aumenta com a profundidade do perfil. Silva (2019) analisou a variação de volume por meio de imagens 3D de um solo expansivo na cidade de Bonito-PE Brasil antes e após a expansão de uma mesma amostra inicialmente indeformada. Alves *et al.* (2021) fizeram uma análise microestrutural de solo colapsível antes e depois do colapso e com ciclo de carga e descarga em uma mesma amostra inicialmente indeformada. Barbosa *et al.* (2021) avaliaram a macroestrutura de um solo expansivo na cidade de Paulista-PE Brasil antes e após a expansão de uma mesma amostra inicialmente indeformada.

5. CARACTERIZAÇÃO HIDROMECÂNICA – PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA OS ENSAIOS HIDROMECÂNICOS

Os procedimentos para a preparação das amostras dos ensaios para os ensaios hidrodinâmicos aqui descritos podem ser utilizados para os ensaios de resistência ao cisalhamento, compressão unidimensional, triaxial, permeabilidade com e sem sucção controlada.

a) Preparação de amostras indeformadas para ensaios hidromecânicos:

A preparação das amostras indeformadas para os ensaios hidromecânico requer que se mantenham as características e condições de umidade, peso específico húmido e estrutura do solo em campo. Assim, as amostras, em laboratório, devem ser transportadas, guardadas e manuseadas para que essas condições sejam mantidas.

As dimensões dos corpos são definidas a partir dos objetivos do programa de investigação e das dimensões máximas dos grãos do solo. Os corpos de prova são moldados com auxílio de moldes de aço ou de PVC de formato prismática ou cilíndrico. Os moldes são de pontas misulada e de paredes finas, com auxílio de espátulas, cabo de aço fino, corda de violão, tornos de moldagem. A qualidade dos resultados dos ensaios depende, fundamentalmente, da preparação dos corpos de prova.

b) Preparação de amostras deformadas para ensaios hidromecânicos:

A preparação das amostras deformadas para os ensaios hidromecânico requer as seguintes etapas: secagem ao ar, destorroamento, peneiramento, umedecimento, homogeneização, equalização de umidade, e a depender da programação dos ensaios a determinação da umidade natural, higroscópica e ótima e dos pesos específicos aparentes secos e máximos.

b.1) Secagem ao ar, destorroamento e peneiramento:

Após a coleta das amostras, em quantidade suficiente para a realização dos ensaios, elas devem ser deixadas para secar ao ar de forma uniforme até a umidade higroscópica, quando, então, deve ser homogeneizada e peneirada. Em função das dimensões dos corpos de prova que se deseja, define-se o diâmetro dos grãos e, consequentemente, a malha da peneira.

b.2) Umedecimento e homogeneização da umidade:

Após definir o número de ensaios, a umidade e o peso específico aparente seco em que se deseja compactar o solo para atender a programação geotécnica e conhecendo as dimensões do volume e o peso do molde de compactação, calcula-se, então, o peso do material necessário para a preparação do número pretendido de corpos de prova para cada umidade.

Com a umidade hidrosfópica (w_h) determinada para o ambiente do laboratório, através da Equação 2, o peso de água (P_w) a ser adicionado ao solo na umidade higroscópica para se obter o peso úmido (P_h) e a umidade desejada (w)

$$P_w = P_h (w - w_h) / (1 + w_h) \quad (\text{Eq. 2})$$

O solo seco ao ar é espalhado em uma bandeja de plástico de modo a formar uma camada de espessura uniforme. A quantidade de água é, então, adicionada com auxílio de um pequeno chuveiro. À medida que a água é adicionada ao solo, a homogeneização manual é realizada. Durante a adição de água e a homogeneização, observa-se a formação de grumos de partículas. A presença desses grupos provoca uma distribuição heterogênea de umidade no corpo de prova. Para se evitar a uniformidade de umidade após homogeneização, a amostra deve ser passada na peneira que definiu o diâmetro máximo dos grãos.

Durante o processo de homogeneização, parte da água adicionada é perdida devido à evaporação, absorvida na fração retida no peneiramento, no contato com a bandeja e nas mãos. Para se evitarem essas perdas, deve-se adicionar 10 a 20% do volume de água para compensá-las.

Após o processo de homogeneização, determina-se a umidade em 3 a 5 pontos da amostra do solo úmido e verifica-se se existe uma diferença nas umidades. Caso a diferença entre a média da umidade e os valores individuais das umidades sejam superiores ou inferiores a 0,5%, repete-se a homogeneização do material, adicionando-se ou dessecando-se o solo. Após a equalização da umidade, a amostra deve ser condicionada em um saco de polietileno e colocada dentro de um reservatório (tanque) com pó de serra saturado em água.

O saco com o solo é apoiado em um extrato de madeira para evitar contato com o pó de serra. Após 24 horas, determina-se a umidade em 3 a 5 pontos para se verificar se a umidade está dentro da faixa desejada. O processo se repete até se obter essa umidade. A amostra ainda pode ser deixada em repouso por 3 a 7 dias para atingir um equilíbrio da umidade.

b.3) Compactação dos corpos de prova:

Em laboratório, quatro tipos de compactação são mais: impacto, amassamento, estático e vibração. Cada um deles induz, na amostra, uma determinada estrutura (Lambe, 1958; Seed *et al.*, 1960). É desejável que a estrutura induzida em laboratório seja a mais próxima possível de campo e uniforme. Para tanto, é necessário aplicar a mesma energia de compactação. No entanto, vários fatores influenciam na aplicação da energia: má distribuição dos golpes nos ensaios dinâmicos e amassamentos, volume das camadas diferentes, atrito entre o solo e o molde, efeito de sobrecompactação provocado pela compactação das camadas superiores nas inferiores (Barata, 1965; Camapum *et al.*, 1985; Lins, 1990). No processo de compactação estática, a distribuição de tensão é uniforme sobre o topo da camada, o efeito do atrito entre o solo e o molde pode ser reduzido pela lubrificação das paredes do molde e pela redução da relação entre a espessura e a altura da camada.

b.3.1) Equalização das umidades:

Antes de iniciar a compactação, verifica-se se a umidade desejada para o corpo de prova atende a especificação com a tolerância de mais ou menos 0,5%. No caso de atender a umidade desejada, com uma tolerância de mais ou menos 0,5%, é iniciado o processo de compactação, caso contrário, corrige-se a umidade e o processo é repetido até se obter a umidade desejada, com a tolerância indicada.

b.3.2) Compactação dos corpos de prova:

Após o equilíbrio da umidade, as amostras são compactadas estaticamente no próprio anel do ensaio por meio de uma de uma prensa. A compactação estática dos corpos de prova para o ensaio edométrico realizada por Guimarães Neto (1997) e Motta e Ferreira (2011), Figura 11, teve o seguinte procedimento:

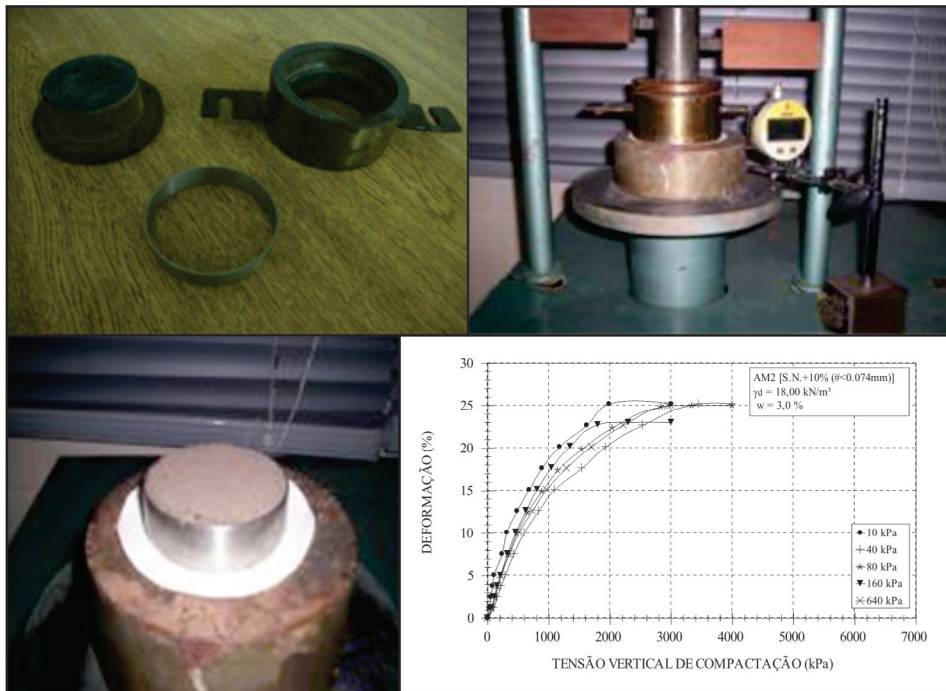


Figura 11 – Moldes e moldagem dos corpos de prova

- i) Lubrificação das paredes do molde com pasta de silicone.
- ii) Coloca-se o peso úmido total da amostra desejado no anel que já se encontra no molde apoiado no papel filtro que será utilizado no ensaio. Faz-se uma regularização e uniformização do topo da camada com leve compressão.
- iii) O conjunto é levado a uma prensa acoplada com célula de carga ou a anel dinamômetro e um medidor de deslocamento. Comprime-se a amostra com uma velocidade constante até a trava do pistão tocar o topo do anel. Guimarães Neto (1997) utilizou prensa com capacidade de 10000 kgf com sensibilidade de 0,5 kgf e velocidade 0,008 mm/s.

No final da compactação, deixa-se a amostra sobre tensão máxima constante durante 10 minutos. Durante a compactação estática, registram-se as cargas, os deslocamentos, e acompanha-se a curva tensão – deformação (Figura 19).

iv) O solo é descarregado lentamente, pesado e colocado na célula de adensamento para a realização do ensaio.

c) Influência da deformação do Sistema na quantificação da deformação do solo:

Na montagem dos corpos de prova em células edométricas convencionais, surgem espaços vazios entre os elementos constituintes, e, à medida que as tensões são aplicadas, esses vazios são reduzidos, e elementos, como pedra porosa, membranas, papel filtro se deformam, sendo quantificada, no ensaio, a deformação resultante (Figura 12). A deformação do sistema (redução de vazios, deformação da pedra porosa, papel filtro, etc.) pode não ser tão importante na deformação de solos moles saturados, mas tem importância significativa com relação aos solos não saturados, principalmente, os de baixa umidade e elevado peso específico.

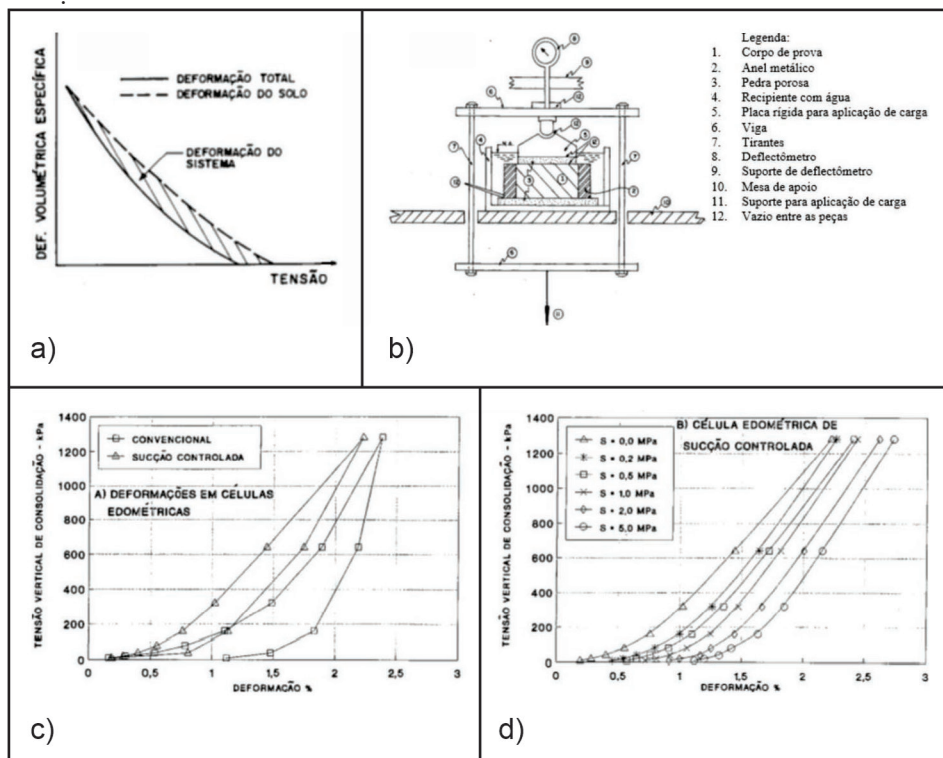


Figura 12 – a) Deformação do sistema, b) Esquema de montagem de ensaios edométricos, c) Deformações do sistema de células edométricas convencionais e de sucção controlada, d) Deformações do sistema de células edométricas de sucção controlada para diferentes sucções (Ferreira, 1982 e Ferreira, 1995)

A deformação do sistema de 1,0% causou erros significativos na determinação da tensão de expansão determinada pelo método volume constante (Brinch Hansen, 1966). Condições similares foram obtidas por Escário (1969) e Ferreira (1993). Se for considerado que uma amostra de altura inicial de 20 mm submetida à tensão de 1000 kPa tem uma deformação total (solo mais sistema) de 4,0% e, sob essa tensão condição, ocorre uma compressão de 153 micras, a deformação do sistema corresponde a 23,6% da deformação do solo.

El-Sohbly *et al.*, (1989), Alonso *et al.*, (1987) e Ferreira (1993) analisaram a deformação do sistema nos valores da tensão de expansão. A influência da deformação do sistema foi maior na avaliação da tensão de expansão pelos métodos carregamento após com sobrecarga e a volume constante. A tensão de expansão avaliada sem a correção da deformação do sistema é inferior à tensão de expansão do solo em cerca de 27% por esses métodos.

A calibração da deformação do sistema deve ser realizada antes no início da realização dos ensaios com o solo com o seguinte procedimento:

i - Confeccionar um corpo de prova de aço com as mesmas dimensões do corpo de prova do solo.

ii - Numerar todas as peças componentes da célula, pedras porosas, membrana e prensa com um mesmo número e preparar a célula com o corpo de prova de aço da mesma maneira que será realizado com o solo.

iii - Colocar a prensa em equilíbrio sobre peso próprio e ajustar a deformação zero com uma pequena tensão (2,5 kPa).

iv - Aplicar a mesma sequência de carregamento na célula com o anel de aço que será aplicado ao solo e medir os deslocamentos. O tempo de permanência de cada estágio de carga é de uma hora ou da duração que será utilizada com o solo.

v - Traçar a curva tensão *versus* deformação para o carregamento e descarregamento para a deformação do sistema.

vi - Quando se realiza o ensaio como o solo, a deformação do solo será calculada deduzindo-se a deformação total (solo + sistema) medida no ensaio da deformação do sistema. Nesse cálculo, é desprezada a deformação do corpo de prova de aço, muito inferior à do solo. Assim, quantifica-se a deformação do sistema.

A Figura 12 mostra exemplos de curvas de calibração da deformação do sistema para células edométricas convencionais e de sucção (Ferreira, 1995).

d) A compactação estática dos corpos de prova do ensaio triaxiais realizados por Lins (1990) teve o seguinte procedimento:

i) Lubrificação das paredes do molde com pasta de silicone.

ii) Calcula-se o peso úmido total da amostra (P_h) com base nos valores da umidade desejada (w) e do peso específico seco (r_d). Divide-se o peso total pelo número de camadas (n), obtendo-se o peso úmido de cada camada (P_{hi}). Frações da amostra úmida total de iguais ao peso (Φ) são condicionadas em sacos plásticos e mantidas sob temperatura e umidade constantes.

iii) Quando se utiliza o molde 1 (Figura 11), a compactação é realizada com o seguinte procedimento:

a) Com o molde do corpo de prova, o pistão 1 é colocado em uma das extremidades do cilindro. Coloca-se uma das frações do colo com peso (P_{hi}) no cilindro e faz-se uma leve compactação manual e regularização com uma haste metálica de seção transversal ($1,0 \text{ cm}^2$). O pistão 2 é colocado no topo do cilindro, e o molde é levado à prensa com controle de velocidade de deslocamento e várias escala de leitura. Lins (1990) utilizou prensa com capacidade de 20 toneladas e velocidade de 4 mm por minuto. Leituras das cargas e deslocamentos são realizadas durante a compactação estática. No término da compactação da camada, a prensa deve ser ajustada para manter a carga constante por 2 a 5 minutos.

b) Com a conclusão da compactação da camada central, inverte-se o molde e retira-se o pistão da base, coloca-se um colar na extremidade do molde e a segunda fração do solo para se compactar com o mesmo procedimento da primeira camada. Concluída a compactação da segunda camada, repete-se o mesmo procedimento da segunda camada.

c) No final da última camada, retira-se o molde da prensa e a sua extrusão amostra por meio de um extrator hidráulico. Pesa-se o corpo de prova e duas dimensões. A amostra deve ser condicionada em dois sacos plásticos e mantida em um ambiente com temperatura constante e umidade constante. Lins (1990) deixou, ainda, as amostras em um tanque de vidro, contendo pó de serra úmido em uma sala com temperatura controlada por um tempo de 15 dias.

Lins (1990) realizou compactação estática em corpos de prova com três e seis camadas, verificou a distribuição da densidade através de ensaios de raio-X (Figura 13) e realizou ensaios de compressão triaxial do tipo não consolidado não drenado (UU) sobre tensão confiante de 100 kPa. Constatou que, nos dois casos, há um gradiente de densidade dentro das camadas. A amostra compactada com seis camadas apresentou melhor distribuição de densidade; há uma maior uniformidade na distribuição da densidade. Na ruptura dos corpos de prova, verificou que as amostras compactadas com três camadas a ruptura ocorreu visivelmente no interior da segunda camada e na amostra compactada com seis camadas a superfície de ruptura foi bem definida passando por todas as camadas. Em função dos resultados obtidos, realizou a sua pesquisa com seis camadas.

e) Preparação de amostra para obter a relação sucção-umidade:

A relação sucção-umidade pode ser obtida por várias técnicas de ensaios. O campo de variação de sucção no solo é bastante amplo. A sucção mátrica pode ser controlada e medida, enquanto que a sucção osmótica, na maioria das técnicas, é determinada de forma indireta. O seu valor é obtido através da diferença entre a sucção total e a mátrica. Há várias técnicas de medir a sucção nos solos, quer através de métodos diretos, quer por métodos indiretos. Os métodos diretos são: placa de sucção, tensiômetros, centrífuga e membrana de pressão; e os métodos indiretos: dessecador de vácuo, célula de gesso, psicrômetro, papel filtro, condutividade térmica e condutividade elétrica. A Tabela 3 apresenta um resumo de alguns desses métodos, em que se destacam as concepções fundamentais, as componentes e o campo de variação das sucções medidas e os cuidados que devem ser tomados. Aqui, serão apresentadas as preparações das amostras para as técnicas de membrana de pressão, dessecador de vácuo e papel filtro.

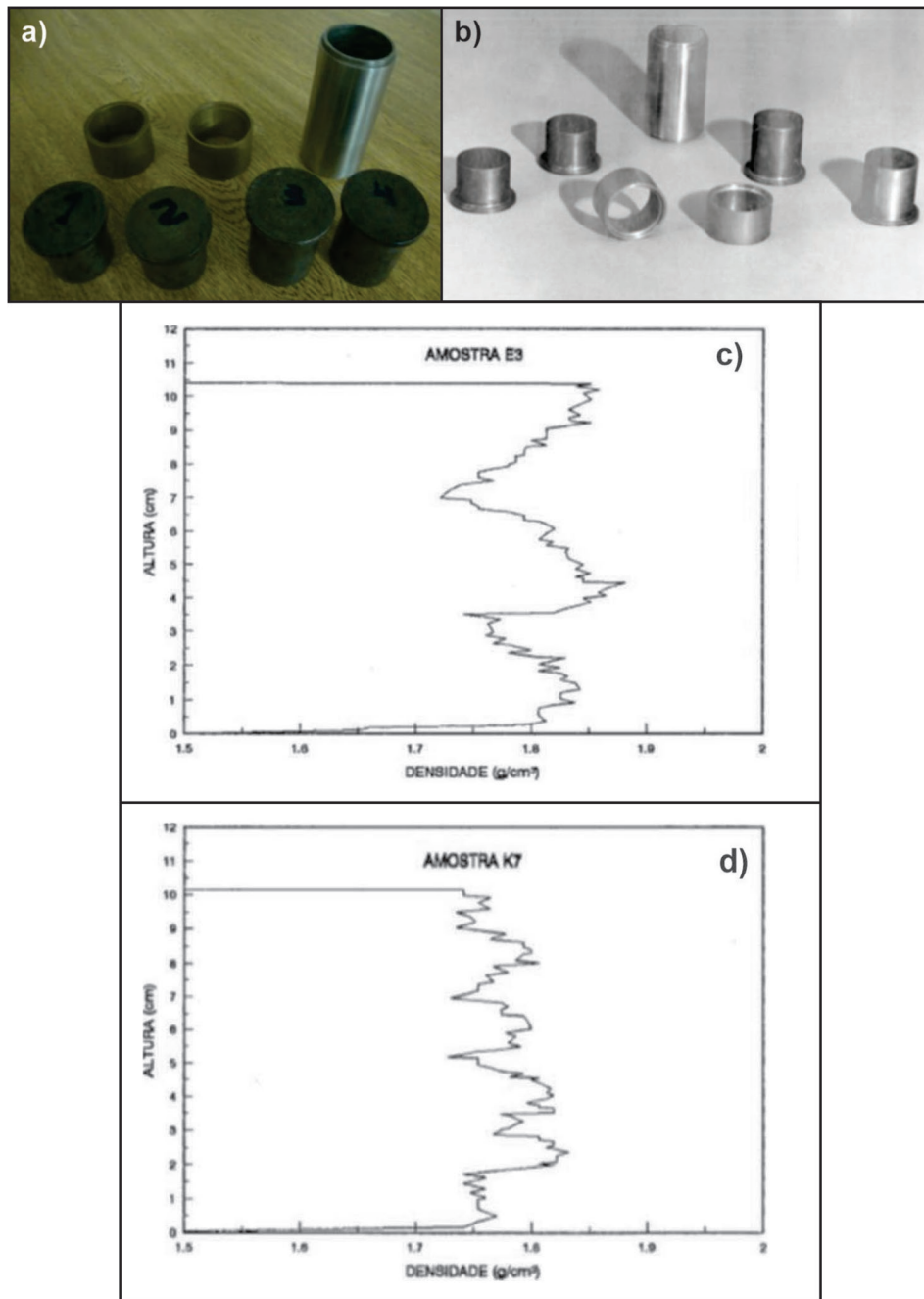


Figura 13 – a) e b) Moldes de compactação. Verificação da uniformidade das amostras compactadas (Lins, 1990), c) para três camadas, d) para seis camadas.

Tabela 3 – Métodos diretos e indiretos de medida de sucção

Métodos/ Técnica	Princípio - Concepção Fundamental	Componentes de Sucção/ Campo	Cuidados	Referências Bibliográficas
PLACA DE SUCÇÃO	Baseado no estabelecimento de uma diferença de pressão em uma placa porosa, mediante a aplicação direta de uma sucção na parte inferior, através de uma bomba de vácuo, enquanto a parte superior é mantida à pressão atmosférica.	MÁTRICA - 0,0 - 3,0 pF 0,0-100 kPa	Controle de temperatura, principalmente para baixas sucções.	Croney e Coleman (1961) Coleman e Marsh (1961)
TENSIÔMETRO	O mesmo da placa de sucção. Uma pedra porosa de alta resistência de entrada de ar quando saturada, que, colocada em estreito contato com o solo, propicia uma medida direta de pressão negativa d'água existente nos vazios do solo.	MÁTRICA e TOTAL 0,0-> 4,0 pF 0,0->1,0 MPa	Na escolha da pedra porosa, tem que se levar em conta o diâmetro dos poros. Limitado uso em clima semiárido. Tempo de resposta.	Bocking e Fredlund (1993) de Campos(1994)
CÉLULA DE PRESSÃO	Baseado no princípio de translação de eixos, isto é, em que a fase líquida sofre um aumento de pressão igual à da fase gasosa.	MÁTRICA - 0,0 - 5,3 pF 0,0-20,0 MPa	Controle de temperatura. Tempo de equilíbrio para baixa umidade pode ser muito grande.	Richards (1980) Ferreira (1995)
DESSECADOR DE VÁCUO	Consiste em estabelecer uma condição de equilíbrio entre a amostra de solo e uma solução de sal ou ácido com concentrações conhecidas, que foi previamente introduzida no dessecador.	TOTAL - 4,5 - 7,0 pF 3,2-1000 MPa	Controle de temperatura. A superfície da solução deve ser grande para acelerar o processo de transferência de umidade.	Aitchison e Richards (1965) Baker <i>et al.</i> (1973) Ferreira (1995)
PSICRÔMETRO	Determina a sucção do solo através de medidas de umidade relativa do ar existente nos vazios do solo em equilíbrio com a interface solo-água. O princípio de funcionamento desse equipamento envolve fenômenos de Seebeck e de Peltier como descreve Presa <i>et al.</i> (1988).	TOTAL - 3,0 - 5,0 pF 0,1-10,0 MPa	Sensível à variação de temperatura. Requer longo tempo de equilíbrio	Spanner (1951) Snethen <i>et al.</i> (1977) Fredlund e Rahardjo (1993)
PAPEL FILTRO	Consiste em medir a umidade do solo por meio de um potencial de água retido no meio poroso (papel filtro) previamente calibrado.	TOTAL e MÁTRICA 0,0-6,2 pF 0,0-160,0 MPa	Pesagem em balança muito sensível. Tempo de pesagem. Tratamento do papel contra fungos.	Chandler e Gutierrez (1986) McKeen (1980) FREDLUND e Rahardjo (1993) Marinho (1994) Ferreira (1995)

Membrana de Pressão – permite obter a sucção mátrica. A sucção é controlada pela técnica de translação de eixo, e a diferença entre a pressão do ar e água é mantida por meio de uma membrana semipermeável de celulose. Para se obter a relação sucção *versus* umidade, amostras indeformadas em sua umidade natural ou amostras compactadas podem ser dessecadas ou umedecidas até a sucção imposta de equilíbrio. Após definir as sucções a serem aplicadas nos ensaios, segue-se o procedimento:

- i - saturação da pedra porosa e membrana de celulose;
- ii - moldar o corpo de prova, determinando peso, características geométricas e umidade;
- iii - circulação de água pela base da célula de membrana de pressão e pedra porosa, corte da membrana de celulose nas dimensões da base da célula, sendo, posteriormente, colocada na célula sem que haja ar entre ela e a pedra porosa; fechar a torneira de passagem de água;
- iv - colocar o corpo de prova em contato com a membrana de celulose;
- v - fechar a célula e aplicar de forma lenta e gradual a sucção desejada (pressão de ar) para o interior da célula, através da válvula reguladora;
- vi - abrir a torneira de passagem d'água após circulação de água na base da célula, pedra porosa e membrana de celulose;
- vii - ajustar periodicamente a sucção aplicada nas células, caso necessário;
- viii - para verificar o equilíbrio de umidade, a pesagem dos corpos de prova é realizada de forma periódica (3 a 4 dias) até haver constância de peso;
- ix - esse procedimento é realizado para vários corpos de prova e cada um com um sucção desejada.

Dessecador de vácuo – Para obter a sucção total. Para se obter a sucção total por meio do dessecador de vácuo, soluções previamente preparadas com concentrações e densidades diferentes são colocadas em câmaras, para que ocorra transferência de umidade. Soluções de cloreto de sódio (Baker *et al.*, 1973) e ácido sulfúrico (Aitchison e Richards, 1965) são preparadas para se atingir a variação de sucção desejada. Os dessecadores utilizados devem ter grandes superfícies e volumes de solução com 500 ml ou 1000 ml. Em cada dessecador, procura-se colocar um número reduzido de amostras (máximo de 5), todas de mesma umidade inicial e preservando a estrutura do solo. As amostras indeformadas ou compactadas moldadas em moldes são talhadas e colocadas em uma placa de alumínio (tampa das cápsulas de umidade), pesadas e apoiadas em uma grade de plástico que repousa na placa de porcelana do dessecador. As pesagens são realizadas periodicamente até haver constância de peso entre pesagens consecutivas (sete em sete dias).

Algumas técnicas para se obter a curva de sucção-umidade – Saturar-se o corpo de prova previamente e, posteriormente, desseca. Esse processo, além de provocar efeito de histerese nos solos e em se tratando de solos expansivos a pré-saturação leva ao aumento de volume, alterando a sua estrutura. Para reduzir esse efeito, o umedecimento da amostra do solo pode ser feito pelo processo de absorção de vapor e por capilaridade. Para tanto, planejam-se as umidades em que se deseja obter a sucção do solo pela técnica do papel filtro e se umedece o solo com o seguinte procedimento:

- i) utilizar um dessecador de vácuo, preenchendo a parte inferior com água fervente; colocar a amostra sobre uma tela metálica localizada na parte superior da câmara, e, em seguida, o dessecador deve ser fechado;

ii) a cada 30 minutos, a água deve ser substituída por nova quantidade de água fervida para sempre produzir vapor para a amostra;

iii) a amostra é retirada quando atinge a umidade desejada, imediatamente é avaliada as dimensões (para determinação do volume, utilizando um paquímetro) e pesada; em seguida, fez-se a colocação do papel filtro (determinação da sucção);

iv) coloca-se um papel de filtro em cada face do corpo de prova é envolvendo-o com filme de PVC em várias camadas. Para proteger da luminosidade envolve-o, com papel alumínio. O tempo de permanência do papel de filtro na atmosfera de influência do corpo de prova é de 7 dias;

v) decorrido o tempo necessário para o equilíbrio da umidade, fez-se a pesagem dos papéis de filtro numa balança com precisão de 0,0001g; em seguida, determina-se o volume do corpo de prova; obteve-se a sucção correspondente a umidade do papel de filtro através de sua curva de calibração

vi) o processo se repetiu, a cada intervalo, entre a retirada e a colocação do papel filtro, aumentando-se a umidade em aproximadamente 3%;

vii) quando o solo atingiu a constância de peso (saturação), foi colocado o papel filtro para a determinação do último ponto (sucção X umidade).

viii) após a determinação do último ponto, levou-se o corpo de prova a estufa para determinação do peso seco.

O tempo necessário para cada aumento da umidade depende do tipo de solo e da umidade inicial. Embora o método exija melhorias, observou-se que permite a expansão do solo ao absorver umidade sem o aparecimento de fissuras (Marinho, 1994).

6. CARACTERIZAÇÃO DE FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS

Os solos expansivos experimentam mudança de volume, sendo uma de suas principais características morfológicas os *slickensides*, resultantes da sua capacidade de se contrair e fissurar com o ressecamento e se expandir com o umedecimento (Ferreira & Ferreira, 2009). A presença de fendas de dessecação no solo altera suas propriedades mecânicas e hidráulicas. A condutividade hidráulica aumenta devido à formação de fissuras que tem vários efeitos adversos em diferentes situações, como movimento rápido e direto de água e solutos da superfície do solo para o substrato permeável. As fissuras formadas alteram as condições de fluxo e comportamento mecânico, comprometendo as camadas, pavimentos, canais, podendo causar acidentes e contaminar os sistemas de água subterrâneos, assim, podendo gerar perda econômica e danos à saúde pública.

Apesar de não existir uma normativa nacional ou internacional específica para esses estudos, observa-se, na literatura, certa padronização entre os autores nas metodologias de ensaios e nos parâmetros analisados. Ensaios de laboratório são levados a efeito em moldar amostras de solo com a umidade inicial conhecida e registrar, por meio de uma câmera fotográfica/webcam, o processo de secagem e fissuração do solo. Ao longo do ensaio, o corpo de prova é pesado (podendo ser em tempos pré-determinados ou colocado em cima de uma balança durante todo o ensaio) de modo a se obter o peso do conjunto e, conseqüentemente, a umidade correspondente aquele momento. O ensaio pode ser re-

alizado com temperatura ambiente ou ainda de forma acelerada (com aquecimento). Os moldes utilizados podem ser de formato circular ou quadrado/retangular, feito de vidro ou metálico, de dimensões e medidas diversas. A Figura 14 apresenta os aparatos desenvolvidos por vários autores (Tang, 2011; Costa, 2015; Ammour e Bouhanna, 2016; Silva, 2017; Ferreira *et al.*, 2019). As imagens obtidas são analisadas por software. Esse procedimento permite uma análise do padrão de fissuras, da quantidade, largura média das fissuras, comprimento total das fissuras e do desenvolvimento da dinâmica de fissuração.

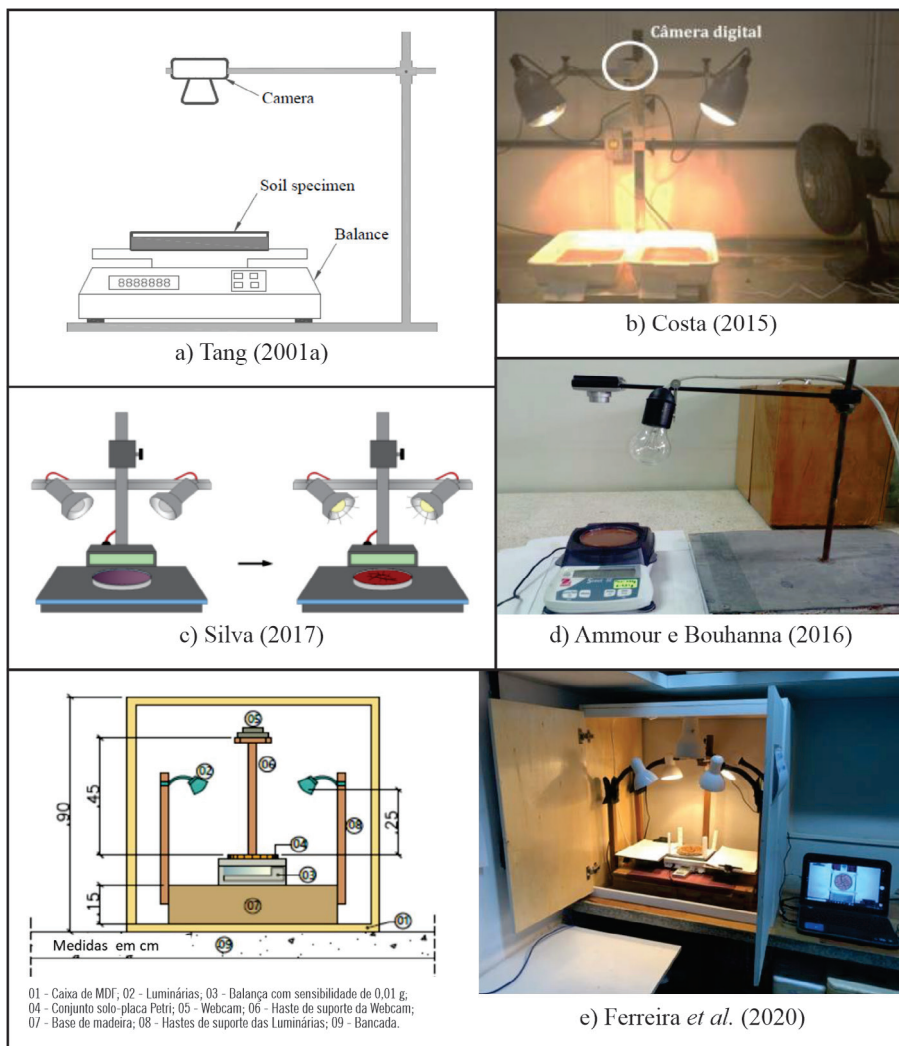


Figura 14 – Aparatos para monitor o processo de formação e propagação de fissuras. a) Tang (2011), b) Costa (2015), c); Ammour e Bouhanna (2016), d); Silva (2017) e Ferreira *et al.* (2020).

Tran *et al.* (2018) descrevem com detalhes os procedimentos de ensaios de fissuras adotados por ele, relatando sobre a potência da lâmpada utilizada (500 W) e a distância entre ela e o corpo de prova (1000 mm); a referência da câmera usada (Nikon D5100) e do intervalo de tempo entre as fotos (a cada 15 min); a utilização de dispositivos de vibração para remover as bolhas de ar da amostra; a utilização de um sensor próximo à amostra a fim de medir, de forma contínua, a temperatura do ambiente e a Umidade Relativa do Ar (URA); e a utilização de uma balança de 0,001 g de precisão.

A técnica de análise de imagem é composta por duas etapas. A primeira consiste em preparar a imagem original colorida para converter a imagem em escala de cinza e, em seguida, para uma imagem binária (preto e branco), Figura 15.

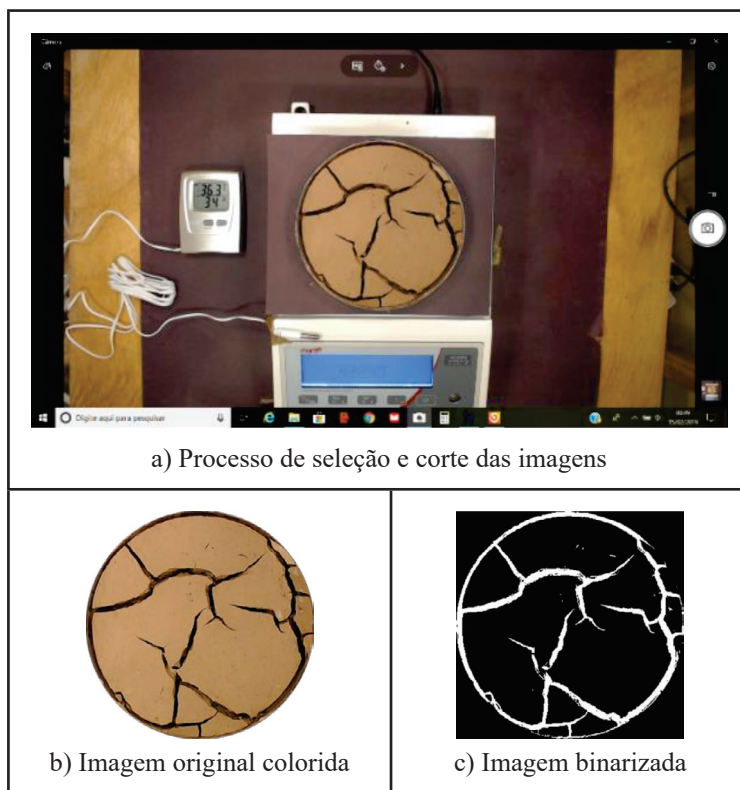


Figura 15. Processo de seleção e corte das imagens

A segunda etapa compreende a análise da imagem processada para obter os índices geométricos que caracterizam o padrão da fissura, como: a) o Crack Intensity Factor - CIF, que corresponde à intensidade da fissuração em uma amostra por meio da relação entre a área superficial da amostra que sofreu a trinca em qualquer tempo e a área superficial da amostra no estado inicial; b) a largura da trinca é calculada pela distância mais curta de um ponto estocástico de uma borda ao limite oposto de um segmento de trinca;

c) o comprimento total de fissura é calculado contando-se o número total de pixels branco após a imagem ter sido esqueletizada; d) O número de segmentos de fissuras são os elementos entre duas interseções adjacentes são definidos como um segmento de fissuras, conforme Tang *et al.* (2019). Também é possível identificar o início do processo de fissuração e seu desenvolvimento. Um programa de domínio público e gratuito, ImageJ, pode ser utilizado para a análise das imagens. O ImageJ possibilita exibição, edição, análise e processamento de imagens. A Figura 16 mostra o desenvolvimento do processo de fissuração, e a Figura 17 mostra a variação dos valores médios dos índices geométricos da fissura, incluindo CIF, a largura média da fissura, o comprimento total da fissura, o número de segmentos da fissura e a área fissurada ao longo da superfície da amostra, com a diminuição do teor de água para o solo natural de Paulista-PE (Ferreira *et al.*, 2020).

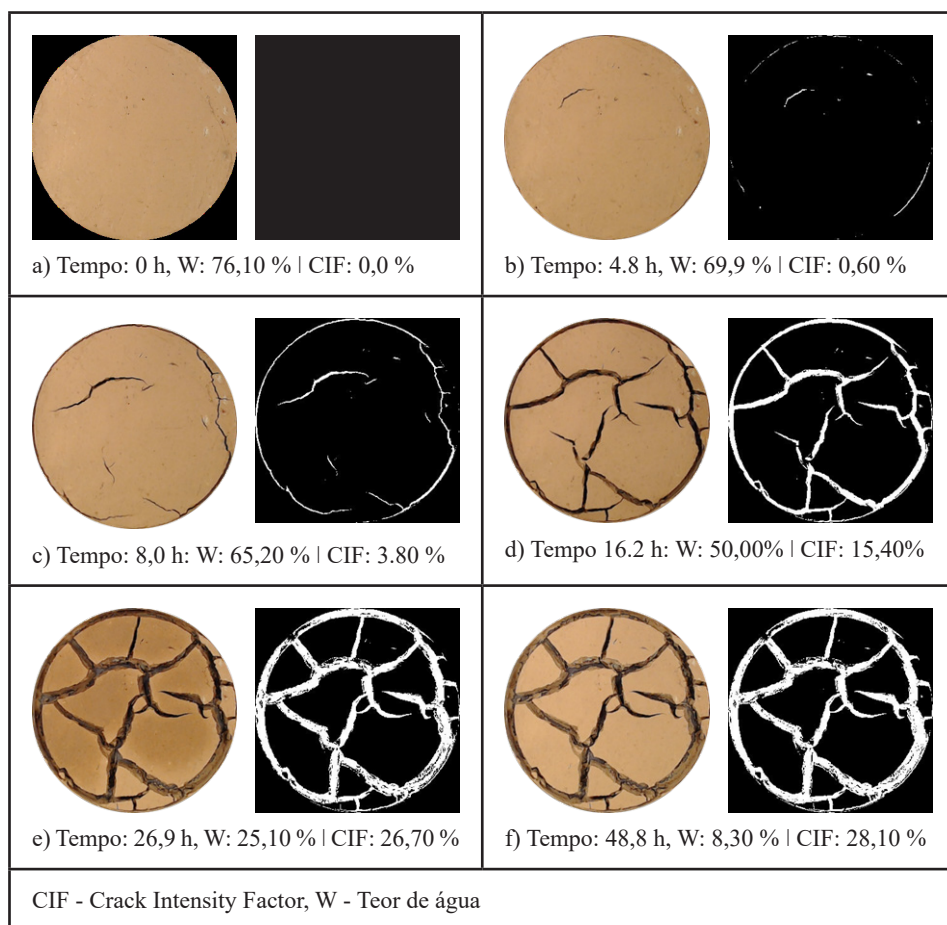


Figura 16 – Desenvolvimento do processo de fissuração em solo expansivo de Paulista - PE.

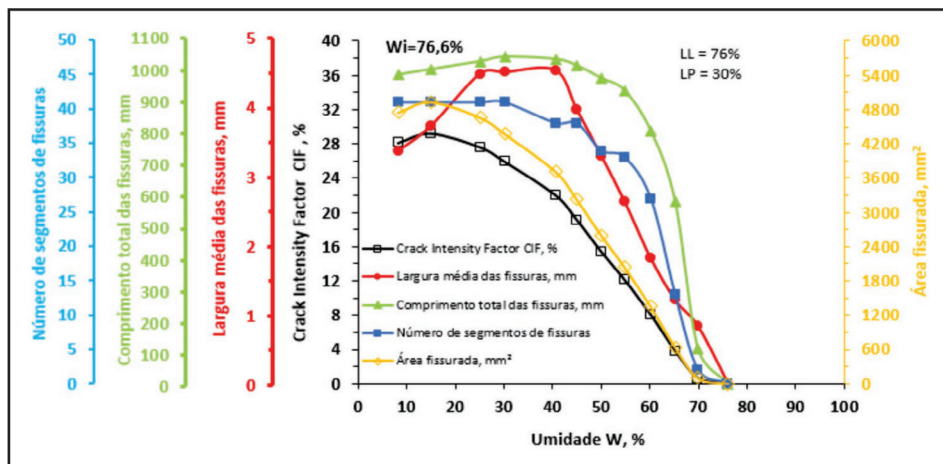


Figura 17 – Evolução quantitativa dos índices geométricos de fissuração no solo de Paulista-PE (Ferreira *et al.*, 2020).

Pesquisas mostram que o padrão de fissuração ao final do ressecamento apresenta uma rede de fissuras composta por três tipos de polígonos: triângulo, quadrado e pentágono. Os segmentos são quase perpendiculares entre si com interseção entre as fissuras nas formas de “T”, Y ou de “+”. Esses índices aumentaram significativamente com a diminuição do teor de água e depois diminuíram. Isso implica que solos argilosos tendem a fissurar mais facilmente com alto teor de água e o potencial de retração e fissuração atenua com a diminuição do teor de água. Comportamento semelhante em solo argiloso foi encontrado por Tang *et al.* (2011b) e Tang *et al.* (2019). A formação do padrão de fissuração por dessecação associada ao início, propagação e união da fenda contribuiu predominantemente para o aumento de todos os índices geométricos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do correto levantamento, análise e espacialização da informação preliminar do local, será possível decidir o tipo mais apropriado de investigação de campo e de laboratório a se realizar, visando contar com uma alternativa técnica e economicamente mais viável para a execução da obra, sempre lembrando que os solos tropicais apresentam propriedades e comportamentos distintos dos solos sedimentares mesmo entre si, o que faz necessário considerá-los no contexto físico-químico, mineralógico, estrutural e mecânico. Conhecer a mineralogia e a microestrutura desses solos pode ser fundamental para que se entenda seu comportamento hidromecânico em condições saturada e não saturada. Por exemplo, em um solo profundamente intemperizado, os vazios e a umidade globais neles presentes têm menor influência sobre o comportamento mecânico do que em um solo pouco intemperizado com presença de argilominerais expansivos, as variações volumétricas registradas geralmente são superiores às variações no volume de vazios, pois parte dela se deve a alterações na distância interplanar basal (Campos, 2008).

Será a adoção de modelos padronizados de preparação de amostras adequados para o estudo do comportamento dos solos tropicais, cuja diversidade dos ambientes em que foram e continuam sendo formados os torna distintos dos solos de clima temperado e frio? Isso não levará ao fracasso nos projetos geotécnicos e, em consequência, nas obras de engenharia?

AGRADECIMENTOS

CAPES/CNPq - IEL Nacional – Brasil, Universidade Federal de Pernambuco, Universidade Católica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco e Universidade de Brasília, Universidade Nacional da Colômbia.

REFERÊNCIA

ABGE (2003). Manual de Sondagem. Boletim n. 3. 5 ed., São Paulo, 203 p.

ABNT (1997). Coleta de Amostras Indeformadas de Solos de Baixa Consistência em Furos de Sondagem – NBR 9820. Rio de Janeiro, 5 p.

_____. (2016) Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – NBR 6457: amostras de solo.. Rio de Janeiro. 8 p.

_____. 1983. Programação de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos para Fundações de Edifícios – NBR 8036. Rio de Janeiro, 3 p

_____. 2016. Solo – análise granulométrica – procedimento – NBR 7181. Rio de Janeiro, 13 p.

_____. 2016. Solo – grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica – NBR 6508. Rio de Janeiro, 8 p.

_____. 2016. Solo – determinação do limite de liquidez – procedimento – NBR 6459. Rio de Janeiro, 6 p.

_____. 2016. Solo – determinação do limite de plasticidade – procedimento – NBR 7180. Rio de Janeiro, 6 p.

_____. 2016a. Abertura de Poços e Trincheiras de Inspeção em Solo com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas – NBR 9604. Rio de Janeiro, 9 p.

_____. 2015. Sondagem a Trado – NBR 9603. Rio de Janeiro, 6 p.

_____. 2016. Solo – ensaio de compactação – procedimento – NBR 7182. Rio de Janeiro, 10 p.

AITCHISON, G.D. & RICHARDS, B.G. (1965). A Broad Scale Study of Moisture Conditions in Pavement Subgrades Throughout Australia. Moisture Covered Areas, Butterworths, Sidney, pp. 226-232.

AL MAHBUB, A. & HAQUE, A. (2016) X-ray computed tomography imaging of the microstructure of sand particles subjected to high pressure one-dimensional compression. Materials (Basel), Nov 3;9 (11)

ALONSO, E.E.; GENS A. & HIGHT D.W. (1987). Special problems soils. 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, General Report, Session 5, pp. 5.1-5.60.

ALVES, I.S. (2019). Análise microestrutural e numérica de um solo colapsível antes e após o colapso. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Pernambuco, 117pp.

ALVES, I.S.; COSTA, L.; ANTONINO, A.C.D.; COSTA, L. & FERREIRA, S.R.M.. (2021). Microstructural analysis of collapsible soil before and after collapse and with loading and unloading cycle. Matec Web Of Conferences, v. 337, p. 01004.

AMMOUR, A. & BOUHANNA, B. (2016). Contribution a l'étude de la fissuration des argiles. Dissertação de Mestrado. Universidade de Tlemcen, Argélia.

ASTM (2009). Standard Practices for Soil Exploration and Sampling by Auger Borings – D1452-09. West Conshohocken, USA. 6 p.

ASTM (2013). Standard Practices for Obtaining Intact Block (Cubical and Cylindrical) Samples of Soils – D7015-13. West Conshohocken, USA. 7 p.

ASTM (2014). Standard Practices for Preserving and Transporting Soil Samples – D4220/D4220M-14. West Conshohocken, USA. 11 p.

BAKER, R.; KASSIF, G. & LOVY, A. (1973). Experience with a Psychrometric Technique. 3rd Int. Conf. on Expansive Soils, Haifa, v. I, pp. 83-96.

BARATA, F.E. (1965). Crítica os métodos laboratoriais dinâmicos de compactação dos solos. I Simpósio sobre pesquisas rodoviárias, IPR.

BARBOSA, F.A.S.; DE ARAÚJO, A.G.D.; SILVA, T.C.R.; BEZERRA, I.M.L.; ANTONINO, A.C.D. & FERREIRA, S.R.M. (2021). Evaluation of hydromechanical behavior and macro-structure of an expansive soil in the city of Paulista-PE Brazil. Matec Web Of Conferences, v. 337, p. 01002.

BELEDELLI, R. & SOUZA, P.H.C. (2012), O que são e como se formam os artefatos nas imagens da tomografia computadorizada de feixe cônico. Revista ABRO – Associação Brasileira de Radiologia Odontológica. v.13, n.1, p.2-15, jan./jun.

BOKING, K.A. & FREDLUNG, D.G. (1993). Use of the Osmotic Tensiometer to Measure Negative Pore Water Pressure. *ASTM Geotech. Testing Jr.*, 2(1):3-10.

BREWER, R. (1976). Fabric and mineral analysis of soils. Robert E. Kinger Pub. Co., Huntington. NY.

BREWER, R. & PAWLUK, S. (1975). Investigations of some soils developed in ummocks of the Canadian subarctic and southernarctic Regions. Part 1. Morphology and Micro-morphology. *Can. Jnl. Sci.*, Ottawa, 55:301-319.

BRINCH HANSEN, J. (1966). Stress-strain relationships for sand. *Danish, Geotec. Inst., Bul.*, 20:8-14.

BULLOCK, P.; FEDEROFF, N. & JONGERIUS, A. (1985). Handbook for soil thin section description. *Waine Research, England*, 152 p.

CAMPOS, I.C.O.; GUIMARÃES, E.M. & CAMAPUM, J.C. (2008). Busca de entendimento da curva característica de materiais expansivos. *XIV COBRAMSEG, Búzios*. pp. 1-8.

CAMAPUM, J.C.; MIEUSSENS, C. & CARVALHO, J.Q. (1985). Problèmes de reconstitution des éprouvettes de sol en laboratoire – Proposition d’une méthode, *Bull. Liaison Lab. P. et Ch.*, 135, pp. 77-83.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. *Soils and Rocks. An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 44 (3). doi.org/10.28927/SR.2021.068121.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2022). Prática da Engenharia Geotécnica no Contexto dos Solos Tropicais. *COBRAMSEG 2022*, 23 a 26 de agosto de 2022. Campinas, SP, Brasil.

CAVALCANTE, A.L.B.; BORGES, L.P.F. & CARVALHO, J.C. (2015). Tomografias computadorizadas e análises numéricas aplicadas à caracterização da estrutura porosa de solos não saturados. In: CAMAPUM, J. DE C.; GITIRANA, G. DE F.N. & MACHADO, S.L. (Ed.). *Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico*. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), p. 531–553.

CETESB (1999). Amostragem do Solo, Projeto GTZ, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, São Paulo, 44 p.

CHANDLER, R.J. & GUTIERREZ, C.I. (1986). The Filter-Paper Method of Suction Measurement. *Geotechnique*, 36(2):265-268.

COLEMAN, J.D. & MARSH, A.D. (1961). An Investigation of the Pressure Membrane Method for Measuring the Suction properties of soil. *Journal of Soil Science*, (12)2:343-362.

CNUUDE, V. & BOONE, M.N. (2013) High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications. *Earth-Science Reviews*. 123. p.1-17.

COSTA, C.D. (2015). Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília.

COSTA, L.F. (2016). Tomografia computadorizada de raios-X aplicada à caracterização do espaço poroso do solo. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Pernambuco, CTG, 71p.

COSTA, L.F.; ANTONINO, A.C.D.; HECK, R.J.; COUTINHO, A.P.; VASCONCELOS, T. C. & CASSIA, B.M. (2018) X-ray computed microtomography in the evaluation of the porous system of soils. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande. v.22, n.4, p.249-254.

CRESTANA, S. MASCARENHAS, S. & POZZI-MUCELLI, R.S. (1985). Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning, by S Crestana, S Mascarenhas, R Pozzi-Mucelli, *Soil Science* 140(5), 326–332.

CRONEY, D. & COLEMAN, J.D. (1961). Pore Pressure and Suction in Soil. Conference on Pore Pressure and Suction in Soils, London, pp. 31-37.

DE CAMPOS, T.M.P. (1994). Equipamentos e Técnicas para a determinação da sucção no Campo. II Simpósio sobre Solos Não Saturados, v. 1, pp. 9-18.

DIXON, J.B.; WEED, S.B. (1989) (eds), *Minerals in soil environments*. 2. ed. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America, 1244 p. (SSSA. Book Series, 1).

EL-SOHBY, M.A.; MAZEN, S.O. & ABOUT-TAHA, M.M. (1989). Effect of apparatus deformability on swelling pressure. XI ICSMFE, v. 1., pp. 589-592.

ESCARIO, V. (1969). Determination of geotechnical characteristics of expansive soils. 2nd International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas, pp. 114-120.

EMBRAPA MEIO AMBIENTE, (2006). FERREIRA, H.; FERREIRA, M.A.; GOMES, DORNELAS DE SOUZA, M. Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos. 169p. Il. ISBN 85-85771-43-7.

FERREIRA, S.R.M. (1982). Compressibilidade de uma argila orgânica mole do Recife. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 212 p.

FERREIRA, S. R. M. (1993). Variação de volume em solos não saturados colapsíveis e expansivos. 7º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Poços de Caldas, Minas Gerais. Vol. 1 pp. 283-296.

FERREIRA, S. R. M.(1995). Colapso e expansão em solos naturais não saturados devidos à inundação. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 379 pp.

FERREIRA S.R.M & FERREIRA M.G.V.X. (2009). Mudanças de volume devido a variação de teor de umidade em um Vertissolo no semiárido de Pernambuco. Rev Bras Cienc Solo. 33:pp. 779-91.

FERREIRA, S.R.M.; ARAÚJO, A.G.D.; BARBOSA, F.A.S.; SILVA, T.C.R.; & BEZERRA, I. M. L. (2020). Analysis of changes in volume and propagation of cracks in expansive soil due to changes in water content. In: Revista Brasileira de Ciência do Solo. v. 44, p. 1-19, 2020.

FREDLUNG, D.G. e RAHARDJO, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, Inc., 513p.

FOOKES, P.G. (2004). Suelos residuales tropicales. Editorial: Hombre Nuevo Editores. (traducción Español Fabián Hoyos Patiño), 235 p.

GRIM, R.E. (1962). Applied clay mineralogy. Ed. McGraw-Hill Book Company, INC.

HUAT, B. B. K; PRASAD, A.; TOLL, D. G., (2012). Handbook of Tropical Residual Soils Engineering CRC Press_Balkema - Libgen.IC

GUIMARÃES NETO, J.S.F. (1997). Análise de alguns fatores que influenciam a colapsividade de um solo compactado devido à inundação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 107 p.

HAINSWORTH, J. M. & AYLMOORE, L.A.G. (1983). The use of computer assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content, by JM Hainsworth and LAG Aylmore, Australian J. Soil Res. 21(4), 435- 443.

HVORSLEV, M.J. (1949). Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes – Waterways Experiment Station – Vicksburg, Mississipi-USA.

JESUS, A.S. (2013). Investigação multidisciplinar de processos erosivos lineares: estudo de caso da cidade de Anápolis - GO. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 340 p.

JOHNSON, L.D. (1978). Predicting potencial heave and heave with time im swelling foudation soils. Technical report S-7 8-7, U.S. Army Engineer waterways experiment station, CE, Viksburg, Miss.

JONGERIUS, A. & HEINTZBERGER, D. (1963). The prepaton of Mammoth-sized thin sections. Wegeningen, The Netherlands: Soil Survey, Paper, 1. The Soil Survey Institute.

JUSTINO DA SILVA, J.M. (2001). Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva Não-Saturada submetida a diferentes condições climáticas. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

JUSTINO DA SILVA, J.M., ROLIM, T.L. (2002). Um Processo Simples para Extração de Amostra Indeformada Tipo Shelby em Argila Fissurada. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo. v. 1. pp. 519-524.

LAMBE, T.W. (1958). The structure of compacted clay. JSMFD, ASCE Vol 84, SM2, 1654, pp. 1654-1 – 1654-35.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. (1960). Mecânica de Suelos. Terzaghi.

LIMA, P.C.; CIRI, N. & LEPSCH, I.(1985). Terminologia de micromorfologia do solo. B. Inf. da SBCE, Campinas, V.10, pp. 33-43.

LIMA, M.R.C. (2018). Estudo de técnicas alternativas para monitoramento ótico de tensões, deformações e temperatura em obras de engenharia. Tese de doutorado, Universidade de Brasília. <https://www.geotecnia.unb.br/index.php/pt/producao-academica/teses-e-dissertacoes>.

LINS, A.H.P. (1990). Resistência e poro-pressão desenvolvidas em um solo compactado não saturado em Laboratório. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 351pp.

LUZ, L.R.Q.P.; SANTOS, M. C. D. & MERMUT, A.R. (1992). Pedogênese em uma topossequência do Semi-árido de Pernambuco. Rev. Bras. Cienc. Solo. Campinas, vol.16, pp. 95-102.

MACHADO, C. B. (2019). Caracterização da Microestrutura de uma Pedosequência com Lamelas utilizando tomografia computadorizada de Raios X. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. p. 69.

MARINHO, F.A.M. (1994). Medição de sucção com o método do papel filtro. Anais... X COBRAMSEG, vol. 2, p. 515 -522.

McGOWN, A. & COLLINS, K. (1975). The Microfabrics of some expansive and collapsing soils. V Cong. Panamericano de Mec. dos Suelos e Ing. de Fundaciones, Buenos Aires, pp. 323-332.

McKEEN, R. G. (1980). Field Studies of Airport Pavements on Expansive Clay. 4th Int. Conf. on Expansive Soils, pp. 242-261.

MOHR, H. A. (1936) – General Report on Sampling Operations - Boston, Massachusetts - USA.

MOTTA, E.Q., FERREIRA, S.R.M. (2011). Variações da compressibilidade e do potencial de colapso de um solo perante diferentes líquidos de inundação. Revista de Estudos Ambientais (Online), vol. 13, pp. 28-41.

MURPHY, C.P. (1986). Thin Section Preparation of Soils and Sediments. Berkhamsted: A.B. Academic publish. 145 p.

OLIVEIRA, J.T.R. (2002). A Influência da qualidade das amostras no comportamento-tensão-deformação-resistência de argilas moles. Rio de Janeiro. Tese de Doutorado, 276 pp. COPPE/UFRJ.

OLIVEIRA, J.T.R. (2005). Prospecção Geotécnica – Ensaios de Laboratório. Geotecnia no Nordeste. GUSMÃO, A.D., GUSMÃO FILHO, J.A., OLIVEIRA, J.T.R., MAIA, G.B. (Org.), Editora da UFPE, 542 p.

OLSSON, J. (1925). Kolvborr, ny borrhyp for upptagning av lerprov (Piston sampler, new sampler for obtaining samples of clay) - Teknisk Tidskrift, vol. 55, pp. 17-20.

PAIVA, S.V. (2008). Estudo químico do saibro coletado na região metropolitana do Recife para utilização nas argamassas de assentamento e revestimento de alvenaria. Dissertação de Mestrado,. Universidade Católica de Pernambuco, 146 p.

PAIVA, S.V. (2015). Solos Expansivos: identificação, avaliação da expansividade e melhoramento com cal: Seminário de Qualificação de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, 146 p.

PEREIRA DE SOUZA, L. A., FERNANDES DA SILVA, R., SHOJI IYOMASA, W. (1998). Métodos de Investigações. Antonio Manoel dos Santos, Sergio Nertan Alves de Brito, (eds), Geologia de Engenharia, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, pp. 163-196.

PETH, S.; NELLESEN, J.; FISCHER, G. & HORN, R. (2010) Dynamics of soil por space structure investigated by X-ray microtomography. In: World Congress os Soil Science, Soil Solutions for a Changing Worl. 19, 2010. Brisbane, Australia. Proceedings [...]. Australia.

PETROVIC, A.M., SIEBERT, J.E. & RIEKE, P.E. (1982). Soil Bulk Density Analysis in Three Dimensions by Computed Tomographic Scanning, by AM Petrovic, JE Siebert and PE Rieke, Proc. Soil Sci. Soc. Am. J. 46(3), 445-450.

RICHARDS, B. G. (1980). Measurement of the Soil Suction in Expansive Clays. Inst. Eng. Austrália, Civ. Eng. Trans., vol. CE22, n. 3, pp. 252-261.

SANTOS, M.C.D.; MERMUT, A.R. & RIBEIRO, M.R. (1991). Micromorfologia de solos com argila de baixa atividade no Sertão de Pernambuco. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas Vol 15, pp. 83-91.

SANTOS, R.D. *et al.* (2005). Manual de descrição e coleta de solos no campo. 5. ed revista e ampliada Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 100 p.

SANTIAGO, J.W.C.M. (2009). Deterioração de embasamentos de fundações de prédios construídos em Alvenaria Resistente. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, 147p.

SEED, H.B., MITCHELL, J.H & CHAN, C.K. (1960). The strength or compacted cohesive soils. ASCE Research Conf. on the shear strength of cohesive soil. Boulder, Colorado, pp. 877-964.

SILVA, T. J. (2017). Avaliação do impacto de fissuras na condutividade hidráulica em aplicações de camada fina por meio de análises de imagens. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.

SILVA, T.C.R. (2019). Avaliação do comportamento hidromecânico e do processo de propagação de fissuras de solo expansivo do município de Bonito/PE. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. 163p.

SNETHEN, D.R.; JOHNSON, L.D. & PATRICK, D.M. (1977). An Evaluation of Expedient Metodology for identification of Potentially Expansive Soils, F.H.W.A.R.D. pp. 77-94, Federal Highway Administration, Washington.

SPANNER, D.C. (1951). The Peltier Effect and its Use in Measurement of Suction Pressure, Journal of Experimental Botany, vol. 2, pp. 145-148.

SOUZA SANTOS. P. (1975). Tecnologia de argila, aplicada as argilas brasileiras, São Paulo. Edgar Blücher, Ed da Universidade de São Paulo, v 1, 340 p.

STOOPS, G.J. (1986). Multilingual translation of the terminology used in the Handbook for Soil thin Section Description Pedologie, Ghent, vol. 36, pp. 337-347.

TANG, C.; CUI, Y.J.; SHI, B.; TANG, A.M. & LIU, C. (2011 a). Desiccation and cracking behavior of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles. *Geoderma*, 166, pp. 111-118.

TANG, C.; SHI, B.; LIU, C.; SUO, W. & GAO, L. (2011 b). Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. In: *Applied Clay Science*, 52, pp. 69-77.

TANG, C.; ZHU, C.; LENG, T.; SHI, B.; CHENG, Q. & ZENG, H. (2019). Three-dimensional characterization of desiccation cracking behavior of compacted clayey soil using X-ray computed tomography. *Engineering Geology* 255 1-10.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEM, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. 2017 *Manual de Métodos de Análise de Solos*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Solos. 3ª edição. Brasília. EMBRAPA. p. 573.

TRAN, K.M.; BUI, H.H.; KODIKARA, J. & SÁNCHEZ, M. (2018). Numerical simulation of soil curling during desiccation process. In: *International Conference on Unsaturated Soils*, 7. Hong Kong. Proceedings [...]. Hong Kong: ICUS.