



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS DE PALMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**JOÃO FRANCISCO FONSECA DA ROCHA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE UM  
SOLO DA REGIÃO DE PALMAS-TO**

Palmas/TO  
2022

**JOÃO FRANCISCO FONSECA DA ROCHA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE UM  
SOLO DA REGIÃO DE PALMAS-TO**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Civil para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora.

Orientadora: MSc. Janaina Lima de Araújo

Palmas/TO  
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

F676e Fonseca da Rocha, João Francisco.  
Estudo do comportamento hidráulico de um solo da região de  
Palmas - TO. / João Francisco Fonseca da Rocha. – Palmas, TO,  
2022.  
46 f.  
Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins –  
Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2022.  
Orientadora : Janaina Lima de Araújo  
1. Papel filtro. 2. Curva de retenção de água. 3. Sucção. 4.  
Função de permeabilidade. I. Título

**CDD 624**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de  
qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde  
que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime  
estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica  
da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

JOÃO FRANCISCO FONSECA DA ROCHA

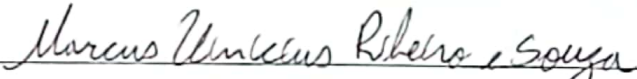
### ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE UM SOLO DA REGIÃO DE PALMAS-TO


Monografia foi avaliada e apresentada à UFT –  
Universidade Federal do Tocantins – Campus  
Universitário de Palmas, Curso de Engenharia  
Civil para obtenção do título de Engenheiro Civil  
e aprovada em sua forma final pelo Orientador e  
pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 04 / 08 / 22

Banca Examinadora

  
Prof. MSc. Janaina Lima de Araújo, UFT

  
Prof. Dr. Marcus Vinicius Ribeiro e Souza, UFT

  
Prof. MSc. Bruno Rogério da Hora Lôbo, UFT

Palmas, 2022

## RESUMO

Na mecânica de solos não saturados a principal ferramenta para os estudos de seu comportamento é a curva de retenção de água no solo, a partir dela é possível prever algumas propriedades de solos não saturados além de servir como base para outros objetos de estudos como a função de condutividade hidráulica. O presente trabalho buscou trazer contribuições nos estudos do comportamento de solos não saturados através da modelagem da curva de retenção de água no solo e da função de condutividade hidráulica. Para determinação da curva de retenção foi necessário obter o valor de sucção do solo, para isso, foi utilizada a metodologia do papel filtro, amostras de solo indeformável foram retiradas no *campus* da UFT e foram levados em laboratório para realização do ensaio do papel filtro para medida indiretamente a sucção do solo. Neste trabalho foram utilizadas as equações de calibração do papel filtro proposta por Chandler *et al.* (1992), ASTM D5298 e Marinho e Oliveira (2006). Com os valores de sucção e umidade dos corpos de provas foi possível determinar a curva de retenção através do ajuste de Mualem (1976)-Van Genuchten (1980), para isso foi calculado os parâmetros desse ajuste com regressão linear no Excel. Com a modelagem da curva de retenção pode-se realizar a determinação da função de condutividade hidráulica utilizando os valores de umidade gravimétrica obtidas com a curva de retenção com o coeficiente de permeabilidade saturada do solo, esse coeficiente foi calculado utilizando o ensaio da ABNT NBR 7229:1993 encontrando um valor de  $7,988 \times 10^{-5}$  cm/s. Com esses resultados foi possível modelar a função de condutividade hidráulica usando a equação de Van Genuchten (1980). As modelagens das curvas apresentaram bons resultados.

**Palavras-chaves:** Papel Filtro; Curva de Retenção de Água; Sucção; Função de Permeabilidade.

## ABSTRACT

In the mechanics of unsaturated soils, the main tool for studying its behavior is the soil water retention curve, from which it is possible to predict some properties of unsaturated soils in addition to serving as a basis for other objects of study such as the function of hydraulic conductivity. The present work sought to bring contributions in the studies of the behavior of unsaturated soils through the modeling of the water retention curve in the soil and the hydraulic conductivity function. To determine the retention curve it was necessary to obtain the soil suction value, for this, the filter paper methodology was used, samples of non-deformable soil were taken from the UFT campus and were taken to the laboratory to perform the filter paper test to indirectly measured soil suction. In this work, the filter paper calibration equations proposed by Chandler et al. (1992), ASTM D5298 and Marinho and Oliveira (2006). With the suction and moisture values of the specimens, it was possible to determine the retention curve through the adjustment of Mualem (1976)-Van Genuchten (1980), for which the parameters of this adjustment were calculated with linear regression in Excel. With the retention curve modeling, it is possible to determine the hydraulic conductivity function using the gravimetric moisture values obtained with the retention curve with the saturated permeability coefficient of the soil, this coefficient was calculated using the ABNT NBR 7229 test :1993 finding a value of  $7.988 \times 10^{-5}$  cm/s. With these results it was possible to model the hydraulic conductivity function using the equation of Van Genuchten (1980). The modeling of the curves showed good results.

**Key-words:** Filter Paper; Water Retention Curve; Suction; Permeability Function.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema ilustrativo dos componentes de sucção do solo .....	12
Figura 2 - Câmara de Richards .....	15
Figura 3 - Tensiômetro .....	16
Figura 4 - Tensiômetro de alta capacidade .....	17
Figura 5 - Placa de Sucção .....	18
Figura 6 - Fluxo de umidade entre solo e papel filtro .....	19
Figura 7 - Formato comum das curvas de retenção .....	21
Figura 8 - Zonas de uma curva unimodal .....	22
Figura 9 - Correlação entre a curva de retenção e condutividade hidráulica .....	25
Figura 10 - Etapas da metodologia .....	26
Figura 11 - Área de Estudo .....	27
Figura 12 - Curva granulométrica do solo .....	28
Figura 13 - Coleta das amostras .....	29
Figura 14 - Amostras em laboratório .....	30
Figura 15 - Procedimentos do ensaio de infiltração .....	31
Figura 16 - Papel Filtro Whatman nº 42 .....	32
Figura 17 - Montagem dos corpos de prova .....	33
Figura 18 - Procedimento de pesagem .....	34
Figura 19 - Curva de retenção de água no solo .....	38
Figura 20 - Função de condutividade hidráulica do solo .....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de métodos para medição da sucção .....	14
Tabela 2 - Equações de Calibração.....	20
Tabela 3 - Equações de ajuste.....	23
Tabela 4 - Equações para curva de condutividade hidráulica .....	25
Tabela 5 – Caracterização do solo .....	28
Tabela 6 - Ensaio de infiltração.....	36
Tabela 7 – Caracterização dos corpos de prova .....	37
Tabela 8 - Sucção do papel filtro.....	37
Tabela 9 - Índices físicos .....	38
Tabela 10 - Parâmetros da modelagem de Mualem-Van Genuchten Genuchten.....	38



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	8
1.2 OBJETIVOS .....	9
1.2.1 Objetivo Geral .....	9
1.2.2 Objetivos Específicos .....	9
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>10</b>
2.1 SOLOS NÃO SATURADOS .....	10
2.1.1 Sucção Total .....	11
2.1.2 Sucção Matricial .....	13
2.1.3 Sucção Osmótica .....	14
2.2 PRINCIPAIS TÉCNICAS PARA MEDIR SUCÇÃO DO SOLO .....	14
2.2.1 Câmara de Richards .....	15
2.2.2 Tensiômetro Convencional .....	15
2.2.3 Tensiômetro de Alta Capacidade .....	16
2.2.4 Placa de Sucção .....	17
2.2.5 Método do Papel Filtro .....	18
2.3 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO .....	20
2.3.1 Ajuste na Curva de Retenção .....	22
2.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO .....	23
2.5 FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO .....	24
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO .....	27
3.1.1 Caracterização do solo .....	27
3.1.2 Coleta de amostras indeformadas do solo .....	29
3.1.3 Ensaio de infiltração de água no solo .....	30
3.2 ENSAIO DO PAPEL FILTRO .....	31
3.3 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO .....	34
3.4 FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA .....	35
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
4.1 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DO SOLO .....	36
4.2 CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVAS .....	36
4.3 MODELAGEM DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO .....	37
4.4 MODELAGEM DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO .....	39
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>40</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na Mecânica dos solos clássica, o estudo dos índices físicos e propriedades do solo são de extrema importância para realização de diversas atividades na área geotécnica. De acordo com o tipo de solo, formação geológica, granulometria, entre outras características é possível prever o comportamento de um dado solo referente ao empreendimento de engenharia que se deseja realizar nele, conseguindo prever as dificuldades que serão encontradas na execução da obra e antecipar problemas futuros decorrentes a natureza do solo.

Sabe-se que os solos são constituídos por três fases distintas: sólida (grãos de solo), gasosa (espaços vazios) e líquida (água e umidade), o solo é considerado saturado quando todos os seus espaços vazios estão preenchidos com água. Na condição de não saturação o solo possui parte de seus vazios preenchidos com água, logo, no estudo de solos não saturados o fator mais importante é conhecer o comportamento do solo mediante as variações no seu teor de umidade que podem promover deformações volumétricas que interferem na resistência desse material.

Os estudos de comportamento do solo mostram que a bibliografia da mecânica de solos foi concebida com a tendência de considerar os solos no estado saturado (ROHM, 1993). Tal concepção foi realizada devido a condições ambientais dos países de clima temperado onde foram desenvolvidas essas teorias, entretanto, em países de clima tropical como no caso do Brasil essa condição de saturação nunca é encontrada (ALONSO *et al.*, 1987).

Embora a condição de saturação se mostre a mais crítica numa diversidade de situações, nem sempre esta situação extrema está associada ao pior efeito do comportamento do solo. Como a mecânica dos solos clássica é baseada em princípios que dependem da completa saturação, na prática, as soluções são encontradas supondo a pior situação possível, no que tange o preenchimento dos vazios do solo. O melhor desenvolvimento da mecânica dos solos não saturados permitiria, portanto, a escolha de soluções mais econômicas, fundamentadas em um conhecimento mais profundo sobre o comportamento do solo em sua real condição de umidade. (NAKASHIMA, 2017)

Silva (2005) relata que na Mecânica dos solos clássica (entenda-se a mecânica dos solos saturados) interessa conhecer as propriedades de compressão, resistência e permeabilidade, dos solos não saturados com a diferença de que se deve atentar para o fato de que a pressão atuante nos poros do solo altera seu comportamento. Assim, ao usar os

conceitos da mecânica dos solos clássica para interpretar estes tipos de problemas, percebe-se que tais conceitos clássicos de solos saturados não representam o comportamento os solos dos sistemas multifásicos solo-ar-água com a mesma consistência.

Sendo assim, há uma necessidade cada vez mais de se estudar o comportamento dos solos em condição não saturada, analisando-se as características de resistência e deformação com base em técnicas que permitem conhecer o parâmetro da sucção. Um dos motivos do avanço dos estudos da mecânica de solos não saturados, de acordo com Leme (2009), é que maciços saturados possuem comportamentos mais críticos o que implica em maiores custos em projetos, portanto, há sempre um incentivo aos estudos de solos não saturados buscando trazer economias e eficiência em projetos de engenharia.

## **1.1 Justificativa**

Grande parte das obras de engenharia é feita em solos não saturados ou utilizam os solos no estado não saturado, estes solos são muitas vezes interpretados como sendo “problemáticos” porque quando sujeitos a variações de grau de saturação eles expandem, colapsam, reduzem a resistência, ou seja, eles mudam as suas características de estado (MARINHO, 2014).

Os problemas mais comuns encontrados na engenharia envolvendo solos não saturados têm relação a fluxo de água. A presença de água no solo provoca mudanças no seu comportamento, tais mudanças são a fonte dos estudos para diversos projetos de engenharia, por exemplo, Bugs (2015) que realizou um estudo sobre a influência de solos não saturados para o dimensionamento de fundações e taludes e concluiu que o aumento da sucção de um solo tem a capacidade de desencadear um acréscimo na tensão admissível do solo.

Em uma região de clima tropical como o Brasil onde a maior parte das precipitações ocorre durante um período curto do ano o conhecimento do comportamento hidráulico do solo possui uma maior importância, pois o solo acaba passando por uma grande variação de umidade em pouco tempo. Isso porque, as precipitações fazem surgir eventos hidrológico-geológicos extremos como inundações, enxurradas, enchentes e deslizamentos causados pelo desconhecimento do comportamento hidráulico dos solos.

A curva de retenção de água e a função de condutividade hidráulica do solo são consideradas componentes fundamentais para os estudos do comportamento de solos não saturados através da relação entre umidade do solo e seus valores de sucção. Marinho (2013) recomenda a utilização de curvas de retenção para obtenção de parâmetros de resistência ao

cisalhamento de costas e taludes quando as pressões de água não são conhecidas para a escolha do fator de segurança.

Apesar da existência de diversos estudos que colabora para utilização das curvas de retenção para mensuração do comportamento de solos não saturados, ainda assim existe uma carência de estudos em solos no Estado do Tocantins, com isso, desenvolveu-se o presente trabalho, motivados pela necessidade de compreender melhor o comportamento hidráulico dos solos não saturados, bem como contribuir para os estudos de solos não saturados no Estado.

## **1.2 Objetivos**

A seguir, serão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral a realização de um estudo do comportamento hidráulico de um solo de Palmas – TO.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Para atingir o objetivo geral, foram então traçados os seguintes objetivos específicos:

- Determinar a sucção matricial do solo pela técnica do papel filtro por meio de três funções de calibração de papel filtro Whatman n°42;
- Construir e avaliar as curvas de retenção do solo, por meio do modelo de ajuste proposto de Van Genuchten (1980).
- Obter e avaliar a função de condutividade hidráulica do solo, Modelo de Van Genuchten (1980), a partir das curvas de retenção obtidas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 SOLOS NÃO SATURADOS

Os engenheiros geotécnicos, tradicionalmente, são direcionados a resolver problemas relacionados à resistência, deformação e percolação, os quais consideram o solo totalmente seco ou saturado. Isso se deve muito ao desenvolvimento da Mecânica dos Solos Clássica, e principalmente, ao princípio das tensões efetivas de Terzaghi, ou seja, tensão efetiva ( $\sigma'$ ) do solo é a diferença entre a tensão total ( $\sigma$ ) e a tensão da água ou poropressão ( $u$ ), princípio esse que forneceu elementos básicos para o entendimento do comportamento desses solos e definiu de forma adequada o estado de tensões no solo. Além de ser logo acompanhado por tecnologias práticas que permitiram que sua teoria fosse incorporada de modo a interpretar e prever o comportamento do solo tanto em campo quanto em laboratório (SILVA, 2005).

A divisão entre os estudos de solos não saturados e solos saturados indica a importância do estudo hidráulico para o entendimento do comportamento de solos. Uma vez que a definição mais geral para solos não saturados se dá em função do estado de tensões da água presente no solo, que está, neste caso, sob tensões negativas, e não apenas como daqueles solos cujo grau de saturação é menor que 100%.

Atualmente têm-se fenômenos que possuem relação com o fluxo de água no interior do solo como problemas de erosão, estabilidade de taludes, problemas provocados pelo rebaixamento do lençol freático, entre outros, o que indica a necessidade de conhecimentos hidráulicos em obras de engenharia (CARVALHO *et. al.*, 2015). Entretanto, alguns desses problemas acabam se apresentando de forma mais complexa exigindo a modelagem de sistemas mais complexos para determinação de certas propriedades do solo entre as quais se pode citar o fluxo de água em solos não saturados que muitas vezes necessitam analisar outros potenciais de energia de água.

Para que haja fluxo de água no solo é necessário que exista um diferencial de energia das moléculas de água localizadas em diferentes poros do solo. Em solos saturados esse fenômeno não ocorre, pois eles são constituídos por um sistema bifásico, ou seja, compostos basicamente pelas partículas sólidas de solo e líquido intersticial.

Já em solos não saturados esse fenômeno ocorre por serem constituídos por um sistema trifásico composto por partículas sólidas de solo, líquido intersticial e ar presente nos poros livres. Alguns autores como Fredlund e Morgentern (1977) admitem a existência de uma quarta fase composta pela interação entre a fase líquida e gasosa chamada de membrana

contráctil, nessa interação, surge uma pressão isotrópica denominada de sucção. Isso por que, nos solos não saturados a membrana contrátil está sujeita à pressão do ar ( $u_a$ ) que é maior do que a pressão da água ( $u_w$ ).

Fredlund e Rahardjo (1993) explicam ainda que a inclusão da membrana contrátil como uma fase adicional é devido a importância da interação água-ar, os mesmos justificam esta hipótese devido ao fato de que, quando a fase ar é contínua, a membrana contrátil interage com as partículas de solo e influencia no seu comportamento mecânico. Sendo a sucção ( $u_a - u_w$ ) torna-se um dos dois parâmetros necessário para descrever o comportamento dos solos não saturados.

Outro parâmetro importante a ser conhecido é a quantidade de água presente no solo. Sabe-se que é comumente representado pelo teor de umidade gravimétrico ( $w$ ) que é a relação entre a massa de água presente no solo ( $M_w$ ) e a massa dos sólidos ( $M_s$ ) e por ser uma relação entre massas sua unidade é g/g. Além deste, pode-se definir o teor de umidade volumétrico ( $\theta_w$ ) definido como a razão entre volume de água presente no solo ( $V_w$ ) e o volume total do elemento ( $V$ ) e por esta razão sua unidade é  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ .

Por envolver medidas de volume, o teor de umidade volumétrica se torna difícil sua obtenção. Porém, o mesmo pode ser calculado por meio de correlação com o teor de umidade gravimétrica, bem como pode ser expresso em função de outros índices físicos como a porosidade, grau de saturação e índice de vazios. É importante ressaltar que as unidades sempre devem ser matidas, uma vez que, para uma mesma amostra de solo, a umidade gravimétrica é diferente da umidade volumétrica.

### 2.1.1 Sucção Total

A energia potencial de água no solo é a soma de duas formas de energia: cinética e a potencial, entretanto, a velocidade da água no interior do solo é extremamente baixa, logo, costuma a considerar a energia cinética nula, então, a energia do solo é representada pela energia potencial de água no solo. A energia potencial total pode ser decomposta em várias outras energias como mostra a Equação 1.

$$\Psi_t = \Psi_{te} + \Psi_z + \Psi_{in} + \Psi_p + \Psi_{pn} + \Psi_m + \Psi_{osm} \quad \text{Equação 1}$$

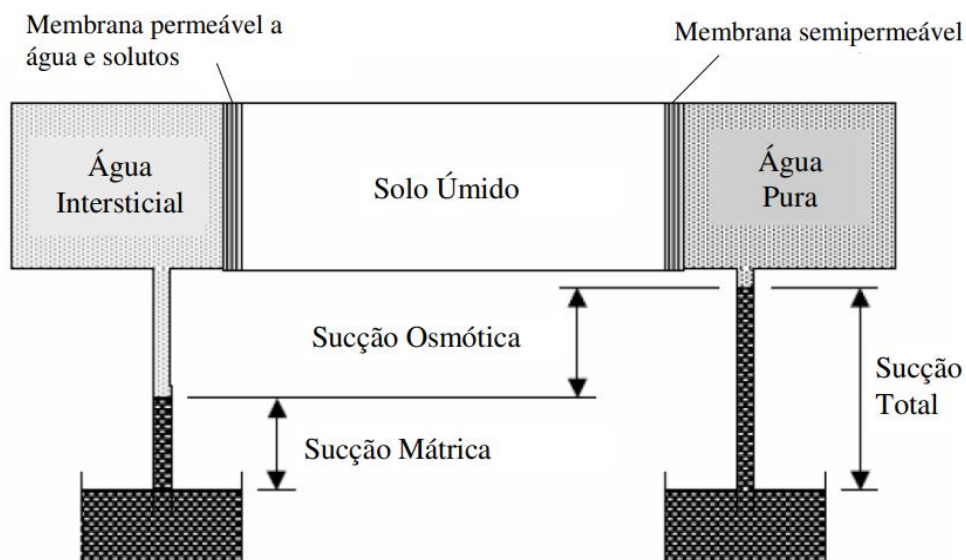
$\Psi_t$  = Potencial total da água no solo;

$\Psi_{te}$  = Potencial térmico da água no solo;  
 $\Psi_z$  = Potencial de posição ou gravitacional;  
 $\Psi_{in}$  = Potencial cinético da água no solo;  
 $\Psi_p$  = Potencial de pressão da água no solo;  
 $\Psi_{pn}$  = Potencial pneumático da água no solo;  
 $\Psi_m$  = Potencial matricial da água no solo;  
 $\Psi_{osm}$  = Potencial osmótico da água no solo.

Entretanto, para estudos do comportamento dos solos não saturados, parte desses potenciais é descartável ou não apresentam grande importância para o potencial total de água no solo. Marinho (1994) refere-se a esse potencial de água no solo como sucção definida como a pressão isotrópica imposta pela água intersticial sobre os poros para absorver mais água, segundo o mesmo autor ela é dividida em três tipos de sucção: mátrica ( $\Psi_m$ ), osmótica ( $\Psi_{osm}$ ) e total ( $\Psi_t$ ).

Para demonstrar fisicamente o comportamento dessas sucções Marinho (1994) utilizou um conceito de membrana semipermeável (Figura 1). Onde a sucção total é representada pela diferença de pressão por meio de uma membrana semipermeável que separa a água pura de um sistema constituído por solo e água matricial, essa membrana permite apenas passagem de água e não dos solutos, então, a pressão ocorre devido à diferença de concentração entre a água pura e a água do solo.

Figura 1 - Sistema ilustrativo dos componentes de sucção do solo



Fonte: Marinho (1994).

Ou seja, a sucção mátrica é representada pela diferença de pressão através de uma membrana semipermeável que separa o sistema solo-água intersticial de uma solução idêntica, mas sem o componente do solo, essa membrana é permeável a solução, logo, permite a passagem de água e solutos o que causa uma mesma concentração química nos poros. A sucção osmótica é obtida pela diferença entre as sucções total e mátrica.

Apesar do parâmetro de sucção ser a principal variável que governa os comportamentos de solos não saturados, este parâmetro é muito pouco utilizado em projetos de engenharia. Houston *et al.* (1994) cita dois fatores para essa baixa adesão: pouca bibliografia disponível que relacione essa variável com as demais propriedades de solos e a ausência de metodologia padronizada de baixo custo para determinação de sucção. Por isso que esforços recentes têm como objetivo garantir uma maior confiabilidade nas medições de sucção através de melhorias de técnicas e correlações utilizadas.

### 2.1.2 Sucção Matricial

De acordo com Freudlund (1979), a sucção matricial é dita como a parcela mais significativa para o estudo da sucção total do solo, ela surge através da interação entre o líquido intersticial e as partículas de solo que através da combinação de efeitos da capilaridade e da adsorção.

A capilaridade surge devido à interação entre as forças de coesão das moléculas de água (Força de Van der Waals) e as forças de atração com a superfície sólida dos poros do solo que por serem pequenas e interconectadas se comportam como tubos capilares facilitando a ascensão capilar dessas moléculas de água. Essa função de capilaridade está intrinsecamente relacionada com a granulometria do solo, porosidade e distribuição de poros, assim, quanto menor forem os tubos capilares formados no solo, maior será a ascensão capilar.

Já o efeito da adsorção na sucção matricial está relacionado com o caráter polar da molécula de água que poderá sofrer uma atração ou repulsão de acordo com o tipo de carga encontrada na superfície do solo, logo, é um fator ligado à composição mineralógica do solo. É importante observar que em condições de variados tipos de líquidos presentes no interior do solo esses líquidos também terão papel para o fluxo de água através da adsorção.



### 2.1.3 Sucção Osmótica

A sucção osmótica surge devida a condição de impureza da água, isto é, a água possui diversos solutos dissolvidos nela. O fluxo de água tende a se orientar do meio com menos solutos para o meio com mais solutos de modo a possibilitar o equilíbrio entre ambos, esse processo é conhecido como osmose e a pressão que surge para anular esse fluxo de água é o que chamamos de sucção osmótica, na maior parte dos casos essa pressão é consideração negativa.

A componente osmótica é desprezível na grande maioria dos solos, principalmente quando a umidade do solo não é muito baixa, ou quando a concentração salina é insignificante. Fredlund e Xing (1994) citam que para valores de sucção altos (maiores de 1.500 kPa), a sucção matricial e a sucção total poderiam ser assumidas como equivalentes, muito provável que está afirmação se deu devido as limitações técnicas de medição de sucção da época, visto que atualmente existem diversas técnicas bastantes avançadas

## 2.2 PRINCIPAIS TÉCNICAS PARA MEDIR SUCÇÃO DO SOLO

As funções constitutivas hidráulicas dos solos são determinadas através da medição dos valores de sucção de um dado solo, para essa medição, utilizam-se métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos são aqueles que medem a sucção do solo sem que haja necessidade de correlacionar com outros parâmetros do solo, enquanto os métodos indiretos buscam medir a sucção do solo através das propriedades de outros materiais. A escolha do método depende do tempo necessário para execução de ensaios, equipamento disponível, custos, nível de precisão escolhido, entre outros (Tabela 1).

Tabela 1 - Tipos de métodos para medição da sucção

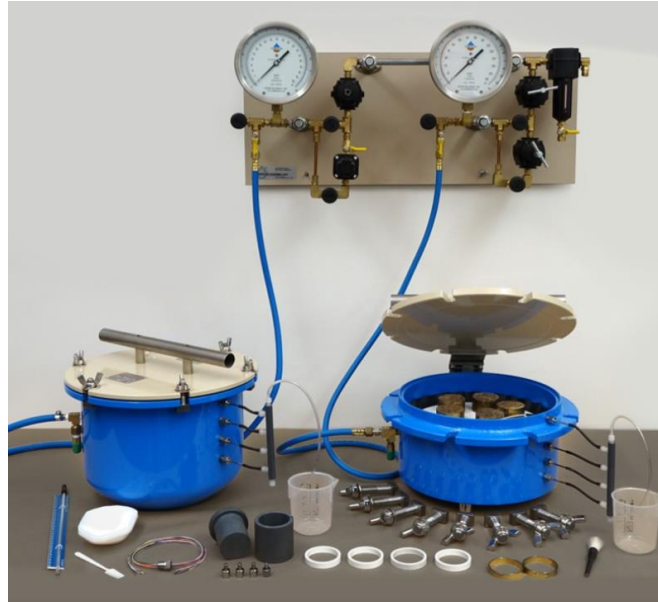
<b>Método</b>	<b>Sucção Medida</b>	<b>Classificação</b>	<b>Faixa de Sucção Medida</b>
Câmara de Richards	Sucção Matricial	Direto	Até 1500 kPa
Tensiômetro Convencional	Sucção Matricial	Direto	0 kPa a 90 kPa
Tensiômetro de Alta Capacidade	Sucção Matricial	Direto	0 kPa a 1000 kPa
Placa de Sucção	Sucção Matricial	Direto	Até 40 kPa
Papel Filtro	Sucção Total e Matricial	Indireto	10 kPa a 100000 kPa

Fonte: Machado (2016).

### 2.2.1 Câmara de Richards

A câmara de Richards é um aparelho de medição direta da sucção de um solo utilizando o princípio da técnica de translação de eixos e a pressão da água intersticial presente no solo. O ensaio é realizado colocando os corpos de prova dentro do aparelho em contato com uma placa porosa, em seguida o aparelho é fechado hermeticamente e aplica-se uma pressão de ar na câmara de modo a provocar uma diferença de potencial entre a placa porosa e as amostras de solo, essa água é captada por um sistema de drenagem e levada à uma balança onde sua massa é registrada, assim, é possível realizar uma relação entre a massa da amostra e a pressão aplicada. O método da câmara de Richards possui algumas limitações, tais como, o aparelho possui um alto valor para sua aquisição, as placas porosas são frágeis e nem sempre se obtém um contato ideal entre a placa e as amostras, é um ensaio demorado e nem sempre o ponto de equilíbrio é atingido. A Figura 2, a seguir, mostra todo o aparato utilizado para o método.

Figura 2 - Câmara de Richards



Fonte: Alemmar (2022).

### 2.2.2 Tensiômetro Convencional

Os tensiômetros são aparelhos capazes de medir a sucção do solo em campo, existem vários modelos comercializados, mas todos possuem os mesmos componentes básicos:

elemento poroso, água e medidor de pressões (Figura 3). O material poroso é localizado na ponta do aparelho que é responsável por promover a interface entre a água do dispositivo e o solo sem permitir a entrada de bolhas de ar no sistema (Carvalho *et al.*, 2015).

Figura 3 - Tensiômetro



Fonte: (Cahn, 2019).

No interior do aparelho existe um compartimento que deve ser preenchido com água e acoplado a um sistema de medição da pressão de água (manômetro), sua medição é feita através da pressão que o solo exerce para adsorver a água no interior do aparelho. É uma metodologia simples, de baixo custo e rápida execução.

Segundo Vilar (2002) apud Silva (2005) os aparelhos desse tipo, apresentam faixa de medidas entre 0 a 90 kPa, seu tempo de resposta da condutância da pedra porosa, e da sensibilidade do elemento de medida. Existindo aparelhos baseados em princípios osmóticos, e também tensiômetros de alta capacidade (para pressões de -1atm).

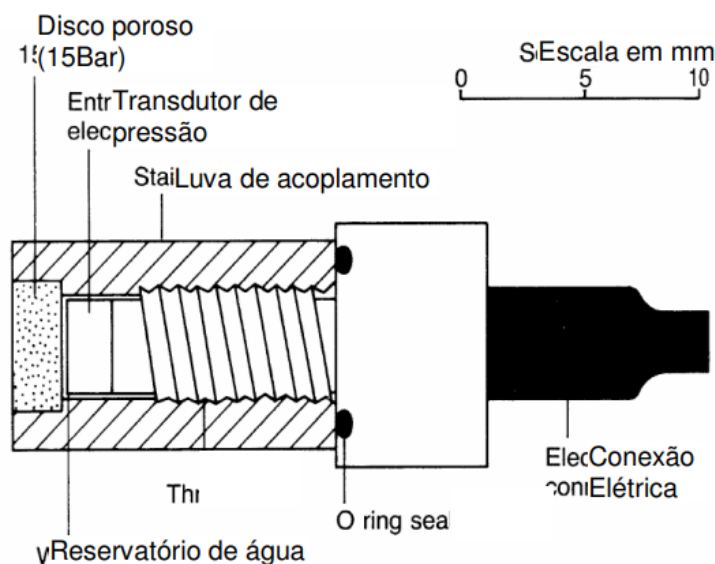
### 2.2.3 Tensiômetro de Alta Capacidade

Devido a baixa capacidade de tensiômetros convencionais em medir sucções elevadas houve a necessidade de elaborar um tensiômetro capaz de mensurar esses valores de sucção.

Ridley e Burland (1993) apresentaram um modelo de tensiômetro capaz de medições de valores de sucção de até 1500 kPa utilizando um transdutor de poropressão miniatura em aço inox envolto por um revestimento também de aço inox, com uma pedra porosa de alta entrada de ar (1500kPa) e um reservatório de água livre entre esta pedra e o transdutor de aproximadamente 3mm<sup>3</sup>.

A saturação da pedra porosa é feita com o uso de uma bomba de água de alta pressão como mostrada na Figura 4. A medição é realizada colocando o instrumento em um buraco, no centro de uma placa horizontal, com a pedra porosa um pouco saliente na parte superior. A amostra é colocada sobre a placa horizontal e o contato é mantido pelo uso de uma mola inserida atrás do instrumento.

Figura 4 - Tensiômetro de alta capacidade

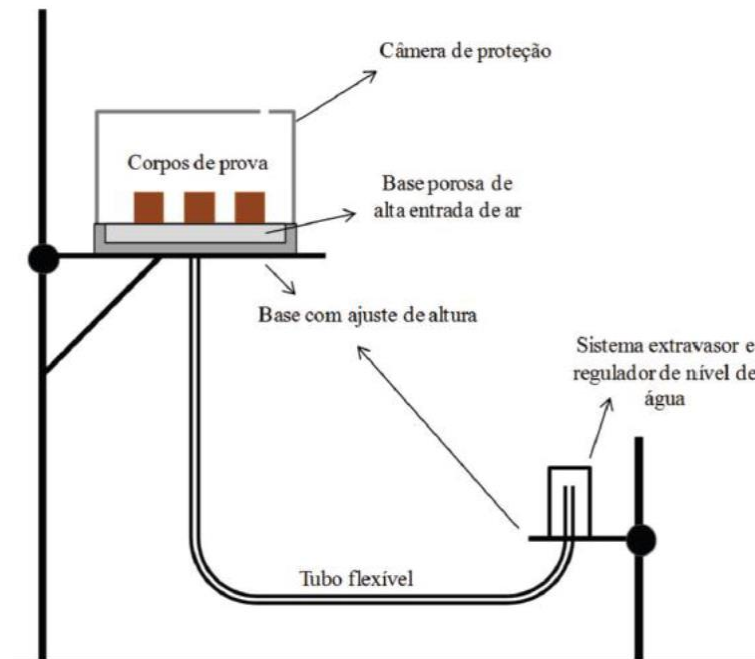


Fonte: Ridley e Burland (1993)

#### 2.2.4 Placa de Sucção

O equipamento consiste em uma câmara hermeticamente fechada que contém em seu interior uma placa porosa. A câmara possui um tubo que permite aplicação de pressão de ar em seu interior e um sistema extravasor de água com regulador, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Placa de Sucção



Fonte: Marinho, Soto e Gitirana Junior (2015).

Para realização do ensaio é necessário saturar a placa porosa já que nesse ensaio as amostras estão em estado seco. O tubo flexível deve ser ligado a base onde estarão os corpos de prova e ao regulador, essas amostras são colocadas em contato com a pedra porosa para realizar a saturação que leva de 24h a 36h, assim que o sistema atingir o equilíbrio as amostras são retiradas do sistema e são pesadas para aferir suas umidades. Essa metodologia possui algumas limitações como a limitação da sucção que pode ser medida (até 40 kPa), o ensaio é demorado e quaisquer variações no sistema falseiam os seus resultados.

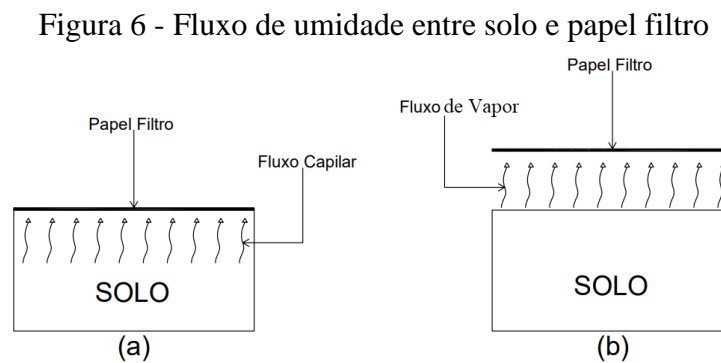
### 2.2.5 Método do Papel Filtro

A técnica do papel de filtro consiste em obter o teor de água de equilíbrio de um papel de filtro (material poroso) que está em contato direto com uma amostra de solo ou dentro de um recipiente hermético junto com a amostra, mas não em contato direto com ela. Após a determinação do teor final de água do papel filtro, estima-se a sucção no solo a partir de uma curva de calibração previamente estabelecida relacionando o teor de água do papel filtro e a sucção. As curvas de calibração são usadas rotineiramente para estimativa de sucção indireta a partir de medições de conteúdo de água em papel de filtro.

Assim, entende-se que o método do papel filtro é um método indireto, ou seja, utiliza da sucção do papel filtro para medir o valor de sucção para um determinado solo, atualmente,

é uma das principais formas de obter a sucção de solos já que se trata de uma metodologia simples, de baixo custo e permite bons resultados, e técnica é padronizada pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D5298-16.

A Figura 6, a seguir, ilustra o fluxo de água entre o solo e o papel-filtro. Uma vez que o método consiste em provocar uma transferência da água do solo para um material poroso até que o equilíbrio seja alcançado, nesse estado, os potenciais matriciais de sucção da água no solo e no material poroso serão iguais, apesar de terem teores umidades diferentes. O equilíbrio se dá através do fluxo de umidade entre o papel e o solo, que pode ocorrer do fluxo capilar ou de vapor.



Fonte: Autoria própria baseado em Marinho (1994).

O fluxo capilar ocorre quando o papel filtro está diretamente em contato com a amostra de solo, assim, a água é transferida para o meio poroso através da capilaridade, o valor medido nesse processo é a sucção matricial (Figura 6a). No fluxo de vapor as moléculas de água saem dos poros do solo pela superação de forças capilares e osmóticas, para que isso ocorra é necessário ter um espaço entre a amostra de solo e o papel filtro, nesse caso, o valor medido é de sucção total (Figura 6b).

Para Houston *et al.* (1994), a sucção mátrica apresenta melhores valores em relação a sucção total quando se utiliza o método do papel filtro para valores baixos de sucção. Quando se opta por utilizar a medição da sucção matricial recomenda-se não colocar o papel filtro diretamente em contato com a amostra, mas colocar uma camada de filtro intermediária para evitar que o filtro fique aderido no solo.

Durante a execução do ensaio são necessários alguns cuidados como selar corretamente as amostras com papel filme PVC e papel alumínio para evitar perdas de umidade do material para o meio externo, o local em que for armazenado as amostras tem que ter baixas variações de temperatura. O tempo de equilíbrio é outro fator importante no ensaio,

a ASTM D5298-16 sugere um tempo mínimo de 7 dias, entretanto, diversos autores citam que maiores períodos de equilíbrio resultam em resultados mais refinados, principalmente para potenciais de sucção muito baixos (Fawcett & Collis-George, 1967).

A chave para o sucesso do ensaio do papel filtro depende da escolha da equação da curva de calibração a ser utilizada para estimar indiretamente os valores de sucção. Diversos autores já descreveram diversas curvas de calibração próprias para o papel filtro Whatman nº 42 baseado em diferentes técnicas experimentais e modelos matemáticos. Tabela 2, a seguir, mostra algumas equações utilizadas para calibração do papel filtro do tipo Whatman nº 42.

Tabela 2 - Equações de Calibração

<b>Modelo</b>	<b>Equação</b>	<b>Intervalo (%)</b>
ASTM D5298-16	$\log(s)=5,327 -0,0779wf$	wf <45.3
	$\log(s)=2,412 -0,0135wf$	wf >45.3
Chandler <i>et al.</i> (1992)	$\log(s)=4,842-0,0622wf$	wf <47
	$\log(s)=6,050-2,48 \log wf$	wf >47
Marinho e Oliveira (2006)	$\log (s)= 4,83-0,0839wf$	wf <33
	$\log (s)= 2,57-0,0154wf$	Wf >33

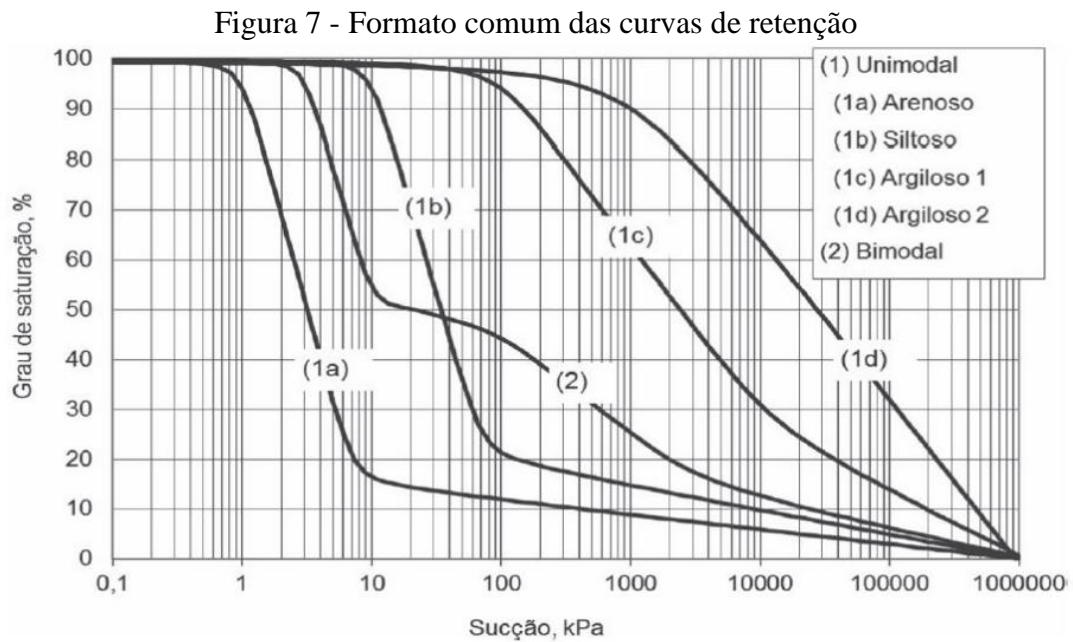
Fonte: Autoria própria (2022).

### 2.3 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A componente sucção pode ser relacionada em função da saturação do solo, do teor de umidade volumétrica ou do teor de umidade gravimétrico do solo. A esta relação dá-se o nome de Curva Característica da Umidade do solo, ou Curva de Retenção de água no solo. As curvas de retenção representadas como a relação entre sucção (kPa) versus o teor de umidade gravimétrico (g/g) são mais sugeridas para aplicação de problemas geotécnicos relacionado à ruptura, já as curvas representadas como a relação entre sucção (kPa) versus o teor de umidade volumétrico ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) é mais sugerido para aplicação de problemas geotécnicos envolvendo deformação.

A curva de retenção de água no solo é a representação gráfica da relação entre o potencial mátrico da água no solo (sucção) com a quantidade de água presente no solo essa curva característica é amplamente utilizada por vários autores para estimar características do solo. A forma da curva é influenciada por diversos fatores como, tipo de solo, teor de umidade inicial do solo, índice de vazios, métodos de compactação (Vanapalli *et al.*, 1999). O formato

da curva de retenção pode ser definido de acordo com o arranjo e distribuição dos poros no material em dois tipos: unimodal e bimodal (Figura 6).

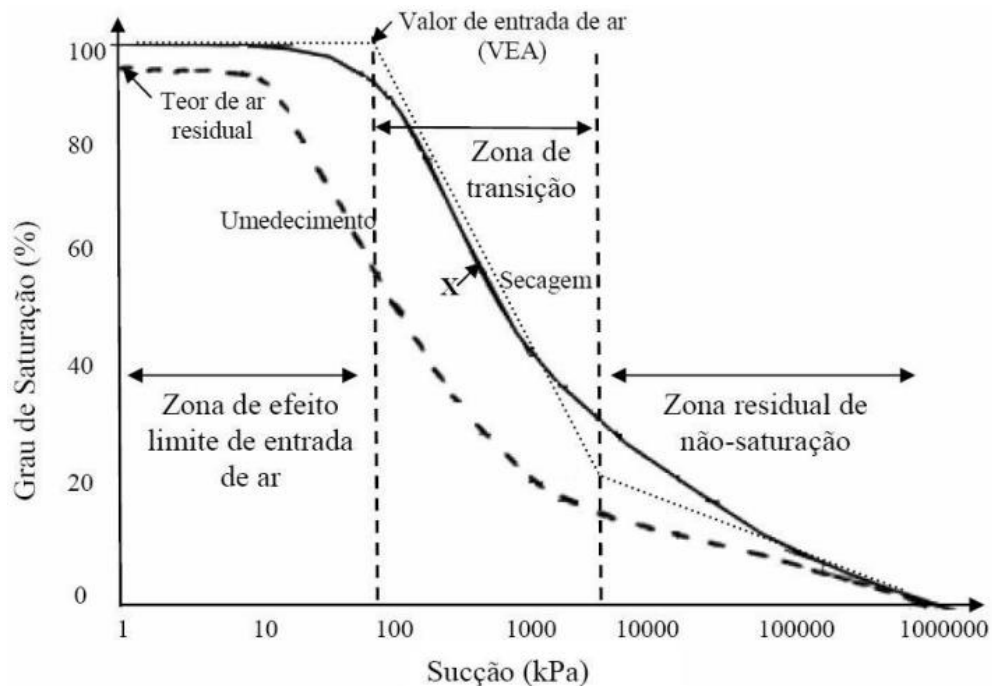


Fonte: Carvalho *et. al.* (2015).

A curva unimodal é caracterizada por possuir três zonas: saturada, desaturação e residual como é mostrada na Figura 7. A zona saturada é região em que todos os poros do material se encontram preenchidos por água, ou seja, em condição saturada, esses trechos se estendem até ao valor de sucção (valor de entrada de ar) que representa a máxima sucção que os maiores poros do material são capazes de suportar sem serem drenados. A zona de desaturação apresenta uma diminuição no teor de umidade com um aumento da sucção, nessa fase, a água presente do solo se encontra numa condição relativamente livre nos poros. Na zona residual a água líquida armazenada nos poros se encontra menos livre o que favorece o fluxo de vapor de água, assim, pequenas variações no teor da umidade implicam em um grande aumento na sucção.



Figura 8 – Zonas de uma curva unimodal



Fonte: Vanapalli *et al.* (1999).

As curvas com o formato bimodal têm como principal característica apresentarem dois trechos de desaturação, além disso, elas também apresentam dois valores de entrada de ar, o primeiro corresponde uma família de poros maiores, enquanto o segundo representa uma família de poros menores (Carvalho *et al.*, 2015). Solos com essa curva característica possuem processos de formação que favorecem uma organização granulométrica descontínua, processo de intemperismo ou solos compactados com baixa energia.

### 2.3.1 Ajuste na Curva de Retenção

Para determinação da curva de retenção de água no solo é necessário utilizar algumas equações encontradas na literatura capazes de relacionar os valores de sucção do solo com as características do solo como o teor de umidade do solo. A Tabela 3, a seguir, apresenta um resumo com as principais equações de ajuste proposta por diversos autores encontrados nos estudos de solos não saturados.

Tabela 3 - Equações de ajuste

<b>Autor</b>	<b>Equação</b>	<b>Parâmetros</b>
Gardner (1956)	$\theta = \frac{\theta_r + \theta_s}{1 + q\Psi^\eta}$	$\theta$ = Teor de Umidade Volumétrica (%); $\Psi$ = Sucção Total (kPa); $\theta_r$ = Teor de Umidade Residual (%); $\theta_s$ = Teor de Umidade Saturadas (%); $\eta$ e $q$ = Parâmetros de Ajuste.
Visser (1966)	$\psi = a(\theta_s - \theta)^b / \theta^c$	$a$ $b$ e $c$ = Parâmetros de Ajuste.
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = C_\psi \frac{\theta_s}{[\ln[e + (\psi/a)^n]]^m}$ $C_\psi = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + \psi_o/\psi_r)}$	$a$ , $m$ e $n$ = Parâmetros de Ajuste; $e$ = Base Log Neperiano; $\Psi_r$ = Sucção Residual (kPa); $\Psi_o$ = Sucção Saturada (kPa).
Mualem (1976)-Van Geuchten (1980)	$\theta = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n} \right]^m$	$\alpha$ , $m$ e $n$ = parâmetros de ajuste.

Fonte: Adaptado de Carvalho *et. al.* (2015).

Quanto maior o número de parâmetros analisados, melhor ajuste obtido para curva, entretanto, a equação se torna mais complexa. A equação de Mualem (1976)-Van Genuchten (1980) é a função mais utilizada para o ajuste de curvas de retenção, pois permite a utilização em conjunto com um método analítico de previsão de permeabilidade não saturada, proposto pelo mesmo autor, por isso, para o trabalho atual foi escolhida a mesma equação de ajuste.

## 2.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO

A condutividade hidráulica é a propriedade de solos que medem a facilidade que a água movimentada em seu interior. À medida que a quantidade de água no interior do solo decresce maior é a dificuldade para a passagem de água por entre suas partículas, ou seja, a permeabilidade de solos não saturados é menor que em solos saturados, por isso, em mecânica de solos não saturados é importante conhecer o comportamento do fluxo hidráulico do solo mediante a sua variação de umidade.

A condutividade hidráulica do solo saturado descreve a funcionalidade de seu sistema poroso, englobando propriedades relacionadas com a sua porosidade, como quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros (GONÇALVES E LIBARDI, 2013). Em solos saturados a condutividade hidráulica está mais associada da estrutura do solo

do que sua textura, por isso, ao elevar o grau de agregação de um solo o valor de condutividade hidráulica aumenta.

Richards (1931) foi o primeiro a apresentar um método de determinação da condutividade hidráulica de solo não saturado através da combinação da equação de Darcy-Buckingham com a equação de continuidade. A maior diferença entre o comportamento hidráulico em meios saturado e não saturado segundo Hillel (1971) é a condutividade hidráulica.

Em estado saturado, todos os poros estão preenchidos e conduzindo água, sendo sua condutividade máxima nessa condição, já em estado não saturado, devido à presença de ar no meio poroso a sua condutividade descrece rapidamente. Independente da condição de saturação do solo, a maior dificuldade nos estudos de fluxos de água no solo está na determinação de sua função de condutividade hidráulica.

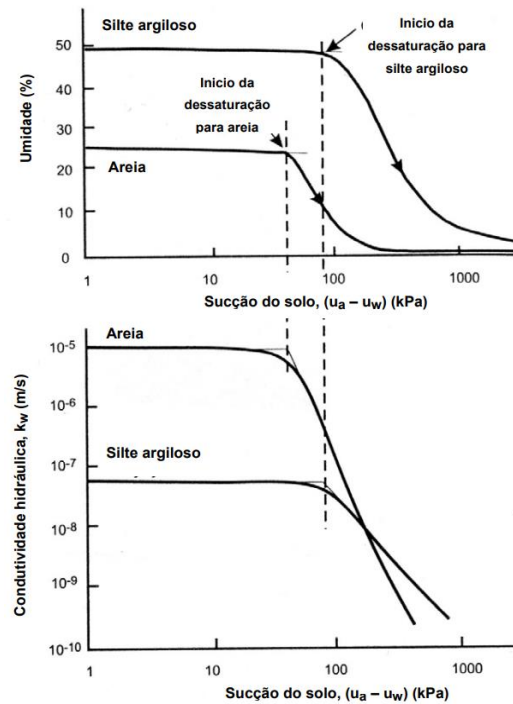
## **2.5 FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO**

As curvas de retenção de água no solo não apenas fornecem as características do solo, mas também possibilita compreender o seu comportamento físico-hídrico através da relação entre a sua umidade volumétrica e sua sucção. Em estudos de fluxo de fluídos em solos utilizam-se os conceitos propostos pela equação de Darcy (1856) que observou que as propriedades hidráulicas do solo poderiam ser representadas através de um coeficiente de permeabilidade, tais conceitos foram passados para mecânica de solos não saturados e o coeficiente de permeabilidade passou a ser em função do teor de umidade do solo e sucção (BUCKINGHAM, 1907). Não há padronização na apresentação das curvas de condutividade hidráulica, normalmente, representa-se a condutividade hidráulica em função sucção matricial, grau de saturação ou umidade volumétrica (LU E LIKOS, 2004).

Na

Figura 9 tem-se a comparação das curvas de um solo arenoso e silte argiloso, observa-se que para qualquer solo a condutividade hidráulica permanece quase constante até ao valor da entrada de ar, a partir desse ponto ela desce rapidamente. Inicialmente a taxa de condutividade hidráulica do solo arenoso é maior que o solo silte argiloso, entretanto, após o valor da entrada de ar o ritmo em que a condutividade do solo arenoso decresce é muito maior (cerca de  $10^3$  vezes) que o solo silte argiloso, de modo que em valores maiores de sucção a condição inicial se inverta.

Figura 9 - Correlação entre a curva de retenção e condutividade hidráulica



Fonte: Fredlund *et al.* (1997).

A determinação da função de condutividade hidráulica pode ser realizada através de métodos indiretos ou diretos, os métodos diretos envolvem ensaios em laboratório utilizando amostras indeformadas de boa qualidade, até mesmo micro fissuras pode falsear o resultado (GONÇALVES, 2012). Devido a essa dificuldade em realizar ensaios de laboratório, autores têm focado em pesquisas que relacionem a condutividade hidráulica com a curva de retenção através de equações como demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Equações para curva de condutividade hidráulica

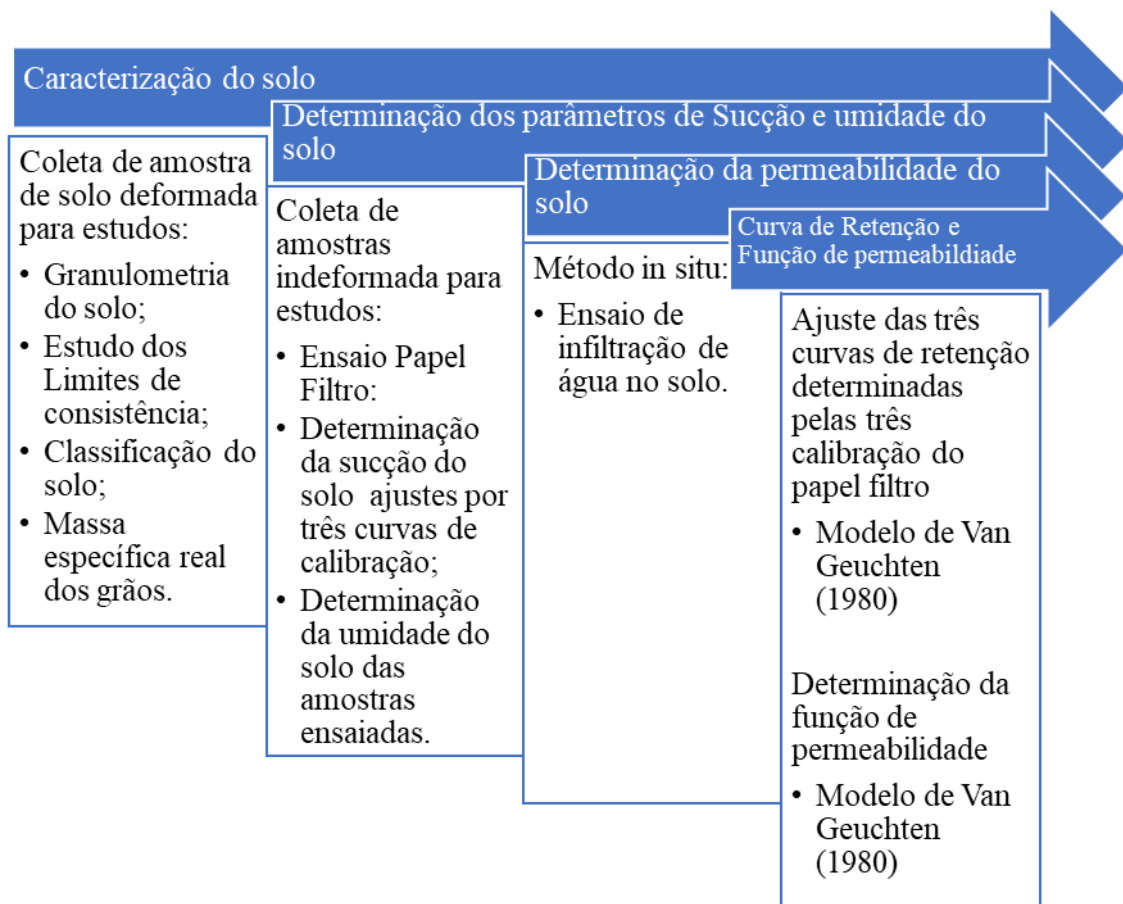
Autor	Equação	Parâmetro
Gardner (1958)	$k = \frac{k_{sat}}{1 + a \left( \frac{\Psi}{\rho_w g} \right)^n}$	$\Psi$ = Sucção (kPa); $k_{sat}$ = Coeficiente de Permeabilidade Saturada (cm/s); a e n = Parâmetros de Ajuste; $\rho_w$ = Densidade da Água (g/cm <sup>3</sup> ); g = Aceleração Gravitacional (m/s <sup>2</sup> ).
Campbell (1974)	$k = k_{sat} \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2\beta+3}$	$\theta_s$ = Teor de Umidade Saturado (%); $\theta$ = Teor de Umidade Volumétrico (%); $\beta$ = Parâmetro de Ajuste.
Van Genuchten (1980)	$k = k_{sat} S^l \left[ 1 - \left( 1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2,$ $S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	S = Grau de Saturação; l = 0,5; m = Parâmetro de Ajuste; $\theta_r$ = Teor de Umidade Residual (%).

Fonte: Autoria própria baseado em Gonçalves (2012).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrito o processo metodológico seguido neste estudo. Assim será apresentada a área de coletada do solo estudado e a metodologias necessárias para obtenção das curvas de retenção de água no solo e função de permeabilidade do solo, para isso foi seguido alguns passos necessários e descritos no fluxograma apresentado na Figura 10, a seguir.

Figura 10 – Etapas da metodologia



Fonte: Autoria própria (2022).

Ressalta-se que a primeira etapa metodológica dessa pesquisa, ou seja, a etapa de caracterização do solo, não foi necessária realizar por este autor. Visto que, a área de estudo já possui diversas pesquisas realizadas que consta tal caracterização.

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo escolhida foi na estação experimental no Campus de Palmas da Universidade Federal do Tocantins (Figura 11), localizada na Avenida NS 15, ALCNO 14, 109 Norte, Palmas-TO nas coordenadas  $10^{\circ}10'46''\text{S}$ ,  $48^{\circ}21'46''\text{W}$  próximo à saída de Palmas em direção à Paraíso.

Figura 11 – Área de Estudo



Fonte: Google Earth (2022).

#### 3.1.1 Caracterização do solo

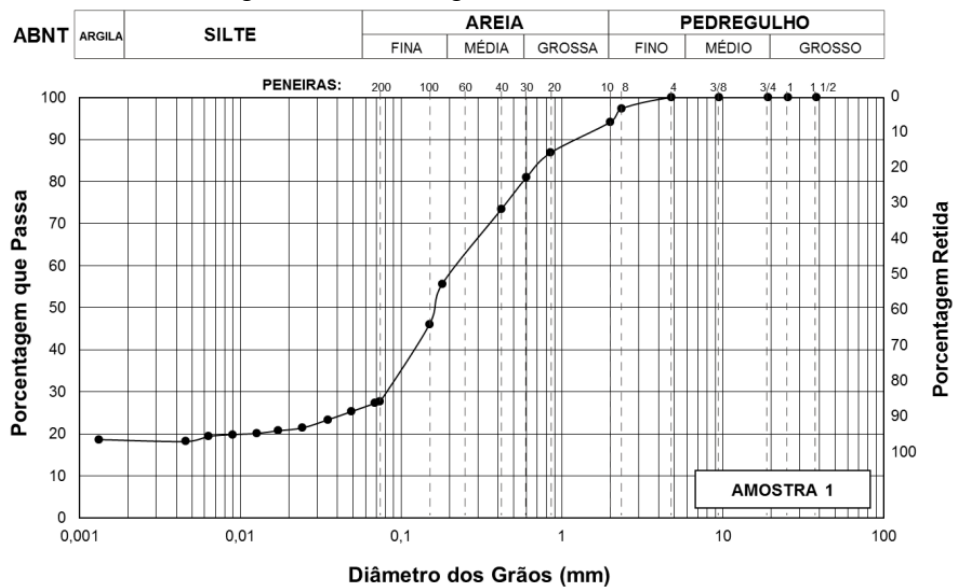
Para realização desta pesquisa foi utilizado o mesmo solo ensaiado por Castro (2015). Foi utilizado a sua caracterização do solo: granulometria e curva granulométrica (NBR 7181:1984), limites de plasticidade (NBR 7180:1984) e liquidez (NBR 6459:1984). A Figura 12, a seguir apresenta a curva granulométrica do solo obtida pelo autor. Já na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentada a sua caracterização.

Tabela 5 – Caracterização do solo

<b>Composição Granulométrica</b>		
Argila (%)	18,50	
Silte (%)	8,00	
Areia (%)	Fina	34,70
	Média	19,80
	Grossa	13,20
Pedregulho (%)	5,80	
<b>Consistência do Solo</b>		
Limite de Liquidez (%)	18,15	
Limite de Plasticidade (%)	12,15	
Índice de Plasticidade (%)	6,00	

Fonte: Castro (2015).

Figura 12 - Curva granulométrica do solo



Fonte: Castro (2015).

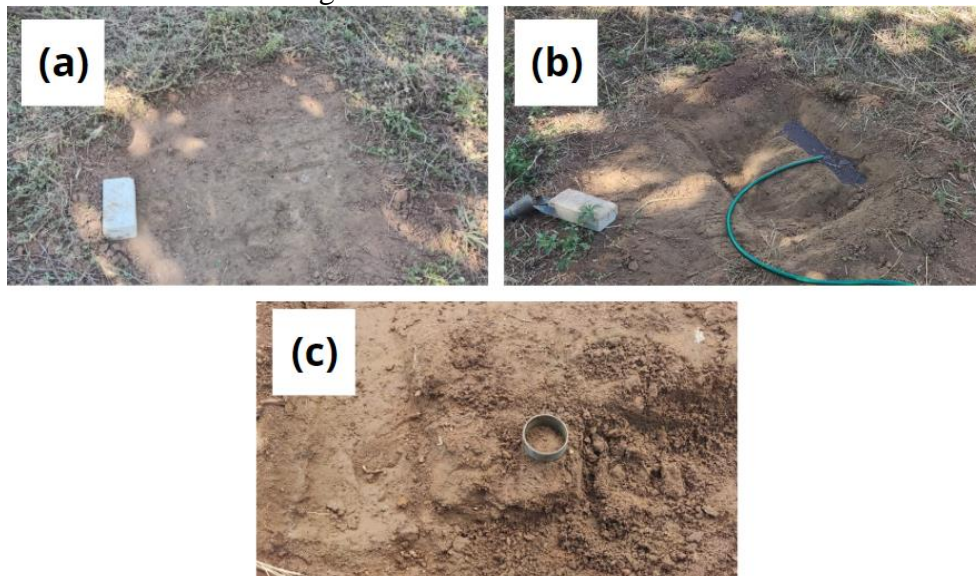
De acordo com os índices de consistência do solo obtido por Castro (2015) é possível classificar o solo como fracamente plástico conforme a classificação de Caputo (1998). O solo em estudo é classificado de acordo com o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS) como SM-SC, ou seja, um solo do tipo Areia Argilo Siltosa. A classificação tátil

visual classificou o solo como uma areia argilo siltosa de coloração amarela o que é compatível com os dados encontrados na composição do solo.

### 3.1.2 Coleta de amostras indeformadas do solo

Para realização dos ensaios foram utilizadas amostras indeformadas retiradas a 10 cm abaixo da superfície do solo na área de estudo, para isso foi feita uma limpeza objetivando a retirada de material orgânico como folhas e raízes (Figura 13a). Para coletar as amostras indeformadas foi utilizado um amostrador em anel de 47 mm de diâmetro (Figura 13c) no primeiro momento a coleta não foi possível devido a condição de baixa umidade no solo, para facilitar a coleta foi feito um umedecimento prévio do solo (30 minutos) com auxílio de uma mangueira (Figura 1b) com função de facilitar a cravação dos anéis no solo.

Figura 13 - Coleta das amostras



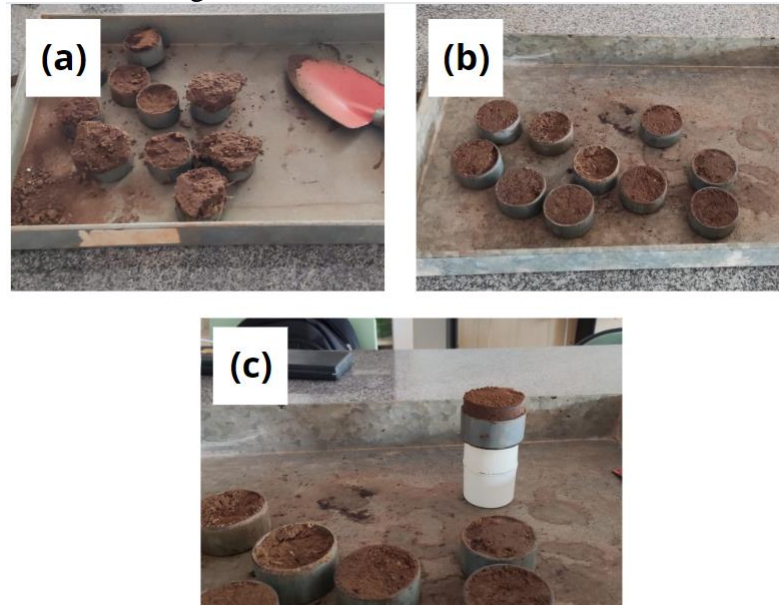
\*(a): Limpeza da área; (b): Umedecimento do solo; (c): Cravação dos corpos de provas.

Fonte: Autoria própria (2022).

As amostras de solo foram levadas para o laboratório para ser desbastada para se ter uma superfície de contato uniforme (Figura 14b), em seguida os corpos de prova foram retirados do anel e com auxílio de um paquímetro de 0,05 mm de precisão suas dimensões (diâmetro e altura) foram mesuradas, no final, foi totalizado seis amostras para realização do ensaio (Figura 14c).



Figura 14 - Amostras em laboratório



\*(a): Amostra indeformadas; (b): Amostras desbastadas; (c): Amostras retiradas do anel.

Fonte: Autoria própria (2022).

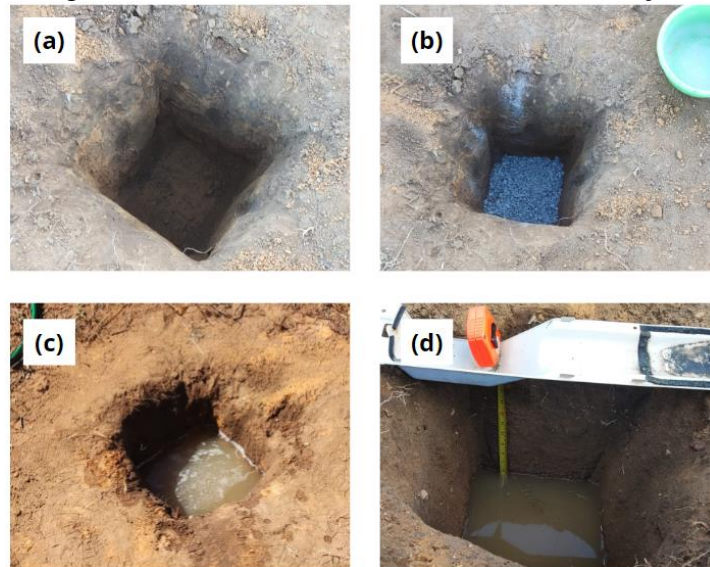
Para a montagem da curva de retenção é necessário que os pontos estejam em valores distintos de umidade, para isso, os corpos de provas sofreram ciclo de secagem e umedecimento divididos em: duas amostras com umidade retirada em campo; duas amostras; uma amostra que passou por uma secagem ao ar livre por 24h; três amostras que sofreram uma saturação em pedra porosa durante 10 min.

### 3.1.3 Ensaio de infiltração de água no solo

Para o cálculo da função de condutividade hidráulica do solo é necessário conhecer o valor do coeficiente de permeabilidade saturado para o solo estudado. Portanto, foi necessário a realização do ensaio de infiltração seguindo os procedimentos da ABNT NBR 7229:1993, para isso, foi realizada uma limpeza da área de estudo para então realizar uma escavação de uma cava quadrada de 30 cm x 30 cm com uma profundidade de 55 cm (Figura 15a) e o fundo da cava foi colocada uma camada de 5 cm de brita #1 (Figura 15b). Com a cava concluída foi feita uma saturação de 5h para avaliação da infiltração no estado do solo saturado que consiste no pior cenário para obras de engenharia (Figura 15c). Com a saturação concluída iniciou-se o ensaio com preenchimento de uma lâmina d'água de 15 cm na cava (Figura 15d), então mediu-se o tempo necessário para lâmina descer 1 cm, o ensaio é concluído após 5 medições

adotando o valor da última medição para o cálculo do coeficiente de infiltração do solo (Equação 2).

Figura 15 - Procedimentos do ensaio de infiltração



\*(a): Cava; (b): Fundo com brita (c): Saturação; (d): Ensaio.

Fonte: Autoria própria (2022).

$$C_i = \frac{490}{t + 2,5}$$

Equação 2

Onde,

$C_i$  = coeficiente de infiltração do solo ( $l/m^2 \cdot dia$ );

$t$  = tempo para o rebaixamento da lâmina d'água (min).

### 3.2 ENSAIO DO PAPEL FILTRO

As curvas características do solo foram obtidas seguindo os procedimentos descritos na ASTM D5298-16 para o ensaio utilizando o papel filtro. Esta técnica consiste no equilíbrio entre o solo com uma umidade específica e o papel filtro Whatman nº 42 (Figura 16), devido ao filtro de papel ter uma umidade menor que o solo a água é transferido por capilaridade até que o sistema solo+filtro atinja o equilíbrio.

Figura 16 - Papel Filtro Whatman nº 42

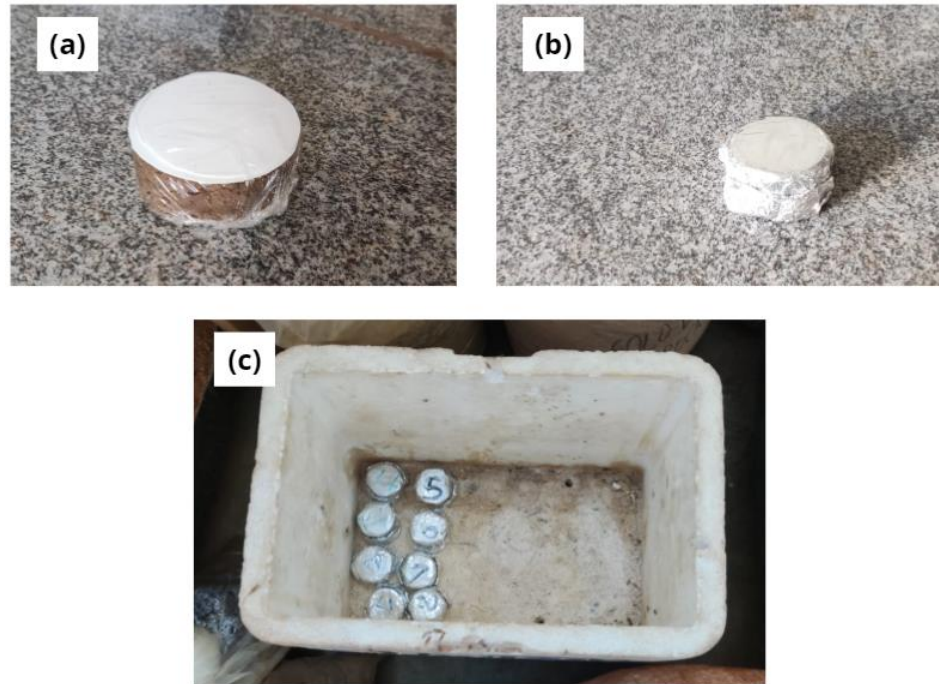


Fonte: Autoria própria (2022).

Cada corpo de prova necessita de dois papéis filtros para realizar o ensaio, um papel filtro é recortado para ter o mesmo diâmetro da amostra e será colocado em contato direto com o solo, esse papel filtro não será pesado para fins de cálculo da sucção, sua utilidade é evitar o contato direto entre o solo e o papel filtro colocado acima que será pesado para o cálculo da sucção, ele foi cortado possuindo um diâmetro menor da amostra de solo (2 mm menor) para facilitar a sua retirada após o tempo de equilíbrio.

Os filtros foram colocados em contato com as amostras e envolvidas com papel filme PVC (Figura 17a) e posteriormente com papel alumínio para manter as características de umidade dos corpos de prova (Figura 17b). As amostras foram então devidamente identificadas e condicionadas em uma caixa térmica em condições de temperatura constante (Figura 17c). Para que o equilíbrio entre o papel filtro e o solo fosse alcançado as amostras permaneceram condicionados na caixa térmica durante um período de 7 dias como recomenda as principais bibliografias estudadas.

Figura 17 – Montagem dos corpos de prova



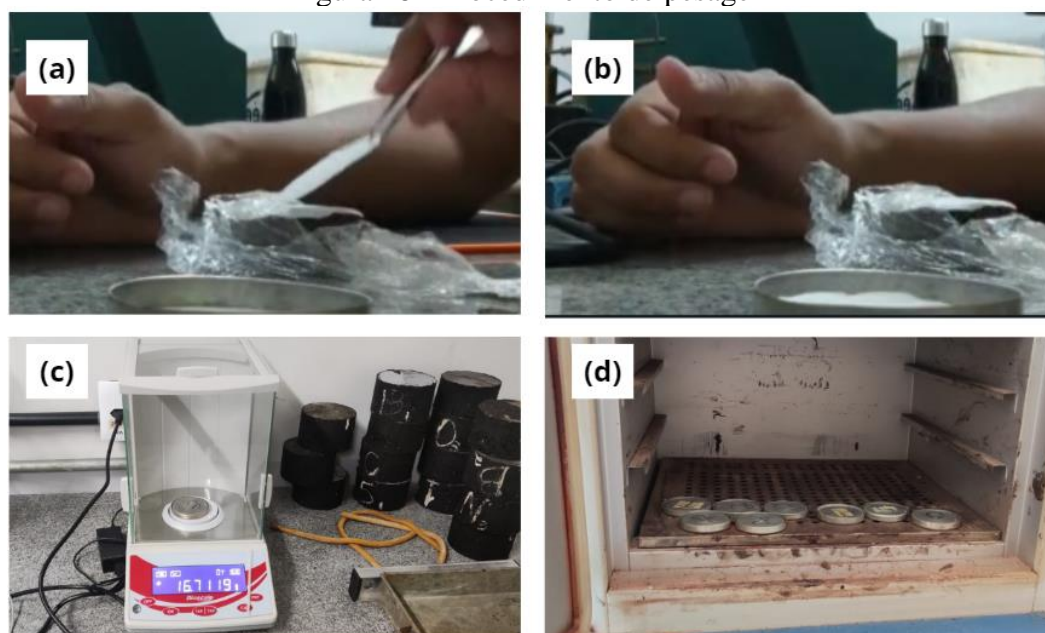
\*(a): Amostra com papel filme PVC; (b): Amostra com papel alumínio; (c): Condicionamento das amostras.

Fonte: Autoria própria (2022).

Ao fim do período de equilíbrio os pacotes com os corpos de prova com os filtros foram abertos e com auxílio de uma pinça os papéis filtros foram removidos da amostra (Figura 18a) e alocados em recipientes metálicos de massa conhecida (Figura 18b) para pesagem em uma balança de precisão de 0,0001 mm (Figura 18c). Após a pesagem procedeu a limpeza da estufa para garantir que impurezas não contaminassem os papéis.

Os papéis foram então colocadas na estufa numa temperatura média de 107 °C durante 24 horas para secagem dos papéis filtros para posterior pesagem (Figura 18d). As amostras de solo também foram colocadas em estufa juntamente com os papéis filtros para secagem e após secas elas foram pesadas para determinar a umidade dos corpos de provas.

Figura 18 - Procedimento de pesagem



\*(a): Manipulação do papel filtro; (b): Papel filtro alocado em recipiente metálico; (c): Pesagem da massa úmida; (d): Secagem na estufa.

Fonte: Autoria própria (2022).

Após a secagem em estufa as amostras foram retiradas para pesagem em balança de precisão para mensurar a umidade dos papéis filtros, a pesagem dos papéis filtros requer muita agilidade e precisão para que o ambiente não interferisse na umidade do filtro a recomendação da ASTM sugere que o procedimento de retirada o papel filtro do recipiente para a balança deve ser realizado em menos de 5 segundos, assim tal recomendação foi realizada para a pesagem dos papéis filtros seco. Com os valores de massa seca e úmida dos papéis filtros foi possível calcular as suas umidades.

### 3.3 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Com os valores de umidades do papel filtro é possível utilizar as equações de calibração propostas nessa monografia: Chandler *et al.* (1992), ASTM D5298-16 (2017) e Marinho e Oliveira (2006). A partir dessas equações foi calculado o valor de sucção dos papéis filtro, e conforme o princípio de equilíbrio das amostras é a mesma sucção dos corpos de provas.

Com os valores de sucção e umidade do solo é possível utilizar o ajuste de Mualem (1976)-Van Geuchten (1980) para modelar a curva de retenção. O ajuste proposto necessita de parâmetros ( $\alpha$ ,  $n$  e  $m$ ) para o seu cálculo, esses parâmetros foram definidos através de

regressão linear utilizando o *software* Excel de modo a curva de retenção obtivesse um melhor coeficiente de determinação ( $R^2$  próximo de 1). Além dos parâmetros citados anteriormente para modelar a curva é necessário calcular os valores de umidade saturada ( $\theta_s$ ) e umidade residual ( $\theta_r$ ), para fins de dimensionamento, o valor de  $\theta_s$  é numericamente igual ao valor da porosidade do solo ( $n$ ) e a valor de  $\theta_r$  é considerado como 0, pois, em curvas de retenção valores muitos altos de sucção tendem a valores extremamente baixos de umidade.

### **3.4 FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA**

Após a modelagem da curva de retenção é possível utilizar os valores de umidade volumétrica da curva e associar com o valor de permeabilidade do saturada do solo através da equação propostas por van Genuchten (1980) para modelar a curva da função de condutividade hidráulica, além dos valores de umidade é necessário também utilizar o parâmetro  $m$  da curva de retenção na equação da função hidráulica.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão descritos os resultados do ensaio de infiltração do solo, umidade dos corpos de prova, sucção do papel filtro, curva de retenção de água no solo e a função de permeabilidade do solo.

### 4.1 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DO SOLO

O ensaio de infiltração seguiu rigorosamente os procedimentos da NBR 7229:1993 e os tempos de rebaixamento de 1 cm de lâmina de água estão representados na Tabela 6.

Tabela 6 - Ensaio de infiltração

Medição	Base	1	2	3	4	5
Tempo	2 min. 56 seg.	3 min. 36 seg.	3 min. 45 seg.	3 min. 31 seg.	3 min. 57 seg.	4 min. 36 seg.
Ci (l/m <sup>2</sup> .dia)	69,014					
k (cm/s)	7,988 x 10 <sup>-5</sup>					

Fonte: Aatoria própria (2022).

O valor da última medição foi inserido na Equação 2 obtendo um valor de coeficiente de infiltração de 69,014 l/m<sup>2</sup>.dia. Esse valor corresponde a um coeficiente de permeabilidade de 7,988 x 10<sup>-5</sup> cm/s, tal valor indica a presença de partículas finas na composição do solo que de fato ocorre como demonstrada na composição granulométrica do solo.

### 4.2 CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVAS

A umidade dos corpos de provas foi determinada seguindo os procedimentos descritos no Anexo A da ABNT NBR 6457:2016 e seus resultados são demonstrados na Tabela 7. Para o solo em estudo foi encontrada os valores de massa específica natural de 1,935 g/cm<sup>3</sup> e de massa específica seca de 1,735 g/cm<sup>3</sup>. O valor de massa específica seca é necessário para o cálculo da umidade volumétrica para a representação da curva de retenção do solo.

Tabela 7 – Caracterização dos corpos de prova

Corpo de Prova	Massa Úmida (g)	Massa Seca (g)	Umidade (%)	Tipo de Secagem/Umidade*
1	65,89	59,45	10,83%	A
2	66,41	59,64	11,35%	A
3	70,89	70,06	1,18%	B
4	75,55	67,42	12,06%	C
5	68,63	58,95	16,42%	C
6	75,63	64,28	17,66%	C

\*A: Amostra com umidade natural; B: Amostra seca ao ar livre durante 24h; C: Amostra saturada durante 10 min em pedra porosa.

Fonte: Autoria própria (2022).

### 4.3 MODELAGEM DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A sucção dos papéis filtros foi mensurada através de três equações de calibração do papel filtro proposta por Chandler *et al.* (1992), ASTM D5298-16 e Marinho e Oliveira (2006), seus resultados estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 - Sucção do papel filtro

Corpo de Prova	Papel Úmido + Tara (g)	Papel Seco + Tara (g)	Tara (g)	Umidade papel (%)	Sucção (kPa) Chandler <i>et al.</i> (1992)	Sucção (kPa) ASTM D5298 – 16 (2017)	Sucção (kPa) Marinho e Oliveira (2006)
6	16,5398	16,2935	16,1242	145,48	4,86	2,81	2,14
5	16,6485	16,4187	16,2538	139,36	5,40	3,39	2,65
4	17,0244	16,8726	16,7040	90,04	15,96	15,72	15,26
2	16,1557	16,0462	15,8891	69,70	30,11	29,58	31,38
1	16,2395	16,1369	15,9775	64,37	36,69	34,92	37,91
3	16,5635	16,5491	16,3959	9,40	18003,32	39335,14	10999,78

Fonte: Autoria própria (2022).

Com os dados da sucção do papel filtro e da umidade dos corpos de prova é possível utilizando o software Excel, realizar o ajuste proposto por Mualem (1976)-Van Genuchten (1980) para a modelagem da curva de retenção de água no solo (Figura 19). A Tabela 9 apresenta os índices físicos necessários para o cálculo dos ajustes e a Tabela 10 os parâmetros encontrados na regressão linear do Excel.



Tabela 9 - Índices físicos

Massa específica dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )	2,689
Massa específica do solo seco (g/cm <sup>3</sup> )	1,735
Índice de Vazios (e)	0,5495
Porosidade (n)	0,3546
Umidade Volumétrica Saturada (%)	35,46
Umidade Volumétrica Residual (%)	0

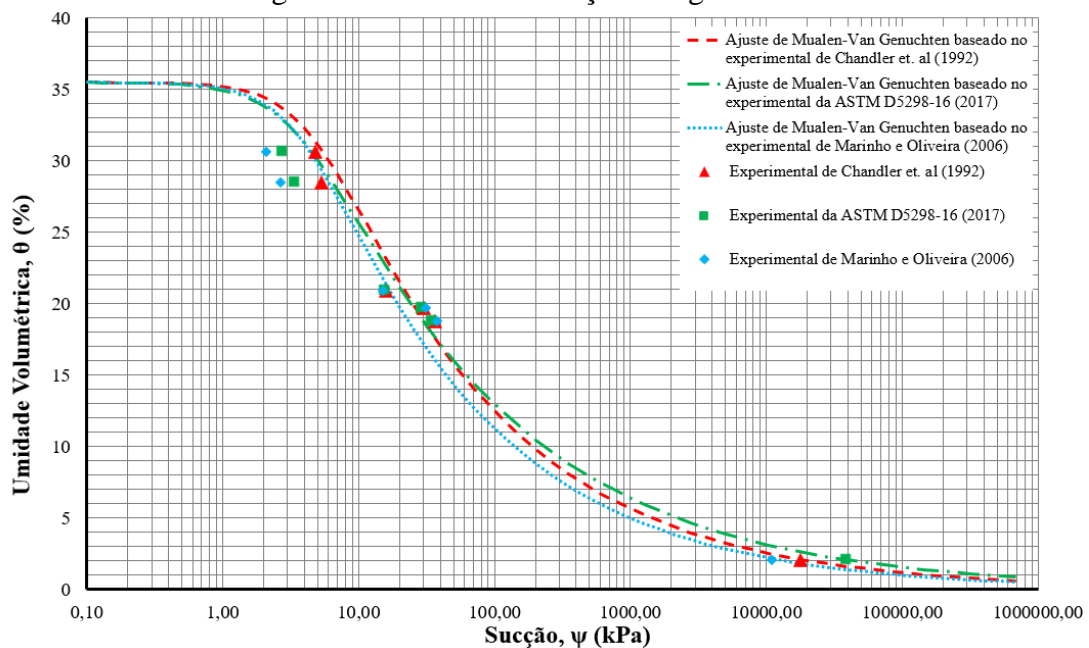
Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 10 - Parâmetros da modelagem de Mualem-Van Genuchten Genuchten

Calibração do papel	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	N	$m = (1-1/n)$	R <sup>2</sup>
Chandler <i>et. al</i> (1992)	0,207	1,929	0,4816	0,9920
ASTM D5298-16 (2017)	0,261	1,786	0,4402	0,9880
Marinho e Oliveira (2006)	0,179	1,978	0,4945	0,9659

Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 19 - Curva de retenção de água no solo



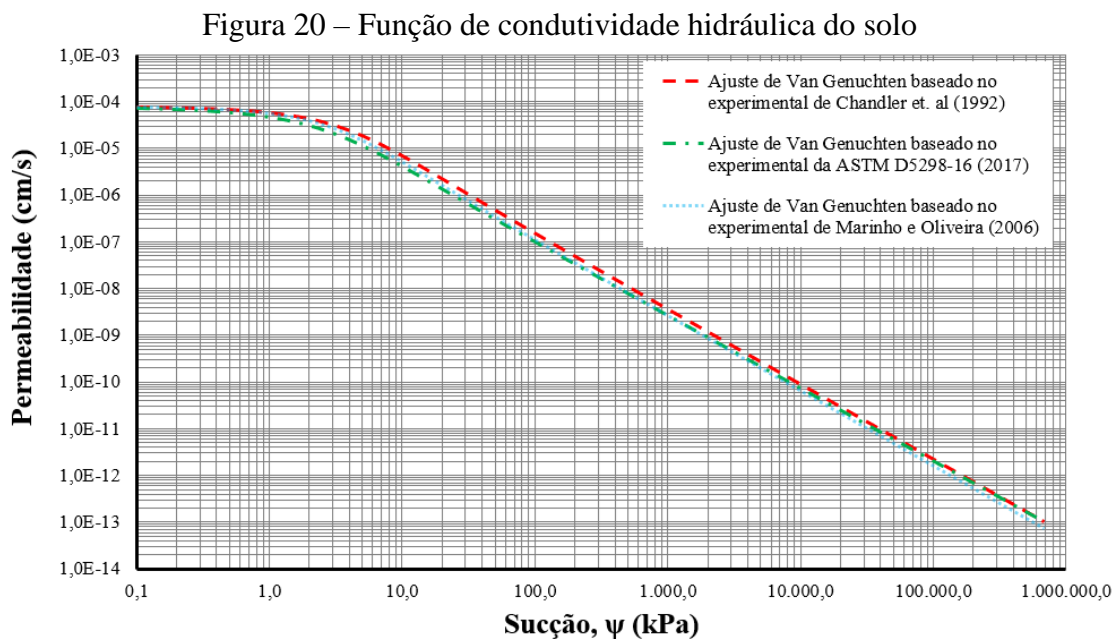
Fonte: Autoria própria (2022).

As curvas modeladas apresentaram um valor de entrada de ar de aproximadamente 3 kPa, o que demonstra a baixa capacidade do solo em manter altos valores de umidade para valores crescente de sucção. Os parâmetros de ajustes obtidos não apresentaram similaridades com o trabalho de Machado (2016) que realizou a modelagem de uma curva de retenção em outra área do município de Palmas-TO, cujo solo foi classificado pela SUCS como um solo do tipo SM-SC (Solo Areno argiloso com IP de aproximadamente 6%), a principal diferença

entre as curvas se dá no limite de entrada de ar aproximadamente 21 kPa para curvas de retenção do solo estudo por Machado (2016), esse resultado distinto pode ser explicado pelo Fenômeno da Histerese, devido o processo de se obter a curva de retenção. No caso de Machado (2016) o processo de obtenção foi por umedecimento, diferente do processo utilizado no presente trabalho o qual aplicou tanto o processo de secagem quanto o processo de umedecimento. Reichardt (1985) *apud* Silva (2005) descreve que cada método para se obter a curva de retenção fornece uma curva contínua, mas em geral, diferente, ou seja, a relação entre a sucção matricial e a umidade não é unívoca.

#### 4.4 MODELAGEM DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO

Associando os valores de sucção e umidade volumétrica obtidos na modelagem da curva de retenção e o parâmetro  $m$ , com o valor da condutividade hidráulica do solo saturado ( $7,99 \times 10^{-5}$  cm/s), foi possível modelar a função hidráulica do solo utilizando a equação de Van Genuchten (1980) conforme mostrado na Figura 20.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para a modelagem da curva as três calibrações apresentaram resultados próximos modelando uma curva com formato característico de solos arenosos, possuindo uma pequena faixa onde a variação da sucção não influencia de maneira expressiva a condutividade hidráulica, mas que após o solo atinge valores de sucção maiores que 1 kPa a condutividade decresce de maneira rápida.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como proposta a realização de um estudo sobre o comportamento hidráulico de um solo não saturado coletado em Palmas-TO através da análise das curvas de retenção de água no solo e da função de condutividade hidráulica. Com base nos dados de granulometria é possível verificar a concentração de partículas arenosas com a presença de alguns finos plásticos, as curvas encontradas nesse trabalho conseguiram mensurar as características desse solo.

O método do papel filtro apresentou bons resultados considerando o tempo para o equilíbrio entre as amostras e o papel filtro foi o mínimo recomendado pela ASTM D5298-16 (7 dias). As três metodologias para a calibração do papel filtro apresentaram resultados com alto coeficiente de determinação ( $R^2$ ), sendo a equação proposta por Chandler *et al.* (1992) apresentou melhor ajuste na curva de retenção. A curva encontrada nesse trabalho não possui parâmetros semelhantes ao encontrado por Machado (2016) o que indica uma necessidade de mais estudos envolvendo solos não saturados em Palmas-TO

A função de condutividade hidráulica foi obtida com a relação da curva de retenção com a permeabilidade saturada do solo. A permeabilidade do solo apresentou um valor esperado para um solo arenoso com um coeficiente de permeabilidade alto (na casa de  $10^{-5}$  cm/s), tal resultado foi confirmado com a modelagem da função de condutividade com uma curva com baixa capacidade de manter valores de permeabilidade constante para uma variação na sucção do solo. Assim, o estudo de solos não saturados apresentou resultados capazes de mensurar as propriedades hidráulicas do solo estudado e contribuir para novos estudos envolvendo solos não saturados para a cidade de Palmas-TO.

## REFERÊNCIAS

- ALONSO, E. E., GENS, A., HIGHT, D. W. **General report, session 5: Special problems soils**. Dublin: Géotechnique, Vol 40, No. 3, p. 405-430, 1987.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. D5298-03: **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. Philadelphia, 2003. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229**: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro, 1993.
- BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**. U.S. Department Agriculture, Bureau of Soils 38, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1907.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Ed. 6. Rio de Janeiro: LTC, 1988.
- CARVALHO, J. C., JUNIOR, G. F. N. G., MACHADO, S. L., MASCARENHA, M. M. A., FILHO, F. C. S. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. ISBN 9788567950037.
- CASTRO, M. H. **Pavimentos permeáveis para drenagem de água e diminuição do escoamento superficial**. Monografia, Curso de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Tocantins, 2015.
- CHANDLER, R. J., CRILLEY, M. S., MONTGOMERY-SMITH, G. **A low-cost method of assessing clay desiccation for lowrise buildings**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Vol. 92, No. 2, p.82-89, 1992.
- CUPERTINO, K. F. **Análise de curvas de calibração utilizadas no método do papel filtro para estimar a sucção matricial em solos não saturados**. Dissertação de Mestrado, Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.
- FAWCETT, R.G. & COLLIS-GEORGE, N. **A filter-paper method for determining the moisture characteristics of soil**. Austr. J. Exper. Agric. Anim. Husb., p. 162-167, 1967.
- FREDLUND, D. G., **Appropriate concepts and technology for unsaturated soils**. Canadian Geotechnical Journal. Vol 16, p. 121-139, 1979.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. **Stress State Variables for Unsaturated Soils.** Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 103, No. GT5, p. 447-466, 1977.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soils Mechanics for Unsaturated Soils.** John Wiley and sons, Inc, Hoboken, 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A. **Equations for the soil-water characteristic curve.** Canadian Geotechnical Journal. Vol. 31°, No. 3, p. 521-532, 1994.

GONÇALVES, F. V. **Estudo das curvas de retenção e condutividade hidráulica estimada pela equação de van Genuchten (1980) para diferentes tipos de solo.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.

HOUSTON, S. L.; HOUSTON, W. N.; WAGNER, A.M. **Laboratory Filter Paper Suction Measurements.** Geotechnical Testing Journal, Vol. 17, No. 2, p. 185-194, 1994.

LEME, R. F. **Influência da Sucção Mátrica nas Condições de Fluxo e Estabilidade de Taludes da Barragem Pesqueiro.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, 2009.

LU, N. & LIKOS, W.J. **Unsaturated soil mechanics.** John Wiley & Sons, New York, 556p, 2004.

MACHADO, R. T. **Avaliação da precisão do método do papel filtro na obtenção de curvas características de um solo da cidade de Palmas-TO.** Monografia, Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Tocantins, 2016.

MARINHO, F. A. M. **Shrinkage Behaviour of some Plastic Soils.** PhD Thesis – Imperial College, University of London, 1994.

MARINHO, F. A. M., OLIVEIRA, O. M. **The filter paper method revisited.** Geotechnical Testing Journal. Vol. 29, No. 3, p. 01-09, 2006.

MARINHO, F.A. M. **Mecânica dos Solos Não Saturados: Na Prática da Engenharia.** Notas de Aula, 2014.

[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/232730/mod\\_resource/content/0/Os%20solos%20n%C3%A3o%20saturados%20%28%29.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/232730/mod_resource/content/0/Os%20solos%20n%C3%A3o%20saturados%20%28%29.pdf) acesso: Julho 2022.

NAKASHIMA, C. H. **Estudo de curvas características de solos que compõe o perfil geotécnico da Formação Guabirotuba.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2017.

ROHM, S. A. **Solos Não Saturados.** Monografia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1993.

SILVA, A. M. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

VAN GENUCHTEN, M. **A close form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, No. 5, p. 892-898, 1980.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E. **The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till.** Dublin: Géotechnique, Vol. 49, No. 2, p. 143- 159, 1999.