



**BIANCA OLIVEIRA PEREIRA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE CURVAS DE RETENÇÃO  
DE ÁGUA NO SOLO**

**LAVRAS-MG  
2020**

**BIANCA OLIVEIRA PEREIRA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido  
Orientador

**LAVRAS-MG**  
**2020**

**BIANCA OLIVEIRA PEREIRA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO**

Monografia apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como  
parte das exigências do Curso de  
Engenharia Civil, para a obtenção do título  
de Bacharel.

APROVADO em 10 de setembro de 2020

Eduardo Souza Cândido UFLA

Klinger Senra Rezende UNIVIÇOSA

Paulo Roberto Borges UFLA



---

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido

Orientador

**LAVRAS-MG  
2020**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a oportunidade de realizar o meu sonho de cursar Engenharia Civil, dando-me força para trilhar todo o caminho até aqui sem fraquejar. Também agradeço a Ele por ter colocado pessoas tão especiais na minha vida, que me ajudaram a chegar até aqui.

À minha mãe, Eliette, por estar sempre ao meu lado, apoiando-me, incentivando-me, motivando-me. Obrigada por muitas vezes se deixar de lado para fazer por mim. Ao meu pai, Ronaldo, que, mesmo nos momentos mais difíceis, esforçou-se ao máximo para que eu pudesse receber uma boa educação e chegar até aqui. À minha irmã, Yasmim, que, apesar de todas as brigas e divergência de opinião, sempre esteve ao meu lado.

Agradeço também ao meu primo Maycon por sempre estar por perto, ajudando-me e compartilhando comigo as frustrações do curso. À minha tia Bruna por toda ajuda e troca de conhecimento. Ao meu tio Charliton por sempre mostrar que aquilo que a gente quer construir está sempre a um passo de nós. À minha avó Maria de Fatima por ser uma fonte de inspiração. À Lara por ser mais que uma prima, minha amiga, companheira, irmã. À Salete e ao Wderlei por todo apoio e incentivo. À minha prima Ana Clara por toda alegria que trouxe para minha vida. Sou grata a todos os meus familiares que me apoiaram sempre.

Também gostaria de agradecer ao meu namorado, José Márcio, por todo amor, incentivo, apoio, carinho, companheirismo, descontração e por estar sempre ao meu lado. Obrigada por me ajudar tanto e sempre me motivar a ser uma pessoa melhor. Sou grata por tê-lo na minha vida. Agradeço também a toda a família dele por me receber com tanto carinho.

Manifesto meus agradecimentos a todas as amizades que a UFLA me proporcionou. Todas contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional. Em especial, agradeço aos meus amigos do grupo “Fundações Coquinho”, que trouxeram leveza aos dias tensos nesta reta final. À Esthela por todo apoio no desenvolvimento deste trabalho. À Iasmin e à Jessica, presentes do primeiro período que irei guardar para sempre. À Constru Jr. pelos ensinamentos. Ao Gustavo por me ensinar que no final tudo vai dar certo. Se não der, não tem problema. Agradeço também à Mayra, minha companheira de casa, pelo apoio.

Agradeço a todos os meus professores pela paciência, dedicação e ensinamentos. Em especial ao meu orientador Eduardo Cândido por todo apoio e incentivo.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Lavras por me proporcionar o ambiente ideal para aprender, com toda a infraestrutura, qualidade de ensino e valores imprescindíveis para o ser humano. Tenho orgulho de ter feito parte desta instituição.

Sou grata a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para meus conhecimentos em Engenharia Civil e que fizeram parte da minha jornada em busca da realização deste sonho.

*“O espírito sem limites é o maior tesouro do homem”*

*(J. K. Rowling)*

## RESUMO

Grande parte dos solos utilizados na Engenharia Civil está na condição não saturada. Para entender seu comportamento, é necessário o conhecimento da Mecânica dos solos não saturados. Dentro deste tópico de conhecimento, é fundamental o conhecimento de dois parâmetros: sucção e teor de umidade volumétrico. A relação entre esses dois parâmetros nos fornece a Curva de Retenção de Água (CRA). O presente trabalho busca a análise e a identificação de qual modelo matemático melhor ajusta a CRA para solos da microrregião de Viçosa. Para tal, utilizaram-se os modelos de Gardner (1958), Brooks e Corey (1964), Brutsaert (1967), Genuchten (1980), McKee e Bumb (1984), McKee e Bumb (1987) e Fredlund e Xing (1994). Além de determinar quais modelos são ideias, foi feita uma análise dos parâmetros de cada modelo para a identificação de suas faixas de variação e graus de importância. A análise feita dos parâmetros é conhecida como análise de sensibilidade e tem o objetivo de detectar quais os parâmetros mais interferem no modelo. Como conclusão, vê-se que apenas 5 dos 7 modelos ajustaram de maneira satisfatória os dados experimentais utilizados, provando maior eficiência para os solos utilizados.

**Palavras-chave:** Curva de Retenção de Água. Mecânica dos Solos não Saturados. Análise de sensibilidade.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Elemento de solo não saturado com fase ar contínua. ....	16
Figura 2.2- Água contida no solo .....	18
Figura 2.3 - Curva de Retenção de Água.....	21
Figura 2.4 - Curva de retenção para diferentes tipos de solo. ....	22
Figura 2.5 - Tipos de fluxo do solo para o papel filtro.....	23
Figura 2.6 - Representação da translação de eixos em termos de pressão. ....	24
Figura 2.7 - Sistema de aplicação de sucção na placa de sucção. ....	25
Figura 3.1 - Curva de retenção de água: a) Cândido et al (2014); b) Teixeira (2014); c) Guimarães (2013); d) Lisboa (2006); e) Custódio (2009) e f) Machado (2005).....	35
Figura 3.2 - Curva de retenção de água Botelho (2007).....	36
Figura 3.3 - Utilização do Solver para obtenção dos parâmetros de ajustes dos modelos. ....	38
Figura 3.4 - Exemplo do tratamento dos dados obtidos no ajuste dos métodos.....	39
Figura 4.1 - Curvas de retenção de água ajustadas: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2; (c) Amostra 3 e (d) Amostra 4. ....	42
Figura 4.2 - Curvas de retenção de água ajustadas. (a) Amostra 5; (b) Amostra 6; (c) Amostra 7; (d) Amostra 8; (e) Amostra 9; (f) Amostra 10. ....	43
Figura 4.3 - Curvas de retenção de água ajustadas. (a) Amostra 11; (b) Amostra 12; (c) Amostra 13; (d) Amostra 14; (e) Amostra 15; (f) Amostra 16.....	44
Figura 4.4 - Curvas de retenção de água ajustadas. (a) Amostra 17; (b) Amostra 18; (c) Amostra 19; (d) Amostra 20; (e) Amostra 21; (f) Amostra 22.....	45
Figura 4.5 - Curvas de retenção de água ajustadas. (a) Amostra 23; (b) Amostra 24; (c) Amostra 25; (d) Amostra 26; (e) Amostra 27; (f) Amostra 28.....	46
Figura 4.6 - Curvas de retenção de água ajustadas. (a) Amostra 29; (b) Amostra 30. ....	47
Figura 4.7 - Gráfico de radar dos parâmetros de ajuste do método de Gardner (1958): a) parâmetro $n$ e erro, e b) parâmetro alfa e o erro. ....	49
Figura 4.8 - Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de Brooks e Corey (1964). .	49
Figura 4.9 -Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de Brutsaert (1967). (a) parâmetro $a$ ; (b) parâmetro $n$ . ....	50
Figura 4.10 - Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de Genuchten (1980). (a) parâmetro alfa; (b) parâmetro $n$ ; (c) parâmetro $m$ . ....	50
Figura 4.11 - Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de Mckee e Bumb (1984). (a) parâmetro $a$ ; (b) parâmetro $b$ .....	50



Figura 4.12 - Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de McKee e Bumb (1987). (a) parâmetro a; (b) parâmetro b.....	51
Figura 4.13 - Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de Fredlund e Xing (1994). (a) parâmetro a; (b) parâmetro m; (c) parâmetro n.....	51
Figura 4.14 - Valor médio da função objetiva de cada modelo.....	52
Figura 4.15 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de Gardner (1958). .....	54
Figura 4.16 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de Brutsaert (1967). .....	55
Figura 4.17 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980). .....	57
Figura 4.18 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de McKee e Bumb (1984).....	57
Figura 4.19 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de McKee e Bumb (1987).....	58
Figura 4.20 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de Fredlund e Xing (1994). .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Equação de calibração para o papel filtro Whatman N°42.....	23
Tabela 3.1 - Autores e método de mensuração da sucção das amostras utilizadas.....	33
Tabela 3.2 - Classificação dos solos.....	34
Tabela 3.3 - Métodos e parâmetros que variaram com o Solver.....	37
Tabela 4.1 - Valores obtidos para a função objetiva.....	41
Tabela 4.2 - Análise estatística dos parâmetros de ajuste.....	48
Tabela 4.3 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de Gardner (1958). ...	52
Tabela 4.4 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de Brutsaert (1967)...	53
Tabela 4.5 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de van Genuchten (1980). .....	53
Tabela 4.6 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de McKee e Bumb (1984). .....	53
Tabela 4.7 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de McKee e Bumb (1987). .....	53
Tabela 4.8 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de Fredlund e Xing (1994). .....	53
Tabela 4.9 - Sensibilidade para o modelo de Gardner (1958). .....	54
Tabela 4.10 - Sensibilidade para o modelo de Brutsaert (1967). .....	55
Tabela 4.11 - Sensibilidade para os parâmetros $\alpha$ e $n$ do modelo de van Genuchten (1980)...	56
Tabela 4.12 - Tabela de sensibilidade para os parâmetros $\alpha$ e $m$ do modelo de Genuchten (1980). .....	56
Tabela 4.13 - Sensibilidade para os parâmetros $n$ e $m$ do modelo de Genuchten (1980).....	56
Tabela 4.14 - Sensibilidade para os parâmetros $n$ e $m$ do modelo de McKee e Bumb (1984). ..	57
Tabela 4.15 - Sensibilidade para os parâmetros do modelo de McKee e Bumb (1987). .....	58
Tabela 4.16- Tabela de sensibilidade para os parâmetros $a$ e $m$ do modelo de Fredlund e Xing (1994). .....	59
Tabela 4.17 - Tabela de sensibilidade para os parâmetros $a$ e $n$ do modelo de Fredlund e Xing (1994). .....	59
Tabela 4.18 - Sensibilidade para os parâmetros $m$ e $n$ do modelo de Fredlund e Xing (1994). .....	59
Tabela 4.19 - Espaço de busca dos parâmetros de cada modelo. ....	61

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1. Mecânica dos solos não saturados</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.1. Definições</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.2. Conceitos básicos de fluxo em meio poroso não saturado</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.3. Curva de retenção de água</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2. Técnicas para determinação da curva de retenção de água</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.1. Método do Papel Filtro</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.2. Placa de Pressão</b> .....	<b>24</b>
<b>2.2.3. Placa de sucção</b> .....	<b>24</b>
<b>2.2.4. Centrífuga</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.5. Tensiômetro</b> .....	<b>26</b>
<b>2.3. Modelagem matemática das curvas de retenção de água</b> .....	<b>26</b>
<b>2.3.1. Gardner (1958)</b> .....	<b>26</b>
<b>2.3.2. Brooks e Corey (1964):</b> .....	<b>27</b>
<b>2.3.3. Brutsaert (1967)</b> .....	<b>27</b>
<b>2.3.4. van Genuchten (1980)</b> .....	<b>27</b>
<b>2.3.5. McKee e Bumb (1984)</b> .....	<b>28</b>
<b>2.3.6. McKee e Bumb (1987)</b> .....	<b>28</b>
<b>2.3.7. Fredlund e Xing (1994):</b> .....	<b>28</b>
<b>2.4. Análise de sensibilidade</b> .....	<b>29</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1. Material</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1.1. Geologia e solos da microrregião de Viçosa</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1.2. Curvas características</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2. Métodos</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.1. Ajuste das Curvas de Retenção de Água</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.2. Análise Estatística</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2.3. Análise de Sensibilidade</b> .....	<b>39</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1. Ajuste das Curvas de Retenção</b> .....	<b>41</b>
<b>4.2. Análises Estatísticas</b> .....	<b>48</b>

<b>4.3. Análise de Sensibilidade .....</b>	<b>52</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>62</b>
<b>5.1. Conclusão .....</b>	<b>62</b>
<b>5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>64</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Devido às recentes tragédias que ocorreram no Brasil envolvendo o rompimento de barragens de rejeito, muito tem sido discutido sobre o descomissionamento de barragens, isto é, a retirada de rejeitos de determinada área e sua revitalização. Para Amorim (2008) esse processo é considerado interdisciplinar e tem como objetivo reabilitar áreas mineradas garantindo que o fechamento da mina não comprometa a qualidade ambiental.

Qualquer que seja a razão que leve ao descomissionamento de uma mina, os problemas de recuperação das áreas degradadas e a reutilização do terreno devem ter posição de destaque. No âmbito da mineração, a recuperação de áreas degradada é geralmente entendida como o conjunto de ações que visam tornar a área apta para outro uso, não necessariamente idêntico ao que antecedeu a atividade de mineração. A possibilidade de um novo uso requer que a área apresente condições de estabilidade física, química e, em alguns casos, biológica, quando, por exemplo, a utilização futura da área será para fins de conservação ambiental e ecossistemas. Uma das tecnologias muito utilizadas para o descomissionamento de minas são coberturas construídas com solo e/ou geossintéticos (RIBEIRO, 2011).

Segundo Amorim (2008), os sistemas de cobertura são divididos em dois tipos: prescritivo e evapotranspirativo. As coberturas evapotranspirativas podem ser consideradas uma boa alternativa as coberturas prescritivas, pois funcionam como uma estrutura natural, possuem uma longa vida útil, baixo custo de implantação e fácil manutenção. Uma das camadas que constitui a cobertura evapotranspirativa é denominada camada de armazenamento e liberação que deve ser capaz de acumular a água que infiltra no período chuvoso e liberá-la através da evapotranspiração no período de seca.

Além disso, a escolha de solos que mudam a condutividade hidráulica não saturada com a sucção garante o processo de evapotranspiração. Sendo assim, a fim de que esse processo seja feito, faz-se necessário compreender a Mecânica dos Solos não Saturados.

Botelho (2007) destaca que a maior parte da superfície terrestre, assim como o Brasil, encontra-se em regiões áridas ou semiáridas, e que nesses locais as camadas superiores do solo estão em condições não saturadas, ou seja, todas as estruturas serão construídas sobre essas condições. Desta forma, se faz necessário a compreensão da Mecânica dos Solos na condição não saturada.

De acordo com Guimarães (2013), a Mecânica dos Solos não saturados tem como escopo o estudo dos solos com seus vazios preenchidos por água e ar, sendo o comportamento hidráulico desse tipo de solo uma de suas partes fundamentais. O solo nestas condições é

muito comum na natureza e possui comportamento diferente daqueles estudados pela Mecânica dos Solos Clássica, que se ocupa a estudar os solos na condição saturada ou seca.

Conforme Miguel et al (2006), a fim de que se compreenda o comportamento hidráulico, é necessário que a sucção e o teor de umidade volumétrico sejam conhecidos. A curva de retenção de água (CRA), que possibilita a obtenção da capacidade de retenção de água do solo, é a representação gráfica da relação entre esses dois parâmetros. Tal curva pode ser determinada em laboratório ou em campo, podendo ser feita por diversos métodos experimentais.

De forma a realizar o ajuste da CRA obtida experimentalmente, tem-se na literatura diversos modelos matemáticos disponíveis. Quando se calibra bem um modelo para um conjunto de dados experimentais, obtém-se uma equação matemática que irá representar esses dados. Cada modelo matemático possui uma formulação própria, com parâmetros de ajuste diferentes. Com a obtenção destes parâmetros torna-se possível o cálculo de resistência do solo, condutividade hidráulica não saturada e outros dados fundamentais para a compreensão do comportamento dos solos na condição não saturada.

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo identificar e analisar, por meio de dados experimentais encontrados na literatura para curvas de retenção de água de diferentes solos da microrregião de Viçosa, o comportamento dos parâmetros de diversos modelos matemáticos com base em análises estatísticas e de sensibilidade, criando assim valores de referência para possíveis trabalhos futuros.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Mecânica dos solos não saturados**

#### **2.1.1. Definições**

Segundo Pereira (2006), o solo é formado por partículas sólidas. Entre essas partículas existem espaços vazios que podem estar parcialmente ou completamente preenchidos por água. A mecânica dos solos pode ser dividida em Mecânica dos Solos Saturados, também conhecida como Mecânica dos Solos Clássica, que trabalha com os espaços vazios do solo cheios de água, e na Mecânica dos Solos Não Saturados. Na prática, a análise por meio da Mecânica dos Solos Clássica se mostra restrita a tipos específicos de solo, mas na grande maioria dos casos a realidade é diferente, fazendo-se necessária a utilização da Mecânica dos Solos Não Saturados.

De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), todos os solos que estão próximos da superfície, em ambientes secos, sofrem pressões negativas causadas pela água em seus poros, o que faz com que o solo deixe de ser saturado. Além disso, as movimentações do solo, suas modelagens e compactação também geram a dessaturação. Como no dia a dia esses exemplos são recorrentes, fica claro a importância da utilização da Mecânica dos Solos Não Saturados.

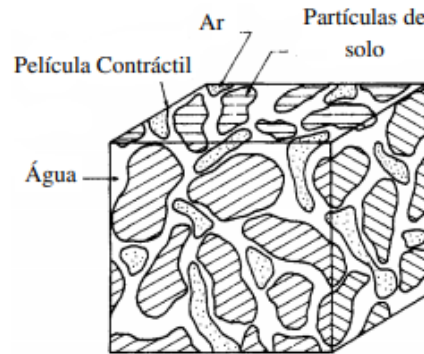
Conforme os mesmos autores um solo saturado pode ser considerado como uma particularidade dos solos não saturados. Isso se deve ao fato de que qualquer quantidade de ar nos poros do solo, por menor que seja, já é o suficiente para o solo deixar de ser considerado saturado. O solo é composto por fases. Essas fases, para serem consideradas independentes, devem possuir propriedades distintas dos demais materiais com que estão juntos e ter uma superfície bem delimitada. Sendo assim, o solo saturado é chamado de bifásico, sendo composto por duas fases: sólidos e água. Já o solo não saturado é composto por quatro fases: sólidos, água, ar e uma película contrátil (interface ar-água) (FIGURA 2.1).

Segundo Valle (2013), a película contrátil é uma fina membrana ao longo dos vazios do solo, atuando como uma parte entre as fases de ar e da água. O grau de saturação influencia diretamente na posição da membrana, o que gera uma alteração nas propriedades dos solos não saturados. A relação entre a película e a estrutura do solo é responsável pela alteração do volume e a resistência ao cisalhamento.

Fredlund e Rahardjo (1993) diz que quando se faz uma análise do solo não saturado partindo do ponto de vista da relação volume-massa, pode-se considerar o solo um sistema trifásico, isso devido ao fato de que o volume da película contrátil é muito pequeno e sua massa pode ser considerada como parte da massa de água. O mesmo fato não pode acontecer

quando se realiza uma análise de tensão. Analisando desse ponto de vista, o sistema pode ser composto por quatro fases e percebe-se que duas fases (partículas de solo e película contráctil) equilibram-se sob um gradiente de tensão, e duas fases (ar e água) fluem sob um gradiente de tensão. Isso quer dizer que as partículas de solo formam um arranjo estrutural, e a película contráctil forma uma divisa entre as fases.

Figura 2.1 - Elemento de solo não saturado com fase ar contínua.



Fonte: Fredlund e Rahardjo (1993).

Como visto anteriormente, o solo é um sistema multifásico. Para definir o estado em que o solo está (saturado, seco ou não saturado), pode-se usar as relações de massa e volume dessas fases. Essas relações são chamadas de índices físicos.

O primeiro índice físico a ser tratado é o índice de vazios ( $e$ ), que é definido com a divisão do volume de vazios ( $V_v$ ) pelo volume de sólidos ( $V_s$ ) (EQUAÇÃO 2.1). Além disso, pode-se definir a porosidade do solo ( $n$ ), que é a proporção do volume de vazios e o volume total do solo ( $V$ ) em função do índice de vazios, como representado na Equação 2.2.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.1)$$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1 + e} \quad (2.2)$$

Outro índice físico fundamental para a mecânica dos solos é o grau de saturação do solo ( $S$ ), que é a relação entre o volume de água ( $V_w$ ) e o volume de vazios, conforme (EQUAÇÃO 2.3).

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.3)$$



Para identificar a quantidade de água presente no solo, pode-se empregar o teor de umidade ou teor de água ( $w$ ), que nada mais é que a relação entre peso de água ( $W_w$ ) e o peso dos sólidos ( $W_s$ )(EQUAÇÃO 2.4).

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (2.4)$$

A relação entre o peso ( $W$ ) e o volume do solo ( $V$ ) é conhecida como peso específico ( $\gamma$ ) (EQUAÇÃO 2.5). A massa específica pode ser obtida empregando a massa no lugar do peso. Para obter o peso específico seco ( $\gamma_s$ ), basta utilizar o peso do solo seco. Esse parâmetro é um dos mais importantes para a mecânica dos solos, sendo utilizado para o cálculo de tensão.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.5)$$

Conforme relatado por Almeida (2018), a tensão efetiva é o mais importante conceito que sofre alteração na mecânica dos solos não saturados. Na mecânica dos solos saturados, tem-se que a tensão efetiva é dada pela diferença entre a tensão total e a poropressão (pressão de água), de acordo com a Equação 2.6 definida por Terzaghi (1943).

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2.6)$$

em que  $\sigma'$  é a tensão efetiva,  $\sigma$  é a tensão total e  $u_w$  é a poropressão.

Entretanto, ainda segundo Almeida (2018), essa definição de tensão efetiva não é válida na mecânica dos solos não saturados, pois não leva em consideração a pressão do ar nos vazios do solo. Com o ar nos vazios do solo ocorre sua sucção, que basicamente é a energia necessária para avaliar sua capacidade de reter água. Em 1959, Bishop aprimorou a teoria desenvolvida por Terzaghi para o cálculo da tensão efetiva aplicando-a em solos não saturados, considerando as características desse tipo de solo, como apresentado na Equação 2.7.

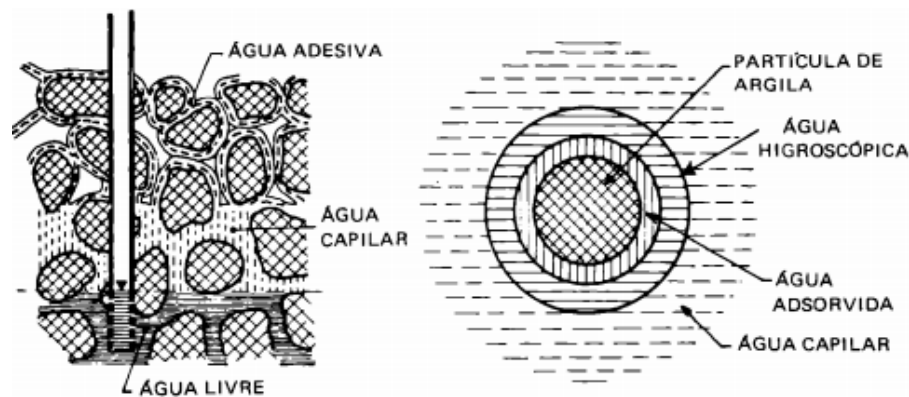
$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2.7)$$

em que  $\sigma'$  é a tensão efetiva,  $\sigma$  é a tensão total,  $u_w$  é a poropressão,  $u_a$  é a pressão do ar e  $\chi$  está relacionado ao grau de saturação, em que  $\chi = 1$  para os solos saturados e  $\chi = 0$  para solos secos.

A água contida no solo pode ser classificada em água de constituição, que faz parte da estrutura molecular; água adesiva ou adsorvida, aquela película de água que envolve e adere fortemente à partícula sólida; água livre, aquela que se encontra em uma determinada zona do

terreno, enchendo todos os seus vazios; água higroscópica, a que ainda se encontra em um solo seco ao ar livre e água capilar, aquela que nos grãos finos sobe pelos interstícios capilares deixados pelas partículas sólidas, além da superfície livre da água. As águas livres, higroscópica e capilar são as que podem ser totalmente evaporadas pelo efeito do calor, a uma temperatura maior que 100 °C (FIGURA 2.2) (CAPUTO, 1988).

Figura 2.2- Água contida no solo



Fonte: Caputo (1988).

Quando a água livre migra dentro de um solo, ela pode ser adsorvida ou retida por ele. Para desprender esta água adsorvida, energia externa tem de ser aplicada. O valor da energia aplicada por unidade de volume de água para desprendê-la é denominada de sucção (LEE; WRAY, 1995 apud ALMEIDA, 2018).

Segundo Silva (2009), a sucção total ( $\psi$ ) do solo é a soma da sucção matricial e a sucção osmótica. A sucção matricial é definida como a energia ligada à água livre do solo. Isso está relacionado ao efeito de capilaridade, podendo ser definida como a diferença entre a poropressão do ar e da água no solo. Já a sucção osmótica tem relação com a existência de íons e diversos componentes na água do solo. Por meio da análise do comportamento tensão-deformação, a sucção osmótica pouco contribui para a análise dos solos não saturados, podendo ser desprezado. Com isso, tem-se a Equação 2.8 que define a sucção total.

$$\psi = u_a - u_w \quad (2.8)$$

### 2.1.2. Conceitos básicos de fluxo em meio poroso não saturado

Quando se trabalha com fluxo de água em meios porosos saturados, pode-se descrevê-lo usando a lei de Darcy, descrita pela Equação 2.9.

$$v = -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.9)$$

em que  $k$  é o coeficiente de permeabilidade. Em solos saturados esse coeficiente é considerado praticamente constante,  $v$  é a velocidade de percolação e a relação  $\partial h/\partial z$ , que também pode ser representado pela letra  $i$ , é o gradiente hidráulico.

Segundo Mascarenhas (2018), a definição de gradiente hidráulico é o gradiente espacial de uma medida de energia mecânica dos fluidos. Por meio da equação de Bernoulli é possível determinar uma equação para o estado de energia mecânica do fluido em um ponto. Sendo assim, considerando que  $h$  é uma medida de energia específica por unidade de peso, também conhecida como carga hidráulica, tem-se a equação de Bernoulli (EQUAÇÃO 2.10).

$$h = \frac{V_w V_w}{2g} + z + \frac{u_w}{\gamma_w} \quad (2.10)$$

em que  $g$  é a aceleração gravitacional,  $z$  é a altura partindo do referencial onde a água no volume de controle se encontra,  $u_w$  é a poropressão e  $\gamma_w$  é o peso específico. De acordo com Mascarenhas (2018), essa equação pode ser separada em três parcelas, sendo a primeira parcela de energia potencial que está relacionada à pressão do fluido ( $u_w/\gamma_w$ ), outra parcela relacionada à energia gravitacional ( $z$ ) e a terceira parcela se deve à energia cinética do fluido. Essa parcela pode ser desprezada, isso devido ao fato da velocidade do fluido no solo ser muito pequeno.

Assim, tem-se que o gradiente hidráulico é dado pela Equação 2.11:

$$i = \nabla \left( z + \frac{u_w}{\gamma_w} \right) \quad (2.11)$$

As Equações 2.9 e 2.11 definem a lei de Darcy para o fluxo em meio saturado, mas quando se trata do fluxo em solo não saturado, faz-se necessária a utilização da lei de Darcy-Buckingham. Essa é uma alteração da lei de Darcy original, trabalhando agora os parâmetros em função da sucção total ( $\psi$ ). Sendo assim, tem-se a lei de Darcy-Buckingham dada pela Equação 2.12.

$$v = -k(\psi)i \quad (2.12)$$

O gradiente hidráulico também deve ser escrito em função da sucção total, então considerando que o solo está aberto para a atmosfera a sucção total (EQUAÇÃO 2.8) pode ser simplificada para  $\psi = -u_w$  substituindo na fórmula do gradiente (EQUAÇÃO 2.11) e o gradiente na fórmula de Darcy-Buckingham (EQUAÇÃO 2.12) tem-se a Equação 2.13.

$$v = -k(\psi) \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( z - \frac{\psi}{\gamma_w} \right) \right] = -k(\psi) \left[ 1 - \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] \quad (2.13)$$

A Equação 2.14 é responsável pelo controle do fluxo de água através de um volume de controle de um meio poroso não saturado, conhecida como equação da continuidade da água, empregada para fluidos incompressíveis e homogêneos.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.14)$$

em que  $\partial \theta / \partial t$  representa a variação de água no volume de controle por unidade de tempo e  $-\partial v / \partial z$  é a diferença da quantidade de água que entra e que sai por unidade de comprimento.

Pode-se substituir a Equação 2.13 na equação da continuidade (EQUAÇÃO 2.14). Segundo Guimarães (2013), para obter a equação do fluxo unidimensional de água em um meio poroso não saturado é necessário empregar a regra da cadeia quando for feita essa substituição para que a sucção passe a ser a variável principal (EQUAÇÃO 2.15).

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k(\psi) \left( 1 - \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right) \quad (2.15)$$

A Equação 2.15 representa a equação de Richards. De acordo com Guimarães (2013), a equação é não linear uma vez que as funções  $k(\psi)$  e  $\theta(\psi)$  geralmente são não lineares. Por causa disso, ela é normalmente resolvida numericamente, pelos métodos das diferenças finitas ou dos elementos finitos.

### 2.1.3. Curva de retenção de água

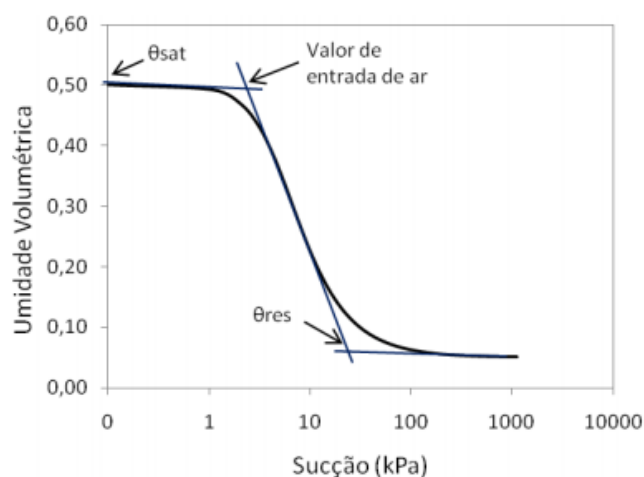
A curva de retenção de água (CRA) também é conhecida como curva característica de sucção ou curva de retenção de umidade. Ela é dada através da relação entre a sucção e a quantidade de água no solo, podendo ser representada pelo grau de saturação ( $S$ ), pela umidade gravimétrica ( $w$ ) ou umidade volumétrica ( $\theta$ ).

De acordo com Guimarães (2013), o conhecimento da curva de retenção de água do solo é fundamental para analisar o comportamento dos solos não saturados. A CRA tem sido empregada para a previsão e quantificação de diversos parâmetros de grande interesse na solução dos problemas geotécnicos, como a condutividade hidráulica, e parâmetros de resistência ao cisalhamento. Isto é atrativo à prática dos projetos, já que ensaios que quantificam estas propriedades podem ser muitas vezes onerosos e demorados para serem obtidos em laboratório.

Segundo Guizelini (2011), é possível analisar alguns pontos importantes na CRA representada na Figura 2.3. O primeiro é onde a curva toca o eixo das ordenadas (umidade volumétrica). Esse ponto representa a sucção zero, ou seja, a saturação do solo. Sendo assim,

o valor da porosidade e da umidade se igualam, determinando a umidade volumétrica de saturação. O segundo ponto a ser analisado é o valor de entrada de ar, que é a diferença entre a pressão de ar e de água que é preciso para gerar a drenagem no maior poro do solo.

Figura 2.3 - Curva de Retenção de Água

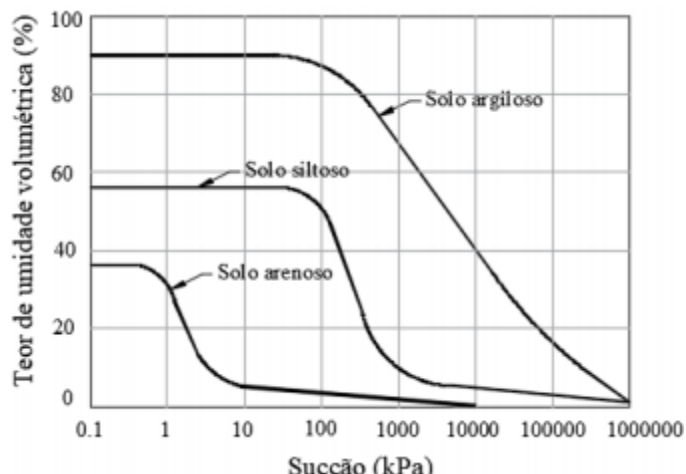


Fonte: Guizelini (2011)

As regiões de decaimento das CRAs representam a região funicular, que constitui uma região não saturada do solo. Deste modo, vê-se que, em solos não saturados, há uma relação inversa da sucção com o teor de umidade, uma vez que, na medida em que se aumenta o valor da sucção, diminui-se a magnitude da umidade volumétrica. Quando a umidade volumétrica atinge um valor residual  $\theta_{res}$ , tem-se uma região do solo em que a fase de água é descontínua, e não mais suporta a possibilidade de fluxo, de modo que a remoção da água requer o fluxo de vapor (GUIZELINI, 2011). A forma da CRA (FIGURA 2.3) está diretamente ligada ao tipo de solo. Entre as características dos solos que interferem na CRA tem-se a granulometria, o teor de umidade na preparação dos corpos de prova, a energia de compactação, o índice de vazios, entre outros.

Conforme Guimarães (2013), ainda que se utilize o mesmo solo para a retirada de amostras, com as mesmas características físicas, podem ser apresentadas curvas de retenção diferentes dependendo da maneira com a qual o solo foi compactado. Na Figura 2.4 é possível verificar que os solos arenosos possuem uma variação de sucção muito menor quando comparados a solos com granulometria mais finas. Outra observação também relacionada à granulometria é que os solos arenosos perdem água com mais facilidade e que quanto menor os grãos do solo, maior é a pressão da entrada de ar e o decaimento da curva é menos acentuado.

Figura 2.4 - Curva de retenção para diferentes tipos de solo.



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing (1994).

Em relação ao teor de umidade na moldagem dos corpos de prova, Dias (2012) relata que quanto mais fino o solo teoricamente maior deve ser o valor da umidade na saturação. Além disso, amostras de um mesmo solo moldadas com teor de umidade inicial diferentes tendem a gerar resultados diferentes. Isso porque, segundo Guimarães (2013), os solos mais secos são governados pela macroestrutura, e os solos mais úmidos, pela microestrutura. Quando se analisam as alterações sofridas pela CRA com base na energia de compactação do solo, chega-se à conclusão de que quanto maior a energia de compactação, menor serão os poros do solo; e quanto menor o poro, maior a sucção.

## 2.2. Técnicas para determinação da curva de retenção de água

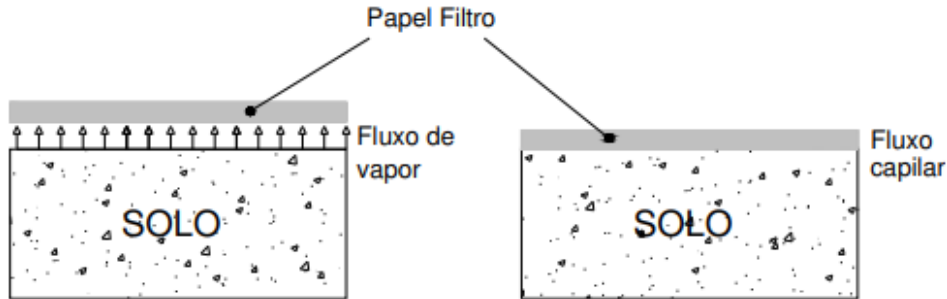
### 2.2.1. Método do Papel Filtro

A técnica do papel filtro consiste na medição da sucção total ou matricial e é considerado um método indireto. De acordo com Moncada (2008), o método do papel filtro parte do princípio de que quando se coloca um material poroso com capacidade de absorver água em contato com um solo, a água presente passa do solo para o material poroso até que se atinja um equilíbrio. Sendo assim, o solo com um determinado teor de umidade, quando colocado em contato com o papel filtro que apresenta uma umidade menor, absorve parte da água presente no solo até chegar a um equilíbrio de pressão.

Para definir qual sucção (matricial ou total) será medida através desse método, é necessário se atentar para a maneira com a qual o papel filtro será colocado no corpo de prova (FIGURA 2.5). Segundo Guizelini (2011), quando o papel filtro é colocado diretamente sobre o solo, a água flui do solo para o papel, sendo o resultado do ensaio a sucção matricial. Já para

a obtenção da sucção total, o papel deve estar separado do solo, de maneira que o equilíbrio seja atingido através do fluxo do vapor d'água, sendo assim determinada a sucção total.

Figura 2.5 - Tipos de fluxo do solo para o papel filtro.



Fonte: Moncada (2008).

A sucção do solo é obtida através de uma curva de calibração, que é determinada pelo conhecimento da relação entre a sucção e a umidade do papel filtro. Sendo assim, a precisão desse método depende da precisão da calibração do papel filtro. Silva (2009) afirma que o tempo que o sistema leva para entrar em equilíbrio é um fator extremamente importante, porque quando o sistema entra em equilíbrio, o papel filtro e o solo fornecem a mesma sucção com umidades diferentes. Segundo Marinho (1997 citado por DIAS, 2012), para a determinação da sucção matricial, sete dias é o tempo suficiente para atingir o equilíbrio para qualquer faixa de sucção.

Para Marinho (2005), os papéis mais usados para esse método são Whatman N° 42 ou Schleicher & Schuell N° 589. Para o papel Whatman N° 42, a curva de calibração mais utilizada está na Tabela 2.1. Em relação ao contato do papel filtro com o solo, Marinho (2005) relata que a redução deste não afeta a medição da sucção matricial. Além disso, a partir de certo valor de sucção, mede-se a sucção total, mesmo que o papel filtro esteja em contato com o solo.

Tabela 2.1- Equação de calibração para o papel filtro Whatman N°42.

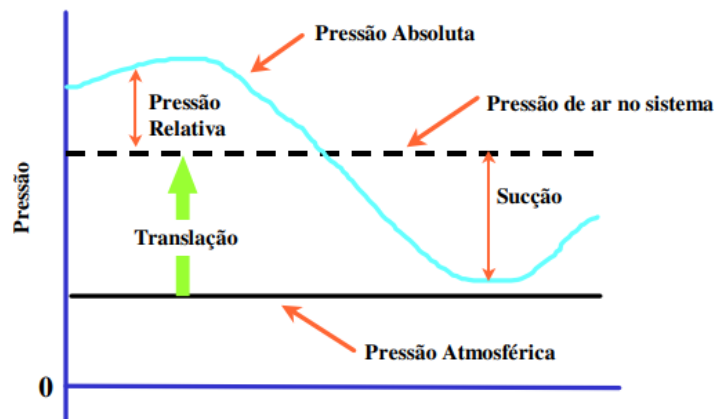
Umidade do papel filtro	Sucção (kPa)
≤ 47%	$10^{[4,84 - 0,0622w]}$
> 47%	$10^{[6,05 - 2,48\log(w)]}$

Fonte: Chandler et al. (1992)

### 2.2.2. Placa de Pressão

Segundo Marinho (2005), A fim de evitar a ocorrência do fenômeno de cavitação, a placa de pressão faz uso da técnica da translação dos eixos (FIGURA 2.6). Essa técnica foi criada por Hilf em 1956 e consiste na alteração do referencial de pressão (pressão atmosférica), aumentando a pressão do ar artificialmente ( $u_a$ ) nos poros do solo. Considerando que esse fenômeno gera um aumento na pressão da água ( $u_w$ ), a sucção ( $u_a - u_w$ ) permanece constante, impedindo o efeito de cavitação, que ocorre quando a pressão negativa atinge valores próximos a 80 kPa. Essa técnica pode ser aplicada em diversos equipamentos geotécnicos, como edômetro, triaxial e cisalhamento direto.

Figura 2.6 - Representação da translação de eixos em termos de pressão.



Fonte: Marinho (2005)

De acordo com Guimarães (2013), para a utilização desse método é necessário que se utilizem placas porosas especiais que permitam apenas o fluxo de água, não de ar. Com isso, obtém-se a sucção matricial. As principais vantagens dessa técnica relacionam-se a medição direta da sucção e a utilização de equipamentos de fácil acesso. A principal desvantagem está no fato da necessidade de todos os vazios de ar estarem conectados, o que ocorre apenas em solos com grau de saturação inferior a 85 %.

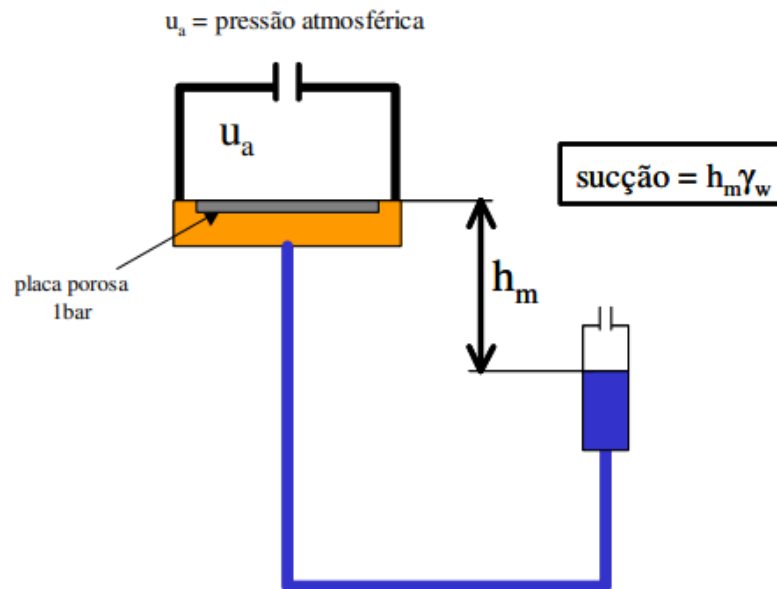
### 2.2.3. Placa de sucção

Segundo Guimarães (2013), essa técnica é recomendada quando se deseja impor sucções pequenas, pois quando a água é submetida a pressões negativas menores que 100 kPa, ela cavita, ou seja, permite a entrada de ar. Na placa de sucção, é definida uma diferença de altura entre o reservatório e a placa porosa de alta entrada de ar, gerando uma pressão na pedra inferior à pressão atmosférica. A diferença de altura ( $h_m$ ) representada na Figura 2.7 é a carga de pressão colocada.



Para determinar a sucção no solo, Marinho (2005) fala que é necessário multiplicar a carga de pressão pelo peso específico de água. Encontra-se, assim, a sucção na pedra, que é a mesma do solo. Esse método é o mais recomendado para definir a entrada de ar em materiais que possuam uma distribuição de poros uniforme ou com baixo valor de entrada.

Figura 2.7 - Sistema de aplicação de sucção na placa de sucção.



Fonte: Marinho (2005).

#### 2.2.4. Centrífuga

Gardner (1937) que havia trabalhado com sementes para obter a relação de umidade versus sucção, adaptou a técnica, calibrando papéis filtro colocados em contato com o solo úmido e medindo a tensão capilar de um solo para uma extensiva gama de teores de umidade, determinando o teor de umidade de equilíbrio. Os papéis filtro foram calibrados determinando o teor de umidade deles quando em contato com uma superfície de água livre em um campo centrifugado. (GUIMARÃES, 2013).

A centrífuga aumenta o campo gravitacional de um objeto, por meio de um movimento circular que gera uma aceleração centrífuga direcionada para fora do círculo, definido pelo movimento de rotação. O valor dessa aceleração centrífuga está relacionado com o raio e a velocidade angular do movimento de rotação (TEIXEIRA, 2014).

Segundo Teixeira (2014), o período de centrifugação é um elemento fundamental para a precisão da curva de retenção de água. O período ideal de centrifugação para atingir o equilíbrio ainda precisa ser investigado considerando-se a variação dos tipos de solo.

### 2.2.5. Tensiômetro

Klenk (2019) define o tensiômetro como um instrumento que permite a medição direta da poropressão negativa da água no solo, a partir da qual se obtém a sucção matricial. Esse instrumento apresenta diversas formas e geometrias, sendo usado comumente *in situ*. O contato do tensiômetro com o solo se dá por meio de uma ponteira porosa, que possibilita o equilíbrio entre a água no dispositivo e no solo, sem a passagem de bolha de ar. Em se tratando de um tensiômetro convencional, os principais componentes são: elemento poroso, sensor de pressão e água. O elemento poroso, como já citado anteriormente, é o elemento que cria a conexão do solo com o sistema. O sensor de pressão pode ser um manômetro de mercúrio, manômetro de vácuo ou transdutores de pressão. O sistema deve manter uma coluna de água contínua. O principal problema do tensiômetro convencional também é a cavitação da água, limitando, assim, a medição da sucção por esse método.

Segundo Marinho (2005), algumas técnicas podem ser utilizadas para minimizar o efeito de cavitação no tensiômetro. Entre elas, pode-se citar a utilização de água pura e superfícies limpas em todo o sistema, a utilização de superfícies mais polidas possíveis, reduzindo-se as microcavidades, e a aplicação de vácuo ao sistema para remoção do máximo de ar possível.

## 2.3. Modelagem matemática das curvas de retenção de água

Como a relação entre umidade volumétrica e a sucção é contínua em todos os intervalos, pode-se descrever essa continuidade através de funções matemáticas. Existem diversas formulações empíricas para realizar a modelagem das curvas de retenção de água. A seguir são apresentados alguns modelos comumente utilizados.

### 2.3.1. Gardner (1958)

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{1 + (\alpha\psi)^n} \quad (2.16)$$

em que:

$\psi$ : sucção matricial;

$\theta$ : teor de umidade volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_s$ : teor de umidade volumétrica de saturação ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_r$ : teor de umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\alpha$ : parâmetro de ajuste da curva ( $\text{cm}^{-1}$ ); e

$n$ : parâmetro de ajuste.

### 2.3.2. Brooks e Corey (1964):

$$\theta(\psi) = \theta_s, \quad \psi \leq \psi_a \quad (2.17)$$

$$\theta(\psi) = (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{\psi_a}{\psi} \right)^\lambda + \theta_r, \quad \psi > \psi_a \quad (2.18)$$

em que:

$\psi$ : sucção matricial;

$\psi_a$ : sucção matricial que corresponde à entrada de ar;

$\theta$ : teor de umidade volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_s$ : teor de umidade volumétrica de saturação ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_r$ : teor de umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); e

$\lambda$ : parâmetro de ajuste que depende do tamanho dos poros do solo.

### 2.3.3. Brutsaert (1967)

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{1 + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n} \quad (2.19)$$

em que:

$\psi$ : sucção matricial;

$\theta$ : teor de umidade volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_s$ : teor de umidade volumétrica de saturação ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_r$ : teor de umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$a, n$ : parâmetros de ajuste;

### 2.3.4. van Genuchten (1980)

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + |\alpha_v \psi|^n)^m} \quad (2.20)$$

em que:

$\psi$ : sucção matricial;

$\theta$ : teor de umidade volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_s$ : teor de umidade volumétrica de saturação ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_r$ : teor de umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); e

$\alpha_v, n, m$ : parâmetros de ajuste.

### 2.3.5. McKee e Bumb (1984)

$$\theta(\psi) = (\theta_s - \theta_r) * e^{\left[\frac{(a-\psi)}{b}\right]} + \theta_r \quad (2.21)$$

em que:

$\psi$ : sucção matricial;

$\theta$ : teor de umidade volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_s$ : teor de umidade volumétrica de saturação ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_r$ : teor de umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); e

a, b: parâmetros de ajuste.

### 2.3.6. McKee e Bumb (1987)

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + e^{\left(\frac{a-\psi}{b}\right)}} \quad (2.22)$$

em que:

$\psi$ : sucção matricial;

$\theta$ : teor de umidade volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_s$ : teor de umidade volumétrica de saturação ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_r$ : teor de umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); e

a, b: parâmetros de ajuste;

### 2.3.7. Fredlund e Xing (1994):

$$\theta(\psi) = \theta_s \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi_a}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[ \frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right)} \right]^m \quad (2.23)$$

em que:

$\psi$ : sucção matricial;

$\psi_a$ : sucção matricial que corresponde à entrada de ar;

$\psi_r$ : sucção que corresponde à umidade volumétrica residual;

$\theta$ : teor de umidade volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_s$ : teor de umidade volumétrica de saturação ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

a: valor aproximado da sucção de entrada de ar (cm);

n, m: parâmetros de ajuste; e

$10^6$ : valor limite de sucção para os solos.

## 2.4. Análise de sensibilidade

Na modelagem inversa, um modelo é calibrado alterando iterativamente as estimativas dos parâmetros de entrada do modelo até que o valor de uma função objetivo, que quantifica a correspondência entre os resultados observados e calculados, seja minimizado. A principal vantagem de uma análise inversa é o cálculo automático e objetivo dos valores dos parâmetros, que produzem o melhor ajuste entre os dados medidos (frequentemente chamados de observações) e os resultados computados. As principais dificuldades estão relacionadas com a complexidade da maioria dos modelos numéricos, que, por vezes, causam problemas de não unicidade e instabilidade da solução ou insensibilidade dos resultados a alterações nos valores dos parâmetros (CALVELLO, 2002).

Segundo Guimarães (2008), quando se trabalha com suposição de parâmetros (análise inversa), é fundamental que eles ajustem de maneira adequada os dados experimentais. Sendo assim, tais parâmetros devem ser confiáveis. Para conhecer a importância de cada parâmetro do modelo ajustado, faz-se necessária a realização de uma análise de sensibilidade, identificando quais parâmetros são relevantes e não correlacionados. Conhecer a convergência ou não de um dado parâmetro é uma maneira de não desperdiçar tempo e dinheiro.

A análise de sensibilidade de um modelo irá avaliar o impacto provocado na variável de saída pelas variações nas variáveis de entrada (YANES, 2018). Para Guimarães (2008), a análise de sensibilidade pode ser realizada por alguns parâmetros estatísticos, tais como a matriz de covariância, o coeficiente de variação e a sensibilidade das previsões às mudanças nos valores dos parâmetros. Em problemas de análise inversa, em que parte de um sistema é desconhecido, ou seja, não se conhecem os parâmetros do modelo, a análise da sensibilidade pode ser fundamental.

De acordo com Melo (2017), podem ser encontrados na literatura diversas metodologias para realização de análise de sensibilidade. Para as análises realizadas neste trabalho foram utilizadas a análise de correlação e a sensibilidade de escala comparada.

Coefficientes de correlação assumem valores entre -1 e 1. O sinal aritmético associado com esse coeficiente indica a direção da relação entre os parâmetros (positiva = direta; negativa = indireta). Os coeficientes de correlação são usados como medida de força da relação entre os parâmetros. Assim, um coeficiente de correlação igual a zero indica que não há correlação entre os parâmetros; um valor maior que 0,9 indica alta correlação, ou seja, os dois parâmetros não podem ser determinados independentemente com as observações usadas na regressão. Ao final da regressão, se os valores de todos os coeficientes estiverem muito

longe de 1,0 e -1,0, as observações usadas na regressão suprem informações suficientes para todos os parâmetros estimados simultaneamente (GUIMARÃES, 2008).

Para Calvello (2002), a sensibilidade de escala comparada é a estatística mais importante para identificar os parâmetros que interfere os resultados da modelagem. Além disso um modelo pode ser calibrado com sucesso mesmo com a retirada de um parâmetro que tenha sido estimado inicialmente de maneira razoável. Para problemas com muitas variáveis a retirada dos parâmetros menos sensíveis facilita a obtenção de um resultado.

Segundo Guimarães (2008), o coeficiente de sensibilidade de escala comparada (css) indica a importância relativa dos parâmetros estimados simultaneamente. Quanto maior o valor desse coeficiente, mais importante é o parâmetro utilizado, ou seja, maior será a influência deste no resultado. Quanto maior o número de parâmetros empregados em um modelo, mais importante se torna o cálculo do coeficiente de sensibilidade.

O coeficiente de sensibilidade de escala comparada pode ser calculado utilizando-se a Equação 2.24.

$$css_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \frac{\partial y_i(\mathbf{p})}{\partial p_j} p_j w_{ii}^{1/2}}{m}} \quad (2.24)$$

em que  $y_i$  é o  $i$ -ésimo valor prescrito pelo modelo;  $p_j$  é o  $j$ -ésimo parâmetro estimado;  $\partial y_i / \partial p_j$  é a sensibilidade do  $i$ -ésimo valor prescrito com relação ao  $j$ -ésimo parâmetro,  $w_{ii}$  é o peso da  $i$ -ésimo observação, e que pode ser definida como o inverso da variância; e  $m$  é o número de observações.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Material**

##### **3.1.1. Geologia e solos da microrregião de Viçosa**

Segunda Vieira (2000, citado por SILVA, 2016), Viçosa está localizada na Zona da Mata Mineira no Complexo da Mantiqueira, constituída por rochas do Embasamento Granito-Gnáissico indiviso, do período pré-cambriano. São formadas por gnaisses moderadamente indiferenciadas e bastantes alteradas, apresentando níveis quartzosos intercalados a níveis micáceos e a presença de intrusões de rocha metabásica às vezes concordantes ou discordantes com a foliação da rocha local.

Conforme Correa (1984), o município de Viçosa está situado na região dos Planaltos Cristalinos Rebaixados, localizado entre as escarpas da serra da Mantiqueira e o prolongamento da Serra do Caparaó. O relevo predominante é o Mar de Morros, composto por encostas, frequentemente convexo-convexas, embutido em vales de fundo chato e intensamente recortados por ravinas no formato de anfiteatros com as laterais íngremes, constituído por terraços amplos e leitos maiores bem colocados, dominados por cursos d'água de pouca expressão.

Nessa região, a ocorrência de intemperismo é bastante presente devido às condições morfoclimáticas com aspectos de zonas intertropicais úmidas, que geraram um manto de intemperismos bastante espesso, principalmente em locais com menor declividade (ROQUE, 2013).

De acordo com Silva (2016), Viçosa tem predominância de solos pobres quanto à composição química e de nutrientes, não possuindo alta produtividade agrícola. Com relação aos tipos de solo de Viçosa, Ramalho (1994), após realizar a caracterização geotécnica, descreve cinco solos: cambissolos háplicos Tb distróficos, argissolos vermelhos distróficos, latossolos vermelho-amarelos, latossolos amarelos e gleissolos háplicos.

Os cambissolos háplicos Tb distróficos são definidos por Roque (2013) como um material do horizonte de transição solo-rocha, composto por massas predominantes terrosas, friáveis e estruturadas, que mudam, em profundidade, para núcleos rochosos com níveis de decomposição variável, apresentando um comportamento heterogêneo. Esses tipos de solos possuem uma espessura que pode chegar a 5 metros de profundidade, com algumas exceções onde é possível haver espessuras de até 50 metros.

Roque (2013) destaca ainda que os argissolos vermelhos distróficos possuem uma textura areno-siltosa pouco coesiva e com baixa plasticidade, sendo muito propensa à erosão.

Esses tipos de solos raramente afloram, aparecendo frequentemente em regiões em que são realizados cortes para a construção de estradas e locais com grande declividade. Sua espessura varia de 5 a 7 metros, podendo chegar a 20 metros em alguns lugares.

Silva (2016) descreve os latossolos vermelho-amarelos como solos de granulação fina, com textura argilo-arenosa, sendo pouco susceptíveis à erosão e com plasticidade média alta. Esses tipos de solos são frequentes na região de Viçosa com uma coloração marrom e marrom avermelhada. Sua espessura está entre 3 e 6 metros, podendo variar conforme a topografia.

Os latossolos amarelos são predominantemente de granulação fina, com textura argilo-arenosa, com plasticidade média a alta, homogêneos e porosos, possuindo assim características semelhantes à do solo residual maduro, o que torna difícil a diferenciação. Apresenta coloração marrom, marrom-avermelhada e marrom-amarelada e suas maiores espessuras situam-se nas partes altas de encostas suaves, variando em função da posição nas encostas (ROQUE, 2013).

O quinto tipo de solo, conhecido como gleissolos háplicos, presente em pequenas áreas na microrregião de Viçosa, é definido por Silva (2016) como solos pouco desenvolvidos, presentes junto aos leitos dos rios e em terraços fluviais. São constituídos pelos sedimentos carregados pela água que decantam quando a velocidade do escoamento diminui.

### **3.1.2. Curvas características**

Os dados experimentais das curvas características utilizadas para se fazer os ajustes matemáticos foram obtidos de diferentes referências bibliográficas: Cândido et al (2014), Teixeira (2014), Guimarães (2013), Lisboa (2006), Custódio (2009), Machado (2005) e Botelho (2007). Todas as curvas foram determinadas a partir de ensaios realizados com solos da microrregião de Viçosa e utilizando-se de diferentes técnicas de mensuração da sucção, como mostrado na Tabela 3.1. A caracterização geotécnica completa de cada uma das amostras estudadas se encontra na Tabela 3.2.



Tabela 3.1 - Autores e método de mensuração da sucção das amostras utilizadas.

<b>Amostra</b>	<b>Referência</b>	<b>Tipo de ensaio</b>
1	Cândido et al (2014)	Centrífuga + Papel filtro
2	Cândido et al (2014)	Centrífuga + Papel filtro
3	Cândido et al (2014)	Centrífuga + Papel filtro
4	Teixeira (2014)	Centrífuga + Papel filtro
5	Teixeira (2014)	Centrífuga + Papel filtro
6	Guimarães (2013)	Papel filtro + Placa de pressão
7	Guimarães (2013)	Papel filtro + Placa de pressão
8	Guimarães (2013)	Papel filtro + Placa de pressão
9	Guimarães (2013)	Centrífuga
10	Guimarães (2013)	Centrífuga
11	Guimarães (2013)	Centrífuga
12	Guimarães (2013)	Papel filtro + Placa de pressão
13	Guimarães (2013)	Papel filtro + Placa de pressão
14	Guimarães (2013)	Centrífuga
15	Guimarães (2013)	Centrífuga
16	Lisboa (2006)	Placa de Pressão
17	Lisboa (2006)	Placa de Pressão
18	Custódio (2009)	Câmara de Richards
19	Custódio (2009)	Câmara de Richards
20	Custódio (2009)	Câmara de Richards
21	Custódio (2009)	Câmara de Richards
22	Machado (2005)	Placa de Pressão
23	Machado (2005)	Placa de Pressão
24	Machado (2005)	Placa de Pressão
25	Machado (2005)	Tensiômetro
26	Machado (2005)	Placa de Pressão
27	Machado (2005)	Placa de Pressão
28	Machado (2005)	Placa de Pressão
29	Machado (2005)	Tensiômetro
30	Botelho (2007)	Papel filtro + placa de sucção

Fonte: Do autor (2020).

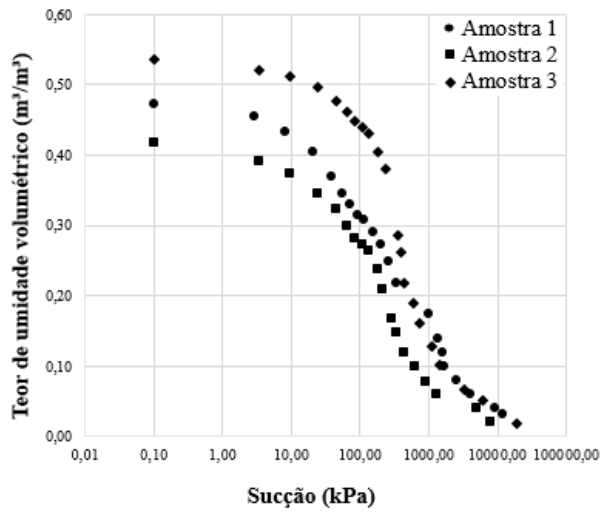
Tabela 3.2 - Classificação dos solos.

Amostra	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	SUCS
1	12	42	46	57	28	29	27,09	CH
2	66	30	4	37	20	17	27,06	SC
3	27	54	19	58	32	26	30,46	MH
4	69	28	22	38	21	17	26,55	SC
5	29	54	17	59	32	27	29,88	MH
6	71	15	14	25	16	9	27,77	SC
7	71	15	14	25	16	9	27,77	SC
8	71	15	14	25	16	9	27,77	SC
9	71	15	14	25	16	9	27,77	SC
10	71	15	14	25	16	9	27,77	SC
11	71	15	14	25	16	9	27,77	SC
12	34	16	50	60	30	30	27,17	CH
13	34	16	50	60	30	30	27,17	CH
14	34	16	50	60	30	30	27,17	CH
15	34	16	50	60	30	30	27,17	CH
16	12	48	39	73,6	60,6	13,0	26,56	MH
17	47	38	16	61,0	46,5	14,5	27,76	SM
18	26	4	70	72,0	28,0	44,0	26,58	CH
19	26	4	70	72,0	28,0	44,0	26,58	CH
20	63	22	15	39,0	25,0	14,0	26,12	CL
21	63	22	15	39,0	25,0	14,0	26,12	CL
22	27	12	61	76,9	38,7	38,2	26,5	MH
23	27	12	61	76,9	38,7	38,2	26,5	MH
24	27	12	61	76,9	38,7	38,2	26,5	MH
25	27	12	61	76,9	38,7	38,2	26,5	MH
26	37	3	61	84,9	50,0	34,9	27,7	MH
27	37	3	61	84,9	50,0	34,9	27,7	MH
28	37	3	61	84,9	50,0	34,9	27,7	MH
29	37	3	61	84,9	50,0	34,9	27,7	MH
30	48	17	35	51,0	36,0	15,0	27,7	CH

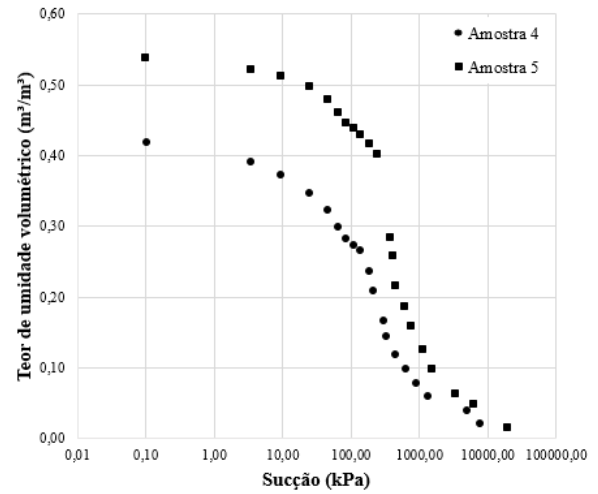
Fonte: Do autor (2020).

Nas Figuras 3.1 e 3.2 são apresentadas as curvas de retenção de água formadas pelos pontos experimentais que foram utilizadas para realizar os ajustes matemáticos através dos modelos matemáticos empregados neste trabalho.

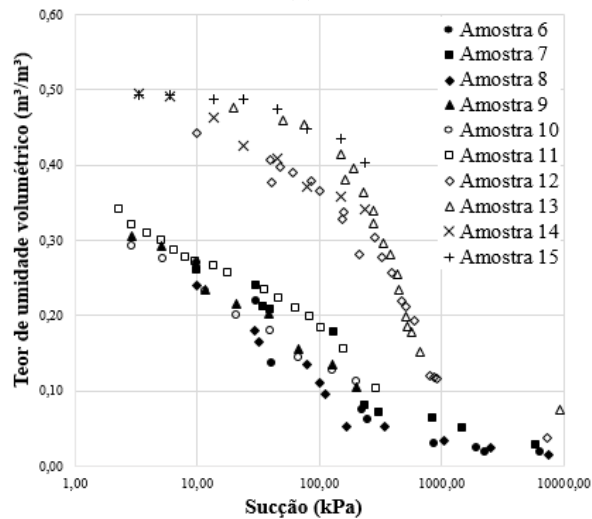
Figura 3.1 - Curva de retenção de água: a) Cândido et al (2014); b) Teixeira (2014); c) Guimarães (2013); d) Lisboa (2006); e) Custódio (2009) e f) Machado (2005).



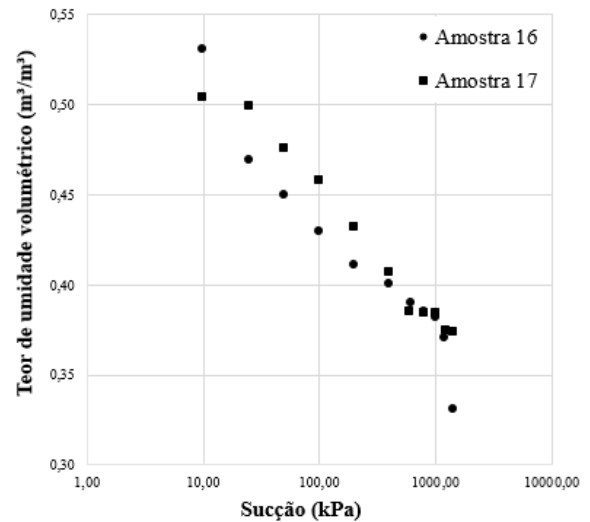
(a)



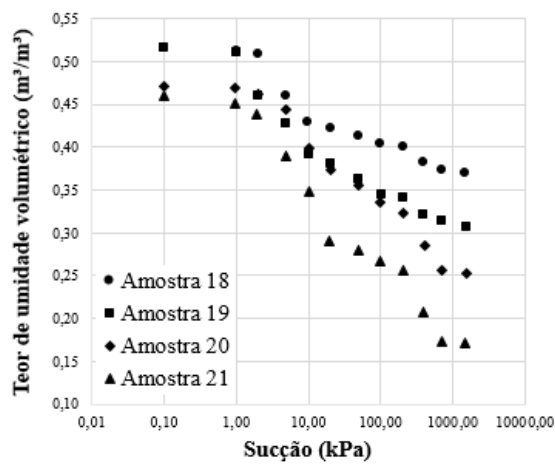
(b)



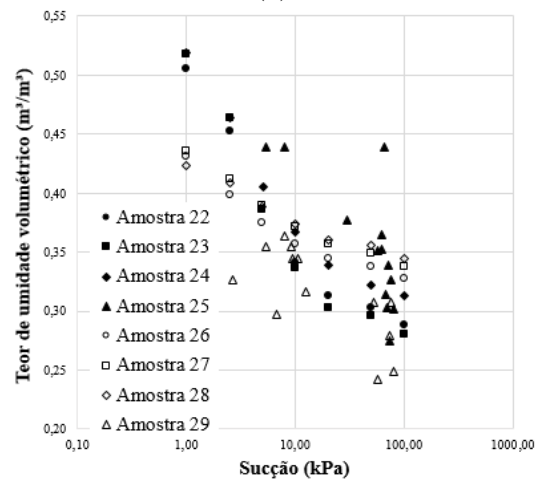
(c)



(d)



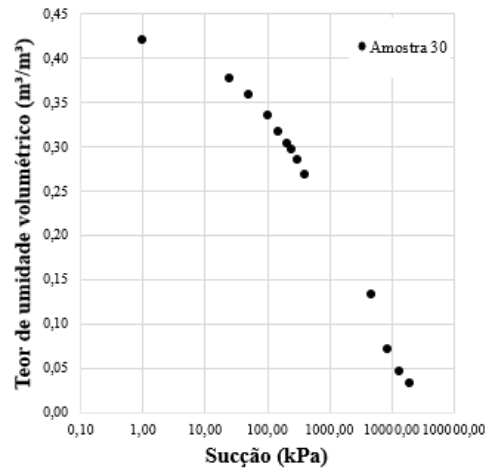
(e)



(f)

Fonte: Do autor (2020).

Figura 3.2 - Curva de retenção de água Botelho (2007).



Fonte: Do autor (2020).

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Ajuste das Curvas de Retenção de Água

Para ajustar os modelos matemáticos aos dados experimentais das curvas características fez-se necessário desenvolver 7 planilhas empregando o Microsoft Excel. Em cada uma destas implementou-se um determinado modelo matemático, sendo os modelos de Gardner (1958), Brooks e Corey (1964), Brutsaert (1967), van Genuchten (1980), McKee e Bumb (1984), McKee e Bumb (1987) e Fredlund e Xing (1994).

Para realização dos ajustes deve-se entrar inicialmente com os dados experimentais, sendo a sucção ( $\psi$ ) e os teores de umidade volumétricos ( $\theta_{v, \text{exp}}$ ). Através da utilização do valor da sucção experimental calculou-se o valor do teor de umidade volumétrico calculado ( $\theta_{v, \text{calculado}}$ ), para tal foi necessário definir valores iniciais para os parâmetros de cada modelo.

Para definir os valores iniciais do teor de umidade volumétrica saturado e residual foram usados respectivamente, os valores máximo e mínimo do teor de umidade experimental. Os demais parâmetros foram definidos de maneira aleatória.

Em seguida, para realizar o ajuste dos parâmetros (TABELA 3.3), utilizou-se a ferramenta Solver do Excel. Para utilizar tal ferramenta é fundamental definir um ponto de partida da busca, ou seja, valores iniciais para cada parâmetro. Os valores utilizados como ponto de partida foram os definidos para o cálculo do teor de umidade volumétrico calculado.

O Solver utiliza o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), que trata da solução de problemas de otimização não lineares nos quais a função objetiva pode ter não linearidades de qualquer forma, contando que essa seja diferenciável (DANTAS et al,2007).

Entretanto, a maior limitação da utilização do GRG provém do fato de que é necessário que a estimativa inicial dos parâmetros seja próxima ao valor do ponto ótimo para que se tenha uma garantia de convergência para o ponto ótimo (GOMES et al, 2017).

Para a utilização do Solver além de definir as estimativas iniciais, é necessário definir a função objetiva, nesse caso usou-se as fórmulas do erro presente na Equação 3.1, e as restrições que são particulares para cada caso. Os dados utilizados para o Solver são apresentados na Figura 3.3.

Pode-se perceber que o objetivo do Solver foi otimizar o valor dos parâmetros de ajuste das equações dos modelos matemáticos e os valores do teor de umidade volumétrico saturado e residual, para minimizar o valor do erro. Nos modelos que precisam do valor da sucção na entrada de ar e/ou o valor da sucção residual, esses valores também foram ajustados pelo solver.

$$\text{Erro} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{v, \text{ calculado}} - \theta_{v, \text{ exp}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{v, \text{ exp}})^2}} \quad (3.1)$$

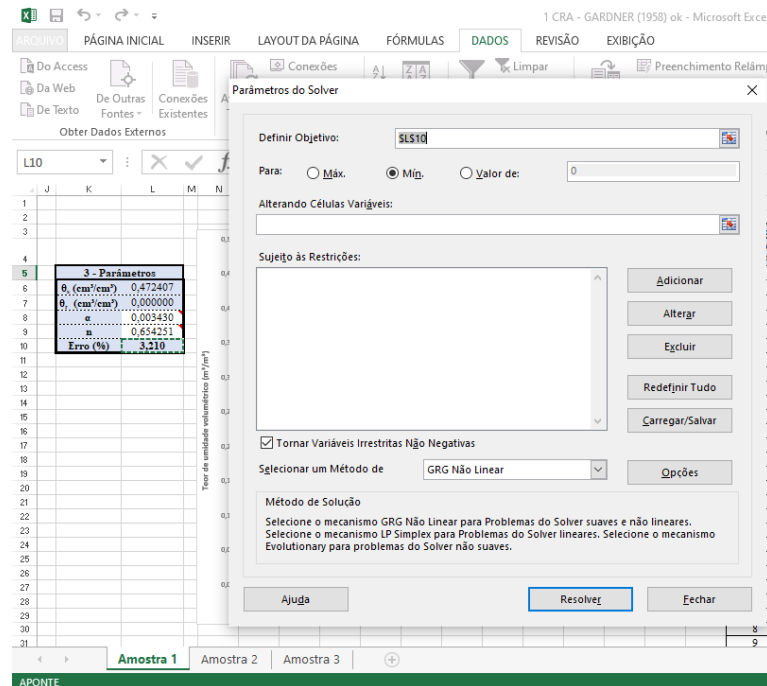
Tabela 3.3 - Métodos e parâmetros que variaram com o Solver.

<b>Método</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Parâmetros de ajuste</b>
Gardner (1958)	$\theta_s, \theta_r$	$\alpha, n$
Brooks e Corey (1964)	$\theta_s, \theta_r, \psi_a$	$\lambda$
Brutsaert (1967)	$\theta_s, \theta_r$	$a, n$
van Genuchten (1980)	$\theta_s, \theta_r$	$\alpha, n, m$
McKee e Bumb (1984)	$\theta_s, \theta_r$	$a, b$
McKee e Bumb (1987)	$\theta_s, \theta_r$	$a, b$
Fredlund e Xing (1994)	$\theta_s, \theta_r, \psi_r$	$a, m, n$

Fonte: Do Autor (2020).

Criou-se uma tabela com a sucção variando de aproximadamente 0,1 a 20000 kPa (em alguns casos a faixa de variação teve início em 0,01 kPa) e aplicou-se a fórmula do modelo matemático com os parâmetros obtidos através do Solver para toda variação da sucção, obtendo-se, assim, os valores dos teores de umidade volumétrica. Utilizando-se os dados de sucção e teor de umidade volumétrica obtidos para toda essa variação foi possível construir a curva de retenção de água ajustada. Esse processo foi realizado para todos os 7 modelos matemáticos, para cada uma das 30 amostras.

Figura 3.3 - Utilização do Solver para obtenção dos parâmetros de ajustes dos modelos.



Fonte: Do autor (2020).

### 3.2.2. Análise Estatística

Após realizar todos os ajustes necessários para todas as amostras, preparou-se uma nova planilha do Excel para colocar junto os dados referentes aos mesmos métodos. Sendo assim criou-se uma tabela para cada método contendo informações das 30 amostras como pode-se verificar na Figura 3.4, que apresenta a planilha preparada para o método de Brooks e Corey (1964).

Com as tabelas resumo pode-se preparar os gráficos de radar para facilitar a visualização do comportamento de parâmetro de ajuste dos modelos, calcular as médias ( $\bar{x}$ ) (EQUAÇÃO 3.2), os desvios-padrões (Dp) (EQUAÇÃO 3.3), as variâncias ( $\sigma^2$ ) (EQUAÇÃO 3.4), os coeficientes de variação (CV) (EQUAÇÃO 3.5) e o valor máximo e mínimo de cada parâmetro.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.2)$$

$$Dp = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3.3)$$

$$\sigma^2 = Dp^2 \quad (3.4)$$

$$CV = \frac{Dp}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Figura 3.4 - Exemplo do tratamento dos dados obtidos no ajuste dos métodos.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		Amostrs	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\psi_a$ (kPa)	$\lambda$	Erro (%)	
3		1	0,440544	0,000010	30,085606	0,318819	8,701	
4		2	0,381615	0,000010	39,553533	0,426409	9,451	
5		3	0,486309	0,000010	126,202637	0,587122	7,182	
6		4	0,381880	0,000000	40,272953	0,431475	9,526	
7		5	0,480532	0,000010	163,618933	0,697834	7,411	
8		6	0,269819	0,000010	16,788224	0,542122	10,288	
9		7	0,260109	0,000010	23,707533	0,401230	11,321	
10		8	0,195556	0,022168	55,227246	1,222985	14,743	
11		9	0,306010	0,000010	4,408389	0,242577	4,719	
12		10	0,292189	0,000000	4,293010	0,242386	1,872	
13		11	0,340460	0,000000	2,546843	0,170798	5,964	
14		12	0,393431	0,000000	124,379918	0,498768	8,469	
15		13	0,462140	0,026301	134,113961	0,615887	6,833	
16		14	0,492355	0,219732	8,149809	0,239130	1,050	
17		15	0,489962	0,000000	31,966738	0,091551	1,070	
18		16	0,516653	0,000010	9,727757	0,072909	3,043	
19		17	0,504289	0,000010	23,098323	0,074753	0,977	
20		18	0,516379	0,000010	0,581748	0,046666	2,636	
21		19	0,516236	0,000010	0,399524	0,069369	3,047	
22		20	0,467108	0,000010	2,514302	0,096022	2,279	
23		21	0,455076	0,000010	1,469088	0,139304	4,021	
24		22	0,497332	0,000010	0,998990	0,135555	4,315	
25		23	0,511577	0,000010	1,003706	0,150753	5,003	
26		24	0,513520	0,000010	0,931508	0,121308	3,549	
27		25	0,727638	0,000000	0,091719	0,116626	10,091	
28		26	0,431247	0,315615	1,266638	0,485962	0,413	
29		27	0,440422	0,289364	0,939106	0,246259	0,690	
30		28	0,422916	0,332050	1,691936	0,445151	0,496	
31		29	0,340672	0,276355	10,658000	2,530195	7,248	
32		30	0,371895	0,000010	120,806508	0,352092	9,049	
33								
34								

Fonte: Do autor (2020).

### 3.2.3. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada com o objetivo de determinar quais parâmetros são relevantes e suas correlações. Para isso, calculou-se o coeficiente de correlação e o índice de sensibilidade para cada parâmetro dos modelos. Além dessas duas análises, fez-se uma observação da variação do valor do erro em função da variação dos parâmetros.

Para realizar o cálculo do coeficiente de correlação, foi utilizado o comando CORREL do Excel, que calcula automaticamente a correlação linear entre dois parâmetros. Para o cálculo do coeficiente de sensibilidade de escala comparada (css), foi feita a variação de um parâmetro por vez, mantendo os demais constantes. Foram feitas 5 simulações diferentes para cada parâmetro, com alteração dos parâmetros de 5 % entre cada simulação. Com o resultado da função objetiva (erro) para cada simulação, foi possível calcular o valor da variância e do

peso de cada parâmetro. Com esses dados calculados foi possível encontrar o valor do css (EQUAÇÃO 2.24).

Para finalizar a análise de sensibilidade, fez-se uma tabela contendo os valores do erro quando dois parâmetros variam simultaneamente com o objetivo de observar de mostrar a sensibilidade de cada parâmetro. Para construir a tabela citadas acima, foram utilizados os dados referentes à amostra 1.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Ajuste das Curvas de Retenção

A Tabela 4.1 apresenta os valores encontrados para as funções objetivas para cada amostra e modelo.

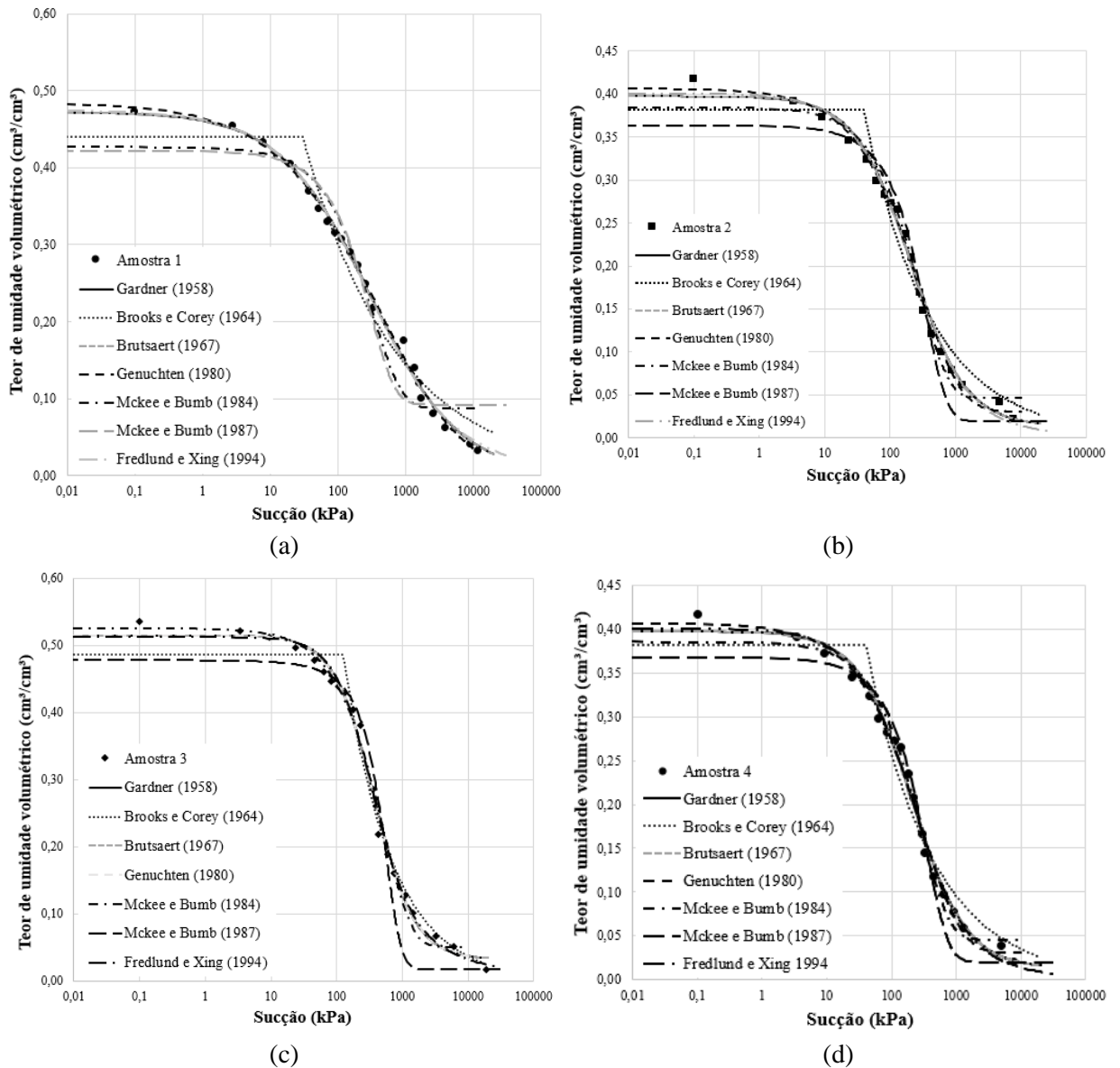
Tabela 4.1 - Valores obtidos para a função objetiva.

	Gardner (1958)	Brooks e Corey (1964)	Brutsaert (1967)	Van Genuchten (1980)	McKee e Bump (1984)	McKee e Bump (1987)	Fredkund e Xing (1994)
Amostra 1	3,210	8,701	3,210	2,870	11,081	12,047	3,403
Amostra 2	4,334	9,451	4,334	3,588	5,558	10,028	4,248
Amostra 3	3,982	7,182	3,982	3,982	4,586	11,197	3,882
Amostra 4	4,415	9,526	4,415	3,699	5,531	9,365	4,328
Amostra 5	4,965	7,411	4,965	4,965	5,470	9,130	4,866
Amostra 6	11,088	10,288	11,088	11,226	16,118	18,847	8,671
Amostra 7	10,071	11,321	10,071	9,451	9,815	9,021	10,275
Amostra 8	8,037	14,743	8,037	7,977	9,614	13,237	8,138
Amostra 9	3,962	4,719	3,962	3,863	6,536	7,727	3,880
Amostra 10	2,045	1,872	1,696	1,744	3,822	14,719	2,140
Amostra 11	3,843	5,964	3,843	3,414	5,838	6,848	4,300
Amostra 12	5,311	8,469	5,311	4,553	4,502	4,607	5,674
Amostra 13	3,280	6,833	3,280	2,662	5,361	2,555	4,313
Amostra 14	1,133	1,050	1,133	1,189	1,390	1,823	1,667
Amostra 15	0,946	1,070	0,944	0,948	0,952	1,020	0,943
Amostra 16	3,166	3,043	3,128	3,030	4,692	6,065	3,420
Amostra 17	1,394	0,977	1,633	1,407	0,993	1,604	1,383
Amostra 18	2,350	2,636	2,350	2,694	3,056	5,966	3,268
Amostra 19	3,349	3,047	3,858	3,835	4,430	10,105	1,627
Amostra 20	2,862	2,279	2,862	2,975	5,824	8,344	3,288
Amostra 21	5,237	4,021	5,237	5,512	8,996	13,254	5,795
Amostra 22	0,865	4,315	0,865	0,619	1,688	14,554	0,923
Amostra 23	2,866	5,003	1,111	0,828	4,784	16,779	1,215
Amostra 24	0,854	3,549	0,502	0,240	3,475	13,414	0,535
Amostra 25	9,460	10,091	9,460	9,421	9,551	9,303	9,417
Amostra 26	0,482	0,413	0,531	0,413	2,018	6,733	0,370
Amostra 27	1,661	0,690	0,619	0,380	1,459	6,042	1,657
Amostra 28	1,418	0,496	1,305	0,494	1,458	4,860	0,473
Amostra 29	7,669	7,248	7,467	7,681	7,662	7,752	7,238
Amostra 30	3,840	9,049	3,840	2,424	8,700	9,113	4,816

Fonte: Do autor (2020).

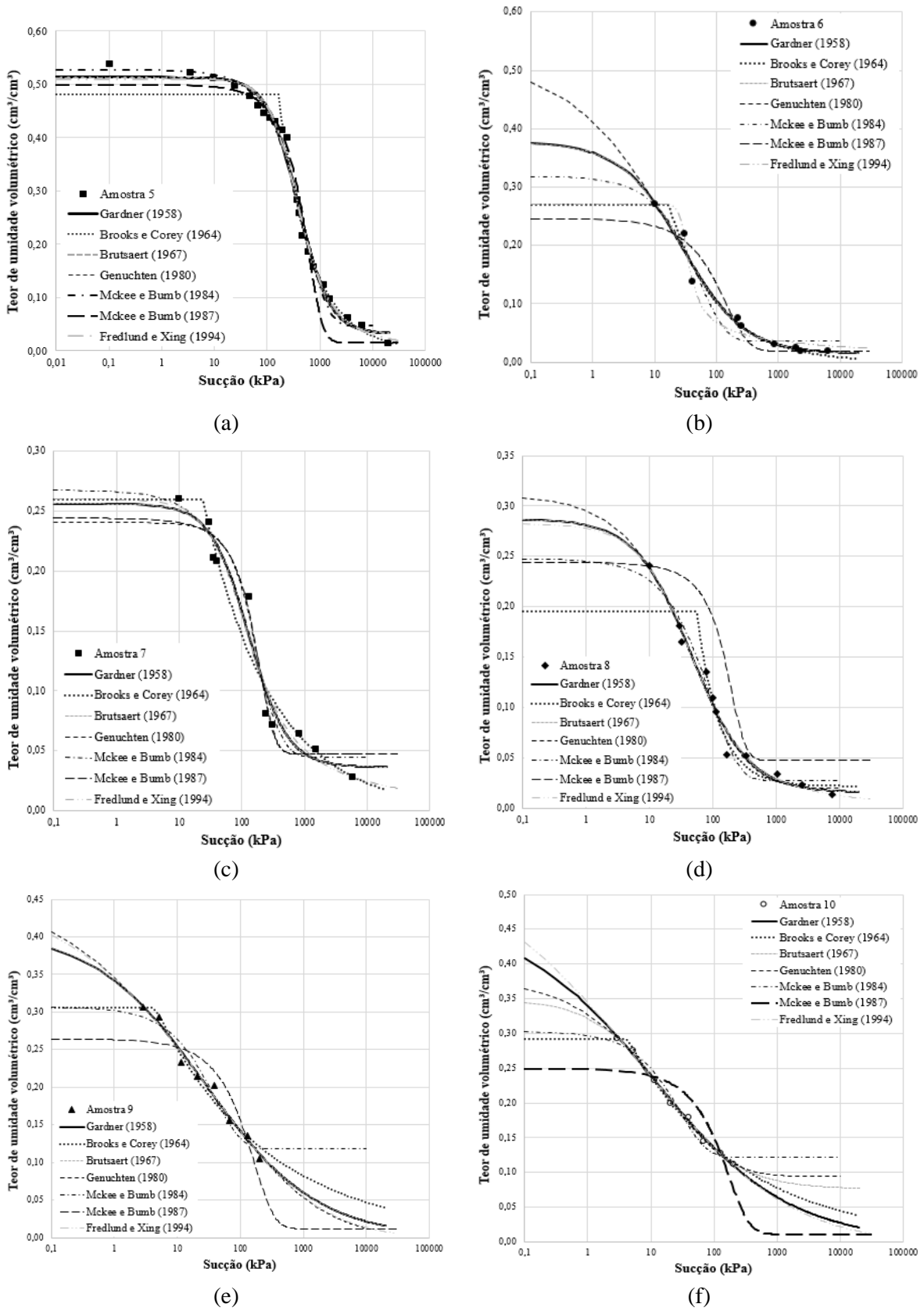
A seguir nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 encontram-se os gráficos de cada amostra com as curvas de ajuste de cada modelo. A escolha de representar todas as curvas de ajuste em apenas um gráfico, foi realizada com o objetivo de facilitar a comparação entre os modelos de ajuste, identificando assim quais foram os modelos mais adequados para cada amostra utilizada.

Figura 4.1 - Curvas de retenção de água ajustadas: (a) Amostra 1; (b) Amostra 2; (c) Amostra 3 e (d) Amostra 4.



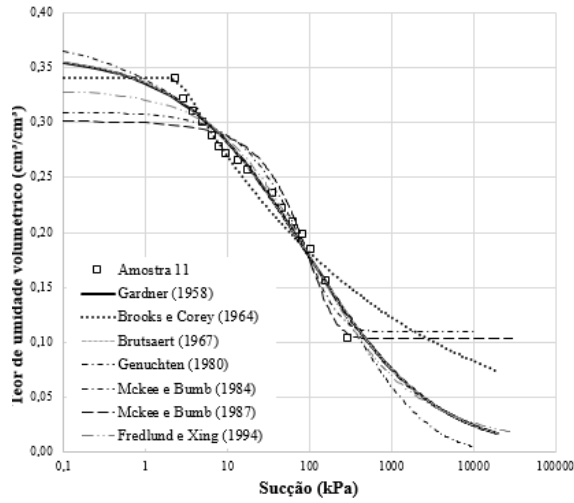
Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.2 - Curvas de retenção de água ajustadas. (a) Amostra 5; (b) Amostra 6; (c) Amostra 7; (d) Amostra 8; (e) Amostra 9; (f) Amostra 10.

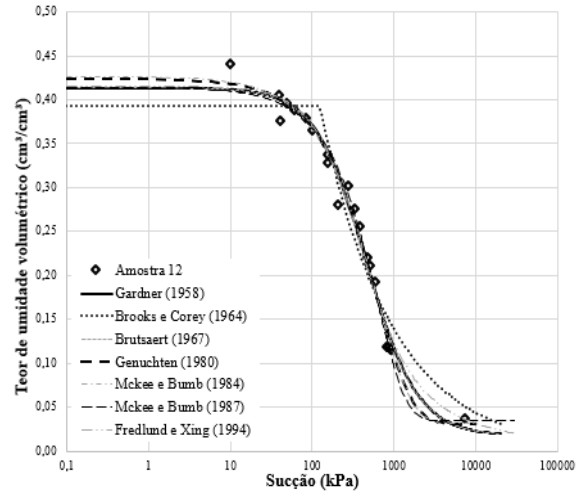


Fonte: Do autor (2020).

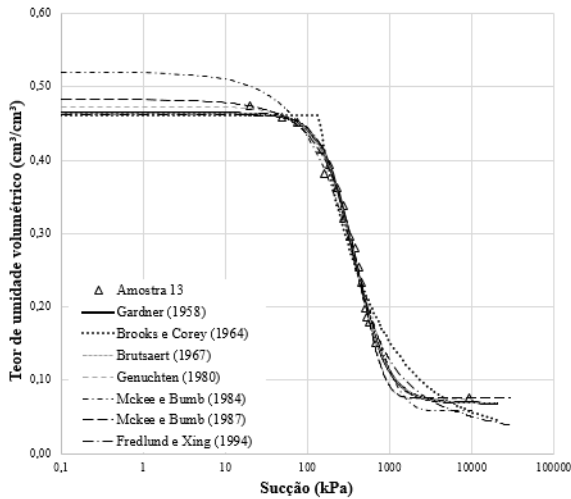
Figura 4.3 - Curvas de retenção de água ajustadas. (a) Amostra 11; (b) Amostra 12; (c) Amostra 13; (d) Amostra 14; (e) Amostra 15; (f) Amostra 16.



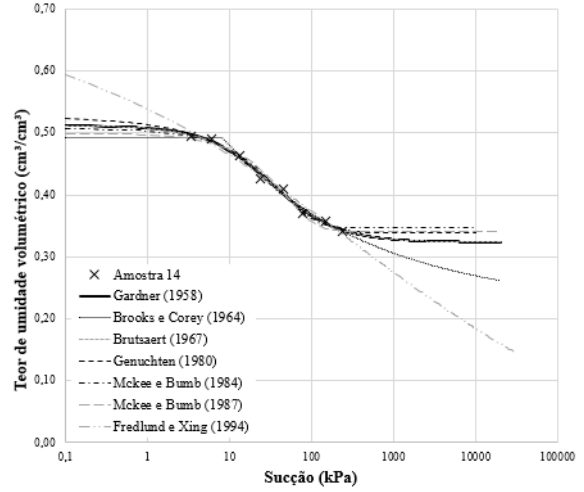
(a)



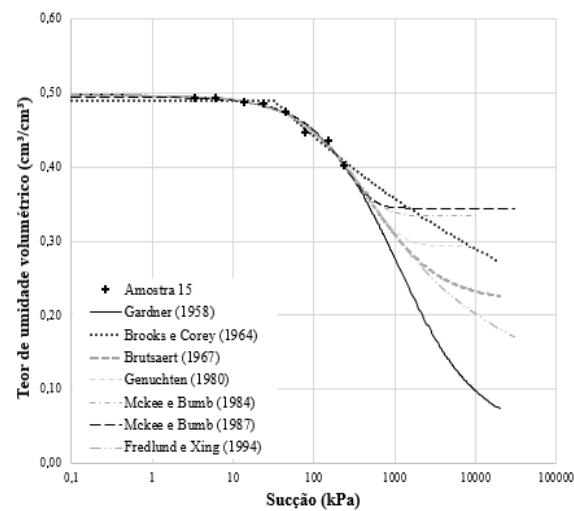
(b)



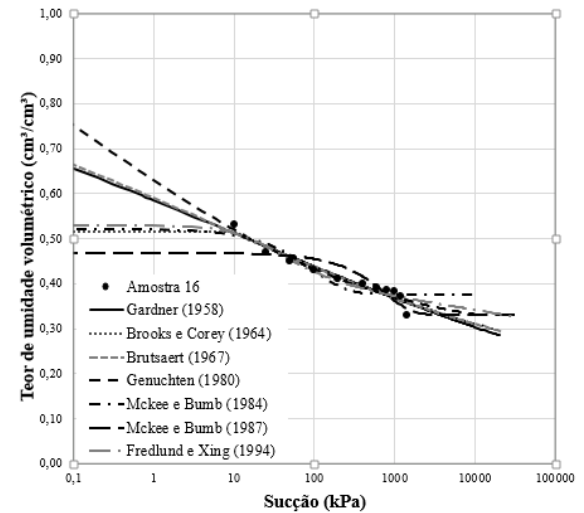
(c)



(d)



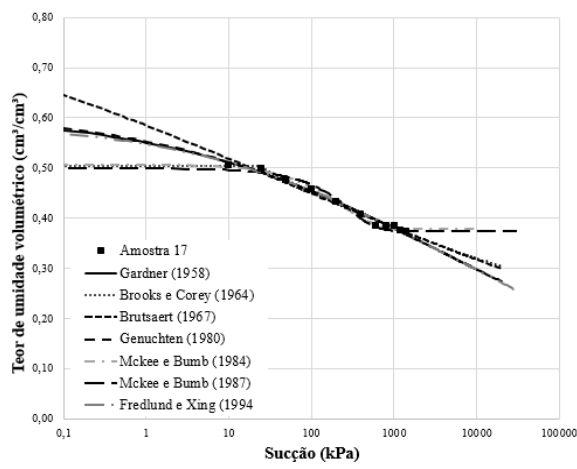
(e)



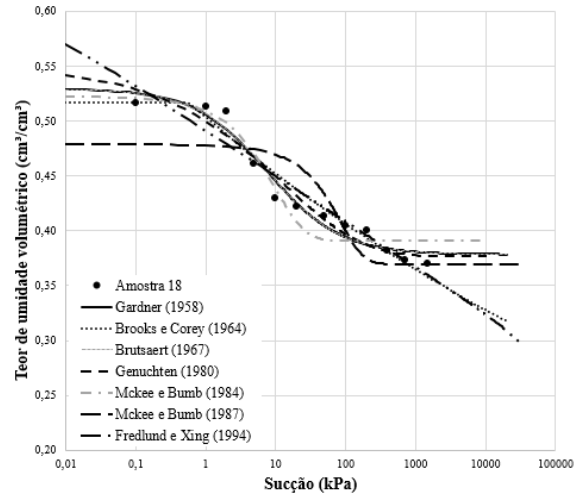
(f)

Fonte: Do autor (2020).

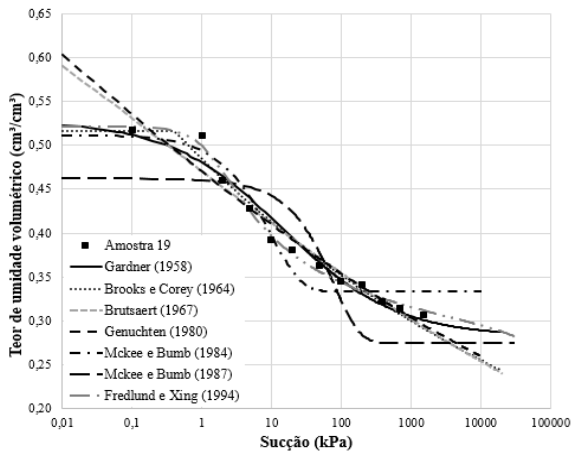
Figura 4.4 - Curvas de retenção de água ajustadas. (a) Amostra 17; (b) Amostra 18; (c) Amostra 19; (d) Amostra 20; (e) Amostra 21; (f) Amostra 22.



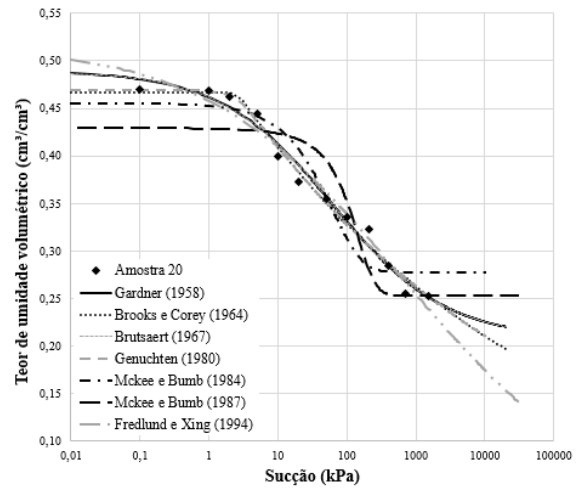
(a)



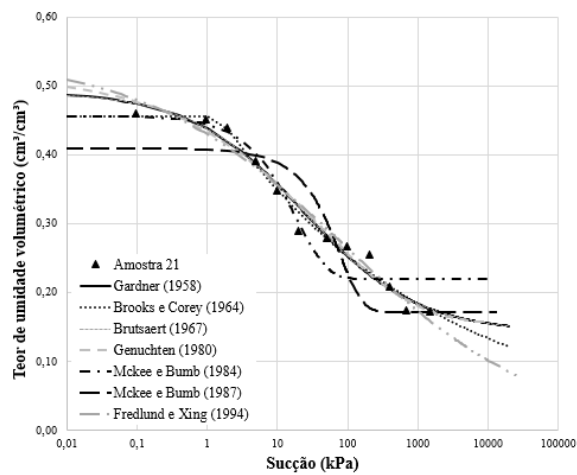
(b)



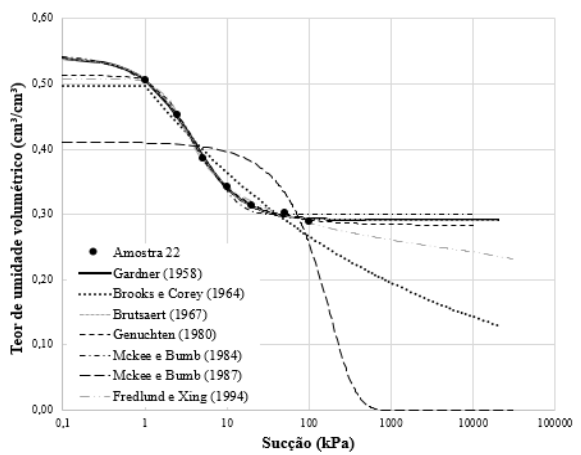
(c)



(d)



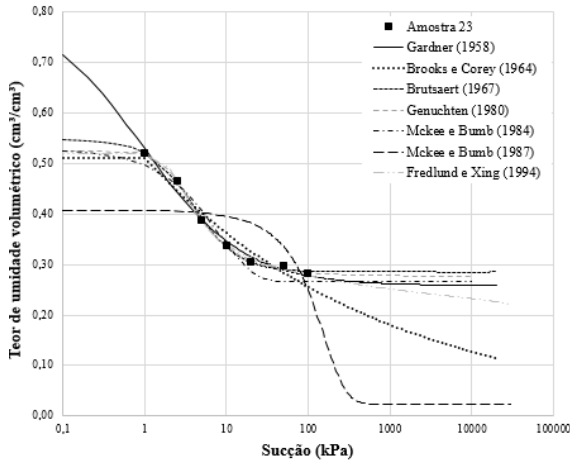
(e)



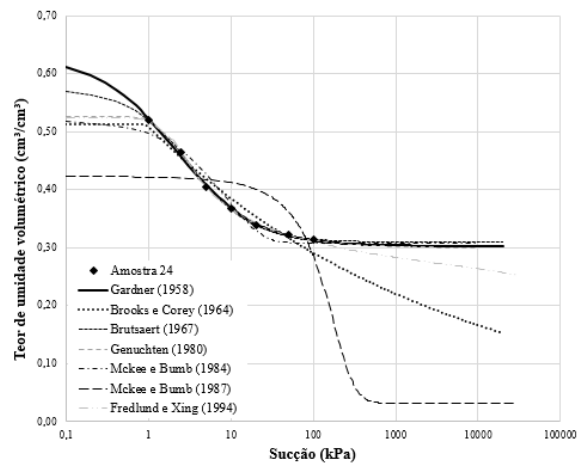
(f)

Fonte: Do autor (2020).

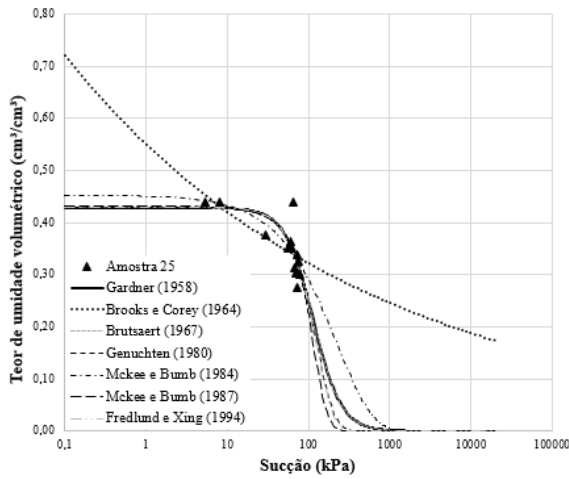
Figura 4.5 - Curvas de retenção de água ajustadas. (a) Amostra 23; (b) Amostra 24; (c) Amostra 25; (d) Amostra 26; (e) Amostra 27; (f) Amostra 28.



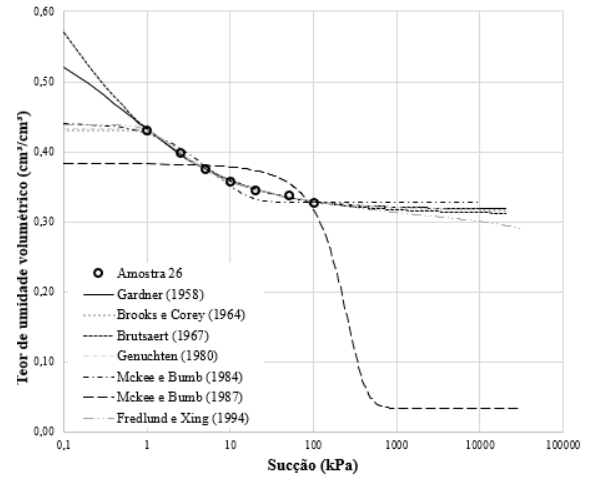
(a)



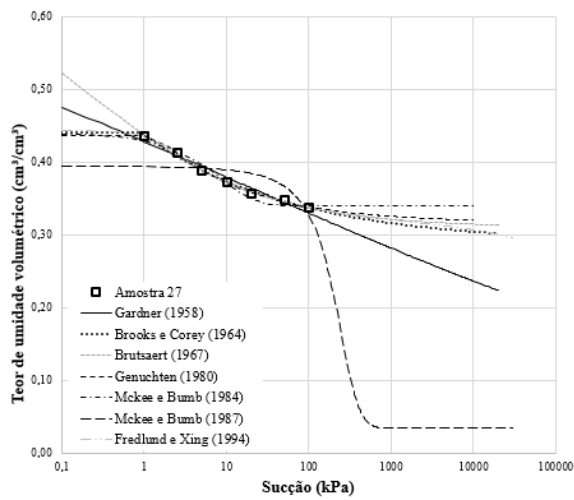
(b)



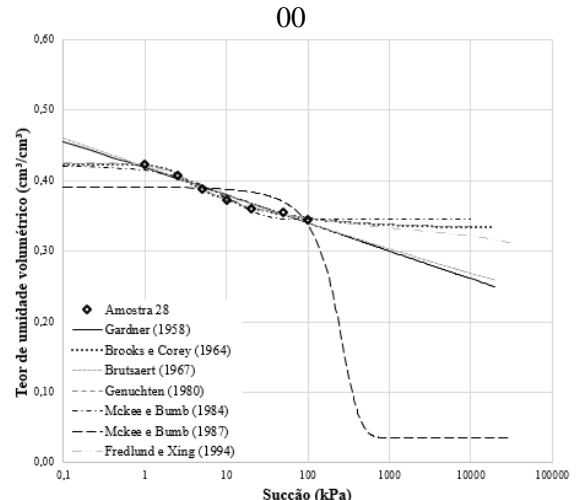
(c)



(d)



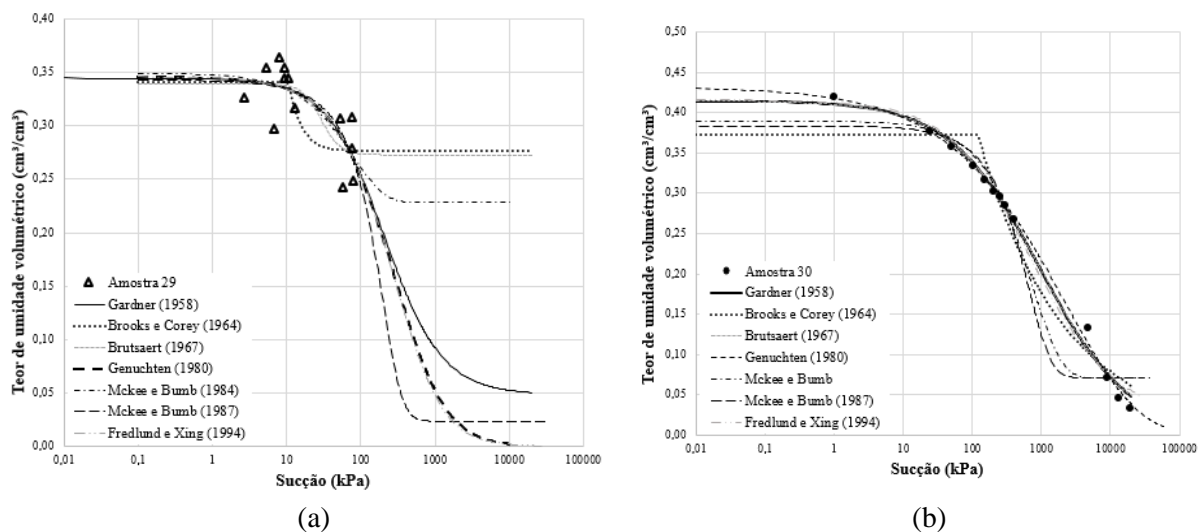
(e)



(f)

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.6 - Curvas de retenção de água ajustadas. (a) Amostra 29; (b) Amostra 30.



Fonte: Do autor (2020).

Com base nos resultados apresentados anteriormente, pode-se perceber que os métodos que melhor se ajustam para os solos da microrregião de Viçosa são os métodos de Gardner (1958), Brutsaert (1967), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994). As amostras de solos classificados como areia argilosa, que foram ensaiados utilizando-se o método do papel filtro mais a placa de pressão (Amostras 6, 7 e 8), e os solos classificados como silte, ensaiados com o uso do método do tensiômetro, apresentaram os piores resultados para esses quatro modelos, mas ainda assim os resultados foram melhores que os demais métodos.

O método de Brooks e Corey (1964), para a maioria das amostras, apresentou um bom ajuste; entretanto, para os dados experimentais obtidos por mais de um método de ensaio, esse modelo produziu valores mais altos de erro, não se ajustando muito bem.

Os dois modelos de ajustes desenvolvidos por McKee e Bumb apresentaram os piores ajustes para a grande parte das amostras; todavia, para as amostras de número 14, 15, 17, 22, 26, 27 e 28, o modelo de McKee e Bumb (1984) apresentou resultados bastante satisfatórios. No caso do método McKee e Bumb (1987), os melhores ajustes foram obtidos para as amostras 13, 14, 15 e 17.

Para os dados experimentais obtidos por meio da técnica de tensiômetros, os valores da função objetivo para cada modelo matemático foram maiores que 7 %, isso devido ao fato de que o tensiômetro forneceu pontos dispersos para os casos analisados, mas as curvas conseguiram modelar de uma maneira satisfatória os dados. Sendo assim, as amostras 25 e 29, junto com as amostras 6,7 e 8, apresentaram os piores valores de ajustes para todos os modelos matemáticos utilizados.

## 4.2. Análises Estatísticas

A Tabela 4.2 apresenta a análise estatística dos parâmetros de ajuste dos modelos utilizados neste trabalho.

Tabela 4.2 - Análise estatística dos parâmetros de ajuste.

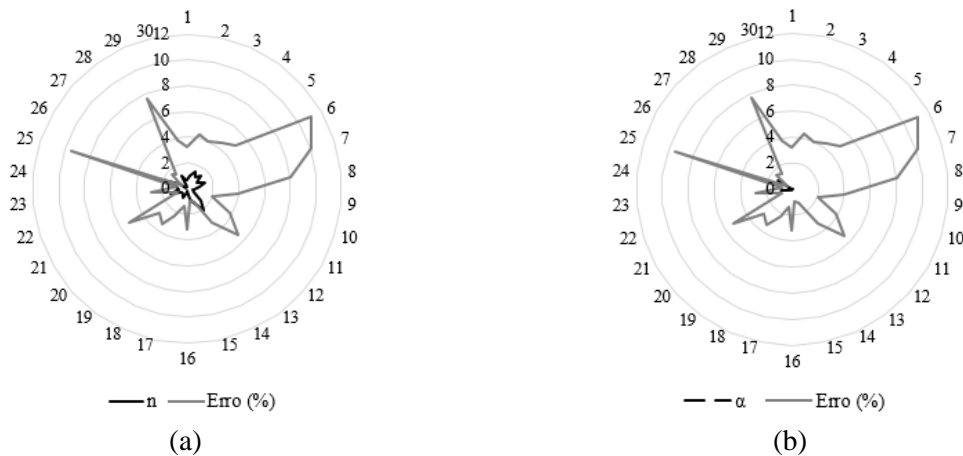
Método	Parâmetros	Média	Desvio-Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Mínimo	Máximo
Gardner (1958)	$\alpha$	0,137	0,347	0,121	253,065	0,0002778	1,671
	n	0,894	0,548	0,300	61,289	0,1043663	2,518
Brooks e Corey (1964)	$\lambda$	0,394	0,468	0,219	118,930	0,0466656	2,530
Brutsaert (1967)	a	146,793	211,625	44785,070	144,166	0,0366933	949,834
	n	1,008	0,717	0,515	71,179	0,0803274	3,383
Genuchten (1980)	$\alpha$	0,122	0,247	0,061	202,834	0,0000011	0,806
	n	1,598	1,907	3,637	119,321	0,0636352	8,027
	m	8,900	12,309	151,511	138,305	0,0603381	56,819
McKee e Bumb (1984)	a	55,514	24,925	621,248	44,899	15,4324598	106,281
	b	177,664	204,519	41828,149	115,116	5,1978586	722,048
McKee e Bumb (1987)	a	86,828	107,827	11626,674	124,185	-57,1670782	420,646
	b	-145,186	114,319	13068,946	-78,740	-474,2356262	-28,240
Fredlund e Xing (1994)	a	180,328	153,167	23460,249	84,938	1,1680349	524,477
	m	3,226	7,394	54,667	229,217	0,0851367	42,135
	n	1,622	1,643	2,698	101,246	0,0740288	7,896

Fonte: Do autor (2020).



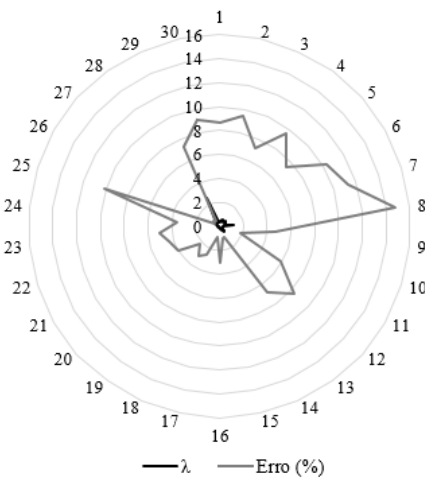
Ao realizar uma análise dos dados estatísticos presentes na Tabela 4.2, pode-se perceber que a maioria dos parâmetros de ajustes possui uma variação alta, refletindo em valores grandes para o desvio-padrão e para a variância. Quando se observa os valores encontrados para o coeficiente de variação, essa dispersão dos dados fica ainda mais clara. Apenas para cinco parâmetros de ajuste o valor do CV foi inferior a 100 %, sendo apenas um desses menor que 50 %. Isso significa que para 66,66 % dos parâmetros o valor do desvio-padrão foi superior à média. Essa amplitude na faixa de variação fica mais clara ainda quando se analisam os valores mínimo e máximo assumidos pelos parâmetros encontrados na Tabela 4.2 e nas figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13.

Figura 4.7 - Gráfico de radar dos parâmetros de ajuste do método de Gardner (1958): a) parâmetro  $n$  e erro, e b) parâmetro alfa e o erro.



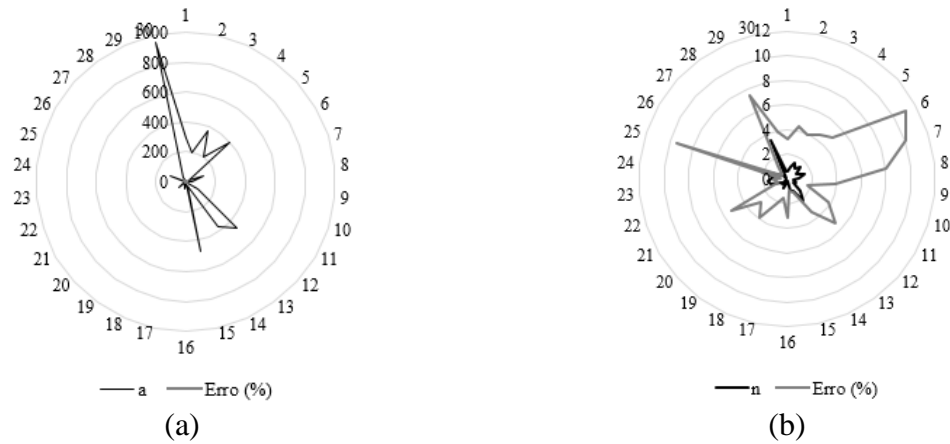
Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.8 - Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de Brooks e Corey (1964).



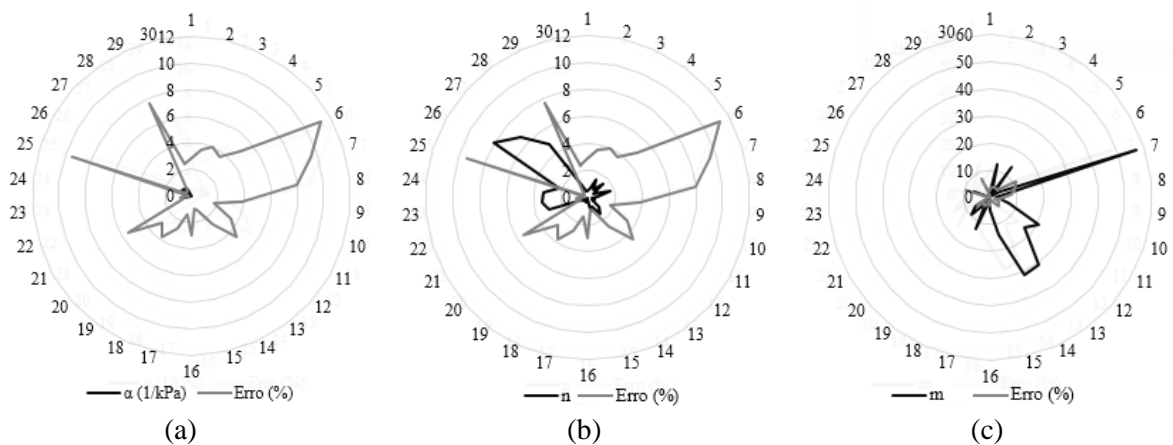
Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.9 -Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de Brutsaert (1967). (a) parâmetro a; (b) parâmetro n.



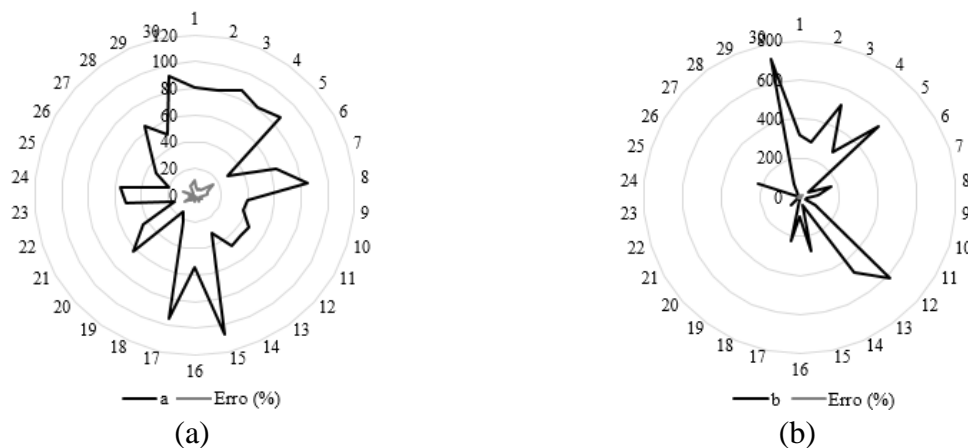
Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.10 - Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de Genuchten (1980). (a) parâmetro alfa; (b) parâmetro n; (c) parâmetro m.



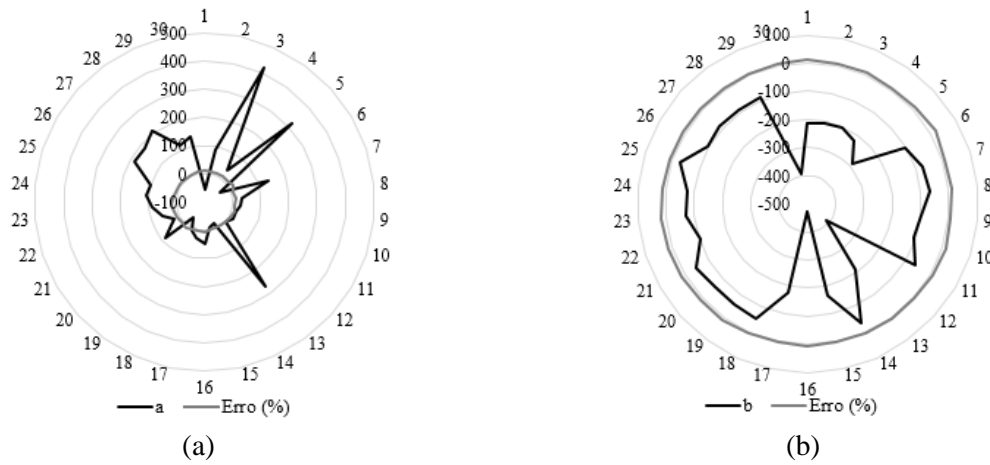
Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.11 - Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de Mckee e Bumb (1984). (a) parâmetro a; (b) parâmetro b.



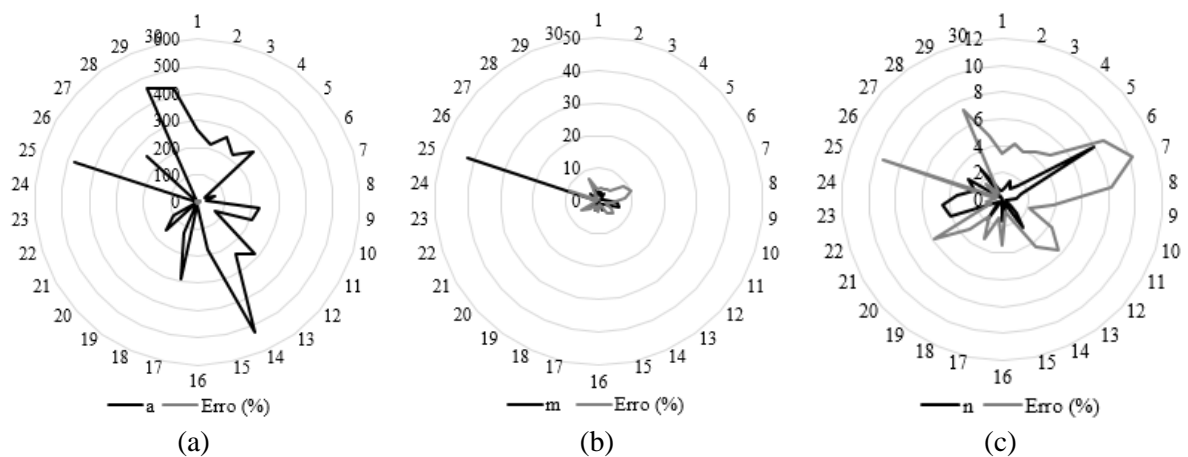
Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.12 - Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de McKee e Bumb (1987).  
(a) parâmetro a; (b) parâmetro b.



Fonte: Do autor (2020).

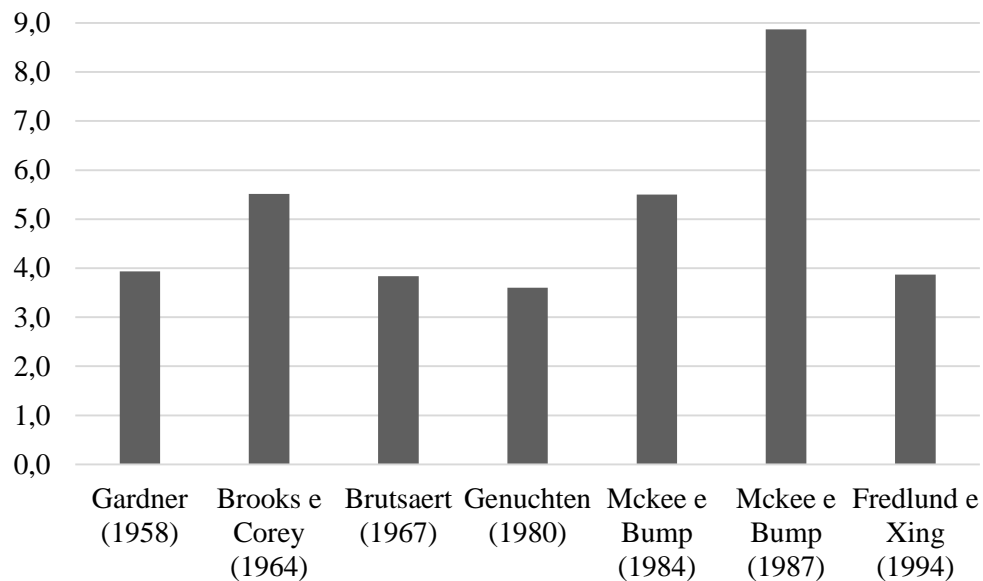
Figura 4.13 - Gráfico de radar do parâmetro de ajuste do método de Fredlund e Xing (1994). (a) parâmetro a; (b) parâmetro m; (c) parâmetro n.



Fonte: Do autor (2020).

Com os gráficos de radar, foi possível comparar os parâmetros de ajuste e seus respectivos erros. Pode-se perceber que os valores do erro para a maioria dos modelos variam entre 0,307 e 15 %. Gerscovich (2001) encontrou em seu trabalho uma faixa de variação de erro entre 0,7 e 15 % para os métodos por ela empregado, a autora adota o critério que valores inferiores a 4 % são considerados aceitáveis. Pode-se ver na Figura 4.14 os valores médios da função objetiva de cada modelo, com isso pode-se ver que para os modelos de Gardner (1958), Brutsaert (1967), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) o valor médio da função objetiva são inferiores a 4 % comprovando assim que tais métodos possuem o melhor ajuste para os solos estudados.

Figura 4.14 - Valor médio da função objetiva de cada modelo.



Fonte: Do autor (2020).

Na Figura 4.12 os gráficos relativos ao modelo de McKee e Bumb (1987), o erro parece aproximadamente constante. Isso acontece devido à grande variação dos parâmetros, já que este modelo foi o que se mostrou mais ineficiente para o ajuste dos solos de Viçosa.

Nas Figuras 4.7-a, 4.8, 4.9-a, 4.10-a, 4.11-b e 4.13-a, nota-se grande diferença nas escalas comparadas, o que dificulta a análise; porém, percebe-se que nos casos em que a escala maior corresponde aos parâmetros de ajuste (FIGURAS 4.9-a, 4.11-b e 4.13-a) a linha do erro converge para um ponto no centro do gráfico, mostrando a baixa dispersão dos dados.

### 4.3. Análise de Sensibilidade

Nesta seção, será apresentada a análise de sensibilidade para todos os parâmetros dos modelos empregados no trabalho, com exceção do modelo de Brooks e Corey (1964). Esse modelo apresenta apenas um parâmetro de ajuste, não havendo necessidade de correlacionar a outros parâmetros. Sendo assim, seu ajuste é fundamental.

Tabela 4.3 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de Gardner (1958).

	$\alpha$	n
$\alpha$	1	-0,12545261
n	-0,12545261	1

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.4 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de Brutsaert (1967).

	a	n
a	1	0,139933425
n	0,139933425	1

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.5 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de van Genuchten (1980).

	$\alpha$	n	m
$\alpha$	1	0,928110995	-0,349210534
n	0,928110995	1	-0,218266314
m	-0,349210534	-0,218266314	1

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.6 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de McKee e Bumb (1984).

	a	b
a	1	0,548648247
b	0,548648247	1

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.7 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de McKee e Bumb (1987).

	a	b
a	1	-0,14988676
b	-0,14988676	1

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.8 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros do método de Fredlund e Xing (1994).

	a	m	n
a	1	0,458937801	-0,461420325
m	0,458937801	1	-0,069626512
n	-0,461420325	-0,069626512	1

Fonte: Do autor (2020).

Conforme indicado nas tabelas, todos os parâmetros dos modelos são classificados como não correlacionados, pois assumem valores inferiores em módulo a 0,9, com exceção dos parâmetros  $\alpha$  e  $n$  representados na Tabela 4.5. Isso indica que esses dois parâmetros não podem ser determinados de maneira independente com as observações usadas na regressão.

Também é possível analisar que os parâmetros  $a$  e  $n$  do modelo Brutsaert (1967),  $\alpha$  e  $n$  do modelo de van Genuchten (1980),  $a$  e  $b$  do modelo de McKee e Bumb (1984) e  $a$  e  $m$  do modelo de Fredlund e Xing (1994) possuem uma relação direta entre si. As demais combinações mostraram relações indireta entre os parâmetros.

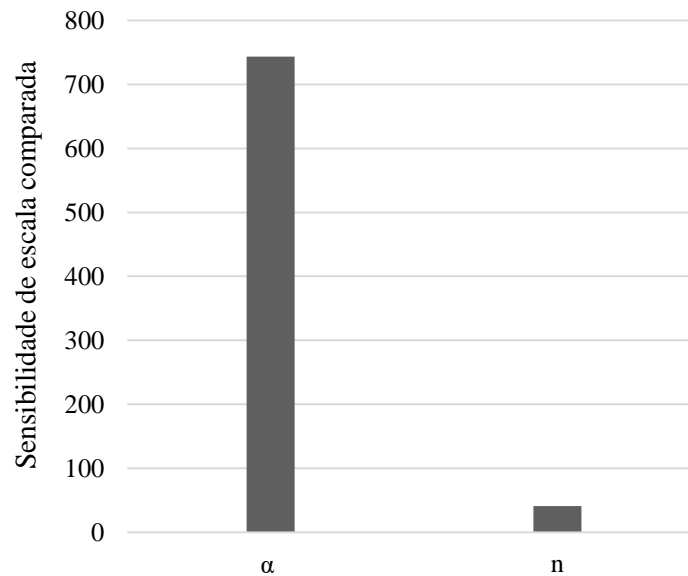
A seguir, tem-se a matriz de sensibilidade, que mostra a alteração que o erro sofre quando se variam os parâmetros, e o gráfico, que disponibiliza a sensibilidade de escala comparada para cada modelo.

Tabela 4.9 - Sensibilidade para o modelo de Gardner (1958).

		n					
		0,654259	0,686972	0,721321	0,757387	0,795256	0,835019
$\alpha$	0,00343	3,210	3,506	5,313	9,025	14,228	20,370
	0,00360	20,210	21,332	23,465	26,366	29,645	32,841
	0,00378	32,248	32,782	33,776	35,110	36,676	38,403
	0,00397	38,760	39,119	39,806	40,757	41,887	43,107
	0,00417	44,973	45,217	45,695	46,385	47,234	48,106
	0,00438	50,997	51,127	51,359	51,640	51,895	52,059

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.15 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de Gardner (1958).



Fonte: Do autor (2020).

Para o modelo de Gardner (1958), quando se analisa a Figura 4.15, percebe-se que o parâmetro  $\alpha$ , quando comparado ao  $n$ , é mais sensível, ou seja, qualquer variação no seu valor ocasiona uma mudança significativa no erro gerado pelo modelo. O parâmetro  $n$  também

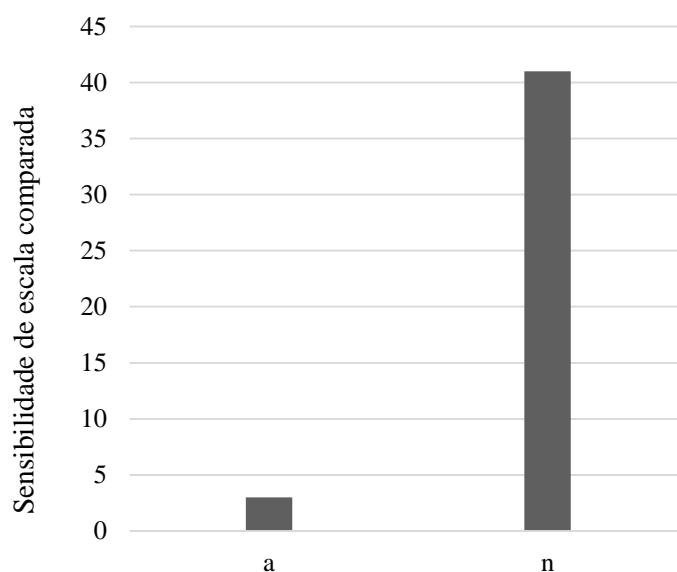
interfere no resultado, mas são necessárias maiores variações. Na Tabela 4.9, fica evidente esse comportamento. Assim, percebe-se que o erro varia muito mais entre linhas do que entre colunas, sendo o parâmetro  $\alpha$  muito menor que o  $n$ . Em consequência, a variação do primeiro é muito menor que a do segundo.

Tabela 4.10 - Sensibilidade para o modelo de Brutsaert (1967).

		n					
		0,654255	0,686967	0,721316	0,757381	0,795250	0,835013
a	291,55907	3,210	3,506	5,313	9,025	14,228	20,370
	306,13703	20,210	21,332	23,465	26,366	29,645	32,841
	321,44388	32,248	32,782	33,776	35,110	36,676	38,403
	337,51607	38,760	39,119	39,806	40,757	41,887	43,107
	354,39188	44,973	45,217	45,695	46,385	47,234	48,106
	372,11147	50,997	51,127	51,359	51,640	51,895	52,059

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.16 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de Brutsaert (1967).



Fonte: Do autor (2020).

Para o modelo de Brutsaert (1967), o parâmetro mais sensível é o  $n$ . Nesse caso, não foi possível fazer a análise através da Tabela 4.10, pois a diferença de magnitude entre os parâmetros atrapalha a visualização, dando a falsa impressão de que o parâmetro  $a$  é o mais sensível. Sendo assim, só é possível perceber a sensibilidade dos parâmetros através da Figura 4.16, que mostra que o parâmetro mais importante é o  $n$ .

Tabela 4.11 - Sensibilidade para os parâmetros  $\alpha$  e  $n$  do modelo de van Genuchten (1980).

		n					
		0,526973	0,553322	0,580988	0,610037	0,640539	0,672566
$\alpha$	0,00066	2,870	3,569	5,084	6,893	8,808	10,761
	0,00069	3,003	3,271	4,571	6,291	8,162	10,090
	0,00073	3,409	3,248	4,229	5,800	7,596	9,482
	0,00076	4,005	3,505	4,103	5,451	7,131	8,950
	0,00080	4,719	3,988	4,211	5,272	6,786	8,508
	0,00084	5,506	4,628	4,538	5,281	6,581	8,171

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.12 - Tabela de sensibilidade para os parâmetros  $\alpha$  e  $m$  do modelo de Genuchten (1980).

		m					
		1,998870	2,098814	2,203754	2,313942	2,429639	2,551121
$\alpha$	0,00066	2,870	3,607	5,285	7,275	9,376	11,520
	0,00069	3,003	4,252	6,109	8,163	10,292	12,451
	0,00073	3,409	4,998	6,967	9,066	11,216	13,387
	0,00076	4,005	5,807	7,849	9,979	12,145	14,325
	0,00080	4,719	6,654	8,746	10,899	13,078	15,265
	0,00084	5,506	7,527	9,655	11,826	14,014	16,206

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.13 - Sensibilidade para os parâmetros  $n$  e  $m$  do modelo de Genuchten (1980).

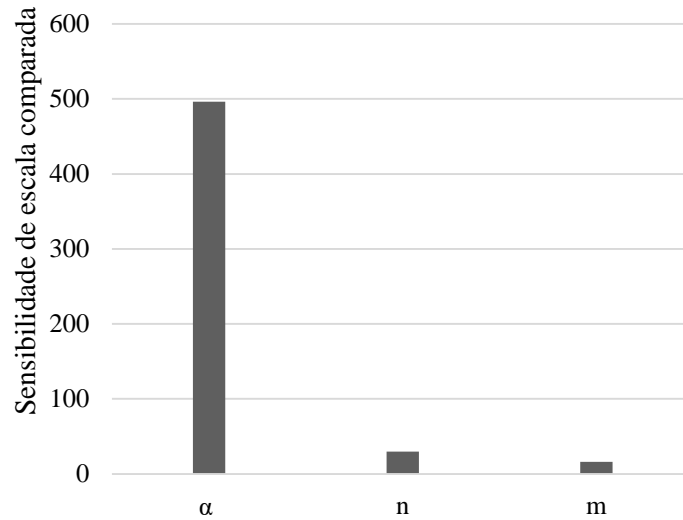
		m					
		2,870	1,998870	2,098814	2,203754	2,313942	2,429639
n	0,526973	2,870	3,607	5,285	7,275	9,376	11,520
	0,55332	3,569	3,413	4,485	6,170	8,087	10,100
	0,58099	5,084	4,395	4,664	5,750	7,292	9,054
	0,61004	6,893	5,999	5,730	6,162	7,163	8,529
	0,64054	8,808	7,844	7,299	7,261	7,732	8,623
	0,67257	10,761	9,784	9,103	8,784	8,859	9,313

Fonte: Do autor (2020).

Para o modelo de van Genuchten (1980), assim como no modelo de Brutsaert (1967), as tabelas podem ser utilizadas apenas para verificar como os parâmetros alteram o valor do erro e não a magnitude dessa alteração. Por meio da Figura 4.17, pode-se notar que o parâmetro  $\alpha$  é o mais importante do modelo. A sensibilidade dos outros dois parâmetros é significativamente inferior, o que implica maior atenção a determinação de  $\alpha$ .



Figura 4.17 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980).



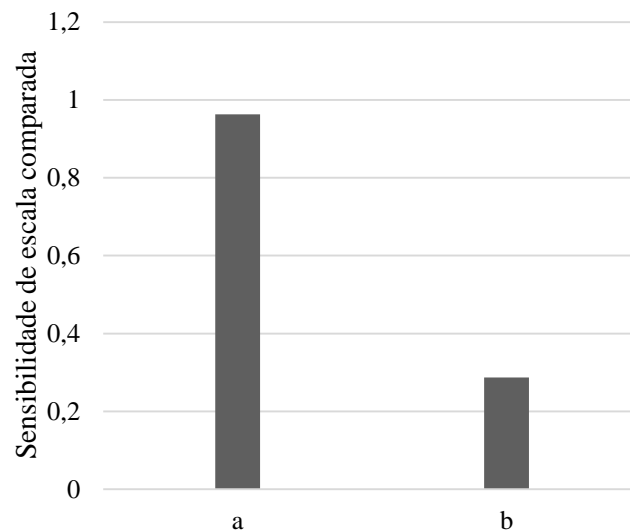
Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.14 - Sensibilidade para os parâmetros  $n$  e  $m$  do modelo de McKee e Bumb (1984).

		b					
		320,666	336,700	353,535	371,211	389,772	409,261
a	80,674	11,081	11,102	11,160	11,251	11,369	11,510
	84,708	11,120	11,118	11,159	11,236	11,344	11,478
	88,943	11,247	11,213	11,227	11,282	11,373	11,494
	93,391	11,475	11,398	11,375	11,400	11,465	11,566
	98,060	11,817	11,686	11,616	11,601	11,632	11,703
	102,963	12,284	12,088	11,961	11,895	11,882	11,916

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.18 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de McKee e Bumb (1984).



Fonte: Do autor (2020).

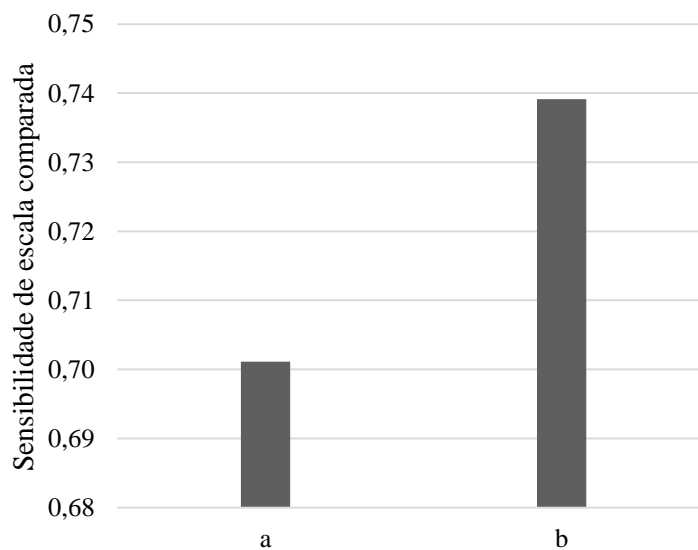
Para o modelo de McKee e Bumb (1984), a sensibilidade de escala comparada (FIGURA 4.18) aponta que o parâmetro  $a$  é mais sensível que o parâmetro  $b$ . A Tabela 4.14 comprova isso, pois, apesar de o parâmetro  $a$  ter valores menores que  $b$ , a variação do erro é maior entre as linhas da tabela.

Tabela 4.15 - Sensibilidade para os parâmetros do modelo de McKee e Bumb (1987).

		b					
		-213,265	-223,928	-235,125	-246,881	-259,225	-272,186
a	-57,167	12,047	12,137	12,395	12,797	13,320	13,938
	-60,025	12,062	12,088	12,289	12,645	13,130	13,719
	-63,027	12,111	12,067	12,206	12,509	12,951	13,507
	-66,178	12,198	12,078	12,149	12,392	12,786	13,303
	-69,487	12,326	12,127	12,123	12,300	12,638	13,111
	-72,961	12,500	12,216	12,132	12,238	12,513	12,935

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.19 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de McKee e Bumb (1987).



Fonte: Do autor (2020).

Nesse modelo, devido à diferença nos valores do parâmetro, a análise se torna difícil, pois, ainda que a variação de  $b$  gere maiores valores de erro, não pode ser conclusiva devido à diferença de escala. Por meio da Figura 4.19, percebe-se que o parâmetro  $b$  é de fato o mais sensível; no entanto, a diferença entre a sensibilidade dos parâmetros é muito pequena, mostrando que, para esse modelo, ambos os parâmetros são fundamentais.

Tabela 4.16- Tabela de sensibilidade para os parâmetros  $a$  e  $m$  do modelo de Fredlund e Xing (1994).

		m					
		2,555	2,682	2,816	2,957	3,105	3,260
a	268,119	3,403	4,153	5,848	7,893	10,070	12,301
	281,525	3,490	3,663	5,088	7,035	9,170	11,379
	295,601	3,819	3,377	4,406	6,207	8,284	10,465
	310,382	4,333	3,348	3,845	5,425	7,418	9,561
	325,901	4,976	3,582	3,463	4,709	6,579	8,672
	342,196	5,703	4,033	3,321	4,095	5,781	7,800

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.17 - Tabela de sensibilidade para os parâmetros  $a$  e  $n$  do modelo de Fredlund e Xing (1994).

		n					
		0,632	0,663	0,697	0,731	0,768	0,806
a	268,119	3,403	3,671	4,379	5,352	6,468	7,659
	281,525	3,490	3,756	4,458	5,428	6,544	7,738
	295,601	3,819	4,075	4,744	5,681	6,772	7,950
	310,382	4,333	4,579	5,202	6,088	7,136	8,283
	325,901	4,976	5,214	5,791	6,620	7,617	8,722
	342,196	5,703	5,937	6,474	7,249	8,193	9,252

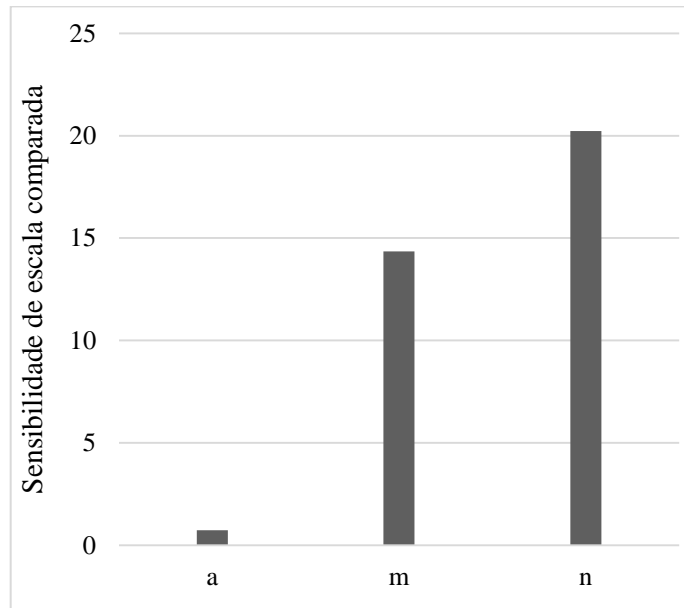
Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.18 - Sensibilidade para os parâmetros  $m$  e  $n$  do modelo de Fredlund e Xing (1994).

		m					
		2,555	2,682	2,816	2,957	3,105	3,260
n	0,632	3,403	4,153	5,848	7,893	10,070	12,301
	0,663	3,671	4,472	6,104	8,069	10,168	12,324
	0,697	4,379	5,146	6,631	8,455	10,432	12,483
	0,731	5,352	6,055	7,368	9,020	10,849	12,770
	0,768	6,468	7,104	8,254	9,730	11,396	13,174
	0,806	7,659	8,234	9,242	10,550	12,053	13,680

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.20 - Sensibilidade de escala comparada dos parâmetros do modelo de Fredlund e Xing (1994).



Fonte: Do autor (2020).

Para o modelo de Fredlund e Xing (1994), nota-se com base na Tabela 4.16 que o erro varia muito mais entre colunas do que entre linhas, apesar do parâmetro  $a$  assumir valores superiores ao de  $m$ . O mesmo acontece na Tabela 4.17 para o parâmetro  $n$ . Isso evidencia que, quando se comparam esses dois parâmetros com o parâmetro  $a$ , eles se mostram mais sensíveis. Isso é confirmado através da sensibilidade de escala comparada (FIGURA 4.20). Essa análise pode ser feita, pois, apesar da variação de  $a$  ser superior, os outros parâmetros, ainda assim, exercem maior influência.

A análise da sensibilidade entre  $m$  e  $n$ , não pode ser feita através da Tabela 4.18, pois a variação do parâmetro  $m$  é maior que a variação do parâmetro  $n$ , dessa forma, o valor do erro sofre maior alteração quando o parâmetro  $m$  é alterado.

Com base nos estudos desenvolvidos ao longo deste trabalho propõe-se o espaço de busca presente na Tabela 4.19 para realização da análise inversa caso seja empregado outros métodos de otimização, como os métodos baseados em colônias, para os modelos de Gardner (1958), Brooks e Corey (1964), Brutsaert (1967), van Genuchten (1980), McKee e Bumb (1984), McKee e Bumb (1987) e Fredlund e Xing (1994 para solos da microrregião de Viçosa.

Tabela 4.19 - Espaço de busca dos parâmetros de cada modelo.

Modelo	Parâmetro	Limite inferior	Limite superior
Gardner (1958)	$\alpha$	0,0002778	1,671
	n	0,1043663	2,518
Brooks e Corey (1964)	$\lambda$	0,0466656	2,530
Brutsaert (1967)	a	0,0366933	949,834
	n	0,0803274	3,383
van Genuchten (1980)	$\alpha$	0,0000011	0,806
	n	0,0636352	8,027
	m	0,0603381	56,819
McKee e Bumb (1984)	a	15,4324598	106,281
	b	5,1978586	722,048
McKee e Bumb (1987)	a	-57,1670782	420,646
	b	-474,2356262	-28,240
Fredlund e Xing (1994)	a	1,1680349	524,477
	m	0,0851367	42,135
	n	0,0740288	7,896

Fonte: Do autor (2020).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. Conclusão

Na literatura, encontram-se disponíveis diversos modelos para o ajuste de curvas de retenção de água no solo. Este trabalho buscou identificar quais modelos são mais adequados para os solos da microrregião de Viçosa e criar uma fonte de referência para os parâmetros dos modelos.

A utilização de 7 diferentes modelos matemáticos para ajustar as 30 curvas de retenção de água no solo mostrou que os modelos de Gardner (1958), Brutsaert (1967), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) foram os que melhor conseguiram ajustar os dados experimentais. Devido a ineficiência dos modelos de Brooks e Corey (1964), McKee e Bumb (1984) e McKee e Bumb (1987) em ajustar os resultados, logo não se recomenda a utilização destes modelos para os solos da microrregião de Viçosa, Minas Gerais.

Acerca da correlação dos parâmetros dos modelos que melhor se ajustaram, pode-se perceber que a maioria assume valores distantes do módulo de 1, sendo considerados não correlacionados, mostrando a independência desses parâmetros. Isso significa que os parâmetros podem ser otimizados simultaneamente na análise inversa gerando resultados otimizados e com valores confiáveis.

A análise de sensibilidade de escala comparada é fundamental para definir quais parâmetros se deve ter maior atenção; no entanto, como os modelos analisados nesse trabalho são compostos por poucos parâmetros (no máximo 3), mesmo os parâmetros que apresentaram pouca sensibilidade de escala comparada não podem ser negligenciados na análise.

O emprego da análise de escala comparada apresenta maior relevância em problemas que possuem um maior número de parâmetros, a identificação da sensibilidade de cada parâmetro permite que seja feita a simplificação do problema de forma a priorizar a otimização dos parâmetros considerados mais sensíveis e considerando os parâmetros menos sensíveis como constantes. Esse processo facilita a análise inversa, pois resolve o problema da complexidade de grande parte dos modelos analisados.

Por fim, para os 4 modelos indicados como os melhores, os parâmetros mais sensíveis foram  $\alpha$  (van GENUCHTEN, 1980),  $n$  (BRUTSAERT, 1967),  $\alpha$  (van GENUCHTEN, 1980) e  $n$  (FREDLUND; XING, 1994). Sendo assim, nas análises inversas de resultados de curvas de retenção de água no solo empregando estes modelos, atenção especial deverá ser dada na determinação destes parâmetros.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Em vista dos estudos realizados sugere-se:

- Coletar, caracterizar e determinar as curvas de retenção de água para os solos da região de Lavras, Minas Gerais;
- Realizar a modelagem matemática dessas curvas empregando diferentes modelos e avaliar a empregabilidade de cada um deles em representar satisfatoriamente os dados experimentais;
- Com base nos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados empregando diferentes técnicas de mensuração da sucção apresentar um novo modelo matemático adequado para os solos da região de Lavras;
- Empregar outras técnicas estatísticas para se avaliar a correlação entre parâmetros; e
- Determinar as funções de condutividade hidráulica para os solos estudados e avaliar os impactos das análises de sensibilidade nestas funções.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. M. R. **Avaliação de métodos de estimativa da capacidade de carga de fundações diretas em solos não saturados**. 2018. 144p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- AMORIM, N. R. **Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na Mina Rio Paracatu Mineração (RPM)**. 2008. 143p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- BISHOP, A. W. The principle of effective stress. **Teknisk Ukeblad**, v. 106, n. 3, p. 859-863, 1959.
- BOTELHO, B. S. **Equipamento triaxial cúbico para ensaios em solos saturados e não-saturados com sucção matricial controlada**. 2007. 106p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous medium. **Hydrology Paper**, Fort Collins, v.3, p.2, 1964.
- BRUTSAERT, W. Evaporation from a Very Small Water Surface at Ground Level: Three-Dimensional Turbulent Diffusion without Convection. **Journal of Geophysical Research**, v.72, p 5361–5369, 1967.
- CALVELLO, M. **Inverse Analysis of a Supported Excavation through Chicago Glacial Clays**. 2002. Dissertaton of Doctor of Philosophy, Northwestern University, Evanston, Illinois, 2002.
- CANDIDO, E. S.; TEIXEIRA, E. K. C.; SOUZA, T. S. C.; GUIMARÃES, L. M.; AZEVEDO, R. F.; MESQUITA, L. C. Determinação de Curvas Características Utilizando uma Pequena Centrífuga e o Método do Papel Filtro. In: COBRAMSEG, XVII, 2014, Goiânia. **Anais...** Viçosa, 2014.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. V. 3. São Paulo: Edgard Blucher, 1988.
- CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proc. Of the Institute of Civil Engineering**, v92 - n.2 - p.82- 89, 1992.
- CORREA, G. F. **Modelo de evolução e mineralogia da fração argila de solos do Planalto de Viçosa**. 1984. 187p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.
- CUSTÓDIO, G. S. **Estudo do efeito combinado da estrutura e da sucção sobre o comportamento mecânico de solos não saturados**. 2009. 165p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- DANTAS, O. D; SILVA, E. M; BARIONI, L.G; OLIVEIRA, M. A. A; LIMA, J. E. F. W. Comparação dos métodos grg2 (solver do excel) e downhill simplex para a parametrização da



função beta. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, XXXIX, 2007, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2007.

DIAS, C. O. **Determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados**. 2012. 236p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

FREDLUND, D. G. AND RAHARDJO, H., **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. New York, John Wiley & Sons, Inc.1993. p. 1 – 6, 1993

FREDLUND, D.G.; XING, A – Equations for the soil water characteristic curve - **Canadian Geotechnical Journal**. v. 31, p. 521-532, 1994.

GARDNER, R. A. 1937. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. **Soil Science**, v43, p277– 283, 1937.

GARDNER W. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water table. **Soil Science**. v85, p228-232, 1958.

GERSCOVICH, D. M. S. Equações para modelagem da curva característica aplicadas a solos brasileiros. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, IV, 2001, Porto Alegre. **Anais...** Rio de Janeiro: 2001. p76-92.

GOMES, F. M; PEREIRA, F. M; MARINS, F. A. S; SILVA, M. B. Estudo comparativo entre os métodos gradiente reduzido generalizado e algoritmo genético em otimização com múltiplas respostas. **Revista Produção Online**. Florianópolis, SC. 2017. v.17, n. 2, p. 592-619, 2017

GUIMARÃES, A. G. **Análise inversa para determinação de parâmetros de deformabilidade de solos**. 2008. 200p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

GUIMARÃES, L. M. **Desenvolvimento de um Permeômetro para Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada e Não Saturada de Solos**. 2008. 64p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, UFV, Viçosa, 2008.

GUIMARÃES, L. M. **Determinação das propriedades hidráulicas em solos não saturados utilizando uma centrífuga de pequenas dimensões**. 2013. 116p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, UFV, Viçosa, 2013.

GUIZELINI, A. P. **Estudo do comportamento hidromecânico de solos visando a construção de sistemas de cobertura alternativos para aterros sanitários**. 2011. 166p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

KLENK, G. **Comportamento hidrodinâmico de encostas em decorrência de eventos pluviométricos: estudo de caso no morro do Bom Brinquedo, Antonia**. 2019. 173p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

LISBOA, R. L. L. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com permeômetro Guelph e ensaios de laboratório**. 2006. 89p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

MACHADO, R. A. **Variação sazonal da sucção matricial e estabilidade de taludes de solos residuais não saturados**. 2005. 122p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

MARINHO, F. A. M., **Os solos não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados**. Texto apresentado a USP/SP para o concurso de livre docência. USP, São Paulo/SP, 2005

MASCARENHAS, P. V. S. **Modelagem fracionária do fluxo de água em meio poroso não saturado**. 2018. 128p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

MCKEE, C. R.; BUMB, A C. Flowtesting coal bed methane production wells in the presence of water and gas, **SPE Formation Evaluation**, dec, p.599-608, 1987.

McKee, C.R.; Bumb, A.C. The importance of unsaturated flow parameters in designing a hazardous waste site. In Hazardous Waste and Environmental Emergencies, Hazardous Materials Control Research Institute National Conference, Houston, Tex., 12–14 March 1984. **Anais...** Hazardous Materials Control Research Institute, Silver Spring, Md. 1984. 50–58p.

MELO, R. M. **Análise de sensibilidade aplicada à identificação de pontos que requerem melhoria na disponibilidade em infraestrutura de cloud**. 2017. 148p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

MIGUEL, M. G; TEIXEIRA, R. S; PADILHA A. C. C. Curvas Característica de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba/SP, v. 12, n. 24, p. 63-74, 2006.

MONCADA, M. P. H. **Avaliação de Propriedades Hidráulicas de Solos Tropicais Não Saturados**. 2008. 324p. Tese (Doutorado) – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2008.

PEREIRA, A. **Resistência ao Cisalhamento de Solos não saturados: Análise experimental e teórica**. 2006. 146p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

RAMALHO, G. G. C. **Mapeamento geotécnico de Viçosa com uso de sistemas de informações geográficas**. 1994. 110p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

RIBEIRO, A. G. C. **Metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura com base em estudos de caso realizado na Mina da empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu, Minas Gerais**. 2011. 161p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

ROQUE, L. A. **Áreas de risco geológico-geotécnico associadas a movimentos de massas no núcleo urbano de viçosa-mg**. 2013. 97p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SILVA, M. T. M. G. **Metodologia para determinação de parâmetros para solos não saturados utilizando ensaios com umidade conhecida**. 2009. 98p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SILVA, T. Q. **Análise de risco geológico-geotécnico em áreas sujeitas à movimentos de massa**. 2016. 119p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

TEIXEIRA, E. K. C. **Estudo da influência da infiltração de águas pluviais na estabilidade de um talude de solo residual**. 2014. 76p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

TERZAGHI, K. Theoretical soil mechanics. **Journal of GeoEngineering**, New York: John Wiley & Sons, v. 12, n. 2, p. 59-64, 1943.

VALLE, J. B. S. **Avaliação da aplicação de modelo simplificado para previsão de Curva de Retenção de Umidade dos solos em análises de estabilidade de taludes**. 2013. 223p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2013.

van GENUCHTEN, M. TH. A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

YANES, J. P. **Parâmetros mais influentes na previsão da diluição inicial em sistemas de emissários submarinos: uma contribuição baseada em técnicas de Planejamento de Experimentos e Superfícies de Resposta**. 2018. 172p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.