

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
DESIRÊ CORAÇA POSSA**

**DETERMINAÇÃO DA CURVA DE SUCÇÃO DO SOLO DE CASCAVEL – PR
PELO MÉTODO DO PAPEL FILTRO**

CASCAVEL - PR

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
DESIRÊ CORAÇA POSSA

DETERMINAÇÃO DA CURVA DE SUCÇÃO DO SOLO DE CASCAVEL – PR
PELO MÉTODO DO PAPEL FILTRO

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Professor Orientador: Eng. Civil, Mestre Maycon André de Almeida

CASCAVEL - PR

2017

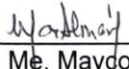
CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG

DESIRÊ CORAÇA POSSA

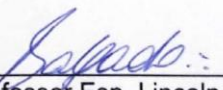
**DETERMINAÇÃO DA CURVA DE SUÇÃO DO SOLO DE CASCAVEL – PR PELO
MÉTODO DO PAPEL FILTRO**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor Engenheiro Civil, Me. Maycon André de Almeida.

BANCA EXAMINADORA


Orientador Prof^a. Me. Maycon André de Almeida
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil


Professor Me. Guilherme Irineu Venson
UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Engenheiro Civil


Professor Esp. Lincoln Salgado
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil

Cascavel, 16 de novembro de 2017.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família e amigos. Com vocês, as pausas entre um parágrafo e outro de produção melhoram tudo o que tenho produzido na vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Carla e Degilmar, exemplos de dignidade e amor, todas as demonstrações de gratidão serão mera retribuição do inesgotável carinho com o qual sempre me cercaram.

Agradeço as minhas irmãs, Débora e Denise, riquezas que tenho em minha vida, me apoiando nos momentos de fraqueza. E, também por terem concedido o seu tempo para me auxiliar na elaboração dos ensaios em laboratório.

A toda minha família, principalmente a minha avó Eugênia, que nos dias tristes orou, nos alegres agradeceu e assim permanecerá.

Aos meus amigos, Allisson, Douglas, Felipe, Gustavo, Heloísa, Luiz Henrique, Lukas, Marcos e Natália, por compartilharem comigo dúvidas, risadas e momentos inesquecíveis.

Também agradeço a empresa Solitec pela disponibilização dos funcionários que realizaram a coleta das amostras em profundidade.

A meu professor orientador Me. Maycon André de Almeida, pela paciência, cobrança e por aceitar me orientar no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, aos funcionários do laboratório de Mecânica dos Solos, especialmente a Jéssica, pelo apoio, paciência, e momentos agradáveis que passamos nos últimos meses.

EPÍGRAFE

“Aonde devemos ir... nós que peregrinamos por esse deserto à procura do melhor de nós?”

Mad Max: Estrada da Fúria

RESUMO

Dentro da mecânica dos solos não saturados, objeto de intenso estudo atualmente, existe o conceito da sucção, que é descrita como a quantidade necessária de energia que deve-se contrapor a força de retenção de água, para liberar a água adsorvida do solo. Existem inúmeros ensaios para a obtenção da curva de sucção do solo e um que apresenta ser eficiente, de baixo custo e rápido é o método do papel filtro. Este estudo tem como objetivo determinar a curva de sucção ao longo da profundidade do solo de Cascavel -PR. As amostras de solo foram retiradas do Campo Experimental de Engenharia da FAG, coletando-se um total de 33 amostras até o quinto metro de solo, realizou-se a execução do método do papel filtro para teores de umidade diferente e utilizando o papel filtro Whatman nº 42. Obteve-se com isso os teores de umidade das amostras e, aplicando em uma curva de calibração, os valores de sucção respectivos. Gerou-se curvas características com valores de sucção inferiores a 10000 kPa e apresentando medidas baixas a partir de teores de umidade de 30%. Pelo fato de utilizar-se poucas amostras por cota, não se obteve uma curva completa, mas os dados encontrados para o primeiro, quarto e quinto metro de solo são satisfatórios. As curvas do segundo e do terceiro metro apresentaram valores errôneos de sucção, devendo-se ter cuidado em sua utilização.

Palavras-chave: curva de sucção, solos não saturados, papel filtro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica da equação de Coulomb.....	17
Figura 2 - Elemento de solo não saturado com a fase gasosa contínua.....	18
Figura 3 - (a) poro-pressão positiva, (b) poro-pressão negativa (sucção).	19
Figura 4 - Distribuição de poro-pressão.	20
Figura 5 - Sistema ilustrativo dos componentes de sucção do solo.	21
Figura 6 - Curvas características de sucção em função da granulometria.....	24
Figura 7 - Principais pontos da curva de sucção.	24
Figura 8 - Histerese formada pelos processos de umedecimento e secagem.	26
Figura 9 - Comparação entre várias técnicas de medição de sucção.....	27
Figura 10 - Método do papel filtro: (a) técnica em contato; (b) técnica sem contato.	28
Figura 11 - Configuração utilizada na técnica sem contato do papel filtro.....	29
Figura 12 – Localização do CEEF indicada na marcação do retângulo.....	30
Figura 13 – Curvas granulométricas do primeiro ao terceiro metro de solo.....	31
Figura 14 – Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Consistência.	32
Figura 15 – Cava onde foram retiradas as amostras do primeiro metro de solo.	33
Figura 16 – Coletadas amostras do primeiro metro de solo.	34
Figura 17 – Coleta das amostras de solo nas cotas de -2, -3, -4 e -5 m.....	34
Figura 18 - Amostras de solo das cotas (a) -2,(b) -3, (c) -4 e (d) -5m.....	35
Figura 19 – Papel filtro Whatman nº 42.....	35
Figura 20 – Papéis filtros após alteração de seu tamanho de 110 mm para 60 mm.....	36
Figura 21 – Camadas feitas nas amostras para vedação.....	37
Figura 22 – Caixa térmica de isopor com as amostras.	37
Figura 23 – Pesagem das amostras de solo e papéis filtros.....	38
Figura 24 – Curva característica de sucção de Cascavel – PR na cota de -1 metro.	42
Figura 25 – Curva característica de sucção de Cascavel – PR na cota de -2 metros.....	42
Figura 26 - Curva característica de sucção de Cascavel – PR na cota de -3 metros.	43
Figura 27 – Curva característica de sucção de Cascavel – PR na cota de -4 metros.....	43
Figura 28 – Curva característica de sucção de Cascavel – PR na cota de -5 metros.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Técnicas de medição de sucção.	27
Tabela 2 - Tempo de equilíbrio sugerido para medida de sucção total.	29
Tabela 3 – Relação entre a cota e o número de amostras.	33
Tabela 4 – Dados obtidos em laboratório das amostras de solo.	40
Tabela 5 - Dados obtidos em laboratório dos papéis filtros centrais das amostras.	41

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação de Coulomb	16
Equação 2 -Tensão normal efetiva	19
Equação 3 - Sucção total	21
Equação 4 - Sucção mátrica	22
Equação 5 - Sucção osmótica	22
Equação 6 -Curva de calibração do papel filtro para $w \leq 47\%$	38
Equação 7 – Curva de calibração do papel filtro para $w > 47\%$	38

SUMÁRIO

CAPITULO 1	11
1.1 INTRODUÇÃO	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.3 JUSTIFICATIVA	12
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE	13
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	13
CAPITULO 2	15
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1.1 Mecânica dos solos	15
2.1.1.1 Solos lateríticos	16
2.1.1.2 Solos colapsíveis	16
2.1.1.3 Resistência ao cisalhamento	16
2.1.2 Solos não saturados	17
2.1.3 Sucção	20
2.1.3.1 Sucção mátrica	22
2.1.3.2 Sucção osmótica	22
2.1.4 Curva característica de sucção do solo	23
2.1.4.1 Fatores que influenciam a curva característica	25
2.1.4.2 Métodos para obtenção da curva de sucção	26
2.1.5 Método do papel filtro	28
CAPITULO 3	30
3.1 METODOLOGIA	30
3.1.1 Caracterização do solo do CEEF	30
3.1.2 Coleta de solo e confecção de amostras	32
3.1.2.1 Amostras superficiais	33
3.1.2.2 Amostras em profundidade	34
3.1.3 Método do papel filtro	35
3.1.4 Análise dos dados	39
CAPITULO 4	40
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40

4.1.1 Teor de umidade das amostras de solo	40
4.1.2 Teor de umidade e sucção mátrica do papel filtro.....	40
4.1.3 Curva característica de sucção do solo	42
CAPITULO 5.....	46
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
CAPITULO 6.....	48
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
REFERÊNCIAS	49

CAPITULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Até a década de 40 as teorias existentes sobre mecânica dos solos eram desenvolvidas considerando que o solo se encontrava em estado saturado. Porém, na prática, não é sempre que se encontra esta situação e quando se trata de solos não saturados as teorias não podem ser aplicadas da mesma maneira (LEE e WRAY, 1995 *apud* BONDER, 2008). Com isso, surge a mecânica dos solos não saturados, objeto de intensos estudos atualmente.

Um dos conceitos da mecânica dos solos não saturados é a sucção, algo novo e com poucas pesquisas no Brasil, sendo encontrado somente em bibliografias estrangeiras e no Brasil através de dissertações ou teses de mestrados e doutorados. Segundo Marinho (1997), a sucção do solo pode ser descrita como a quantidade necessária de energia que deve-se contrapor a força de retenção de água para liberar a água adsorvida do solo.

A sucção está diretamente ligada ao grau de saturação do solo, podendo aumentar ou diminuir conforme as condições climáticas. Por isso, para se analisar as variações de sucção de um solo, primeiramente, determina sua curva de sucção, podendo esta ser definida por vários ensaios laboratoriais.

O ensaio mais tradicional e conhecido para a determinação da curva de sucção é a câmara de pressão de Richards, por ser um procedimento de elevado custo e muito lento, busca-se recorrentemente métodos alternativos ao de Richards. Um dos métodos encontrados é o método do papel filtro, que segundo Lucas *et al.* (2011) apresenta ter variações de resultados inferiores a 10% quando comparado ao método de Richards.

O presente estudo buscou abordagens para facilitar pesquisa de campo, para determinar a curva de sucção ao longo da profundidade do solo de Cascavel, cidade do interior do Paraná, pelo método do papel filtro.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Determinar a curva de sucção ao longo da profundidade do solo de Cascavel – PR pelo método do papel filtro.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar a curva característica de sucção do solo de Cascavel – PR pelo método do papel filtro;
- Comparar resultados encontrados com outras bibliografias.

1.3 JUSTIFICATIVA

O mau reconhecimento de um solo pode acarretar sérios danos patológicos no decorrer da vida útil da construção a ser executada sobre o mesmo e, conseqüentemente, financeiros.

O Brasil é predominantemente formado por solos tropicais, e alguns dos principais pesquisadores notaram que, as regiões tropicais apresentam características bem diferentes quando se comparado aos solos das regiões de clima temperado, cujos conceitos tradicionais de mecânica dos solos foram desenvolvidos para o mesmo (WOLLE, 2004 *apud* BONDER, 2008). Sendo assim, consideram-se inaplicáveis as teorias conhecidas até então, pois, afetam consideravelmente as características particulares de cada solo.

Justifica-se este trabalho acadêmico como uma pesquisa científica para ajudar a entender as características e propriedades do solo de Cascavel, Paraná, visando melhorar e auxiliar no desenvolvimento de projetos de fundações e futuras pesquisas.

Também, serve como um complemento na área de pesquisa de mecânica dos solos não saturados, já que o mesmo tem uma carência enorme de bibliografias nacionais e é um assunto muito pesquisado nos tempos atuais.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Qual a curva característica de sucção ao longo da profundidade do solo da cidade de Cascavel, localizada no oeste do estado do Paraná?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

O conceito de sucção é um conceito estudado há pouco tempo, tendo em vista que as primeiras pesquisas desenvolvidas na área de geotecnia começaram no início do século XVIII (DAS, 2007), na mecânica dos solos e com poucos estudos realizados. Com a curva de sucção é possível se obter parâmetros importantes para o entendimento do solo não saturado, tais como: o coeficiente de permeabilidade, resistência ao cisalhamento, variação do volume, entre outros. Desses parâmetros, o mais importante para a Engenharia Civil é a resistência ao cisalhamento, utilizado para examinar os problemas de estabilidade do solo, tais como: capacidade de carga, estabilidade de taludes e pressão lateral em estruturas de contenção de terra.

Este trabalho acadêmico obteve a curva característica de sucção do solo de Cascavel até o seu quinto metro, possuindo uma sucção inferior à 100 kPa a partir de um teor de umidade de 90%, apresentando uma curva suave (com uma angulação próxima a 45°) e valores de sucção acima de 10000 kPa com teores de umidade inferiores à 40% (FREDLUND e XING, 1994).

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa foi limitada a análise quantitativa da curva característica de sucção de amostras retiradas ao longo da profundidade do solo de Cascavel, Paraná através de ensaios laboratoriais.

Os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos, do Centro Universitário Assis Gurgacz, para determinar a curva de sucção pelo método do papel filtro. Utilizou-se de 33 pares amostras indeformadas por metro retiradas nas cotas de -1 m, -2 m, -3

m, -4 m e -5 m, sendo 7 pares para o primeiro, segundo e terceiro metro e 6 para o quarto e quinto metro de solo.

CAPITULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo, serão abordados conceitos importantes para facilitar o entendimento e a importância da curva característica de sucção de um solo.

2.1.1 Mecânica dos solos

Segundo Terzaghi (1943), a mecânica dos solos pode ser definida como a utilização das leis de mecânica e hidráulica em questões de engenharia relacionada ao solo, ou seja, é o estudo das características físicas e propriedades mecânicas do solo quando tensões são aplicadas no mesmo. Ainda, Caputo (1988) complementa que o propósito da mecânica dos solos é substituir os métodos empíricos, utilizados antigamente na engenharia de fundações e obras de terra, pelos métodos científicos para uma melhor análise do problema.

Os problemas que podem ser encontrados no projeto e execução das fundações e obras de terra diferem-se em dois tipos: os que fazem relação a deformações do solo e os que consideram a ruptura de uma massa de solo. O primeiro refere-se ao estudo dos recalques das obras e o segundo abrange questões sobre a capacidade de carga do solo, estabilidade de maciços terrosos e empuxos de terra (CAPUTO, 1988).

Segundo Caputo (1988), o solo é o resultado do intemperismo das rochas por desintegração mecânica (através de agentes como água, temperatura, vegetação e vento) ou decomposição química (que é uma transformação química ou mineralógica das rochas de origem), esses processos atuam ao mesmo tempo na maioria dos casos, podendo um ter predominância sobre o outro.

Os solos podem ser classificados conforme sua origem, sendo eles o solo residual, solo sedimentar ou solo de formação orgânica (CAPUTO, 1988). Os solos residuais não são transportados do seu local de origem, sendo assim, permanecem no mesmo, apresentando uma mudança gradativa do solo até a rocha. Dentro desta categoria, destacam-se os solos lateríticos, os expansivos e os colapsáveis.

Os solos sedimentares são os que foram transportados do seu local de origem podendo ser pela água (aluvionares), pelo vento (eólicos), pela ação da gravidade

(coluvionares) e pelas geleiras (glaciares), podendo variar a sua textura dependendo do tipo de agente transportador e com a distância do transporte. E, os solos de formação orgânica são os de origem necessariamente orgânica, podendo ser de natureza animal ou vegetal (CAPUTO, 1988).

2.1.1.1 Solos lateríticos

Segundo Pinto (2006), os solos lateríticos são solos intemperizados típicos de regiões com clima quente, regime de chuvas moderadas e intensas. Os solos lateríticos são formados principalmente por minerais cauliníticos e são ricos em ferro e alumínio que se encontram normalmente recobrimdo as partículas de argila, dando uma cor avermelhada ao solo.

Encontram-se na natureza, normalmente, não saturados e com um alto índice de vazios, devido á essas características apresenta uma baixa capacidade de suporte. Mas, quando compactados sua capacidade de suporte aumenta, caso o teor de umidade diminua o solo apresenta contração, mas não expande na presença de água (PINTO, 2006).

2.1.1.2 Solos colapsíveis

Os solos colapsíveis são solos não saturados que apresentam uma queda repentina em sua resistência, sem que a tensão total que está submetida seja variada, quando sua umidade aumenta (PINTO, 2006).

Segundo Pinto (2006), o colapso é causado pela destruição dos meniscos capilares ou a um amolecimento do agente cimentante que mantém as partículas e agregações de partículas unidas. Este fenômeno está ligado ao da perda de resistência dos solos não saturados.

2.1.1.3 Resistência ao cisalhamento

Leonards (1962, *apud* CAPUTO, 1988) define a resistência ao cisalhamento como “a tensão de cisalhamento sobre o plano de ruptura, na ruptura”. Segundo Caputo (1988), a resistência ao cisalhamento é importante para determinar a quantidade de carga que um solo suporta e quanto ele mantém sua estabilidade.

Pela Equação 1 de Coulomb, nota-se que a resistência ao cisalhamento é composta pela coesão e o atrito entre partículas.

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

Onde:

τ = Resistência ao cisalhamento;

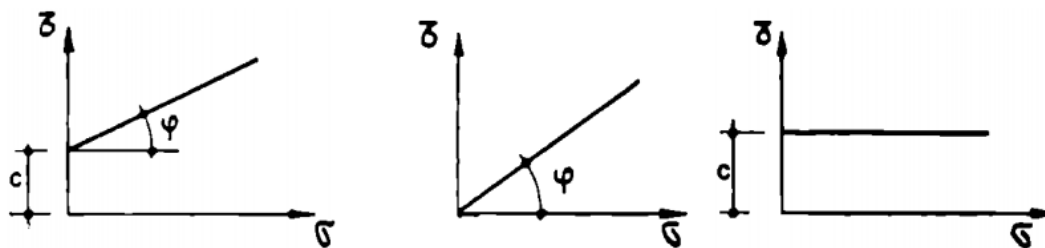
σ = Tensão normal ao plano de cisalhamento;

c = Coesão do solo;

φ = Ângulo de atrito interno do solo.

A equação é apresentada de maneira gráfica pela envoltória de resistência, representada por uma reta, utilizando dos valores da coesão do solo (c) e do ângulo de atrito interno (φ) para traçar a mesma, conforme Figura 1.

Figura 1 – Representação gráfica da equação de Coulomb.



Fonte: Caputo, 1988.

Segundo Caputo (1988), o atrito interno de um solo não é apenas o atrito físico entre suas partículas, mas também o atrito fictício dado pela interação entre as partículas. Já a coesão do solo é dividida entre a coesão aparente e a coesão verdadeira:

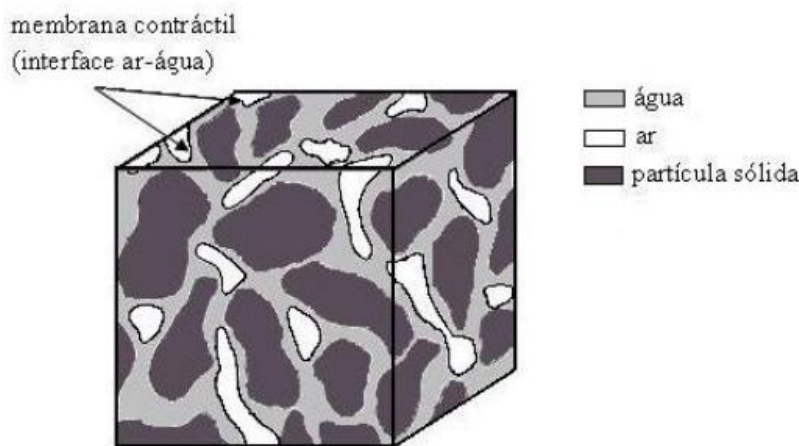
- Coesão aparente: coesão temporária criada devido à adição de água no solo, resultante da pressão capilar;
- Coesão verdadeira: devido a cimentações existente entre as partículas, facilmente encontrado em argilas e em solos tropicais.

2.1.2 Solos não saturados

Os estudos envolvendo solos não saturados são de suma importância para a engenharia, tendo em vista que existem diversas obras de engenharia sobre o assunto, como aterros, barragens e taludes (FREDLUND E RAHARDJO, 1993 *apud* DELGADO, 2002). A mecânica dos solos clássica se baseia em análises feitas sobre o comportamento de solos sedimentares, mais propenso em regiões de clima temperado. Além disso, considera-se que o solo é saturado, constituindo-se um sistema bifásico formado por partículas sólidas e água.

Já o solo não saturado é composto por um sistema trifásico, formado por fases sólidas (partículas de minerais), líquidas (água) e gasosas (ar). Alguns autores, como Fredlund e Morgenstern (1977), postulam que deve-se considerar uma quarta fase, composta pela interface ar e água, conhecida como membrana contrátil, conforme Figura 2.

Figura 2 - Elemento de solo não saturado com a fase gasosa contínua.



Fonte: Lopes, 2006.

Uma característica importante da membrana contrátil é a sua capacidade de poder exercer uma tensão de tração nos materiais adjacentes, chamada como tensão superficial. Devido esta tensão, a membrana contrátil tende a se comportar como uma membrana elástica, se a fase gasosa for contínua, esta membrana interage com as partículas sólidas, influenciando no comportamento mecânico do solo.

Se houver a existência de líquido intersticial ou bolhas de ar presas ao solo, assume-se que o sistema multifásico não é mais um meio contínuo podendo ser tratado como um sistema bifásico, desde que seja considerado que um fluido compressível preencha os poros (FREDLUND E RAHARDJO, 1993 *apud* DELGADO, 2002). O conhecimento dessas fases

na estrutura do solo é relevante para o entendimento do comportamento do mesmo, sendo em termos de resistência, variação volumétrica, condutividade hidráulica, entre outros.

Em solos saturados considera-se apenas uma variável para descrever o estado de tensão e definir o comportamento mecânico dos mesmos, chamada por tensão normal efetiva (σ') (TERZAGHI, 1943). O princípio das tensões efetivas para solos saturados foi confirmado por diversos autores (Rendulic, 1936; Bishop e Eldin, 1950; Skempton, 1953). A Equação 2 mostra a relação entre as tensões atuantes no solo e a variação de tensão para solos saturados.

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad (2)$$

Onde:

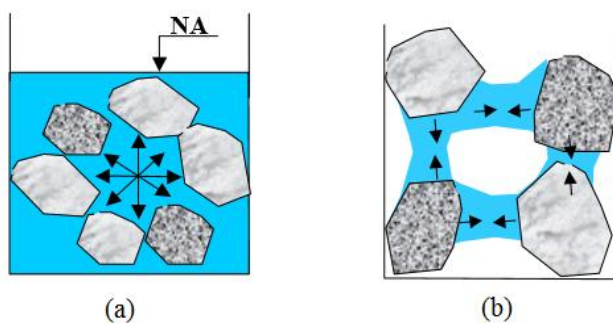
σ' = Tensão normal efetiva;

σ = Tensão normal total;

μ = Poro-pressão atuante no solo.

Mas, quando se trata de solos não saturados, essa teoria não pode ser aplicada pelo fato de surgir uma pressão negativa nos poros do solo, denominada sucção (Figura 3). Nestas condições o solo aparenta ter uma coesão que pode ser alterada em virtude da variação de umidade.

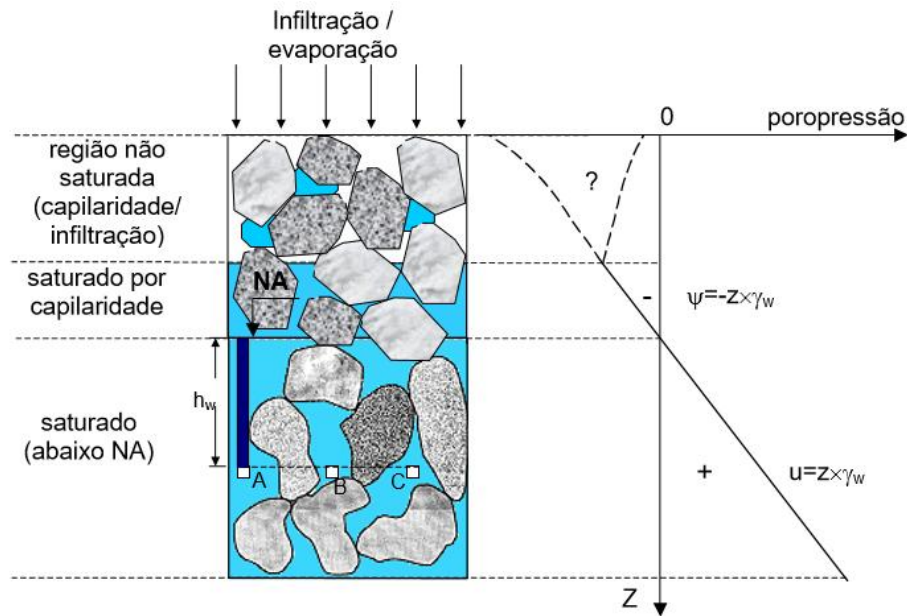
Figura 3- (a) poro-pressão positiva, (b) poro-pressão negativa (sucção).



Fonte: Material de mecânica dos solos – UERJ.

O estado de não saturação do solo ocorre acima da camada do lençol freático, nesta região a umidade pode ocorrer por meios de infiltração da água de chuva ou por ascensão através de vazios, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4- Distribuição de poro-pressão.



Fonte: Material de mecânica dos solos – UERJ.

2.1.3 Sucção

A pressão negativa, gerada pela sucção, é um fator de grande importância no comportamento mecânico dos solos não saturados pela alteração que o mesmo provoca na resistência ao cisalhamento dos solos. O entendimento sobre a sucção no solo, segundo Fredlund e Rahardjo (1993, *apud* MENEZES, 2013), começou a ser desenvolvido no início da década de 1900 e continua sendo estudado por muitos pesquisadores até hoje.

Segundo Marinho (1997), é possível descrever a sucção como a pressão isotrópica imposta nos poros de água de um solo não saturado para a possível absorção de mais água, ou ainda definida como, a energia necessária para remover as moléculas de água dos poros de um material. Sendo assim, a sucção também pode ser definida como a tensão utilizada para estimar a capacidade do solo de reter água.

Em geral, a sucção do solo é dividida em duas componentes: a matricial e a osmótica. A componente matricial é a pressão negativa criada no solo devido forças capilares e de adsorção e está relacionada ao tipo de partículas e seu arranjo estrutural, já a componente

osmótica é relacionada à concentração de sais na água do solo. A sucção total é dada pela soma desses dois componentes, dada pela Equação 3.

$$S_t = S_m + S_{osm} \quad (3)$$

Onde:

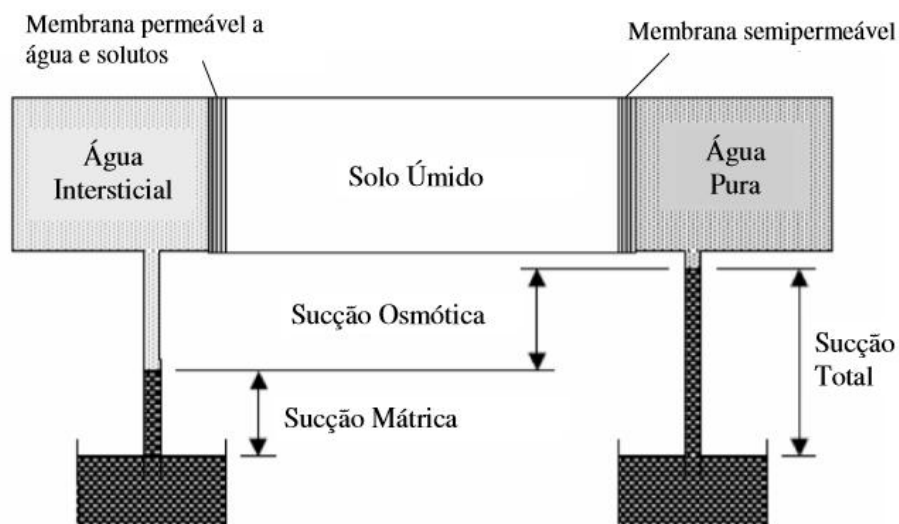
S_t = Sucção total;

S_m = Sucção mátrica;

S_{osm} = Sucção osmótica.

Marinho (1994) explicou o significado destes componentes utilizando o conceito de uma membrana semipermeável conforme Figura 5.

Figura 5- Sistema ilustrativo dos componentes de sucção do solo.



Fonte: Marinho, 1994.

A sucção total é a diferença de pressão através de uma membrana semipermeável que separa a água pura do sistema constituído pelo solo e água intersticial. A sucção mátrica é a diferença de pressão através de uma membrana que separa o sistema solo-água intersticial de uma solução idêntica à da água intersticial, mas sem o solo (MARINHO, 1994). A membrana é permeável à solução, mas não as partículas de solo ou ar. A sucção osmótica pode ser encontrada subtraindo da sucção total a sucção mátrica.

Embora a sucção tenha uma grande influência no comportamento dos solos não saturados, este fator ainda é pouco utilizado em projetos de engenharia. Houston *et al.* (1994) cita duas razões pelas quais as medidas de sucção podem não ser inseridas nas análises, a primeira está relacionada às poucas publicações existentes sobre correlações entre essa variável e as propriedades básicas dos solos e a segunda refere-se a falta de um método padronizado de baixo custo para determinação da sucção.

2.1.3.1 Sucção mátrica

A sucção mátrica é a pressão negativa gerada na água do solo devido aos efeitos de capilaridade e forças de adsorção. O efeito da capilaridade ocorre pelo fenômeno da ascensão capilar, gerando uma pressão negativa na água que preenche os meniscos e as forças de adsorção interferem na componente mátrica quando o solo possui partículas finas, como as argilas. Assim, a sucção mátrica pode ser representada pela Equação 4 (de CAMPOS *et al.*, 1992).

$$S_m = S_c + S_{ad} \quad (4)$$

Onde:

S_c = Sucção devido à capilaridade;

S_{ad} = Sucção causada pela adsorção.

A sucção mátrica corresponde à afinidade do solo com a água na ausência de sais na mesma (HOUSTON *et al.*, 1994). Quando não há a existência de sais no fluido do solo, a sucção osmótica é nula e a sucção mátrica é igual à sucção total. Quando um solo não possui nenhum tipo de contaminação, é possível definir os parâmetros de sucção apenas pela sucção mátrica.

2.1.3.2 Sucção osmótica

A sucção osmótica é definida por Ridley (1995) como a tensão adicional necessária para retirar uma molécula de água, devida à presença de sais dissolvidos na água. A sucção osmótica é expressa pela Equação 5 (YONG e WARKENTIN, 1965 *apud* WIEBE, 1996).

$$S_{osm} = n.R.T.C \quad (5)$$

Onde:

n = Número de moléculas por moles do sal;

R = Constante universal dos gases;

T = Temperatura absoluta (K);

C = Concentração de solutos.

A importância da sucção osmótica na mecânica dos solos parece estar mais relacionada aos solos dispersivos ou expansivos, embora admita-se que o valor da sucção total é quase integralmente ao valor da sucção matricial (FREDLUND e RAHARDJO, 1993 *apud* SOTO, 2004). Sendo assim, na prática é considerado que a sucção total é igual a sucção matricial.

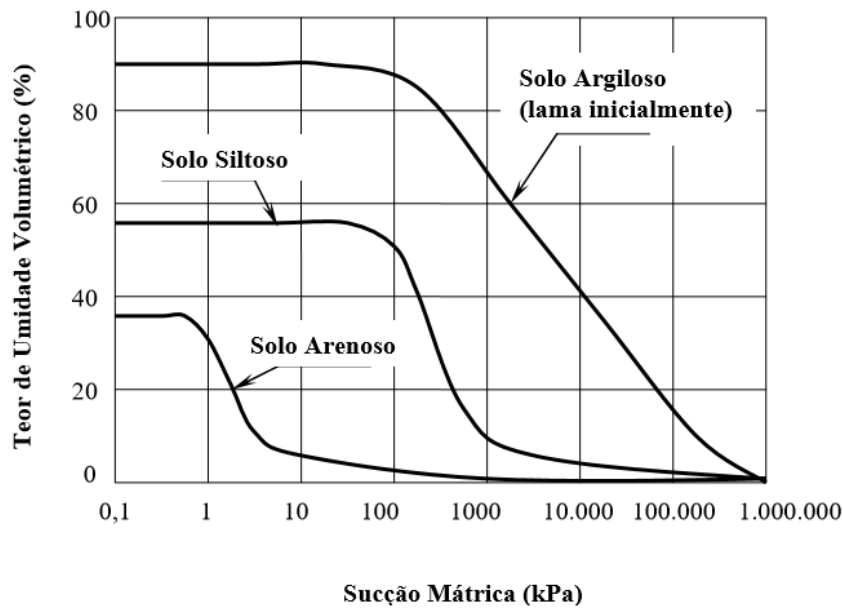
2.1.4 Curva característica de sucção do solo

O prévio conhecimento da sucção e de sua variação com o teor de umidade causado pela evaporação é de suma importância para uma análise dos resíduos de qualidade. A curva característica de sucção é a expressão gráfica da relação entre o teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) do solo e a sucção, que também pode ser representada em termos do grau de saturação do solo (MARINHO, 1994). Em relação à sucção, a curva pode ser em função da sucção mátrica ou da sucção total.

Segundo Soto (2004), a natureza da relação entre sucção e teor de umidade é diretamente associada à granulometria e mineralogia do solo a ser estudado, sendo fatores determinantes na posição relativa, forma e inclinação da curva. Solos arenosos apresentam perda brusca de umidade quando a sucção ultrapassa um determinado valor e solos argilosos apresentam curvas mais suaves.

Na Figura 6 é possível ver os formatos característicos das curvas de sucção em função da granulometria do solo.

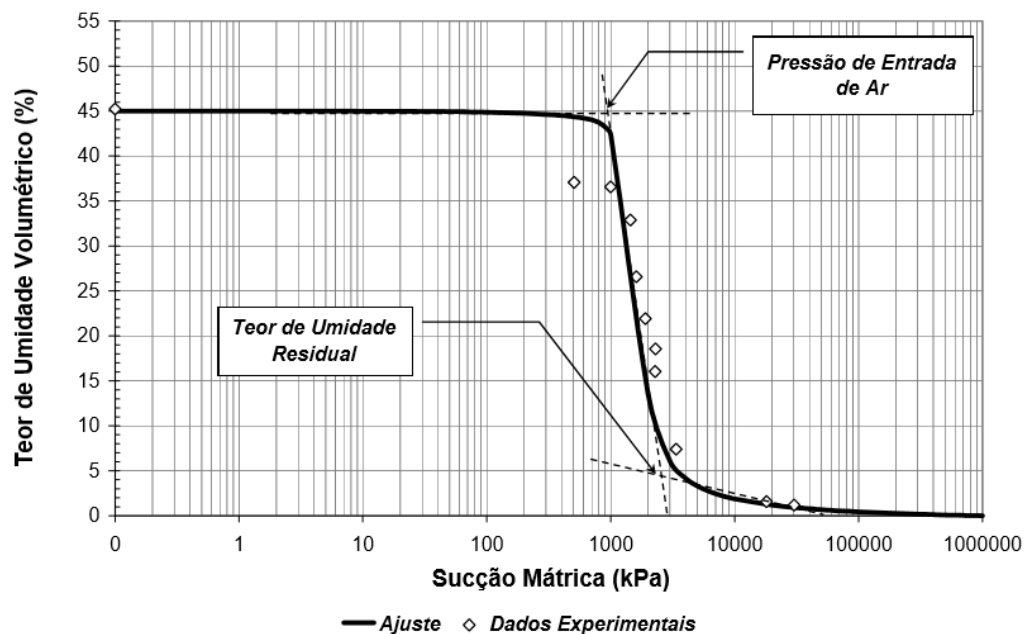
Figura 6- Curvas características de sucção em função da granulometria.



Fonte: adaptado de Fredlund e Xing, 1994.

Segundo Fredlund e Xing (1994), duas características importantes podem ser obtidas com a curva que é o valor da pressão de entrada de ar e o teor de umidade residual, apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Principais pontos da curva de sucção.



Fonte: adaptado de Fredlund e Xing, 1994.

Segundo Gerscovich (2001), quando um valor baixo de sucção é aplicado a um solo saturado, nenhum fluxo irá ocorrer até que ultrapasse um determinado valor crítico, capaz de fazer com que a água existente no maior vazio comece a sair. Esta sucção crítica é denominada pressão de entrada de ar. Conforme a sucção vai aumentando gradativamente os vazios de diâmetros menores se esvaziam, até que para valores altos de sucção somente os vazios muito pequenos ainda irão reter água.

O ponto da curva onde qualquer aumento na sucção mátrica não afeta de forma significativa os valores de umidade é definido como teor de umidade residual. Para se determinar esses parâmetros é traçado tangentes no gráfico como indicado na Figura 7.

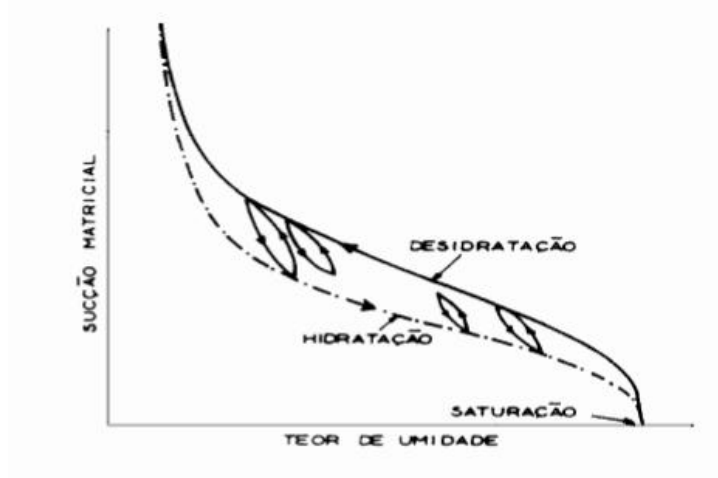
A curva característica de sucção fornece fatores importantes para a descrição do comportamento de um solo não saturado, como o coeficiente de permeabilidade, resistência ao cisalhamento, variação do volume, entre outros. Normalmente é feita a relação desses fatores considerando a sucção mátrica.

2.1.4.1 Fatores que influenciam a curva característica

Além do tipo do solo, outros fatores podem influenciar a forma da curva característica, atuando em conjunto e não de maneira isolada (de CAMPOS, 1984).

Em decorrência dos processos de secagem e umedecimento, verificou-se que em determinados solos as trajetórias desses processos podem não coincidir para um mesmo valor de sucção, manifestando-se o fenômeno de histerese. A Figura 8 mostra as diferentes curvas obtidas pelos processos.

Figura 8 - Histerese formada pelos processos de umedecimento e secagem.



Fonte: Soto, 2004.

A granulometria e mineralogia de um solo influenciam fortemente na forma da curva característica. Solos argilosos possuem vazios menores e maior superfície de contato, aumentando o efeito da capilaridade e elevando a capacidade de retenção de água oriundo das forças de adsorção.

Outro fator importante que afeta a sucção é a temperatura, quando aumentada, provoca a redução na interface solo-água, diminuindo a temperatura do menisco, ocasionando uma redução na tensão superficial e na sucção do solo.

A natureza do comportamento da curva de sucção pode ser causada por irregularidades geométricas dos poros individuais intercomunicados por pequenas passagens, efeito do ângulo de contato que varia de acordo com o avanço ou recuo do menisco, ar aprisionado nos vazios do solo no processo de umedecimento, história de secagem e umedecimento e liberação lenta de ar dissolvido na água (CAMPOS, 1984).

2.1.4.2 Métodos para obtenção da curva de sucção

Para se determinar o potencial de sucção de um solo, necessita da obtenção da curva característica do solo que pode ser encontrada tanto em campo como em laboratório. Existe uma grande variedade de técnicas e equipamentos para determinar a mesma. Na Tabela 1 estão apresentadas as técnicas mais utilizadas para se obter a sucção e qual tipo de sucção é possível encontrar por cada técnica.

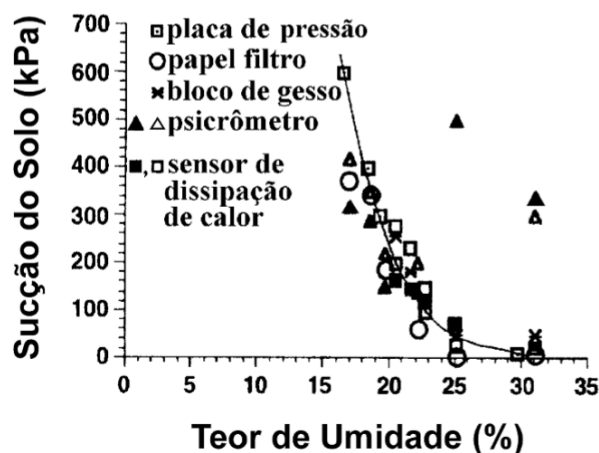
Tabela 1 - Técnicas de medição de sucção.

Técnica	Sucção Mátrica	Sucção Osmótica	Sucção Total	Intervalo (kPa)
Condutividade elétrica	x	x		20 - 1500
Condutividade térmica	x			0 - 400
Papel Filtro	x		x	0 - 29000
Psicrômetro		x	x	100 - 8000
Tensiômetro	x		x	0 - 90
Translação dos eixos	x			0 - 1500

Fonte: Marinho, 1997.

Com exceção da placa de pressão, todas as técnicas medem-se o conteúdo de água ou alguma propriedade física à mudança no conteúdo de água, sendo necessário calcular o valor da sucção através de curvas de calibração.

Lee e Wray (1995, *apud* SOTO, 2004) analisaram os diversos equipamentos e técnicas de medição de sucção e com os resultados obtidos fizeram a curva característica do solo, como pode ser visto na Figura 9. Os diversos métodos de medição de sucção fornecem resultados semelhantes, desde que sejam corretamente calibrados e utilizados.

Figura 9 - Comparação entre várias técnicas de medição de sucção.

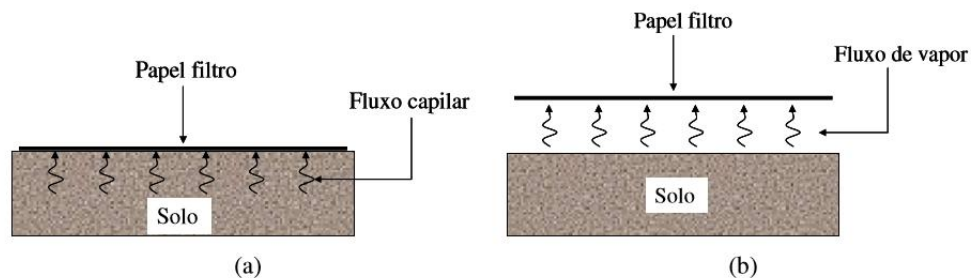
Fonte: Lee e Wray, 1995.

2.1.5 Método do papel filtro

A técnica do papel filtro consiste no princípio de absorção e equilíbrio, que ocorre quando um material poroso é posto em contato com um papel filtro, que apresenta o teor de umidade menor. O papel absorve uma certa quantidade água do solo até que o sistema entre em equilíbrio, tendo-se a relação entre sucção e umidade do material poroso, a sucção do solo pode ser obtida a partir da curva de calibração.

Dependendo do contato que o papel tem com o solo é possível medir tanto a sucção mátrica quanto a total, é possível entender melhor essa capacidade na Figura 10. Quando se deseja medir a sucção mátrica, o papel filtro fica em contato com o solo e atua como uma membrana permeável à água e solutos e, quando se desejar a sucção total, o papel não deve ficar em contato com o solo e o ar que fica entre o papel filtro e o solo atua como a membrana permeável (MARINHO, 1994).

Figura 10 - Método do papel filtro: (a) técnica em contato; (b) técnica sem contato.



Fonte: Marinho, 1994.

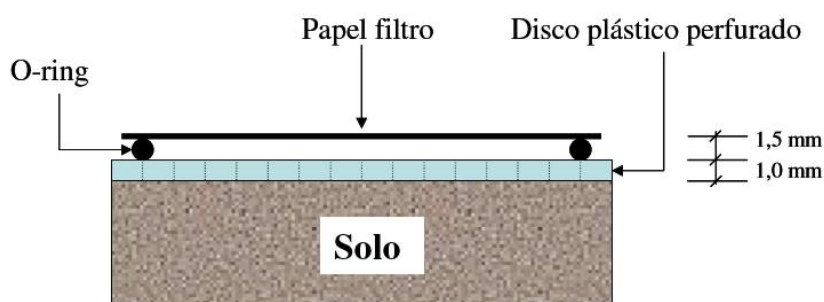
Houston *et al.* (1994) afirmam que, para valores baixos de sucção, a sucção mátrica é mais fácil de se obter em relação à sucção total quando se utiliza o método do papel filtro. Isto deve-se à baixa sensibilidade do papel filtro às variações de umidade em níveis baixos de sucção (quando não faz contato com a amostra). Mas, quando se trata de valores altos de sucção, a continuidade da água é reduzida pelo teor de umidade muito baixo, mesmo que o papel e o solo façam contato. Neste caso, a migração de água irá acontecer apenas por fluxo de vapor e as curvas de sucção mátrica e sucção total tendem a ser idênticas a partir de um certo teor de umidade.

O ensaio é padronizado pela norma ASTM D 5298-10, e recomenda-se a utilização do papel filtro da marca Whatman N° 42 ou Schleicher e Schell N° 589. Também especificam para uma medida correta dos pontos da curva característica um tempo mínimo para o solo

entrar em equilíbrio com o papel de 7 dias (dependendo do tipo e magnitude da sucção a ser medida), o tempo entre a remoção do papel da amostra e sua pesagem deve estar entre 3 e 5 segundos e a temperatura padrão deve ser de 20°C com uma variação máxima menor que 3°C.

Muitas obras da mecânica dos solos envolvem a utilização do método do papel filtro, e, como esse método não é padronizado mundialmente, existem variações e adaptações criadas frequentemente por pesquisadores. Marinho (1994) realizou um estudo para avaliar o efeito da distância entre o solo e papel filtro, quando se trata da técnica sem contato. Os resultados mostraram que a distância pode influenciar no teor de umidade do papel para um certo tempo de equilíbrio, resultado obtido pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Configuração utilizada na técnica sem contato do papel filtro.



Fonte: Marinho, 1994.

O mesmo autor observou uma tendência no ensaio que o tempo de equilíbrio requerido pode ser menor para amostras que apresentam maior sucção, os tempos de equilíbrio indicados estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Tempo de equilíbrio sugerido para medida de sucção total.

Sucção Total (kPa)	Tempo de equilíbrio sugerido
0 – 100	> 30 dias
100 – 250	30 dias
250 - 1000	15 dias
1000 - 30000	7 dias

Fonte: Marinho, 1994.

CAPITULO 3

3.1METODOLOGIA

Este trabalho determinou quantitativamente a curva de sucção do solo de amostras retiradas do Campo Experimental de Engenharia da FAG (CEEF), localizado na cidade de Cascavel – PR, conforme indicado no retângulo da Figura 12. Os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário Assis Gurgacz.

Figura 12 – Localização do CEEF.



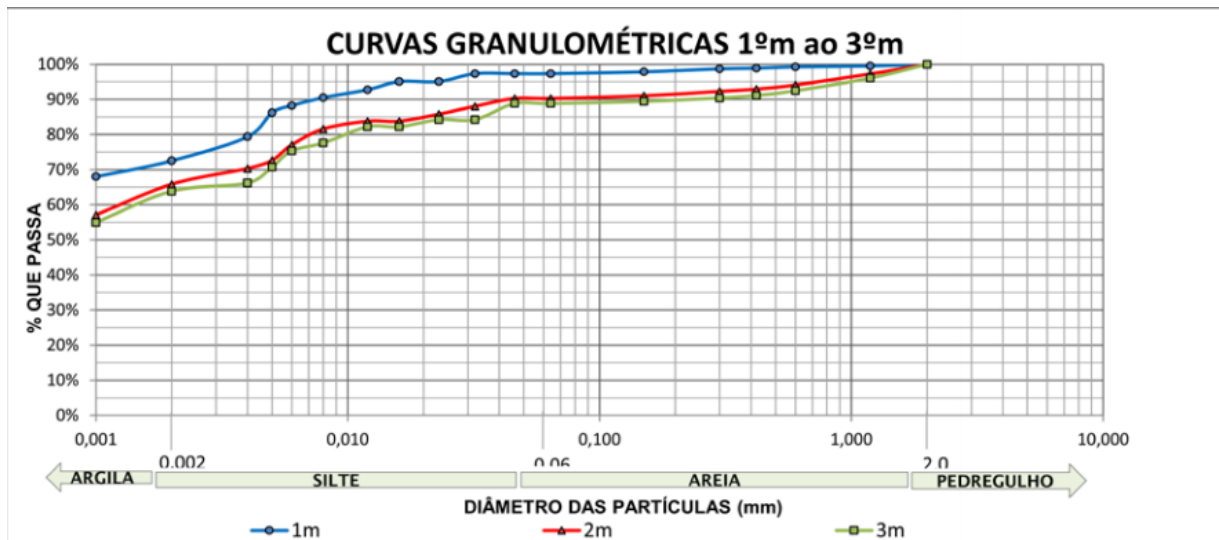
Fonte: Google Maps, 2017.

3.1.1 Caracterização do solo do CEEF

Zen (2016) fez a caracterização do solo do CEEF realizando ensaios de granulometria conjunta e limites de consistências, a seguir abordar-se-á detalhadamente esses itens para se obter uma melhor caracterização do solo a ser estudado.

O ensaio de granulometria conjunta consiste nos ensaios de peneiramento e o de sedimentação, sendo que o primeiro se trata da porcentagem de solo retida em cada peneira de dimensões definidas pela norma NBR 7181 (ABNT, 1984) e a segunda é realizada quando se identifica partículas mais finas no solo. Nas Figuras 13 e 14 é possível ver os resultados obtidos por Zen (2016) no ensaio de granulometria conjunta com o uso de defloculante que atua como um dispersante químico para as partículas de solo.

Figura 13 – Curvas granulométricas do primeiro ao terceiro metro de solo.

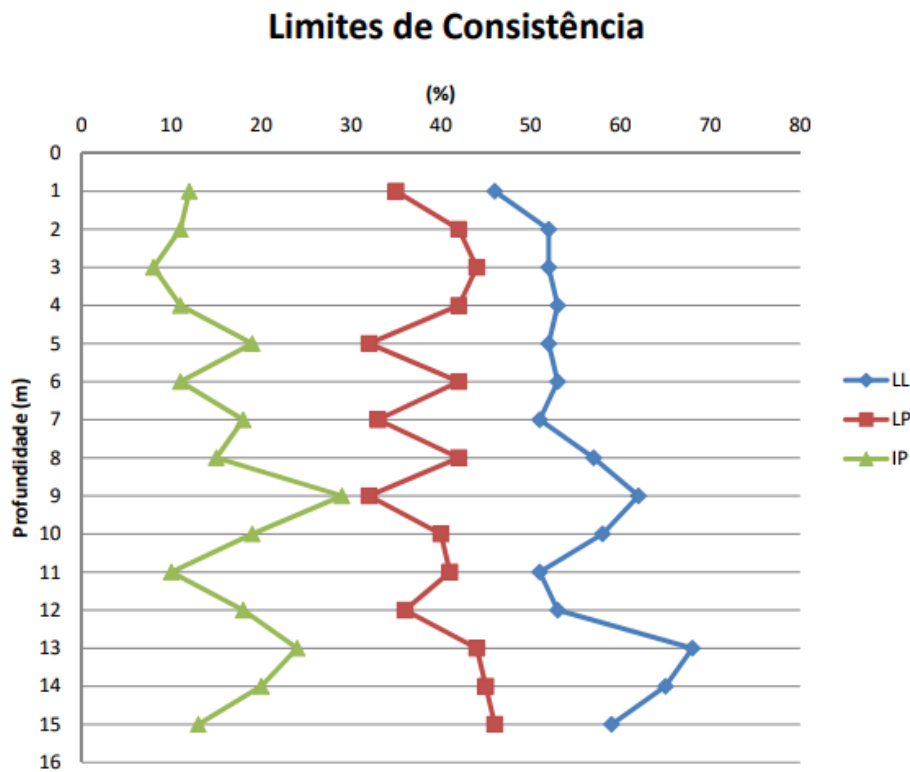


Fonte: Zen, 2016.

Analisando as curvas granulométricas é possível identificar que não há a presença de pedregulho e valores altos de argila (entre 62 a 73%). Zen (2016) classifica a graduação do solo como mal graduado devido a elevada quantidade de finos contido no solo e a falta de material granular, prejudicando o contato entre os grãos, e define o solo até o seu quinto metro como uma argila silto arenosa.

Os limites de consistência são caracterizados pelos ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) e pelo Índice de Plasticidade (IP), os resultados obtidos por Zen (2016) são apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Consistência.



Fonte: Zen, 2016.

Com os dados obtidos, Zen (2016) determinou que o solo do CEEF é um solo de média plasticidade. Ainda, Zen (2016) classificou o solo conforme a NBR 7181/84 e o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) sendo identificado conforme a textura e plasticidade do solo. Pela NBR 7181/84 o solo até o seu quinto metro de profundidade, é classificado como uma argila silto arenosa, já pelo SUCS seu primeiro metro é classificado como argila inorgânica de baixa e média plasticidade (CL) e até o seu quinto metro como argila inorgânica de alta plasticidade (CH).

3.1.2 Coleta de solo e confecção de amostras

Foram coletadas um total de 33 pares de amostras; o número de amostras por cota é apresentado na Tabela 3, sendo que a coleta do primeiro metro foi em uma cava e a dos demais foi em um poço de inspeção a cerca de 5 metros de distância da cava, ambos localizados no CEEF. Utilizou-se moldes metálicos com 60 mm de diâmetro e 40 mm de altura para retirar as amostras, cada par de amostras tinha entre 200 a 400 g de massa.

Tabela 3 – Relação entre a cota e o número de amostras.

Cota (m)	Nº de amostras
-1	7
-2	7
-3	7
-4	6
-5	6

Fonte: Autor, 2017.

3.1.2.1 Amostras superficiais

Na Figura 15 é possível ver a cava de inspeção que retirou-se os 7 pares de amostras indeformados do primeiro metro de solo do CEEF.

Figura 15 – Cava onde foram retiradas as amostras do primeiro metro de solo.

Fonte: Autor, 2017.

Para coletar as amostras retirou-se o solo superficial do fundo da cava, para evitar a extração de um solo compactado e a presença de material orgânico (folhas e raízes), os moldes metálicos foram colocados cuidadosamente no solo. Em seguida, removeu-se o solo em torno do molde com o auxílio de uma espátula, cortando o solo em volta e por baixo, e coletou-se a amostra, repetiu-se o processo até coletar todas as amostras. É possível visualizar a extração das amostras na Figura 16.

Figura 16 – Coletadas amostras do primeiro metro de solo.



Fonte: Autor, 2017.

3.1.2.2 Amostras em profundidade

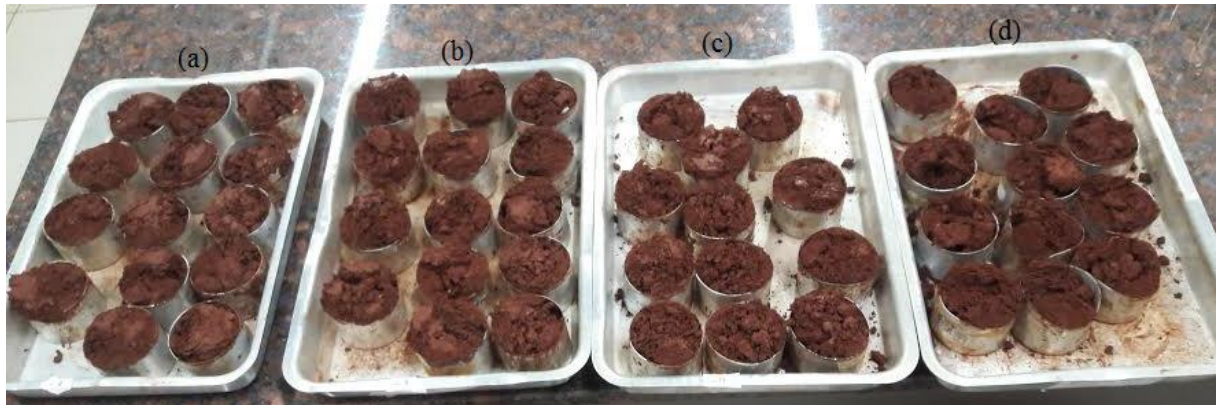
A coleta das amostras nas cotas de -2, -3, -4 e -5 metros foram feitas com o auxílio de uma equipe utilizando um equipamento próprio para ser possível descer no poço de inspeção. Coletou-se, primeiramente, as amostras do segundo metro de solo, depois do terceiro e assim por diante. É possível ver o equipamento e o poço de inspeção na Figura 17 e as amostras logo após a coleta na Figura 18.

Figura 17 – Coleta das amostras de solo nas cotas de -2, -3, -4 e -5 m.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 18 - Amostras de solo das cotas (a) -2,(b) -3, (c) -4 e (d) -5m.



Fonte: Autor, 2017.

3.1.3 Método do papel filtro

O ensaio foi realizado conforme a norma D5298-10 (ASTM, 2010), confeccionando um total de 33 amostras e utilizando o papel filtro Whatman nº 42 em todas as amostras (Figura 19).

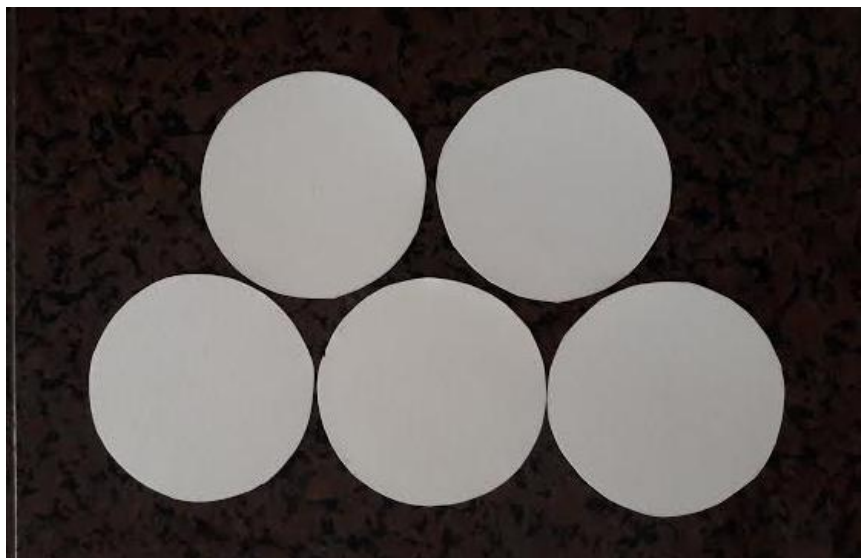
Figura 19 – Papel filtro Whatman nº 42.



Fonte: Autor, 2017.

Antes de serem utilizados, os papéis filtros foram cortados para se ter um diâmetro de 60 mm (Figura 20), obtendo-se o mesmo diâmetro que os moldes, e ficaram em um forno de secagem por pelo menos 16 horas antes da sua utilização para garantir que não houvesse alteração na curva de calibração do papel filtro, a mesma foi manuseada com luva de borracha a fim de não ter variação de umidade.

Figura 20 – Papéis filtros após alteração de seu tamanho de 110 mm para 60 mm.

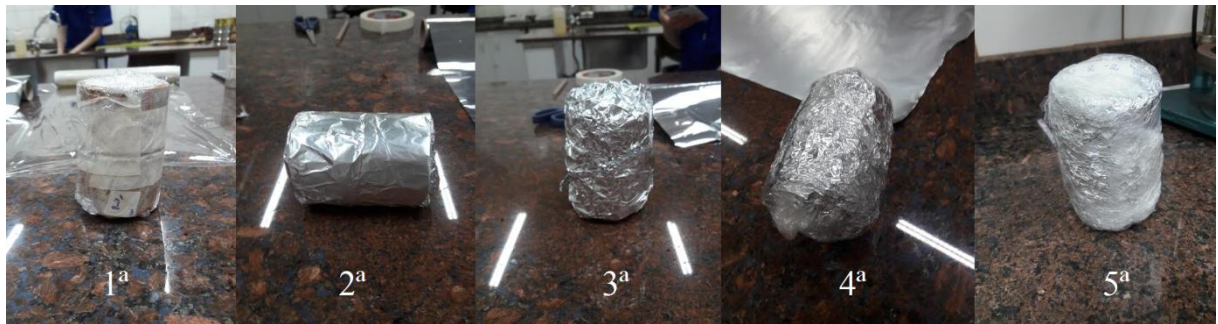


Fonte: Autor, 2017.

Logo após, iniciou-se a montagem seguindo a norma D5298-10, pegando-se duas amostras de solo indeformadas e colocando entre elas três papéis filtros, formando assim um par de amostra com teores de umidade semelhantes. Conforme descrito no Capítulo 2, colocou-se o papel filtro em contato direto com o solo e, assim, obteve-se a sucção mátrica. A montagem foi realizada o mais rápido possível para evitar que houvesse equilíbrio entre o papel filtro com a umidade relativa do ar (BONDER, 2008).

As amostras foram enroladas numa primeira camada de filme plástico, seguida de duas camadas de papel de alumínio e mais outras duas de filme plástico, para diminuir as variações de temperaturas dentro do recipiente térmico e evitar que o teor de umidade seja alterado, sendo que na última camada colocou-se uma etiqueta para facilitar a identificação da profundidade e da amostra do solo. Na Figura 21 é possível ver as camadas realizadas nas amostras de solo e a etiquetagem na 5ª camada.

Figura 21 – Camadas feitas nas amostras para vedação.



Fonte: Autor, 2017.

Colocou-se as amostras dentro de uma caixa térmica de isopor e retirou-se após um período mínimo de sete dias para permitir que a sucção do papel filtro e do solo entrassem em equilíbrio, conforme Figura 22. Este recipiente foi isolado em local com variações de temperatura inferior a 3°C (ASTM, 2010), deixou-se a caixa térmica isolada no laboratório de mecânica dos solos por ser um local onde ocorrem poucas variações de temperatura.

Figura 22 – Caixa térmica de isopor com as amostras.



Fonte: Autor, 2017.

Passado esse período, retirou-se a amostra da caixa térmica e dos materiais utilizados para vedação e foi colocado o papel filtro central em uma cápsula de alumínio de peso conhecido para ser pesado, recomenda-se que esse processo seja concluído em até 5 segundos

para reduzir a perda de água para o ambiente, na prática levou cerca de 5 a 7 segundos, e pesou-se as amostras de solo também (Figura 23). Em seguida, colocou o papel filtro e as amostras de solo para secagem em estufa por pelo menos 24 horas e pesou novamente para se determinar o teor de umidade presente nos mesmos, conforme Figura 23.

Figura 23 – Pesagem das amostras de solo e papéis filtros.



Fonte: Autor, 2017.

Realizou o mesmo processo para todas as amostras, mas modificando os teores de umidade. Para isso, colocou-se todas as amostras para secarem na estufa num período mínimo de 24 horas e, só então, molhou-se cada uma delas com quantidades diferentes de água destilada e foi deixado por um período mínimo de 3 horas para que a água percola-se todo o solo ficando o mais homogênea possível.

Utilizou-se a curva de calibração estabelecida por Chandler *et al.* (1992) para o papel filtro Whatman nº 42, sendo que a Equação 6 é para teores de umidade menores que 47% e a Equação 7 é para teores de umidade maiores ou iguais a 47%.

$$\psi = 10^{(4,84 - 0,0622 \cdot w)} \quad (6)$$

$$\psi = 10^{(6,05 - 2,48 \cdot \log w)} \quad (7)$$

Onde:

ψ = Sucção ou potencial matricial do solo (kPa);

w = Teor de água do papel filtro em porcentagem.

3.1.4 Análise dos dados

Após a execução do ensaio, realizou-se a análise de dados por meio de tabelas e gráficos, analisando os resultados obtidos e comparando com a bibliografia.

CAPITULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.1 Teor de umidade das amostras de solo

Os dados obtidos nos ensaios realizados, em relação as amostras de solo, são apresentados na Tabela 4. Para se obter o teor de umidade (w), dividiu-se o valor de massa de água pelo valor de massa seca de solo.

Tabela 4 – Dados obtidos em laboratório das amostras de solo.

Amostra	Teor de umidade (%)				
	1º metro	2º metro	3º metro	4º metro	5º metro
1	47,63	27,46	27,84	27,95	42,53
2	32,85	46,74	25,51	43,45	36,81
3	29,94	47,83	49,82	49,47	37,52
4	19,89	22,01	52,56	47,87	24,36
5	22,34	29	44,9	27,19	31,06
6	50,15	30,42	39,59	28,38	32,15
7	28,97	32,99	37,18	-	-

Fonte: Autor, 2017.

Separou-se os pares de amostras pelos teores de umidades mais próximos um do outro, este critério foi realizado com sucesso com exceção das amostras 2 e 3 da cota de -2 m e da amostra 3 da cota de -5 m. Acredita-se que para a cota de -2 m houve este diferencial de teor de umidade pela inversão dos pares de amostra, já para a cota de -5 m foi um erro na quantidade de água utilizada para umedecer a amostra.

4.1.2 Teor de umidade e sucção mátrica do papel filtro

Obtiveram-se os valores da sucção matricial (Ψ_m) a partir da utilização da Equação 6 e 7, entrando com o valor do teor de umidade (w) de cada papel filtro após o contato com as

amostras de solo. Os valores obtidos em laboratório dos papéis filtro centrais das amostras de solo estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados obtidos em laboratório dos papéis filtros centrais das amostras.

Amostra	Sucção matricial (kPa)				
	1º metro	2º metro	3º metro	4º metro	5º metro
1	3,53	4,50	378,6	4404	3,47
2	16,13	0,73	0	3	5,34
3	13,46	1,06	2,01	3	2,33
4	7639,71	6,33	2,21	4	1061,29
5	1688,14	3,47	0,31	137	1688,14
6	4,16	2,01	1,27	1254	26,04
7	49,29	1,90	4,13	-	-

Fonte: Autor, 2017.

Conforme é possível ver na Tabela 5, pode ter ocorrido alteração nos valores do papel filtro da amostra 7 da cota de -3 metros por ter verificado, após a secagem em estufa, que haviam 2 papéis filtro na cápsula, acredita-se que por eles estarem muito próximos não foi possível notar que eram dois ao invés de um no momento da montagem. Ainda na cota de -3 metros, a amostra de número 2 apresentou um valor negativo de teor de umidade, isso foi verificado pelo fato do peso da cápsula estar maior que o peso seco do papel filtro mais a cápsula, evidentemente ocorreu uma confusão com os dados e o provável é que tenha-se anotado um valor diferente que o dado pela balança.

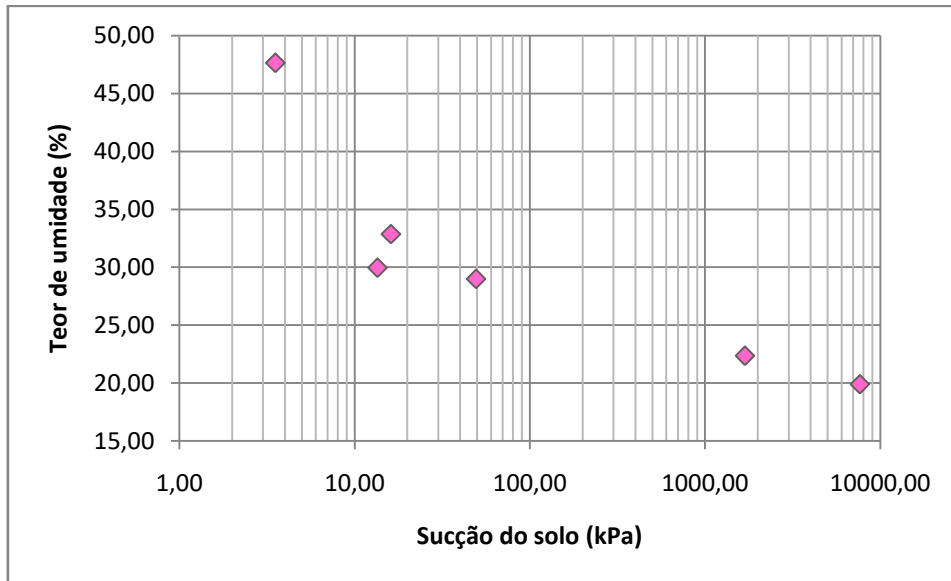
Como citado por Houston *et al.* (1994), quando o solo está em contato direto com o papel filtro se obtém a sucção mátrica e em casos de valores altos de sucção, que é o caso de solos argilosos, os valores da sucção mátrica e a sucção total apresentam-se bem semelhantes. Sendo assim, considerou-se o valor da sucção osmótica igual a zero, logo, o valor da sucção mátrica será a sucção total.

Segundo Marinho (1997), o método do papel filtro em contato direto com o solo consegue captar valores de sucção de até 29000 kPa, e os valores obtidos deram dentro dessa faixa.

4.1.3 Curva característica de sucção do solo

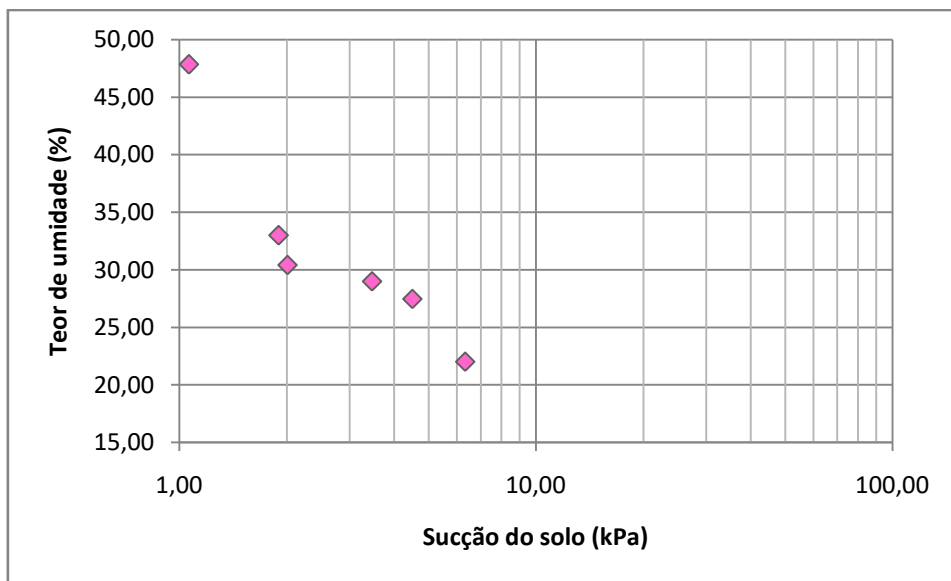
Para se obter a curva característica de sucção de Cascavel utilizou-se os dados do teor de umidade médio de cada par de amostra com o seu respectivo valor de sucção total. As curvas encontradas são apresentadas nas Figuras 23, 24, 25, 26, e 27.

Figura 24 – Curva característica de sucção de Cascavel – PR na cota de -1 metro.



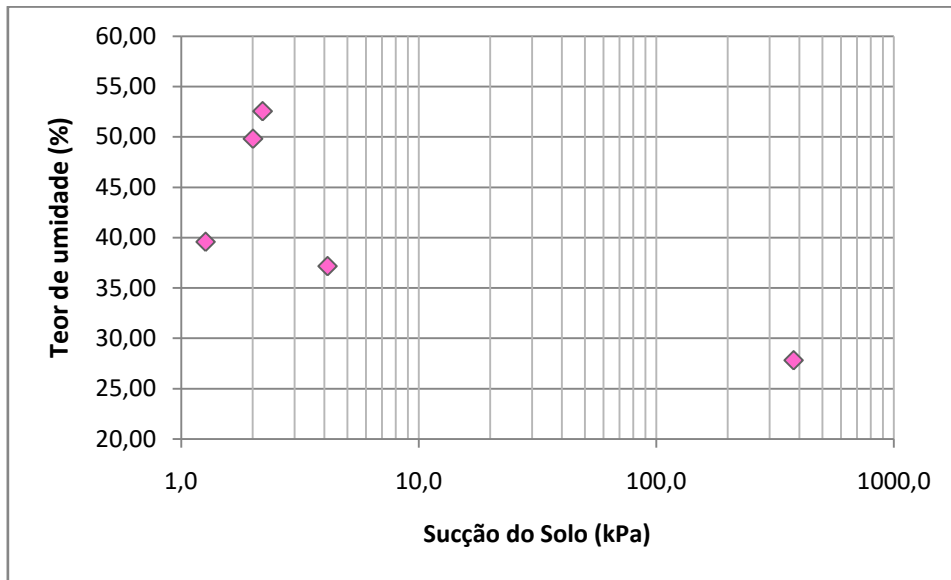
Fonte: Autor, 2017.

Figura 25 – Curva característica de sucção de Cascavel – PR na cota de -2 metros.



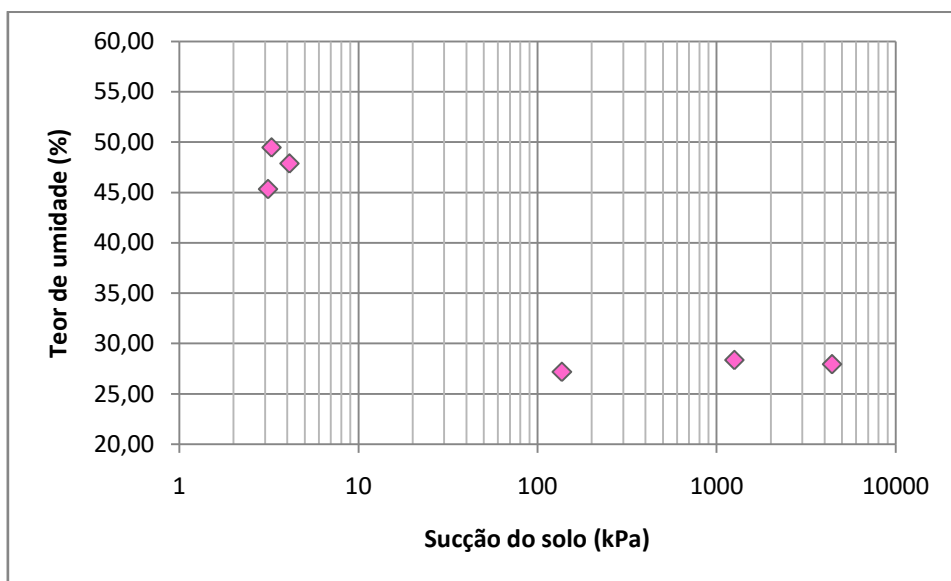
Fonte: Autor, 2017.

Figura 26 - Curva característica de sucção de Cascavel – PR na cota de -3 metros.



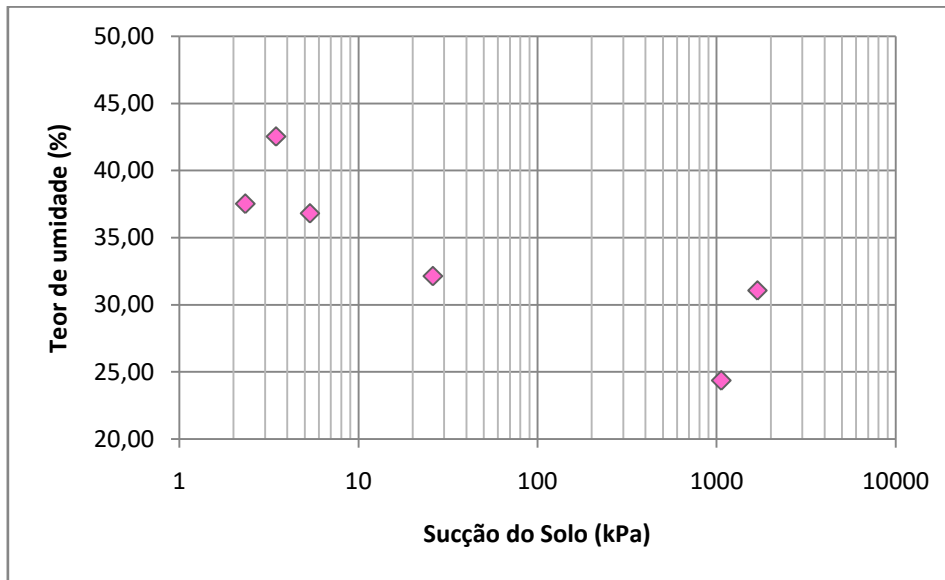
Fonte: Autor, 2017.

Figura 27 – Curva característica de sucção de Cascavel – PR na cota de -4 metros.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 28 – Curva característica de sucção de Cascavel – PR na cota de -5 metros.



Fonte: Autor, 2017.

Para a determinação das curvas de sucção considerou-se todos os pares de amostra, com exceção da Figura 26 que excluiu-se a amostra de número 2 por ter valores negativos, gerando um valor de sucção igual a zero, e também a amostra de número 5 por ter dado um valor muito baixo. Pelo fato de ter sido poucas amostras por cota (de 6 a 7 amostras) e apresentar teores de umidade, em sua maioria, entre 20 a 50% não foi possível gerar uma curva uniforme e contínua como o desejável. Nas bibliografias analisadas (BONDER, 2008; VIVIAN, 2008) os autores utilizaram entre 16 a 24 amostras com teores de umidade diferentes, gerando uma curva contínua e homogênea.

Por não ter obtido uma curva completa, não foi possível retirar dos gráficos dados importantes como o valor da pressão de entrada de ar e o teor de umidade residual que são encontrados traçando tangentes no gráfico como indicado na Figura 7.

A curva de sucção com valores mais elevados foi a do primeiro metro de solo (Figura 24), isto se explica por ser a curva com menores valores de teor de umidade e, conforme Fredlund e Xing (1994), o valor da sucção aumenta conforme o teor de umidade é reduzido. Como realizou o ensaio secando todas as amostras de solo e só depois saturando elas, antes da realização do mesmo.

Sobre o fenômeno da histerese, todas as amostras foram feitas pelo método de secagem e, conforme é possível analisar na Figura 8, quando se trata da trajetória de sucção por esse método ela necessita de teores de umidade mais elevados para se obter o mesmo valor de sucção quando comparado com a trajetória de sucção pelo método de umedecimento.

Analisando em bibliografias (BONDER, 2008; SOTO, 2004), normalmente os valores encontrados para as trajetórias de secagem e umedecimento não se diferem muito.

As curvas características de sucção se assemelham mais a de um solo silto arenoso (Figura 6) por apresentarem valores baixos de sucção com teores de umidade acima de 30%, o que sugere que alguns dados obtidos estejam errados. A curva de sucção do terceiro metro de solo (Figura 26) apontam valores extremamente baixos até para teores de umidade de 25%, sendo que a amostra 1 com um teor de umidade de 27,84% gerou uma sucção de 379 kPa (valor mais alto do gráfico), o que indica que os dados verificados possam estar incorretos. O mesmo pode ser notado na curva de sucção do segundo metro (Figura 25).

Os dados incorretos podem ser resultantes de erros cometidos no momento da coleta ou em laboratório. No momento da coleta pelo fato das amostras poderem ter sido retiradas de maneira que deformou o solo, compactando e alterando os índices físicos naturais do solo e, em alguns casos, as cápsulas não estando totalmente completas de solo.

E por erros laboratoriais, devido a saturação do solo ser realizada utilizando um Becker com água destilada e não por capilaridade com a utilização de um granito poroso como feito por Bonder (2008). Também, pode ter ocorrido algum erro na hora de desmontar as amostras e virar as cápsulas, em alguns casos teve uma pequena perda de solo, mas nada em grande quantidade.

Ainda, por erros laboratoriais, por ter deixado um período de equilíbrio entre o papel filtro e o solo de 7 dias (no caso do primeiro metro, um tempo de 9 dias), e notou-se que quando se tinha um tempo superior a este os resultados eram mais satisfatórios e pelo fato de não ter utilizado uma pinça para a retirada dos papéis filtros centrais, sendo utilizado apenas luvas.

Segundo a norma D5298-10 (ASTM, 2010), quando o solo não está suficientemente úmido pode prejudicar o contato entre o papel filtro e o solo, causando medições imprecisas da sucção matricial. Isto foi verificado em algumas amostras (principalmente a do segundo e terceiro metro de solo) com teores de umidade mais baixos, menores de 30%.

CAPITULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo determinar a curva característica de sucção do solo de Cascavel – PR pelo método do papel filtro para as cotas de -1, -2, -3, -4 e -5 metros, não conseguindo alcançar o mesmo com êxito.

Os curvas características de sucção apresentaram valores entre 0 a 7640 kPa, sendo que os maiores valores foram obtidos na curva do primeiro metro de solo, dentre esses valores a maioria apontavam valores baixos de sucção para teores de umidade acima de 30% (menores que 10 kPa). Pela região de Cascavel-PR apresentar um solo argiloso, esperava-se que a sucção fosse reduzida a partir de valores mais elevados de umidade (em torno de 80%). Analisando em bibliografias que determinaram a curva de sucção pelo mesmo método e também com solos similares (LUCAS *et al*, 2011; BONDER, 2008; VIVIAN, 2008) notou-se que os valores obtidos foram semelhantes, principalmente para as curvas da cota de -1, -4 e -5 metros.

Existem inúmeras curvas de calibração para o papel filtro Whatman nº 42, tentou-se utilizar primeiramente a curva estabelecida por Lucas *et al*. (2011) mas apresentou valores exorbitantes. Foi testado outras fórmulas e a que apresentou resultados mais satisfatórios foi a curva de calibração de Chandler *et al*. (1992), analisando em outras bibliografias verificou-se que essa curva de calibração foi utilizada por Bonder (2008), Vivian (2008), Delgado (2002) e Soto (2004) e em todos os trabalhos mostrou-se resultados adequados.

Algo que dificulta a comparação é a existência de apenas uma norma para a elaboração do ensaio do método do papel filtro, que seria a norma D5298-10 (ASTM, 2010), e dentro dela há muitas lacunas que foram necessárias adaptar analisando outras bibliografias para realizar o ensaio, fazendo com que cada autor tenha feito de uma maneira o ensaio.

Segundo Marinho (1994), para valores de sucção altos, até 30000 kPa, o tempo de equilíbrio requerido entre o papel filtro e o solo pode ser de apenas 7 dias e solos argilosos, que é o caso do solo do CEEF, apresentam valores altos de sucção. Em prática notou-se que os valores não passaram de 8000 kPa, devendo-se ter deixado um tempo mínimo de equilíbrio maior (entre 15 a 30 dias) para se obter resultados mais precisos, por isso o resultado final deste trabalho pode ter sido afetado.

O fato de ter um número pequeno de amostras por cota de solo foi um ponto que influenciou na obtenção incompleta da curva e de uma melhor caracterização das mesmas.

Conclui-se que as curvas características de sucção do 1º, 4º e 5º metro de solo apresentam valores satisfatórios e as do 2º e 3º metro possuem dados incorretos, devendo-se ter cuidado em sua utilização para fins de cálculos e projetos de engenharia.

CAPITULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros:

A elaboração do método do papel filtro para determinação da curva de sucção para apenas uma cota de profundidade utilizando de 20 a 30 amostras com teores de umidade variando de 0 a 90%.

Realização do ensaio do método do papel filtro analisando o efeito da histerese na curva característica de sucção.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 5298**: Standard Test Method of Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. [S.l.]: 2010.

BONDER, B. H. **Curvas de Retenção de Água de um Solo Coluvionar de Campinas Obtidas Mediante Técnicas de Laboratório e de Campo**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas: São Paulo: 2008.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A Low-Cost Method of Assessing Clay Dessication for Low-Rise Buildings. **Proc. Of the Institute of Civil Engineering**. [S.l.], v 92, p 82-89, 1992.

DAS, B. M. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**. 6.ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DE CAMPOS, T. M. P.; DELGADO, C. C.; TIBANA, S.; AGUILAR, S. A. S.; FONSECA, R. C. **Determinação da Curva Característica de Sucção em Laboratório**. In 1ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – 1ª COBRAE: Rio de Janeiro: 1992.

DELGADO, A. K. V. **Influência da sucção no comportamento de um perfil de solo tropical compactado**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília: Distrito Federal: 2002.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**: v.31, [S.l.]: 1994.

FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R. Stress State Variables for Unsaturated Soils. **Journal of the Geotechnical Engineer Divison**. ASCE, v.103, [S.l.]: 1977.

GERSCOVICH, D. M. S. **Equações para modelagem da curva característica aplicadas a solos brasileiros**. In: 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, NSAT01: v.1, Rio Grande do Sul: 2001.

HOUSTON, S. L.; HOUSTON, W. N.; WAGNER, A. M. Laboratory Filter Paper Suction Measurements. **Geotechnical Testing Journal**: v. 17, [S.l.]: 1994.

LOPES, M. B. L. **Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio: Rio de Janeiro: 2006.

LUCAS, J. F. R.; TAVARES, M. H. F.; CARDOSO, D. L.; CÁSSARO, F. A. M. **Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro**. Cascavel-PR: 2011.

MARINHO, F. A. M. **Medição de sucção em Solos**. In: 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados – NSAT97: Rio de Janeiro/RJ: 1997.

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

MENEZES, L. P. **Determinação da curva de retenção de água em solos utilizando bomba de fluxo.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto: Minas Gerais: 2013.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RIDLEY, A. M. Discussionon ‘Laboratory Filter Paper Suction Measurements’ bu Sandra L. Houston, William N. Houston and Anne-Marie Wagner. **Geotechnical Testing Journal:** v.18, [S.l.]: 1995.

SOTO, M. A. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados.** Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo: São Paulo: 2004.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics.** 1.ed. New York: John Wiley& Sons, 1943.

VIVIAN, B. J. **Utilização do método do papel filtro para a determinação das curvas características de um solo coluvionar não saturado contaminado com óleo diesel.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS: Rio Grande do Sul: 2008.

ZEN, B. A. B. **Caracterização geotécnica do subsolo do campo experimental do centro acadêmico da FAG em Cascavel/PR.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Assis Gurgacz, Paraná: 2016.