

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

CARLOS HENRIQUE NAKASHIMA

**ESTUDO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SOLOS QUE
COMPÕEM O PERFIL GEOTÉCNICO DA FORMAÇÃO
GUABIROTUBA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2017

CARLOS HENRIQUE NAKASHIMA

**ESTUDO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SOLOS QUE
COMPÕEM O PERFIL GEOTÉCNICO DA FORMAÇÃO
GUABIROTUBA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Ronaldo Luis dos Santos Izzo

CURITIBA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

N163e Nakashima, Carlos Henrique
2017 Estudo de curvas características de solos que compõe
o perfil geotécnico da Formação Guabirotuba / Carlos
Henrique Nakashima.-- 2017.
103 f.: il.; 30 cm.

Texto em português, com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil, Curitiba, 2017.
Bibliografia: p. 100-103.

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Mecânica de
rochas. 3. Mecânica do solo. 4. Geologia. 5. Curvas
em engenharia. 6. Solos. I. Izzo, Ronaldo Luis dos
Santos. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná
- Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

CDD: Ed. 22 -- 62

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba



TERMO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO N.º __

ESTUDO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SOLOS QUE COMPÕEM O PERFIL GEOTÉCNICO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA

POR

CARLOS HENRIQUE NAKASHIMA

Esta dissertação foi apresentada às 09:30 do dia 29 de março de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**, área de Construção Civil, Linha de Estruturas e Geotecnia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____.

Ronaldo Luis Dos Santos Izzo
(Orientador - UTFPR)

Profa. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann
(UTFPR)

Prof. Dr. Ben-hur De Albuquerque E Silva
(IME/PUC-RIO)

Prof. Dr. Rogerio Francisco Kuster Puppi
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo
Coordenador do PPGEC

AGRADECIMENTOS

A existência desta folha na dissertação vai se mostrando cada vez mais necessária durante o desenvolvimento do trabalho. Conduzir estudos que resultem em trabalhos demanda muito não só do autor, mas de todas as pessoas em seu convívio. Aproveito essa existência, então, para agradecer, inicialmente de maneira genérica, a todos os que estiveram presentes na minha vida durante meu período de estudo.

De maneira mais específica, agradeço primeiramente ao meu orientador, professor Ronaldo Izzo, com quem, desde a graduação, desenvolvi uma parceria, e que é talvez a principal responsável pela conclusão do presente trabalho. Estendo esse agradecimento à UTFPR, instituição da qual tenho orgulho de ser egresso.

Gostaria de agradecer também aos membros da banca, Professora Amanda Dalla Rosa Johann, professor Rogerio Francisco Kuster Puppi e professor Bem-hur de Albuquerque e Silva, que contribuíram de maneira inestimável, com críticas sempre no intuito de contribuir para um melhor trabalho. Também vale lembrar de todos os professores que ministraram matérias, ou, de alguma maneira, cederam seu tempo para auxiliar-me.

Enalteço também Gustavo Matsubara e André Rosa, que iniciaram o formato do estudo, por mim realizado, pavimentando degraus nos quais firmemente me apoiei.

Por fim, gostaria de agradecer a meus familiares e amigos, que forneceram a estabilidade necessária nas demais esferas da vida, permitindo que eu tivesse o foco necessário para a conclusão das etapas do mestrado. Em especial a minha namorada Camila Frotte, que acompanhou de maneira mais direta essas etapas.

RESUMO

NAKASHIMA, Carlos Henrique. Estudo de curvas características de solos que compõem o perfil geotécnico da Formação Guabirotuba. 2017. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Em detrimento à mecânica dos solos clássica, a mecânica dos solos não saturados ainda é pouco desenvolvida. Com o intuito de contribuir para essa área, é apresentado o presente trabalho. Utilizando amostras de solo de três horizontes que compõem o perfil da Formação Guabirotuba e a técnica de translação dos eixos, através do método da placa de pressão, foram determinadas as curvas características de secagem. Os dados foram ajustados às equações propostas pela literatura através do software SciDavis, na intenção de determinar qual das equações melhor descreve o material analisado. A equação que melhor descreveu os dados experimentais foi a proposta por Fredlund e Xing (1994) para os três horizontes estudados. Por fim, são propostas duas novas equações que apresentam resultados relevantes para o solo local e pressões inferiores a 1000kPa, sendo que uma delas, nessas condições, apresentou resultados melhores do que a equação proposta por Fredlund e Xing (1994).

Palavras-chave: Formação Guabirotuba, solos não saturados, curva característica.

ABSTRACT

NAKASHIMA, Carlos Henrique. Study of soil-water characteristic curves of soils that make up the geotechnical profile of the Guabirota Formation. 2017. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Compared to the classic soil mechanics, the unsaturated soil mechanics still not very advanced. This work is presented intending to help the development of this area. Using samples of soils of three different horizons of the Guabirota formation, through the axis translation technique, with the pressure plate method, the drying soil-water characteristic curves was determined. The data was then be compared to the equations proposed by the literature, using the SciDavis software, to define which best describe the studied material. The best fitting curve for the experimental data was the curve that used the equation proposed by Fredlund and Xing (1994) for the three horizons. At the end, two new equations are proposed. These equations show relevant results for the local soil and suctions under 1000kPa. Under this conditions one of the proposed equations reach a better result than the one proposed by Fredlund e Xing (1994).

Keywords: Guabirota formation, unsaturated soils, soil-water characteristic curve.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visualização da mecânica dos solos generalizada	14
Figura 2 - Empacotamento (a) cúbico simples e (b) tetraédrico para partículas uniformes e esféricas	16
Figura 3 - Arranjo representando as componentes da sucção	18
Figura 4 - Curva característica típica de um solo siltoso	19
Figura 5 - Zonas componentes da curva característica.....	20
Figura 6 - Sistema de aplicação de sucção na placa de sucção	22
Figura 7 - Curvas características típicas para solos arenosos, siltosos e argilosos ..	24
Figura 8 - Curvas características para amostras compactadas com diferentes teores de umidade inicial.....	25
Figura 9 - Curvas características para diferentes volumes específicos.....	26
Figura 10 - Delimitação espacial da Formação Guabirota com Curitiba destacada	29
Figura 11 - Perfil típico da Formação Guabirota.....	30
Figura 12 - Horizonte exposto e um talude	32
Figura 13 - Posicionamento do tubo de PVC para retirada de amostra indeformada	33
Figura 14 - Amostra deformada armazenada.....	33
Figura 15 - Entalhe da amostra	35
Figura 16 - Fim da etapa de entalhe	36
Figura 17 - Posicionamento do relógio comparador.....	37
Figura 18 - Esquema do ensaio montado com coluna suspensa.....	37
Figura 19 - Efeito dos parâmetros de ajuste nas equações de van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) - (a) Parâmetro a variando, (b) parâmetro n variando, (c) parâmetro m variando	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do horizonte 1	43
Gráfico 2 - Curva granulométrica do horizonte 2.....	44
Gráfico 3 - Curva granulométrica do horizonte 3.....	44
Gráfico 4 - Determinação do limite de liquidez para o horizonte 1	45
Gráfico 5 - Determinação do limite de liquidez para o horizonte 2	46
Gráfico 6 - Determinação do limite de liquidez para o horizonte 3	47
Gráfico 7 - Gráfico de plasticidade de Casagrande.....	47
Gráfico 8 - Curva característica obtida para o horizonte 1	49
Gráfico 9 - Curva característica obtida para o horizonte 2	49
Gráfico 10 - Curva característica obtida para o horizonte 3	50
Gráfico 11 - Determinação do ponto de entrada de ar para o horizonte 1	50
Gráfico 12 - Determinação do ponto de entrada de ar para o horizonte 2	51
Gráfico 13 - Determinação do ponto de entrada de ar para o horizonte 3	51
Gráfico 14 - Modelo de Burdine (1953) para o horizonte 1	53
Gráfico 15 - Modelo de Gardner (1958) para o horizonte 1.....	53
Gráfico 16 - Modelo de Brooks e Corey (1964) para o horizonte 1	54
Gráfico 17 - Modelo de Mualem (1976) para o horizonte 1	55
Gráfico 18 - Modelo de Roger e Hornberger (1978) para o horizonte 1	55
Gráfico 19 - Modelo de van Genuchten (1980) para o horizonte 1.....	56
Gráfico 20 - Modelo de Williams et al. (1983) para o horizonte 1.....	56
Gráfico 21 - Modelo de Mckee e Bumb (1984) para o horizonte 1	57
Gráfico 22 - Modelo de Mckee e Bumb (1987) para o horizonte 1	57
Gráfico 23 - Modelo de Kosigi (1994) para o horizonte 1	58
Gráfico 24 - Modelo de Fredlund e Xing (1994) para o horizonte 1.....	59
Gráfico 25 - Modelo de Burdine (1953) para o horizonte 2	63
Gráfico 26 - Modelo de Gardner (1958) para o horizonte 2.....	64
Gráfico 27 - Modelo de Brooks e Corey (1964) para o horizonte 2	64
Gráfico 28 - Modelo de Brutsaert (1966) para o horizonte 2	65
Gráfico 29 - Modelo de Mualem (1976) para o horizonte 2	66
Gráfico 30 - Modelo de Roger e Hornberger (1978) para o horizonte 2.....	67
Gráfico 31 - Modelo de van Genuchten (1980) para o horizonte 2.....	67
Gráfico 32 - Modelo de Williams et al. (1983) para o horizonte 2.....	68

Gráfico 33 - Modelo de Mckee e Bumb (1984) para o horizonte 2.....	69
Gráfico 34 - Modelo de Mckee e Bumb (1987) para o horizonte 2.....	70
Gráfico 35 - Modelo de Kosigi (1994) para o horizonte 2.....	71
Gráfico 36 - Modelo de Fredlund e Xing (1994) para o horizonte 2.....	72
Gráfico 37 - Modelo de Burdine (1953) para o horizonte 3.....	76
Gráfico 38 - Modelo de Gardner (1958) para o horizonte 3.....	76
Gráfico 39 - Modelo de Brooks e Corey (1964) para o horizonte 3.....	77
Gráfico 40 - Modelo de Brutsaert (1966) para o horizonte 3.....	78
Gráfico 41 - Modelo de Mualem (1976) para o horizonte 3.....	78
Gráfico 42 - Modelo de Roger e Hornberger (1978) para o horizonte 3.....	79
Gráfico 43 - Modelo de van Genuchten (1980) para o horizonte 3.....	79
Gráfico 44 - Modelo de Williams et al. (1983) para o horizonte 3.....	80
Gráfico 45 - Modelo de Mckee e Bumb (1984) para o horizonte 3.....	81
Gráfico 46 - Modelo de Mckee e Bumb (1987) para o horizonte 3.....	82
Gráfico 47 - Modelo de Kosigi (1994) para o horizonte 3.....	83
Gráfico 48 - Modelo de Fredlund e Xing (1994) para o horizonte 3.....	83
Gráfico 49 - Coeficientes de determinação para hipótese de trecho único.....	88
Gráfico 50 - Coeficientes de determinação para hipótese de trecho inicial em reta..	90
Gráfico 51 - Ajuste da equação 1 para o horizonte 1.....	91
Gráfico 52 - Ajuste da equação 1 para o horizonte 2.....	92
Gráfico 53 - Ajuste da equação 1 para o horizonte 3.....	92
Gráfico 54 - Ajuste da equação 2 para o horizonte 1.....	93
Gráfico 55 - Ajuste da equação 2 para o horizonte 2.....	94
Gráfico 56 - Ajuste da equação 2 para o horizonte 3.....	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	OBJETIVOS.....	11
1.1.1	Objetivos Principais	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
1.2	JUSTIFICATIVA.....	11
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1	HISTÓRICO DA MECÂNICA DOS SOLOS	13
2.2	MECÂNICA DOS SOLOS NÃO SATURADOS	13
2.2.1	Solos Não Saturados.....	14
2.2.2	Tensão Superficial e Capilaridade.....	15
2.2.3	Sucção em Solos.....	17
2.3	CURVA CARACTERÍSTICA	18
2.3.1	Determinação da Curva Característica.....	21
2.3.2	Métodos de medição de sucção	21
2.3.3	Fatores que influenciam a curva característica	24
2.3.4	Equações Propostas pela Literatura.....	26
2.4	FORMAÇÃO GUABIROTUBA	28
2.4.1	Curvas Características de solos da Formação Guabirotuba	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	COLETA DO SOLO	32
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	34
3.2.1	Granulometria.....	34
3.2.2	Limite de Liquidez.....	34
3.2.3	Limite de Plasticidade.....	34
3.2.4	Densidade Real dos Grãos.....	34

3.3	OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA	34
3.3.1	Preparação da Amostra e do Equipamento	35
3.3.2	Coleta de Dados	38
3.4	CORRELAÇÃO COM EQUAÇÕES EXISTENTES	39
3.5	PROPOSIÇÃO DE UMA NOVA EQUAÇÃO	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1	GRANULOMETRIA.....	43
4.2	LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE	45
4.3	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	48
4.4	CURVA CARACTERÍSTICA	48
4.5	CORRELAÇÃO COM AS EQUAÇÕES EXISTENTES	52
4.5.1	Ajustes para o Horizonte 1	52
4.5.2	Ajustes para o Horizonte 2	62
4.5.3	Ajustes para o Horizonte 3	75
4.5.4	Resultados para os Três Horizontes.....	86
4.6	PROPOSIÇÃO DE NOVAS EQUAÇÕES	90
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
5.1	CONCLUSÕES	96
5.1.1	Sobre o Ensaio	96
5.1.2	Sobre os Softwares utilizados.....	97
5.1.3	Sobre os Ajustes.....	98
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98

1 INTRODUÇÃO

A mecânica dos solos, como é conhecida hoje, deve muito à Karl von Terzaghi. De seu trabalho deriva o que Das (2013) define como o conceito mais importante da engenharia geotécnica: o princípio da tensão efetiva, que tem utilização na resolução de uma série de problemas da área, como pressão lateral em contenções, capacidade de carga e recalque de fundações. Baseando-se nesse conceito, foram estabelecidos os princípios fundamentais para o entendimento do comportamento dos solos saturados (FREDLUND, 2006).

Solos não saturados podem ser definidos como aqueles nos quais os vazios são preenchidos parcialmente por água e parcialmente por ar. A diferença de compressibilidade dessas fases distintas torna complexa a determinação da pressão neutra, impedindo a simples aplicação do conceito de Terzaghi (PINTO, 2006).

Aplicações práticas da mecânica dos solos não saturados ainda depende de um maior desenvolvimento do conhecimento sobre o assunto (LEONG e RAHARDJO, 1997) e a base para a determinação dos parâmetros físicos de solos não saturados é a curva característica (FREDLUND e XING, 1994). Williams (1982) define a curva característica do solo como a relação entre a quantidade de água contida em seus vazios e sua sucção.

A condição crítica para a utilização de um solo é, em geral, quando este encontra seus vazios plenamente preenchidos por água, ou seja, um solo saturado. Como a mecânica dos solos clássica é baseada em princípios que dependem da completa saturação, na prática, as soluções são encontradas supondo a pior situação possível, no que tange o preenchimento dos vazios do solo. O melhor desenvolvimento da mecânica dos solos não saturados permitiria, portanto, a escolha de soluções mais econômicas, fundamentadas em um conhecimento mais profundo sobre o comportamento do solo em sua real condição de umidade.

A Formação Guabirota se estende desde o município de Campo Largo, até Quatro Barras, abrangendo toda a cidade de Curitiba (FELIPE, 2011). Sendo a constituição mineralógica um fator determinante para o comportamento de um solo (OLIVEIRA JR. et al., 2011), torna-se relevante uma análise dos processos de formação que deram origem ao solo estudado.

Tem-se, portanto, como sujeito do presente trabalho os solos, especificamente os não saturados. O objeto de estudo são as curvas características. Juntos, compõem

o assunto de pesquisa: as curvas características de solos não-saturados. Finalmente, delimitando espacialmente o assunto, chega-se ao tema: curvas características de solos não-saturados que compõe o perfil geotécnico da Formação Guabirotuba.

Fredlund (2006) classificou os ensaios laboratoriais (equipamentos) como um problema primário na implementação da mecânica dos solos não saturados, juntamente com o desenvolvimento de uma base teórica, extensão das relações entre os parâmetros do solo saturado para o solo não saturado e resolução de equações diferenciais. Avanços consideráveis ocorreram na área nas últimas décadas, porém ainda existem muitas incertezas acerca da solidez das descobertas (SHENG, ZHANG e YU, 2013). Localmente, no Brasil, essa incerteza é agravada pelo menor volume da pesquisa. Delimitando o problema de pesquisa como pergunta, tem-se: Quais equações propostas pela literatura melhor descrevem as curvas características de solos que compõe o perfil geotécnico da Formação Guabirotuba?

Buscando-se a solução do problema, a hipótese é: A equação que melhor se ajusta as curvas características que compõe o perfil geotécnico da Formação Guabirotuba é a proposta por Fredlund e Xing (1994).

Como fica evidenciado pela presença da hipótese no parágrafo anterior, o método de abordagem a ser adotado no presente trabalho é o método hipotético-dedutivo, aproximadamente como proposto por Popper (1972).

Tendo como objeto de estudo as curvas características e, sendo elas, basicamente, relações entre parâmetros de solo, decorre que o estudo se encaixa, metodologicamente, no que tange ao procedimento, no conceito de pesquisa experimental, tal como descrito por Gil (2010).

O conteúdo dessa dissertação é dividido em Desenvolvimento e Considerações Finais, sendo o primeiro subdividido em três partes: revisão de literatura, materiais e métodos, e resultados e discussões. As Considerações Finais são compostas pelas conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Na revisão de literatura é apresentado um estudo sobre o estado da arte da área da pesquisa. Trata-se, basicamente, de um aprofundamento dos conceitos e teorias apresentados no embasamento teórico previamente exposto. Há um breve histórico da mecânica dos solos como um todo, culminando no surgimento e desenvolvimento de sua vertente não saturada. Aprofundando-se nas teorias que buscam descrever seu comportamento, torna-se oportuna a descrição da curva característica e de seus parâmetros constituintes, bem como as equações propostas pela literatura para

descrevê-las. Por fim, para uma delimitação espacial, a Formação Guabirotuba é descrita juntamente com suas propriedades relevantes para o estudo.

Na seção de materiais e métodos é descrito basicamente o ensaio para a obtenção das curvas características dos solos. Desde a coleta e preparação da amostra, até a coleta de dados. Alguns ensaios de caracterização que possam apresentar importância posterior também estão aqui descritos.

Posteriormente são expostos os resultados e possíveis consequências a eles atreladas. Os principais resultados a serem divulgados são as próprias curvas características, objeto do estudo, além dos ajustes feitos as equações que as descrevem, com seus respectivos coeficientes de correlação.

Por fim, são expostas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Principais

- Identificar qual equação proposta pela literatura melhor se ajusta à curva característica dos solos que compõe o perfil geotécnico da Formação Guabirotuba.
- Propor equação que descreva a curva característica de secagem dos solos que compõem o perfil geotécnico da Formação Guabirotuba.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir a curva característica de secagem dos solos estudados e;
- Ajustar as curvas encontradas às equações propostas pela literatura.

1.2 JUSTIFICATIVA

Cientificamente se justifica o presente trabalho na lacuna do conhecimento da área da mecânica dos solos não saturados. Dentro dessa área do conhecimento, na qual soluções práticas dependem de avanços teóricos (LEONG e RAHARDJO, 1997), a curva característica do solo é essencial para modelagem e compreensão do comportamento mecânico do solo (SREEDEEP e SINGH, 2011).

Academicamente, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), instituição na qual o estudo foi desenvolvido, dispõe do equipamento necessário para a realização dos ensaios para a obtenção dos parâmetros que compõem a curva

característica, incluindo um Fredlund SWCC Device (modelo SWC-150 da GCTS Testing Systems), que tem capacidade de medir a sucção em um intervalo relevante (de aproximadamente zero a 1500 kPa).

Por fim, socialmente, o melhor entendimento da mecânica dos solos não saturados tem como objetivo permitir soluções mais econômicas para problemas práticos (aterros, contenções, fundações, recalques). Possibilitando a aplicação das tecnologias disponíveis em serviço da sociedade, o trabalho atinge, portanto, o dever jurado da Engenharia Civil.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 HISTÓRICO DA MECÂNICA DOS SOLOS

As opiniões aparentemente divergem a respeito da origem de Mecânica dos Solos. A respeito de seus primeiros registros, Das (2013) ressalta diques no atual Paquistão que datam de 2000 a.C. e sapatas e *radiers* utilizados na Grécia antiga. O autor também cita as pirâmides do Egito e suas dificuldades técnicas em termos de fundação e subsolos. Já Caputo (1988) comenta sobre a Babilônia, Muralha da China e o Império Romano. Essa divergência se mostra meramente aparente, visto que há consenso de que a essência, da hoje consagrada ciência, remonta aos primeiros esforços de realizar obras relevantes.

Após um período de estudos relacionados a encostas naturais no século XVIII, quando Henri Gautier e Bernard Forest Belidor propuseram princípios conceituais para projetos de muros de arrimo (DAS, 2013), há a origem da Mecânica dos Solos Clássica. Os principais nomes desse período, até hoje consagrados, são Charles Augustin Coulomb e John Macquorn Rankine. Esses estudiosos – entre outros - através de uma abordagem matemática, propuseram o conceito de “massas ideais de fragmentos” e o aplicaram para desenvolver suas teorias sobre o equilíbrio de maciços terrosos (CAPUTO, 1988).

A mecânica dos solos como conhecemos hoje, é comumente relacionada ao nome de Karl von Terzaghi. Seu livro publicado em 1925 (*Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*) deu início a uma pesquisa em nível mundial sobre o tema, fornecendo as bases sobre as quais se desenvolveria a nova ciência (KÉZDI, 1974). Esse início culminou, em 1936, para a Primeira Conferência Internacional em Mecânica dos Solos, em Cambridge. Seus anais continham mais informação quantitativa sobre solos e fundações do que toda a literatura de engenharia até 1910 (TERZAGHI, 1943), confirmando o nascimento de um novo ramo da Engenharia Civil.

2.2 MECÂNICA DOS SOLOS NÃO SATURADOS

Fredlund (2006) afirma que, já na Primeira Conferência Internacional em Mecânica dos Solos, havia interesse sobre o comportamento de solos não saturados, porém mais trinta anos seriam necessários para que os princípios fundamentais para o desenvolvimento da mecânica dos solos não saturados fossem apresentados.

2.2.1 Solos Não Saturados

Definindo solo, para fins de engenharia, como “agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta (partículas sólidas), com líquido e gás preenchendo os espaços vazios existentes entre as partículas sólidas” (DAS, 2013), tem-se um solo saturado quando o grau de saturação é de 100%, ou seja, quando os vazios estão completamente preenchidos pela água (ORTIGÃO, 2007). Portanto, deduz-se que um solo não saturado é aquele cujos vazios não são completamente preenchidos pela água.

O preenchimento dos vazios, tem consequência em seu comportamento mecânico. Em comparação à compressibilidade das partículas sólidas constituintes do solo, a água nos vazios é – por ser menos compressível – considerada praticamente incompressível. Já o ar, na mesma comparação, se mostra muito mais compressível que a estrutura sólida. Devido à capilaridade da água, ocorre uma diferença de pressão entre os meios preenchendo os vazios, gerando a pressão de sucção no solo (PINTO, 2006).

Fredlund (1996), através da Figura 1, ilustra o aumento de complexidade ao se ultrapassar o nível da água, alcançando pressões negativas e culminando na sucção matricial, componente do estado de tensões capaz de descrever o comportamento de solos não saturados. O princípio da tensão efetiva não é mais suficiente para descrever a tensão a qual fica exposto o esqueleto sólido do solo.



Figura 1 - Visualização da mecânica dos solos generalizada
 Fonte: Fredlund (1996)

2.2.2 Tensão Superficial e Capilaridade

O conceito de capilaridade está presente na mecânica dos solos desde seu surgimento. Em seu livro *Theoretical Soil Mechanics* (1943), Terzaghi reserva um capítulo todo às forças capilares. O autor, mesmo considerando controversa a visão de que o mecanismo molecular produz a tensão superficial – responsável pela capilaridade –, é capaz de posicionar o fenômeno na camada de contato entre a água e o ar dos vazios, e de tratar da quantificação de seus efeitos mecânicos (TERZAGHI, 1943).

Do caráter controverso sobre a origem da tensão superficial em 1943, passa-se a uma quase certeza na conceituação de Lambe e Whitman (1969) que afirmam que “há muitas evidências de que a superfície de um líquido resiste a tensões devido à atração entre as moléculas adjacentes da superfície”. Por fim, há uma afirmação enfática de Netto et al. (1989) ao descreverem a formação de uma película elástica na superfície de um líquido em contato com o ar, devido à “atração entre as moléculas do líquido ser maior que a atração exercida pelo ar”.

Lu e Likos (2004) definem a tensão superficial como o grau máximo de energia que um fluido é capaz de armazenar sem partir. Os autores se aprofundam, utilizando a analogia da película elástica. Lu e Likos (2004) também definem as origens da tensão superficial, confirmando o posicionamento do fenômeno, dado por Terzaghi, e sua causa, suposta por Lambe e Whitman. Segundo os autores, em uma interface entre líquido e gás, a tensão superficial se origina do desequilíbrio entre as forças intermoleculares agindo sobre as moléculas que compõe a fase líquida. Sendo as moléculas próximas à interface mais coesas àquelas a elas diretamente associadas, há uma curvatura em direção à fase líquida.

Um fenômeno físico importante gerado pela tensão superficial é a capilaridade (ascensão ou depressão capilar) (FOX, PRITCHARD e MCDONALD, 2010). A evidência prática desse fenômeno é o fato de que a água, quando em contato com um tubo de pequeno diâmetro (a altura de elevação é inversamente proporcional ao diâmetro do tubo), se eleva a uma altura e lá permanece indefinidamente. Sendo o peso da coluna de água suportado pela força de contato entre o líquido e a parede do tubo (KÉZDI, 1974).

O mesmo fenômeno é observado em solos, principalmente de grãos finos (TERZAGHI, 1943). Apesar do contraste entre os tubos capilares e os vazios

interligados dos solos, sendo os segundos de formas irregulares, e diâmetro variável, os mesmos princípios governam o comportamento dos dois casos (KÉZDI, 1974). Portanto, se a parte inferior de uma massa de solo for exposta a água, ela subirá a um nível acima do nível da água. A rede de vazios ficará saturada até o nível da água, acima disso a água ocupará os vazios mais estreitos, enquanto os mais largos permanecerão preenchidos pelo ar (TERZAGHI, PECK e MESRI, 1996).

Modelos para prever a altura final de ascensão capilar em solos vem sendo desenvolvidos baseados em idealizações para a permeabilidade e para a geometria dos poros (LU e LIKOS, 2004). Em geral, essas idealizações contemplam permeabilidade uniforme, partículas esféricas uniformes e empacotadas de maneira cúbica ou tetraédrica. A Figura 2 ajuda a ilustrar essas idealizações.

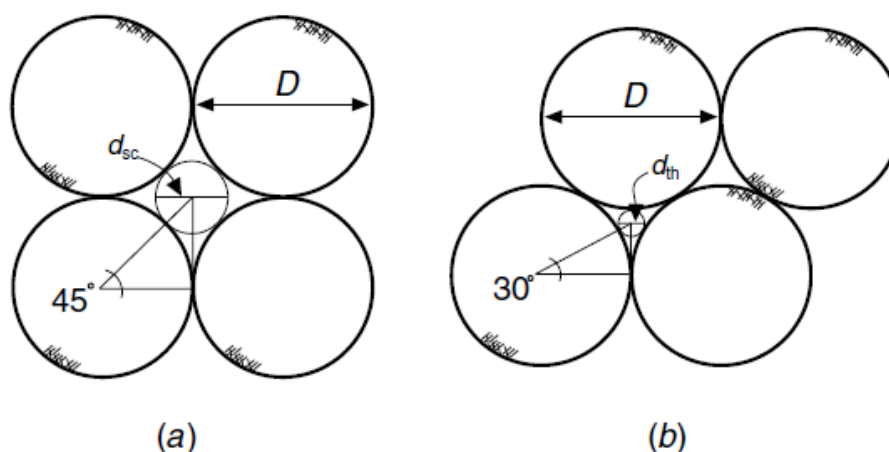


Figura 2 - Empacotamento (a) cúbico simples e (b) tetraédrico para partículas uniformes e esféricas
Fonte: Lu e Likos, 2004.

Para esses casos idealizados, soluções analíticas são encontradas. Em um tubo, pode-se definir a altura de ascensão capilar através de um equilíbrio mecânico entre a tensão superficial e a massa de fluido que ascende. Esse equilíbrio, isolada no lado esquerdo a ascensão capilar (h_c), leva a:

$$h_c = \frac{4T_s \cos\alpha}{d\rho_w g}$$

Sendo T_s a tensão superficial, α o ângulo formado pelo menisco, d o diâmetro do tubo, ρ_w a massa específica da água e g a aceleração da gravidade. Inserindo alguns parâmetros conhecidos, define-se a ascensão capilar em função do diâmetro (ambos em centímetros) como:

$$h_c = \frac{0,3}{d}$$

Transferindo a análise do tubo para o solo idealizado, considerando um empacotamento “real” como algo entre o cúbico e o tetraédrico, tem-se (em centímetros):

$$\frac{0,73}{D} \leq h_c \leq \frac{2}{D}$$

Já para solos reais, encontrar soluções analíticas é extremamente complexo. Surge então a necessidade de buscar soluções empíricas (LU e LIKOS, 2004).

2.2.3 Sucção em Solos

Marinho (2005) define sucção como a energia com a qual um elemento poroso absorve água quando está livre para se mover. O autor ainda destaca que essa avidéz por água depende basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo.

A sucção total pode ser definida como uma pressão negativa em relação à pressão externa do meio que contém os vazios do solo em questão, e é composta por duas parcelas: a sucção matricial e a sucção osmótica (KRAHN e FREDLUND, 1972).

No esquema apresentado na Figura 3, considerando um sistema em equilíbrio, a sucção osmótica é a diferença de pressão através de uma membrana semipermeável separando água pura e uma solução do solo. A sucção matricial, no mesmo esquema, é a diferença de pressão através de uma membrana permeável à solução, mas não a partículas sólidas ou ar, de uma solução de solo e o solo natural. Em outras palavras, é a sucção do solo, quando as concentrações são iguais (anulando o efeito da osmose). Por fim, a sucção total é a soma dessas duas parcelas (HILLEL, 2004).

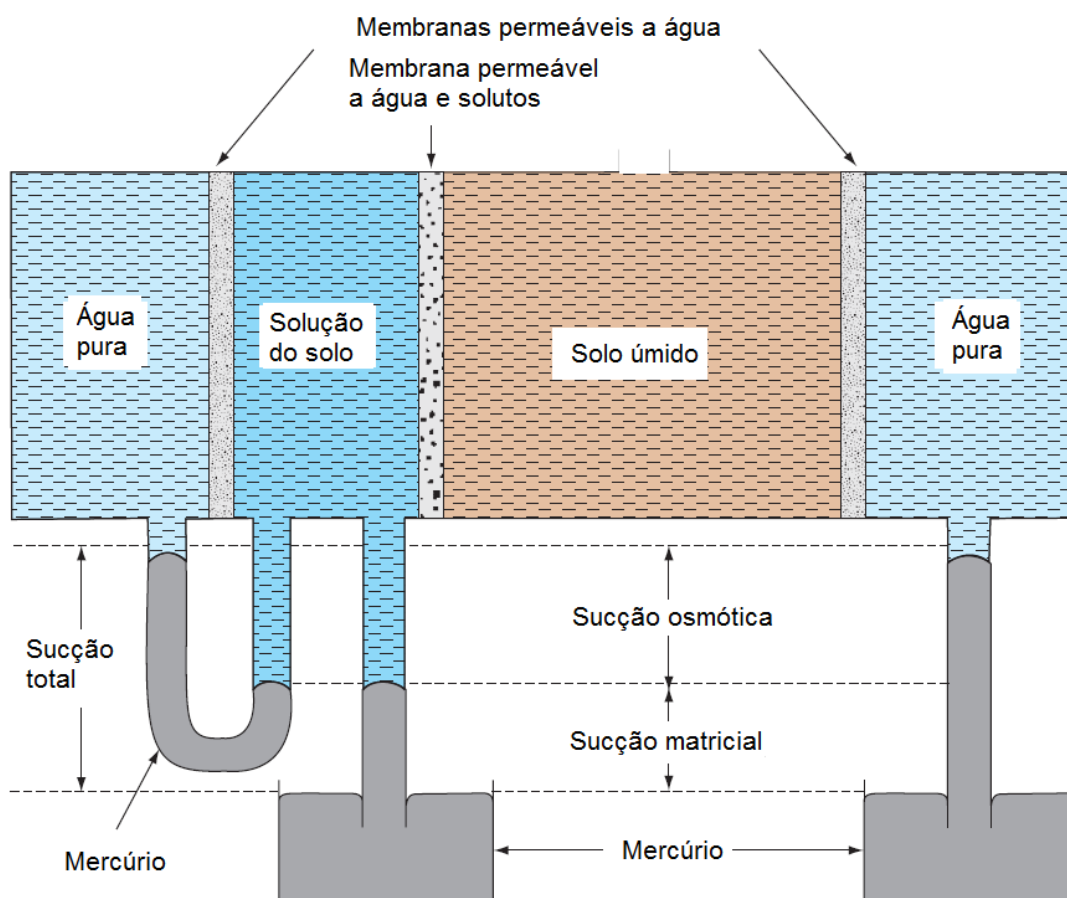


Figura 3 - Arranjo representando as componentes da sucção
Fonte: Hillel (2004)

A sucção matricial é consequência dos fenômenos da capilaridade da adsorção, enquanto a sucção osmótica se deve à diferença de concentração de cátions entre a dupla camada elétrica que envolve as partículas e a água presente nos vazios. Mesmo podendo a sucção osmótica atingir valores mensuráveis, na maioria das aplicações em geotecnia, a variação da sucção matricial se mostra preponderante e, portanto, causadora de praticamente qualquer alteração na sucção total (TERZAGHI, PECK e MESRI, 1996).

2.3 CURVA CARACTERÍSTICA

“A curva característica de um solo é definida como a relação entre a quantidade de água e a sucção do solo” (WILLIAMS, 1982). Complementando, Sreedeeep e Singh (2011) exaltam o caráter gráfico da relação anteriormente definida. Na Figura 4 é exibida uma curva característica típica para um solo siltoso – os pontos notáveis indicados, porém, podem ser extrapolados para outros tipos de solo.

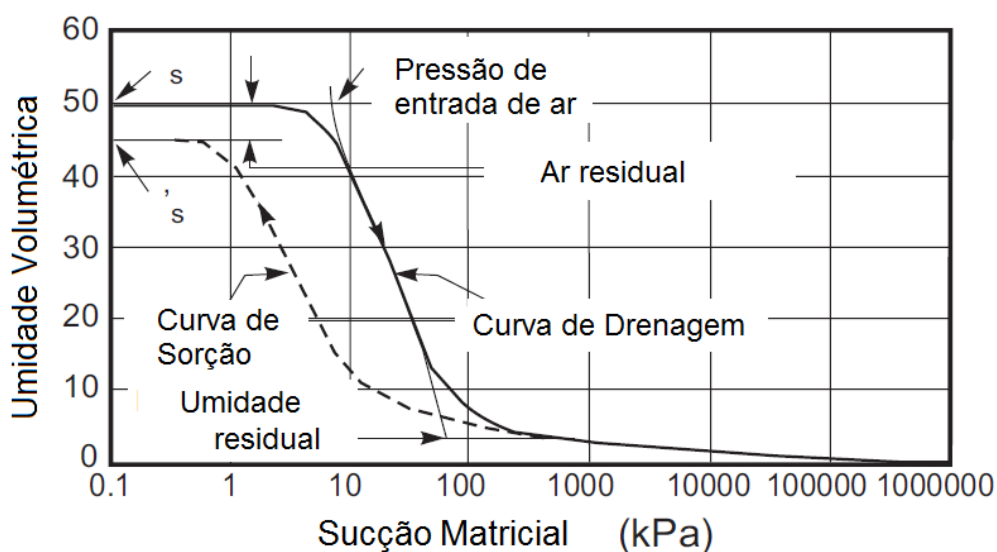


Figura 4 - Curva característica típica de um solo siltoso
Fonte: Fredlund e Xing (1994)

Os pontos notáveis da curva são a pressão de entrada de ar e a umidade residual. Eles dividem a curva em três zonas de sucção, classificadas como zona de efeito de borda – ou zona de efeito limite de entrada de ar –, zona de transição e zona residual de drenagem – ou zona residual de não-saturação –. A pressão de entrada de ar representa a diferença de pressão entre ar e água que causa o início da drenagem, ou seja, quando o ar começa a preencher os poros. Já a umidade residual representa o grau de saturação no qual a fase líquida do solo passa a se comportar de maneira descontínua, ou seja, quando a remoção de água se torna progressivamente mais difícil. Graficamente, é possível obter o valor da pressão de entrada de ar estendendo a inclinação constante da curva até o ponto de interseção com a horizontal que indica o solo saturado, enquanto o valor da umidade residual é obtido ligando o ponto no eixo horizontal de 1000000 kPa, tangenciando a curva até o cruzamento com a extensão da inclinação constante. Essa separação de zonas é ilustrada através da Figura 5 (VANAPALLI, FREDLUND e PUFAHL, 1999).

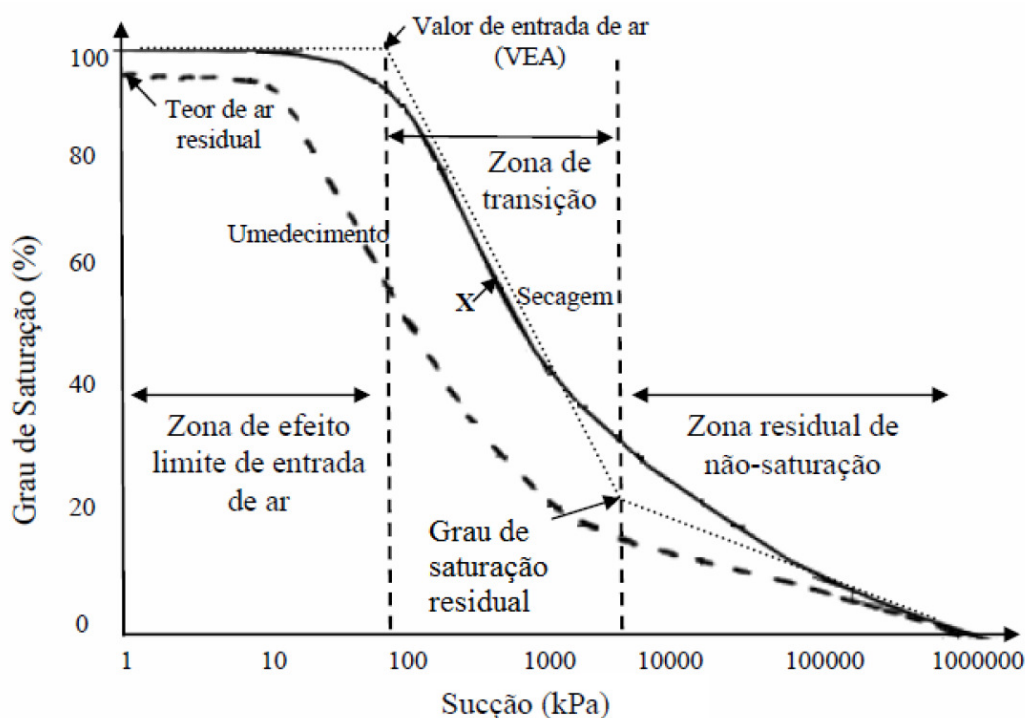


Figura 5 - Zonas componentes da curva característica
 Fonte: Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999)

Além do formato característico, dos pontos notáveis e das zonas estabelecidas, nas Figura 4 e Figura 5 também é possível perceber a diferença entre as trajetórias de umedecimento e secagem. Devido à diferença entre os poros primários e suas conexões, a mudança do ângulo de contato (na secagem e no umedecimento), e ao ar enclausurado nos vazios, ocorre o fenômeno da histerese. Assim, dado um grau de saturação, a sucção matricial é maior na drenagem em relação à sorção (TINJUM, BENSON e BLOTZ, 1997). Por ser um fenômeno complexo, a histerese é comumente ignorada e, por ser experimentalmente mais fácil de obter, a curva de secagem é mais utilizada do que a de umedecimento (HILLEL, 1998).

Essa representação gráfica é uma das propriedades mais importantes para a determinação do comportamento de um solo não saturado, sendo a base para a predição de diversos parâmetros essenciais, como a permeabilidade e a resistência ao cisalhamento (FREDLUND e XING, 1994).

O traçado da curva em questão depende, portanto da medição de dois parâmetros: a quantidade de água e a sucção. A medição da quantidade de água se mostra conceitualmente fácil, enquanto a medição da sucção matricial apresenta algumas peculiaridades.

2.3.1 Determinação da Curva Característica

A curva característica pode ser obtida de diversas maneiras, tanto em campo quanto em laboratório. A classificação dessa maneira de obtenção é feita de acordo com o método de medida da sucção, podendo ele ser direto ou indireto. Métodos diretos significam que a sucção é medida diretamente através de medidores de pressão. Já as técnicas indiretas dizem respeito àquelas nas quais a determinação da sucção é feita através de parâmetros e propriedades dos solos (FEUERHARMEL, 2003).

Uma das técnicas mais comuns para a medição e controle de sucção é a técnica de translação de eixos (FREDLUND, 2006; DELAGE, ROMERO e TARANTINO, 2008). Richards (1941) forneceu as bases para o desenvolvimento dessa técnica, que envolve um aumento artificial da pressão atmosférica na qual o solo está exposto. A medição de poropressões negativas esbarra na dificuldade causada pelo efeito da cavitação nos dispositivos de medida (BAKER e FRYDMAN, 2009). A técnica da translação de eixos contorna essa dificuldade. Com o aumento da pressão do ar, ocorre um aumento de mesmo valor na pressão da água presente nos vazios. Sendo a sucção matricial definida como a diferença entre a pressão do ar e a pressão da água, ela se mantém constante no processo. O aumento é imposto até se atingir valores mensuráveis para os equipamentos (TINJUM, BENSON e BLOTZ, 1997).

2.3.2 Métodos de medição de sucção

Marinho (2005) descreve os tensiômetros, o método do papel filtro, o método da placa de sucção e o método da placa de pressão como métodos de medida de sucção e solos. O autor explica como os tensiômetros interagem com o solo por meio de uma pedra poros que “interliga” a água do solo com a água do dispositivo, permitindo a medição da sucção da água do tensiômetro. Este aparato é considerado o mais simples para a medição de sucção e possui como sua maior limitação a cavitação, restringindo sua medição a sucções de até 90 kPa.

A técnica do papel filtro se baseia no fato de que quando solo é colocado em contato com um material poroso, a água tende a passar do solo para o material poroso até que o equilíbrio seja alcançado. Sendo a relação entre a sucção e a umidade do

material poroso determinada através de calibração, é possível determinar a sucção, em geral, utilizando a curva de calibração, que relaciona o teor de umidade do papel filtro com a sucção no papel filtro (que é a mesma do solo quando em equilíbrio) (MARINHO, 2005).

Para sucções de até 80 kPa, Marinho (2005) destaca a adequação do uso da placa de sucção. Ilustrado através da Figura 6. A diferença entre a altura do reservatório e da pedra porosa é a carga de pressão, que ao ser multiplicada pelo peso específico da água, fornece a sucção na pedra porosa, que é igual a encontrada no solo. As limitações desse método estão novamente na cavitação e, neste caso, também na altura que se pode impor em laboratório (MARINHO, 2005).

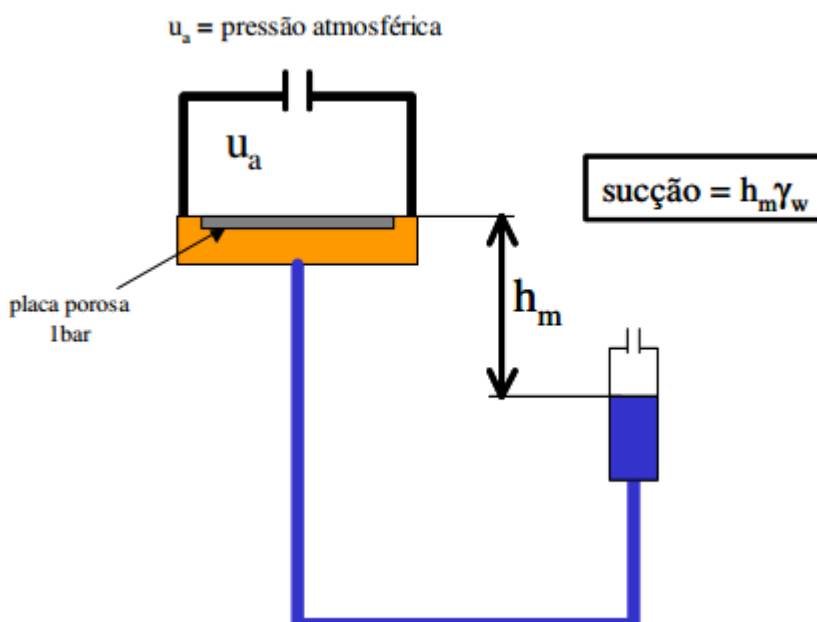


Figura 6 - Sistema de aplicação de sucção na placa de sucção
 Fonte: Marinho (2005)

Freitas Neto (2008), utilizando notas de aula de seu orientador resumiu através da Tabela 1 métodos utilizados para a medição de sucção em solos, destacando as faixas de medição e algumas particularidades de cada técnica. Vale destacar o método da placa de pressão por ser o utilizado pelo presente trabalho.

Tabela 1 - Métodos de medida de sucção

Método de Medida/ Tipo de Sucção	Faixa de Medida (kPa)	Observações
Blocos porosos (matricial)	10 a 1000	<ul style="list-style-type: none"> • Baseia-se na condutividade elétrica de materiais porosos como gesso, fibra de vidro e etc., bem como da resistência elétrica (ohms x Sucção); • Desvantagens: solubilidade do gesso, histerese pronunciada, mais sensível às altas sucções; • Tempo de Equilíbrio: Semanas.
Equilíbrio da fase vapor (total)	Toda a faixa acima de 400	<ul style="list-style-type: none"> • Solução com concentração conhecida; Umidade relativa; sucção total; • Amostras de solo em dessecador sem contato com a solução até o equilíbrio de peso; • Tempo de equilíbrio demorado
Extrato da solução do solo (osmótica)	Todos os valores	<ul style="list-style-type: none"> • Condutividade elétrica do extrato da solução; • Concentração de solutos; • Extratos + psicrômetros: Resultados precários
Funil de pedra porosa (matricial)	0 a 90	<ul style="list-style-type: none"> • Sucção aplicada diretamente à amostra • Indicado para determinar baixas sucções (Libardi, 1995); Tempo de Equilíbrio: Horas
Membrana de pressão	até 10000	<ul style="list-style-type: none"> • Emprega a técnica da translação de eixos; • Emprega membrana de celulose • Tempo de equilíbrio: Dias
Papel filtro com e sem contato (matricial/total)	30 a 30000	<ul style="list-style-type: none"> • Depende do contato com o solo, que, por sinal deve ser garantido; • Necessita calibração do papel; • Evitar formação de fungos nos papéis mais umedecidos • Pesagem com precisão de 0,0001g; • Tempo de equilíbrio de 7 a 30 dias
Placa de pressão (matricial)	0 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> • Emprega a técnica de translação de eixos; • Depende da pressão de entrada de ar na pedra porosa; • Continuidade da fase ar; • Tempo de equilíbrio: Horas
Princípios osmóticos (matricial)	200 a 1600 (PEG 20000)	<ul style="list-style-type: none"> • Solo em contato com solução com concentração conhecida (umidade relativa conhecida) através de membrana seletiva; • Solução de Polietileno Glicol (PEG), peso molecular 20000; • Útil para instalar e controlar sucção em ensaios; • Tempo de equilíbrio: Horas.
Psicrômetros (total/osmótica)	100 a 8000	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de rigoroso controle de temperatura, principalmente nas baixas sucções; mais recomendado para laboratório; • Sucção osmótica: mede sucção de extrato da solução do solo (Confiabilidade precária) (Fredlund; Rahardjo, 1993); • Tempo de Equilíbrio: Minutos.

Método de Medida/ Tipo de Sucção	Faixa de Medida (kPa)	Observações
Tensiômetro padrão (matricial)	0 a 100	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de resposta: Depende da condutância da pedra porosa e sensibilidade do elemento de medida; • Existem tensiômetros baseados em princípios osmóticos; • Tempo de equilíbrio: Minutos.
Tensiômetro de alta capacidade (tac) * (matricial)	0 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> • Medem sucção abaixo de - 1atm; até uma sucção de 1500kPa; • Tiram partido da elevada resistência à tração da água (Ridley, Burland, 1993) e tem curto tempo de resposta.

Fonte: Vilar, 2006 (*apud* FREITAS NETO, 2008)

2.3.3 Fatores que influenciam a curva característica

Georgetti (2010) destaca que os principais fatores que influenciam a forma da curva característica de solos são a granulometria, sua estrutura e mineralogia.

O tipo de solo é fator determinante para a forma da curva. Curvas são apresentadas na Figura 7. Fredlund e Xing (1994) destacam essas diferenças e ressaltam que os valores de pressão de entrada de ar geralmente aumentam com a plasticidade do solo. Os autores ainda comentam que outros fatores tais como histórico de tensões afetam o formato da curva.

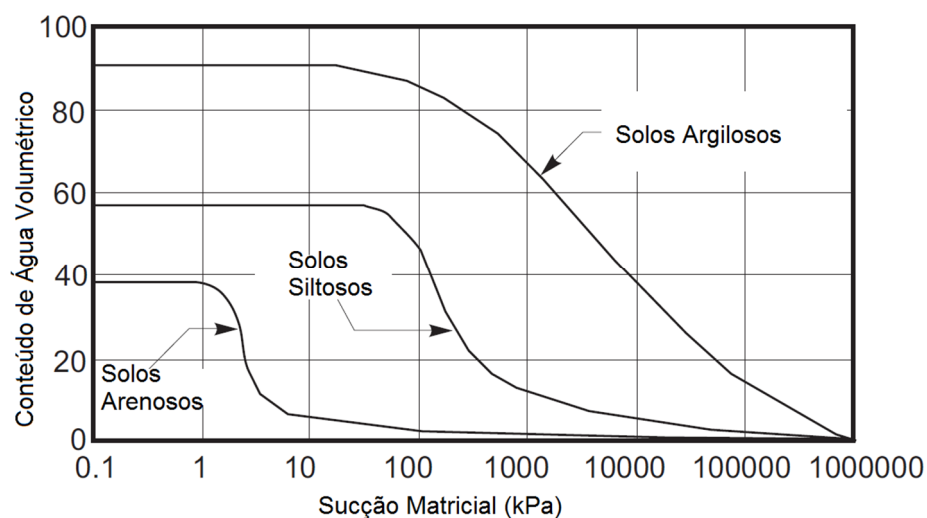


Figura 7 - Curvas características típicas para solos arenosos, siltosos e argilosos
Fonte: Fredlund e Xing (1994)

Em ensaios envolvendo argilas arenosas, Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999) perceberam diferenças na forma das curvas características de acordo com o teor de umidade no momento da moldagem. Essa influência é ilustrada através da Figura 8.

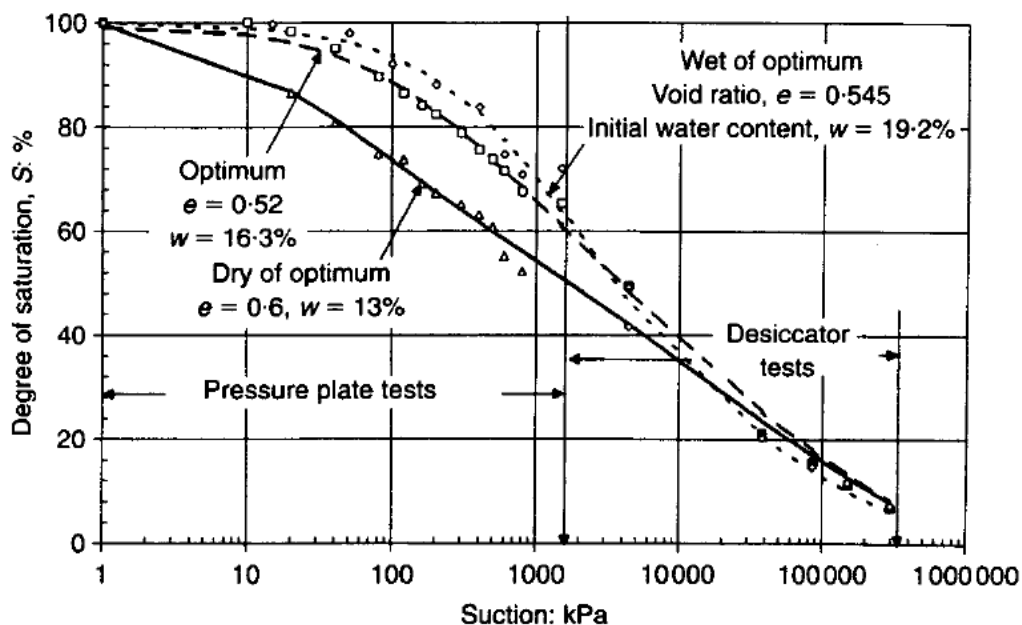


Figura 8 - Curvas características para amostras compactadas com diferentes teores de umidade inicial

Fonte: Vanapalli, Fredlund e Pufahl (1999)

Os autores atribuem essas diferenças a mudanças na macroestrutura resultantes das diferenças de umidade inicial. Definindo aqui a macroestrutura do solo como a arranjo de agregados de solo (Vanapalli, Fredlund e Pufahl, 1999).

Gallipoli, Wheeler e Karstunen (2003) chegaram à conclusão de que o volume específico pode ser tão determinante quanto a sucção para a determinação do grau de saturação. Dados plotando as curvas de retenção para diferentes volumes específicos encontram-se dispostos na Figura 9.

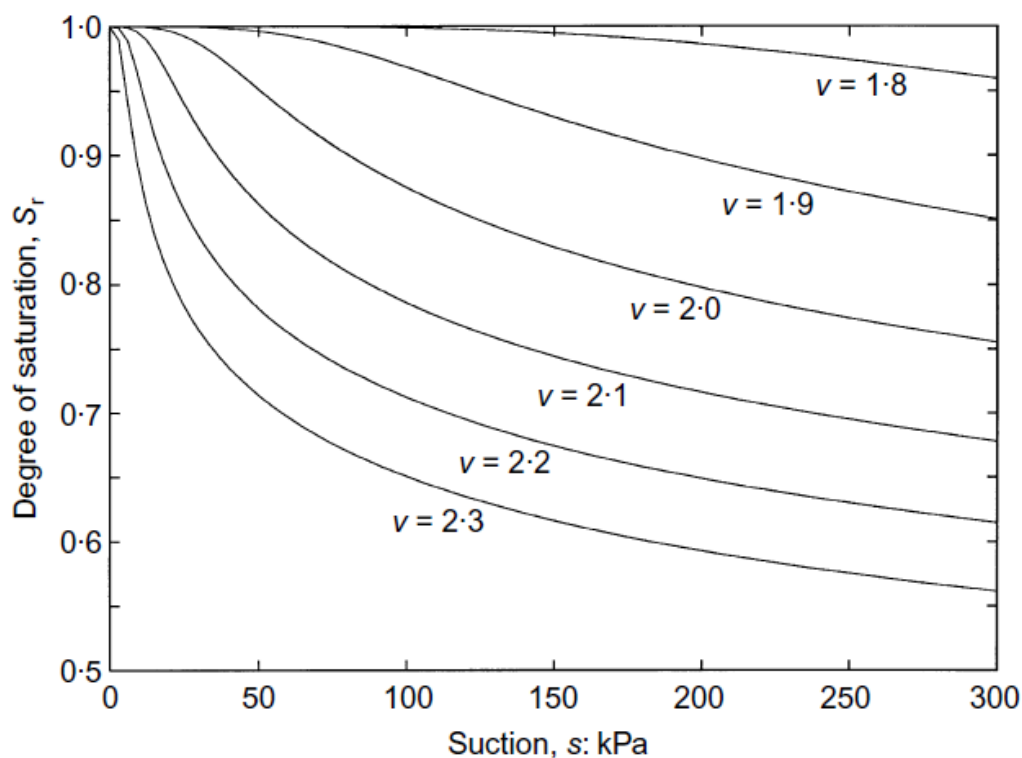


Figura 9 - Curvas características para diferentes volumes específicos
 Fonte: Gallipoli, Wheeler e Karstunen (2003)

Feuerharmel (2007) ainda destaca fatores como ciclos de umedecimento e secagem e energia de compactação.

2.3.4 Equações Propostas pela Literatura

“Equações adequadas para representar matematicamente as curvas características de solos são necessárias tanto para apresentações gráficas quanto para modelagem numérica” (GITIRANA JR. e FREDLUND, 2004). Existem muitas equações de diferentes pesquisadores que tentam descrever a curva característica. A natureza dessas equações é, preponderantemente, empírica. Fredlund e Xing (1994) propuseram uma equação após analisarem as propostas por Brooks e Corey (1964), Williams et al. (1983), Mckee e Bumb (1984 e 1987), Roger e Hornberger (1978), van Genuchten (1980) e Gardner (1958). Na Tabela 2 são apresentadas as equações e resumidos os parâmetros nelas contidos.

Tabela 2 - Equações propostas pela literatura para descrever a curva característica

Referência	Equação	Descrição das Variáveis
Burdine (1953)	$S = \frac{1}{(1 + (\alpha\psi)^n)^m}$	S=grau de saturação ψ=sucção a,n e m=parâmetros de ajuste (m=1-2/n)
Gardner (1958)	$S = \frac{1}{1 + \alpha\psi^n}$	a e n=parâmetros de ajuste
Brooks e Corey (1964)	$S = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda$	ψb=sucção de entrada de ar λ=índice de distribuição de tamanho dos poros
Brutsaert (1966)	$S = \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^n}$	ψb=sucção de entrada de ar n=parâmetro relacionado à distribuição de tamanho de poros
Mualem (1976)	$S = \frac{1}{(1 + (\alpha\psi)^n)^m}$	S=grau de saturação ψ=sucção a,n e m=parâmetros de ajuste (m=1-1/n)
Roger e Hornberger (1978)	$\psi = a(S_s - b)(S_s - 1)$	Ss=θ/θs a e b=parâmetros de ajuste
van Genuchten (1980)	$S = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n}\right]^m$	a, n, m= parâmetros de ajuste
William et. al. (1983)	$\ln\psi = a + b\ln\theta$	a e b=parâmetros de ajuste
Mckee e Bumb (1984)	$S = \exp\left(\frac{a - \psi}{n}\right)$	a e n=Parâmetros de ajuste
Mckee e Bumb (1987)	$S = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\psi - a}{n}\right)}$	a, n=parâmetros de ajuste
Kosigi (1994)	$S = \left(1 + \frac{a - \psi}{a - n}\right) \exp\left(-\frac{a - \psi}{a - n}\right)$	a e n= parâmetros de ajuste
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r}\right)}\right] \frac{\theta_s}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]\right\}^m}$	ψ0=10^6kPa ψr=sucção correspondente ao ponto de saturação residual a, m, n=parâmetros de ajuste

Fredlund e Xing (1994) e Leong e Rahardjo (1997) destacam uma limitação importante das equações de Brooks e Corey (1964), William et al. (1983) e Mckee e Bumb (1984). Os primeiros alertam para a característica descontínua da curva para valores de quantidade de água próximos à saturação. Mesmo considerando um comportamento observável em areias grossas, os autores ressaltam o caráter gradual da curva no momento da entrada do ar. A equação de Roger e Hornberger (1978) é

citada por contemplar esse caráter. Já o trabalho mais recente (LEONG e RAHARDJO, 1997) utiliza uma abordagem gráfica para uma argumentação semelhante. As três equações nas quais observou-se a descontinuidade no estudo de 1994 não apresentam forma sigmoide, enquanto as equações de Gardner (1958), van Genuchten (1980), Mckee e Bumb (1987) e Fredlund e Xing (1994) possuem, tornando-as mais versáteis.

As três primeiras equações da Tabela 2, ou seja, a de Brooks e Corey (1964), William et al. (1983) e Mckee e Bumb (1984), se mostram, portanto, mais propensas a descreverem o comportamento de solos mais granulosos, devido a sua característica mais repentina, que gera um gráfico mais acentuado.

Em uma análise comparativa envolvendo diferentes solos de diferentes regiões – desde solos arenosos dos Estados Unidos, até solo argiloso de Israel – Leong e Rahardjo (1997) concluem que entre as equações que apresentam forma sigmoide, as de Fredlund e Xing (1994) e van Genuchten (1980) tem desempenho melhor por possuírem mais parâmetros constituintes em detrimento às equações de Gardner (1958) e Mckee e Bumb (1987). Ainda nesse estudo, foi observado que a equação de Fredlund e Xing (1994) obteve performance levemente superior à de van Genuchten (1980), mesmo tendo a segunda se desempenhado melhor quando ajustada a solos de característica mais arenosa.

2.4 FORMAÇÃO GUABIROTUBA

Apresentando uma área de aproximadamente 3000 km², a Formação Guabirota é composta por sedimentos do Terciário médio ao superior (SALAMUNI e STELLFELD, 2001). Sua distribuição espacial é ilustrada através da Figura 10. É possível perceber, portanto, que a formação abrange Curitiba e região metropolitana.

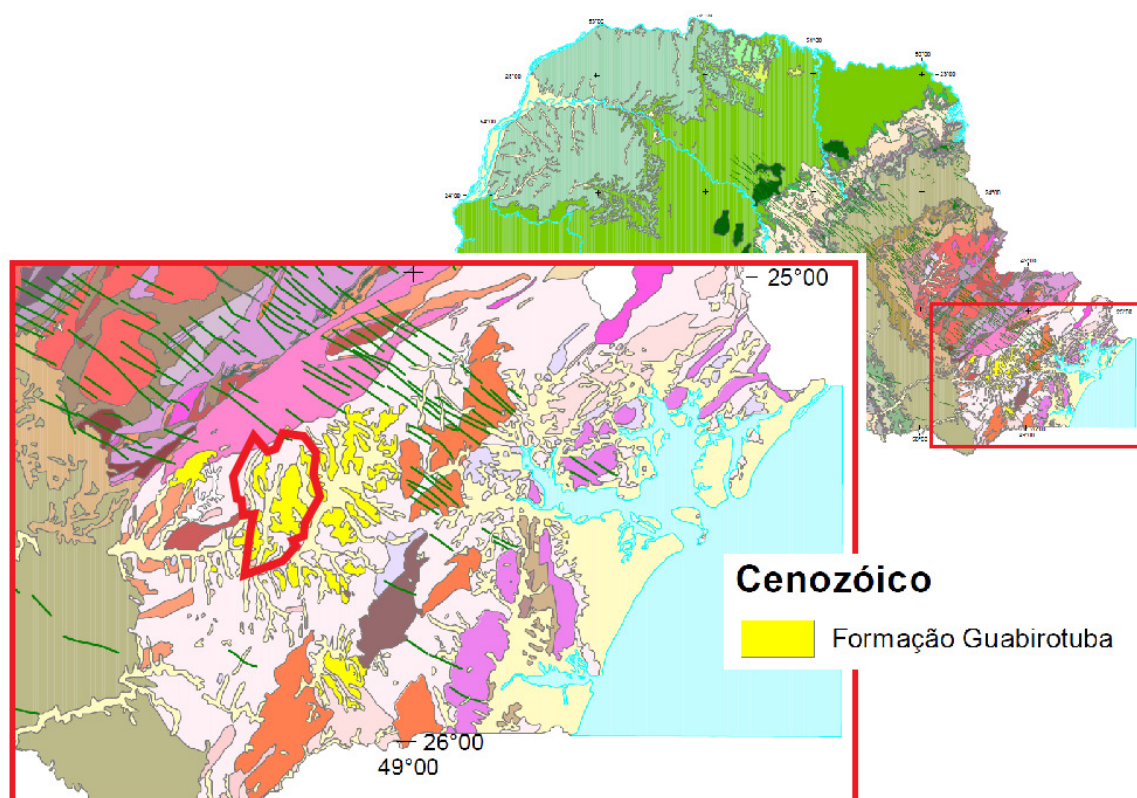


Figura 10 - Delimitação espacial da Formação Guabirotuba com Curitiba destacada
Fonte: Adaptado de MINEROPAR (2001)

Ela é formada predominantemente por argilitos e siltitos esverdeados, com presença de areias arcossianas. Mais raramente é possível a ocorrência de conglomerados oligomíticos e impregnações de carbonato de cálcio (SALAMUNI, 1998). A espessura atingida pelos sedimentos que compõe a formação varia entre sessenta e oitenta metros (FELIPE, 2011). Na Figura 11 é esquematizado um perfil típico da formação Guabirotuba.

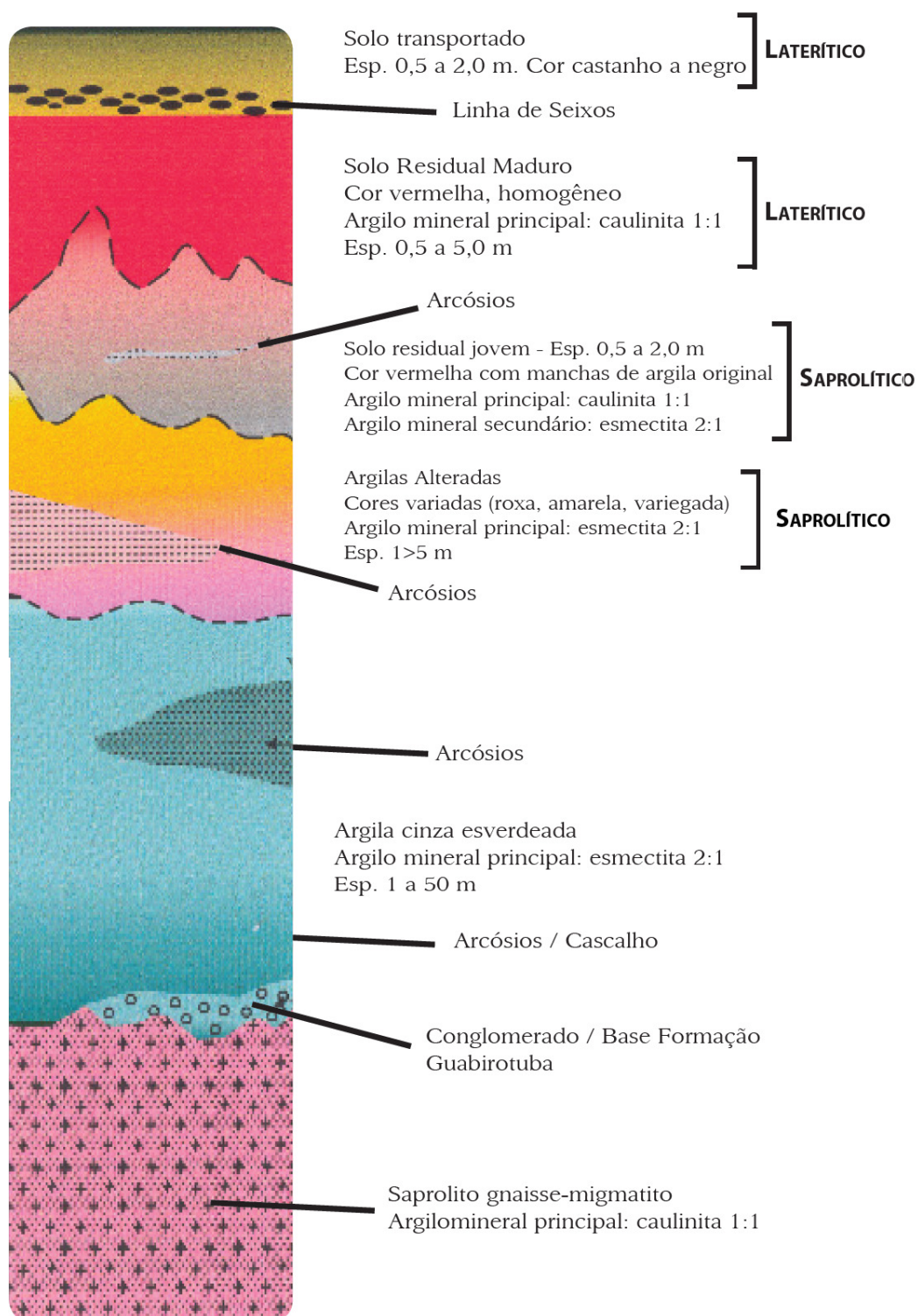


Figura 11 - Perfil típico da Formação Guabirotuba
 Fonte: Felipe (2011)

2.4.1 Curvas Características de solos da Formação Guabirotuba

Como estudos contemplando a curva característica de solos da Formação Guabirotuba destacam-se os realizados por Matsubara (2015) e Rosa (2016). Esses estudos, largamente utilizados no presente trabalho, determinaram a curva característica dos solos aqui chamados, respectivamente, de horizonte 3 e horizonte 2.

Utilizando para ajuste as equações de Gardner (1958), van Genuchten (1980), Williams et al. (1983) e Mckee e Bumb (1984 e 1987), Matsubara (2015) concluiu que a equação que melhor descreve a curva característica de drenagem do solo estudado é a proposta por van Genuchten em 1980, com r^2 de 0,9979 (considerando trecho inicial em reta). O ensaio por ele realizado se limitou a sucções de até 400 kPa.

Rosa (2016) utilizou equações propostas por Burdine (1953), Gardner (1958), Brooks e Corey (1964), Brutsaert (1966), Farrel e Larson (1972), Mualem (1976), van Genuchten (1980), Williams et al. (1983), Mckee e Bumb (1984 e 1987) e Kosigi (1994) para determinar qual delas melhor descrevia os dados experimentais encontrados. O autor conclui que a equação que obteve o melhor ajuste foi a proposta por van Genuchten (1980). O intervalo de medição de sucção utilizado foi de 10 a 800 kPa.

Os gráficos contendo as curvas características são posicionados, no presente trabalho, na seção de resultados (Gráfico 10 e Gráfico 9, respectivamente) por motivos de comparação com horizonte 1. Os resultados dos ensaios de caracterização desses solos também estão dispostos na seção 4.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 COLETA DO SOLO

A coleta das amostras se deu em taludes expostos em uma obra localizada em Curitiba, no estado do Paraná. Ela ocorreu dividida em dois momentos. No primeiro, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de três horizontes distintos em dois taludes diferentes. Em um segundo momento, foram coletadas amostras indeformadas de um dos horizontes anteriormente citados – em função de uma dificuldade na moldagem das amostras no anel metálico a ser inserido na célula de pressão. A primeira etapa mencionada foi realizada na primeira metade de 2015 e a segunda, em março de 2016. A Figura 12 apresenta uma foto tirada de um dos taludes expostos do qual foram recolhidas amostras.



Figura 12 - Horizonte exposto e um talude
Fonte: Rosa (2016)

Para a coleta de amostras indeformadas, os taludes foram cortados localmente com o intuito de proporcionar uma base horizontal para a introdução de tubos de PVC. O procedimento é mostrado na Figura 13. Para cada horizonte, quatro amostras foram retiradas. As dimensões do tubo eram de 100 milímetros de diâmetro e 15 centímetros de altura. Após a inserção dos tubos, o excesso de solo, retido na parte externa, foi removido, até ser possível a retirada da amostra sem danificá-la. Posteriormente, o

material coletado, ainda no interior do PVC, foi envolto em filme plástico para preservar a umidade *in situ*.



Figura 13 - Posicionamento do tubo de PVC para retirada de amostra indeformada
Fonte: Matsubara (2015)

As amostras deformadas foram retiradas nos mesmos pontos que as indeformadas. Uma camada superficial de aproximadamente cinco centímetros foi descartada, visando reduzir a interferência de possíveis impurezas. Após sua retirada, elas foram dispostas em sacos plásticos fechados com elásticos. As amostras já armazenadas são mostradas na Figura 14.



Figura 14 - Amostra deformada armazenada
Fonte: Matsubara (2015)

A primeira coleta descrita foi feita por Matsubara (2015). A segunda coleta descrita foi realizada por Rosa (2016).

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.2.1 Granulometria

A preparação das amostras seguiu metodologia descrita na NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO..., 2016). O ensaio foi realizado seguindo os passos propostos pela NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO..., 2016).

3.2.2 Limite de Liquidez

A preparação das amostras seguiu metodologia descrita na NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO..., 2016). O ensaio foi realizado seguindo os passos propostos pela NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO..., 2016).

3.2.3 Limite de Plasticidade

A preparação das amostras seguiu metodologia descrita na NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO..., 2016). O ensaio foi realizado seguindo os passos propostos pela NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO..., 2016).

3.2.4 Densidade Real dos Grãos

A preparação das amostras seguiu metodologia descrita no ME 041 (DEPARTAMENTO..., 1994). O ensaio foi realizado seguindo os passos propostos pelo ME 093 (DEPARTAMENTO..., 1994), com uma adaptação no que tange ao bico de gás, substituído por uma bomba de vácuo ligada a uma dessecadora. Portanto, a fervura recomendada foi atingida pela diminuição da pressão e não pelo aumento da temperatura.

3.3 OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

O equipamento utilizado para a obtenção da curva característica dos solos estudados é o modelo SWC-150 da GCTS (Geotechnical Consulting & Testing Systems). A metodologia empregada, portanto, se aproxima tanto quanto possível das recomendações descritas no manual do dispositivo. Equipamentos auxiliares são a coluna suspensa HWA-HCA, dispositivo de controle de temperatura HTC-250 e condicionador de sinal SCU-DC, todos do mesmo fabricante, a GCTS.

3.3.1 Preparação da Amostra e do Equipamento

A etapa de preparação pode ser dividida em três partes. A primeira consiste na preparação da amostra de solo a ser analisada. A segunda, na preparação da pedra porosa. Finalmente, a terceira parte na montagem do equipamento, contemplando os cuidados com tubos e válvulas.

A recomendação do manual do fabricante, no que tange à preparação da amostra é de que um anel metálico seja pressionado verticalmente contra o solo indeformado (GCTS Testing Systems, 2007). Para os solos analisados, fez-se necessário o entalhe com o auxílio de uma faca. Após retiradas do tubo de PVC com o qual foram coletadas, as amostras foram cuidadosamente entalhadas e inseridas no anel metálico. Após um excesso extrapolar o limite superior do anel, a amostra foi retificada. O processo de entalhe, no caso do horizonte 2, é ilustrado na Figura 15 e Figura 16.



Figura 15 - Entalhe da amostra
Fonte: Autoria Própria (2016)



Figura 16 - Fim da etapa de entalhe
Fonte: Autoria própria (2016)

Para a determinação da curva característica de secagem de um solo, a recomendação que consta no manual do equipamento é de que o solo a ser analisado seja saturado. A amostra, já inserida no disco metálico, é posicionada em um recipiente de uma dessecadora com água destilada, cujo nível excede em alguns milímetros o topo da amostra. Os dois lados expostos são cobertos com filtro de papel e na parte superior um peso é posicionado. Fechada a dessecadora, a amostra é saturada por um período de uma semana, com a bomba de vácuo funcionando de maneira intermitente.

A preparação da pedra porosa consiste basicamente em sua fixação em um anel metálico, de maneira a garantir sua propriedade essencial para esse ensaio: permitir apenas a passagem de água, e não de ar. Essa fixação é realizada pelo fabricante (GCTS Testing Systems) através de cola epóxi.

A montagem do ensaio se inicia com a retirada da amostra de solo da água, removendo o excesso de água com o auxílio de um papel absorvente. O solo é transferido para a pedra porosa com cuidado para garantir a centralização. Tanto a pedra porosa, quanto o solo (conjunto solo e anel metálico), são pesados. A pedra porosa é umedecida e pressionada no fundo da célula (saturação do conjunto que leva à bureta de medição da quantidade de água). São então montados o topo da célula, o compensador e a placa de carga, com suas respectivas tubulações, com preenchimento com água quando necessário. A célula se encontra, então, lacrada.

Em resumo, a montagem consiste em um compressor aplicando uma pressão determinada na célula através de entradas de ar na placa de topo e no compensador, e buretas graduadas medindo a saída de água através da placa inferior (fundo da

célula. O equipamento conta com medidores e controle de temperatura, que evita qualquer alteração de volume por esse motivo. Para a determinação de uma ocasional mudança de volume, um relógio comparador é posicionado na placa de carga, captando qualquer mudança de volume (altura) da amostra, a fixação desse relógio é mostrada na Figura 17. Um esquema do ensaio montado com a coluna suspensa é apresentado na Figura 18.



Figura 17 - Posicionamento do relógio comparador
Fonte: Matsubara (2015)

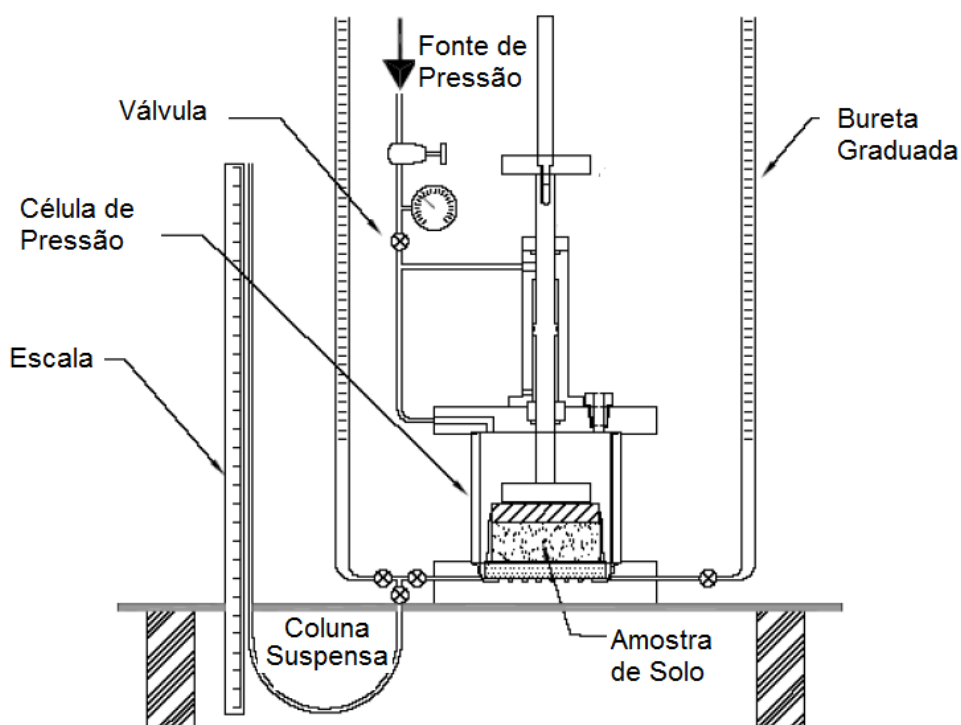


Figura 18 - Esquema do ensaio montado com coluna suspensa
Fonte: GCTS Testing Systems (2007)

Após a montagem do ensaio, alguns comentários relativos a dificuldades e particularidades de cada etapa se mostram pertinentes. O presente trabalho se encarregou da realização de um dos ensaios e utilizou os dados obtidos por Matsubara (2015) e Rosa (2016), juntamente com preciosas contribuições de ambos os autores. Essas contribuições foram notadas em todo o trabalho, mas em especial nas particularidades do ensaio.

Na etapa de preparação da amostra, no que compreende a inserção do solo em anel metálico, destaca-se que seguir a instrução do manual, de pressionar o anel contra a amostra indeformada até que ela preencha o molde, só se mostra possível com solo recém coletado ou mantido em câmara úmida. Matsubara (2015) seguiu tal recomendação para o ensaio feito para o horizonte 3. Enquanto Rosa (2016), para o horizonte 2 e o presente trabalho, para o horizonte 1, houve necessidade de entalhar a amostra com auxílio de uma faca. Esse entalhe demanda extremo cuidado para não romper a amostra. Ocorreu um rompimento durante um dos entalhes, forçando o descarte da amostra e recomeço do processo.

Ainda na preparação do solo, na saturação da amostra notou-se bastante dificuldade em atingir saturação na dessecadora. Mesmo após dias de submersão ainda era possível notar bolhas de ar deixando amostra quando era ligada a bomba de vácuo. Quando esse fenômeno deixou de ser notado, considerou-se a amostra saturada e, por segurança, ela foi mantida submersa por mais um dia, totalizando aproximadamente 12 dias de submersão.

A etapa de montagem da pedra porosa não apresentou dificuldades por ser realizada pelo fabricante. A etapa de montagem do equipamento não demonstrou dificuldades relevantes.

3.3.2 Coleta de Dados

Como descrito anteriormente, a curva característica relaciona sucção (nesse caso matricial) e a quantidade de água em uma amostra de solo. Os dados a serem coletados, portanto, são a pressão de sucção e a quantidade de água que deixou a amostra, que, no tratamento de dados, pode ser convertida em saturação.

Nesse ensaio, a sucção é a variável independente e, portanto, a controlada pelo estudo. A variável dependente é a quantidade de água que deixa o corpo de prova. As leituras são feitas diariamente. Inicia-se com uma pressão de 1 kPa. Após a estabilização, ou seja, quando não há mudança relevante no volume de água entre

uma leitura e outra, a quantidade de água presente no solo do momento corresponde àquela que se equilibra com a pressão aplicada. A pressão é então aumentada e aguarda-se outra estabilização. A mudança relevante é de 1 mm na altura da bureta graduada, enquanto o intervalo de tempo entre uma leitura e outra é de 24 horas.

Para leituras de pressões muito baixas (1 a 5 kPa), utiliza-se a coluna suspensas através da diferença entre as alturas das colunas de água. Para pressões superiores, o equipamento conta com dois medidores e reguladores de pressão, um para pressão alta (até 1500 kPa) e um para baixa (até 200 kPa).

Devido à incerteza no tempo de estabilização, é difícil precisar o tempo demandado para concluir um ensaio, limitando-se a informar a duração do ensaio que compôs o presente estudo. Contando com um problema no compressor, que precisa manter pressão disponível durante todo o ensaio, sendo que seu pressostato fica regulado para ligar e desligar o aparelho automaticamente, o ensaio durou quatro meses entre a montagem e a última leitura.

3.4 CORRELAÇÃO COM EQUAÇÕES EXISTENTES

A análise de correlação é feita com o auxílio do software Scidavis, ajustando os dados obtidos às equações propostas pela literatura. A consistência dos dados é representada pelo coeficiente de determinação (r^2).

Como citado anteriormente, na Revisão de Literatura: Para o horizonte 3, Matsubara (2015) ajustou os dados às equações de Williams et al. (1983), Mckee e Bumb (1984 e 1987), van Genuchten (1980) e Gardner (1958). Rosa (2016) ajustou, para um segundo horizonte (aqui chamado de horizonte 2) os dados às mesmas equações adicionando também as equações de Burdine (1953), Brooks e Corey (1964), Brutsaert (1966), Mualem (1976) e Kosigi (1994). Esses ajustes foram utilizados, refeitos e complementados pelo presente trabalho, que adicionou as equações de Roger e Hornberger (1978) e Fredlund e Xing (1994).

Os ajustes foram feitos segundo duas hipóteses. A primeira hipótese aqui chamada de trecho único, ou seja, quando a equação foi ajustada a todos os pontos experimentais obtidos. A segunda hipótese é aqui chamada de trecho inicial em reta, quando os primeiros pontos, que visualmente compõem um patamar no gráfico são ajustados a uma reta e os demais são ajustados segundo as equações propostas pela literatura.

3.5 PROPOSIÇÃO DE UMA NOVA EQUAÇÃO

Após o ajuste das curvas utilizando as equações propostas pela literatura aos dados experimentais encontrados, torna-se válido propor uma nova equação que descreva as curvas obtidas em laboratório. Sendo essa proposição mais relevante de acordo com as vantagens em relação às já existentes, seja por melhores ajustes, seja por simplicidade e facilidade de aplicação.

A proposição de uma nova equação é feita através da análise das melhores equações, além de formatos característicos disponíveis em bancos de dados. Para esse exercício, foi utilizado o Software Sigmaplot 13, para ajustes iniciais e consulta ao banco de dados, e o Scidavis para o ajuste, com o intuito de manter o mesmo programa utilizado para as equações propostas pela literatura.

A análise das, aqui chamadas melhores equações, consistiu em plotar as equações que obtiveram os melhores coeficientes de correlação seguindo metodologia semelhante à aplicada por Leong e Rahardjo (1997), para as equações de Fredlund e Xing (1994) e de van Genuchten (1980). Essa metodologia baseia-se em plotar os gráficos resultantes de cada uma das equações variando um dos parâmetros de cada vez, enquanto os demais permanecem constantes. Isso permite a percepção e qual o efeito de cada parâmetro no formato da curva. Por exemplo, na equação proposta por van Genuchten (1980) o parâmetro a determina o comprimento do patamar anterior ao ponto de entrada de ar, enquanto o parâmetro n determina a inclinação da zona de transição e o parâmetro m é responsável por refinar essa inclinação. Leong e Rahardjo (1997) destacam a semelhança desse comportamento nos parâmetros de ajuste da equação proposta por Fredlund e Xing (1994). A Figura 19 é um exemplo dessa metodologia.

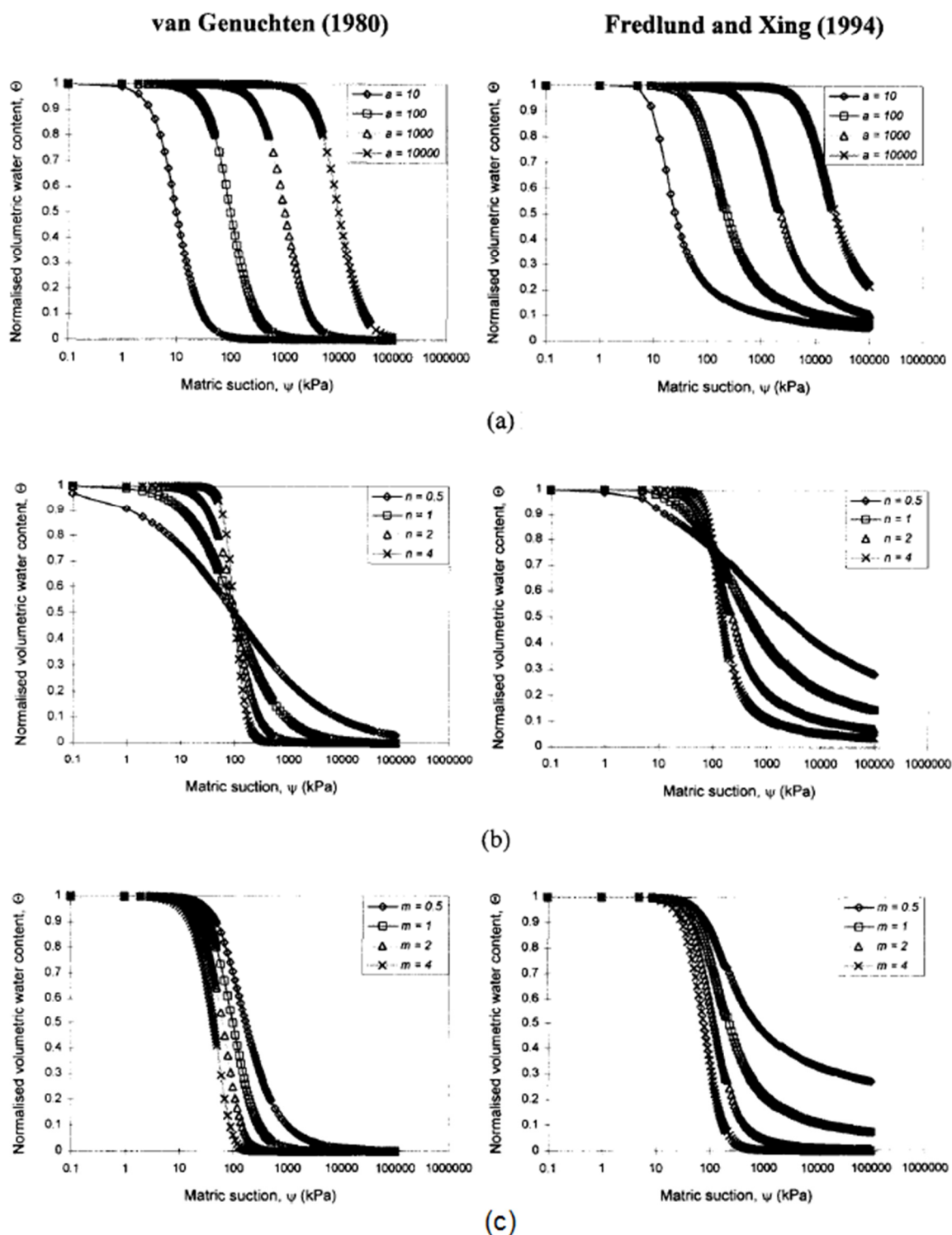


Figura 19 - Efeito dos parâmetros de ajuste nas equações de van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) - (a) Parâmetro a variando, (b) parâmetro n variando, (c) parâmetro m variando
Fonte: Leong e Rahardjo (1997)

Os formatos característicos disponíveis em bancos de dados dizem respeito ao banco de dados do software SigmaPlot 13, que possui uma série de equações conhecidas agrupadas de acordo com sua forma resultante. Para o presente estudo

foram utilizadas as pertencentes à característica exponencial, dada a escala do eixo das abcissas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 GRANULOMETRIA

Como primeiro resultado dos ensaios de caracterização temos as curvas granulométricas dos solos estudados.

O Gráfico 1 representa a distribuição granulométrica do, aqui tratado como, horizonte 1. De acordo com os parâmetros dispostos por normas brasileiras, há nesse solo aproximadamente 13% de areia grossa, 19% de areia média, 16% de areia fina, 35% de silte e 18% de argila. Da curva resultante também é possível chegar ao coeficiente de não uniformidade, que, nesse caso, é de 87,87, sendo considerado não uniforme.

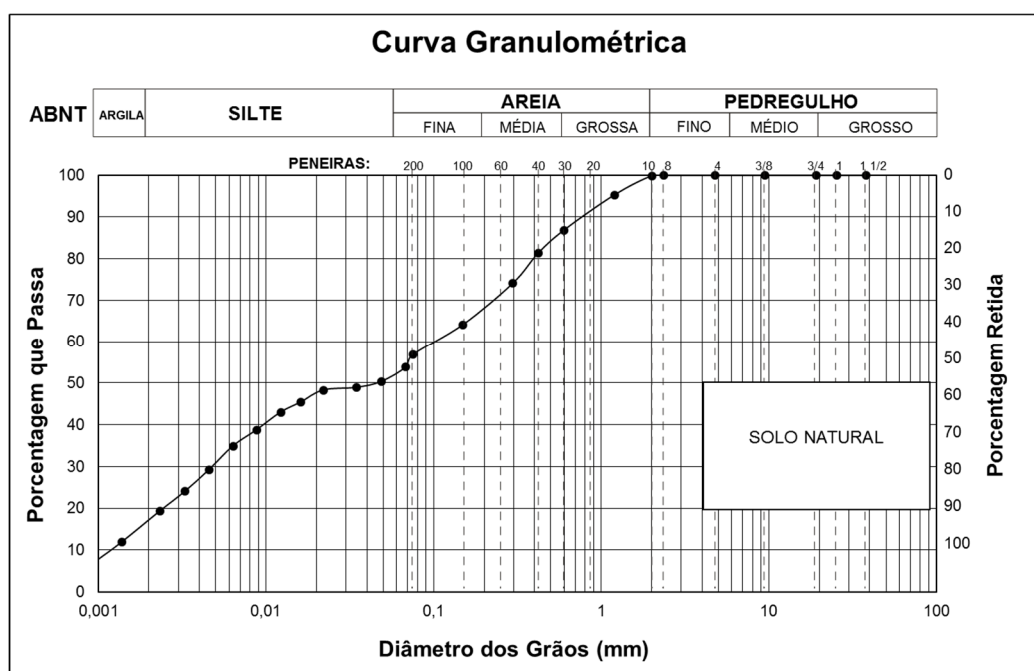


Gráfico 1 - Curva granulométrica do horizonte 1
Fonte: Autoria própria (2016)

O solo cuja granulometria é representada pelo Gráfico 2 apresenta, de acordo com os parâmetros dispostos na NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO..., 1995), composição de 2% de pedregulho, 19% de areia grossa, 11% de areia média, 14% de areia fina, 38% de silte e 15% de argila. O solo em questão também apresenta um coeficiente de não uniformidade de aproximadamente 57, sendo considerado não uniforme (ROSA, 2016).

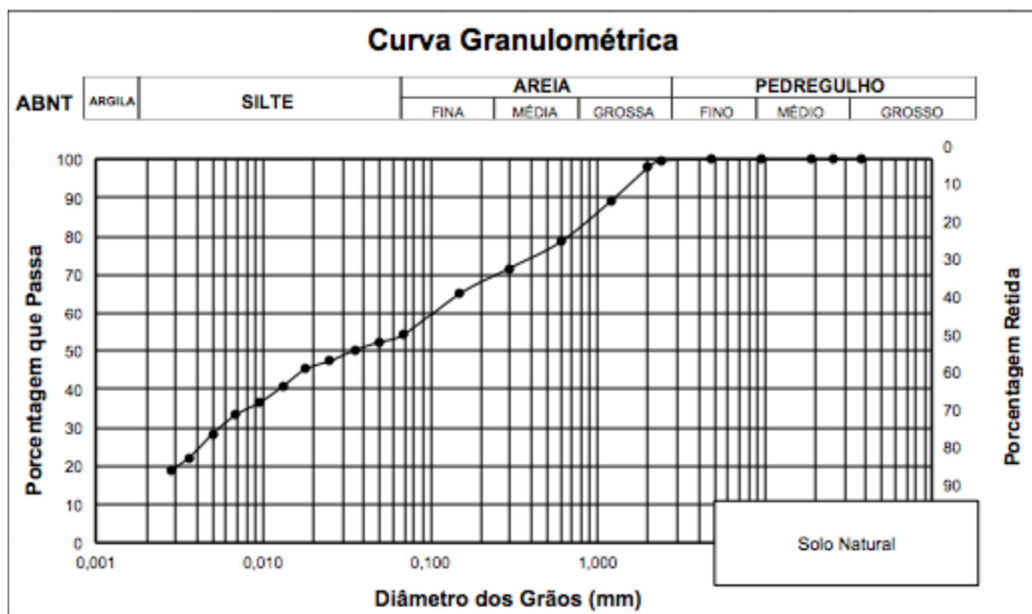


Gráfico 2 - Curva granulométrica do horizonte 2
 Fonte: Rosa (2016)

Por fim, o Gráfico 3 apresenta o gráfico resultante para o horizonte 3. O solo em questão se mostra preponderantemente argiloso, constituído por 5% de areia grossa, 10% de areia média, 22% de areia fina, 18% de silte e 46% de argila. Este também pode ser classificado como não uniforme.

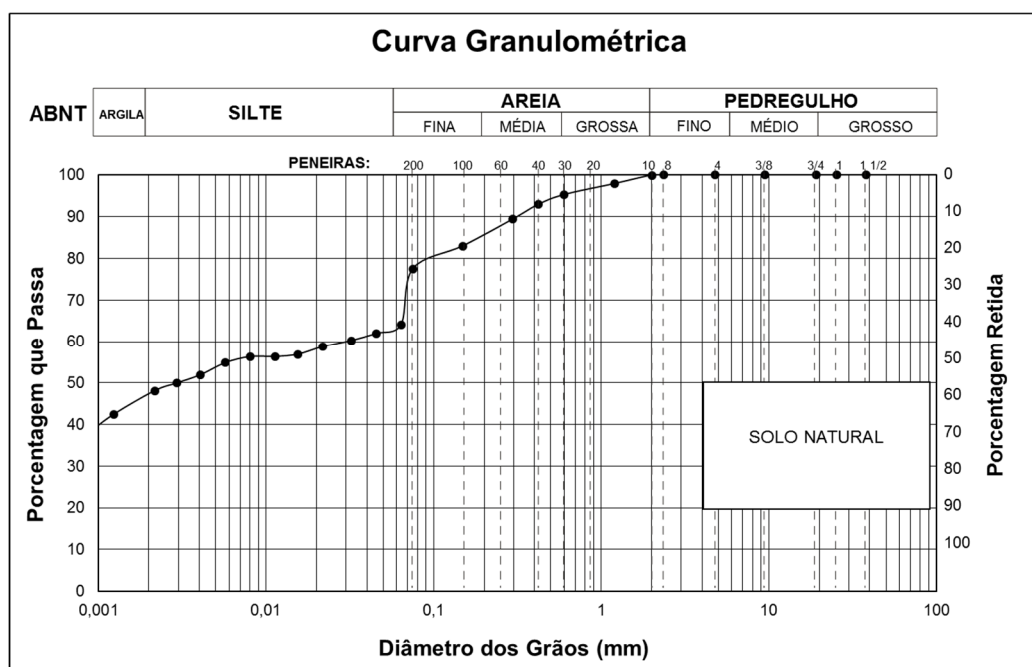


Gráfico 3 - Curva granulométrica do horizonte 3
 Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

4.2 LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE

Os ensaios para determinar os limites de liquidez e plasticidade são os gráficos para a determinação do limite de liquidez, o limite de plasticidade e, por fim, a determinação do índice de plasticidade de cada um dos horizontes aqui estudados.

O Gráfico 4 foi obtido por regressão logarítmica para os pontos ensaiados, buscando o valor de umidade correspondente a vinte e cinco golpes do aparelho de Casagrande para o horizonte 1. O resultado é um limite de liquidez de 68,85%. Para o limite de plasticidade, foi encontrado o valor de 51,61%, resultando em um índice de plasticidade de 17,24%. Esses valores indicam, em conjunto com a granulometria, de acordo com a classificação rodoviária de solos, um solo argiloso A-6.

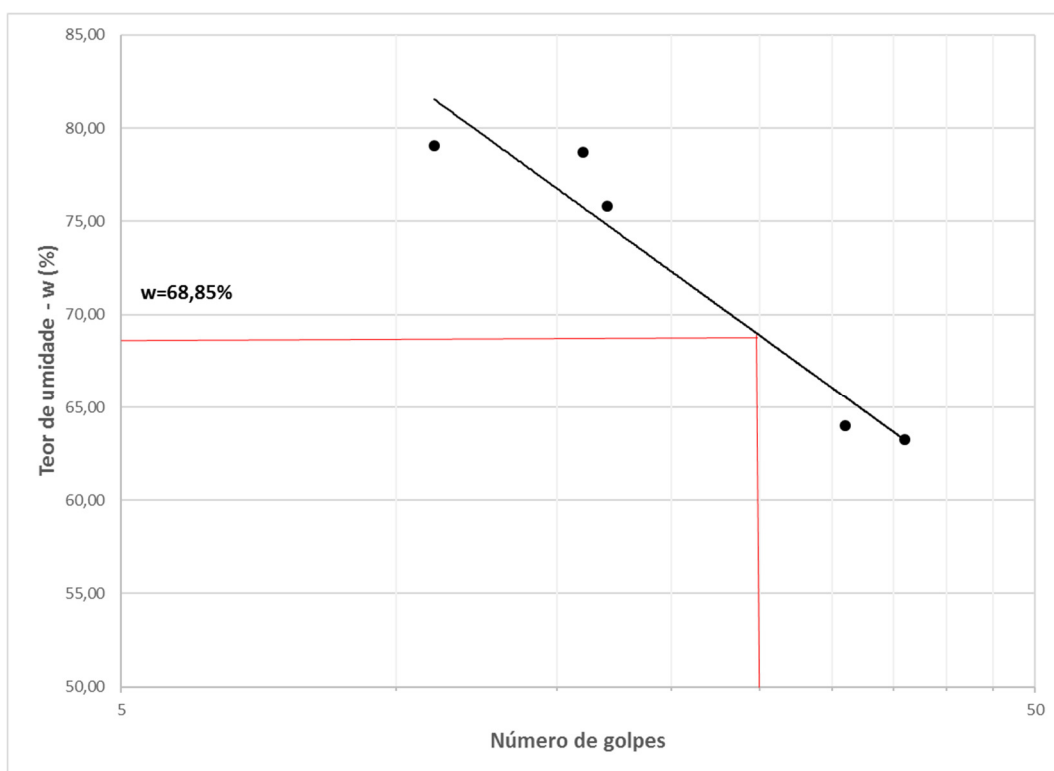


Gráfico 4 - Determinação do limite de liquidez para o horizonte 1
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

O Gráfico 5 ilustra os resultados obtidos para o limite de liquidez do horizonte 2. Para tal solo, o valor encontrado correspondente ao limite de liquidez foi de 57,75%. Para o limite de plasticidade, foi encontrado um valor de 48,06%, resultando em um índice de plasticidade de 9,69%. Rosa (2016) classificou o solo estudado, de acordo com os parâmetros do Sistema Unificado de Classificação de Solos, como Silte inorgânico bem graduado de alta compressibilidade. De acordo com o sistema rodoviário, o solo se enquadra na categoria A-5.

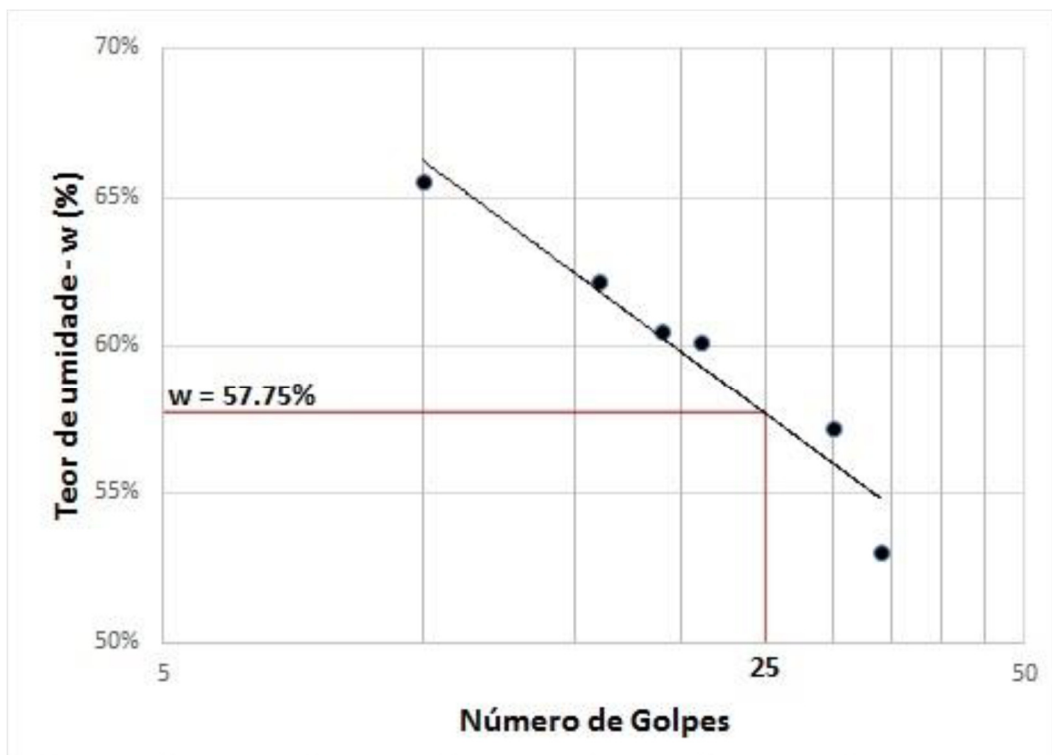


Gráfico 5 - Determinação do limite de liquidez para o horizonte 2
Fonte: Rosa (2016)

Finalmente, os resultados para o limite de liquidez do horizonte 3 estão dispostos no Gráfico 6. Para o limite de liquidez foi obtido o valor de 37,44% enquanto para o limite de plasticidade o resultado foi de 24,68%. O índice de plasticidade resultante é de 12,76%. Matsubara (2015) ressaltou a coerência entre os valores aqui expostos e os relativos a solos residuais do arenito. Esses resultados são, na classificação pelo gráfico de plasticidade de Casagrande, relativos a um solo argilo-siltoso de baixa compressibilidade. O sistema rodoviário, ao aplicado, leva a consideração do solo como A-6.

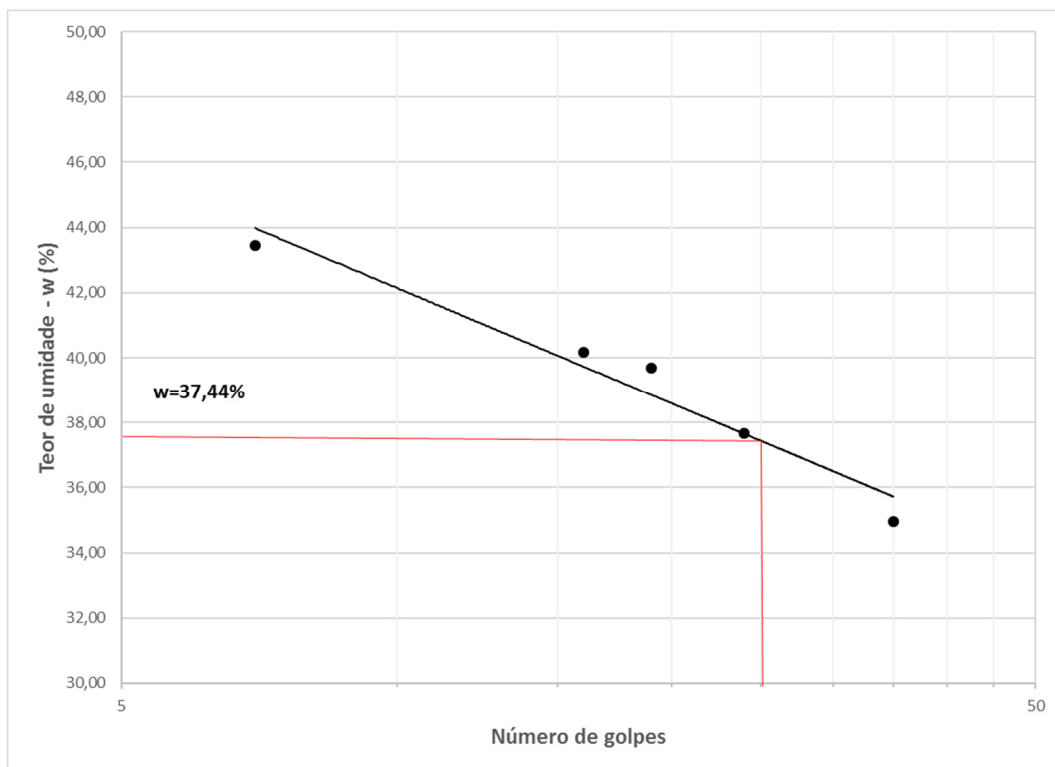


Gráfico 6 - Determinação do limite de liquidez para o horizonte 3
 Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

Os resultados obtidos para os três horizontes foram posicionados no gráfico de plasticidade de Casagrande. Esse posicionamento é ilustrado no Gráfico 7. A letra C se refere a argilas, M a silte. A letra O diz respeito a solos orgânicos. Por fim, as letras L e H tratam, respectivamente, de solos com baixa e com alta compressibilidade.

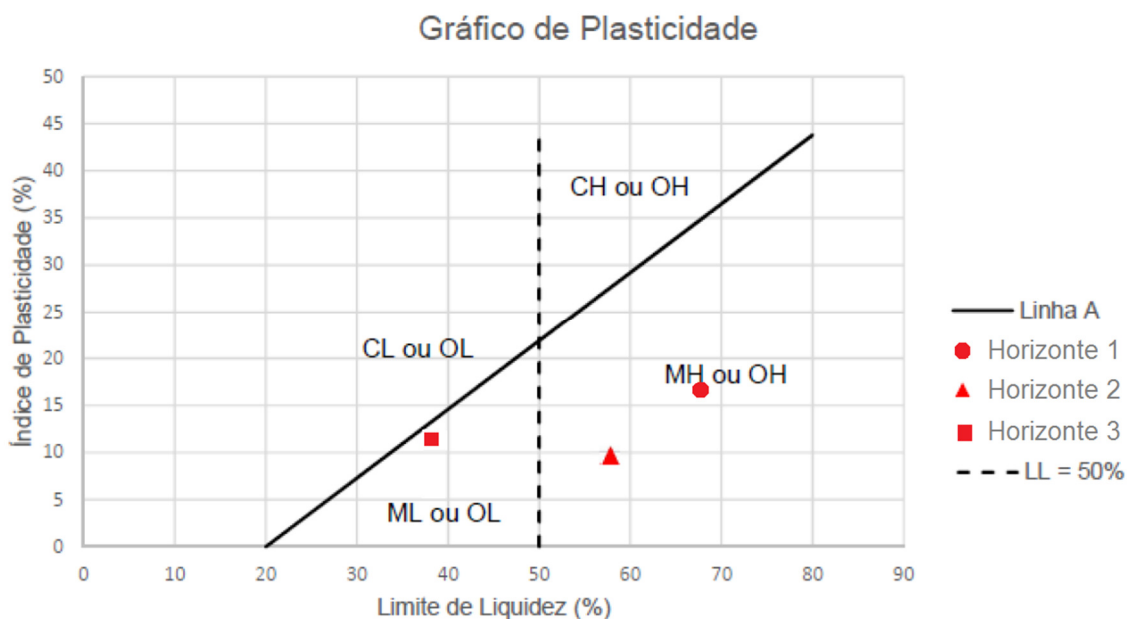


Gráfico 7 - Gráfico de plasticidade de Casagrande
 Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

Em comparação com valores descritos por Pinto (2006), os encontrados para os limites de liquidez e índice de plasticidade para os horizontes 1, 2 e 3 se situam em intervalos condizentes respectivamente com: argilas variegadas de São Paulo, residual de basalto, e residuais de arenito (arenosos finos) ou areias argilosas variegadas de São Paulo.

4.3 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

O ensaio para a determinação da densidade real dos grãos (Gs) levou aos seguintes resultados, respectivamente para os horizontes 1, 2 e 3: 2,53; 2,60 e 2,61. Em comparação com valores típicos propostos por Das (2013) para diferentes minerais, o horizonte 1 é condizente com a halosita, enquanto os solos dos horizontes 2 e 3 se aproximam dos valores encontrados em minerais como caulinita, clorita e feldspato (sódico e cálcico).

Em comparação com os dados da Formação Guabirota propostos por Felipe (2011), há indícios de que o horizonte 2 é um solo residual jovem e o horizonte 3 um solo residual maduro. Esses indícios se baseiam no peso específico real dos grãos e nos minerais a eles relacionados e na coloração das amostras. Sem haver registro de halosita como argilomineral principal na Formação Guabirota, o horizonte 1 apresenta indícios de coloração para pertencer a parcela de argilas alteradas.

Rosa (2016) ressalta a presença de quartzo em grande quantidade no horizonte 2, tendo em vista o valor encontrado para o Gs e a coloração mais clara do solo. O autor ainda destaca que os valores encontrados para a densidade real dos grãos, para a granulometria, e para os limites de Atterberg levam à conclusão de que não há presença significativa de matéria orgânica nos solos estudados.

4.4 CURVA CARACTERÍSTICA

Os pontos obtidos no ensaio de sucção foram plotados. O Gráfico 8 foi obtido ao serem plotados os dados experimentais do ramo seco do ensaio com o solo proveniente do horizonte 1.

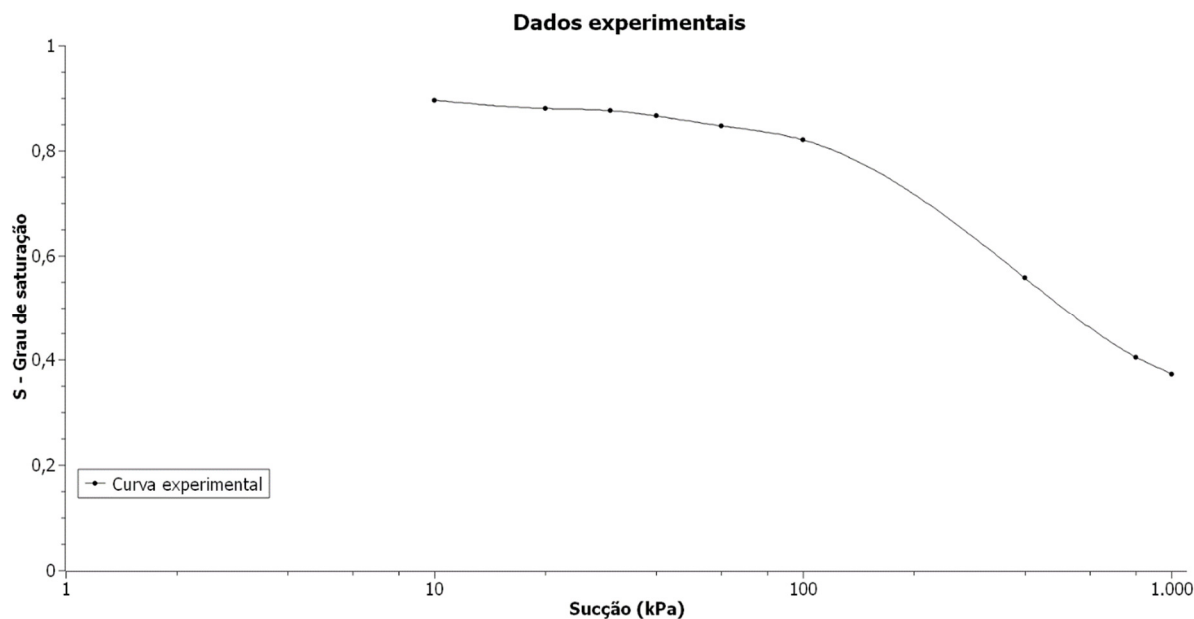


Gráfico 8 - Curva característica obtida para o horizonte 1

O Gráfico 9 é disposto aqui para demonstrar a curva característica de secagem obtida para o horizonte 2.

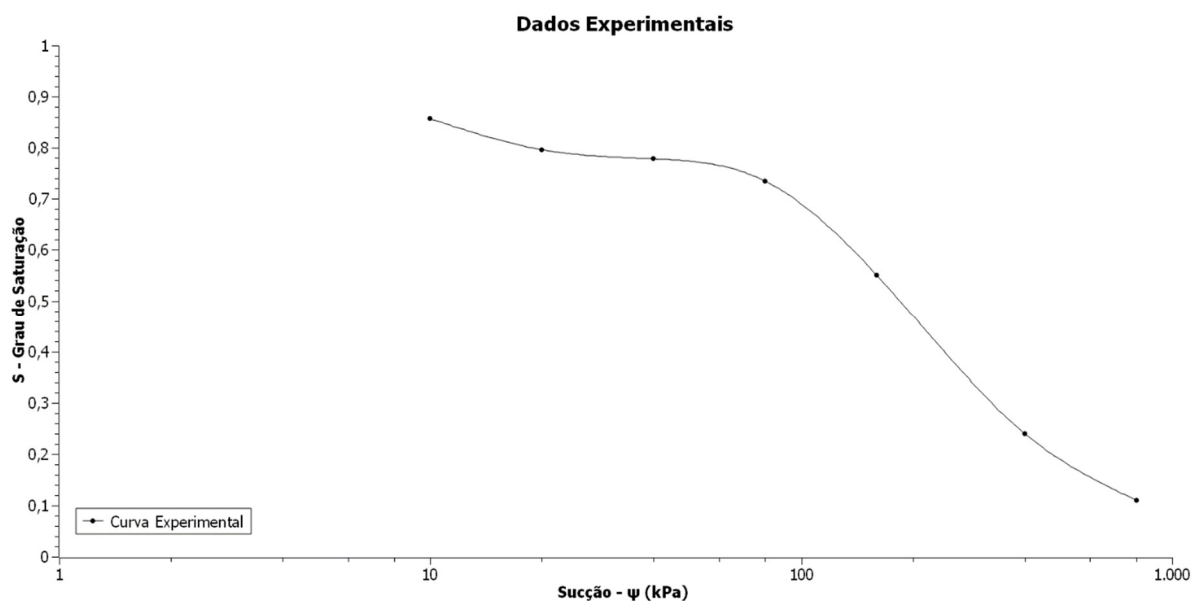


Gráfico 9 - Curva característica obtida para o horizonte 2
Fonte: Rosa (2016)

O Gráfico 10 teve seus dados obtidos experimentalmente de drenagem utilizando o solo proveniente do horizonte 3.

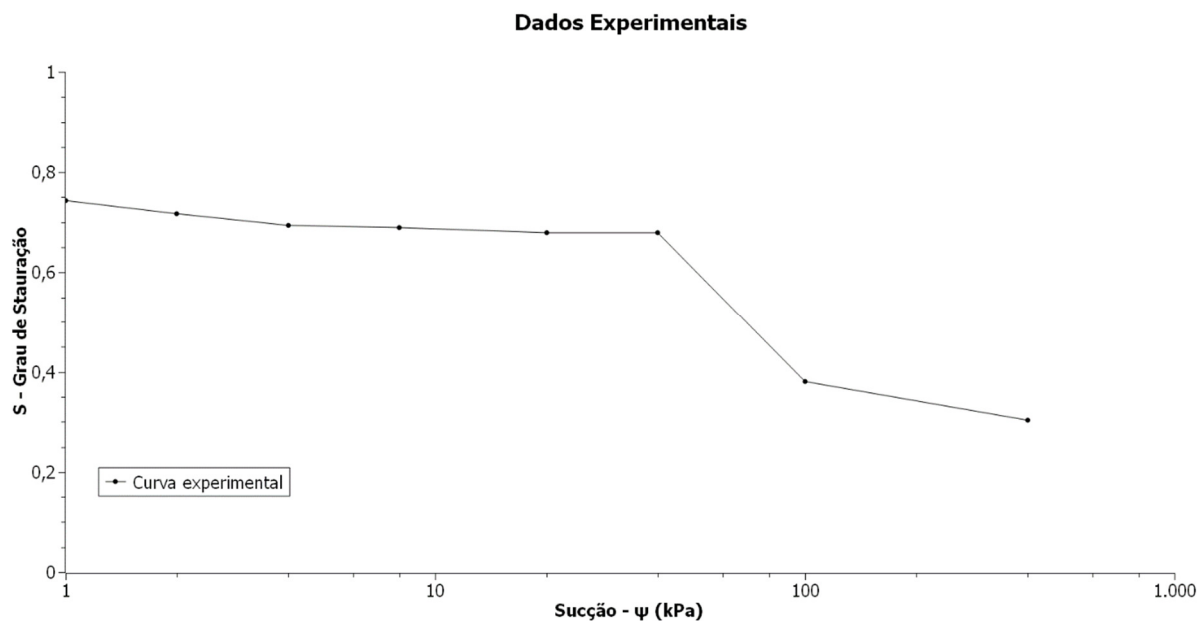


Gráfico 10 - Curva característica obtida para o horizonte 3
Fonte: Matsubara (2015)

O Gráfico 11 ilustra a técnica gráfica para a obtenção do ponto de entrada de ar para o horizonte 1.

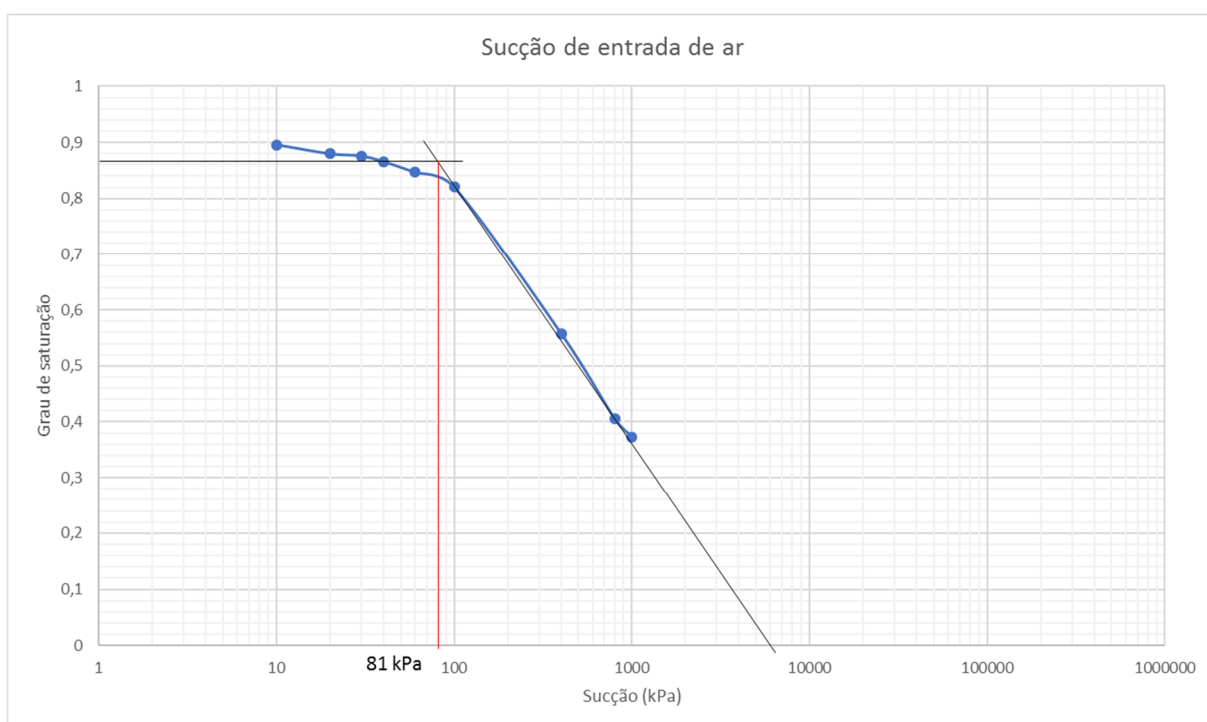


Gráfico 11 - Determinação do ponto de entrada de ar para o horizonte 1

O Gráfico 12 foi obtido ao aplicar o método gráfico para a determinação do ponto de entrada de ar para o horizonte 2.

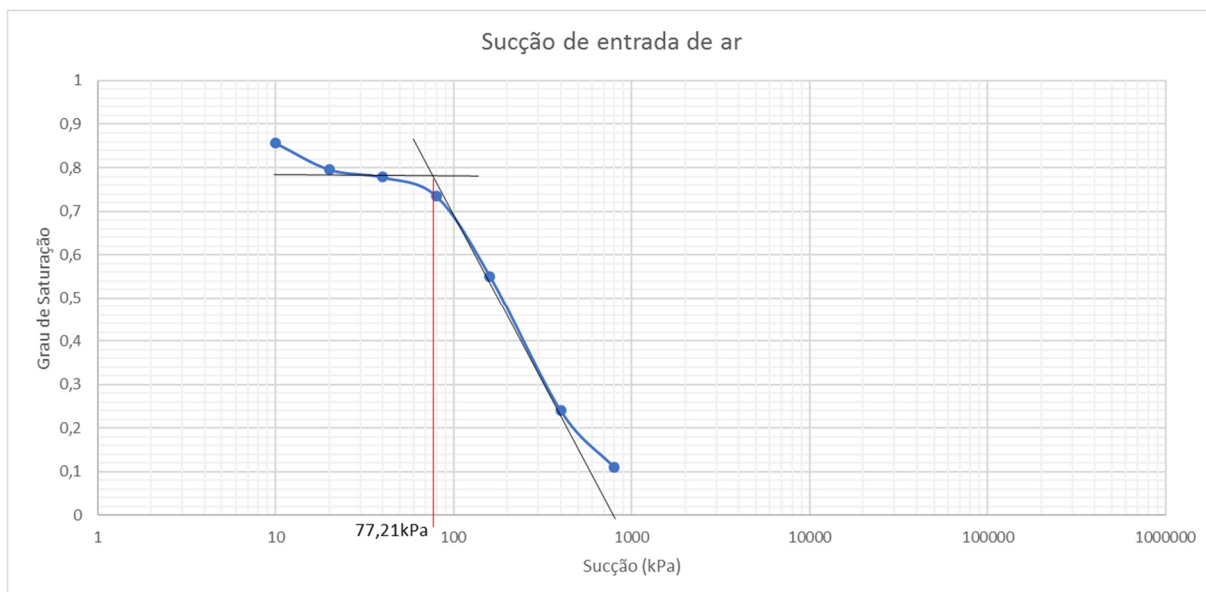


Gráfico 12 - Determinação do ponto de entrada de ar para o horizonte 2

Fonte: Rosa (2016)

O Gráfico 13 foi plotado para representar o método gráfico para a obtenção do ponto de entrada de ar do horizonte 3.

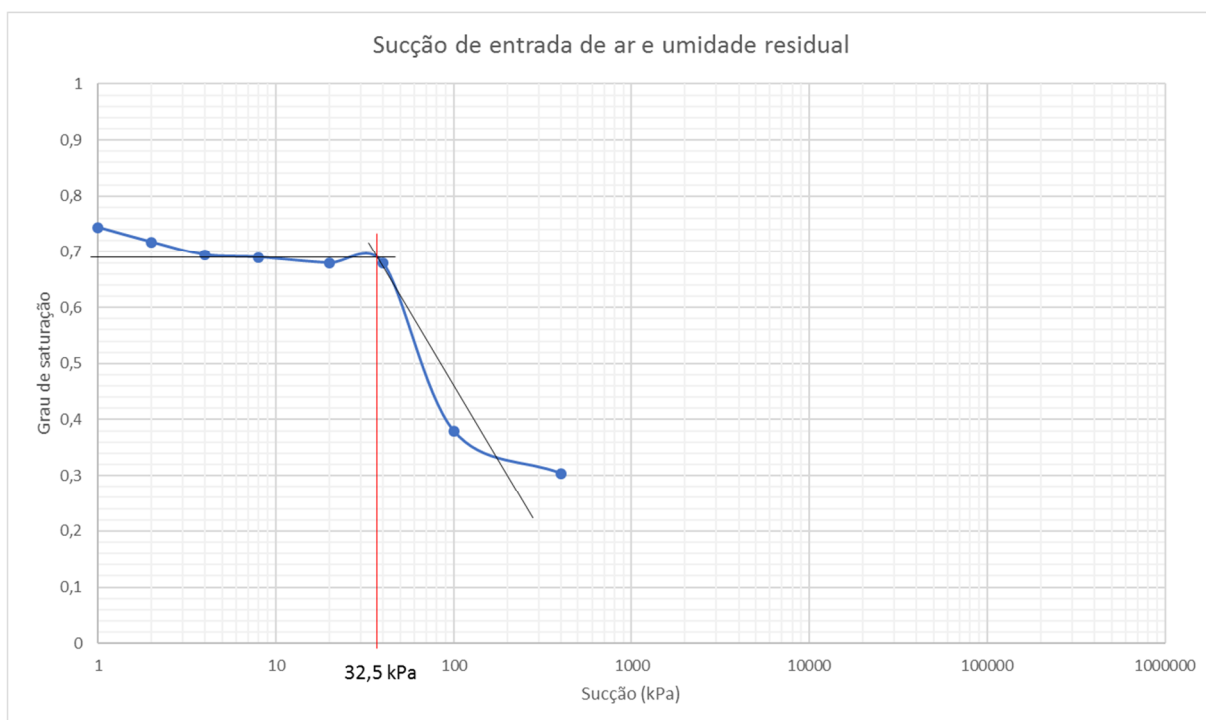


Gráfico 13 - Determinação do ponto de entrada de ar para o horizonte 3

Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

As sucções de entrada de ar obtidas para os horizontes 1, 2 e 3 foram, respectivamente, 81, 77,21 e 32,5 kPa.

As curvas características que descrevem os horizontes 1 e 2 se mostram mais semelhantes em detrimento ao horizonte 3. Muito disto se deve ao intervalo de coleta de dados ter sido mais parecido entre esses dois solos. Em uma análise superficial, pode-se dizer que os pontos de entrada de ar dos dois primeiros horizontes são condizentes com os encontrados em argilas e siltes, o que é condizente com os resultados apresentados na caracterização, em especial pela granulometria e limites de Attnberg. Já a sucção de entrada de ar do terceiro horizonte é o que se espera de um solo com classificação entre uma areia e um silte.

4.5 CORRELAÇÃO COM AS EQUAÇÕES EXISTENTES

De posse dos gráficos correspondentes às curvas características de cada um dos horizontes estudados, é possível ajustar as equações propostas pela literatura – citadas anteriormente no presente trabalho na seção 2.3.4 – às curvas obtidas experimentalmente. Esses ajustes são aqui apresentados, primeiramente para cada um dos horizontes e, em um segundo momento, contemplados os três simultaneamente.

4.5.1 Ajustes para o Horizonte 1

Os ajustes feitos aos dados encontrados pelos ensaios envolvendo o solo proveniente do horizonte 1 são apresentados a seguir.

O Gráfico 14 apresenta os ajustes feitos utilizando o modelo proposto por Burdine (1953). Visualmete é possível verificar uma melhora quando atribuído ao trecho inicial a forma de reta.

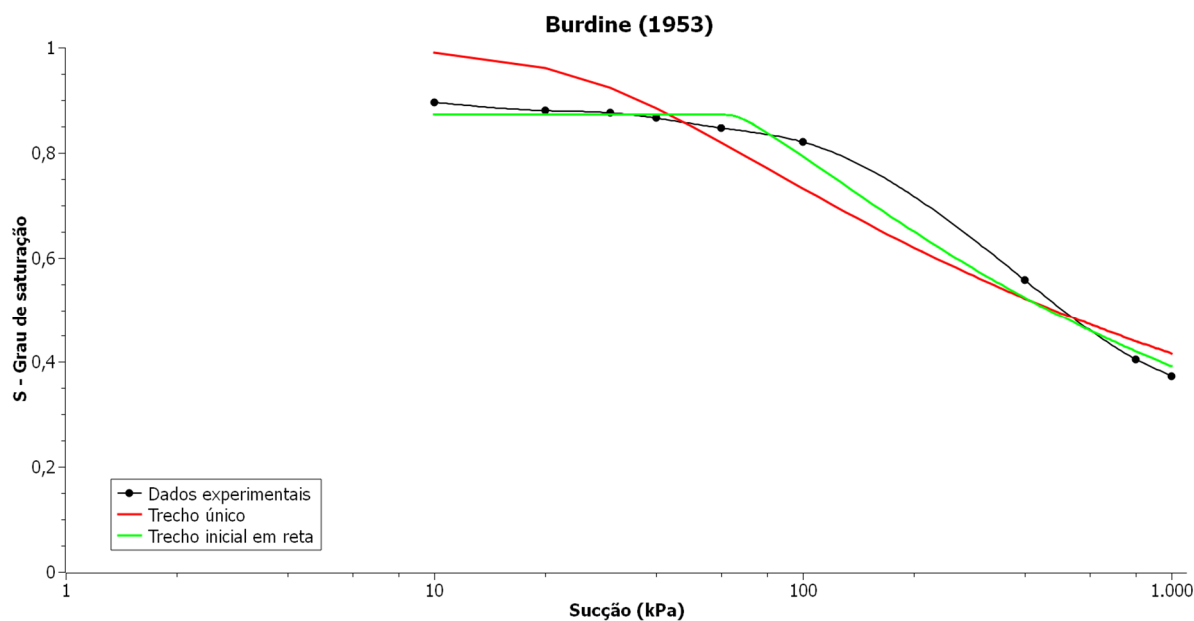


Gráfico 14 - Modelo de Burdine (1953) para o horizonte 1

O modelo de Gardner (1958) tem seus ajustes dispostos no Gráfico 15. Para as duas hipóteses testadas, os ajustes ficaram bastante próximos aos pontos experimentais.

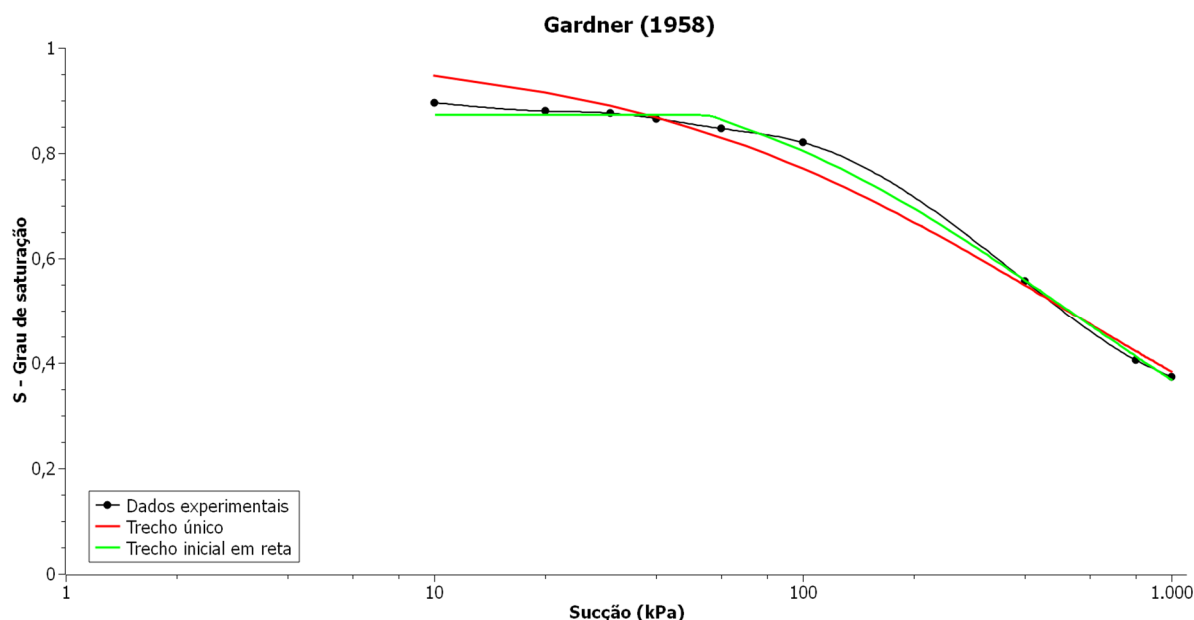


Gráfico 15 - Modelo de Gardner (1958) para o horizonte 1

Para o modelo Proposto por Brooks e Corey (1964) não houve convergência quando considerada a hipótese de trecho único. Esse é o motivo pelo qual encontra-se plotado no Gráfico 16 apenas o ajuste feito utilizando a hipótese de trecho inicial em reta.

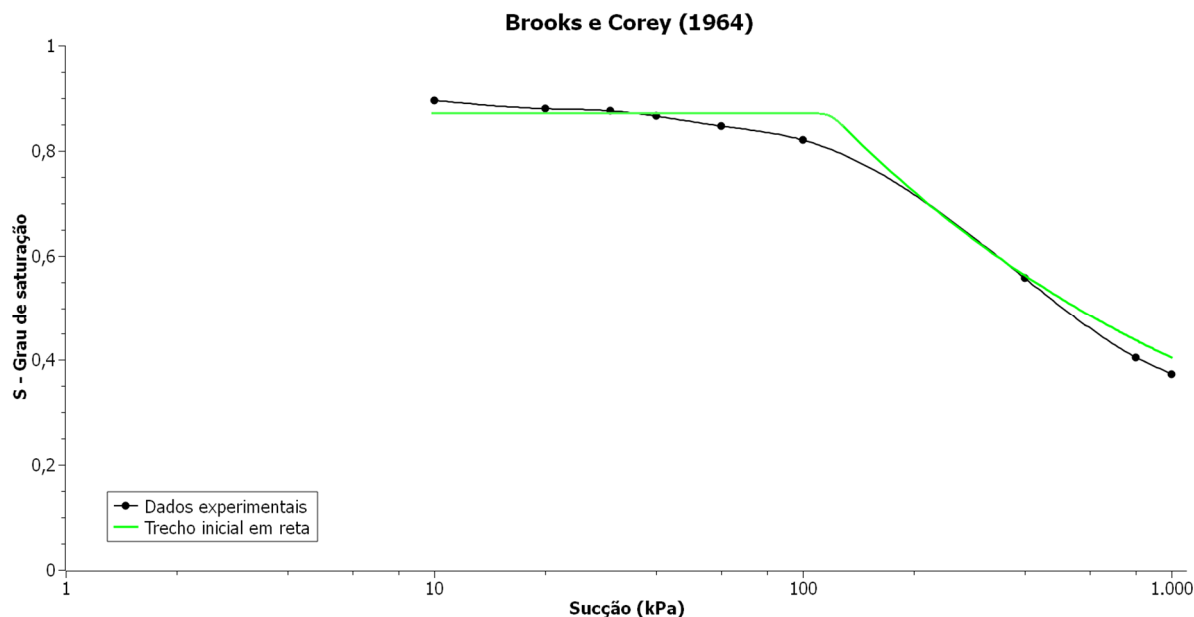


Gráfico 16 - Modelo de Brooks e Corey (1964) para o horizonte 1

Nas tentativas de ajustes utilizando o modelo de equação proposto por Brutsaert (1966), não houve convergência em nenhuma das duas hipóteses adotadas. Essa divergência ocorreu apenas para o horizonte 1 e os gráficos contendo os ajustes para os demais horizontes serão apresentados posteriormente.

O modelo de Mualem (1976) foi utilizado para dar origem aos ajustes dispostos no Gráfico 17. Aqui é válido notar a semelhança entre as curvas resultantes dos modelos de Burdine (1953), Gardner (1958) e Mualem (1976) no que tange a forma das curvas.

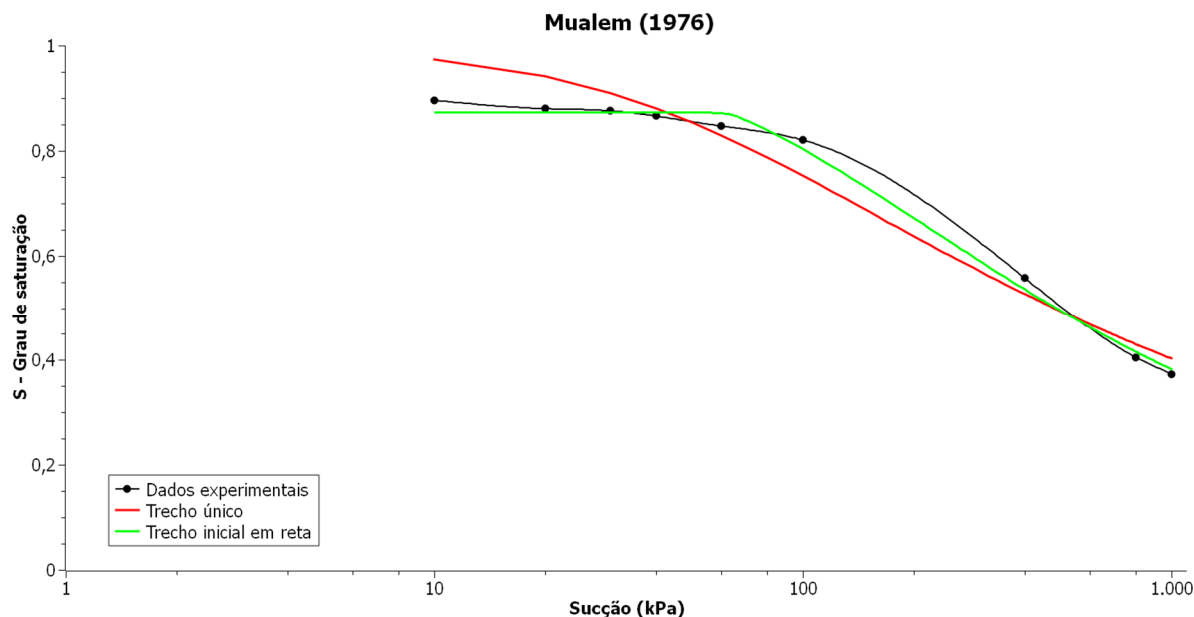


Gráfico 17 - Modelo de Mualem (1976) para o horizonte 1

O modelo proposto por Roger e Hornberger (1978) foi utilizado para plotar os ajustes expostos no Gráfico 18, com sua forma peculiar devida à inversão dos eixos.

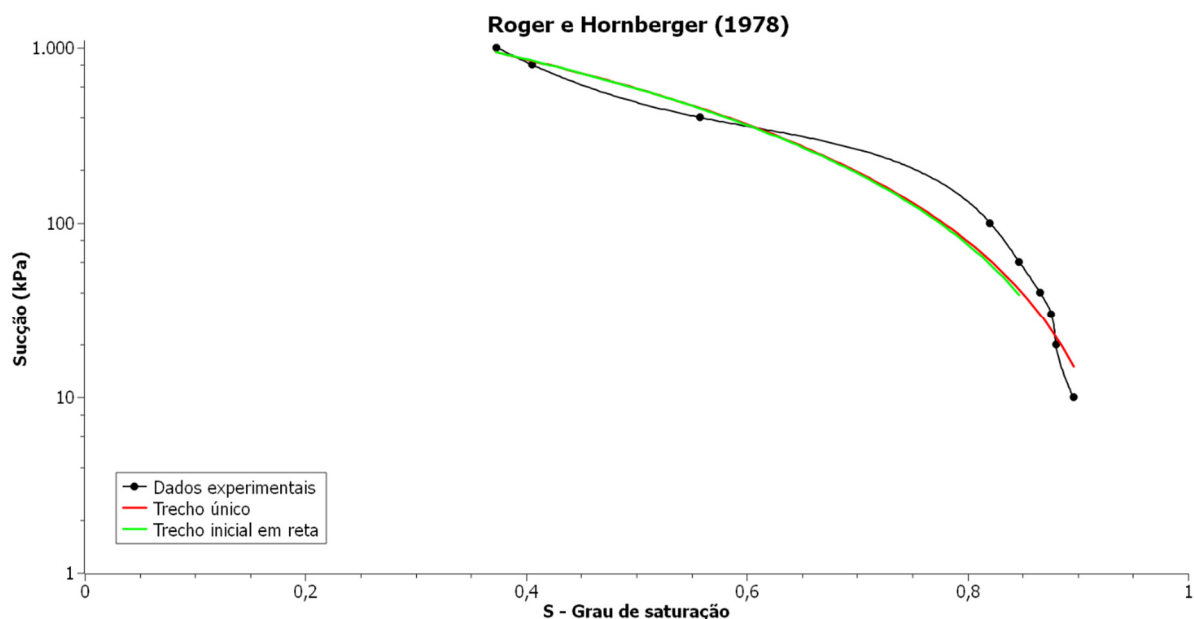


Gráfico 18 - Modelo de Roger e Hornberger (1978) para o horizonte 1

O Gráfico 19 foi plotado utilizando os dados obtidos através da equação proposta por van Genuchten (1980). A equação se mostra capaz de apresentar as duas curvaturas características do formato sigmoide, sendo sua consagração respaldada por um ajuste visualmente preciso.

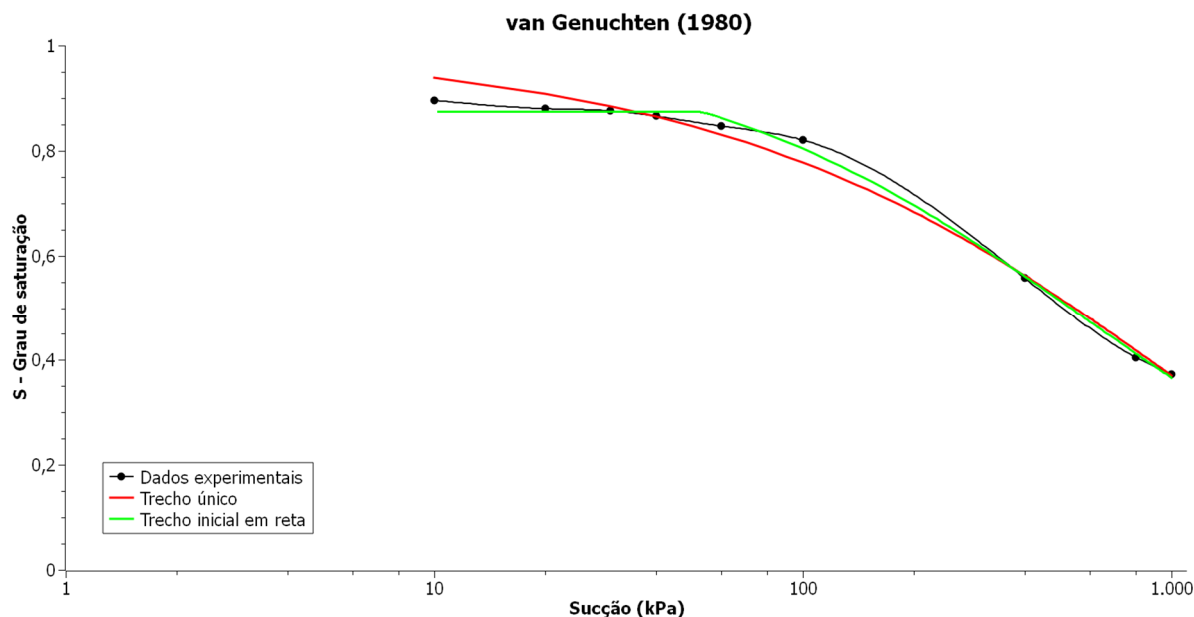


Gráfico 19 - Modelo de van Genuchten (1980) para o horizonte 1

O Gráfico 20 é posicionado aqui para ilustrar os ajustes feitos utilizando o modelo de Williams et al. (1983). O formato da curva com uma concavidade positiva leva a uma melhora perceptível ao se considerar o trecho inicial como uma reta, pois tal forma se ajusta melhor à zona de transição.

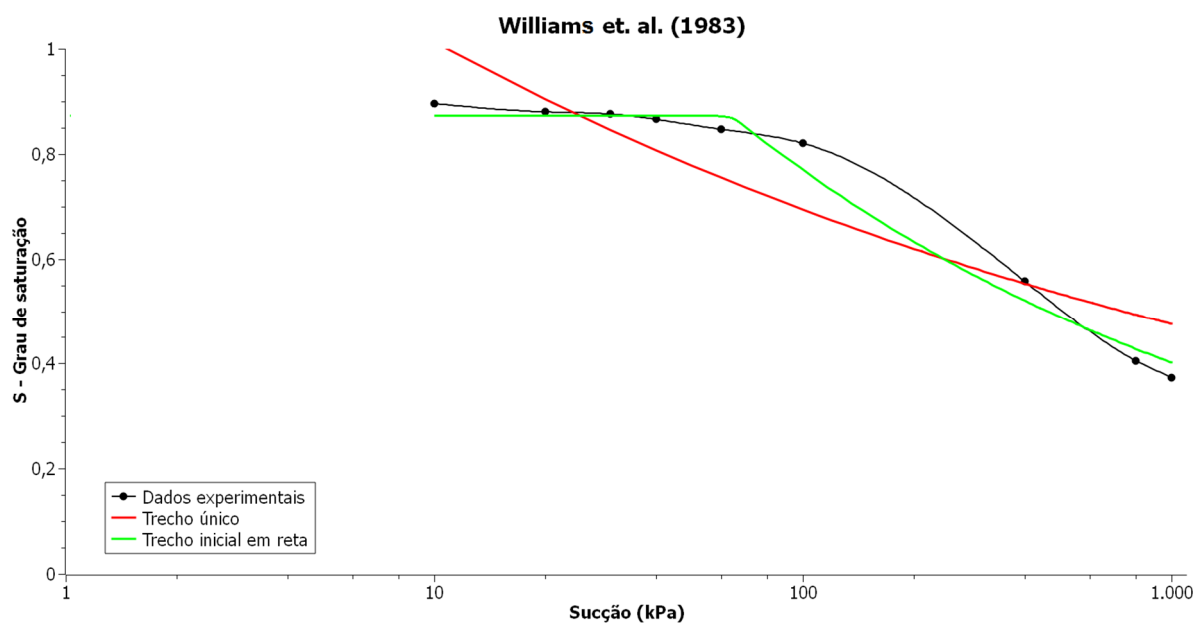


Gráfico 20 - Modelo de Williams et al. (1983) para o horizonte 1

A equação proposta por Mckee e Bumb (1984) foi utilizada para ajustar as curvas dispostas no Gráfico 21. O ajuste se mostrou bastante coerente, principalmente quando comparado aos pontos experimentais obtidos antes do ponto de entrada de ar.

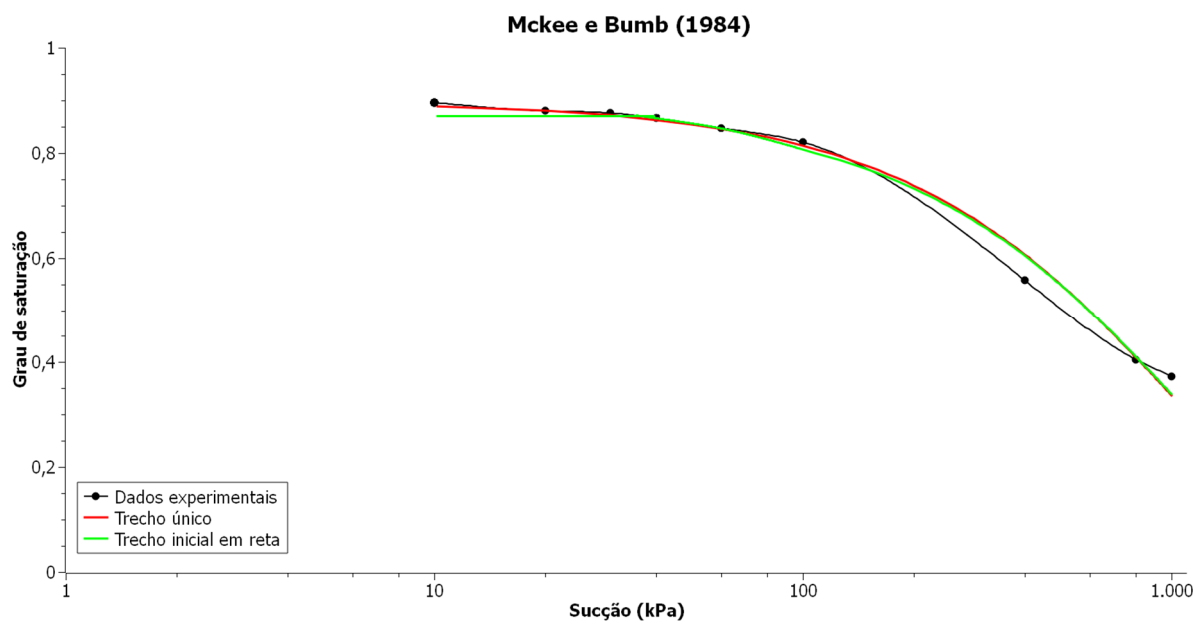


Gráfico 21 - Modelo de Mckee e Bumb (1984) para o horizonte 1

Para o modelo proposto por Mckee e Bumb (1987), houve uma descontinuidade entre os ajustes da reta e da curva. Por isso, no Gráfico 22, encontra-se plotado apenas o ajuste considerando a hipótese de trecho único.

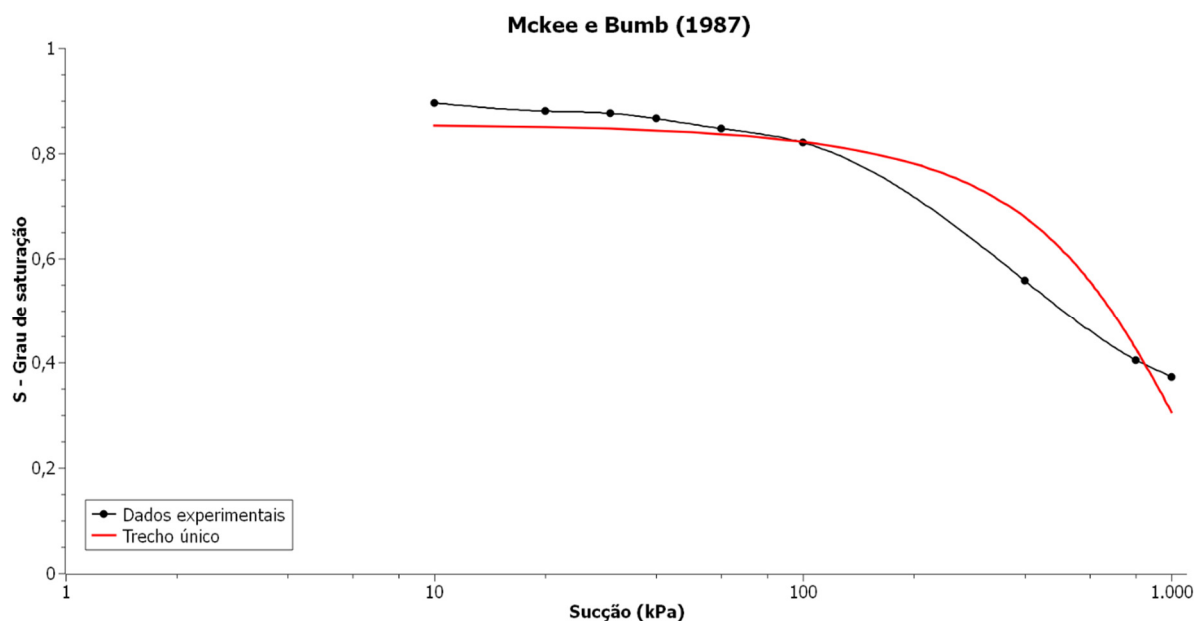


Gráfico 22 - Modelo de Mckee e Bumb (1987) para o horizonte 1

Para o modelo de Kosigi (1994) com hipótese de trecho inicial em reta houve o mesmo problema de descontinuidade encontrado no modelo de Mcke e Bumb (1987). A forma semelhante da curva pode explicar tal fato. Apesar da semelhança em forma, a equação de Kosigi (1994) parece se ajustar melhor aos dados experimentais quando considerada a hipótese de trecho único. Tal aparência poderá ser comprovada posteriormente pelos coeficientes de determinação obtidos. Os resultados são apresentados no Gráfico 23.

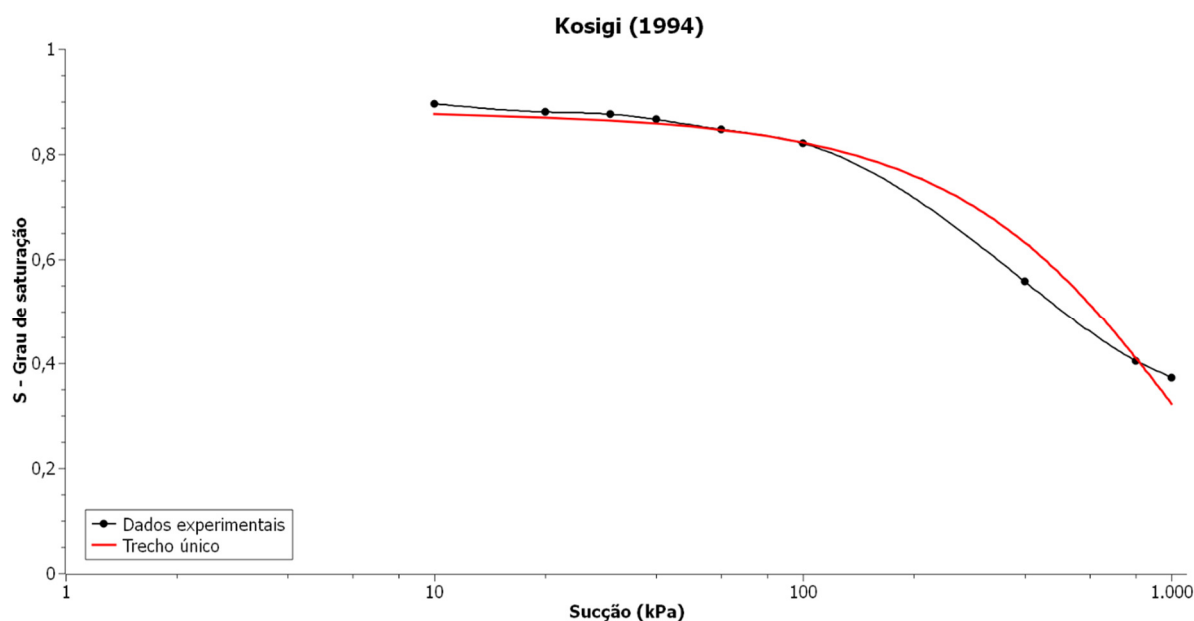


Gráfico 23 - Modelo de Kosigi (1994) para o horizonte 1

Os ajustes feitos utilizando a equação proposta por Fredlund e Xing (1994) encontram-se plotados no Gráfico 24. Nota-se uma grande proximidade entre a curva experimental e os ajustes, tanto para a hipótese de trecho único como para a hipótese considerando trecho inicial em reta.

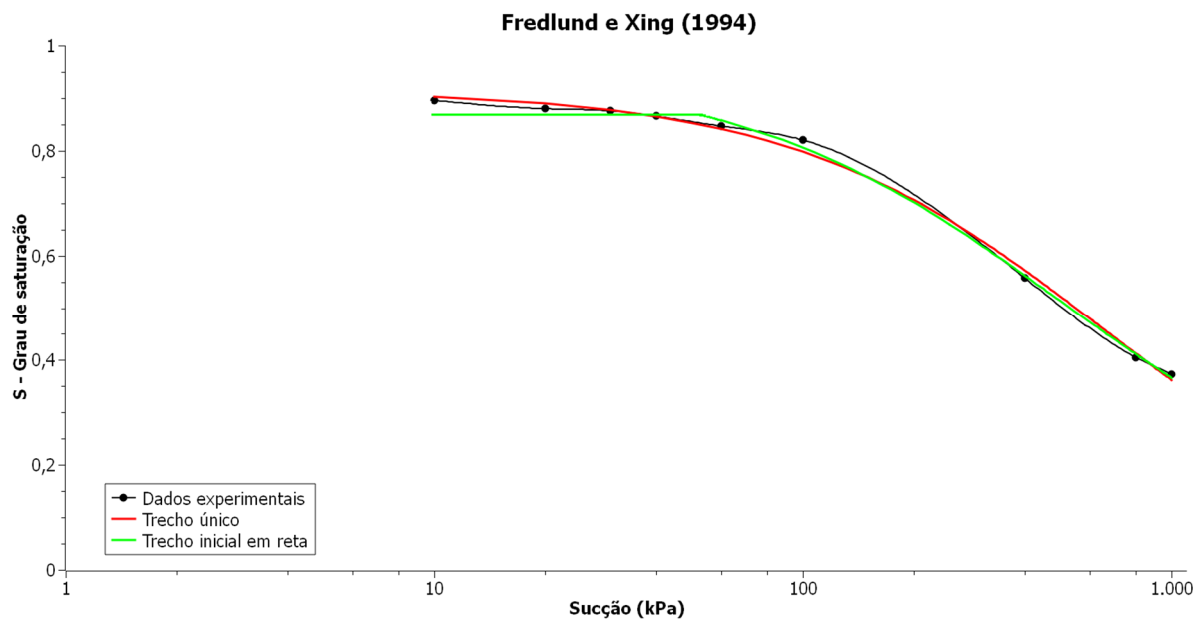


Gráfico 24 - Modelo de Fredlund e Xing (1994) para o horizonte 1

Os coeficientes de determinação, bem como os parâmetros encontrados para cada um dos ajustes feitos aos dados experimentais do horizonte 1 encontram-se dispostos na Tabela 3, para a hipótese de trecho único, e na Tabela 4, para a hipótese de trecho inicial em reta.

Tabela 3 - Resultados para hipótese de trecho único para o horizonte 1

Equação	Parâmetros	R ²
Burdine (1953)	a=0,03 n=2,25	0,917
Gardner (1958)	a=0,01 n=0,73	0,980
Brooks e Corey (1964)	-	-
Brutsaert (1966)	-	-
Mualem (1976)	a=0,02 n=1,30	0,950
Roger e Hornberger (1978)	a=2595,03 b=0,95	0,991
van Genuchten (1980)	1,65E-06 n=0,60 m=46,70	0,987
Williams et. al. (1983)	a=-2,38 b=-6,09	0,836
Mckee e Bumb (1984)	a=-110,34 b=1019,62	0,990
Mckee e Bumb (1987)	a=68607 b=384,06	0,937
Kosigi (1994)	a=-338,28 n=-235,39	0,977
Fredlund e Xing (1994)	a=572,59 m=1,92 n=1,15	0,997

Tabela 4 – Resultados para a hipótese de trecho inicial em reta para o horizonte 1

Equação	Parâmetros	R ²
Burdine (1953)	a=0,02 n=2,32	0,979
Gardner (1958)	a=0,00 n=0,85	0,997
Brooks e Corey (1964)	$\psi b=81$ $\lambda=0,36$	0,577
Brutsaert (1966)	-	-
Mualem (1976)	a=0,01 n=1,39	0,990
Roger e Hornberger (1978)	a=2634,96 b=0,94	0,986
van Genuchten (1980)	1,00E-03 n=0,82 m=1,20	0,997
Williams et. al. (1983)	a=-23,68 b=-3,54	0,965
Mckee e Bumb (1984)	a=-123,94 b=1039,32	0,982
Mckee e Bumb (1987)	-	-
Kosigi (1994)	-	-
Fredlund e Xing (1994)	a=344,57 m=1,26 n=1,33	0,998

Para a hipótese de trecho único, o melhor ajuste, segundo os coeficientes de determinação encontrado, foi o feito utilizando o modelo de Fredlund e Xing (1994), com r² de 0,997. Outros que se aproximaram bastante das curvas experimentais foram

os ajustes que utilizaram as equações de Roger e Hornberger (1978) e Mckee e Bumb (1984), com coeficientes de, respectivamente, 0,991 e 0,990. A menor correlação foi a encontrada ao ajustar a curva com equação proposta por Williams et al. (1983), com r^2 de 0,836. Sendo a diferença entre a melhor correlação – Fredlund e Xing (1994) – e a menor correlação – Williams et al. (1983) – dessa magnitude, descontando as equações que divergiram, pode-se dizer que todas as equações descrevem a curva característica do horizonte 1 satisfatoriamente.

Para a hipótese de trecho inicial em reta, a equação de Brooks e Corey (1964) proporcionou um ajuste discrepante em relação às outras equações testadas. Com coeficiente de determinação de 0,577, o ajuste foi o mais afastado dos dados experimentais com grande margem. Os melhores ajustes encontrados foram os que fizeram uso das propostas de Fredlund e Xing (1994), Gardner (1958) e van Genuchten (1980), com r^2 de, respectivamente, 0,998; 0,997 e 0,997. Os ajustes utilizando as equações não citadas nesse parágrafo obtiveram resultados de coeficiente de determinação elevados, como pode ser visto na Tabela 4.

Comparando as duas hipóteses (trecho único e trecho inicial em reta), algumas das percepções visuais se confirmam. A equação de Williams et al. (1983) teve, em seus ajustes, uma aproximação grande aos dados experimentais quando considerado o trecho inicial em reta, ou seja, o maior incremento de coeficiente de correlação ao se passar do trecho único para o trecho inicial em reta foi utilizando tal equação (de 0,836 para 0,965).

Ainda levando em consideração as duas hipóteses, a equação que melhor descreve o solo proveniente do horizonte 1 é a proposta por Fredlund e Xing (1994). Outras equações que mostraram consistência em seus ajustes foram as propostas por van Genuchten (1980) e Roger e Hornberger (1978).

4.5.2 Ajustes para o Horizonte 2

Os ajustes feitos para os dados experimentais obtidos para o horizonte 2 são apresentados e comentados a seguir.

Primeiramente, para a equação proposta por Burdine (1953), os dados obtidos e os ajustes feitos se encontram plotados no Gráfico 25. Visualmente é possível perceber que a hipótese com trecho inicial em reta se ajusta melhor aos dados experimentais. Tal fato poderá ser quantificado posteriormente.

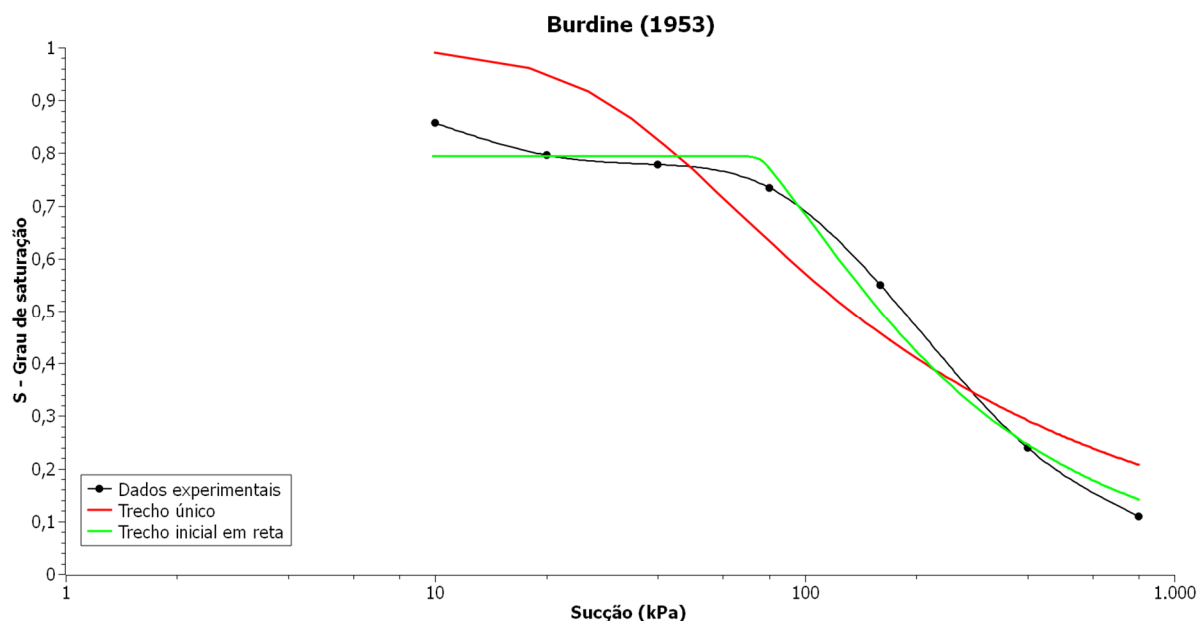


Gráfico 25 - Modelo de Burdine (1953) para o horizonte 2
Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

Os resultados encontrados se mostram bastante semelhantes aos encontrados por Rosa (2016) para o modelo de Burdine (1953). O autor inclusive ressalta a similaridade entre esse modelo e os de Gardner (1958) e Mualem (1976). Essa similaridade, também notada no presente trabalho, será citada posteriormente.

Os ajustes feitos a partir da equação proposta por Gardner (1958) compõem o Gráfico 26. Assim como no modelo de Burdine (1953), é notável um melhor ajuste quando considerado o trecho inicial em reta, porém, nesse caso, menos acentuado, tendo em vista a maior proximidade entre as três curvas (experimental, hipótese de trecho único e hipótese de trecho inicial em reta).

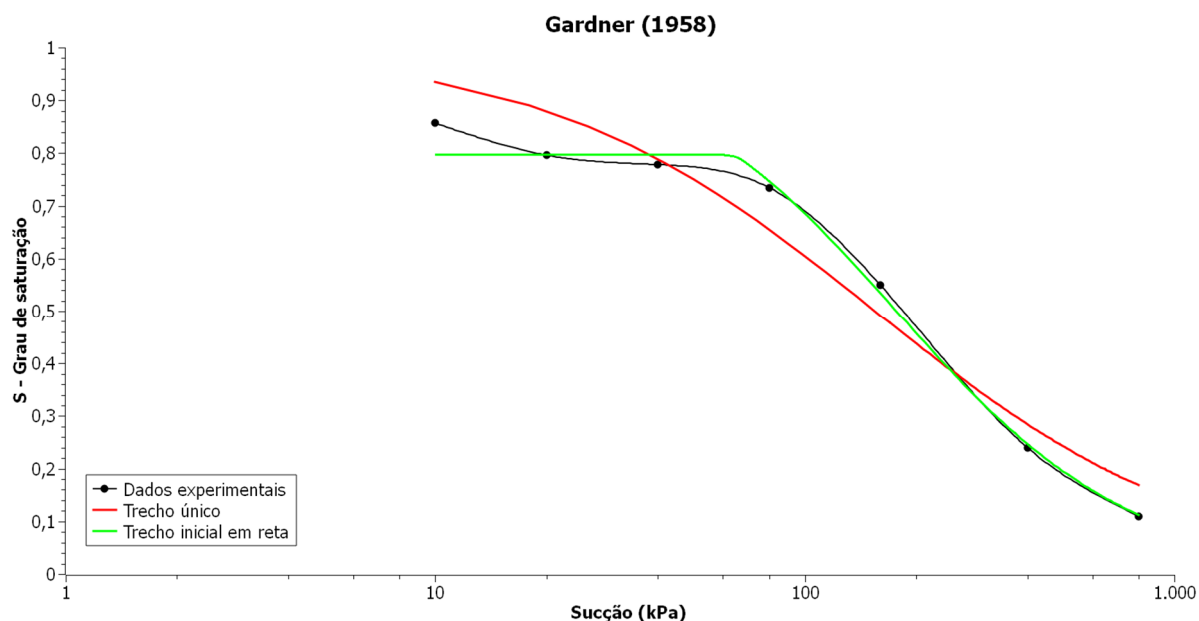


Gráfico 26 - Modelo de Gardner (1958) para o horizonte 2
Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

Os coeficientes encontrados são consistentes com os resultados obtidos por Rosa (2016) para o modelo de Gardner (1958).

Para o modelo proposto por Brooks e Corey (1964) não houve convergência para a hipótese de trecho único. Motivo pelo qual no Gráfico 27 encontra-se plotada apenas a curva correspondente à hipótese com trecho inicial em reta.

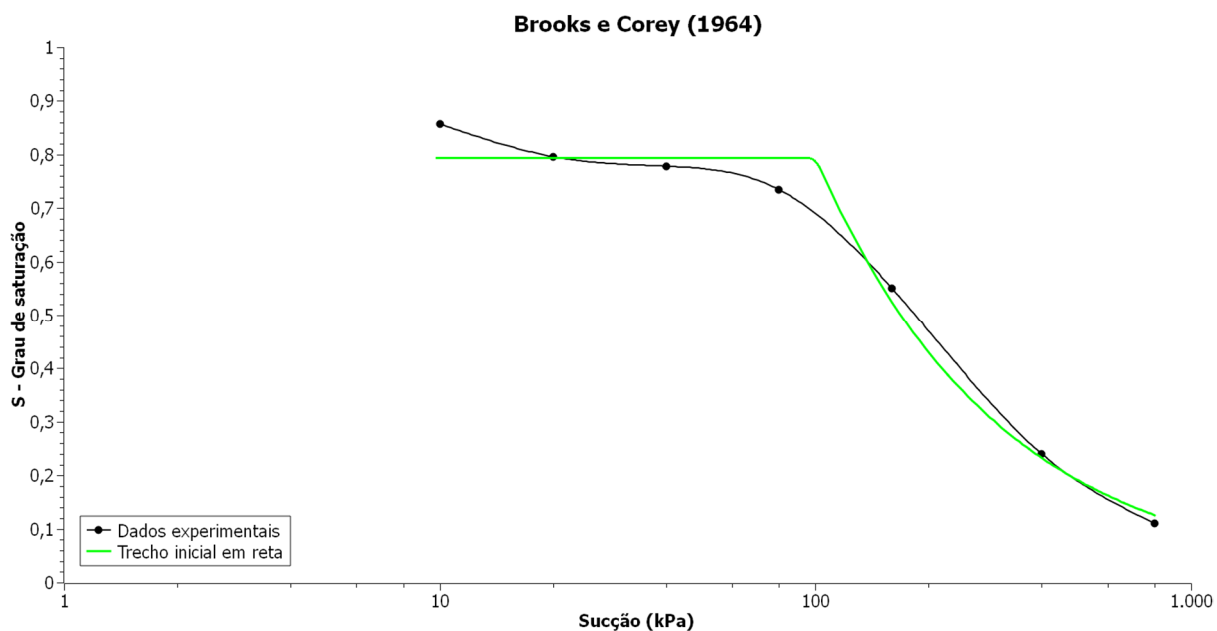


Gráfico 27 - Modelo de Brooks e Corey (1964) para o horizonte 2
Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

Em comparação com os resultados obtidos por Rosa (2016) para o modelo proposto por Brooks e Corey (1964), o presente estudo se mostrou semelhante no

que tange à divergência da hipótese considerando trecho único. Já se tratando da hipótese de trecho inicial em reta, o autor encontrou um coeficiente de determinação de 0,886, enquanto no presente trabalho, esse coeficiente foi de 0,771.

Já para o modelo de Brutsaert (1966) foi desconsiderada a hipótese com trecho inicial em reta, pois não há continuidade entre o ajuste encontrado e a reta proposta. O resultado do ajuste para a hipótese de trecho único é mostrado no Gráfico 28. Percebe-se que a equação apresenta bons resultados nos pontos das extremidades, porém se afasta da curva experimental nos pontos centrais (zona de transição).

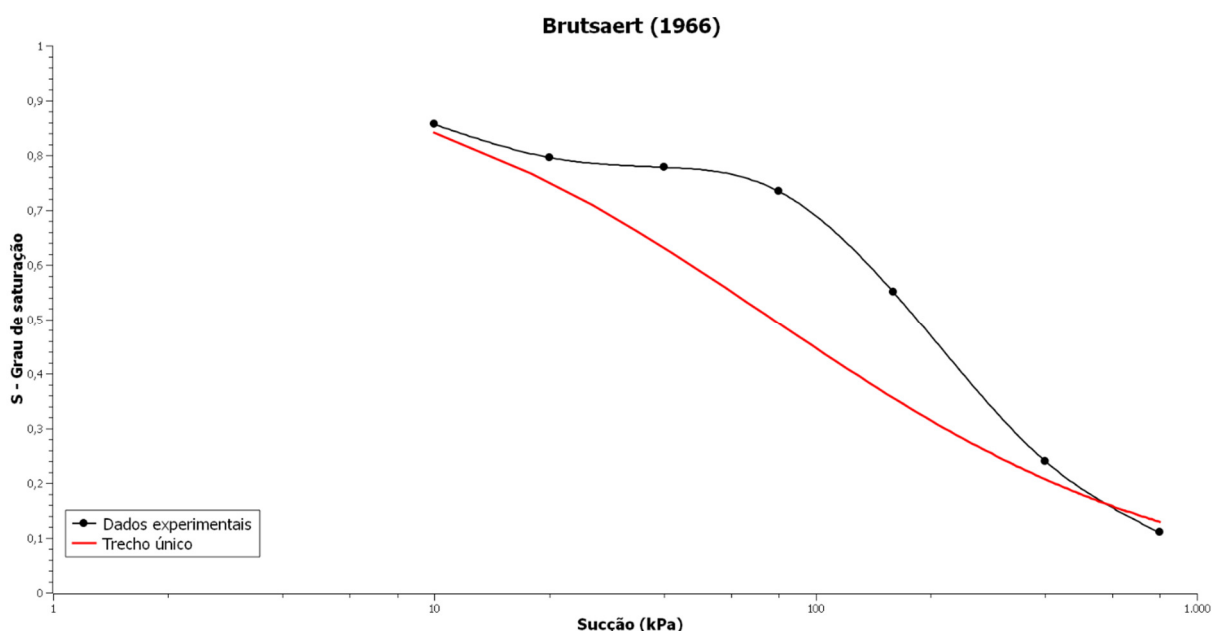


Gráfico 28 - Modelo de Brutsaert (1966) para o horizonte 2
Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

Ainda se tratando do modelo de Brutsaert (1966), Rosa (2015) também não encontrou convergência quando considerada a hipótese de trecho inicial em reta. O presente trabalho também corrobora com os resultados encontrados por Rosa (2016) na hipótese de trecho único, com coeficientes muito semelhantes (0,768 e 0,770, respectivamente).

O modelo de Mualem (1976) apresenta ajustes semelhantes aos de Burdine (1953) e Gardner (1958) no que tange ao formato das curvas. No que diz respeito à proximidade das curvas teóricas e da experimental, pode-se dizer que esse modelo se encontra entre as duas equações anteriormente citadas, ou seja, as curvas se encontram mais próximas que no caso de Burdine (1953) e mais afastadas do que no modelo de Gardner (1958). Essa proximidade entre as três curvas demonstra melhor

ajuste (maior r^2) e menor diferença entre as hipóteses em trecho único e com trecho inicial em reta.

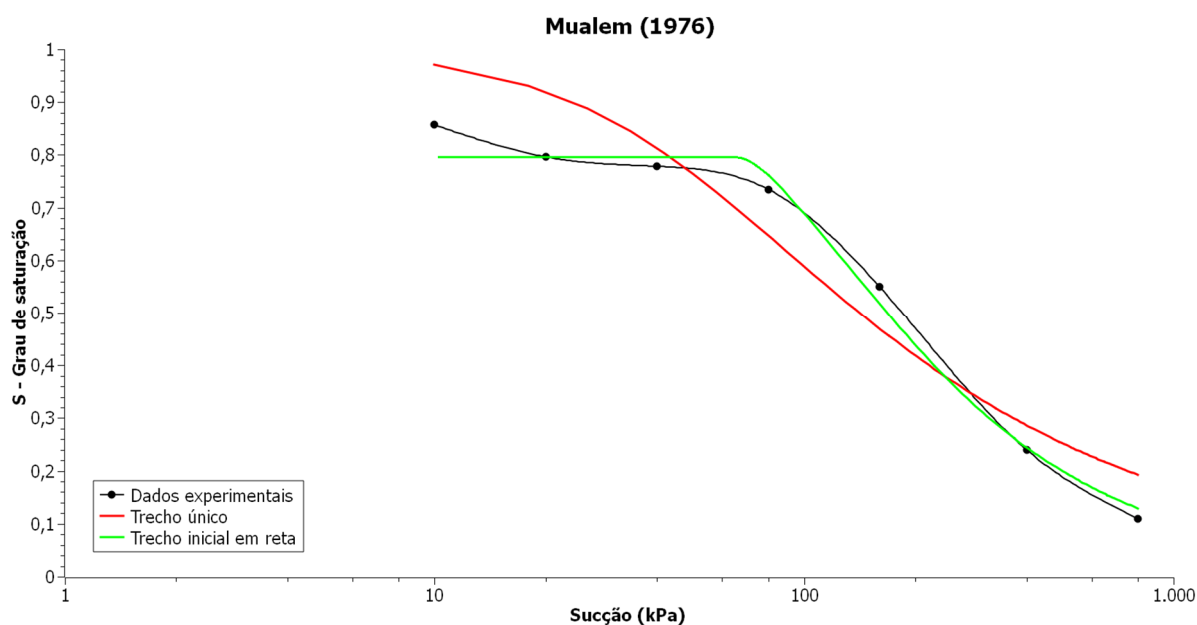


Gráfico 29 - Modelo de Mualem (1976) para o horizonte 2
Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

Em comparação com o trabalho de Rosa (2016), os resultados se mostraram semelhantes para o modelo de Mualem (1976). Enquanto Rosa (2016) encontrou coeficientes de determinação de 0,900 e 0,999, respectivamente para as hipóteses de trecho único e trecho inicial em reta, o presente estudo obteve 0,899 e 0,991 para as mesmas hipóteses.

O modelo proposto por Roger e Hornberger (1978) tem a peculiaridade de inverter os eixos, o que causa estranheza na visualização e comparação com as demais equações. Plotados no Gráfico 30, os resultados deixam visualmente claro que a hipótese com trecho inicial em reta apresenta resultados piores que a hipótese de trecho único tendo em vista que o ajuste se afasta dos dados experimentais.

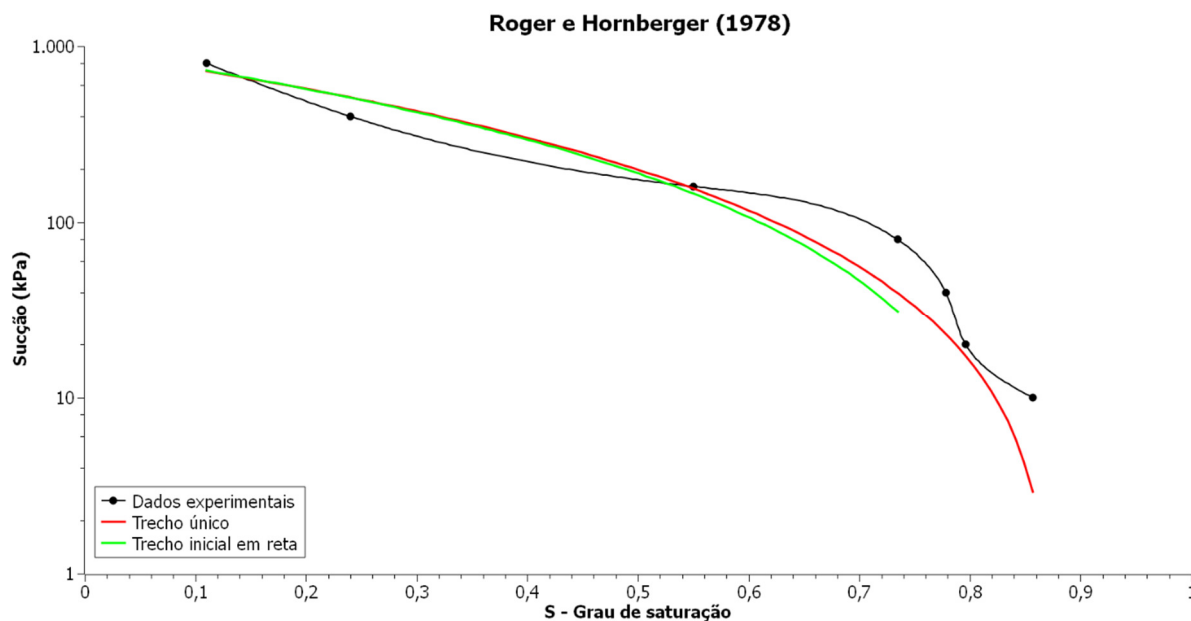


Gráfico 30 - Modelo de Roger e Hornberger (1978) para o horizonte 2
Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

O modelo proposto por van Genuchten (1980) tem seus resultados ilustrados pelo Gráfico 31. Bastante consagrado, o modelo demonstra sua precisão nos resultados aqui apresentados, principalmente no que diz respeito ao modelo com trecho inicial em reta, no qual a curva experimental e o ajuste quase se sobrepõem.

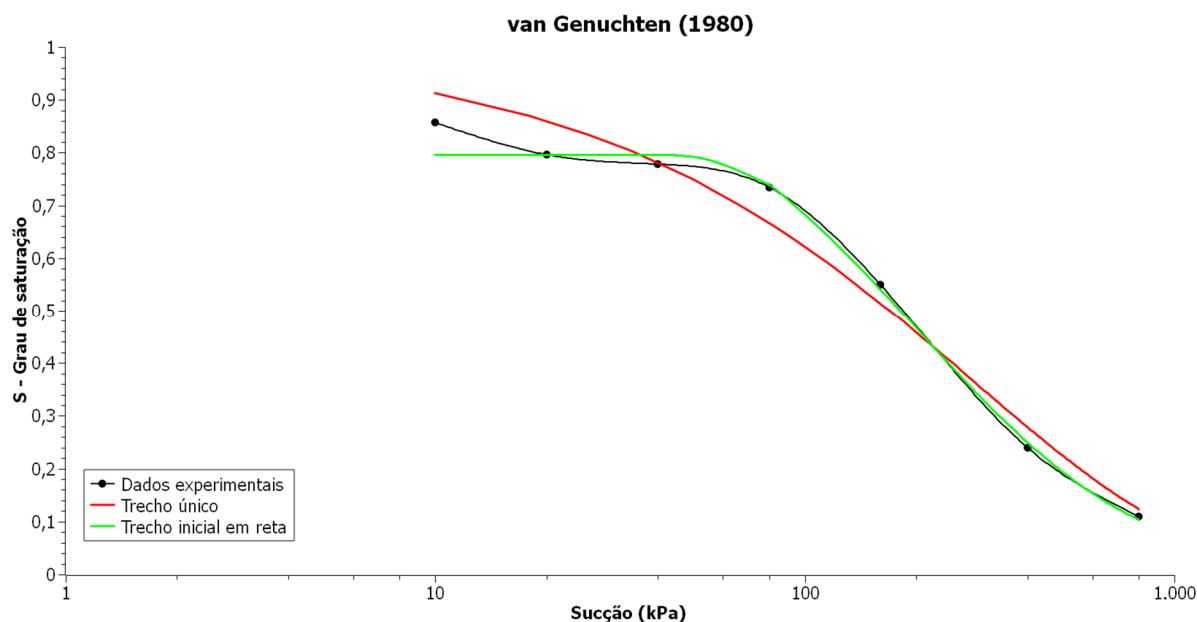


Gráfico 31 - Modelo de van Genuchten (1980) para o horizonte 2
Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

Os ajustes realizados se mostraram idênticos aos feitos por Rosa (2016) utilizando o modelo de van Genuchten (1980), tanto para hipótese de trecho único, como para a hipótese de trecho inicial em reta.

O Gráfico 32 foi obtido a partir do ajuste utilizando a equação proposta por Williams et al. (1983). Dado o formato da curva, é perceptível a melhora quando considerado o trecho inicial em reta.

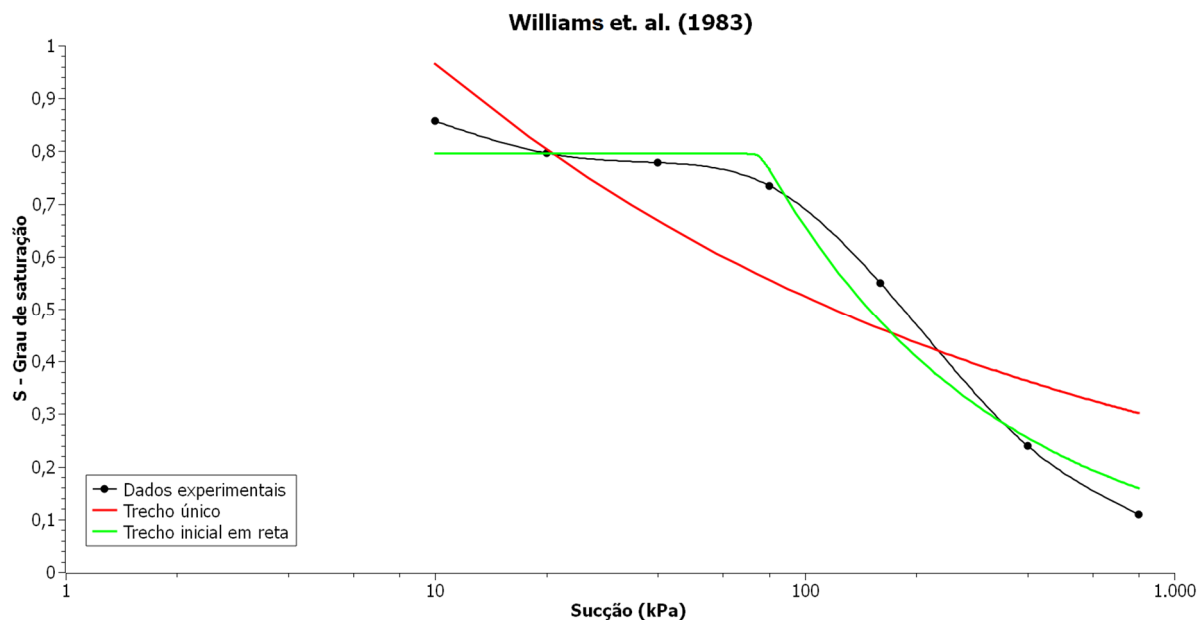


Gráfico 32 - Modelo de Williams et al. (1983) para o horizonte 2

Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

No caso do modelo proposto por Williams et al. (1983), Rosa (2016) encontrou os seguintes coeficientes de determinação: 0,597 para a hipótese de trecho único e 0,964 para a hipótese de trecho inicial em reta. Esses coeficientes mostram que a melhora quando considerado o trecho inicial em reta, citada no parágrafo anterior, também é perceptível no estudo de Rosa (2016). É válido ressaltar que o incremento no coeficiente de determinação ao alternar as hipóteses é ainda mais acentuado no estudo de Rosa (2016).

O Gráfico 33 tem como base os ajustes feitos utilizando a equação proposta por Mckee e Bumb (1984). Destaque para os três pontos correspondentes a sucções de 10, 40 e 160 kPa para a hipótese de trecho único, nos quais os dados experimentais e o ajuste são praticamente coincidentes, podendo ter peso considerável no coeficiente de determinação.

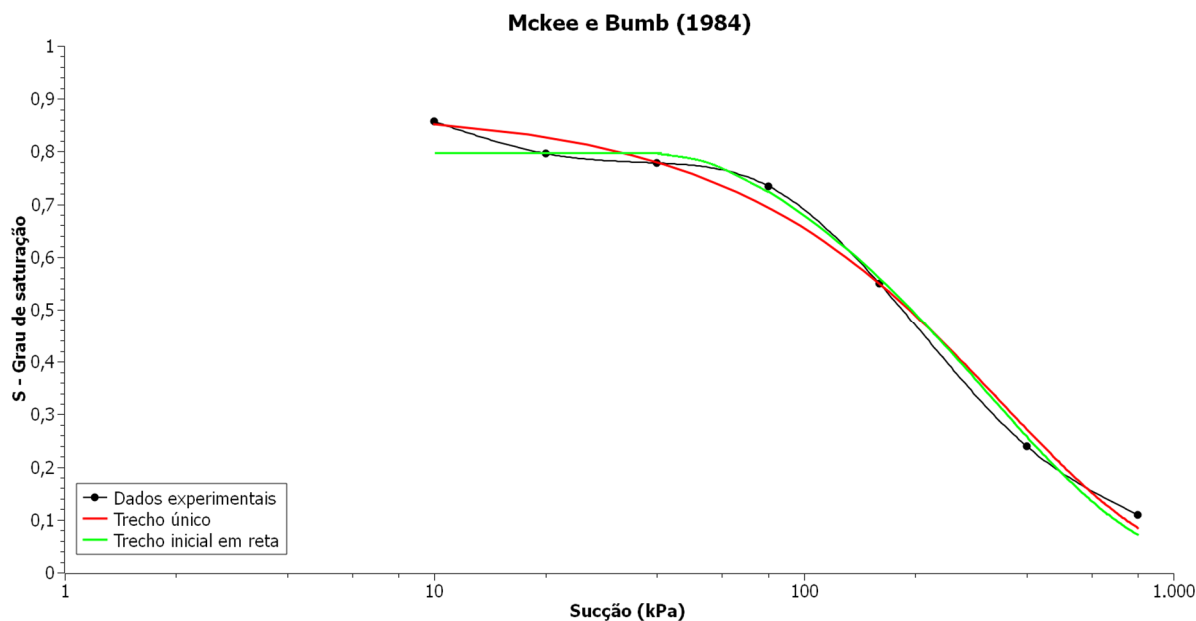


Gráfico 33 - Modelo de Mckee e Bumb (1984) para o horizonte 2
Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

Com r^2 de 0,992 para a hipótese de trecho único e 0,987 para a hipótese de trecho inicial em reta, ambos para o modelo de Mckee e Bumb (1984), Rosa (2016) obteve resultados semelhantes aos encontrados, posteriormente, pelo presente estudo.

Para o modelo de Mckee e Bumb (1987), ilustrado pelo Gráfico 34, também foi desconsiderada a hipótese com trecho inicial em reta. O motivo é o mesmo dado no modelo de Brutsaert (1966), a descontinuidade entre o trecho em reta e o ajuste baseado na equação.

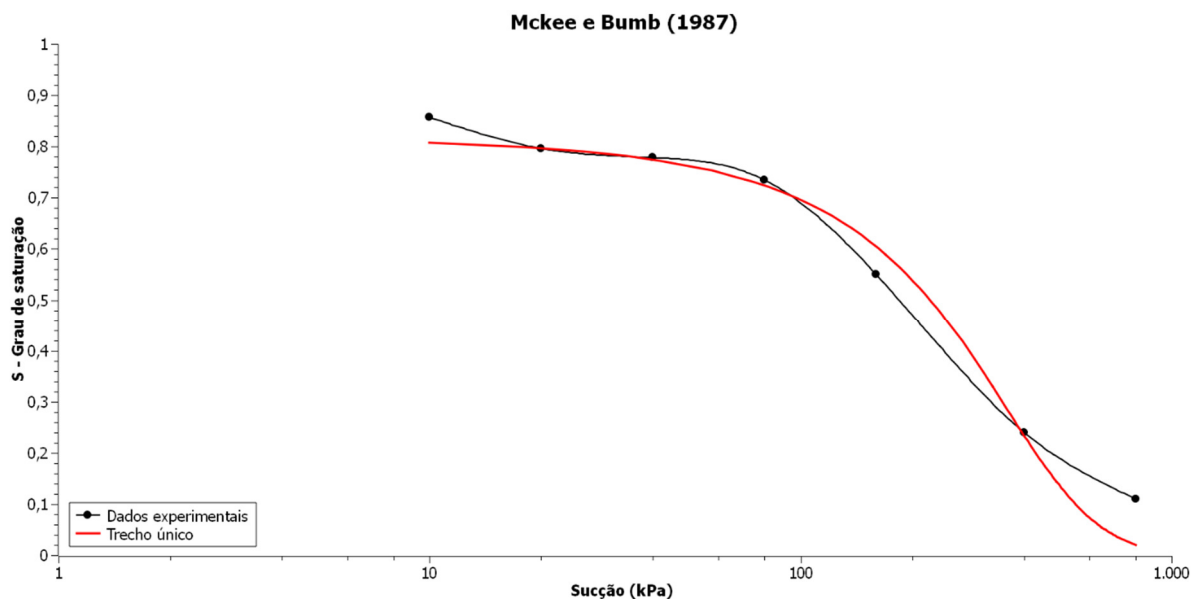


Gráfico 34 - Modelo de Mckee e Bumb (1987) para o horizonte 2
Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

Para o modelo de Mckee e Bumb (1987), Rosa (2016) obteve r^2 de 0,974 considerando trecho único, o presente estudo obteve o mesmo resultado. Já considerando o trecho inicial em reta, o autor chegou a um coeficiente de determinação de 0,9458, enquanto o presente trabalho não encontrou convergência no ajuste.

O modelo de Kosigi (1994) apresentou, visualmente, excelentes resultados tanto para a hipótese de trecho único, quanto para o trecho inicial em reta. Esses resultados são mostrados através do Gráfico 35.

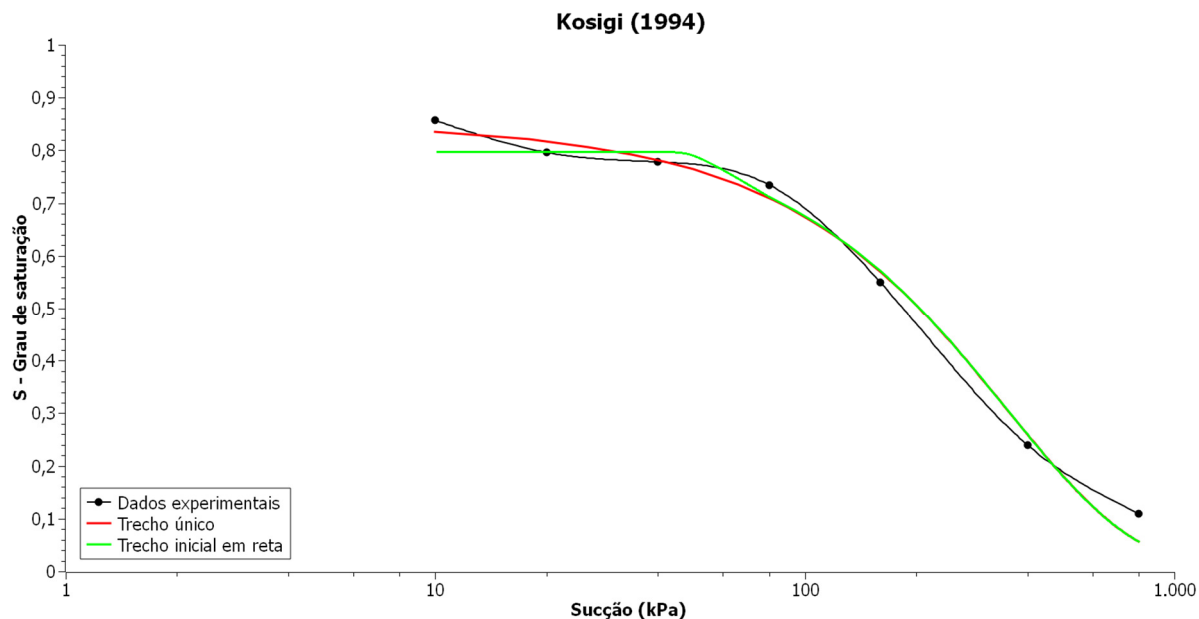


Gráfico 35 - Modelo de Kosigi (1994) para o horizonte 2
Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

O modelo proposto por Kosigi (1994), quando analisado por Rosa (2016), resultou em coeficientes de determinação de 0,990 e 0,923 para as hipóteses de trecho único e trecho inicial em reta, respectivamente. O presente estudo resultou em coeficiente coincidente na primeira hipótese e de 0,982 para a segunda hipótese.

Ilustrados fazendo uso do Gráfico 36, os resultados para o ajuste das curvas utilizando a equação proposta por Fredlund e Xing (1994) se mostram extremamente consistentes para as duas hipóteses testadas pelo presente trabalho.

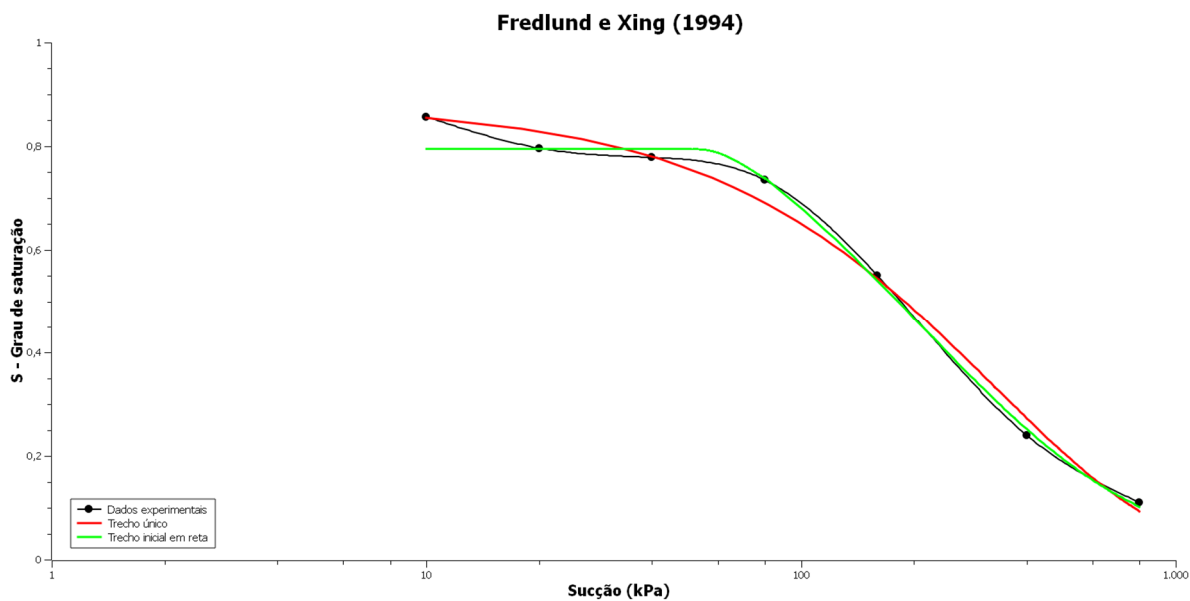


Gráfico 36 - Modelo de Fredlund e Xing (1994) para o horizonte 2
Fonte: Adaptado de Rosa (2016)

Os parâmetros encontrados para cada um dos casos analisados, assim como os coeficientes de determinação estão dispostos na Tabela 5, para a hipótese de trecho único e na Tabela 6, para hipótese de trecho inicial em reta.

Tabela 5 - Resultados para hipótese de trecho único para o horizonte 2

Equação	Parâmetros	R ²
Burdine (1953)	a=0,03 n=2,49	0,856
Gardner (1958)	a=0,01 n=0,97	0,946
Brooks e Corey (1964)	-	-
Brutsaert (1966)	$\psi b=77,31$ n=0,82	0,768
Mualem (1976)	a=0,02 n=1,58	0,899
Roger e Hornberger (1978)	a=1061,44 b=0,88	0,959
van Genuchten (1980)	a=1E-05 n=0,72 m=67,60	0,972
Williams et. al. (1983)	a=-2,17 b=-3,76	0,780
Mckee e Bumb (1984)	a=-45,08 b=342,26	0,992
Mckee e Bumb (1987)	a=223,65 b=149,01	0,974
Kosigi (1994)	a=-138,37 n=65,58	0,990
Fredlund e Xing (1994)	a=3702,81 m=6,76 n=4,27	0,992

Tabela 6 - Resultados para hipótese com trecho inicial em reta para o horizonte 2

Equação	Parâmetros	R ²
Burdine (1953)	a=0,01 n=2,80	0,980
Gardner (1958)	a=8E-03 n=1,37	0,998
Brooks e Corey (1964)	ψ b=77,31 λ =0,89	0,771
Brutsaert (1966)	-	-
Mualem (1976)	a=0,01 n=1,95	0,991
Roger e Hornberger (1978)	a=1121,02 b=0,84	0,936
van Genuchten (1980)	a=3E-03 n=1,18 m=1,60	0,999
Williams et. al. (1983)	a=-3,99 b=-1,47	0,963
Mckee e Bumb (1984)	a=-20,31 b=310,81	0,992
Mckee e Bumb (1987)	-	-
Kosigi (1994)	a=-137,07 n=66,46	0,982
Fredlund e Xing (1994)	a=432,43 m=2,30 n=2,30	0,999

A análise comparativa entre as hipóteses (trecho único e trecho inicial em reta) para uma mesma equação, em geral, aponta para a mesma direção que as evidências visuais anteriormente citadas.

Para a hipótese de trecho único os melhores ajustes foram os que utilizaram as equações de Fredlund e Xing (1994) e Mckee e Bumb (1984), ambos com coeficiente de determinação de 0,992. Com resultado bastante próximo está o ajuste resultante da utilização da equação proposta por Kosigi (1994). Como piores ajustes tem-se os resultantes da equação de Brutsaert (1966) e Williams et al. (1983), respectivamente com r^2 de 0,768 e 0,780.

Para a hipótese com trecho inicial em reta os melhores ajustes foram novamente o de Fredlund e Xing (1994), desta vez em conjunto com o que utilizou a equação proposta por van Genuchten (1980), ambos com coeficiente de determinação de 0,999. Outros ajustes que se destacaram nessa hipótese foram os baseados na equação de Gardner (1958) e Mckee e Bumb (1984) com r^2 de, respectivamente, 0,998 e 0,992. O pior ajuste para essa hipótese foi, com bastante diferença, o que utilizou a proposição de Brooks e Corey (1964) com coeficiente de determinação de 0,771.

Ao considerar as duas hipóteses, a equação que melhor descreve a curva característica do solo proveniente do horizonte 2 é a proposta por Fredlund e Xing (1994), corroborando para a hipótese inicial do presente trabalho. Os resultados apontam também ótimos resultados para a equação proposta por Mckee e Bumb (1984), van Genuchten (1980) e Kosigi (1994). Esses resultados, de certa forma, corroboram com os encontrados por Rosa (2016) e a adição da análise utilizando a equação proposta por Fredlund e Xing (1994) se mostra um complemento relevante.

4.5.3 Ajustes para o Horizonte 3

Os ajustes feitos aos resultados experimentais encontrados para o horizonte 3 são apresentados e comentados nessa seção.

Para o modelo de Burdine (1953), que tem o resultado dos ajustes apresentado no Gráfico 37, a equação se mostrou incapaz de se adaptar à reta inicial para a hipótese de trecho único. Reflexo de tal fato, é a melhora visualmente perceptível quando considerada a hipótese com trecho inicial em reta.

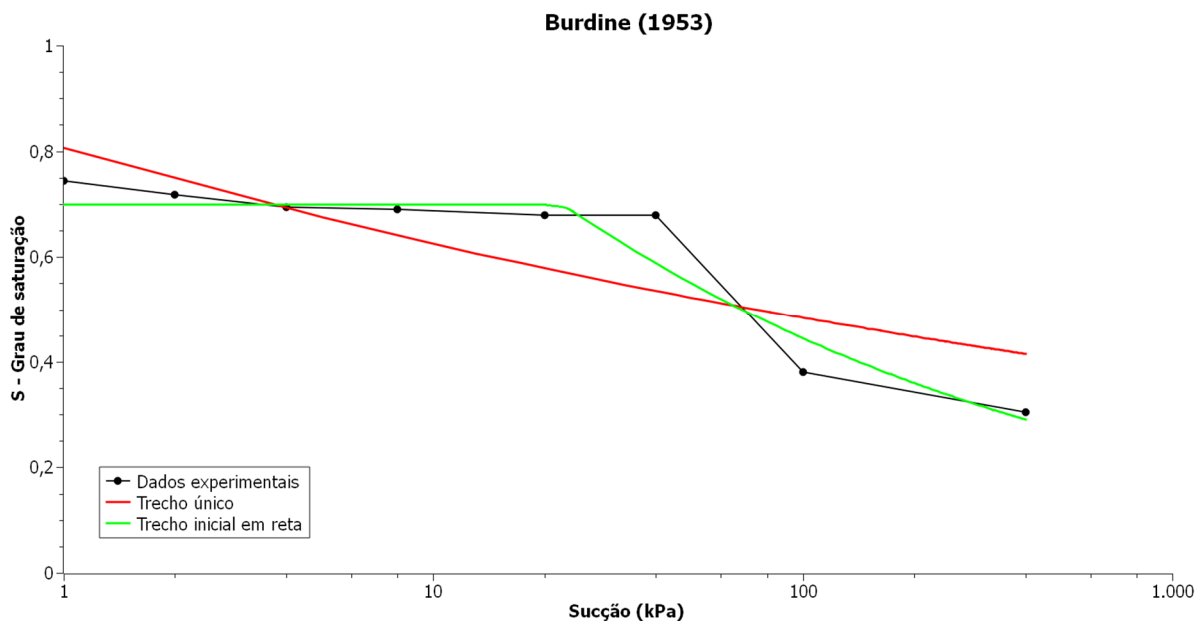


Gráfico 37 - Modelo de Burdine (1953) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

Novamente a equação proposta por Gardner (1958), que tem seus ajustes plotados no Gráfico 38, apresenta características semelhantes às encontradas para o modelo de Burdine (1953).

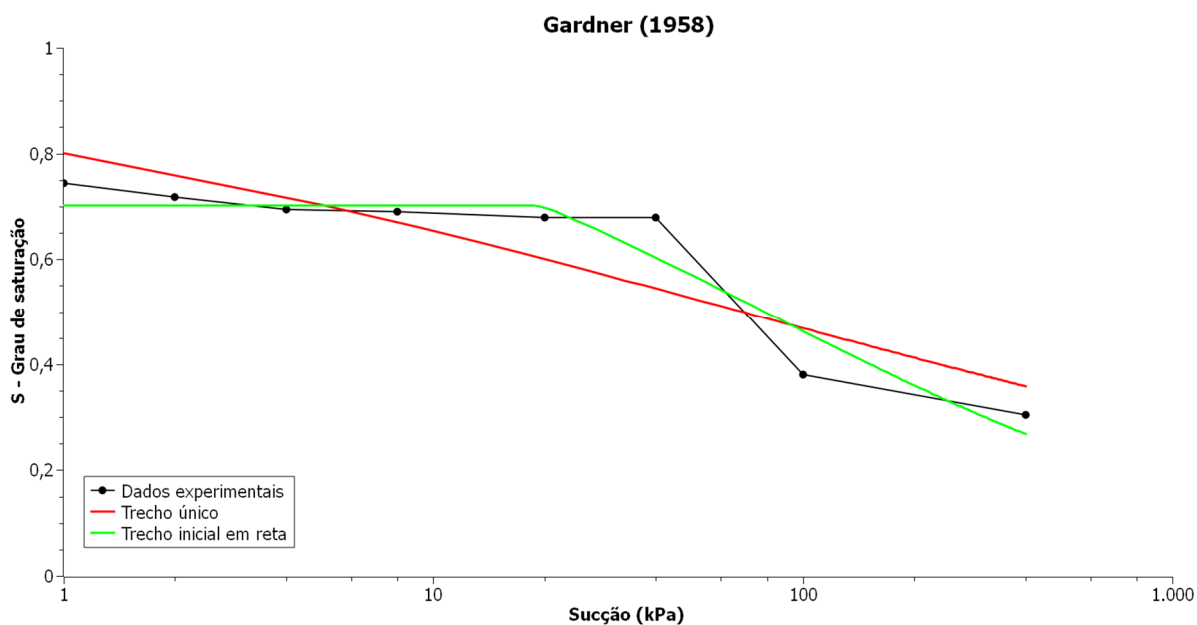


Gráfico 38 - Modelo de Gardner (1958) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

O melhor ajuste do modelo de Gardner (1958) considerando trecho inicial em reta é condizente com o resultado encontrado por Matsubara (2015) ao fazer os ajustes. Porém, enquanto o coeficiente de determinação da hipótese de trecho único se mostrou semelhante nos dois ajustes (0,790 e 0,791, respectivamente), no modelo

com trecho inicial em reta, Matsubara (2015) obteve um coeficiente de determinação maior.

Para o modelo de Brooks e Corey (1964), mais uma vez não houve convergência para a hipótese de trecho único. Portanto, no Gráfico 39, encontram-se plotados os resultados apenas os resultados para a hipótese com trecho inicial em reta.

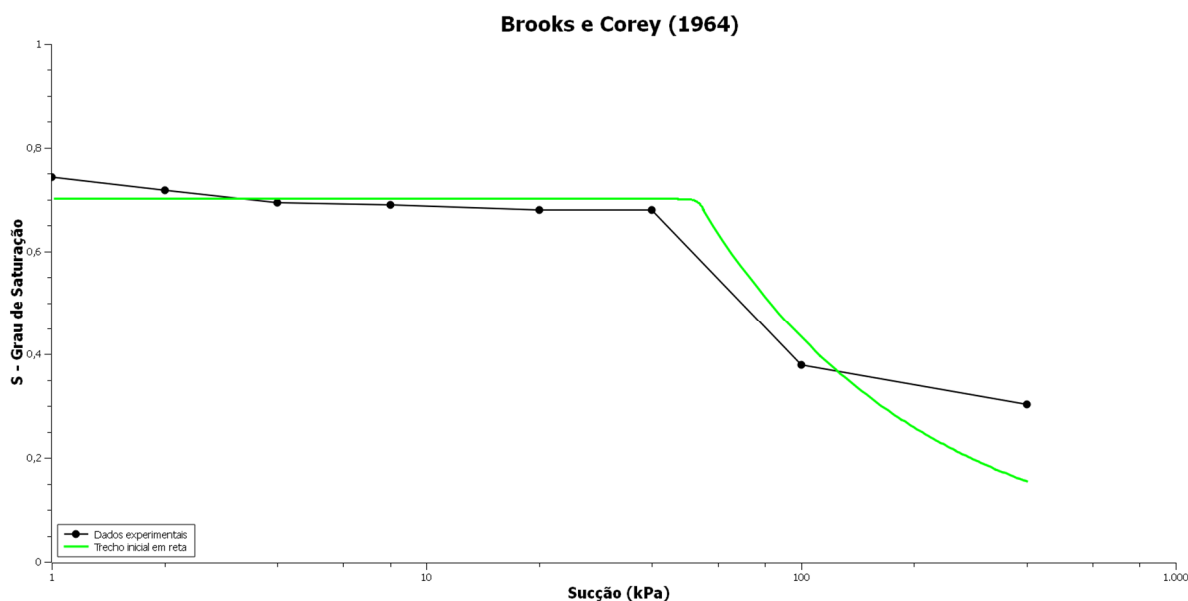


Gráfico 39 - Modelo de Brooks e Corey (1964) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

Os resultados para os ajustes utilizando a equação proposta por Brutsaert (1966) encontram-se apresentados no Gráfico 40. Nele, só é possível visualizar a curva referente à hipótese de trecho único. Isso se deve ao fato de ter se desconsiderado a hipótese com trecho inicial em reta devido à descontinuidade encontrada entre a reta proposta e o ajuste dos demais pontos.

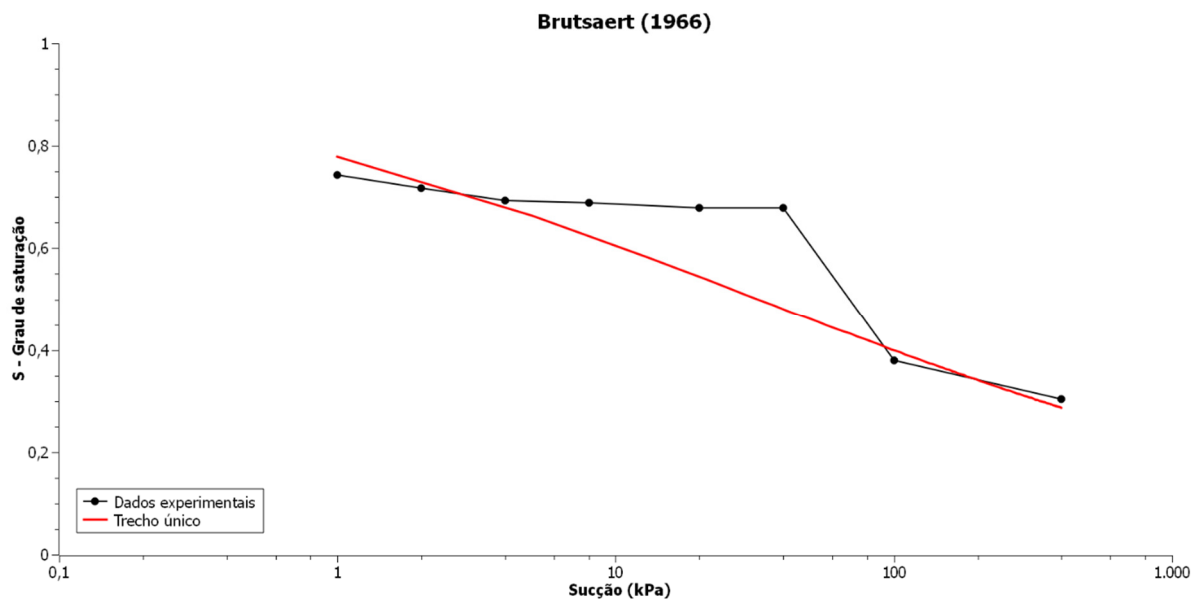


Gráfico 40 - Modelo de Brutsaert (1966) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

O Gráfico 41 foi plotado fazendo uso dos ajustes utilizando a equação proposta por Mualem (1976). Mais uma vez, é possível perceber que os resultados se encontram entre os resultados encontrados para o modelo de Burdine (1953) e os encontrados para o modelo de Gardner (1958).

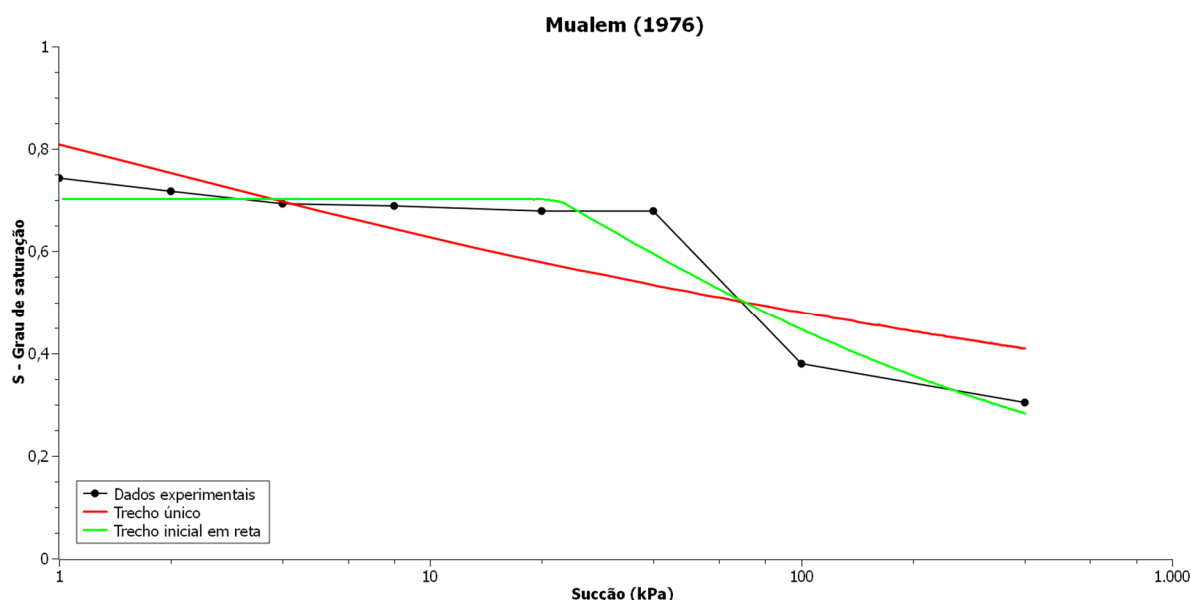


Gráfico 41 - Modelo de Mualem (1976) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

Observa-se no Gráfico 42 os ajustes realizados à excêntrica equação proposta por Roger e Hornberger (1978) em que os eixos são considerados invertidos em relação aos demais modelos.

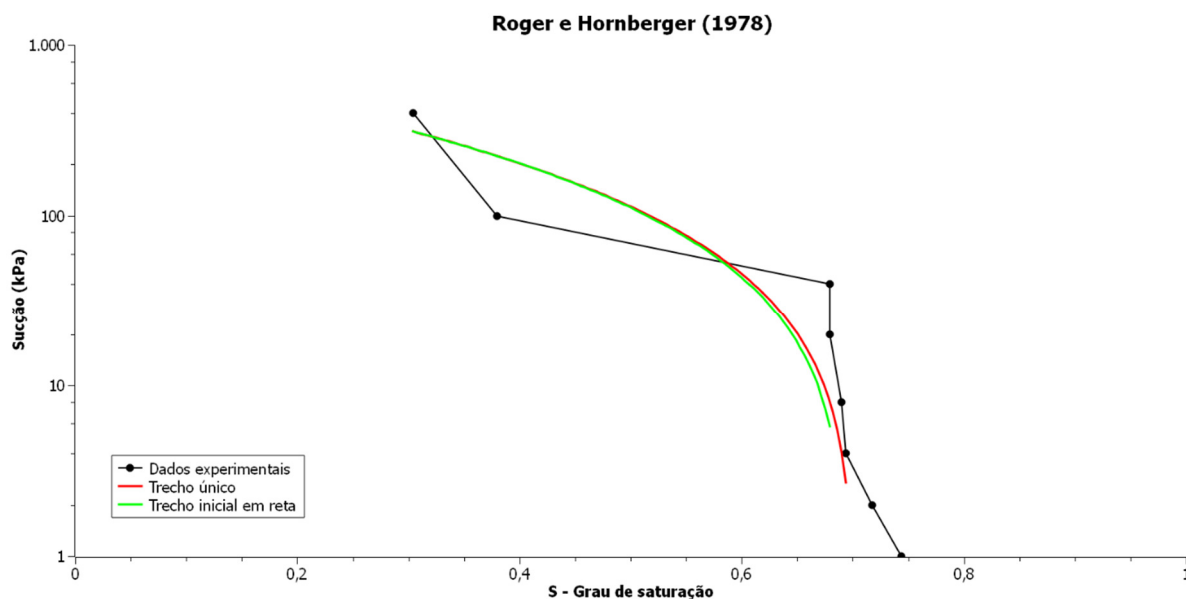


Gráfico 42 - Modelo de Roger e Hornberger (1978) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

Para o horizonte 3, com seus resultados apresentados no Gráfico 43, os ajustes para o modelo proposto por van Genuchten (1980) se mostraram semelhantes aos que utilizaram as equações de Burdine (1953), Gardner (1958) e Mualem (1976), onde a hipótese de trecho inicial é a que melhor se ajusta aos dados da amostra.

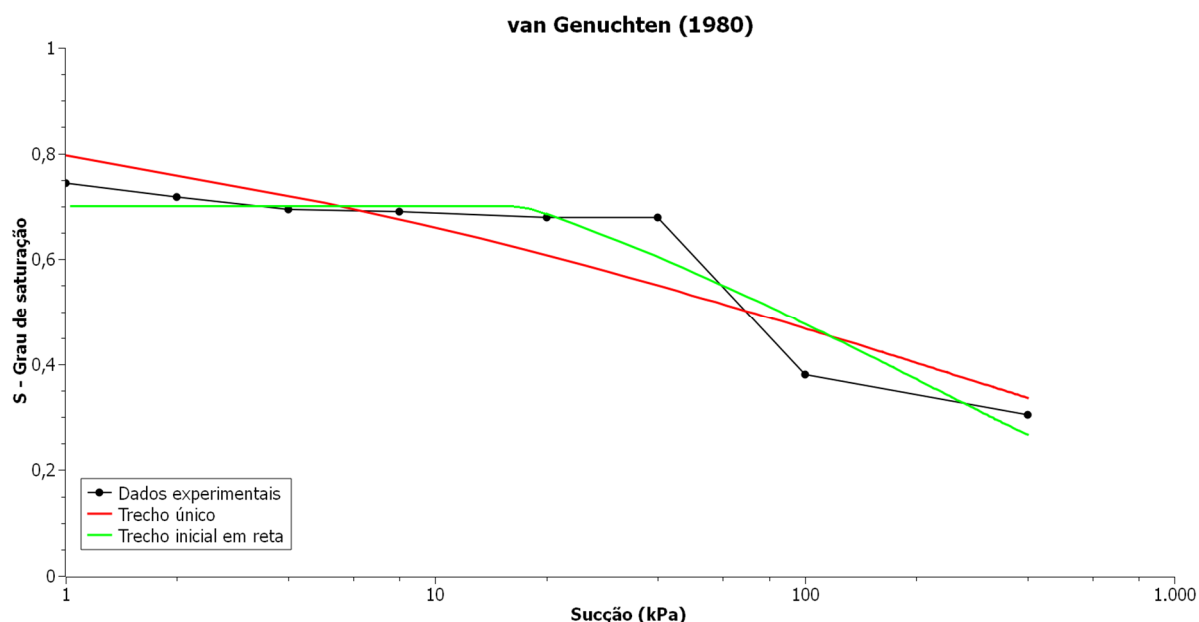


Gráfico 43 - Modelo de van Genuchten (1980) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

Em comparação com os resultados obtidos por Matsubara (2015), no que tange ao modelo de trecho único, os coeficientes de determinação encontrados foram semelhantes, sendo o encontrado pelo autor maior (0,826) que o resultante do

presente trabalho (0,817). Já no que diz respeito ao modelo considerando o trecho inicial em reta, Matsubara (2015) obteve um coeficiente de determinação de 0,998, enquanto o presente estudo obteve 0,858.

Os ajustes feitos utilizando a equação proposta por Williams et al. (1983) encontram-se plotados no Gráfico 44. Novamente o formato da curva faz com que os resultados obtidos para a hipótese com trecho inicial em reta atinjam resultados notavelmente superiores aos feitos utilizando a hipótese de trecho único. Tal fato pode ser confirmado e quantificado em análise posterior que contemple os coeficientes de determinação encontrados para cada uma dessas hipóteses.

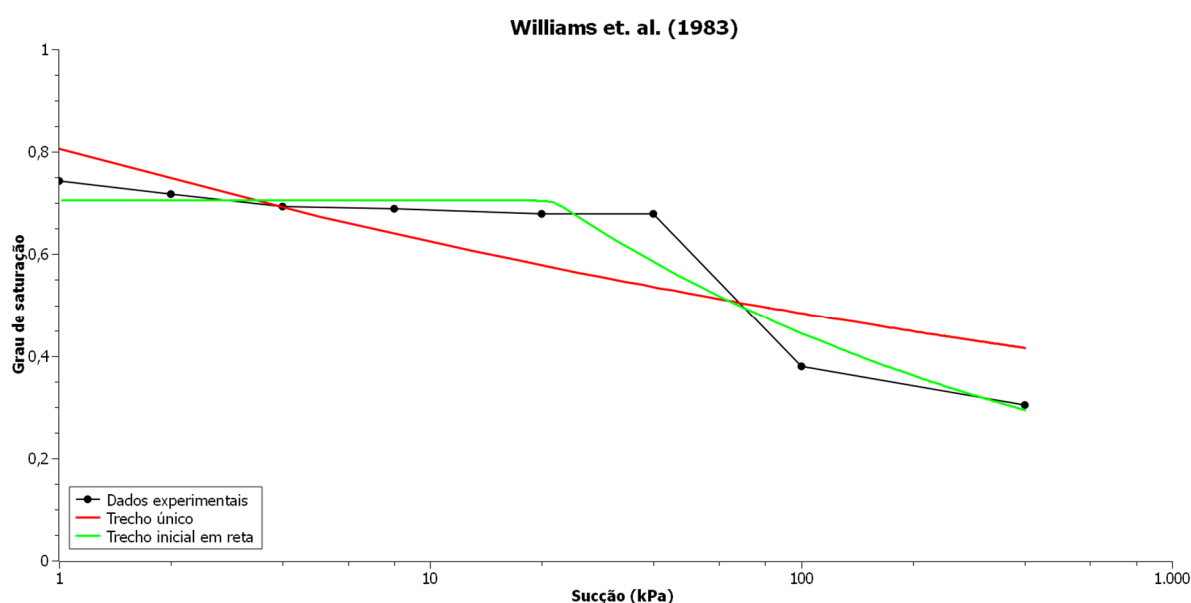


Gráfico 44 - Modelo de Williams et al. (1983) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

Matsubara (2015) também obteve ajustes com coeficientes baixos para o modelo de Williams et al. (1983) considerando trecho único. O autor também percebe um notável aumento do coeficiente de determinação quando considerado o trecho inicial em reta – de 0,597 para 0,971.

Os resultados plotados no Gráfico 45 são correspondentes aos ajustes feitos utilizando a equação proposta por Mckee e Bumb (1984). Através desta, nota-se que ambas as hipóteses apresentam trechos iniciais bastante similares aos dos dados experimentais, sendo coincidentes para as pressões 4 kPa e 8 kPa no ajuste de trecho único e para a pressão 20 kPa no ajuste com trecho inicial em reta.

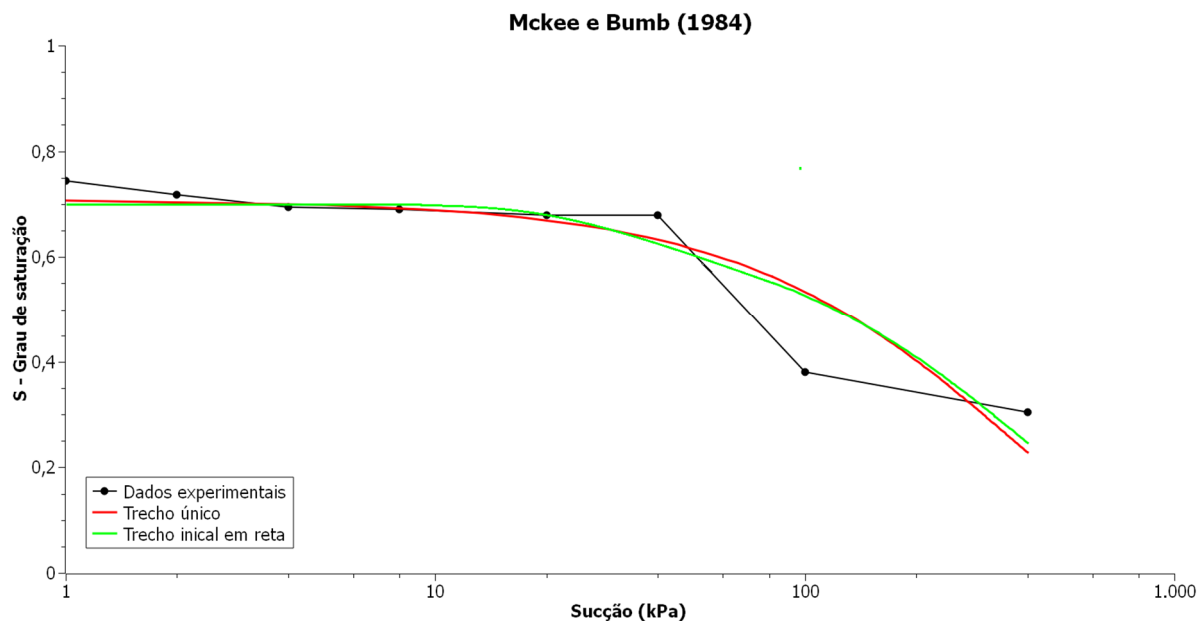


Gráfico 45 - Modelo de Mckee e Bumb (1984) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

Os resultados obtidos por Matsubara (2015) indicam um maior coeficiente de determinação quando considerada a hipótese de trecho único (0,890) em detrimento da hipótese de trecho inicial em reta (0,809). Esse fato também foi percebido no presente trabalho.

O Gráfico 46 foi obtido ao serem dispostos os resultados para o ajuste feito utilizando o modelo de Mckee e Bumb (1987). Os resultados apresentam apenas a hipótese de trecho único pelo mesmo motivo causador da desconsideração da hipótese de trecho inicial em reta do modelo de Brutsaert (1966). Quando considerada a reta nos primeiros pontos, não há continuidade entre ela e a curva ajustada através da equação.

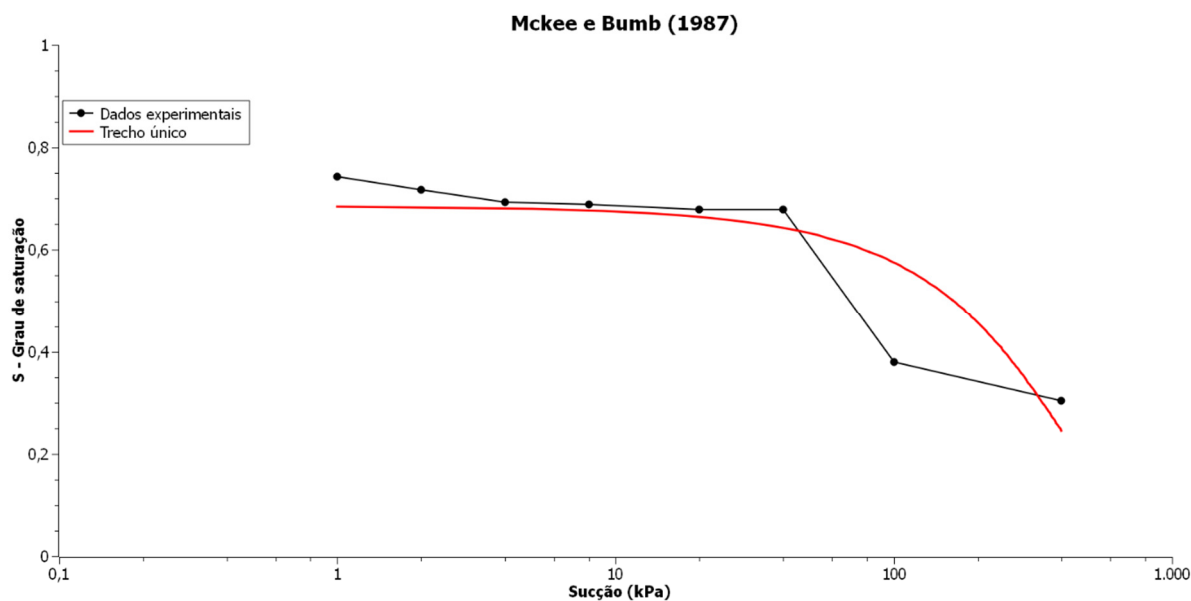


Gráfico 46 - Modelo de Mckee e Bumb (1987) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

Matsubara (2015) obteve um coeficiente de determinação de 0,890 para a hipótese de trecho único e de 0,809 para a hipótese com trecho inicial em reta, ambos utilizando o modelo de Mckee e Bumb (1987). Tais resultados diferem dos encontrados no presente estudo.

No modelo proposto por Kosigi (1994), cujos ajustes encontram-se plotados no Gráfico 47, observa-se que nos pontos de pressão mais elevados obteve-se maior divergência enquanto que para as medições iniciais os ajustes adequaram-se se forma satisfatória.

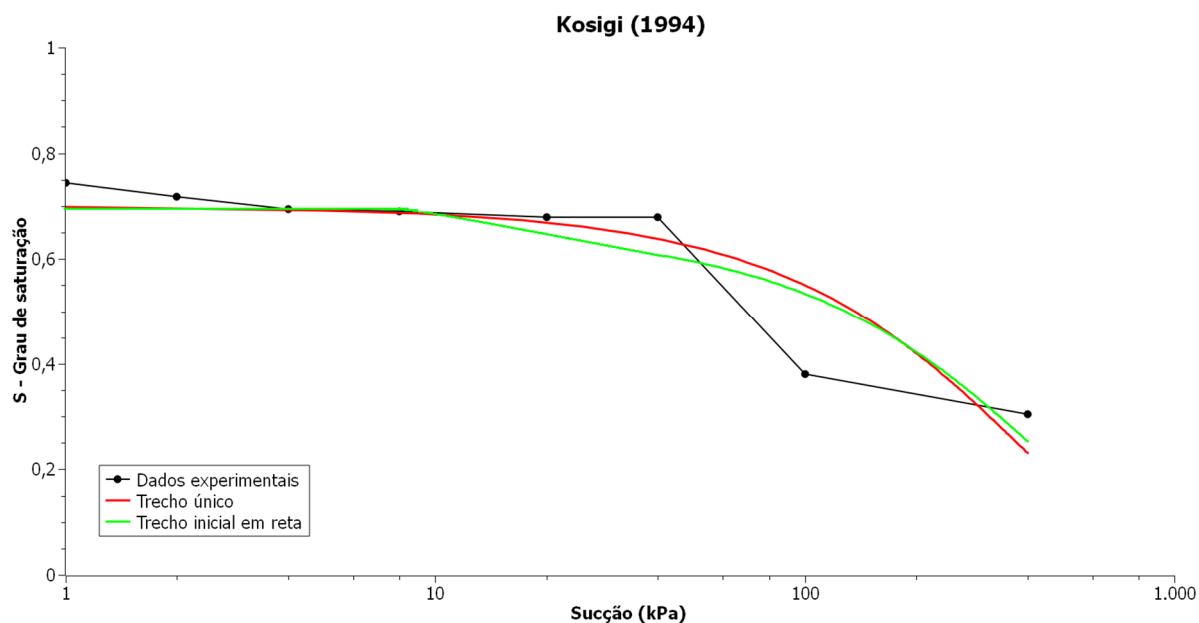


Gráfico 47 - Modelo de Kosigi (1994) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

O Gráfico 48 consiste na plotagem dos dados obtidos utilizando para o ajuste a equação proposta por Fredlund e Xing (1994). Ambas as hipóteses aplicadas apresentam uma boa similaridade à curva experimental do horizonte 3.

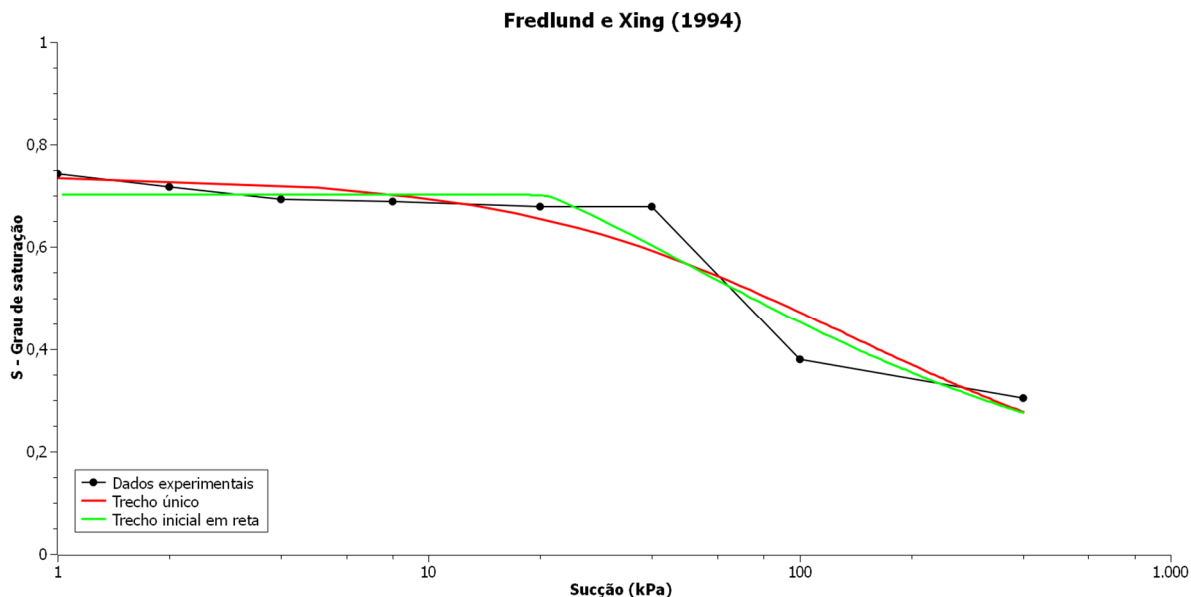


Gráfico 48 - Modelo de Fredlund e Xing (1994) para o horizonte 3
Fonte: Adaptado de Matsubara (2015)

Os parâmetros encontrados ao ajustar cada uma das equações aos dados experimentais, bem como os coeficientes de determinação encontrados encontram-se dispostos na Tabela 7, para a hipótese de trecho único e na Tabela 8 para a hipótese com trecho inicial em reta.

Tabela 7 - Resultados para hipótese de trecho único para o horizonte 3

Equação	Parâmetros	R ²
Burdine (1953)	a=6,92 n=2,11	0,693
Gardner (1958)	a=0,25 n=0,33	0,790
Brooks e Corey (1964)	-	-
Brutsaert (1966)	ψ b=32,5 n=0,36	0,677
Mualem (1976)	a=5,44 n=1,12	0,700
Roger e Hornberger (1978)	a=1124,48 b=0,702	0,792
van Genuchten (1980)	a=6,77E-10 n=0,26 m=58,20	0,817
Williams et. al. (1983)	a=1,96 b=-9,05	0,692
Mckee e Bumb (1984)	a=-121,85 b=353,45	0,838
Mckee e Bumb (1987)	a=193,96 b=210,31	0,758
Kosigi (1994)	a=-258,63 n=-23,22	0,806
Fredlund e Xing (1994)	a=65,24 m=1,04 n=1,03	0,907

Tabela 8 -Resultados para hipótese com trecho inicial em reta para o horizonte 3

Equação	Parâmetros	R ²
Burdine (1953)	a=0,14 n=2,31	0,876
Gardner (1958)	a=0,07 n=0,62	0,876
Brooks e Corey (1964)	$\psi b=32,5$ $\lambda=0,74$	0,28
Brutsaert (1966)	-	-
Mualem (1976)	a=0,11 n=1,34	0,883
Roger e Hornberger (1978)	a=1146,09 b=0,70	0,739
van Genuchten (1980)	a=2,05E-07 n=0,42 m=70,27	0,858
Williams et. al. (1983)	a=-1,89 b=-3,35	0,873
Mckee e Bumb (1984)	a=-153,73 b=395,61	0,739
Mckee e Bumb (1987)	-	-
Kosigi (1994)	a=-329,11 n=-56,27	0,715
Fredlund e Xing (1994)	a=21,98 m=0,80 n=1,19	0,889

Para a hipótese de trecho único, a equação que, quando ajustada, resultou em um maior coeficiente de determinação foi a proposta por Fredlund e Xing (1994), com r² de 0,907. Em seguida, os melhores ajustes utilizaram as equações de Mckee e

Bumb (1984) e van Genuchten (1980), respectivamente com coeficientes de determinação de 0,838 e 0,817. O pior resultado foi o encontrado ao se ajustar a equação de Brutsaert (1966) aos dados experimentais, com r^2 de 0,677.

Para a hipótese considerando o trecho inicial em reta, o melhor ajuste encontrado foi, novamente, o que utilizou a equação proposta por Fredlund e Xing (1994) com r^2 de 0,889. Também foram obtidos bons resultados com a equação de Mualem (1976) com coeficiente de determinação de 0,883 e com os modelos de Burdine (1953) e Gardner (1958), ambos com r^2 de 0,876. O modelo proposto por Brooks e Corey (1964) quase divergiu apresentando um coeficiente de determinação de apenas 0,28. As demais equações não apresentaram grandes diferenças, mantendo seus r^2 na faixa entre 0,715 e 0,873.

Ao considerar as duas hipóteses, a equação que tem seus ajustes se aproximando mais dos dados experimentais é a proposta por Fredlund e Xing (1994). Novamente, a adição desta última equação se mostra um relevante complemento ao trabalho de Matsubara (2015).

4.5.4 Resultados para os Três Horizontes

Tendo exposto os resultados separadamente para cada um dos horizontes analisados, torna-se válido contemplar os ajustes considerando o desempenho de cada equação quando se leva em consideração os três horizontes. Esses resultados e discussões serão tratados a seguir. Vale ressaltar que o gráfico do horizonte 2 foi obtido por Rosa (2016) e o gráfico para o horizonte 3 foi obtido por Matsubara (2015).

Inicialmente, comparando os dados que deram origem ao Gráfico 8, Gráfico 9 e Gráfico 10, nota-se que, para o horizonte 3, primou-se pela coleta de dados a pressões mais baixas, resultando em um detalhamento maior da zona de efeito de borda em detrimento da zona de transição. Esse fato pode ser responsável pelos resultados de coeficientes de determinação sensivelmente mais baixos para o horizonte 3, tendo em vista que algumas das equações tendem a se adaptar melhor a formatos sigmóides, o que não é alcançado pelo intervalo de coletas do horizonte 3.

Os coeficientes de determinação para cada um dos horizontes, bem como cada um dos ajustes considerando a hipótese de trecho único encontram-se dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficientes de determinação para cada horizonte para a hipótese de trecho único

Equação	Horizonte 1	Horizonte 2	Horizonte 3
Burdine (1953)	0,917	0,856	0,693
Gardner (1958)	0,980	0,946	0,790
Brooks e Corey (1964)	-	-	-
Brutsaert (1966)	-	0,768	0,677
Mualem (1976)	0,950	0,899	0,700
Roger e Hornberger (1978)	0,991	0,959	0,792
van Genuchten (1980)	0,987	0,972	0,817
Williams et. al. (1983)	0,836	0,780	0,692
Mckee e Bumb (1984)	0,990	0,992	0,838
Mckee e Bumb (1987)	0,937	0,974	0,758
Kosigi (1994)	0,977	0,990	0,806
Fredlund e Xing (1994)	0,997	0,992	0,907

Considerando o desempenho das equações em um critério de consistência ao transitar entre os diferentes horizontes estudados, a equação que melhor se ajusta às curvas características experimentalmente obtidas é a proposta por Fredlund e Xing

(1994), com r^2 médio de 0,965. Em seguida, se posicionam as equações de Mckee e Bumb (1984) e, posteriormente a de van Genuchten (1980).

A equação proposta por Brooks e Corey (1964) não convergiu para a hipótese de trecho único para nenhum dos horizontes analisados. Tal fato pode ser explicado pelo estudo desenvolvido por Leong e Rahardho (1997), que classifica a equação como válida somente para pressões superiores ao valor relativo à entrada de ar nos poros (ponto de entrada de ar). Essa explicação se mostra coerente com a convergência de tal equação ao se considerar o trecho inicial em reta.

Desconsiderando a equação proposta por Brooks e Corey (1964) e a proposta por Brutsaert (1966), por não terem convergido para os três horizontes, o pior desempenho foi verificado nos ajustes que utilizaram o modelo de Williams et al. (1983). Além de não possuir formato sigmoide, a equação de Williams et al. (1983) não apresenta artifícios para criar o patamar anterior ao ponto de entrada de ar, resultando em uma inclinação muito acentuada e um ajuste ruim, principalmente no caso do horizonte 3 que contempla preponderantemente a zona de efeito de borda.

Um resumo do desempenho de cada equação é feito no Gráfico 49

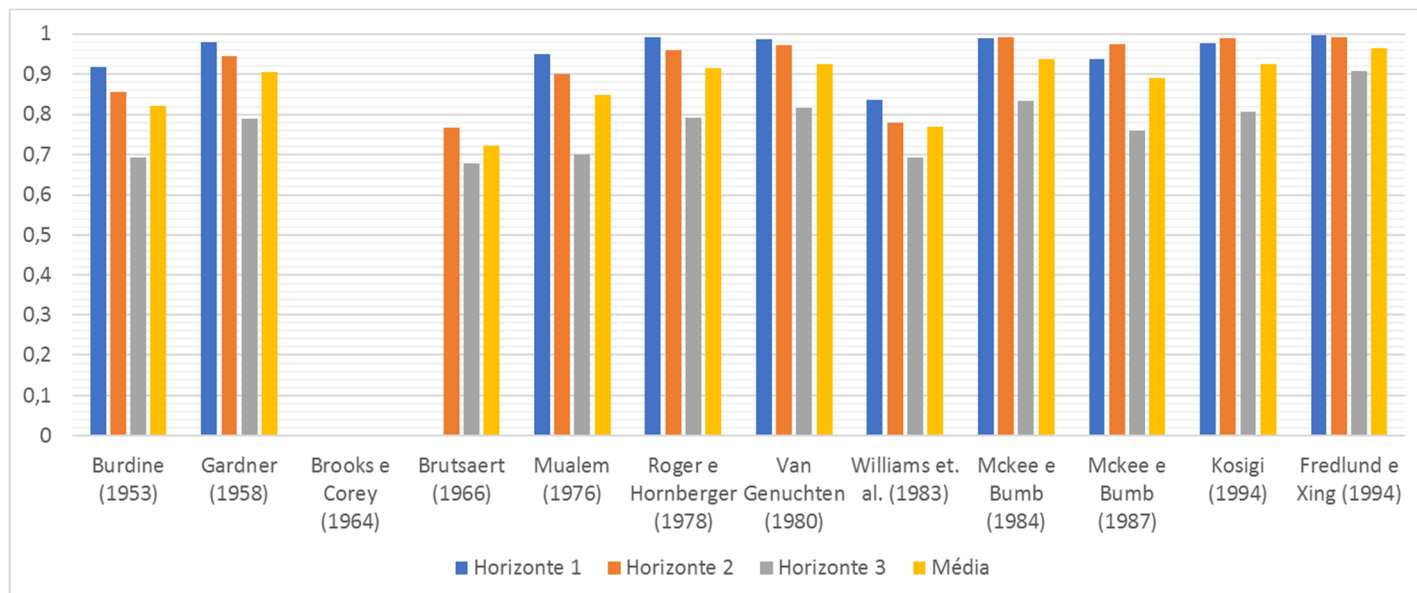


Gráfico 49 - Coeficientes de determinação para hipótese de trecho único

Fonte: Autoria própria

Os coeficientes de determinação para cada um dos horizontes, bem como cada um dos ajustes considerando a hipótese de trecho inicial em reta encontram-se dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Coeficientes de determinação para cada horizonte para hipótese com trecho inicial em reta

Equação	Horizonte 1	Horizonte 2	Horizonte 3
Burdine (1953)	0,979	0,980	0,876
Gardner (1958)	0,997	0,998	0,876
Brooks e Corey (1964)	0,577	0,771	0,28
Brutsaert (1966)	-	-	-
Mualem (1976)	0,990	0,991	0,883
Roger e Hornberger (1978)	0,986	0,936	0,739
van Genuchten (1980)	0,997	0,999	0,858
Williams et. al. (1983)	0,965	0,963	0,873
Mckee e Bumb (1984)	0,982	0,992	0,739
Mckee e Bumb (1987)	-	-	-
Kosigi (1994)	-	0,982	0,715
Fredlund e Xing (1994)	0,998	0,999	0,889

Considerando a hipótese com trecho inicial em reta para os três horizontes combinados, a equação que melhor descreve as curvas características dos solos

estudados é, assim como na hipótese de trecho único, a proposta por Fredlund e Xing (1994). Equações que apresentaram consistência e boas correlações com os dados experimentais também foram as propostas por Gardner (1958) e van Genuchten (1980). Quando considerado o trecho inicial em reta, a equação proposta por Mckee e Bumb (1984) cai um pouco de desempenho nos ajustes analisados, enquanto os modelos de Gardner (1958) e Williams et al. (1983) se aproximam dos dados experimentais.

Para a hipótese de trecho inicial em reta, ajustes utilizando a equação proposta por Brutsaert (1966) não convergiram para nenhum dos horizontes estudados. Também nessa hipótese, nota-se que a equação proposta por Mckee e Bumb (1987) apresentou ajustes descontínuos em relação à reta inicial para todos os horizontes, bem como a equação de Kosigi (1994) para o horizonte 1.

Novamente descartando os ajustes que não convergiram para todos os horizontes, o pior desempenho foi verificado para a equação proposta por Brooks e Corey (1964), como fica bastante claro no Gráfico 50, que resume as informações anteriormente citadas.

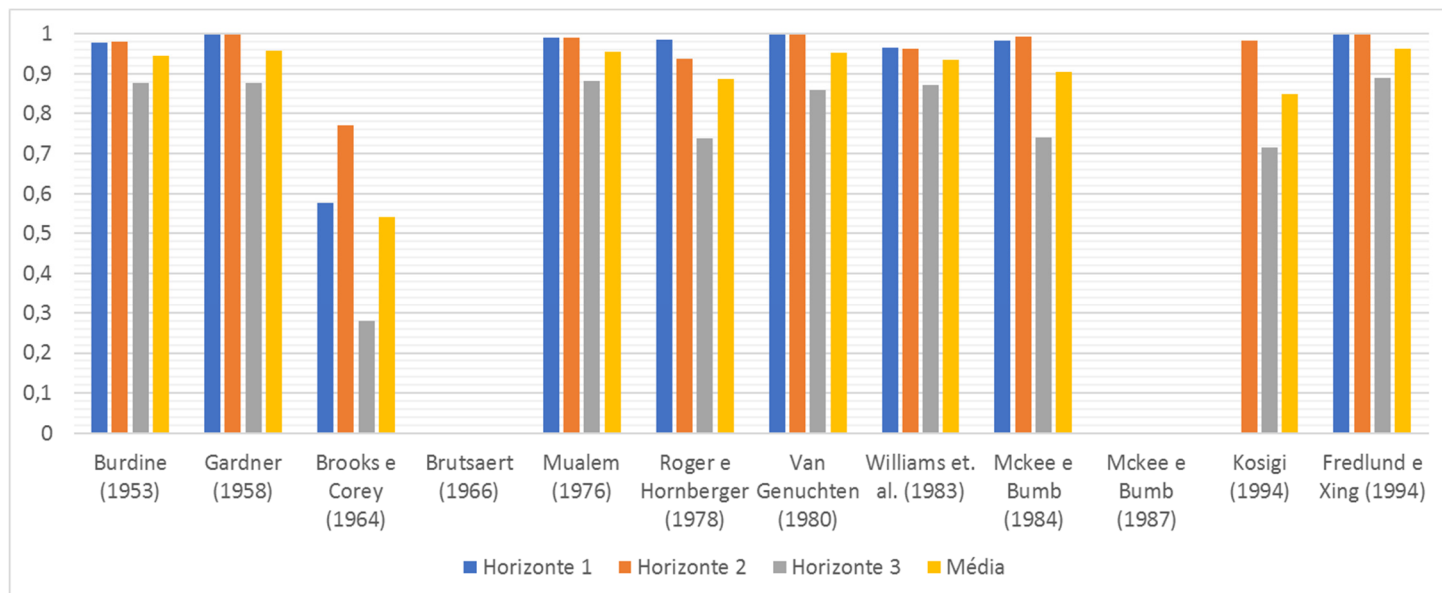


Gráfico 50 - Coeficientes de determinação para hipótese de trecho inicial em reta

4.6 PROPOSIÇÃO DE NOVAS EQUAÇÕES

Após os ajustes apresentados, que utilizaram as equações propostas pela literatura, seguem as equações propostas e seus parâmetros e resultados.

Propõe-se a Equação 1, que não possui formato sigmoide, mas apresentou resultados relevantes para os dados experimentais encontrados. Evidências de que se ajusta bem, ao menos, aos pontos para sucções de até 1000 kPa, foram encontradas. Tal equação também se ajustou de maneira satisfatória ao patamar no qual a saturação permanece praticamente constante.

$$S = a \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{m} \right)}{\ln \left(1 + \frac{n}{m} \right)} \right]$$

A equação se trata de uma adaptação do coeficiente de correção introduzido por Fredlund e Xing (1994).

Os gráficos resultantes da aplicação da Equação 1 são posicionados seguir.

O Gráfico 51 contém o ajuste feito utilizando a Equação 1 para os dados obtidos no ensaio do horizonte 1. Por possuir apenas uma curvatura, nota-se um afastamento em relação aos dados experimentais no ponto de entrada de ar. O ajuste obteve parâmetros de 0,92; 3.443,41 e 214,68 para, respectivamente a, n e m. Esses parâmetros resultaram em um r^2 de 0,996.

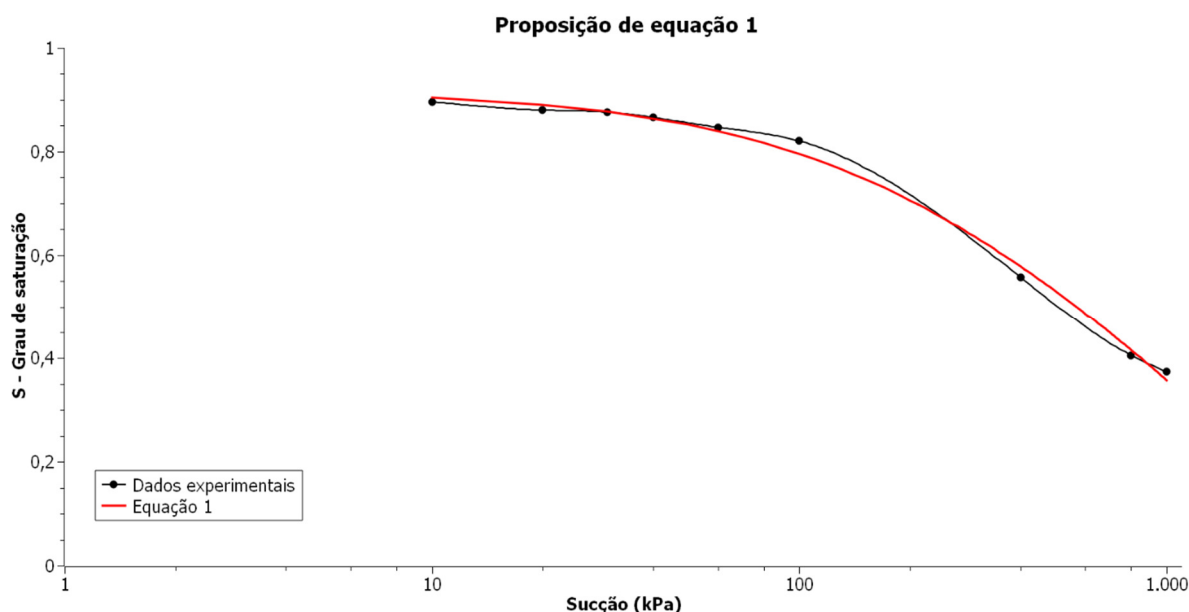


Gráfico 51 - Ajuste da equação 1 para o horizonte 1

O ajuste utilizando a equação 1 aos dados experimentais coletados para o horizonte 2 encontram-se plotados no Gráfico 52. Com parâmetros de 0,89; 1.004,88 e 111,79 para a, n e m, respectivamente, obteve-se um coeficiente de determinação de 0,984.

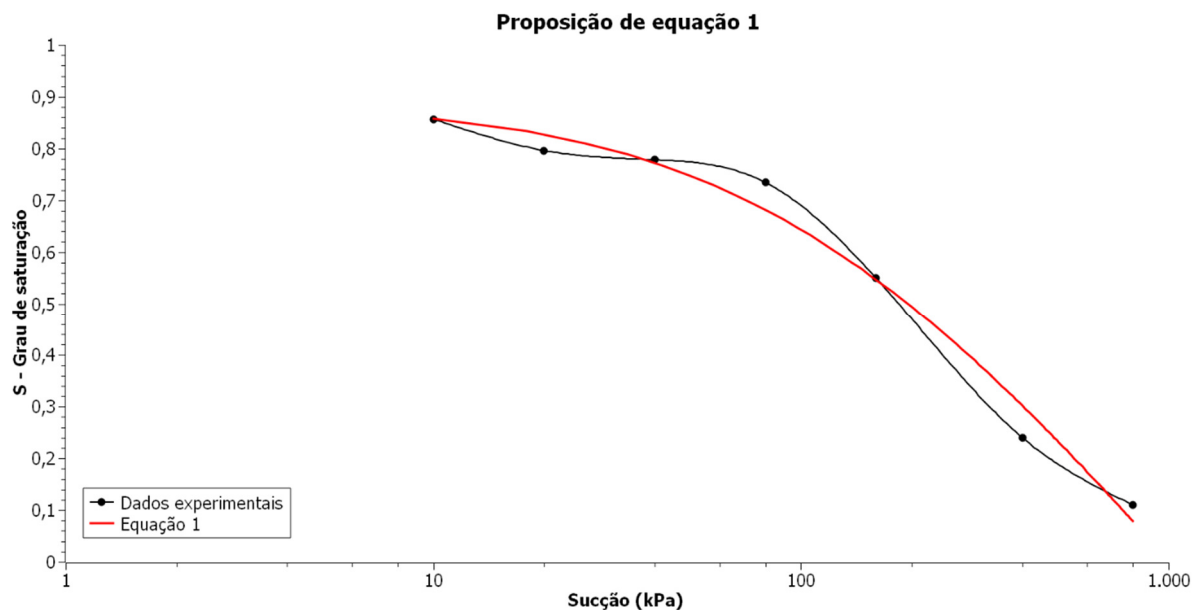


Gráfico 52 - Ajuste da equação 1 para o horizonte 2

O Gráfico 53 é aqui posicionado para ilustrar os resultados obtidos ao se ajustar a Equação 1 aos dados do horizonte 3. Os parâmetros utilizados para plotar a curva foram $a=0,74$; $n=29,63$ e $m=2.095,15$; resultando em r^2 de 0,895.

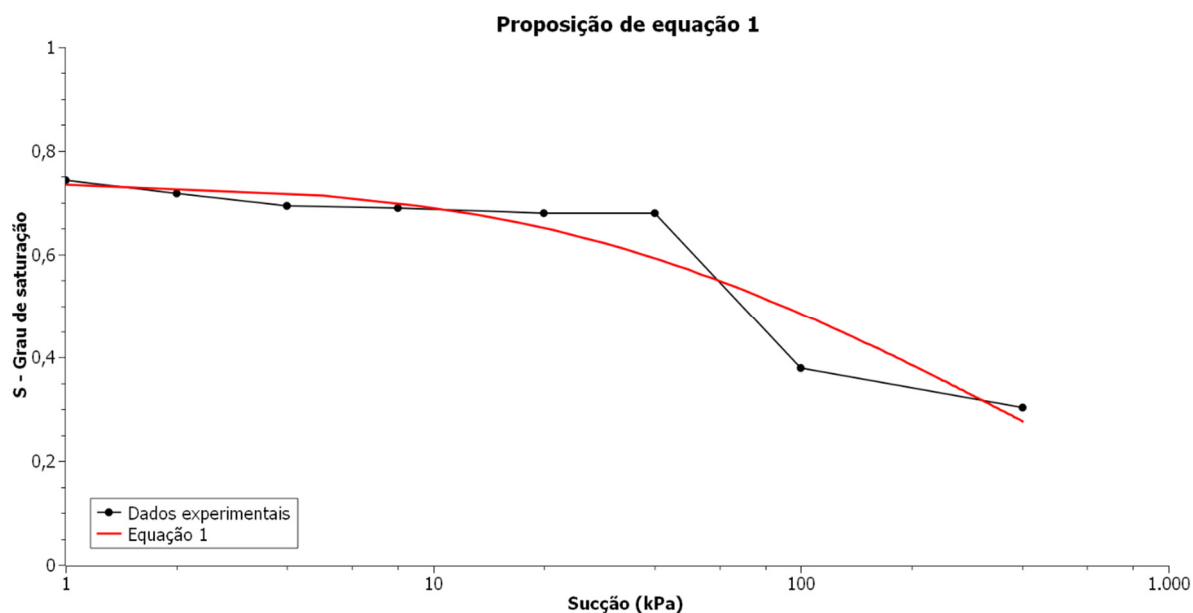


Gráfico 53 - Ajuste da equação 1 para o horizonte 3

Utilizando um modelo de decaimento exponencial, propõe-se a Equação 2, que possui um formato sigmoide, na escala logarítmica no eixo das abcissas. Ao atenuar a inclinação nos pontos de sucção mais alta, a curva ajustada se aproxima dos pontos onde há início de curvaturas.

$$S = n + ae^{-m\psi}$$

Os ajustes para a Equação 2 são apresentados a seguir.

O Gráfico 54 apresenta o ajuste feito utilizando a Equação 2 aos dados experimentais do horizonte 1. Nota-se a aproximação aos pontos de curvatura em relação ao ajuste da Equação 1. Para os parâmetros de ajuste $a=0,63$; $n=0,28$ e $m=0,00$; obteve-se um r^2 de 0,998.

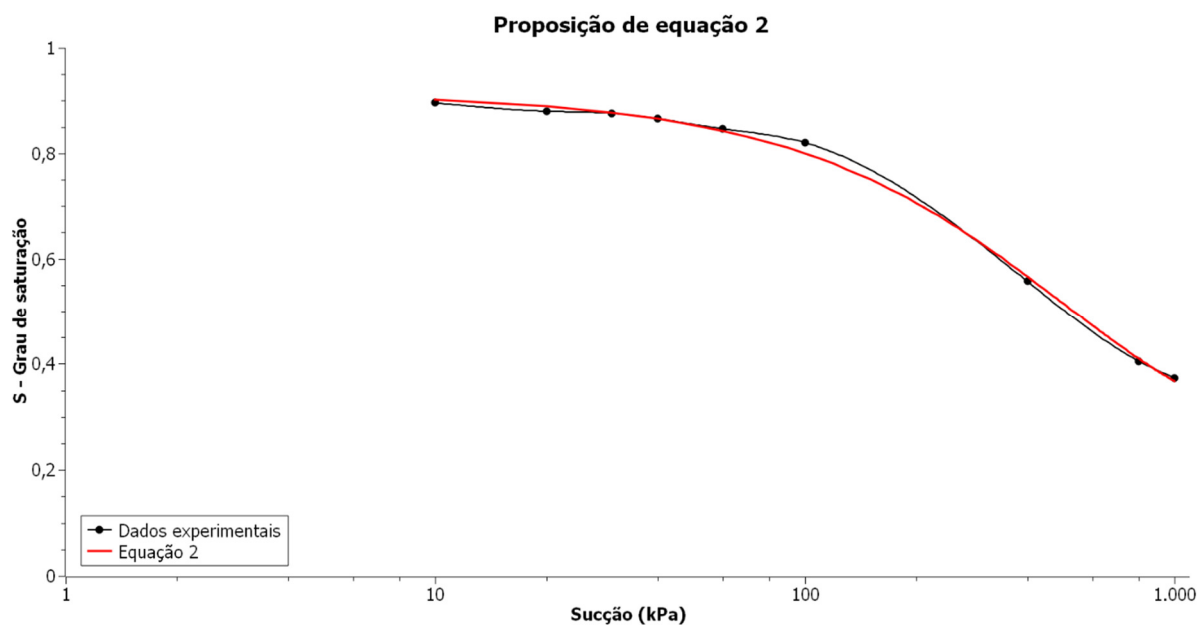


Gráfico 54 - Ajuste da equação 2 para o horizonte 1

O Gráfico 55 teve seus dados retirados do ajuste feito com a Equação 2 para o horizonte 2. Para parâmetros de 0,85; 0,03 e 0,00 (a , n e m , respectivamente), chegou-se a um coeficiente de determinação de 0,992.

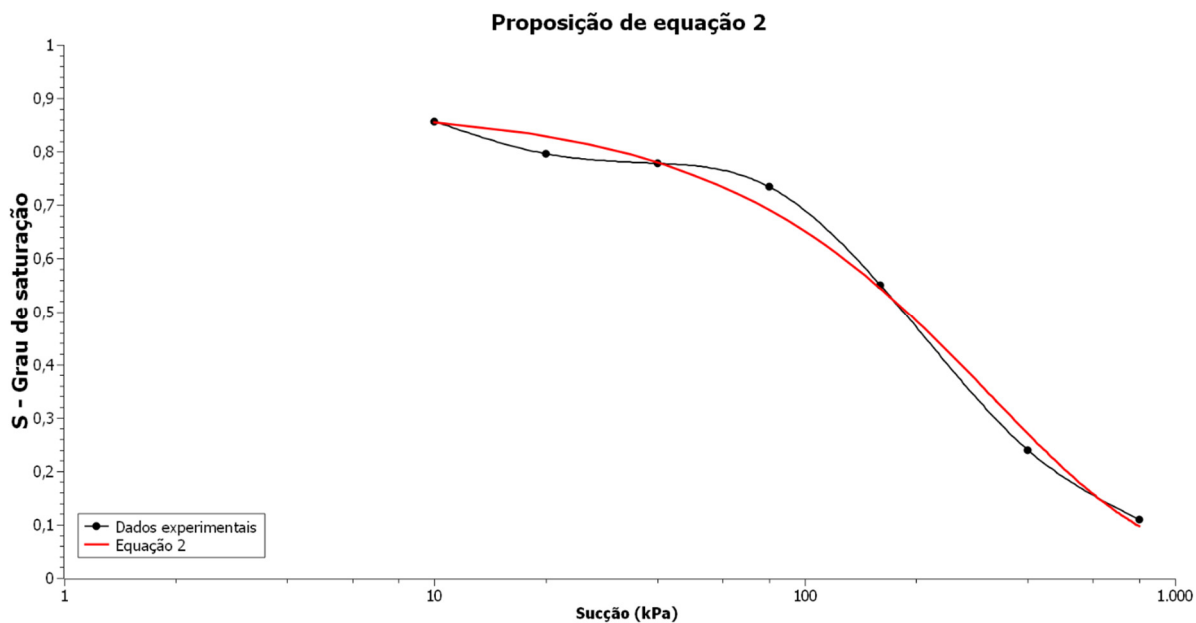


Gráfico 55 - Ajuste da equação 2 para o horizonte 2

Com parâmetros de $a=0,46$; $n=0,28$ e $m=0,01$; ajustou-se a Equação 2 ao horizonte 3, obtendo um r^2 de 0,924. Esse ajuste é mostrado no Gráfico 56.

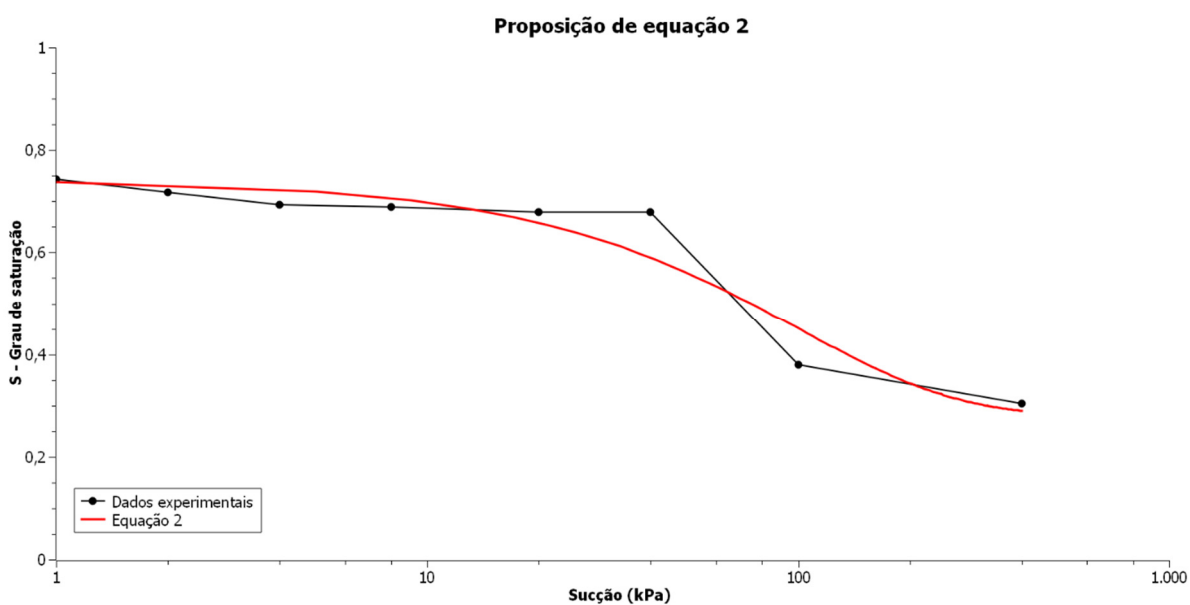


Gráfico 56 - Ajuste da equação 2 para o horizonte 3

Os resultados até aqui apresentados são resumidos através da Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros e resultados dos ajustes propostos

	Horizonte 1		Horizonte 2		Horizonte 3	
Equação 1	a=0,92		a=0,89		a=0,74	
	n=3.443,41	r ² =0,996	n=1.004,88	r ² =0,984	n=29,63	r ² =0,895
	m=214,68		m=111,79		m=2.095,15	
Equação 2	a=0,63		a=0,86		a=0,46	
	n=0,28	r ² =0,998	n=0,28	r ² =0,992	n=0,28	r ² =0,924
	m=0,00		m=0,00		m=0,01	

A verificação dos resultados de coeficiente de determinação demonstra que a Equação 2 apresentou uma maior proximidade em relação às equações propostas pela literatura, apresentando um ganho em relação à equação proposta por Fredlund e Xing (1994), principalmente no que tange ao horizonte 3.

A Equação 1, por sua vez se mostrou menos ajustável aos dados experimentais do que o melhor ajuste das equações propostas pela literatura. Porém, seu ajuste se posicionaria como segundo melhor para todos os horizontes e a vantagem em relação à equação proposta por Fredlund e Xing (1994) é a simplicidade dos parâmetros.

Torna-se válido comentar que ao comparar-se as duas equações propostas, é possível corroborar com a conclusão de Leong e Rahardjo (1997) que ressalta a maior versatilidade das equações com formato sigmoide para os ajustes às curvas características.

É importante também ressaltar que as equações propostas pelo presente trabalho obtiveram resultados bons e, no caso da Equação 2, superiores aos encontrados pelas equações já existentes, para as condições aqui apresentadas. Dessas condições, destaca-se a natureza local do solo, que demanda mais investigações a fim de constituir-se um referencial teórico para a Formação Guabirotuba. Também se exalta como condição a faixa de sucção analisada (até 1000 kPa), por limitações do compressor utilizado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Os solos estudados no presente trabalho foram coletados da região oeste de Curitiba e foram caracterizados e submetidos a ensaio visando obter as curvas características. Para os três solos foram traçadas as curvas características de secagem, sendo uma delas obtida experimentalmente e as outras duas retiradas da literatura, e a elas ajustadas curvas baseadas nas equações propostas pela literatura.

O objetivo principal é alcançado ao se determinar que, para os dados experimentais coletados, a equação proposta por Fredlund e Xing (1994) é a que melhor descreve a curva característica dos três horizontes estudados, e no intervalo de sucção matricial abrangido. Tal equação apresentou os melhores resultados para os três horizontes. Os dados aqui apresentados, portanto, corroboram com a hipótese inicialmente levantada. Atingir o objetivo principal, logicamente só foi possível após o cumprimento dos objetivos específicos, ou seja, após a determinação das curvas características, através de ensaios para o horizonte 1 e pela literatura para os horizontes 2 e 3, e dos ajustes a elas pertinentes.

Ao fim, são propostas duas equações para descrever as curvas características obtidas experimentalmente. Os resultados obtidos são relevantes, sendo, em um dos casos, mais próximos que os ajustes feitos utilizando a equação proposta por Fredlund e Xing (1994), para o solo local e para sucções inferiores a 1000 kPa.

5.1.1 Sobre o Ensaio

A conclusão do estudo permite a realização de algumas considerações no que tange ao ensaio realizado. Ao longo do trabalho foi demonstrada a importância da mecânica dos solos não saturados e, em consequência, da curva característica. Dada a importância do assunto, portanto, é válido iniciar esse comentário ressaltando que a realização do ensaio é justificada e recompensadora, mesmo diante das dificuldades.

A primeira dificuldade é o tempo. Trata-se de um ensaio relativamente demorado, levando meses desde a montagem até a última leitura. Essa vagareza é agravada pela incerteza da estabilização. Tendo registrado isso, tal dificuldade é mitigada pelo esforço necessário durante as leituras. Após a montagem é necessária

apenas uma leitura diária da altura de água e de alguma alteração volumétrica. Quando há a estabilização, é necessário um acréscimo na pressão aplicada. Portanto, o ensaio é demorado, mas após a montagem as leituras são fáceis e podem ser realizadas em paralelo com outras atividades.

Uma segunda dificuldade diz respeito aos equipamentos. O dispositivo é bastante específico e requer alguns cuidados no uso. A principal dificuldade encontrada no presente estudo, se tratando de equipamentos foi o compressor. Há necessidade de manter pressão durante todo o ensaio e o dispositivo SWC-150 regula a pressão aplicada na câmara, porém o compressor é regulado para ligar e desligar por um pressostato. O pressostato é um elemento sensível, sendo afetado pela temperatura e vibração do equipamento, requerendo manutenção e cuidado. Outro empecilho do compressor é a condensação de líquido em seu reservatório, que deve ser expurgado semanalmente, caso contrário, não armazenará pressão corretamente, levando a ser ativado e desativado repetidas vezes em pequenos intervalos de tempo.

Uma particularidade do ensaio é determinar quais pressões aplicar, visto que há interesse em detalhar bem os pontos notáveis, mas há necessidade de cobrir o maior intervalo possível no tempo disponível.

5.1.2 Sobre os Softwares utilizados

Todas as ferramentas computacionais se mostraram bastante úteis. Para os ajustes, o SciDavis se mostrou extremamente balanceado em questão de simplicidade e funcionalidade. De fácil aprendizagem, ele desempenhou de maneira satisfatória a função de plotar e ajustar os modelos aos dados experimentais.

Utilizado pelo presente trabalho de maneira secundária, o SigmaPlot possui aparentemente um rol de funcionalidades mais completo. Tal completude vem acompanhada de uma maior complexidade de operação. Tendo sido indispensável para o desenvolvimento da Equação 2.

Dados tais características, conclui-se que o SciDavis é mais adequado para análises simples e rápidas, enquanto o SigmaPlot é recomendado para trabalhos nos quais há necessidade de análises mais aprofundadas ou gráficos mais complexos, tridimensionais, por exemplo.

5.1.3 Sobre os Ajustes

Os ajustes utilizando modelos matemáticos deve ser feita de maneira bastante cuidadosa, visto que os resultados são bastante sensíveis. A entrada de dados utilizando as equações propostas pela literatura, ou pelo presente trabalho, deve ser feita com zelo, pois um erro pode ser imperceptível nos gráficos e coeficientes.

Outras questões importantes são o método de regressão e os parâmetros iniciais. Os coeficientes de correlação se mostram alterados por leves alterações das condições iniciais que, em último caso, podem resultar em um modelo em convergência. Por esse motivo, torna-se relevante a divulgação desses parâmetros de ajuste, pois eles podem ser utilizados como iniciais em outros trabalhos, tornando o estudo replicável.

Os ajustes também tornam notável que algumas equações se mostram mais ou menos condizentes com diferentes solos, mesmo quando estes são pertencentes de uma mesma formação. Deve-se sempre ressaltar que o solo é um sistema complexo e, como consequência, seu comportamento é regido por diferentes mecanismos. Sendo a curva característica fruto de uma interação complicada, ela é afetada por diferentes características dos solos e, portanto, descrevê-la através de uma única equação é, no mínimo, ambicioso. Há necessidade de balancear precisão e funcionalidade, propondo uma equação que seja precisa, mas que não contenha tantos parâmetros que a torne sem funcionalidade.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros que façam uso dos resultados aqui apresentados, ou relacionados ao tema, recomenda-se:

- Expandir o referencial disponível analisando outros solos componentes da Formação Guabirotuba;
- Obter a curva característica de solos semelhantes para pressões maiores;
- Obter a curva característica de umedecimento, permitindo uma quantificação dos efeitos da histerese para os solos locais;
- Ajustar os dados apresentados a curvas adicionais, corroborando com ou refutando as conclusões aqui apresentadas;

- Buscar aplicações práticas para os resultados obtidos. Em estabilidade de taludes, por exemplo;
- Ajustar as equações aqui propostas para diferentes solos e sucções.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

BAKER, Rafael; FRYDMAN, Sam. Unsaturated soil mechanics: Critical review of physical foundations. **Engineering Geology**, v. 106, p. 26-39, mar. 2009. Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/enggeo>. Acesso em 12 abr. 2016.

CAPUTO, Homero P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

DELAGE, Pierre; ROMERO, Enrique; TARANTINO, Alessandro. Recent development in the techniques of controlling and measuring suction in unsaturated soils. In: European Conference on Unsaturated Soils, 1, 2008, Durham. **Keynote Lecture Proceedings**. Durham, 2008. Disponível em < <https://arxiv.org/ftp/arxiv>>. Acesso em 01 jun. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 041**: Solos – Preparação de amostra para ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **ME 093**: Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

FELIPE, Rogério S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba Erosão – Movimentos Gravitacionais de Massa**. 1ª ed. Curitiba: Mineropar, 2011.

FEUERHARMEL, Carolina. **Aspectos do Comportamento não Saturado de dois Solos Coluvionares – Gasoduto Bolívia-Brasl**. 2003. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FEUERHARMEL, C. **Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da formação Serra Geral**. 2007. 330 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; MCDONALD, Alan T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

FREDLUND, Delwyn G. The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics. **The Fourth Spencer J. Buchanan Lecture**. Texas, nov. 1996.

FREDLUND, Delwyn G. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 132 n^o 3, p. 286-321, mar. 2006. Disponível em:< <http://ascelibrary.org/journal/jggef>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

FREDLUND, Delwyn G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31 n^o 3, p. 521-532, mar. 1994. Disponível em: < <http://www.nrcresearchpress.com/journal/cgj>>. Acesso em 12 abr. 2016.

FREITAS NETO, Osvaldo de. **Resistência ao cisalhamento de um solo não saturado com medida direta de sucção**. 150p. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GALLIPOLI, D.; WHEELER, S.J.; KARSTUNEN, M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil. **Geotechnique**, v. 53, n^o 1, p 105-112, 2003.

GCTS Testing Systems. **SWC-150 User's Guide & Reference Manual**. L.L.C. 2007.

GEORGETTI, G. B. **Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante (CW)**. 108 p. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GIL, Antonio C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5^a ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GITIRANA JR, Gilson F.N.; FREDLUND, Delwyn, G. Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130 n^o 2, p. 209-212, fev. 2004. Disponível em:< <http://ascelibrary.org/journal/jggef>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

HILLEL, Daniel. **Environmental Soil Physics**. 2^a ed. San Diego: Elsevier Academic Press, 1998.

HILLEL, Daniel. **Introduction to Environmental Soil Physics**. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004.

KÉZDI, Árpád. **Handbook of Soil Mechanics**. Vol. 1. New York, Elsevier, 1974.

KRAHN, J; FREDLUND, Delwyn G. On Total, Matric and Osmotic Suction. **Journal of Soil Science**, v. 114 n^o 5, p. 339-348, set. 1972. Disponível em < <https://www.soilvision.com/subdomains/unsaturatedsoil.com/Docs/Research%20Papers/1972/Journal%20Papers/On%20total,%20matric%20and%20osmotic%20suction.pdf>>. Acesso em 31 mai. 2016.

LEONG E. C.; RAHARDJO Harianto Review of Soil-Water Characteristic Curve Equations. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123 n^o

12, p. 1106-1117, dec. 1997. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/journal/jggefek>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

LAMBE, Thomas W.; WHITMAN, Robert V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1969.

LU, Ning; LIKOS; William J. **Unsaturated Soil Mechanics**. John Willey & Sons. 2004.

MARINHO, Fernando Antônio Medeiros; **Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados**. 2005. 200f. Texto (Concurso de Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MATSUBARA, Gustavo Y. **Estudo da Curva Característica de um Horizonte do Perfil Geotécnico da Formação Guabirota**. 2015. 64 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

MINEROPAR, Minerais do Paraná. **Atlas Comentado da Geologia e dos Recursos Minerais do Estado do Paraná**. Curitiba: Mineropar, 2001.

NETTO, José M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, Miguel; ARAÚJO, Roberto de; ITO, Acácio E. **Manual de Hidráulica**. 8ª ed. São Paulo: Blucher, 1989.

OLIVEIRA JR., Jairo Calderari de; SOUZA, Luiz C. P.; MELO, Vander F.; ROCHA, Hélio O. Variabilidade Espacial de Atributos Mineralógicos de Solos da Formação Guabirota, Curitiba (PR). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 35, p.1481-1490, mai. 2011. Disponível em: <http://www.sbc.org.br/revista/a-revista/> Acesso em: 26 abr. 2016.

ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3ª ed. 2007. Disponível em <<http://www.terratek.com.br>>. Acesso em: 27/04/2016.

PINTO, Carlos S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POPPER, Karl R. **A Lógica da Pesquisa Científica**. São Paulo: Pensamento-Cultrix, 1972

RICHARDS, Lorenzo A. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. **Soil Science**, v. 51 nº 5, p. 377-386, mai. 1941. Disponível em <<http://www.ars.usda.gov/main/main.htm>>. Acesso em 01 jun. 2016.

ROSA, André. **Determinação da Curva característica de um Horizonte do Perfil Geotécnico da Formação Guabirota**. 2016. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SALAMUNI, Eduardo. **Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba**. 1998. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998.

SALAMUNI, Eduardo; STELLFELD, Maria C. Banco de dados geológicos georeferenciados da bacia sedimentar de Curitiba (PR) com base de sistema de informação geográfica (SIG). **Boletim Paranaense de Geociências**, nº 49, p. 21-31, 2001. Disponível em <<https://ihgb.org.br/pesquisa/hemeroteca/periodicos/item/100491-boletim-paranaense-de-geoci%C3%AAs.html>>. Acesso em 12 abr. 2016.

SHENG, DaiChao; ZHANG, Sheng; YU, ZhiWu. Unanswered questions in unsaturated soil mechanics. **Science China Technological Sciences**, v. 56 nº 5, p. 1257-1272, mai. 2013. Disponível em: <<http://tech.scichina.com:8082/sciEe/EN/volumn/home.shtml>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

SREEDEEP, S.; SINGH, Devandra N. Critical Review of the Methodologies Employed for Suction Measurement. **International Journauk of Geomechanics**, v. 11 nº 2, abr. 2011. Disponível em:< <http://ascelibrary.org/journal/ijgnai>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

TERZAGHI, Karl. **Theoretical Soil Mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1943.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3ª ed. New York: John Wiley and Sons, 1996.

TINJUM, James M.; BENSON, Craig H.; BLOTZ, Liza R. Soil-Water Characteristic Curves for Compacted Clays. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123 nº 11, p. 1060-1069, nov. 1997. Disponível em:< <http://ascelibrary.org/journal/jggef>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

VANAPALLI, Sai K.; FREDLUND, Delwyn G.; PUF AHL, Dennis E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. **Géotechnique**, v. 49 nº 2, p. 143-159, 1999. Disponível em: <http://www.icevirtuallibrary.com/toc/jgeot/current>. Acesso em 12 abr. 2016.

WILLIAMS, P.J. **The surface of the Earth: An Introduction to Geotechnical Science**. Longman: New York, 1982.