UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANITA CURITIBA CHRYSTELLO

AVALIAÇÃO DE CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DO PAPEL FILTRO TIPO WHATMAN №42 UTILIZADAS PARA ESTIMAR SUCÇÃO MATRICIAL EM SOLOS NÃO SATURADOS

VITÓRIA - ES

Junho de 2017

ANITA CURITIBA CHRYSTELLO

AVALIAÇÃO DE CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DO PAPEL FILTRO TIPO WHATMAN Nº42 UTILIZADAS PARA ESTIMAR SUCÇÃO MATRICIAL EM SOLOS NÃO SATURADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Geotecnia.

Orientadora: Prof.^a Kátia Vanessa Bicalho, Ph. D.

VITÓRIA - ES

Junho de 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP) (Biblioteca Setorial Tecnológica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Chrystello, Anita Curitiba, 1990-

C558a

Avaliação de curvas de calibração do método do papel filtro tipo Whatman nº42 utilizadas para estimar sucção matricial em solos não saturados / Anita Curitiba Chrystello. – 2017.

135 f.: il.

Orientador: Kátia Vanessa Bicalho.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

Mecânica do solo. 2. Sucção – Medição. 3. Calibração.
 Método do papel filtro. 5. Solos não saturados (Engenharia Civil). I. Bicalho, Kátia Vanessa. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

AVALIAÇÃO DE CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DO PAPEL FILTRO TIPO WHATMAN Nº42 UTILIZADAS PARA ESTIMAR SUCÇÃO MATRICIAL EM SOLOS NÃO SATURADOS

Anita Curitiba Chrystello

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

Aprovada no dia 29 de junho de 2017 por:

Profa. Dra. Katia Vanessa Bicalho Doutora em Engenharia Civil Orientadora - UFES

Prof. Dr. Élcio Cassimiro Alves Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais Membro Interno - UFES

> Prof. Dr. Bruno Teixeira Dantas Doutora em Engenharia Civil Membro Interno - UFES

Profa. Dra. Karla Maria Wingler Rebelo Doutora em Geotecnia Membro Externo - UFES

Prof. Dr. Edmundo Rogerio Esquivel Doutor em Engenharia Civil Membro Externo - USP Por meio de vídeo conferência

Dedico este trabalho a minha mãe Sandra Curitiba da Silva (*in memorian*), de quem sentirei saudades eternamente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS pela vida.

A instituição Universidade Federal do Espirito Santo.

À minha orientadora Prof. Dra. Katia Vanessa Bicalho pela orientação, amizade, conhecimento, por me acompanhar tão bem e pelas fundamentais contribuições para este trabalho. Acima de tudo, obrigada pela compreensão e pela oportunidade oferecida em permitir que eu conciliasse a vida acadêmica com o mercado trabalho, mesmo com todas as dificuldades.

A minha mãe de criação Sandra Curitiba da Silva (*in memorian*) e a minha mãe de sangue Flávia Curitiba da Silva, minhas bases, simplesmente por terem me criado, por tanto amor, por tudo o que sou, por cada oração, por terem me proporcionado educação e amor pelos estudos.

A minha avó Selva Curitiba da Silva (*in memorian*) por ser o meu exemplo de vida e ser minha fortaleza.

Ao meu marido, Danilo Folador Rossi, meu equilíbrio, pela sua boa vontade em me ajudar, por cuidar de mim, ser minha melhor companhia e pelo incentivo em concluir esta jornada. Enfim, por estar ao meu lado em todos os momentos bons e ruins.

A minha sogra Alaize Folador e ao meu sogro Clovis Carlos Rossi, principais incentivadores do meu desenvolvimento profissional, pela força, pelo suporte, por todo o carinho e amor em toda a minha caminhada.

A minha família e a família do meu marido, em especial as minhas tias, pelo apoio nas dificuldades, pelo incentivo, pela paciência e por tanto amor.

As minhas amigas, por compreenderem minhas ausências, por toda a ajuda, pelas conversas e conselhos, pelo carinho e amizade.

A Engesolo, em especial, Calos Leandro Stoll Vaz, Fernanda Fafá Sily e Mateus Gino D. Jorge, pela oportunidade, pela compreensão, incentivo e apoio durante toda a minha jornada.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização de mais essa etapa de minha formação acadêmica, um sonho que se tornará realidade.

RESUMO

O método do papel filtro é um método simples e econômico utilizado para medir sucção em solos não saturados. O método do papel filtro estima indiretamente a sucção (s) nos solos a partir do valor medido para um dado teor de umidade gravimétrico do papel filtro (w_f) em equilíbrio hidráulico com o solo através de uma curva de calibração predeterminada. Várias funções de calibrações para o papel filtro do tipo Whatman Nº42 (W42) têm sido publicadas na literatura. A calibração (trajetória de umedecimento) do papel filtro é determinada diretamente por diferentes técnicas experimentais e modelagem matemática. Diferentes técnicas experimentais (placa de pressão, membrana de pressão dessecador a vácuo) são usadas para impor sucção para obtenção da curva de calibração do papel filtro W42. A maioria das calibrações é definida por uma função bilinear (duas equações lineares diferentes) com o ponto de inflexão entre 60kPa<s<100kPa (i.e, 40%<w/>< 50%). Recentemente algumas publicações sugerem uma única calibração exponencial com uma transição suave entre os altos e baixos valores de sucções. Neste trabalho apresenta-se a avaliação estatística de funções de calibrações (equações bilineares e exponenciais) previamente publicadas na literatura para o papel filtro W42 para estimar sucção matricial de solos não saturados pelo método do papel filtro em contato. Definem-se novas calibrações exponenciais através do ajuste de dados experimentais dos valores de sucção controlada do papel filtro determinados por diferentes técnicas para obtenção das equações bilineares propostas pela ASTM D5298-10 e por Leong et al. (2002). Finalmente realizam-se comparações entre os valores de sucções estimados pelo método do papel filtro em contato com diferentes calibrações, inclusive o modelo proposto neste estudo e os valores correspondentes de sucções medidos por outras técnicas experimentais para dois diferentes tipos de solos. Os resultados indicam que o método do papel filtro usado com a calibração exponencial sugerida neste estudo tem considerável potencial a ser adotado para estimativa de valores de sucção matricial em solos não saturados. Entretanto, recomenda-se investigação experimental da calibração sugerida para diferentes intervalos de sucções e tipos de solos.

Palavras-chave: Método do papel filtro, Medição de sucção, Solos não saturados, Calibração do papel filtro.

ABSTRACT

The filter paper method is a simple and economical method for estimating suction in unsaturated soils. The filter paper method estimates the suction, s, in soil indirectly by measuring the gravimetric water content of filter paper, w_f , at hydraulic equilibrium with the soil using a predetermined calibration curve. A number of calibration functions for the Whatman No. 42 (W42) filter paper have been published in the literature. Varieties of techniques (pressure plate, pressure membrane and vacuum desiccator) are used to apply suction values to obtain the calibration curve (wetting paths) to W42 filter paper. Most of the calibrations involve a bilinear function (two different equations) with an inflection point occurring at 60 kPa < s < 100 kPa (i.e., $40\% < w_f < 50\%$). An approach for defining a continuous calibration function with a smooth transition between the high and low suctions based on a regression analysis of experimental data from various previously published calibrations obtained for filter paper Whatman No. 42 (W42) is presented and discussed. This paper presents a statistical analysis of the evaluated calibrations (bilinear and exponential equations) have been published in the literature for the W42 filter paper for soil suctions of unsaturated soils inferred from the filter paper method. New exponential calibrations are defined herein to fitting experimental data used to determine the bilinear equations proposed by ASTM D5298-10 and Leong et al. (2002). Finally, an experimental study was also conducted to compare the suctions estimated by the contact filter paper method test using different calibration with suctions measured by other laboratory techniques for two different soils. The results show that the exponential calibration suggested herein has considerable potential to be used for soil suctions of unsaturated soils inferred from the filter paper method. However, more measured data are required with different soil textures and differences suction range to evaluate of the suggested exponential calibration.

Keywords: Unsaturated soils, Soil suction measuring, Filter paper method, Calibration of filter paper

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Elemento de solo não saturado com interface ar-água22
Figura 3.2 - Curvas de retenção de água no solo25
Figura 3.3 - Fenômeno de histerese em curva de retenção do solo26
Figura 3.4- Esquema do equipamento de placa de pressão
Figura 3.5 - Fotografias do procedimento utilizado para o método do papel filtro36
Figura 3.6 - Ensaio do método do papel filtro utilizando o papel filtro em contato direto com o solo (método em contato)
Figura 3.7- Ensaio do método do papel filtro utilizando o papel filtro sem contato direto com o solo (método sem contato)
Figura 3.8 - Curvas de calibração do método do papel filtro tipo W42 para estimar sucção total e matricial nos solos não saturados
Figura 3.9 - Reta teórica do método dos mínimos quadrados61
Figura 3.10 - Exemplos de gráficos residuais (a) da distribuição independente dos resíduos (b) da ocorrência de dependência dos resíduos65
Figura 3.11 - Exemplos de Histogramas (a) da distribuição normal dos resíduos (b) da distribuição não normal dos resíduos
Figura 3.12 – Exemplos de Q-Q plots (a) da distribuição normal dos resíduos (b) da distribuição não normal dos resíduos
Figura 4.1– Fluxograma da avaliação das calibrações investigadas73
Figura 4.2 - Metodologia para análise comparativa entre o método do papel filtro e diferentes técnicas experimentais81
Figura 4.3 – Intervalos de confiança82
Figura 5.1 - Calibrações investigadas (trajetórias de umedecimento) para o papel filtro W42 e as faixas de erro da ASTM D5298-10 ± 0,25kPa: (a) bilineares (b) exponenciais
Figura 5.2 - Calibração bilinear (trajetória de umedecimento) da ASTM D5298-10 para o papel filtro W42: equações e dados experimentais90
Figura 5.3– Calibração bilinear (trajetória de umedecimento) de Leong et al. (2002) para o papel filtro W42: equações e dados experimentais91
Figura 5.4– Calibração exponencial (trajetória de umedecimento) de Bicalho et al. (2015a) para o papel filtro W42: equação e dados artificiais92

Figura 5.5 - Calibração exponencial A (6 resultados experimentais de s imposta com 48 valores de w_f medidos) para o papel filtro W42 proposta neste trabalho94
Figura 5.6 - Calibração exponencial B1 (28 resultados experimentais de s imposta com 28 valores de w_f medidos) para o papel filtro W42 proposta neste trabalho96
Figura 5.7 - Calibração exponencial B2 (28 resultados experimentais de s imposta com 77 valores de w_f medidos) para o papel filtro W42 proposta neste trabalho97
Figura 5.8 - Análise dos resíduos da calibração bilinear proposta pela ASTM D5298-10 para w_f <45,3%: (a) distribuição dos resíduos em relação w_f ; (b) Distribuição dos resíduos em relação a $log(s)$; (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)
Figura 5.9 - Análise dos resíduos da calibração bilinear proposta pela ASTM D5298-10 para $w_f>45,3\%$ (a) distribuição dos resíduos em relação w_f , (b) Distribuição dos resíduos em relação a $log(s)$; (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)
Figura 5.10 - Análise dos resíduos da calibração bilinear proposta por Leong et al. (2002) para $w_f < 47\%$ (a) distribuição dos resíduos em relação w_f ; (b) Distribuição dos resíduos em relação a $log(s)$; (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)
Figura 5.11 - Análise dos resíduos da calibração bilinear proposta por Leong et al. (2002) para $w_f \ge 47\%$ (a) distribuição dos resíduos em relação w_f ; (b) Distribuição dos resíduos em relação a $log(s)$; (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)
Figura 5.12- Análise dos resíduos da calibração exponencial proposta por Bicalho et al. (2015a) (a) distribuição dos resíduos em relação w_f ; (b) Distribuição dos resíduos em relação a $log(s)$; (c) Histograma ; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)
Figura 5.13 - Análise dos resíduos da Calibração exponencial A (Eq. 5.2) obtida neste trabalho (a) distribuição dos resíduos em relação $w_{\it f}$, (b) Distribuição dos resíduos em relação a $log(s)$; (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)
Figura 5.14 - Análise dos resíduos da Calibração exponencial B1 (Eq. 5.3) obtida neste trabalho (a) distribuição dos resíduos em relação w_i , (b) Distribuição dos resíduos em relação a $log(s)$; (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)
Figura 5.15 - Análise dos resíduos da Calibração exponencial B2 (Eq. 5.4) obtida neste trabalho (a) distribuição dos resíduos em relação w_i , (b) Distribuição dos resíduos em relação a $log(s)$; (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)
Figura 5.16 – Limites dos intervalos de confiança (80%) entre valores de s estimados pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medidos pela técnica de TE para o solo caulim siltoso

Figura 5.17 - Limites dos intervalos de confiança (80%) entre valores o pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medido do TAC para o solo caulim siltoso	s pela técnica
Figura 5.18 - Limites dos intervalo de confiança (80%) entre valores de pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medido da CPR para o solo laterítico argiloso	s pela técnica

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1- Técnicas utilizadas para a determinação de sucção em solos não saturados
Tabela 3.2- Técnicas experimentais usadas para calibração do papel filtro46
Tabela 3.3 - Algumas curvas de calibração do método do papel filtro tipo W42 para estimar sucção matricial e/ou total em solos não saturados previamente publicadas
Tabela 5.1 Calibrações investigadas neste trabalho85
Tabela 5.2 - Resultados dos coeficientes de determinação (R²) e teste t das calibrações investigadas
Tabela 5.3 – Resultados do valor p para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para os dados experimentais das calibrações investigadas neste estudo111
Tabela 5.4 - Resumo dos resultados obtidos para as análises estatísticas dos ajustes investigados e propostos neste trabalho
Tabela 5.5 - Resumo dos resultados das hipóteses atendidas nas análises dos resíduos das calibrações investigadas neste trabalho
Tabela 5.6 - Valores de <i>RMSE</i> e <i>ME</i> dos resíduos dos ajustes das calibrações válidas
Tabela 5.7 - Propriedades físicas de dois solos avaliados experimentalmente118
Tabela 5.8 – Valores de s estimados pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medidos pela técnica de TE para o solo caulim siltoso119
Tabela 5.9 - Valores de s estimados pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medidos pela técnica do TAC para o solo caulim siltoso120
Tabela 5.10 - Valores de s estimados pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medidos pela técnica da CPR para o solo laterítico argiloso 122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO The American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM American Society for Testing and Materials

F Fischer (teste estatístico t)

IC Intervalo de Confiança

ME Erro Médio

MSE Erro Quadrático Médio

RMSE Raiz Quadrada do Erro Médio

SQR Soma dos Quadrados da Regressão

SQT Soma dos Quadrados Total

SW Shapiro Wilk

W42 Whatman nº42

LISTA DE SÍMBOLOS

N Número de amostras

n Porosidade

R² Coeficiente de determinação

s Sucção matricial

S_r Grau de saturação

u Poropressão

*u*_a Poropressão do ar

*u*_w Poropressão da água

valor-p Resultado de testes estatísticos

w Teor de umidade gravimétrico

W_f Teor de umidade gravimétrico do papel filtro

w_{nat} Teor de umidade estado natural

w_ó Teor de umidade ótima

α Nível de significância

γ_d Peso específico seco

γ_{dmáx} Peso específico seco máximo

γ_s Peso específico dos sólidos

θ Teor de umidade volumétrico

 π Sucção osmótica

σ_e Desvio Padrão

 ψ Sucção total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos específicos	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Solos não saturados	21
3.2	Sucção	23
3.2.1	Componentes da sucção	23
3.2.2	Curva de retenção de água no solo	24
3.2.3	Métodos para a determinação de sucção nos solos	27
3.3	Método do papel filtro	32
3.3.1	Histórico	32
3.3.2	Princípios	33
3.3.3	Equipamentos necessários	34
3.3.4	Procedimento	34
3.3.5	Fatores que influenciam nos resultados do método do papel filtro	38
3.3.5.1	Contato entre o papel filtro e o solo	38
3.3.5.2	Determinação do w_f do papel filtro	41
3.3.5.3	Tempo de equilíbrio entre as sucções do solo e do papel filtro	42
3.3.5.4	Variação de temperatura durante o ensaio	42
3.3.5.5	Quantidade de papel filtro a ser utilizado	43
3.3.5.6	Escolha do tipo de papel filtro	44
3.3.5.7	Histerese	44
3.3.5.8	Tratamento do papel filtro	45
3.3.5.9	Técnicas usadas para calibração do papel filtro	46
3.3.6	Curvas de calibração do método do papel filtro tipo W42	48

3.3.6.1	Calibrações investigadas neste trabalho	52				
3.4	Métodos Estatísticos	57				
3.4.1	Regressão Linear	57				
3.4.1.1	Modelo de regressão linear simples	58				
3.4.1.2	Modelo de regressão intrinsecamente linear	59				
3.4.1.3	Método dos mínimos quadrados	60				
3.4.1.4	Coeficiente de determinação	63				
3.4.2	Avaliação da regressão linear	63				
3.4.2.1	Teste t	64				
3.4.2.2	Análise dos resíduos	64				
3.4.2.3	Teste de Shapiro-Wilk	67				
3.4.3	Quantificação da variabilidade residual	68				
3.4.4	Intervalo de Confiança	70				
4	METODOLOGIA	72				
4.1	Avaliação estatística	74				
4.2	Análise comparativa	80				
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	84				
5.1	Calibrações do método do papel filtro investigadas	84				
5.2	Obtenção de novas calibrações propostas neste trabalho93					
5.3	Avaliação estatística das calibrações investigadas98					
5.4	Análise comparativa utilizando as calibrações investigadas116					
6	CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	124				
6.1	CONCLUSÃO	124				
6.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS128					
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS12					

1 INTRODUÇÃO

O estudo de solos não saturados tem reconhecida a importância em várias obras de engenharia, tais como: aterros compactados, fundações em solos expansivos ou colapsíveis, barragens de terra e estabilidade de taludes, sendo crescente o interesse e a atenção dos engenheiros para a condição de não saturação do solo durante o desenvolvimento de seus projetos (Vivacqua, 2012). Na condição dos solos não saturados, além das tensões geostáticas comuns aos solos saturados, ocorre o surgimento de uma pressão isotrópica resultante da interação entre o líquido e o gás nos poros do solo, denominada sucção. A determinação dos valores de sucção de solos não saturados é extremamente necessária na análise do seu comportamento hidromecânico.

A sucção total do solo pode ser determinada pela soma de duas parcelas, denominadas sucção matricial a sucção osmótica. A sucção matricial é comumente associada com o fenômeno de capilaridade, devido à interface água-ar. Já a sucção osmótica é associada ao teor de sais dissolvidos na água que preenche os poros do solo. Atualmente, são utilizadas as mais recentes tecnologias desenvolvidas na medição e/ou controle da sucção (ou teor de umidade) nos solos não saturados para os ensaios de campo e laboratório (Ridley e Burland, 1993). As principais técnicas experimentais usadas para medir sucções em solos amplamente difundidas na literatura são as seguintes: tensiômetros, técnica de translação de eixos, psicrómetros, sensores de condutividade térmica e o método do papel filtro. Essas técnicas são empregadas na determinação de pontos de valores de sucções medidos na curva de "retenção de água no solo", que é uma das propriedades mais fundamentais e, ao mesmo tempo, mais complexas presentes em solos não saturados (Camapun *et al.*, 2015).

O método do papel filtro provavelmente é um dos métodos mais simples e econômicos disponíveis para medir sucção (s) em solos não saturados. Segundo a ASTM D5298-10, o método do papel filtro pode ser utilizado em um amplo intervalo de sucção (10 kPa < s < 100.000 kPa), sendo também vantajoso por estimar a sucção em solos não saturados em um curto intervalo de tempo, para uma elevada quantidade de amostras de solo a serem ensaiadas. O princípio do método do papel

filtro consiste em colocar um papel filtro de características conhecidas num ambiente hermeticamente fechado junto com uma amostra de solo. O contato entre o papel filtro e o solo não saturado permite a transferência da água presente no solo úmido para um material poroso (papel filtro) até atingir o estado de equilíbrio hidráulico. O método do papel filtro é um método indireto de medição da sucção matricial ou sucção total do solo onde a sucção é determinada quando o papel está em contato direto com o solo e o equilíbrio hidráulico é atingido. No estado de equilibro hidráulico, a sucção do solo e do papel filtro será a mesma, e o teor de umidade gravimétrico (w) do solo e do papel filtro serão distintos. A sucção do solo (s) pode então ser determinada relacionando-a ao valor do teor de umidade gravimétrico do papel filtro (w) a partir de uma curva de calibração do papel filtro "s-w_f" (sucção-teor de umidade gravimétrico do papel filtro) predeterminada para cada tipo de papel.

Os tipos de papeis filtro mais utilizados são os de especificações Whatman Nº42 (W42) e Schleicher e Schuell Nº 589 (SS59). Existem vários tipos de papel filtro disponíveis no mercado. Chandler e Gutierrez (1986) recomendam a utilização do papel filtro do tipo W42, pois é relativamente mais espesso e seus poros possuem dimensões pequenas quando comparado com o papel filtro do tipo SS59.

O sucesso do método do papel filtro depende da equação da curva de calibração utilizada para estimar valores de sucções de solos não saturados. Várias curvas de calibrações para o papel filtro tipo W42 têm sido publicadas na literatura (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002; ASTM d5298-10). Estas várias curvas de calibrações (trajetória de umedecimento) são determinadas através do ajuste de dados de ensaios dos valores de sucção controlada do papel filtro, medidos diretamente por diferentes técnicas experimentais e modelagem matemática. As calibrações utilizadas no método do papel filtro para estimar sucção nos solos requerem, em sua maioria, uma combinação de duas equações lineares (calibrações bilineares) como recomenda a ASTM D5298-10. Entretanto, algumas publicações definem apenas uma única equação de calibração (calibrações exponenciais). As calibrações bilineares apresentam um ponto de inflexão entre o intervalo de s associado com a água adsorvida (valores de sucção mais elevados) e o intervalo associado às forças capilares (valores de sucção mais baixos). Já as

calibrações exponenciais apresentam uma transição suave entre os valores de sucções altos e baixos.

Existem várias curvas de calibrações previamente publicadas na literatura para o papel filtro W42. O estudo de avaliação das curvas de calibrações mais utilizadas no método do papel filtro é muito importante na estimativa da sucção em solos não saturados e seu comportamento hidromecânico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

As curvas de calibrações "s- w_f " (sucção-teor de umidade gravimétrico do papel filtro) para o papel filtro do tipo Whatman Nº42 (W42) são necessárias na determinação indireta da sucção do solo pelo método do papel filtro. As várias curvas de calibrações (trajetória de umedecimento) podem ser determinadas através do ajuste de dados experimentais dos valores de sucção controlada do papel, obtidos diretamente por diferentes técnicas experimentais e modelagem matemática.

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação estatística e experimental de curvas de calibrações (equações bilineares e exponenciais) utilizadas no MPF W42 previamente publicadas na literatura para estimar indiretamente sucção matricial em diferentes tipos de solos e intervalos de variação de sucção. Pretende-se, através dessas avaliações e resultados estatísticos obtidos neste trabalho, recomendar as calibrações mais apropriadas para o papel filtro tipo W42 utilizadas no MPF para determinado solo e intervalo de sucção a serem medidos.

2.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos deste trabalho, destacam-se:

- Avaliar estatisticamente curvas de calibrações (equações bilineares e exponenciais) para estimar indiretamente sucção matricial em solos não saturados pelo método do papel filtro em contato, utilizando dados experimentais de valores de sucção controlada do papel filtro determinados por diferentes técnicas para obtenção dos ajustes de curvas de calibrações (trajetórias de umedecimento) predeterminadas para o papel filtro W42;
- Propor, se necessário, novas calibrações (equações exponenciais) mais adequadas para estimar sucção matricial pelo método do papel filtro em contato utilizando dados experimentais de valores de sucção controlada do papel filtro determinados por diferentes técnicas de obtenção dos ajustes de curvas de

calibrações (equações bilineares) predeterminadas para o papel filtro W42, para determinado solo e intervalo de sucção;

- Quantificar a variabilidade definida pelas diferenças entre dados experimentais dos valores de sucção controlada do papel filtro determinados por diferentes técnicas e os dados estimados dos valores de sucção do papel obtidos pelas calibrações investigadas (erros residuais);
- Comparar os valores de sucção de solos estimados pelo método do papel filtro em contato usando as curvas de calibrações (trajetórias de umedecimento) investigadas com os valores de sucção correspondentes medidos por outras técnicas experimentais para diferentes tipos de solos e intervalos de sucção;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica realizada sobre curvas de calibração do método do papel filtro, publicadas na literatura, para estimar valores de sucção em solos não saturados.

Inicialmente, serão apresentados alguns conceitos básicos aplicáveis aos solos não saturados, incluindo-se a obtenção da relação sucção-umidade por diferentes técnicas de ensaios. Posteriormente, será descrito o método do papel filtro, utilizado para medir indiretamente sucção em solos não saturados, dada as curvas de calibração "s- w_f " (sucção-teor de umidade gravimétrico do papel filtro) para o papel filtro Whatman Nº 42 (W42), objeto principal desta pesquisa. A maioria das calibrações é definida por uma função bilinear (duas equações lineares diferentes) com o ponto de inflexão entre 60kPa < s < 100kPa (i.e, 40%< w_f < 50%). Recentemente algumas publicações sugerem uma única calibração exponencial com uma transição suave entre os altos e baixos valores de sucções (30 < s < 30.000 kPa).

Por fim, serão apresentados os métodos estatísticos inerentes à avaliação estatística e experimental das funções de calibrações (equações bilineares e exponenciais) previamente publicadas na literatura para estimar sucção matricial em solos não saturados pelo método do papel filtro em contato utilizando o papel filtro W42. Os métodos estatísticos foram anteriormente desenvolvidos por diversos pesquisadores e encontram-se disponíveis na bibliografia consultada.

3.1 Solos não saturados

A teoria clássica da mecânica dos solos ocupa-se da descrição do comportamento de solos arenosos, siltosos e argilosos em condição saturada ou, eventualmente, de areias secas. Entretanto, é comum na natureza a incidência de solos que apresentam seus vazios preenchidos parcialmente por água e ar, os quais apresentam comportamento distinto daquele previsto para solos saturados (Gomes, 2007).

O solo não saturado é considerado como um sistema trifásico, isto é, constituído de três fases: líquida (água), gasosa (ar) e sólida (partículas de minerais) (Lambe e Whitman, 1969; Fredlund e Morgenstern, 1977). Entretanto, muitos pesquisadores sugerem que se deve considerar uma quarta fase independente, denominada interface ar-água (película contrátil) conforme idealizado no elemento de solo não saturado da Figura 3.1.

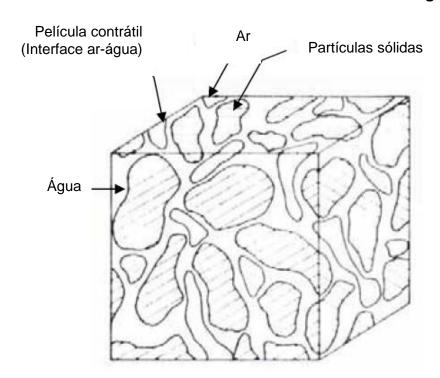


Figura 3.1 - Elemento de solo não saturado com interface ar-água

Fonte: Adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993)

A característica mais importante da película contrátil é a possibilidade de exercer uma tensão de tração nos materiais contíguos, denominada tensão superficial. Devido à ação dessa tensão, a interface ar-água comporta-se como uma membrana elástica. Se a fase gasosa for contínua, tal membrana interage com as partículas sólidas, influenciando no comportamento mecânico do solo. Assim, o solo não saturado pode ser analisado como um sistema bifásico, semelhante aos solos saturados, desde que se assuma que um fluido compressível preencha os poros (Fredlund e Rahardjo, 1993). Portanto, o objeto de estudo é um sistema trifásico e a interação interfásica dita o comportamento do conjunto. Uma revisão mais detalhada dos elementos do solo não saturado e o princípio das tensões efetivas podem ser encontrados em Vivacqua (2012).

3.2 Sucção

Além das tensões geostáticas comuns aos solos saturados, na condição não saturada surge uma pressão isotrópica resultante da interação entre o líquido e o gás nos poros do solo, denominada sucção (Fredlund e Rahardjo, 1993). Marinho (2005) afirma que a sucção faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação.

No ponto de vista da termodinâmica, a sucção equivale à energia livre da água intersticial e pode ser determinada pela medida da umidade relativa da atmosfera que envolve o solo, ou pelo emprego de uma membrana semipermeável, isto é, a sucção pode ser descrita como a energia com que um elemento poroso absorve água quando esta está livre para se mover. Essa avidez por água é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo. A sucção é normalmente expressa como pressão e as unidades mais utilizada são kPa, atm e bar.

3.2.1 Componentes da sucção

A sucção total (ψ) pode ser desmembrada em dois componentes, como já citado: (1) a sucção matricial, $(s, u_{ar}-u_w)$, que está relacionada às forças de capilaridade e de adsorção, e (2) a sucção osmótica (π) devido à concentração de sais na água (Camapun *et al.*, 2015; Marinho, 2005). A sucção total é definida pela a soma dessas duas parcelas de sucção e dada pela Equação 3.1:

$$\psi = (u_{ar} - u_w) + \pi \tag{3.1}$$

A sucção osmótica é, frequentemente, considerada constante quando envolve problemas com pequena amplitude de variação de teor de umidade. Sob esse argumento, a sucção osmótica é tratada como de pequena relevância em problemas práticos. Contudo, deve-se atentar para os problemas que envolvam contaminação de solos ou variações significativas de teor de umidade.

O valor da sucção matricial, quantitativamente, é definido pela diferença entre a pressão do ar (u_a) e a pressão da água nos vazios do solo (u_w) . Quando a pressão do ar presente nos vazios do solo é igual à pressão atmosférica, a pressão da água nos vazios do solo será negativa e, portanto, igual ao valor da pressão capilar.

Com o emprego de alguns equipamentos de laboratório torna-se possível medir e/ou controlar a sucção para determinação dos parâmetros hidráulicos do solo (taxa de infiltração, coeficiente de condutividade hidráulica e outros) e do comportamento mecânico (compressibilidade e resistência) (Gehling, 2004). Com algumas técnicas experimentais torna-se possível, ainda, obter variáveis para definição da curva de retenção de água no solo. Em sua maioria, os equipamentos que medem o valor da sucção matricial diretamente fazem a medição do valor da poropressão da água presente nos solos (Ridley e Burland, 1993).

3.2.2 Curva de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo é uma propriedade física que descreve a relação entre teor de umidade e o potencial matricial que varia no espaço e no tempo, cujas informações possibilitam a obtenção de outros atributos de solo (Scott, 2000). A quantificação da curva de retenção pode ser expressa em termos de teor de umidade gravimétrico (w), teor de umidade volumétrico (θ) ou grau de saturação (S_r).

Campos *et al.* (1992) sugerem a representação da curva em termos de teor de umidade gravimétrico para problemas geotécnicos envolvendo ruptura, assim como o teor de umidade volumétrico para problemas envolvendo deformação em solos não saturados.

Dentre os principais fatores que influenciam na forma da curva de retenção de água no solo podem ser citados o tipo de solo (estrutura e agregação), o teor de umidade inicial, o índice de vazios, a textura, a mineralogia, o histórico de tensões e os métodos de compactação (Vanapalli *et al.*,1999). Esses fatores podem interferir na forma da curva de retenção de diferentes maneiras, cada um se sobressaindo ao outro, dependendo do tipo de solo.

O solo tem uma relação sucção vs umidade característica, geralmente apresentada em forma sigmoidal, desde que não se altere o arranjo poroso e a geometria do sistema. A Figura 3.2 ilustra curvas de retenção de água para três tipos de solo com granulometrias distintas. Observa-se, por exemplo, que uma pequena variação da sucção determina maior variação de umidade na areia argilo-siltosa do que para a areia, o qual necessita de amplas variações de sucção para modificar sensivelmente o valor da umidade. Além disso, o decréscimo do tamanho dos grãos leva a um aumento no valor da pressão do ar e suaviza a inclinação da curva. Em geral, o aumento da sucção reduz o teor de umidade do solo. A resposta diferenciada observada deve-se a capacidade do solo de reter água nos poros dependendo de cada tipo de solo, sendo a areia argilo-siltosa com maior capacidade de retenção de água e a areia com menor capacidade.

0,55 UMIDADE VOLUMÉTRICA (-) -∆- A - areia 0,50 -O-B - silte argiloso C - areia argilo siltosa 0,45 0,40 0,35 0,30 0,25 0,20 0 20 80 100 SUCÇÃO MATRICIAL (kPa)

Figura 3.2 - Curvas de retenção de água no solo

Fonte: Santos e Vilar (2004)

As amostras utilizadas para a determinação da curva de retenção de água no solo devem representar (do ponto de vista estrutural, de nível de tensões, de teor de umidade e de grau de saturação) as condições do solo no projeto de engenharia a ser estudado, uma vez que a determinação de qualquer parâmetro de solo está relacionada diretamente com as características do solo em sua condição de trabalho (Camapun *et al.*, 2015). As amostras de um solo em particular, apesar de possuir a mesma textura e mineralogia, podem exibir diferentes curvas de retenção se forem

preparadas com diferentes umidades e possuírem diferentes histórico de tensões. Como resultado, o comportamento também poderá ser diferente (Miller *et al.*, 2002).

Existem três métodos para se obter a curva de retenção de água no solo: (i) Por secagem (drenagem), toma-se uma amostra de solo inicialmente saturada e aplicando-se gradualmente sucções maiores, fazendo medidas sucessivas de tensão em função de θ ; (ii) Por molhamento (umedecimento): toma-se uma amostra de solo inicialmente seca ao ar e permitindo-se seu umedecimento gradual por redução de tensão. (iii) Por secagem e molhamento: toma-se uma amostra em que pode é possível aplicar, tanto o processo de drenagem quanto o de umedecimento, a partir de um teor de umidade intermediário do solo, como por exemplo, o teor de umidade natural da amostra.

Reichardt (1985) descreve que cada método fornece uma curva contínua, mas em geral, diferentes, ou seja, a relação entre a sucção matricial e a umidade não é unívoca. Este fenômeno é denominado histerese, e é apresentado na Figura 3.3.

Umedecimento $\theta_r \quad \theta_{1w} \quad \theta_{1d} \quad \theta_s$ Umidade Volumétrica (θ)

Figura 3.3 - Fenômeno de histerese em curva de retenção do solo

Fonte: Adaptado de Lu e Likos (2004)

O fenômeno de histerese influencia nas propriedades dos solos não saturados, seja no estado de tensões ou na permeabilidade, considerado a maior causa da dependência da trajetória de tensões do solo (Fredlund e Rahardjo, 1993). Em relação à permeabilidade, a histerese torna-se significante quando se avalia a condutividade hidráulica em função da sucção matricial.

Fredlund (2002) se refere à curva de retenção como a principal função constitutiva para aplicação prática da mecânica dos solos não saturados. A curva de retenção de água no solo é uma ferramenta conceitual para interpretação do comportamento dos solos não saturados. Várias são as relações teóricas e empíricas disponíveis para modelagem das propriedades dos solos com base na curva de retenção de água no solo. Nesse sentido, várias são as funções publicadas na literatura para descrevê-la, como as apresentadas, por exemplo, por Gardner (1958), Brooks e Corey (1966), van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994).

3.2.3 Métodos para a determinação de sucção nos solos

As medidas de sucção, tanto em laboratório como em campo, podem ser realizadas através de diversos métodos, que apresentam vantagens e limitações. Os métodos mais comuns para a determinação da curva de retenção através de equipamentos e recursos laboratoriais relativamente simples são: a placa de sucção, a placa de pressão, a membrana de pressão, o método do papel filtro e o método do equilíbrio da fase de vapor. Essas técnicas, em determinados casos, são complementares entre si, principalmente, com relação aos intervalos de sucções de cada método. Para a medição de sucção no campo, existe um considerável número de instrumentos desenvolvidos, sendo que a maioria mede a sucção matricial. Alguns desses instrumentos utilizados em campo são: os tensiômetros, blocos porosos e psicrômetros. A Tabela 3.1 apresenta algumas das técnicas utilizadas para a determinação de sucção em solos.

Tabela 3.1- Técnicas utilizadas para a determinação de sucção em solos não saturados

Técnicas	Tipo de Sucção	Intervalo de sucção (kPa)
Placa de Sucção	Matricial	0 a 70
Placa de Pressão	Matricial	0 a 1.500
Membrana de Pressão	Matricial	0 a 10.000
Método do Papel Filtro	Matricial e Total	10 a 100.000
Equilíbrio da fase de vapor	Total	s > 400 kPa
Tensiômetros convencionais	Matricial	0 a 100
Tensiômetros de alta Capacidade	Matricial	100 a 1.500 kPa
Psicrômetro	Total e Osmótica	100 a 8.000

Fonte: (Fredlund e Rahardjo 1993; Vilar, 1995; Camapun et al., 2015).

Placa de sucção

A placa de sucção consiste de duas câmaras, uma de ar e outra de água, separadas por uma pedra porosa. É conhecida como funil de Haines, recomendada para impor sucções entre 0 e 70 kPa. O limite superior, no entanto, é limitado tanto por condições práticas de laboratório como pela eventual dificuldade em se manter a continuidade hidráulica do sistema. A placa de sucção permite, com muita precisão, definir o trecho inicial da curva de retenção, que, em muitos casos, é de fundamental importância para a interpretação da curva da retenção. Não se pode definir previamente, sem se conhecer o tipo de material e sua estrutura, os diversos valores de sucção a serem utilizados no ensaio. Porém, solos mais argilosos tendem a possuir uma sucção de entrada de ar elevada, e isso deve ser levado em consideração na escolha dos valores de sucção a serem impostos.

Placa de pressão

A placa de pressão é um equipamento capaz de contornar as limitações experimentais encontradas em certos equipamentos, como a placa de sucção e tensiômetros, relacionadas às dificuldades de controlar e/ou medir pressões negativas. Aplica-se uma mudança do referencial de pressão (pressão atmosférica), ou seja, aumenta-se artificialmente a pressão do ar existente nos poros do solo. Admitindo-se que isso produz igual aumento da pressão de água, a sucção e a pressão na água são aumentadas, levando-a até valores mensuráveis. Essa

mudança de referencial chama-se técnica de translação de eixo. Hilf (1956), propôs essa técnica para o controle da sucção atuante na amostra do solo. Para esse método, usam-se placas porosas especiais que permitem o fluxo de umidade, porém não de ar. A sucção máxima a ser aplicada depende da pressão do ar das placas porosas, que podem atingir até pressões de 1.500 kPa. Com essa técnica, tem-se a possibilidade de movimentação de solutos através da placa porosa, portanto o que se impõe à amostra é a sucção matricial.

A câmara de pressão de Richards é um dos equipamentos que utilizam placas de alta pressão do ar, sendo esse o elemento principal para o controle da sucção nesse equipamento. O equipamento consiste em uma câmara hermeticamente fechada, construída para suportar altas pressões (Libardi, 2000). A Figura 3.4 ilustra uma das possibilidades para o equipamento de placa de pressão. A placa de pressão, quando realizada na configuração apresentada na Figura 3.4, é conhecida também como "panela de Richards", em homenagem ao cientista que a introduziu, na década de 1930. A câmara possui um duto que permite a aplicação da pressão de ar (também, é possível se utilizar nitrogênio) dentro da câmara. Uma vez aplicada a pressão de ar desejada, a água da amostra é expulsa através da placa porosa em direção da bureta. A magnitude da sucção equivale à pressão de ar aplicada artificialmente quando se mantém a água sob pressão atmosférica, ou seja, a sucção é a diferença entre a pressão de ar aplicada e a pressão da água na amostra. O ar sob pressão do interior da câmara não escapa através do elemento poroso, graças às suas características de retenção da água. O elemento poroso não permitirá a passagem do ar, contanto que a pressão do ar não seja atingida. Dessa forma, deve-se ter em mente o nível de sucção que se deseja aplicar ou controlar para que seja utilizado o elemento poroso adequado.

O intervalo de tempo desse procedimento tem uma variação que depende do tipo de solo e do valor da pressão aplicada, ficando em média 168 horas por pressão aplicada. Ao atingir o equilíbrio hidráulico em cada tensão, a amostra é pesada para determinação do seu conteúdo de água, depois de submetidas à última tensão, são secas em estufa a 105 °C durante 24 h. Na condição de equilíbrio, o solo terá um teor de umidade de água retido a um valor de sucção matricial numericamente igual à pressão aplicada na câmara (Libardi, 2000). O limite de trabalho da câmara de

pressão de Richards é dado pela pressão do ar, que é a pressão capaz de dar início ao fluxo de ar através da placa e que pode atingir até 1.500 kPa. Acima dessas sucções pode-se utilizar o ensaio da membrana de pressão.

Pressão na água (u_w)
igual à atmosférica

Pressão de ar (u_a)

Placa porosa cerâmica

Figura 3.4- Esquema do equipamento de placa de pressão

Fonte: Camapun et al. (2015).

Membrana de Pressão

A membrana de pressão utiliza uma membrana de celulose e emprega a técnica de translação de eixos. O procedimento de ensaio da membrana de pressão é similar ao da câmara de pressão de Richards, a diferença está na utilização de membranas semipermeável de celulose como elemento de interface para controle de sucção, no lugar da placa porosa. Essa membrana de pressão permite a entrada de água e não de ar, onde há a possibilidade de medir valores de sucção de até 10.000 kPa.

Equilíbrio da fase de vapor

O método do equilíbrio da fase de vapor é baseado em uma forma de imposição de sucção total, sendo possível a aplicação de valores de sucção relativamente elevados. O ensaio é realizado colocando amostras num dessecador que contêm uma solução aquosa de um dado composto químico. De acordo com as propriedades físico-químicas desse composto, uma determinada umidade relativa é

imposta dentro do dessecador. Mudanças de água ocorrem por transferências de vapor entre a solução e a amostra, e uma determinada sucção é aplicada na amostra quando o equilíbrio de vapor é atingido.

Tensiômetro convencional

O tensiômetro permite a medição direta da poropressão negativa da água do solo, a partir da qual se tem o valor da sucção matricial. A grande limitação do tensiômetro convencional é sua capacidade de medição, que, em geral, vai de 0 a 70 kPa (Ridley e Burland, 1993).

Tensiômetro de alta capacidade

O tensiômetro de alta capacidade, permite a obtenção de valores de sucção superiores a 100 kPa, sem que ocorra cavitação no sistema. Essa técnica possui uma grande versatilidade para medir sucção matricial direta no solo, bem como homogeneidade das medidas quando realizadas repetidas vezes. O aparelho utilizado é um instrumento desenvolvido no *Imperial College* (Inglaterra) por Ridley e Burland (1993) e é constituído por um tensiômetro, um reservatório, uma ponta porosa de cerâmica e um transdutor de pressão. O princípio do tensiômetro de alta capacidade é similar aos tensiômetros convencionais, que se baseia na transmissão de pressão de água numa ponta porosa em equilíbrio com o solo até o sistema de medição de sucção (Gehling, 2004). Usando o mencionado transdutor e minimizando o volume de água no reservatório, a sucção matricial dos solos pode ser medida em torno de 1.500 kPa com um tempo de resposta de poucos minutos. O tempo de resposta é muito rápido em relação a tensiômetros convencionais (Soto, 2004).

Psicrômetros

Os psicrômetros são aparelhos que medem a sucção total do solo através da medição da umidade relativa do ar no solo em equilíbrio com a interface solo-água. Consiste basicamente de uma cápsula porosa em contato com o solo, com um termopar ligado a um microvoltímetro e uma fonte de alimentação elétrica e um

sensor de temperatura. Os psicrômetros medem valores de sucções entre 100 a 8.000 kPa. As variações das respostas dos valores de sucções podem ser em poucas horas e até em duas semanas dependendo da sucção do solo analisado.

Descrições detalhadas de diferentes técnicas experimentais, comumente utilizadas para medir ou controlar a sucção do solo, podem ser encontradas em muitas publicações (Fredlund e Rahardjo, 1993; Lee e Wray, 1995; Ridley e Wray, 1996; Lu e Likos, 2004; Marinho, 2005; Bulut e Leong, 2008; Vilar, 1995).

3.3 Método do papel filtro

3.3.1 Histórico

Desde o século XIX a sucção em solos tem sido objeto de estudo e a análise destes estudos permite uma melhor compreensão dos métodos de medição de sucção. Tais métodos utilizam ferramentas básicas, nas quais os conceitos físico/químicos são facilmente compreendidos.

Shull (1916) foi um dos pioneiros a desenvolver um método para determinação indireta da sucção utilizando o fenômeno de absorção (apud Marinho, 1994). O pesquisador utilizou sementes de plantas especialmente selecionadas que funcionavam como elemento de absorção para medir sucções, com base na descoberta de membranas semipermeáveis das sementes (Brown, 1907; Schroder, 1911 apud Marinho,1994). Durante a calibração das sementes foi observado que a característica semipermeável da semente não é importante. A calibração das sementes consistiu em medir o teor de umidade (em equilíbrio) das sementes secas ao ar e diferentes concentrações de soluções de ácido sulfúrico. A curva de calibração das sementes obtida relacionou o teor de umidade das sementes com a pressão do vapor da solução. Com a curva de calibração das sementes tornou-se possível medir indiretamente a sucção de um solo em uma condição particular. Durante a determinação de sucção do solo, após atingir o equilíbrio hidráulico entre as sementes e o solo, as sementes foram pesadas e seu teor de umidade foi medido. Após o equilíbrio hidráulico, através da curva de calibração das sementes, foi obtido o valor de sucção do solo. O pesquisador concluiu que a principal fonte de

erro do método de medição de sucção utilizado em seus estudos foi devido à evaporação ocorrida durante o manuseio das sementes, após o equilíbrio hidráulico entre as sementes e o solo ser atingido.

Hansen (1926) (apud Marinho, 1994) fez o uso de papéis filtro saturados em solução de açúcar para medir a sucção do solo, usando o conceito do fenômeno de absorção nesta medição. Foi observado que o método utilizado na publicação não leva em consideração o efeito capilar do papel filtro assumindo que a sucção correspondente do papel é dada pela pressão de vapor da solução de açúcar. Gardner (1937) foi o primeiro a usar o papel filtro para medições de sucção, sem uso de quaisquer soluções para saturá-lo, aprimorando o método utilizado por Shull (1916) (apud Marinho, 1994). O método adotado pelo pesquisador utilizando o papel filtro para medições de sucção de um solo resultou em uma maior confiabilidade. O controle no processo industrial envolvido na produção do papel filtro o tornaria mais uniforme em qualidade, garantindo que as características de absorção para medir sucção controlada do papel filtro sejam essencialmente iguais e independentes da caixa ou dos lotes usados. Desde então, muitas pesquisas foram realizadas sobre o uso do papel filtro para medir sucção em solos não saturados.

3.3.2 Princípios

O princípio do método do papel filtro baseia-se em colocar um solo úmido em contato com um material poroso (papel filtro). A água do solo é transferida para o material poroso por capilaridade, até que o equilíbrio hidráulico seja alcançado em um determinado intervalo de tempo. No estado de equilíbrio, as sucções no solo e no material poroso igualam-se, apesar de suas respectivas umidades serem diferentes. Conhecendo a relação entre a sucção e a umidade do material poroso, através de uma curva de calibração do material poroso, determina-se a sucção do solo.

O método do papel filtro apresenta as seguintes vantagens para medir sucções em solos não saturados: os custos de ensaios são baixos, comparados ao de ensaios de determinação de umidade; os ensaios podem ser realizados por técnicos que tenham apenas o treinamento básico de laboratório; e, principalmente, o papel filtro

pode ser utilizado para medir uma grande variação de valores de sucção, isto é, de 10 a 100.000 kPa (ASTM D5298-10). O método do papel filtro é uma alternativa simples, barata e com razoável precisão quando comparada as outras técnicas tradicionais de medir sucção em solos não saturados. Essas vantagens permitem determinar um grande número de valores de sucção e em curto prazo. Além disso, é um método que permite ser utilizado tanto em laboratório como em campo.

3.3.3 Equipamentos necessários

Os materiais e métodos para medir sucção do solo pelo método do papel filtro foram padronizados pela norma americana ASTM D5298-10. Os materiais necessários para calibrar e utilizar o papel filtro como um sensor de medição de sucção são:

- 1. Uma balança analítica com precisão de aproximadamente 4 casas decimais
- 2. Sacos plásticos auto selante
- 3. Piças e pincel
- 4. Estufa (105 °C)
- 5. Filme plástico
- 6. Discos de acrílico transparente (Perspex)
- 7. Papel filtro e correspondente curva de calibração

Ressalta-se que o papel filtro deve ser colocado na estufa a 105 °C por no mínimo 2 horas (ASTM D5298-10).

3.3.4 Procedimento

O procedimento do método do papel filtro para medir sucção de um solo não saturado consiste em colocar um papel filtro de características conhecidas num ambiente hermeticamente fechado junto com uma amostra do solo a ser ensaiado. O contato entre o papel filtro e o solo permite a transferência da água presente no solo úmido para o papel filtro, por um intervalo de tempo suficiente, até atingir o estado de equilíbrio hidráulico entre eles. O método do papel filtro mede a sucção matricial ou sucção total do solo. A sucção total é determinada quando o papel não está em contato direto com o solo e o equilíbrio é atingido pelo fluxo de vapor d'água do solo

para o papel. A sucção matricial é determinada quando o papel está em contato direto com o solo e o equilíbrio hidráulico é atingido por fluxo capilar. No estado de equilibro hidráulico a sucção do solo e do papel filtro será a mesma, e o teor de umidade gravimétrico do solo e do papel filtro serão distintos. Determina-se indiretamente a sucção do solo através do valor do teor de umidade gravimétrico do papel filtro (w_f), a partir de uma curva de calibração predeterminada para um tipo de papel filtro. A calibração (trajetória de umedecimento) do papel é determinada através do ajuste de dados de ensaios dos valores de sucção controlada do papel filtro determinados diretamente por diferentes técnicas experimentais e modelagem matemática.

Pesquisadores do *Imperial College* de Londres adotam o procedimento para a determinação da sucção matricial utilizando o método do papel filtro descrito a seguir. Na Figura 3.5 o procedimento do método do papel filtro é ilustrado por fotografias durante o ensaio. Prepara-se um corpo de prova de solo com 100 mm de diâmetro e 25 mm de espessura. Adotam-se alguns cuidados para garantir que o topo e a borda das superfícies do corpo de prova estejam lisos e sem irregularidades. Coloca-se um papel filtro de diâmetro de 70 mm em íntimo contato com o topo e a borda da amostra. Cada papel filtro é mantido fixo no local com um pequeno disco de Perspex. Envolve-se a amostra com três camadas de filme plástico.

Figura 3.5 - Fotografias do procedimento utilizado para o método do papel filtro

Fonte: Acervo da autora

O sistema (amostra e papel filtro) é armazenado dentro de dois sacos plásticos selados, a temperatura ambiente, durante 7 dias. Recomenda-se usar sacos plásticos selados, previamente pesados, adotando-se este peso para prevenir eventuais variações de umidade do papel filtro durante o processo de pesagem. Depois de 7 dias o sistema atinge o equilíbrio hidráulico. Após o filme plástico e o disco de Perspex serem cuidadosamente removidos, o papel filtro é colocado dentro do saco plástico. O papel filtro deve ser removido da amostra e colocado dentro de saco plástico em aproximadamente 5 segundos (com prática, este tempo é alcançado). O papel filtro deve ser selado e pesado imediatamente. Repete-se o mesmo procedimento para o outro papel filtro.

Após a pesagem, os papéis filtro são removidos dos sacos plásticos e colocados em estufa a 105°C por 2 horas. Durante esse período, cada papel filtro é colocado em um saco plástico vazio separadamente, a fim de absorver qualquer excesso de

umidade recorrente. Após as 2 horas, os sacos plásticos são pesados novamente. Cada papel filtro seco em estufa é colocado novamente dentro do mesmo saco plástico (inicialmente removido e selado). Com isso, pesa-se o saco plástico com o papel filtro novamente. No final do processo, pequenas quantidades de solo podem se prender ao lado do papel filtro que estava em contato com o solo. Quando o papel filtro é removido da amostra, o solo preso ao papel filtro deve ser rapidamente retirado. Gardner (1937) sugere pesar o papel filtro antes de iniciar o ensaio de forma a subtrair a quantidade de solo preso ao papel. Ridley *et al.* (2003) recomendam desconsiderar as medições quando existir algum solo preso ao papel, no momento em que ele é colocado dentro do saco plástico.

De acordo com a ASTM D5298-10, para uma medida correta dos valores de sucção do solo através da curva de calibração pelo método do papel filtro, os seguintes cuidados são necessários: (i) o tempo mínimo requerido para o sistema (amostra e papel filtro) atingir o equilíbrio hidráulico é de 7 dias, dependendo do tipo e valor da sucção a ser medida; (ii) o tempo entre a remoção do papel do topo da amostra e sua colocação em um compartimento fechado para pesagem deve estar entre 3 e 5s; e (iii) a temperatura padrão deve ser 20°C ± 3°C. É recomendado que as variações de temperatura máximas para a medida de sucção matricial sejam menores que 3°C, e, para a medida de sucção total, menores que 0,5°C (Marinho,1994).

A sucção determinada a partir da curva de calibração utilizada no método do papel filtro pode ser obtida como a média das sucções medidas a partir do teor de umidade gravimétrico do papel, se no método do papel filtro foram utilizados dois papéis para estimar a sucção do solo. A norma ASTM D5298-10 determina que os valores de sucção estimados pelo método do papel filtro sejam descartados se a diferença entre dois papéis ensaiados exceder 0,5 log(s).

Em geral, as unidades utilizadas para expressar os valores de sucção são unidades de pressão, sendo as mais utilizadas kPa, atm e bars. A sucção também pode ser expressa através da unidade pF, que representa o logaritmo decimal da altura de coluna de água em centímetros da pressão correspondente, isto é, 1 pF = 0,1 mca (Moncada, 2004) pois 1 = log (10cm). Vários estudos descritos na literatura

geotécnica envolvem a utilização do método do papel filtro e existem variações e adaptações realizadas constantemente pelos pesquisadores.

3.3.5 Fatores que influenciam nos resultados do método do papel filtro

Durante a execução do método do papel filtro, diversos cuidados são necessários. Destacam-se os fatores que influenciam nos resultados dos valores de sucção do solo obtidos pelo método do papel filtro, nomeadamente: o contato entre o papel filtro e o solo; a determinação do w_f do papel filtro; o tempo de equilíbrio hidráulico para equalização da sucção; a variação de temperatura durante o ensaio; a quantidade de papéis filtro utilizada; a escolha do tipo de papel filtro; a histerese entre as trajetórias de umedecimento e de secagem; o tratamento do papel filtro; técnicas de obtenção da curva de calibração do papel filtro. Uma série de experimentos usando os papéis filtro do tipo Whatman No. 42 (ou W42) e Schleicher e Schuell Nº 589 (ou SS589) foi realizada por vários pesquisadores (Fawcett e Collis George, 1967; Al-Khafaf e Hanks, 1974; Hamblin, 1981; Greacen et al., 1987; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992; Leong et al., 2002; Houston et al., 1994; Marinho, 1994; Ridley e Wray, 1996; Marinho e Oliveira, 2006; Bulut, 2008) para avaliar esses fatores, que estão descritos a seguir.

3.3.5.1 Contato entre o papel filtro e o solo

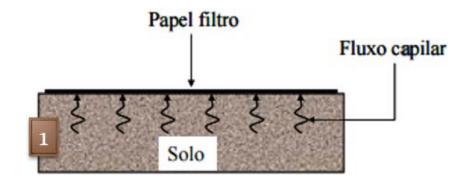
Os solos não saturados em contato o papel filtro, material poroso que possui capacidade de absorver água, são colocados em um recipiente hermeticamente fechado, por um período de tempo suficiente para que ocorra o fluxo de umidade no sistema (amostra e papel filtro) até atingir o equilíbrio hidráulico. Tendo-se a relação entre sucção e umidade do papel filtro (curva de calibração), a sucção matricial ou total do solo é medida indiretamente. Havendo contato direto (fluxo capilar) entre a amostra e papel, mede-se sucção matricial, s. Não havendo contato direto (fluxo de vapor), mede-se sucção total.

O fluxo de umidade entre o papel filtro e o solo, que pode ocorrer através de fluxo capilar ou de vapor é um dos importantes fatores que influenciam nos resultados dos valores de sucções estimados pelo método do papel filtro. O fluxo capilar ocorre

através dos poros do solo e das fibras do papel. O "método em contato" se refere ao caso quando o papel filtro está em contato direto com o solo (Figura 3.6). A parcela de sucção medida pelo método em contato é a sucção matricial. No fluxo de vapor, as moléculas de água são transferidas dos poros do solo pela superação de forças capilares e forças osmóticas, presentes em solos que possuem água intersticial contendo sais dissolvidos. Esse fluxo ocorre quando o papel filtro e o solo são colocados sem contato direto, ou seja, é deixado um espaço entre eles (Figura 3.7). Para não existir contato direto do papel filtro com o solo, deve ser colocado um disco perfurado entre eles, de forma que possa existir um espaço para passagem da água presente no solo para o papel filtro. O espaço deixado entre esses materiais (camada de ar) constitui em uma barreira para os sais, permitindo a saída de vapor de água do solo em direção ao papel. Neste caso, quando há somente um fluxo de vapor entre o papel e o solo, o procedimento é denominado "método sem contato" e o valor medido corresponde à sucção total (ASTM D5298-10).

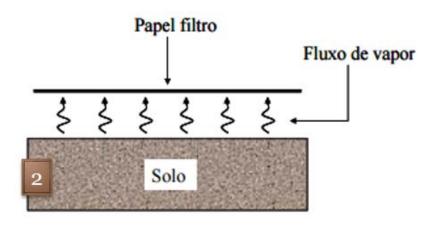
Um estudo qualitativo para avaliar o efeito da distância entre a fonte de vapor de água e o papel filtro foi realizado por Marinho (1994) para o método do papel filtro utilizando a técnica sem contato. O pesquisador mostrou que essa distância influencia no teor de umidade do papel para um dado tempo de equilíbrio hidráulico.

Figura 3.6 - Ensaio do método do papel filtro utilizando o papel filtro em contato direto com o solo (método em contato)



Fonte: Adaptado de Vivian (2008)

Figura 3.7- Ensaio do método do papel filtro utilizando o papel filtro sem contato direto com o solo (método sem contato)



Fonte: Adaptado de Vivian (2008)

Estudos sobre o contato entre o papel filtro e o solo foram feitos por Al-Khafaf e Hanks (1974), Leong *et al.* (2002), Crilly e Chandler (1993) e Fredlund e Rahardjo (1993). A redução do contato entre o papel e o solo não afeta a medição da sucção matricial. À medida que a sucção aumenta a sucção matricial torna-se uma combinação de sucção matricial e total. A partir de determinado valor de sucção mede-se a sucção total, mesmo que o método do papel filtro seja utilizado pelo método em contato (papel filtro em contato direto com o solo) para estimar a sucção matricial do solo.

Recentemente, Gomes (2007) apresentou evidências experimentais que indicam que a acurácia da medição de sucção pelo método do papel filtro pode ser significativamente afetada pela deficiência de contato entre o papel filtro e o solo estudado. Esse pesquisador discutiu sobre irregularidades superficiais ou descontinuidades na face da amostra do solo que podem ser responsáveis por medições de sucções incorretas.

Normalmente, as curvas de calibração são obtidas usando vários métodos para impor sucção (ver subitem 3.3.6 deste trabalho). Essas técnicas podem ser divididas em dois grupos, dependendo do contato entre o papel filtro e a água para o controle de sucção do papel. Para altos valores de sucção, o papel filtro geralmente é

calibrado usando técnicas que não permitem o contato entre o papel filtro e a água, e isso ocorre pela técnica sem contato. Para baixos valores de sucções, o papel filtro é normalmente calibrado usando a técnica com contato. Verifica-se que o grau de efeito de contato na imposição de sucção para calibração do papel tem muita influência pelo tempo de equilíbrio hidráulico.

Greacen *et al.* (1987) realizaram a técnica de placa de sucção para imposição de sucção em um papel filtro W42. Observaram que para altos valores de sucção controlados é necessário um tempo maior para que o fluxo de umidade ocorra a uma determinada distância. O estudo mostra que a existência do contato entre o papel filtro e a água do solo pode ser suficiente para que o papel filtro absorva água para medir sucção.

3.3.5.2 Determinação do w_f do papel filtro

No método do papel filtro, o papel filtro pode absorver a água de duas maneiras: por fluxo capilar ou por fluxo de vapor (ver subitem 3.3.5.1). Para a obtenção de uma adequada medição de sucção pelo método deve ser garantido que o papel filtro, após o equilíbrio hidráulico ser atingido, seja removido do ambiente hermeticamente fechado sem perda significativa de umidade. A perda de umidade do papel é da ordem de 1,5% por minuto para umidades de aproximadamente 35%. Essa perda depende da umidade do papel no estado equilíbrio hidráulico com o solo. Para baixas umidades (elevadas sucções) a evaporação é menor.

Ridley *et al.* (2003) recomendam que, após a remoção do papel filtro que está em contato com o solo, ele seja colocado em sacos plásticos leves e com lacre, para o processo de pesagem. O mesmo deve ser feito após o papel filtro ser seco em estufa. Quando o papel filtro é retirado da estufa, ele pode absorver água do ar, devendo ser rapidamente colocado em um recipiente selado. Esses sacos plásticos devem ser previamente pesados, de forma a prevenir variação de umidade do papel filtro.

3.3.5.3 Tempo de equilíbrio entre as sucções do solo e do papel filtro

O tempo é fator importante no método do papel filtro, pois deve ser suficiente para que o equilíbrio hidráulico entre o solo e o papel filtro para equalização dos valores de sucção do solo e do papel filtro sejam alcançados (Marinho e Oliveira, 2006). O tempo necessário para que o valor da sucção no solo e no papel filtro atinja a situação de equilíbrio hidráulico em um recipiente fechado às condições ambientes é função da sucção inicial do solo, umidade relativa inicial do ar, da massa de solo e do espaço disponível no ambiente fechado (ASTM D5298-10).

Segundo Leong et al. (2002) o período de 7 dias é considerado suficiente para garantir o equilíbrio na maioria das medições de sucção do solo. A norma ASTM D5298-10 recomenda, para as condições normalmente encontradas na mecânica dos solos, um período de 7 dias para que a sucção no solo e no papel filtro atinjam a situação de equilíbrio hidráulico. Quando o papel filtro está em contato direto com a água presente nos poros do solo, para pequenos valores de sucções (menores que 50 kPa), a maioria da água é absorvida nos primeiros minutos e depois lentamente tende a atingir o equilíbrio em aproximadamente 7 dias (Greacen et al., 1987). Fawcett e Collis-George (1967) mostram que, para sucções muito baixas, são necessários períodos maiores que 7 dias.

Segundo Marinho (1994), o tempo de equilíbrio de 7 dias utilizados no método do papel filtro é suficiente para medir sucção matricial. Já para medir a sucção total, a duração desse período depende do nível de sucção a ser ensaiado, sendo que para os níveis de sucção entre 0 e 100kPa é necessário um tempo de equilíbrio maior que 30 dias. Para sucções entre 100 e 250 kPa, 30 dias são suficientes. Para sucções entre 250 e 1.000 kPa, e entre 1.000 a 30.000 kPa são necessários 15 e 7 dias, respectivamente.

3.3.5.4 Variação de temperatura durante o ensaio

Al-Khafaf e Hanks (1974) mostram que a temperatura absoluta no ambiente do ensaio não tem muita influência na condição de equilíbrio hidráulico entre o solo e o papel filtro. Entretanto, foi observado que para variações de temperatura de 2°C no

ambiente de ensaio, ocorre condensação no papel e esse problema é significativo para medições de valores de sucções pelo método do papel filtro menores que 1.500 kPa. Dessa forma, a temperatura no ambiente de ensaio deve ser mantida constante durante a determinação do teor de umidade gravimétrico do papel.

A falta de controle da temperatura ambiente durante o ensaio do método do papel filtro irá causar evaporação ou condensação no papel filtro, o que irá interferir no fluxo de umidade entre o solo e papel filtro durante o equilíbrio hidráulico do sistema. A norma ASTM D5298-10 (2010) especifica uma variação máxima de 3°C a uma temperatura nominal de 20°C no ambiente de ensaio do método do papel filtro (Marinho, 1994).

Haghighi *et al.* (2011) analisaram o efeito da temperatura na determinação de uma curva de calibração utilizando o papel filtro W42 para um solo argiloso. Os experimentos foram realizados considerando temperaturas de 10°C, 25°C e 50°C. Dado um valor de sucção, o teor de umidade gravimétrico do solo diminui com o aumento da temperatura. Em outras palavras, a capacidade de retenção da água no solo diminui com o aumento da temperatura.

3.3.5.5 Quantidade de papel filtro a ser utilizado

Hamblin (1981) descreve que a quantidade de papel filtro utilizado em contato com o solo altera o tempo para o método do papel filtro atingir as condições de equilíbrio hidráulico, visto que, durante a realização do ensaio feita por Al-Khafaf e Hanks (1974), foi colocado um papel absorvente entre o papel filtro e o solo, a fim de proteger o papel do solo se prender nele. Porém, foi verificado que o erro devido à presença de solo no papel, no final do método do papel filtro, foi menor que o erro devido a longos períodos para atingir as condições de equilíbrio hidráulico do sistema (amostra e papel) ou se fossem feitas tentativas para limpar o papel do solo preso a ele. Hamblin (1981) sugere o uso de um único papel filtro a ser utilizado no método do papel filtro para estimar sucção em solos não saturados.

3.3.5.6 Escolha do tipo de papel filtro

Quando um tipo específico de papel filtro (Whatman Nº 42, Schleicher e Schuell Nº 589, Whatman Nº 1, etc.) é calibrado para estimar indiretamente a sucção em solos não saturados pelo método do papel filtro, assume-se que todos os papéis com a mesma especificação se comportem de forma semelhante. Para a escolha do papel filtro, sempre deve ser utilizado o papel filtro "quantitativo". Os mais usados são Whatman Nº 42 (ou W42) ou Schleicher e Schuell Nº 589 (ou SS589). Chandler e Gutierrez (1986) recomendam a utilização do papel filtro do tipo W42, pois é relativamente mais espesso e seus poros possuem dimensões pequenas quando comparado com o papel filtro do tipo SS59.

O processo industrial envolvido na produção do papel filtro (material poroso) utilizado no método do papel filtro deve ser realizado de tal forma que a sua capacidade de medir sucção não se altere para diferentes lotes. Esse aspecto foi investigado por Fawcett e Collis George (1967) e por Hamblin (1981). Os pesquisadores mostraram que os papéis filtro de diferentes lotes podem ser considerados como tendo características equivalentes para a medição de sucção. Sibley *et al.* (1990) realizaram uma análise estatística a fim de investigar as características do papel filtro W42 entre diferentes caixas. As analises estatísticas foram realizadas com caixas de papel filtro dos mesmos lotes. Não foram detectadas diferenças significativas nos papéis filtros das diferentes caixas.

Para o papel filtro W42, a umidade inicial no estado seco ao ar é aproximadamente 6%, permitindo medições de sucção de zero a 30 MPa. Essa é a máxima sucção que o solo pode ter para que o papel filtro absorva água do solo. Em contrapartida, o papel filtro também pode ser utilizado no estado inicialmente saturado. Porém a curva de calibração do papel filtro será afetada pelo fenômeno de histerese. Nesse caso, a máxima sucção que o solo pode ter não será mais 30MPa.

3.3.5.7 Histerese

A histerese é um fenômeno que envolve efeitos de superfície e está associado com a forma de absorção ou perda de água do papel filtro (material poroso) utilizado. A histerese corresponde à diferença existente entre as trajetórias de umedecimento e secagem da calibração do papel filtro, afetando a forma da função de calibração do papel, e consequente afetando nos valores de sucções estimados pelo método do papel filtro.

O papel filtro, que é um material poroso, apresenta curvas de calibração diferentes para as trajetórias de umedecimento (papel inicialmente seco) e trajetórias de secagem (papel inicialmente úmido). Quando o papel filtro está úmido o fluxo de umidade ocorre do papel em direção ao solo, exceto quando a sucção do solo é muito baixa. Por outro lado, se o papel estiver seco, o sentido do fluxo de umidade será do solo para o papel. A fim de evitar a influência da histerese na medida da sucção do solo pelo método do papel filtro, o papel deve ser sempre utilizado diretamente da caixa no estado inicialmente seco ao ar (Fawcett e Collis-George, 1967; Mcqueen e Miller, 1968; Chandler e Gutierrez, 1986).

3.3.5.8 Tratamento do papel filtro

Para inibir a presença de fungos e de decomposição biológica, um tratamento no papel filtro torna-se necessário antes de estimar sucção nos solos pelo método do papel filtro (por exemplo, o uso de 0.005 % de HgCl₂ ou semelhante). Hamblin (1981) e Chandler e Gutierrez (1986) observaram que a falta de tratamento no papel filtro não alterou os resultados obtidos em seus trabalhos. A decomposição biológica depende do tipo de solo ensaiado para obtenção da sucção pelo método do papel filtro. Depende também do tempo de equilíbrio hidráulico entre o solo e o papel filtro para equalização dos valores de sucção entre eles durante o método do papel filtro. Um período superior a 30 dias para atingir as condições de equilíbrio hidráulico do sistema (amostra e papel filtro) no método do papel filtro, em solos inorgânicos, pode induzir ataque bacteriológico (Marinho, 1994).

Hamblin (1981) realizou calibrações para dois lotes de papel filtro do tipo W42. Um dos lotes foi tratado para impedir a decomposição biológica e o outro lote, obtido dois anos mais tarde, não foi tratado, entretanto não foram observadas diferenças entre as duas calibrações.

3.3.5.9 Técnicas usadas para calibração do papel filtro

A curva de calibração tem sido levantada por pesquisadores empregando diferentes técnicas experimentais e equipamentos. Uma vez que o papel filtro é um material produzido perante rigoroso controle de qualidade por um processo industrial, a curva de calibração não se altera para diferentes lotes.

Várias técnicas experimentais podem ser usadas para impor sucção para fins de calibração do papel. As principais técnicas experimentais e os intervalos de sucção usados para calibração do papel filtro são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Técnicas experimentais usadas para calibração do papel filtro

Técnica	Intervalo de s		
Placa de Sucção	0 – 100 kPa		
Amostras de campo	0 – 2.000kPa		
Placa de Pressão	0 – 1.500 kPa		
Membrana de Pressão	0 – 1.500 kPa		
Amostras edométricas	as 100 kPa – 2.000kPa		
Dessecador	s> 5.000kPa		

Fonte: Marinho (2006) e Fawcett e Collis-George (1967).

As técnicas experimentais de calibração do papel filtro permitem que o papel filtro atinja o equilíbrio hidráulico com um valor de sucção controlado em um ambiente fechado. Depois que o equilíbrio é alcançado, o papel filtro é pesado e seco em estufa (duas horas de secagem a 105°C). Após a secagem, o teor de umidade gravimétrico do papel filtro é obtido e relacionado com a sucção controlada. Várias medidas são necessárias para cobrir o intervalo de sucção necessário. A escolha da

técnica para controlar sucção do papel depende do nível de sucção necessário (Marinho, 1994). Dessa forma, as diferentes técnicas experimentais usadas para calibração do papel filtro determinam os dados experimentais por imposição de sucção para obtenção da curva de calibração do papel filtro. O papel filtro pode se encontrar inicialmente seco ao ar, quando é retirado diretamente da caixa, e também pode ser usado em estado inicialmente úmido, embora seja necessária uma calibração específica para esse procedimento, como a descrita por Gardner (1937), por exemplo.

A técnica da placa de sucção controla a sucção do papel filtro para valores de s<100kpa. Esse método permite controlar a sucção mantendo-se a poro pressão de ar nula (pressão atmosférica) e a poropressão de água em um valor negativo. A sucção controlada é conhecida e o valor de teor de umidade gravimétrico do papel é correlacionado a sucção e obtido em função da variação de volume de água.

Assume-se que para as amostras de campo, a sucção matricial determinada diretamente possui valor equivalente à média da tensão efetiva da amostra no campo. Para amostras em ensaios edométricos de imposição da sucção assumemse descarregamento unidimensional e não drenado e a pressão imposta é equivalente ao valor da sucção da amostra descarregada.

A técnica da placa de pressão emprega o método de translação de eixos. A placa de pressão é o elemento principal para controle de sucção das técnicas experimentais que empregam o princípio da translação de eixos (Vilar, 2006).

A técnica do dessecador consiste em colocar o papel filtro em uma solução com pressão de vapor conhecida. Essa técnica permite impor a sucção mediante soluções saturadas de cloreto de sódio, de potássio e de bário. Nesse sistema hermeticamente fechado, a transferência de água ocorre por vapor até atingir o equilíbrio hidráulico e permite impor sucções superiores a 100kPa e inferiores a 2.000kPa para obtenção da calibração do papel filtro.

Das técnicas experimentais usadas para calibração do papel filtro apresentadas na Tabela 3.2, a única em que a água é transferida para o papel filtro por vapor é o

dessecador. A principal consequência disso está relacionada ao tempo de equilíbrio hidráulico durante a calibração do papel.

3.3.6 Curvas de calibração do método do papel filtro tipo W42

O sucesso do método do papel filtro depende da equação da curva de calibração do papel utilizada para estimar indiretamente valores de sucção matricial e/ou total de solos. Diferentes pesquisadores sugeriram diferentes curvas de calibração para o mesmo papel filtro. A calibração do papel filtro Whatman No. 42 (W42) propostas por vários pesquisadores são realizadas para o papel inicialmente seco ao ar (trajetória de umedecimento). As várias funções de calibrações são determinadas através do ajuste de dados experimentais dos valores de sucção controlada do papel filtro determinados diretamente por diferentes técnicas experimentais e modelagem matemática usadas na calibração do papel.

As curvas de calibração determinadas para o mesmo tipo de papel não são equivalentes. As diferenças entre essas curvas para um mesmo papel filtro na literatura são atribuídas a vários fatores, principalmente no momento do levantamento dos dados experimentais para obtenção da calibração do papel, tais como: técnica usada na calibração (imposição de sucção), tempo de equilíbrio hidráulico, qualidade do papel filtro, histerese, distância entre o papel filtro e a fonte de sucção usada na calibração (Bulut e Leong, 2008; Leong *et al.*, 2002; Bicalho et al., 2015b). Esses fatores foram detalhados anteriormente neste estudo.

Em relação à modelagem matemática das funções de calibrações do papel filtro W42 para estimar sucção do solo pelo método do papel filtro, Fredlund e Rahardjo (1993) afirmam que as equações de calibração do método do papel filtro necessariamente sempre serão calibrações compostas por duas equações lineares diferentes. A denominação utilizada para a calibração do papel compostas por duas equações lineares é usualmente definida como calibração "bilinear", embora na literatura o termo bilinear em matemática é usado na álgebra linear e significa uma forma definida em um espaço vetorial.

As curvas de calibrações bilineares necessitam de duas equações lineares para definir uma única calibração, em que uma equação apresenta o intervalo de s associado com a água adsorvida (valores de sucção mais elevados) e o intervalo associado às forças capilares (valores de sucção mais baixos). Moncada (2004) observa que diferentes valores entre os altos e baixos níveis de sucção para as calibrações bilineares propostas por diversos pesquisadores indicam a sensibilidade do papel filtro. A maioria das calibrações do papel filtro do tipo W42 encontradas na literatura são calibrações bilineares com funções semelhantes. Essas equações podem ser descritas utilizando a forma geral (Bicalho *et al.*, 2011) descrita como:

$$\log(s) = A - Bw_f \tag{3.2}$$

onde s é o valor da sucção estimada do solo pelo método do papel filtro (em contato) expresso em kPa e w_f é o teor de umidade gravimétrico medido do papel filtro, expresso em %. As constantes A e B são derivadas da relação linear entre o log(s) e w_f , variando de acordo com a equação publicada.

Por outro lado, Bicalho *et al.* (2013) observaram que nos pontos de inflexão entre uma reta e outra ocorre uma dispersão numérica muito grande dos valores de sucção, sendo essa mudança é muito abrupta, podendo indicar uma limitação das calibrações bilineares para o método do papel filtro. Recentemente algumas publicações sugerem uma calibração exponencial (trajetória de umedecimento) com uma equação contínua, única e não linear para estimar sucção matricial em solos não saturados para o papel filtro W42. A função exponencial apresenta uma transição suave entre a parte inferior da curva de calibração (alto intervalo de teor umidade gravimétrico do papel filtro) e a parte superior da curva de calibração (menores valores de teor de umidade gravimétrico do papel filtro). Para as calibrações exponenciais o ponto de inflexão exigido pelas calibrações bilineares é desnecessário (Bicalho *et al.*, 2015b).

Existem várias curvas de calibração utilizadas no método do papel filtro para estimar sucção matricial e/ou total em solos não saturados disponíveis na literatura e não há um consenso sobre qual é a mais adequada. Na tabela 3.3 são listadas algumas equações de calibrações (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e

Gutierrez, 1986; Chandler *et al.*, 1992; Crilly e Chandler, 1993; Leong *et al.*, 2002; ASTM D5298-10, 2010) e seus respectivos intervalos de w_f definidos pelos pontos de inflexão quando a calibração apresenta forma bilinear.

Tabela 3.3 - Algumas curvas de calibração do método do papel filtro tipo W42 para estimar sucção matricial e/ou total em solos não saturados previamente publicadas

Referência	Sucção	Intervalo do teor de umidade gravimétrica do papel filtro(%)	Log ₁₀ (sucção) (kPa)
Fawcett e Collis-George (1967)	N/A*	w < 45,3	5,327-0,0779 w
Hamblin (1981)	N/A	N/A	6,281-0,0822 w
Chandler e Gutierrez (1986)	N/A	N/A	5,85-0,0622 w
Chandler et al. (1992)b	N/A	w ≤ 47	4,84-0,0622 w
	N/A	$w \ge 47$	6,05-2-48 log (w)
Crilly e Chandler (1993)	N/A	15 ≤ w ≤ 47	4,84-0,0622 w
	N/A	> 47	6,05-2,48 log (w)
Leong et al. (2002)	Matricial	< 47	4,945-0,0673 w
	Matricial	≥ 47	2,909-0,0229 w
Leong et al. (2002)	Total	< 26	5,31-0,0879 w
	Total	≥ 26	8,779-0,222 w
ASTM D5298-03	N/A	< 45,3	5,327-0,0779 w
	N/A	> 45,3	2,412-0,0135 w

^{*}N/A: não foi definido na publicação da equação de calibração

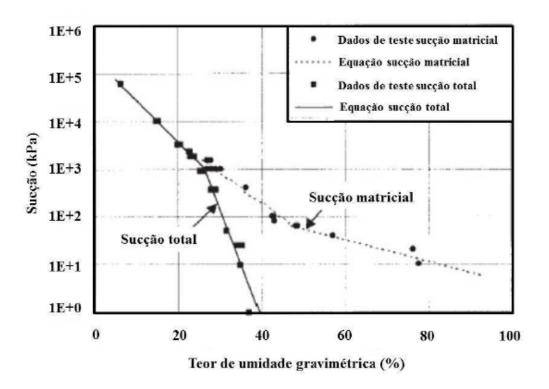
Fonte: Cupertino (2013)

Fredlund e Rahardjo (1993) mostraram que existe uma tendência de convergência entre a sucção total e matricial para altos valores de sucção medidos pelo método do papel filtro, ou baixos teores de umidade gravimétricos do papel. Isso pode ser explicado tendo em vista que, para baixos valores de teor de umidade do papel, a

transferência de umidade entre o solo e o papel filtro ocorre predominantemente por fluxo de vapor (Moncada, 2004).

Leong *et al.* (2002) apresentaram duas curvas de calibração utilizadas no método do papel filtro tipo W42 mostradas na Figura 3.8, sendo uma obtida usando placa de pressão (sucção matricial) e a outra usando soluções salinas (sucção total). Os pesquisadores observaram na Figura 3.8, que os valores de s<1.000 kPa estimados pelo método do papel filtro utilizando curvas de calibrações do papel devem ser usadas separadamente para técnica em contato (sucção matricial) e para técnica sem contato (sucção total). Esses pesquisadores recomendaram a utilização de curvas de calibrações diferentes para determinação da sucção matricial (método do papel filtro em contato) e sucção total (método do papel filtro sem contato).

Figura 3.8 - Curvas de calibração do método do papel filtro tipo W42 para estimar sucção total e matricial nos solos não saturados



Fonte: Adaptado de Leong et al. (2002)

As calibrações avaliadas no presente trabalho determinam a sucção matricial nos solos não saturados, uma vez que a sucção osmótica não é significante para a

maioria dos valores de sucção total medidos em obras de engenharia (Houston *et al.*, 1994).

Além disso, é recomendado um cuidado especial no uso de curvas de calibrações publicadas para a determinação da sucção total pelo método do papel filtro uma vez que, se o equilíbrio hidráulico entre o papel filtro e o solo não é alcançado, a curva de calibração para a sucção total pode fornecer valores de sucção total menores do que sucção matricial, produzindo um valor negativo das sucções osmóticas, o que não é equivalente ao real valor de sucção total do solo ensaiado (Bicalho *et al.*, 2009).

Procedimentos detalhados sobre o método do papel filtro podem ser encontrados nas seguintes publicações: Marinho (2006); Power *et al.* (2008); Al-Khafaf *et al.* (1974); Bulut e Wray (2005); Chandler e Gutierrez (1986); Houston (1994) e Leong *et al.* (2002).

3.3.6.1 Calibrações investigadas neste trabalho

Algumas equações para as curvas de calibração do papel filtro Whatman No. 42 (W42) inicialmente secos ao ar (trajetórias de umedecimento) propostas por vários pesquisadores utilizadas no método do papel filtro em contato para estimar sucção matricial em solos não saturados foram investigadas nesta dissertação. As curvas de calibrações previamente publicadas na literatura são determinadas através do ajuste de dados experimentais dos valores de sucção controlada do papel filtro determinados diretamente por diferentes técnicas experimentais e modelagem matemática. As curvas de calibrações bilineares investigadas neste estudo estão apresentadas na Figura 5.1-(a) e na Tabela 5.1-(a), no capítulo 5 deste trabalho, propostas por: ASTM D5298-10, Chandler *et al.* (1992) e Leong *et al.* (2002). Já as calibrações exponenciais investigadas neste estudo são apresentadas na Figura 5.1 (b) e na Tabela 5.1 (b) do capítulo 5, e foram as propostas por: Van Genuchten (1980), Fredlund e Xing (1994) e Bicalho et al. (2015a). Uma revisão bibliográfica detalhada dessas pesquisas que definiram as curvas calibrações investigadas é apresentada nesta seção.

a. ASTM D5298-10

A curva de calibração (trajetória de umedecimento) para estimar sucção matricial pelo método do papel filtro em contato recomendada pela norma ASTM D5298-10 para o papel filtro W42 consistem de duas equações lineares definidas por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, a partir dos dados experimentais de valores de sucção controlada do papel filtro determinados pelas pelas técnicas de Greacen *et al.* (1987) e de Fawcett e Collis-George (1967).

Nos estudos de Fawcett e Collis-George (1967) para obter a calibração do papel filtro W42 foram utilizados 8 lotes desse papel, obtidos em diferentes instituições de pesquisa. Foram calibrados 6 papeis por lote (inicialmente secos ao ar), retirados diretamente da caixa, a partir de técnicas experimentais de imposição de sucção para 9 valores diferentes de sucção conhecidas. A média do w_f medidos para cada papel é obtida e relacionada com a correspondente sucção controlada por diferentes técnicas experimentais. A calibração do papel (trajetória de umedecimento) para diferentes valores de sucção (1<s<91.000kPa) foi determinada diretamente utilizando equipamentos convencionais, a 22°C através das técnicas de placa de pressão (valores de sucção até 70 kPa), membrana de pressão (valores de sucção até 1.500 kPa) e dessecador a vácuo (para valores de sucções acima de 5.000 kPa)

Fawcett e Collis-George (1967) apresentaram o desvio padrão dos w_i medidos para cada valor de sucção imposta pelas diferentes técnicas experimentais, a fim de verificar a variabilidade entre os 8 lotes dos papéis ensaiados durante a calibração. Os pesquisadores realizaram testes t (ou Teste LSD de Fisher) ao nível de significância α =5% e α =1% e verificaram a independência das características dos papeis filtros entre os lotes ensaiados. Fawcett e Collis-George (1967) observaram que mesmo ocorrendo diferenças significativas e relativamente altas dos valores de w_i entre os 8 lotes para os valores mais baixos de sucção (1 kPa<s<10 kPa), verificam-se que essas diferenças são de pouca importância prática, uma vez que correspondem a pequenos valores de sucções estimados pelo método do papel filtro. Os pesquisadores argumentaram que o valor da sucção nos solos quando medidos em campo normalmente são maiores que 30 kPa.

Greacen *et al.* (1987) mostraram que para os baixos valores de sucções controladas (s<50 kPa) do papel filtro obtidos em Fawcett e Collis-George (1967) para calibração do papel utilizada no método do papel filtro, existe uma alta variabilidade no intervalo dos valores de *w_f* correlacionados (50%<*w_f*<195%) para diferentes lotes de papel ensaiados. Nesse sentido, Greacen *et al.* (1987) obtiveram em seus estudos uma outra calibração para os valores de s<50 kPa. Os pesquisadores utilizaram a técnica da placa de sucção. Essa técnica foi realizada para um único lote do papel filtro W42 para 6 papéis do lote ensaiado. Os valores de sucção controlada do papel obtidos pelos pesquisadores abrangeram o intervalo de 10 a 50 kPa no intervalo dos valores correlacionados de *w_f*>45,3%. Os pesquisadores mostraram através de analises estatísticas que a calibração (s<50 kPa) do papel proposta por eles é mais adequada, em comparação com a calibração correspondente de Fawcett e Collis-George (1967).

Nesse sentido, a norma ASTM D5298-10 considerou para os valores de sucção s<50 kPa, os dados experimentais determinados por Greacen *et al.* (1987) e para os valores de sucção s>50 kPa os dados experimentais obtidos em Fawcett e Collis-George (1967) utilizados na calibração bilinear do papel filtro W42 (trajetória de umedecimento) proposto para o método do papel filtro em contato para estimar indiretamente sucção matricial de solos não saturados.

b. Leong *et al.* (2002)

Leong et al. (2002) apresentaram duas curvas de calibração utilizadas no método do papel filtro mostradas anteriormente na Figura 3.8. Uma foi obtida pela técnica de placa de pressão (sucção matricial) e outra usando soluções salinas (sucção total). Os pesquisadores sugerem que para altas sucções (superiores a 1.000 kPa) o fluxo de umidade transferido para o papel filtro ocorre na maior parte do tempo por fluxo de vapor. Leong et al. (2002) recomendaram a utilização de curvas de calibrações diferentes para determinação da sucção matricial (método do papel filtro em contato) e sucção total (método do papel filtro sem contato).

Leong et al. (2002) apresentaram uma comparação estatística (soma dos quadrados dos resíduos) entre calibrações avaliadas e obtida em seus estudos para estimar

sucção matricial nos solos pelo método do papel filtro em contato. A curva de calibração (trajetória de umedecimento) composta por duas equações lineares (bilinear) proposta pelos pesquisadores forneceu, entre as calibrações exponenciais propostas por Van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994), o melhor ajuste obtido.

Leong et al. (2002) utilizou na calibração do papel filtro proposto para o método do papel filtro em contato para estimar indiretamente sucção matricial de solos não saturados, os dados experimentais dos valores de sucção controlada do papel obtidos pela técnica da placa de pressão para o papel filtro W42 inicialmente seco (trajetória de umedecimento). A curva de calibração proposta foi determinada por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados utilizando os dados experimentais.

c. Chandler *et al.* (1992)

A calibração (trajetória de umedecimento) proposta por Chandler *et al.* (1992) utilizada para estimar sucção matricial em solos é determinada por diferentes técnicas experimentais de imposição de sucção do papel. A calibração $s-w_f$ é definida por uma função bilinear com o ponto de inflexão para w_f igual a 47%. Foi apresentada uma equação logarítmica para o ponto de inflexão ($w_f > 47\%$) para baixos valores de sucções. Observa-se que o ponto de inflexão definida é exatamente a mesma determinada por Chandler e Gutierrez (1986).

Chandler e Gutierrez (1986) apresentaram uma curva de calibração para o papel filtro W42 para estimar sucção matricial para 80 kPa<s<6.000 kPa. A calibração do papel incluía seus próprios dados experimentais dos valores de sucção controlada do papel e também os dados experimentais obtidos por Fawcett e Collis-George (1967) e em Hamblin (1981). Ambos pesquisadores utilizam uma variedade de técnicas de imposição de sucção para distintos dados experimentais de valores de sucção obtidos (placa de pressão, membrana de pressão e dessecador). Os dados experimentais obtidos por Chandler e Gutierrez (1986) para calibração do papel tiveram boa concordância com a curva de calibração proposta por Fawcett e Collis-George (1967) utilizada no método do papel filtro para estimar sucção em solos.

Posteriormente, Chandler *et al.* (1992) apresentaram uma curva de calibração para o papel filtro W42 para estimar sucção para baixos valores (s<80 kPa). A calibração também incluiu pontos obtidos por Fawcett e Collis-George (1967) e Hamblin (1981) (Marinho e Oliveira, 2006). O ajuste da calibração dos dados experimentais de valores de sucção controlada do papel filtro foi obtido por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados.

d. Bicalho et al. (2015a)

Bicalho *et al.* (2015a) apresentaram uma única equação de calibração exponencial para o papel filtro W42 utilizada no método do papel filtro em contato para estimar sucção matricial em solos não saturados. A função exponencial apresenta uma transição suave entre a parte inferior da curva de calibração (altos valores de w_i) e a parte superior da curva de calibração (baixos valores de w_i). Essa transição suave entre os altos e baixos valores de sucções ocorre no intervalo de 30 < s < 30.000 kPa.

A equação exponencial proposta por Bicalho *et al.* (2015a) utilizadas no método do papel filtro apresenta a função com melhor ajuste obtido para os dados artificiais de sucções obtidos por regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados. Os dados artificiais de sucção foram determinados a partir de incrementos de 1% para valores de w_f (w_{fi} em %, i=1..n) adotados e aplicados em três calibrações bilineares (ASTM D5298-10; Leong *et al.*, 2002; Chandler *et al.*,1992). Essas calibrações bilineares (seis equações) predeterminadas são as mesmas investigadas neste estudo para o papel filtro W42.

e. Van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994)

Várias funções foram publicadas na literatura para descrever a curva de retenção da água no solo. As equações das curvas de retenção definem a relação entre sucção e o conteúdo de água no solo (trajetória de secagem) e têm sido utilizadas e reavaliadas para estimar propriedades dos solos não saturados. Especificamente, as funções de van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994) são frequentemente utilizadas para descrever a curva de retenção da água no solo.

Leong et al. (2002) apresenta em seus estudos as curvas de retenção de água no solo propostas por van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994) parametrizadas para o papel filtro W42 para estimar indiretamente sucção matricial em solos não saturados pelo método do papel filtro em contato. Essas equações apresentam a forma sigmoidal geral das curvas de retenção de água no solo.

Recomenda-se cautela ao utilizar as curvas de retenção de água no solo publicadas na literatura (originalmente obtidas para trajetórias de secagem) como curvas de calibração do papel (trajetória de umedecimento). Além disso, o grau residual de saturação observado nas curvas de retenção de água no solo não deve ser incluído para calibrações utilizadas no método do papel filtro devido à limitada faixa de medição do método.

3.4 Métodos Estatísticos

Para a revisão bibliográfica dos métodos estatísticos aplicados neste trabalho, utilizou-se os estudos de: Peternelli e Mello (2007); Murray (1994); Wilks (2006); Meyer (1983); Bussab e Morettin (2011); Naggetini e Pinto (2007); Torman *et al.* (2012); Bonat, *et al.* (2013).

3.4.1 Regressão Linear

O comportamento de uma variável dependente *y* como uma função de variáveis independentes *x* são usados para descrever os modelos de regressão. Com os modelos de regressão busca-se encontrar e descrever padrões de homogeneidade dentre a heterogeneidade observada em um conjunto de observações de *y*. O estudo de uma série de problemas práticos, em diversas áreas, pode ser formatado sob esta abordagem, o que faz com que os modelos de regressão sejam largamente adotados e, provavelmente, a mais utilizada dentre as metodologias estatísticas (Bonat, *et al*, 2013).

A regressão linear permite (i) explicar o comportamento de y; (ii) quantificar a influência das condicionantes em y; (iii) selecionar, mediante algum critério, as condicionantes relevantes; (iv) predizer o comportamento de y para estados

observados e também não observados das condicionantes x; (v) avaliar a incerteza associada a esse processo.

Os modelos de regressão linear são classificados como: (i) modelo de regressão linear simples; (ii) modelo de regressão intrinsecamente linear aqueles que, por meio de alguma transformação, tornam-se lineares, ou seja, são linearizáveis; e (iii) modelo de regressão não linear. Neste trabalho foram abordados os modelos de regressão linear simples e de regressão intrinsecamente Linear.

3.4.1.1 Modelo de regressão linear simples

O modelo de regressão linear simples é definido como a relação linear entre os dados observados ou medidos de uma variável dependente y e uma variável independente x. A análise de regressão linear estuda a relação entre essas variáveis. A equação representativa do modelo de regressão linear simples é definida pela Equação 3.3:

$$y = \alpha + \beta x + \varepsilon \tag{3.3}$$

Onde y é o valor observado da variável dependente, x é o valor observado da variável independente, ε é o resíduo ou erro residual da regressão e α e β são os coeficientes do modelo.

O coeficiente α representa o ponto em que a reta corta o eixo y quando x=0 e é chamado de intercepto ou coeficiente linear. O coeficiente β representa a inclinação da reta, expressando a taxa de mudança em y, ou seja, indica a mudança na média da distribuição de probabilidade de y para um aumento de uma unidade na variável x. Os coeficientes α e β da reta teórica são estimados através dos dados observados ou medidos fornecidos pela amostra (y e x da Equação 3.3), obtendo uma reta estimada na forma da Equação 3.4:

$$\hat{\mathbf{y}}_{i} = \mathbf{a} + \mathbf{b}\mathbf{x}_{i} \tag{3.4}$$

Onde \hat{y}_i (i=1...n) é o valor estimado da variável dependente, x_i (i=1...n) é o valor observado da variável independente, a é a estimativa do coeficiente α da Equação 3.3 (α ~a) e b é a estimativa do coeficiente β da Equação 3.3 (β ~b)

Supondo que existe efetivamente uma relação linear entre x e y, coloca-se a questão de como estimar os parâmetros α e β (Equação 3.3). Karl Gauss, entre 1777 e 1855, propôs estimar esses parâmetros visando minimizar a soma dos quadrados dos resíduos (erros residuais) da equação representativa da regressão (Equação 3.3), definido pelo processo do método dos mínimos quadrados.

3.4.1.2 Modelo de regressão intrinsecamente linear

Por definição, um modelo de regressão é não linear se pelo menos um dos seus parâmetros aparecem de forma não linear: exponenciais, potenciais ou recíprocas. E o modelo de regressão é considerado intrinsecamente linear se o modelo de regressão não linear puder ser reduzido a um modelo linear por meio de uma parametrização apropriada. O termo intrinsecamente linear é utilizado para referir-se a funções que podem ser linearizadas via alguma transformação, expresso por uma função do 1º grau (linha reta).

No modelo de regressão intrinsecamente Linear, não pode ser considerada uma relação linear entre a variável dependente y e a variável independente x como é definido para o modelo de regressão linear simples (Equação 3.3), pois não existe combinação linear dos parâmetros. Porém, a equação não linear representativa do modelo de regressão intrinsecamente Linear pode sofrer ajuste linear mediante o uso de transformações adequadas, definidas em determinados casos. Como por exemplo, no caso em que o modelo de regressão intrinsecamente Linear é descrita na forma exponencial (não linear) determinada por:

$$Y = AX^b \varepsilon' \tag{3.5}$$

Comprova-se que essa equação pode sofrer ajuste linear, uma vez que ela é considerada intrinsecamente linear. Nesse caso, a seguinte transformação logarítmica pode ser observada:

$$\ln Y = \ln(AX^b \,\varepsilon')$$

$$\ln Y = \ln A + \ln(X^b) + \ln \varepsilon'$$

$$\ln Y = \ln A + b \ln X + \ln \varepsilon'$$
(3.6)

Alterando as variáveis de forma dessa resolução de acordo com notações dadas por:

$$\alpha = \ln A; \beta = b; \ y = \ln Y; \ x = \ln X; \ \varepsilon = \ln \varepsilon'.$$
 (3.7)

A Equação 3.5 se transforma na função da reta transformada representativa do modelo de regressão intrinsecamente Linear definida pela Equação 3.3. De forma análoga, existem muitas outras funções não lineares que podem ser transformadas para uma função do 1º grau (linha reta). E a maior vantagem do modelo de regressão intrinsecamente Linear é que os coeficientes das retas representativas transformadas podem ser estimados de imediato por meio do método dos mínimos quadrados. E o princípio do método dos mínimos quadrados aplicado ao modelo de regressão intrinsecamente Linear se torna equivalente ao aplicado no modelo de regressão linear simples.

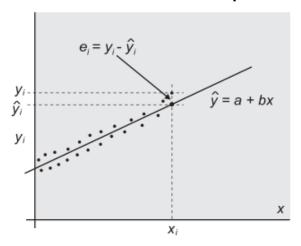
Destaca-se que a distribuição do erro residual (resíduos) não será alterada, ou seja, mesmo que exista o inconveniente de uma transformação linear qualquer, os erros residuais do modelo original (não linear) irão satisfazer as suposições usuais de normalidade, independência e homogeneidade da variância.

3.4.1.3 Método dos mínimos quadrados

O método dos mínimos quadrados é uma técnica de otimização matemática que busca encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados observados minimizando a soma dos quadrados dos resíduos (diferenças entre os valores estimados e os valores observados). Nesse sentido, o objetivo do método dos mínimos quadrados é definir o ajuste da função de regressão que minimize a soma das distâncias entre os pontos estimados e os pontos observados.

Para a regressão linear, os coeficientes α e β da reta representativa (Equação 3.3) devem ser estimados a partir dos pontos observados (fornecidos por uma amostra) com a finalidade de se obter uma reta estimativa na forma da Equação 3.4.

Figura 3.9 - Reta teórica do método dos mínimos quadrados



Fonte: Naggetini e Pinto (2007)

Observa-se para a Figura 3.9 que a distância entre o valor observado (y) e o valor estimado (\hat{y}) pelo ajuste da reta de regressão é definido pelo erro residual (resíduo):

$$\varepsilon_{i} = y_{i} - \hat{y}_{i} \tag{3.8}$$

Substituindo a Equação 3.8 na Equação 3.4, obtém-se:

$$\varepsilon_{i} = y_{i} - a - bx_{i} \tag{3.9}$$

O método dos mínimos quadrados consiste em minimizar o somatório dos quadrados dos resíduos entre o valor observado e valor estimado do modelo proposto. Para o ponto indexado por i, o desvio quadrático é dado por:

$$\varepsilon_i^2 = (y_i - a - bx_i)^2 = y_i^2 - 2y_i a - 2y_i bx_i + a^2 + 2abx_i + b^2 x_i^2$$
(3.10)

Para todos os n elementos da amostra, o somatório dos quadrados dos desvios é dado por Z=f(a,b), onde:

$$Z = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i^2 - 2a \sum_{i=1}^{n} y_i - 2b \sum_{i=1}^{n} x_i y_i + na^2 + 2ab \sum_{i=1}^{n} x_i + b^2 \sum_{i=1}^{n} x_i^2$$
 (3.11)

Sendo Z=f (a,b), os valores de a e b que minimizam a equação são aqueles obtidos calculando-se as derivadas parciais, em relação aos coeficientes a e b, e igualando-as a zero, isto é:

Mínimo de Z
$$\begin{cases} \frac{\partial Z}{\partial a} = 0\\ \frac{\partial Z}{\partial b} = 0 \end{cases}$$
 (3.12)

Calculando-se as derivadas, obtém-se o seguinte sistema de equações dado por:

$$\begin{cases} \frac{\partial Z}{\partial a} = -2\sum_{i=1}^{n} y_i + 2na + 2b\sum_{i=1}^{n} x_i = 0\\ \frac{\partial Z}{\partial b} = -2\sum_{i=1}^{n} x_i y_i + 2a\sum_{i=1}^{n} x_i + 2b\sum_{i=1}^{n} x_i^2 = 0 \end{cases}$$
(3.13)

Multiplicando as equações do sistema anterior por (-1/2) encontra-se as equações normais da regressão linear:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} y_{i} - na - b \sum_{i=1}^{n} x_{i} = 0 \\ \sum_{i=1}^{n} x_{i} y_{i} - a \sum_{i=1}^{n} x_{i} - b \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{2} = 0 \end{cases}$$
(3.14)

A resolução do sistema de equações normais permite a estimativa dos parâmetros da equação representativa modelo de regressão linear a partir dos dados amostrais (Naggetini e Pinto, 2007):

$$\begin{cases} a = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} - b \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} = \overline{y_i} - b \overline{x_i} \\ b = \frac{n \sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} y_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} x_i)^2} \end{cases}$$
(3.15)

Onde, y_i (i=1...n) é o valor observado da variável dependente, \bar{y} é o valor da média dos valores observados da variável dependente, x_i (i=1...n) é o valor observado da variável independente, \bar{x} é o valor da média dos valores observados da variável independente, sendo n corresponde ao número de observações.

3.4.1.4 Coeficiente de determinação

Uma das formas de avaliar a qualidade do ajuste do modelo de regressão linear é através do cálculo do coeficiente de determinação (R²), definido pela Equação 3.16:

$$R^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_{i} - \bar{y})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \bar{y})^{2}} = \frac{SQR}{SQT}$$
(3.16)

Onde, y_i (i=1...n) é o valor observado da variável dependente, $\widehat{y_i}$ (i=1...n) é o valor estimado da variável dependente pela regressão linear e \overline{y} é o valor da média dos valores observados da variável dependente, sendo n corresponde ao número de observações.

R² é a razão entre a soma dos quadrados da regressão (SQR) e a soma dos quadrados total (SQT). O R² é sempre positivo (varia entre 0 e 1) e deve ser interpretado como a proporção da variância total da variável dependente y que é explicada pelo modelo de regressão. Em outras palavras, o R² indica o quanto o modelo de regressão consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R², mais explicativo é o modelo e melhor o modelo se ajusta à amostra (valores observados).

3.4.2 Avaliação da regressão linear

Realiza-se a avaliação da regressão linear para o modelo de regressão linear simples e o modelo de regressão intrinsecamente Linear verificando-se as hipóteses da regressão, ou seja, avalia-se a linearidade entre as variáveis x e y, a independência dos resíduos e se estes seguem uma distribuição normal com média zero e variância constante. As hipóteses do modelo de regressão precisam ser validadas para que os resultados dos ajustes obtidos sejam confiáveis.

Os testes de hipóteses possuem a condição definida para duas hipóteses (H_0 e H_1) de conteúdos excludentes entre si. A conclusão de aceitar ou rejeitar H_0 dependerá da comparação do valor-p para determinada estatística. O valor-p é obtido por meio de ferramentas estatísticas computacionais, com o nível de significância (α) arbitrado. E caso o valor-p seja superior ao nível de significância, se aceita H_0 , caso contrário, rejeita-se H_0 e se aceita H_1 com o nível de confiança arbitrado (geralmente 95%).

3.4.2.1 Teste t

A linearidade do modelo da regressão linear pode ser avaliada por meio do gráfico de dispersão entre as variáveis x e y e pelo exame do valor da estimativa do coeficiente de correlação de Pearson. A existência de relação linear entre as variáveis x e y também pode ser avaliada a partir de um teste de hipótese sobre o coeficiente angular β da Equação 3.3. A hipótese nula e a alternativa podem ser expressas da seguinte forma:

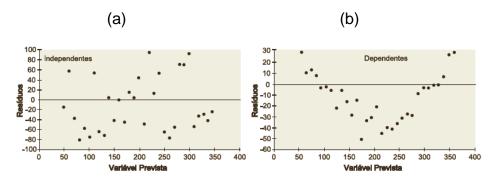
 H_0 : β = 0 (não existe relação linear) H_1 : β ≠ 0 (existe relação linear)

A estatística do teste t de Student aplicada é igual à diferença entre a inclinação estimada a partir dos dados observados, b, e a inclinação dos dados observados, β , dividida pelo desvio padrão da inclinação.

3.4.2.2 Análise dos resíduos

Avalia-se a distribuição dos resíduos ou erros residuais quanto a sua (i) independência e (ii) normalidade (média zero e variância constante). A independência dos resíduos pode ser verificada a partir de gráficos residuais em relação à variável estimada, y e x. A Figura 3.10 ilustra duas situações: (a) uma onde se verifica a independência dos resíduos e a outra (b) na qual se observa a ocorrência de dependência dos resíduos.

Figura 3.10 - Exemplos de gráficos residuais (a) da distribuição independente dos resíduos (b) da ocorrência de dependência dos resíduos

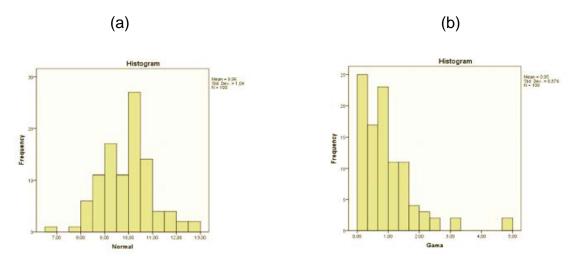


Fonte: Naggetini e Pinto (2007)

No gráfico residual torna-se possível também observar a variância dos resíduos. Para tanto, os pontos do gráfico devem distribuir-se de forma aleatória em torno da reta que corresponde ao resíduo zero, formando uma faixa horizontal de largura uniforme, em que o pressuposto de variância constante é atendido. Caso contrário, se os pontos do gráfico são observados distribuídos formando um faixa de largura variável a variância do modelo não é constante.

Para verificação da distribuição de normalidade dos resíduos utiliza-se o histograma. O histograma é um gráfico de barras justapostas em que no eixo horizontal está a variável de interesse dividida em classes e no eixo vertical a frequência da classe correspondente. Através do histograma, busca-se verificar se a forma de sino da distribuição normal dos resíduos está presente. Na Figura 3.11, apresentam-se dois exemplos de histogramas onde, na Figura 3.11-(a) os dados distribuídos sugerem a forma de sino, e na Figura 3.11-(b) os dados não possuem forma de sino. Verifica-se que a forma simétrica da normal está presente apenas na Figura 3.11-(a).

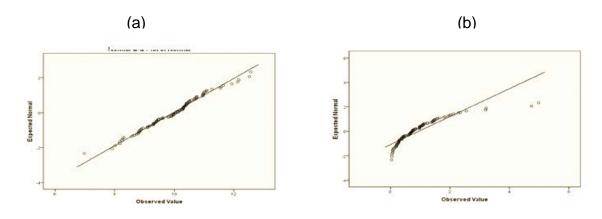
Figura 3.11 - Exemplos de Histogramas (a) da distribuição normal dos resíduos (b) da distribuição não normal dos resíduos



Fonte: Torman et al. (2012)

Outro gráfico que pode ser utilizado para avaliar a normalidade de uma variável é o gráfico Quantil-Quantil, ou Q-Q Plot. Nesse gráfico, no eixo horizontal têm-se os valores observados da variável e, no eixo vertical, os valores estimados. Caso a variável tenha distribuição normal, os pontos do gráfico devem estar próximos à reta de referência apresentada no QQ-Plot. Na Figura 3.12, tem-se dois exemplos de Q-Q Plots. Na Figura 3.12-(a) os dados obtidos se aproximam bem da reta e sugerem uma distribuição normal. Na Figura 3.12-(b) verifica-se que os pontos da variável possuem um grande desvio da reta referência, ou seja, não sugerem uma distribuição normal dos dados.

Figura 3.12 – Exemplos de Q-Q plots (a) da distribuição normal dos resíduos (b) da distribuição não normal dos resíduos



Fonte: Torman et al.(2012)

3.4.2.3 Teste de Shapiro-Wilk

A hipótese de normalidade pode ser testada recorrendo a testes de normalidade tais como o teste Kolmogorov-Smirnov, o teste da Normalidade de Lilliefors, o teste de Anderson-Darling, o teste de Shapiro-Wilk ou o teste de Ryan-Joiner. Os testes de normalidade verificam se a distribuição de probabilidade associada aos dados de interesse pode ser aproximada pela distribuição normal dos mesmos. Neste estudo foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk (SW). O teste de Shapiro-Wilk, além de ser muito adequado para esse tipo de análise, é indicado para a quantidade de dados avaliados.

Para realizar o teste de Shapiro-Wilk, a formulação da hipótese é expressa da seguinte forma:

H₀: Os dados observados provêm de distribuição normal

H₁: Os dados observados não provêm de distribuição normal

A estatística do teste Shapiro-Wilk (SW), é definida como:

$$SW = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$
 (3.17)

Onde, $x_i(i=1...n)$ são os valores observados da amostra, ordenados, e a constante b é determinada pelo sistema de equações:

$$b = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i), n \notin par \\ \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i), n \notin impar \end{cases}$$
(3.18)

Onde, a_(n-i+1) (i=1...n) são constantes obtidas pelas médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem de uma amostra de tamanho n de uma distribuição normal.

3.4.3 Quantificação da variabilidade residual

A quantificação da variabilidade residual dos modelos de regressão linear analisados refere-se a quantificar a variabilidade entre os valores observados e estimados. Para a quantificação da variabilidade do erro residual aplicam-se os índices estatísticos: (i) o erro médio (*ME*) e (ii) raiz quadrada do erro médio (*RMSE*). É dada preferência ao uso de siglas em língua inglesa para a identificação desses erros por ser uma melhor conformação à literatura científica disponível atualmente.

A correspondência ponto a ponto entre a solução numérica dos valores observados e os valores estimados de uma mesma variável, proporciona um teste quantitativo para medir a capacidade do modelo estimado em reproduzir ou prever dados observados.

a. Erro médio (*ME*)

A medida mais simples derivada do erro residual (Equação 3.5) é definida como o Erro Médio (*ME* em Inglês) ou tendência. O erro médio mede a tendência do modelo superestimar ou subestimar o valor estimado em relação ao valor observado, indicando a direção do erro entre esses valores. O erro médio (*ME*) é definido como:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - y_i)$$
 (3.19)

Onde, \hat{y}_i (i=1...n) corresponde a um dado valor estimado e y_i (i=1...n) corresponde a um dado valor observado, em um mesmo ponto i (i=1...n) para n pontos avaliados.

O erro médio (*ME*) não traz informação a respeito dos erros individuais e, portanto, não pode ser usado como medida de acurácia do modelo. Além disso, apesar de fornecer uma ideia da tendência ou erro sistemático, o erro médio é afetado pelo fato de que erros individuais positivos e negativos de mesma magnitude se cancelam na somatória, o que geralmente leva à subestimação do erro das simulações.

b. Raiz quadrada do erro médio (*RMSE*)

Segundo Wilks (2006), uma medida frequentemente usada na verificação da acurácia de modelos numéricos estimados é o Erro Quadrático Médio (*MSE* na sigla em Inglês). O erro quadrático médio (*MSE*) é similar ao erro médio (ME), porém mais sensível aos grandes erros, por elevar as diferenças individuais ao quadrado. O MSE é sempre positivo. Um MSE nulo (MSE = 0) indica simulação perfeita. O MSE é definido como:

MSE =
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - y_i)^2$$
 (3.20)

Onde, \hat{y}_i (i=1...n) corresponde a um dado valor estimado e y_i (i=1...n) corresponde a um dado valor observado em um mesmo ponto i (i=1...n) para n pontos avaliados.

Em adição, a raiz quadrada do erro médio (*RMSE* em Inglês) é comumente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos estimados com a vantagem de que a raiz quadrada do erro médio (*RMSE*) apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. A raiz quadrada do erro médio (*RMSE*) mede a amplitude do erro entre os valores estimados e os valores medidos e são definidos segundo a Equação 3.21:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\hat{y} - y_i)^2}$$
 (3.21)

Onde, \hat{y}_i (i=1...n) corresponde a um dado valor estimado e y_i (i=1...n) corresponde a um dado valor observado, em um mesmo ponto i (i=1...n) para n pontos avaliados.

3.4.4 Intervalo de Confiança

Os intervalos de confiança (IC) são usados para indicar a confiabilidade de um valor previsto, y. A ideia é construir o intervalo de confiança (IC) com nível de confiança de 1-α (expresso em %), no qual estará contido o valor previsto de y, calculado para certo valor especificado de x. Os limites máximo e mínimo (adição ou subtração do valor nos intervalos de confiança) em relação aos valores previstos são definidos pelo IC.

O intervalo de confiança (IC) para um valor da variável dependente a ser previsto, \hat{y}_i ', utilizando um valor x_i ', é estimado por:

IC =
$$t_{1-\frac{\alpha}{2},n-2}\sigma_e \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i' - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$
 (3.22)

Onde, x_i (i=1...n) corresponde ao valor observado, x_i '(i=1...n) ao valor previsto, \bar{x} é o valor da media dos valores observados, n é o número de pontos avaliados, t é o valor do t de Student para (1- α /2) e (n-2) graus de liberdade, e σ_e é o desvio padrão da estimativa determinado por:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \hat{y}_i')^2}{n-2}}$$
 (3.23)

Onde, \hat{y}_i (i=1...n) é o valor estimado, \hat{y}_i (i=1...n) é o valor previsto e n é o número de pontos avaliados.

O intervalo de confiança (Equação 3.22) considera o valor da variabilidade dos valores observados e estimados com os valores previstos, bem como a variabilidade

dos valores observados em relação a seu valor médio. A teoria estatística diz que quanto menor forem os limites do intervalo de confiança melhor é a confiabilidade da distribuição (Bussab e Morettin, 2011).

4 METODOLOGIA

Nesta pesquisa busca-se avaliar curvas de calibrações "s-w-f" (sucção-teor de umidade gravimétrico do papel filtro) previamente publicadas na literatura para o papel filtro W42 inicialmente secos ao ar (trajetórias de umedecimento) pelo método do papel filtro em contato para estimar indiretamente sucção matricial em diferentes tipos de solos e intervalos de variação de sucção por meio de métodos estatísticos. As várias curvas de calibrações (equações bilineares e exponenciais) são determinadas através do ajuste de dados experimentais dos valores de sucção controlada do papel filtro determinados diretamente por diferentes técnicas experimentais e modelagem matemática.

As diferentes técnicas experimentais para calibração do papel filtro permitem que o papel inicialmente seco ao ar (trajetória de umedecimento) atinja o equilíbrio hidráulico com uma sucção controlada em um ambiente fechado. Após o equilíbrio ser alcançado, o teor de umidade gravimétrico do papel filtro é obtido e relacionado com a sucção controlada do papel. Avaliam-se os ajustes das funções de calibrações investigadas, obtidos por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, para os valores de sucção controlada do papel filtro, determinados por técnicas experimentais diferentes, e seus respectivos w_f por cada pesquisador. A avaliação das curvas de calibração investigadas segue conforme o fluxograma da Figura 4.1.

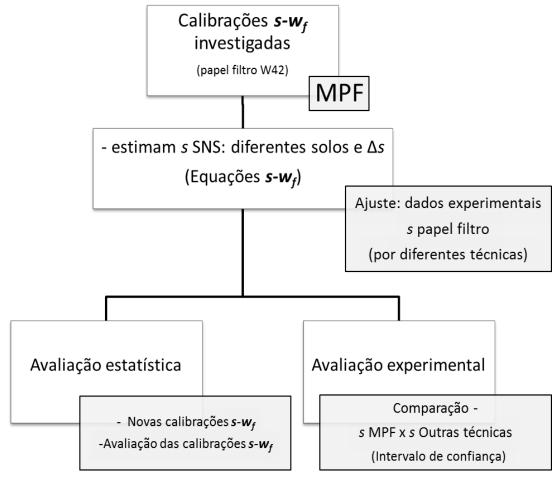


Figura 4.1- Fluxograma da avaliação das calibrações investigadas

As calibrações investigadas utilizadas no método do papel filtro para estimar sucção matricial são agrupadas de acordo com modelagem matemática (forma da função) dos ajustes dos dados experimentais de valores de sucção controlada do papel filtro determinados por diferentes técnicas experimentais de imposição de sucção relacionados com seus respectivos w_f medidos: (i) calibrações bilineares, composta por duas equações lineares de acordo com seus respectivos pontos de inflexão; (ii) calibrações exponenciais, composta por apenas uma única equação contínua e não linear. A avaliação estatística e a análise comparativa (avaliação experimental) entre o método do papel filtro e diferentes técnicas experimentais realizadas para as curvas de calibrações (equações bilineares e exponenciais) investigadas neste trabalho são descritas nas próximas seções.

A ASTM D5298-10 determina que a sucção estimada a partir da curva de calibração utilizada no método do papel filtro obtida como a média de valores de sucções

medidas utilizando dois papéis a partir do w_f obtido seja descartada se a diferença entre os valores de sucção dos dois papéis filtro ensaiados exceder 0,5 log(s). Inicialmente, verificou-se a validade das calibrações investigadas a partir das faixas de erro definidas como ASTM D5298-10 \pm 0,25 log(s). Essas faixas de erro foram traçadas juntamente com as equações das calibrações investigadas, conforme metodologia realizada em Bicalho *et al.* (2015b).

Neste trabalho determinam-se novas calibrações exponenciais mais adequadas para estimar sucção matricial pelo método do papel filtro em contato utilizando dados experimentais de valores de sucção controlada do papel filtro que foram determinados por diferentes técnicas de imposição de sucção e seus correlacionados *w_f* medidos. Os dados experimentais são extraídos de publicações predeterminadas para o papel filtro W42 e são os dados originais que foram utilizados na obtenção das calibrações investigadas, diferente do que ocorre em Cupertino (2013) que utilizou dados artificiais obtidos a partir de funções de calibração previamente selecionadas para os intervalos de sucção definidos pela publicação correspondente. Além disso, em Cupertino (2013) foram realizadas análises estatísticas quantificando a variabilidade entre as calibrações propostas em seus estudos em comparação com as calibrações publicadas selecionadas. Neste trabalho avaliam-se o ajuste de calibrações investigadas por meio de métodos estatísticos aplicados aos dados experimentais dos valores de sucção impostas por diferentes técnicas experimentais. Dessa forma, destaca-se a diferença na análise de curvas de calibração utilizadas no método do papel filtro para estimar a sucção matricial em solos não saturados realizada neste trabalho em relação ao estudo de Cupertino (2013).

4.1 Avaliação estatística

A avaliação estatística das curvas de calibrações (equações bilineares e exponenciais) investigadas neste trabalho para estimar sucção matricial em solos não saturados pelo método do papel filtro em contato é realizada utilizando dados experimentais de valores de sucção controlada do papel filtro determinados por diferentes técnicas usadas na obtenção das curvas de calibrações investigadas.

Avalia-se o ajuste das calibrações investigadas por meio de métodos estatísticos aplicados aos dados experimentais (sucção controlada por diferentes técnicas experimentais em equilíbrio hidráulico relacionada com o w_f medido) e dados estimados (sucção estimada pela equação de calibração investigada utilizando o w_f previamente determinado), sob dois pontos de vista: (i) determinam-se novas calibrações exponenciais para o papel filtro W42 utilizadas no método do papel filtro em contato para estimar sucção matricial em solos não saturados; (ii) avalia-se o ajuste das equações investigadas e das novas equações propostas neste trabalho (equações bilineares e exponenciais) utilizadas no método do papel filtro para estimar sucção em solos não saturados.

Obtenção de novas calibrações propostas neste trabalho

Determinam-se novas calibrações exponenciais mais adequadas para estimar sucção matricial pelo método do papel filtro em contato utilizando dados experimentais de valores de sucção controlada do papel filtro determinados por diferentes técnicas de imposição de sucção e seus correlacionados w_f medidos na obtenção de calibrações bilineares predeterminadas para o papel filtro W42.

As novas calibrações exponenciais (trajetória de umedecimento) são obtidas pelo método dos mínimos quadrados aplicados a um modelo de regressão intrinsecamente linear para um ajuste exponencial. Utilizam-se os valores de sucção controlada do papel filtro determinados por técnicas experimentais diferentes de imposição de sução relacionados aos w_f medidos (dados experimentais). Os dados experimentais foram obtidos nos estudos das calibrações bilineares predeterminadas para o papel filtro W42.

Para uma escala semi logarítmica, determina-se a existência de um comportamento não linear (exponencial) entre os valores experimentais. Nesse sentido, os modelos propostos neste trabalho para novos ajustes das calibrações utilizadas no método do papel filtro são exponenciais, com uma transição suave entre os altos e baixos valores de sucções estimados.

Por se tratar de modelo de regressão intrinsecamente Linear, a transformação logarítmica utilizada é definida na equação 4.1.

$$\log(s) = Ae^{bw_f} \varepsilon' \tag{4.1}$$

Onde, s é o valor observado da sucção controlada do papel filtro determinado por diferentes técnicas experimentais expresso em kPa, w_f é o teor de umidade gravimétrico medido do papel filtro expresso em %, A e b são os parâmetros da equação exponencial e ε' é o erro residual.

Comprova-se que essa equação pode sofrer ajuste linear, uma vez que ela é considerada intrinsecamente linear. Nesse caso, a transformação logarítmica pode ser observada:

$$\ln(\log s) = \ln(Ae^{bw_f}\varepsilon')$$

$$\ln(\log s) = \ln A + bw_f \frac{\ln e}{\ln e} + \ln \varepsilon'$$

$$\ln(\log s) = \ln A + bw_f + \ln \varepsilon'$$
(4.2)

Alterando as variáveis de forma dessa resolução de acordo com notações dadas por $\alpha = \ln A$; $\beta = b$; $\tilde{s} = \ln \log s$; $\epsilon = \ln \epsilon'$. A reta representativa do modelo de regressão intrinsecamente Linear é definida por:

$$\tilde{\mathbf{s}} = \alpha + \beta w_f + \varepsilon \tag{4.3}$$

Onde, \tilde{s} é a variável transformada de $\ln(\log s)$, α e β são os coeficientes da reta ajustada e ε é o resíduo ou erro residual da regressão.

Em sequência, estimam-se os coeficientes do modelo de regressão intrinsecamente Linear por meio do método dos mínimos quadrados, trabalhando com a variável transformada \tilde{s} e utilizando a resolução do sistema de equações definida pela Equação 3.14. São substituídos \tilde{s} e w_f , na fórmula dos estimadores pontuais a e b (Equação 3.15) e a solução do sistema de equações resulta no modelo exponencial, tal que:

$$\tilde{s} = e^{\alpha} e^{\beta w_f} \tag{4.4}$$

Alterando as variáveis, de acordo com notações definidas por $A=e^{\alpha}$; $e^{-\tilde{s}}=\ln \log s$). Define-se a função do ajuste exponencial utilizado neste trabalho para as novas calibrações $s-w_f$ propostas:

$$\widehat{\log s} = A. e^{\beta w_f} \tag{4.5}$$

Onde s é o valor estimado da sucção do método do papel filtro expresso em kPa, w_f é o teor de umidade gravimétrico medido do papel filtro expresso em % e A e B são os coeficientes da equação exponencial.

O intervalo das sucções estimadas do método do papel filtro de determinada calibração exponencial proposta neste estudo é definido a partir dos dados experimentais obtidos por diferentes técnicas experimentais previamente publicados e são apresentados no capítulo 5 dos resultados desta dissertação para cada calibração exponencial obtida.

Métodos estatísticos utilizados para análise das calibrações

As curvas de calibrações para o papel filtro W42 investigadas neste estudo compreendem as calibrações (equações bilineares e exponenciais) previamente publicadas e selecionadas e as calibrações exponenciais propostas neste estudo para estimar sucção matricial em solos pelo método do papel filtro em contato. As curvas de calibrações (trajetória de umedecimento) são determinadas através do ajuste de dados experimentais dos valores de sucção controlada do papel filtro determinados diretamente por diferentes técnicas experimentais e modelagem matemática.

Avaliam-se o ajuste das calibrações investigadas utilizadas no método do papel filtro para estimar sucção em solos não saturados por meio de métodos estatísticos, aplicados aos dados experimentais (sucção controlada por diferentes técnicas

experimentais em equilíbrio hidráulico relacionada com o w_f medido) e dados estimados (sucção estimada pela equação de calibração investigada utilizando o w_f medido previamente determinado).

Avalia-se a qualidade do ajuste das equações das calibrações investigadas a partir do cálculo o coeficiente de determinação, R² (varia entre 0 e 1) definido por:

$$R^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\widehat{\log s_{i}} - \overline{\log s})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (\log s_{i} - \overline{\log s})^{2}}$$
(4.6)

Onde, s_i (i=1...n) é o valor observado da sucção controlada do papel filtro determinado por diferentes técnicas experimentais expresso em kPa, $\widehat{s_i}$ (i=1...n) é o valor estimado da sucção do método do papel filtro pela calibração investigada expresso em kPa e \overline{s} é a média dos valores observados da sucção do papel expresso em kPa, n corresponde ao número de observações.

Quanto maior o R², mais explicativo é a calibração do papel investigada utilizada no método do papel filtro e melhor a equação da calibração se ajusta aos valores da sucção controlada do papel filtro determinado por diferentes técnicas experimentais.

Avalia-se se a relação linear (ou intrinsicamente linear) definida por regressão linear, para determinada calibração investigada, é significativa. Esse teste avalia um dos coeficientes das equações investigadas utilizadas no método do papel filtro, ou seja, se os valores de sucção controlada do papel filtro obtidos experimentalmente podem ser linearmente (calibrações bilineares) ou intrinsecamente relacionados (calibrações exponenciais). Determina-se o nível de confiança arbitrado em 95% e aplica-se estatística do teste t de Student. Esses testes são interpretados pela estatística do valor-p, obtidos com o auxílio de ferramentas computacionais, em relação ao nível de significância de 5%.

Os resíduos das calibrações investigadas utilizadas no método do papel filtro para o papel W42 são obtidos pela diferença entre os dados experimentais e os dados estimados. Calculam-se os resíduos ou erro residual ε obtidos das calibrações investigadas utilizadas no método do papel filtro:

$$\varepsilon_i = \log s_i - \widehat{\log s_i} \tag{4.7}$$

Onde, s_i (i=1...n) corresponde ao valor observado da sucção controlada do papel filtro determinado por diferentes técnicas experimentais expresso em kPa, $\widehat{s_i}$ (i=1...n) é o valor estimado da sucção do método do papel filtro pelo ajuste da calibração investigada expresso em kPa.

Os erros residuais do modelo original (não linear) satisfazem as suposições usuais de normalidade, independência e homogeneidade da variância, mesmo após transformação linear. Na análise dos resíduos, obtidos pela Equação 4.1, das calibrações (equações bilineares e exponenciais) do papel W42 investigadas utilizadas no método do papel filtro: (i) Verifica-se a independência dos resíduos através do: (a) Gráfico da distribuição dos resíduos, ε_i em relação ao $\log(s)$ (valor observado da s do papel filtro); e do (b) Gráfico da distribuição dos resíduos através do: (c) Histograma; e do (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (quantil-quantil).

Uma vez que a análise gráfica é subjetiva aplicam-se o teste de Shapiro-Wilk (SW) para avaliar a normalidade da distribuição dos resíduos das calibrações do papel W42 investigadas utilizadas no método do papel filtro com nível de confiança arbitrado em 95%.

Após a determinação do R², do teste t e de análises dos resíduos das calibrações (trajetórias de umedecimento) do papel W42 investigadas é possível identificar quais as calibrações utilizadas no método do papel filtro para estimar sucção matricial que são "estatisticamente válidas".

Quantifica-se a variabilidade dos resíduos das calibrações investigadas neste estudo, identificadas como estatisticamente válidas, para estimar sucção matricial em solos não saturados pelo método do papel filtro. A variabilidade dos resíduos é quantificada com objetivo de realizar uma comparação entre essas equações estatisticamente válidas. Calculam-se os resultados do erro médio (*ME*) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMSE*), determinados por:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} (\log s_i - \widehat{\log s_i})$$
 (4.8)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} (\log s_i - \widehat{\log s_i})}^{2}$$
(4.9)

Onde, s_i (i=1...n) corresponde ao valor observado da sucção controlada do papel filtro determinado por diferentes técnicas experimentais expresso em kPa, $\widehat{s_i}$ (i=1...n) é o logaritmo do valor estimado da sucção do método do papel filtro pelo ajuste da calibração investigada (estatisticamente válida) expresso em kPa.

A partir do valor da raiz quadrada do erro médio (*RMSE*) faz-se uma comparação entre as calibrações investigadas e as estatisticamente válidas. Quanto menor o valor da raiz quadrada do erro médio (amplitude do erro), melhor será o ajuste proposto da calibração para estimar sucção matricial em solos não saturados pelo método do papel filtro.

4.2 Análise comparativa

As curvas de calibração do papel filtro W42 investigadas neste estudo, utilizadas no método do papel filtro, foram obtidas por diversos pesquisadores em diferentes momentos e usando diferentes métodos para impor sucção na obtenção de sua calibração proposta. Torna-se útil e importante comparar os valores de sucção estimados pelo método do papel filtro com os valores de sucção medidos por outras técnicas experimentais para medir sucção em solos não saturados.

A metodologia realizada neste estudo para análise comparativa entre o método do papel filtro e diferentes técnicas experimentais foi proposta em Cupertino (2013). Realiza-se a comparação entre o método do papel filtro utilizando sucções estimadas pelas calibrações investigadas e outras técnicas experimentais para medir sucção em diferentes solos e intervalos de sucção. A Figura 4.2 mostra o detalhamento da metodologia utilizada para a obtenção dos gráficos.

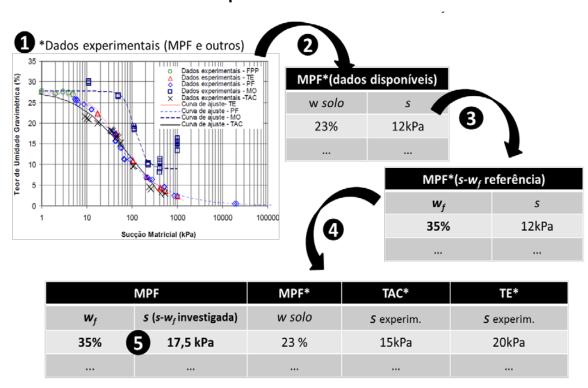


Figura 4.2 - Metodologia para análise comparativa entre o método do papel filtro e diferentes técnicas experimentais

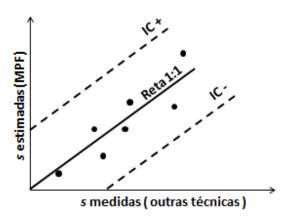
Fonte: Adaptado de Cupertino (2013)

Observam-se na Figura 4.2 que são necessárias cinco etapas principais. Inicialmente dispõe-se de um gráfico (w_s -s) com curvas de retenção de água no solo, previamente publicado, em que se apresentam resultados experimentais obtidos pelo método do papel filtro e por outras técnicas de medir sucção no solo (etapa 1). Através do gráfico w_s -s selecionam-se os pontos disponíveis de medições do solo obtidas pelo método do papel filtro (etapa 2). Na etapa 3, são redefinidos os w_f com a utilização dos valores de sução do solo apresentados para o método do papel filtro, a partir equação da curva de calibração adotada pela referência.

Na Etapa 4 busca-se no gráfico w_s -s, a partir dos valores de w_s disponíveis para o método do papel filtro determinados na etapa 2, os correspondentes valores de s medidos por outras técnicas experimentais. A partir do w_s projeta-se uma reta horizontal, no gráfico w_s -s, onde interceptará os valores dos resultados de s medido por outras técnicas experimentais. Na etapa 5 obtêm-se a sucção (s) estimada pelo método do papel filtro utilizando a calibração investigada neste trabalho, para o valor de w_f redefinido da etapa 3.

Nos diagramas de dispersão utilizados na análise comparativa para os valores de s estimados pelo método do papel filtro e medidos por outras técnicas experimentais adiciona-se uma reta de proporção 1:1, para os valores de s medidos por outras técnicas. A reta de proporção 1:1 indica o melhor resultado possível na análise comparativa entre os resultados experimentais analisados, conforme apresentado na Figura 4.3. Para essa análise comparativa, estima-se o intervalo de confiança (IC) a 80%

Figura 4.3 – Intervalos de confiança



Fonte: Adaptado de Cupertino (2013)

O intervalo de confiança (IC) é o intervalo estimado para os valores previstos da reta com proporção 1:1, determinado por:

IC =
$$t_{1-\frac{0.8}{2},n-2} \sigma_e \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\log s_{Ti}' - \overline{\log s_{Ti}})^2}{\sum_{i=1}^{n} (\log s_{Ti} - \overline{\log s_{Ti}})^2}}$$
 (4.10)

Onde, s_{Ti} é o valor de sucção medido por outras técnicas experimentais expresso em kPa, $s_{Ti'}$ é o valor de sucção previsto (nesse caso, equivalente ao valor s medido) expresso em kPa, $\overline{s_{Ti}}$ é o valor da média da sucção medida expresso em kPa, n é o número de pontos avaliados de acordo com cada análise, t é o valor do t de Student para(1- α /2), sendo α (80% de nível de confiança) e (n-2) graus de liberdade para cada análise e σ_e é o desvio-padrão da estimativa determinado por:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\log \widehat{s_{MPFi}} - \log s_{Ti}')^2}{n-2}}$$
 (4.11)

Onde, $\widehat{s_{MPF}}$ é o valor da sucção estimada do método do papel filtro pela calibração investigada neste estudo expresso em kPa, $s_{Ti}{}'$ (i=1...n) é o valor da sucção prevista (nesse caso, equivalente ao valor sucção medido por outras técnicas experimentais) expresso em kPa e n é o número de pontos avaliados.

Para cada técnica experimental e solos diferentes determinam-se o intervalo de confiança. O intervalo de confiança (IC) é somado e subtraído dos valores obtidos pela reta de proporção 1:1. Os diagramas de dispersão para análise comparativa entre o método do papel filtro e diferentes técnicas experimentais utilizando as curvas de calibrações investigadas neste trabalho, com os respectivos intervalo de confiança e os valores de sucções estimados e medidos, são apresentados no capítulo 5 dos resultados nesta dissertação.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das avaliações estatísticas e análises comparativas experimentais das curvas de calibrações "s- w_f " (sucção-teor de umidade gravimétrico do papel filtro) investigadas neste estudo, previamente publicadas na literatura para o papel filtro W42 inicialmente secos ao ar (trajetórias de umedecimento) pelo método do papel filtro em contato, para estimar indiretamente sucção matricial em diferentes tipos de solos e intervalos de variação de sucção, por meio de métodos estatísticos.

5.1 Calibrações do método do papel filtro investigadas

Várias calibrações (equações bilineares e exponenciais) do papel filtro do tipo W42 publicadas na literatura para o método do papel filtro possuem funções semelhantes e em sua maioria são definidas por duas equações lineares, como recomenda a ASTM D5298-10. Essas equações podem ser descritas utilizando a forma geral (Bicalho *et al.*, 2011) descrita como:

$$\log(s) = A - Bw_f \tag{5.1}$$

Onde s é o valor da sucção estimada do solo pelo método do papel filtro (com contato) expresso em kPa, w_f é o teor de umidade gravimétrico medido do papel filtro medido expresso em % e A e B são as constantes derivadas da relação linear entre o $\log(s)$ e w_f , variando de acordo com a equação publicada.

Inicialmente foram selecionadas as seguintes calibrações bilineares, compostas por duas equações lineares, apresentadas na Figura 5.1-(a) e na Tabela 5.1-(a): ASTM D5298-10; Chandler *et al.* (1992); Leong *et al.* (2002). Para as calibrações exponenciais foram selecionadas as seguintes, apresentadas na Figura 5.1-(b) e na Tabela 5.1-(b): Van Genuchten (1980); Fredlund e Xing (1994); Bicalho *et al.* (2015a), publicadas para o papel filtro W42 (trajetória de umedecimento) investigadas neste estudo.

Tabela 5.1 Calibrações investigadas neste trabalho

(a) Calibrações s-w _f bilineares					
Referências	Calibrações s-w _f (trajetória de umedecimento)	Intervalo			
ASTM D5298-10	$log(s) = 5.327 - 0.0779 W_f$	W _f <45.3			
	$\log(s) = 2.412 - 0.0135 w_f$	$W_f > 45.3$			
Chandler et al. (1992)	$\log(s) = 4.842 - 0.0622 \text{W}_{\text{f}}$	$W_f < 47$			
Leong et al. (2002)	$log(s) = 6.050-2.48 log w_f$ $log(s) = 4.945-0.0673w_f$	w _f ≥ 47 w _f <47			
	$\log(s) = 2.909 - 0.0229 w_f$	$w_f \leq 47$			
(b) Calibrações s-w _f exp					
Van Genuchten (1980)	$s = 0.051 \left[\left(\frac{248}{w_{\rm f}} \right)^{9.615} \right]$	-1 $\begin{bmatrix} 0,473 \\ -1 \end{bmatrix}$			
Fredlund e Xing (1994)	$s = 0.23 \left[e^{\left(\frac{268}{W_{\rm f}}\right)^{0.829}} - e \right]^{-0.829}$				
Bicalho et al. (2015a)	$\log s = 5.328e^{-0.02w}$				

Nota: w_f = teor de umidade gravimétrico do papel filtro em %; s= sucção em kPa. Fonte: Acervo da Autora (2017)

Na Tabela 5.1-(a), as calibrações bilineares selecionadas para o papel filtro W42, de acordo com a equação 5.1, possuem A variando de 2,412 a 6,05 e B variando de 0,01350 a 0,077. Moncada (2004) observa que diferentes valores entre os altos e baixos níveis de sucção para as calibrações bilineares propostas em diversas literaturas indicam a sensibilidade do papel filtro. As calibrações bilineares apresentam ponto de inflexão entre 60kPa<s<100kPa (i.e, 40% a 50%).

As curvas de calibrações bilineares necessitam de duas equações lineares para definir uma única calibração, em que uma equação apresenta o intervalo de s associado com a água adsorvida (valores de sucção mais elevados) e a outra equação apresenta o intervalo associado às forças capilares (valores de sucção mais baixos).

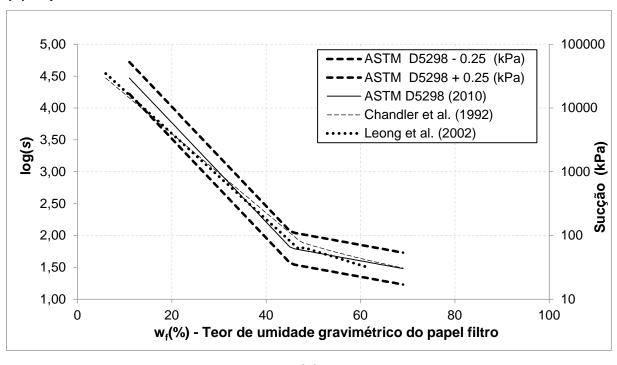
Já as calibrações exponenciais da Tabela 5.1-(b) consistem equações contínuas, únicas e não lineares utilizadas no método do papel filtro em contato para estimar indiretamente sucção matricial de solos. Cada calibração exponencial apresenta uma transição suave entre os valores de sucções altos e baixos. Nesse caso, a

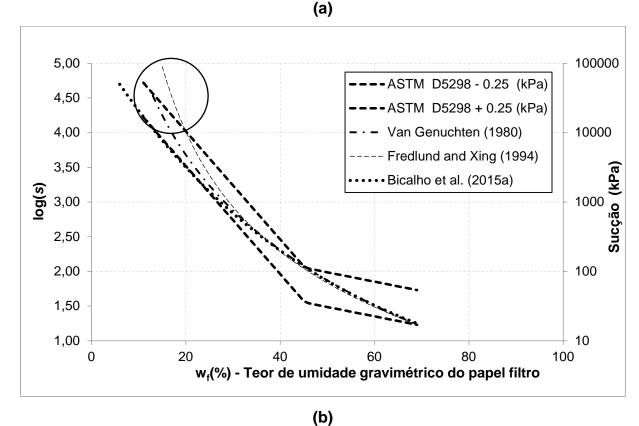
apresentação do ponto de inflexão exigido pelas calibrações bilineares é desnecessária (Bicalho *et al.*,2015b).

Verificou-se a validade das equações das calibrações (trajetórias de umedecimento) bilineares e exponenciais investigadas neste trabalho para estimar sucção matricial pelo método do papel filtro em contato, definidas na Tabela 5.1, apresentadas na Figura 5.1 para o papel filtro W42, a partir das faixas de erro definidas como ASTM D5298-10 \pm 0,25 $\log(s)$. Essas faixas de erro são traçadas juntamente com as equações das calibrações investigadas na Figura 5.1.

A norma americana ASTM D5298-10 determina que a sucção estimada a partir da curva de calibração utilizada no método do papel filtro, obtida como a média de sucções medidas a partir do w_t utilizando dois papéis, seja descartada se a diferença entre os valores de sucção dos dois papéis filtro ensaiados exceder 0,5log(s).

Figura 5.1 - Calibrações investigadas (trajetórias de umedecimento) para o papel filtro W42 e as faixas de erro da ASTM D5298-10 \pm 0,25kPa: (a) bilineares (b) exponenciais





Somente os valores de sucção estimados pelo método do papel filtro obtidos pela calibração exponencial proposta por Fredlund e Xing (1994) para s >10.000 kPa não estão inseridos na faixa de erro aceitável pela ASTM D5298-10 (ou seja, \pm 0,25 $\log(s)$), conforme marcado na Figura 5.1 . As variações entre as sucções estimadas pelo método do papel filtro considerando as calibrações exponenciais, definidas por van Genuchten (1980), Fredlund e Xing (1994) e Bicalho *et al.* (2015b) aumentam para suções maiores que 1.000 kPa.

Observou-se variações nas sucções estimadas para as calibrações investigadas. Por exemplo, para w_f igual a 30%, as sucções do método do papel filtro utilizando as calibrações sugeridas por Bicalho *et al* (2015a) e ASTM D5298-10 são iguais a 688 kPa e 977 kPa, respectivamente. As sucções estimadas pelo método do papel filtro podem variar muito dependendo da curva de calibração utilizada. A variabilidade desses resultados pode ser devida às incertezas e erros na realização dos experimentos e na obtenção dos dados experimentais que definiram as calibrações adotadas (Bicalho *et al.*, 2015a).

A seguir será apresentado e discutido, quando possível, os dados experimentais dos valores sucção controlada por diferentes técnicas experimentais para calibração do papel filtro relacionados com os valores de w_f medido por cada literatura investigada da Tabela 5.1. Esses são os dados experimentais que determinam o ajuste das calibrações investigadas.

ASTM D5298-10

Os ajustes dos dados experimentais (sucção controlada por diferentes técnicas experimentais em equilíbrio hidráulico relacionada com o w_f medido) da função bilinear proposta pela ASTM D5298-10 usadas no método do papel filtro foram obtidas através de regressão linear (modelo de regressão linear simples) por meio do método dos mínimos quadrados.

A ASTM D5298-10 considerou para os valores de sucção s<50 kPa, os dados experimentais determinados por Greacen *et al.* (1987) e, para os valores de sucção s>50 kPa, os dados experimentais obtidos em Fawcett e Collis-George (1967)

utilizados na calibração bilinear do papel filtro W42 (trajetória de umedecimento) proposto para o método do papel filtro em contato para estimar indiretamente sucção matricial de solos não saturados.

Nos estudos de Fawcett e Collis-George (1967), para obter a calibração do papel filtro W42, foram utilizados 8 lotes calibrados para 6 papeis filtro por lote (inicialmente secos ao ar) retirados diretamente da caixa. Os papeis filtro foram calibrados (trajetória de umedecimento) para 9 valores de sucção diferentes (1<s<91.000kPa) determinados utilizando equipamentos convencionais, a 22°C através das técnicas de membrana de pressão, placa de pressão e dessecador.

Fawcett e Collis-George (1967) apresentam 9 resultados experimentais com 72 valores de umidade medidos para cada valor de sucção imposta: 1 kPa, 10 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 800 kPa, 1.500 kPa, 3.000 kPa, 29.000 kPa e 91.000 kPa. A ASTM D5298-10 considerou somente a média dos valores de umidade medidos para os valores de sucção entre o intervalo de 50 a 100.0000 kPa, ou seja, 7 observações.

A calibração do papel proposta por Greacen *et al.* (1987) para estimar valores de s<50 kPa, foram obtidas através da técnica da placa de sucção. A calibração do papel foi obtida para um único lote com 6 papéis ensaiados. Greacen *et al.* (1987) apresentam 3 resultados experimentais com um único valor de umidade medido para cada valor de sucção imposta: 9 kPa, 20 kPa e 50 kPa.

O ponto de inflexão da curva de calibração proposta pela ASTM D5298-10 é equivalente a w_f de 45,3%. A análise estatística realizada em Fawcett e Collis-George (1967) e Greacen *et al.* (1987) não controlam a taxa de erro em que foi ajustada a curva.

Na Figura 5.2 são apresentadas as equações lineares da curva de calibração bilinear recomendada pela ASTM D5298-10 descritas na Tabela 5.1 para o papel filtro W42 (trajetória de umedecimento) utilizadas no método do papel filtro para estimar sucção matricial em solos não saturados e os 10 dados experimentais obtidos por diferentes técnicas por Greacen *et al.* (1987), 3 observações e Fawcett e Collis-George (1967), 7 observações .

E w_f(%) - Teor de umidade gravimétrico do papel filtro

Figura 5.2 - Calibração bilinear (trajetória de umedecimento) da ASTM D5298-10 para o papel filtro W42: equações e dados experimentais

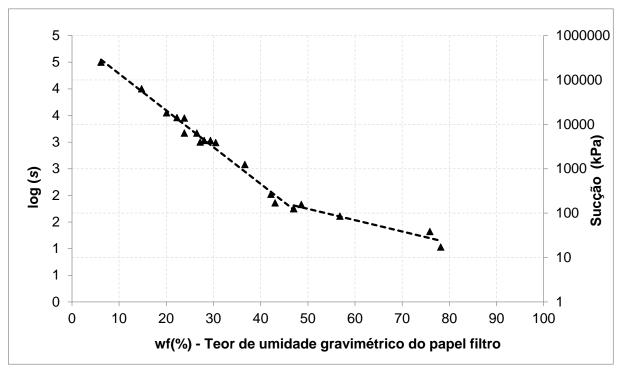
Leong et al. (2002)

Os dados experimentais (sucção controlada em equilíbrio hidráulico relacionada com o w_f medido) utilizados na obtenção da calibração do método do papel filtro proposta por Leong et~al.~(2002) foram determinados pela técnica de placa de pressão. O ajuste dos dados experimentais foi obtido através de regressão linear (modelo de regressão linear simples) por meio do método dos mínimos quadrados, na forma bilinear (duas equações lineares). Seu ponto de inflexão apresentado é equivalente a w_f de 47%. A análise estatística realizada por Leong et~al.~(2002) consiste em uma análise comparativa entre as calibrações exponenciais propostas por Van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994). Nessa análise, a calibração proposta por Leong et~al.~(2002) mostrou o melhor ajuste obtidos para dados experimentais avaliados.

Na Figura 5.3 são apresentadas as equações lineares da curva de calibração bilinear proposta por Leong *et al.* (2002) descritas na Tabela 5.1 usada no método do papel filtro em contato para estimar sucção matricial em solos não saturados e os

18 dados experimentais obtidos por placa de pressão para calibração do papel filtro W42 inicialmente seco ao ar (trajetória de umedecimento).

Figura 5.3– Calibração bilinear (trajetória de umedecimento) de Leong et al. (2002) para o papel filtro W42: equações e dados experimentais



Fonte: Autora, 2017

Chandler et al. (1992)

Para o estudo de Chandler et al. (1992) não foi possível obter em sua publicação os dados experimentais (sucção controlada por diferentes técnicas experimentais em equilíbrio hidráulico relacionada com o w_f medido) que determinaram o ajuste da curva de calibração bilinear usada no método do papel filtro para estimar sucção em solos. Dessa forma, não é possível realizar a avaliação estatística proposta na metodologia desta dissertação para a calibração proposta por Chandler *et al.* (1992).

Bicalho et al. (2015a)

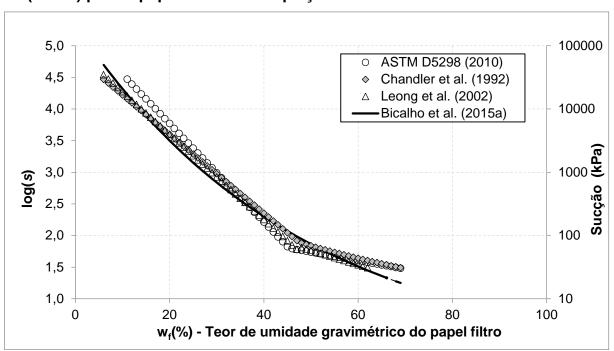
Os resultados experimentais utilizados por Bicalho *et al.* (2015a) foram obtidos a partir de incrementos de valores unitários, adotados denominado de dados artificiais, para w_{fi} =1%, i=1..n (observações) usados em três calibrações bilineares (seis equações) predeterminadas para o intervalo de sucção entre 30 kPa e 30.000 kPa.

Essas calibrações são as mesmas investigadas neste estudo (ASTM D5298-10; Leong *et al.*, 2002; Chandler *et al.*, 1992) para o papel filtro W42.

Bicalho *et al.* (2015a), utilizaram o método dos mínimos quadrados para um modelo de regressão intrinsecamente Linear e definiu uma única equação de calibração exponencial para o papel filtro W42. Verifica-se que seus pesquisadores realizaram uma análise estatística para a calibração exponencial proposta, a partir da quantificação da variabilidade observada entre curvas de calibrações previamente publicadas selecionadas em seus estudos.

A seguir é apresentada a equação exponencial da curva de calibração proposta por Bicalho *et al.* (2015a) descrita na Tabela 5.1 para o papel filtro W42 (trajetória de umedecimento). Todos seus 179 dados artificiais adotados são inseridos e plotados na Figura 5.4.

Figura 5.4– Calibração exponencial (trajetória de umedecimento) de Bicalho et al. (2015a) para o papel filtro W42: equação e dados artificiais



Fonte: Autora, 2017

Van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994)

Não foi possível obter na literatura os dados experimentais (sucção controlada por diferentes técnicas experimentais em equilíbrio hidráulico relacionada com o w_f

medido) que determinaram os ajustes das equações da calibração exponencial utilizada no método do papel filtro para estimar sucção em solos proposta Leong *et al.* (2002) definidas por van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994). Dessa forma, não é possível realizar a avaliação estatística proposta na metodologia desta dissertação para essas calibrações.

As calibrações propostas pelas ASTM D5298-10, por Leong *et al.* (2002) e por Bicalho *et al.* (2015a), das quais foi possível extrair os valores de sucção controladas do papel filtro (dados experimentais) utilizados na obtenção de suas respectivas calibrações para estimar sucção matricial em solos não saturados, foram investigados neste estudo.

5.2 Obtenção de novas calibrações propostas neste trabalho

Definem-se três novas calibrações exponenciais (calibrações A, B1 e B2) para estimar sucção matricial pelo método do papel filtro em contato utilizando dados experimentais de valores de sucção controlada do papel filtro determinados por diferentes técnicas de imposição de sucção e seus correlacionados w_f medidos na obtenção de calibrações bilineares propostas por ASTM D5298-10 e por Leong *et al.* (2002) para o papel filtro W42. Os ajustes dos dados experimentais são realizados por regressão linear através do modelo de regressão intrinsecamente linear utilizando o método dos mínimos quadrados.

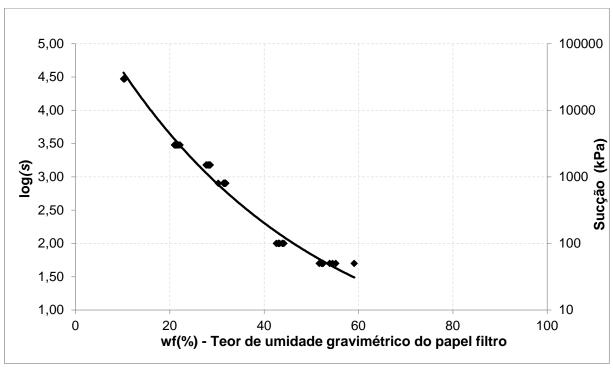
Conforme discutido na revisão bibliográfica deste estudo no subitem 3.4, os modelos das equações de calibrações usadas no método do papel filtro obtidos por regressão linear definidas neste estudo são usados sob o ponto de vista da estatística para descrever o comportamento de valores de sucção estimados (variável dependente) em solos pela calibração proposta como uma função exponencial de w_f medidos (variáveis independentes). Os w_f medidos e correlacionados aos valores de sucções controladas do papel determinados por técnicas experimentais diferentes são utilizados para nova calibração do papel filtro do tipo W42, proposta neste estudo.

Calibração A (6 resultados experimentais de sucção imposta)

Fawcett e Collis-George (1967) apresentam 9 resultados experimentais (observações) com um total de 72 valores de umidade medidos, sendo que para cada valor de sucção imposta foram medidos 8 valores de umidade: 1 kPa, 10 KPa, 50 KPa, 100 KPa, 800 KPa, 1.500 KPa, 3.000 KPa, 29.000 KPa e 91.000 KPa. Na determinação da Calibração A (trajetória de umedecimento) foram considerados somente os valores de sucção entre o intervalo de 30 a 30.0000 kPa, ou seja, 6 observações com 48 valores de umidade medidos.

Na Figura 5.5 é apresentada a curva de Calibração A do papel, proposta neste estudo, para ser utilizada no método do papel filtro em contato para estimar sucção matricial em solos não saturados. Os 6 resultados experimentais foram determinados diretamente em Fawcett e Collis-George (1967) utilizando equipamentos convencionais, a 22°C através das técnicas de membrana de pressão, placa de pressão e dessecador.

Figura 5.5 - Calibração exponencial A (6 resultados experimentais de s imposta com 48 valores de w_f medidos) para o papel filtro W42 proposta neste trabalho



A calibração A é definida pela a equação exponencial expressa como:

$$\widehat{\log(s)} = 5,7682e^{-0,023w_f}$$
 (5.2)

O coeficiente de determinação (R²) obtido pela regressão da equação 5.2 é igual a 0,982.

Calibração B (28 resultados experimentais de sucção imposta)

A Calibração B é determinada para dois grupos de dados experimentais e é subdivida em Calibração B1 e Calibração B2. Na Figura 5.6 e na Figura 5.7 são apresentadas as curvas de Calibração B1 e B2 respectivamente. As calibrações B1 e B2 são propostas neste estudo para serem utilizadas no método do papel filtro (em contato) para estimar sucção matricial em solos não saturados, sob trajetória de umedecimento. As calibrações B1 e B2 são determinadas por regressão linear para dois grupos de dados experimentais diferentes no intervalo de sucção proposto pela (ASTM D5298-10) entre 10 kPa e 100.000 kPa.

Os dados experimentais utilizados para obtenção das calibrações B1 e B2 foram determinados em Fawcett e Collis-George (1967), Greacen *et al.* (1987) e Leong *et al.* (2002). Esses pesquisadores utilizaram equipamentos convencionais para obtenção de seus dados experimentais, através das técnicas de impor sucção (membrana de pressão, placa de pressão e dessecador).

Fawcett e Collis-George (1967) apresentam 9 resultados experimentais (observações) com um total de 72 valores de w_f medidos, sendo que para cada valor de sucção imposta foram medidos 8 valores de w_f : 1 kPa, 10 KPa, 50 KPa, 100 KPa, 800 KPa, 1.500 KPa, 3.000 KPa, 29.000 KPa e 91.000 KPa. Greacen *et al.* (1987) apresentam 3 resultados experimentais com um total de 3 valores de umidade medidos e Leong *et al.* (2002) apresentam 18 resultados experimentais com um total de 18 valores de w_f medidos.

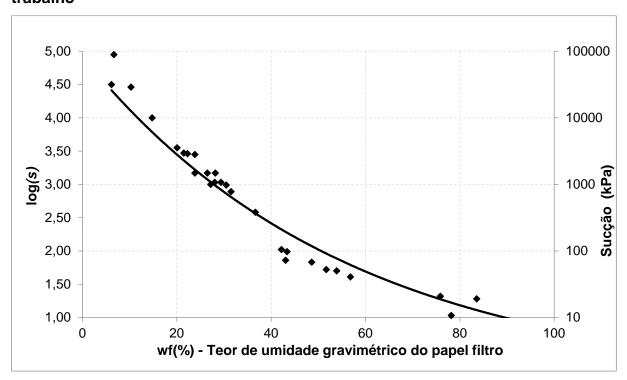
Para estimar a Calibração B1 deste trabalho foram considerados um total de 28 dados experimentais com 3 observações determinados em Greacen *et al.* (1987),18

observações determinados em Leong *et al.* (2002) e 7 observações determinados em Fawcett e Collis-George (1967), sendo 7 resultados experimentais (observações) de sucção imposta com 7 valores médios de w_f medidos respectivamente

Em contrapartida, na determinação da Calibração B2 foram considerados um total de 28 resultados experimentais com 3 observações determinados em Greacen *et al.* (1987),18 observações determinados em Leong *et al.* (2002) e 7 observações determinados em Fawcett e Collis-George (1967) sendo 7 resultados experimentais (observações) de sucção imposta com 56 valores de w_f medidos respectivamente.

A diferença entre a calibração B1 e B2 estão nos dados extraídos de Fawcett e Collis-George (1967) em que, para a Calibração B1 (total de 28 valores de w_i) são considerados apenas os dados médios para os w_i medidos por sucção imposta e para a Calibração B2 (total de 77 valores de w_i) são considerados todos os valores de w_i medidos por sucção imposta, porém destaca-se que ambas as calibrações apresentam 28 resultados experimentais diferentes de sucção imposta.

Figura 5.6 - Calibração exponencial B1 (28 resultados experimentais de s imposta com 28 valores de w_f medidos) para o papel filtro W42 proposta neste trabalho

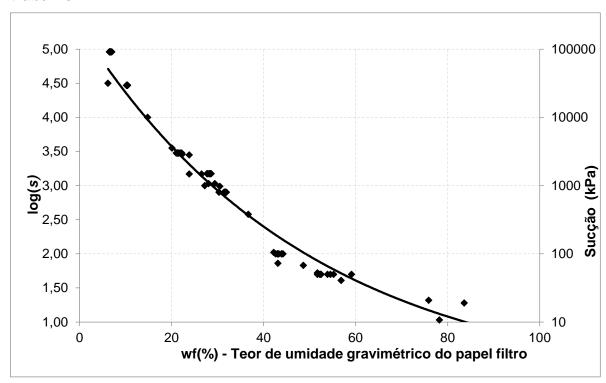


A calibração B1 é definida pela a equação exponencial expressa como:

$$\widehat{\log(s)} = 4,9271e^{-0.018w_f}$$
 (5.3)

O coeficiente de determinação obtido pela regressão da equação 5.3 é equivalente a $R^2 = 0.9426$.

Figura 5.7 - Calibração exponencial B2 (28 resultados experimentais de s imposta com 77 valores de w_f medidos) para o papel filtro W42 proposta neste trabalho



Fonte: Autora, 2017

A calibração B2 é definida pela a equação exponencial expressa como:

$$\widehat{\log(s)} = 5,3274e^{-0.02w_f} \tag{5.4}$$

O coeficiente de determinação obtido pela regressão da equação 5.3 é equivalente a $R^2 = 0.9541$.

5.3 Avaliação estatística das calibrações investigadas

Neste trabalho, a avaliação estatística é realizada para as calibrações investigadas do método do papel filtro em que é possível extrair na literatura seus dados experimentais (sucção controlada por diferentes técnicas experimentais em equilíbrio hidráulico relacionada com o w_f medido) para calibração do papel tipo W42 inicialmente seco ao ar (trajetórias de umedecimento). Uma revisão bibliográfica detalhada sobre as diferentes técnicas experimentais e metodologia utilizadas por cada pesquisador para determinação desses resultados experimentais de sucção controlada do papel filtro e o ajuste da curva de calibração proposta apresenta-se no subitem 3.3.3 deste estudo.

Os modelos de regressão linear usados nas equações de calibrações investigadas do método do papel filtro, sob o ponto de vista estatístico, buscam descrever padrões de homogeneidade dentre a heterogeneidade observada em um conjunto de observações de w_f medidos correlacionados aos valores de sucções controladas do papel determinados por diferentes técnicas experimentais.

A regressão linear permite explicar o comportamento de valores de sucção estimados para diferentes solos pela calibração investigada usada no método do papel filtro e avaliar a incerteza associada a esse processo. Nesse sentido, verificam-se as hipóteses da regressão do modelo proposto pelas calibrações investigadas, em que: (i) se avaliam a relação linear ou intrinsecamente linear observada entre as variáveis das sucções estimadas pelas calibrações do método do papel filtro e os w_f medidos e (ii) verificam-se a independência dos resíduos e se esses seguem uma distribuição normal com média zero e variância constante. Os resíduos são determinados pela diferença entre os valores dos logaritmos da sucção controlada do papel filtro correlacionados ao w_f medido (em equilíbrio hidráulico) obtidos por diferentes técnicas experimentais e os valores da sucção estimados pelo método do papel filtro obtidos pela calibração investigada. As hipóteses do modelo de regressão precisam ser validadas para que os resultados dos ajustes dos modelos das calibrações usados no método do papel filtro para estimar sucção matricial em solos não saturados obtidos sejam confiáveis.

Os ajustes dos dados experimentais de valores de sucção controlada do papel filtro determinados por técnicas experimentais diferentes e os relacionados w_f medidos utilizadas na calibração do método do papel filtro para estimar sucção matricial em solos para as calibrações bilineares investigadas são propostas pela ASTM D5298-10 (Figura 5.2) e por Leong $et\ al.$,2002 (Figura 5.3). Já para as calibrações exponenciais investigadas, os ajustes foram propostos por Bicalho $et\ al.$ (2015a) (Figura 5.4), pela Calibração A (Equação 5.2) definida neste estudo (Figura 5.5), pela Calibração B1 (Equação 5.3) definida neste estudo (Figura 5.6) e pela Calibração B2 (Equação 5.4) definida neste estudo (Figura 5.7). As equações das calibrações propostas pela ASTM D5298-10, por Leong $et\ al.$ (2002) e por Bicalho $et\ al.$ (2015a) são apresentadas na Tabela 5.1. A avaliação realizada para as curvas de calibrações (trajetórias de umedecimento) investigadas neste trabalho são descritas nas próximas seções.

Na Tabela 5.2 apresentam-se os resultados dos coeficientes de determinação (R²) e os testes estatísticos obtidos para os modelos das calibrações bilineares investigadas propostas pela ASTM D5298-10 e por Leong *et al.* (2002) e para as calibrações exponenciais investigadas propostas por Bicalho *et al.* (2015a), para a Calibração A (Eq. 5.2), Calibração B1 (Eq.5.3) e Calibração B2 (Eq.5.3) definidas neste estudo. As calibrações investigadas usadas no método do papel filtro apresentam o R² obtido de aproximadamente 100%, conforme é mostrado na Tabela 5.2. O alto valor de R² indica que os modelos das cinco calibrações investigadas usadas no método do papel filtro em contato para estimar sucção em solos não saturados se ajustam aos dados experimentais dos valores de sucção controlada determinadas por diferentes técnicas experimentais para calibração do papel filtro tipo W42.

A existência da relação linear das calibrações bilineares investigadas (duas equações lineares) usadas no método do papel filtro são verificadas sob o teste estatístico t para as calibrações propostas pela ASTM D5298-10 e por Leong *et al.* (2002). A condição intrinsecamente linear também é verificada sob teste estatístico t para as calibrações exponenciais usadas no método do papel filtro investigada propostas por Bicalho *et al.* (2015a); e para as calibrações deste trabalho: Calibração A (Eq. 5.2), Calibração B1 (Eq.5.3) e Calibração B2 (Eq.5.4).

Os resultados dos testes estatísticos t das funções de calibração investigadas usadas no método do papel filtro são apresentados na Tabela 5.2 para um dado valor-p calculado. Sendo o valor-p inferior ao nível de significância predeterminado (α= 5%) rejeita-se a hipótese nula, e a existência da relação linear (ou intrinsecamente linear) para a calibração investigada é satisfeita. A Tabela 5.2 mostram que o valor-p << 5% é obtido para todos os resultados das calibrações investigadas (trajetórias de umedecimento) usadas no método do papel filtro para estimar sucção matricial em solos não saturados em que se verificam para as (i) calibrações bilineares propostas pela ASTM D5298-10 e por Leong et al. (2002) a existência da linearidade proposta por suas duas equações lineares e (ii) para as calibrações exponenciais propostas por Bicalho et al. (2015a); para a Calibração A (Eq. 5.2) e Calibração B (Eq.5.3) definidas neste estudo a existência da relação intrinsecamente linear dos dados experimentais utilizados na calibração do papel filtro W42. O resumo dos resultados obtidos para os coeficientes de determinação (R²) e para os testes t das calibrações usadas no método do papel filtro investigadas nesta seção também é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.2 - Resultados dos coeficientes de determinação (R²) e teste t das calibrações investigadas

(a) Calibrações s-w _f bilineares					
Referências	ASTM D5298-10		Leong et al. (2002)		
	$w_f < 45,3\%$	w _f ≥45,3%	$w_f < 47\%$	w _f ≥47	
R ²	0.9893	0.9996	0.981	0.921	
Teste t (P-valor)	1.02E-06	3.58E-05	2.00E-16	1.13E-02	
Observações	6	4	14	4	
(b) Calibrações s-w _f exponenciais					
Referências	Bicalho et al	Calibração A	Calibração B1	Calibração B2	
	(2015a)	(Eq. 5.2)	(Eq. 5.3)	(Eq. 5.4)	
R ²	0.9627	0.982	0.9426	0.9541	
Teste t (P-valor)	2.20E-16	2.20E-16	2.20E-16	2.20E-16	
Observações	179	6	28	28	

Fonte: Autora, 2017

Verificam-se as hipóteses da independência dos resíduos e se esses seguem uma distribuição normal com média zero e variância constante. Os resíduos são determinados pela diferença entre os valores dos logarítmicos da sucção controlada do papel filtro correlacionados ao w_f medido (em equilíbrio hidráulico) obtidos por diferentes técnicas experimentais e os valores da sucção estimados pelo método do

papel filtro obtidos pela calibração investigada. As hipóteses do modelo de regressão precisam ser validadas para que os resultados dos ajustes dos modelos das calibrações usados no método do papel filtro para estimar sucção matricial em solos não saturados obtidos sejam confiáveis.

Avaliam-se a distribuição dos resíduos das (i) calibrações bilineares investigadas propostas pela ASTM D5298-10; por Leong *et al.* (2002); (ii) e as calibrações exponenciais investigadas proposta por Bicalho *et al.* (2015a); pelas calibrações definidas neste estudo: Calibração A (Equação 5.2), Calibração B1 (Equação 5.3) e Calibração B2 (Equação 5.4), quanto às suposições de normalidade, independência e homogeneidade da variância.

Destaca-se que a distribuição do erro residual (resíduos) não será alterada mesmo que exista o inconveniente de uma transformação linear para obtenção das calibrações exponenciais proposta por Bicalho *et al.* (2015a) e pelas calibrações exponenciais definidas neste estudo, usadas no método do papel filtro. Dessa forma, os erros residuais do modelo original (não linear e exponencial) deverão satisfazer as suposições usuais de normalidade, independência e homogeneidade da variância, a serem verificadas a seguir.

Os resultados das análises dos resíduos das equações lineares proposta pela ASTM D5298-10 são apresentadas na Figura 5.8 para eq. w_f <45,3% e na Figura 5.9 para eq. w_f>45,3%. Os resultados das análises dos resíduos das equações lineares proposta por Leong *et al.* (2002) são apresentadas na Figura 5.10 para eq. s-w_f<47% e na Figura 5.11 para eq. s-w_f≥47%. Para análise dos resíduos da calibração exponencial proposta por Bicalho *et al.* (2015a) os resultados são apresentados na Figura 5.12. Por fim, para as calibrações exponenciais A (Eq. 5.2 deste trabalho), B1 (Eq. 5.3 deste trabalho) e B3 (Eq. 5.4 deste trabalho) os resultados são apresentados nas Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15, respectivamente. Para as figuras e análises citadas, apresentam-se os respectivos gráficos para cada equação da calibração investigada: (a) distribuição dos resíduos em relação w_f, (b) Distribuição dos resíduos em relação a log (*s*) ; (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)

Figura 5.8 - Análise dos resíduos da calibração bilinear proposta pela ASTM D5298-10 para w_f <45,3%: (a) distribuição dos resíduos em relação w_f ; (b) Distribuição dos resíduos em relação a log(s); (c) Histograma ; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)

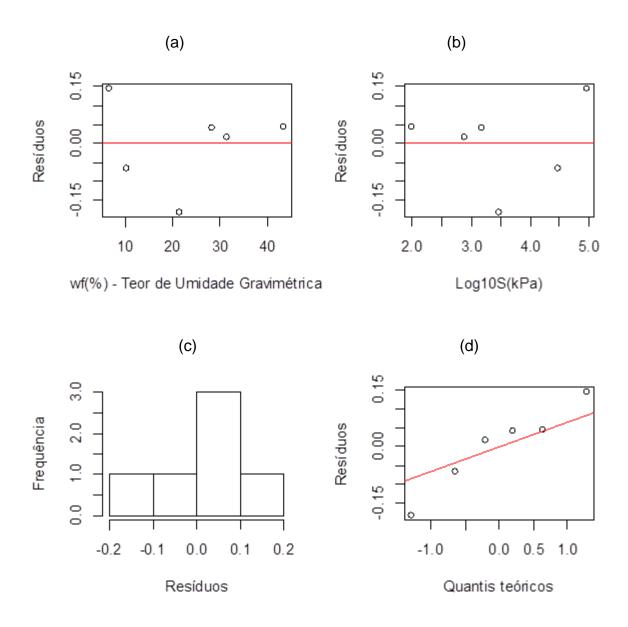


Figura 5.9 - Análise dos resíduos da calibração bilinear proposta pela ASTM D5298-10 para $w_f>45,3\%$ (a) distribuição dos resíduos em relação w_f ; (b) Distribuição dos resíduos em relação a log(s); (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)

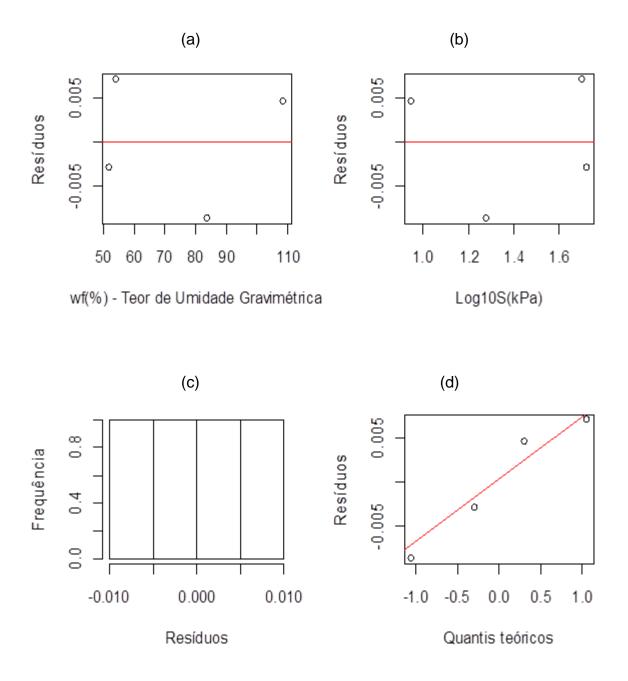


Figura 5.10 - Análise dos resíduos da calibração bilinear proposta por Leong et al. (2002) para $w_f < 47\%$ (a) distribuição dos resíduos em relação w_f ; (b) Distribuição dos resíduos em relação a log(s); (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)

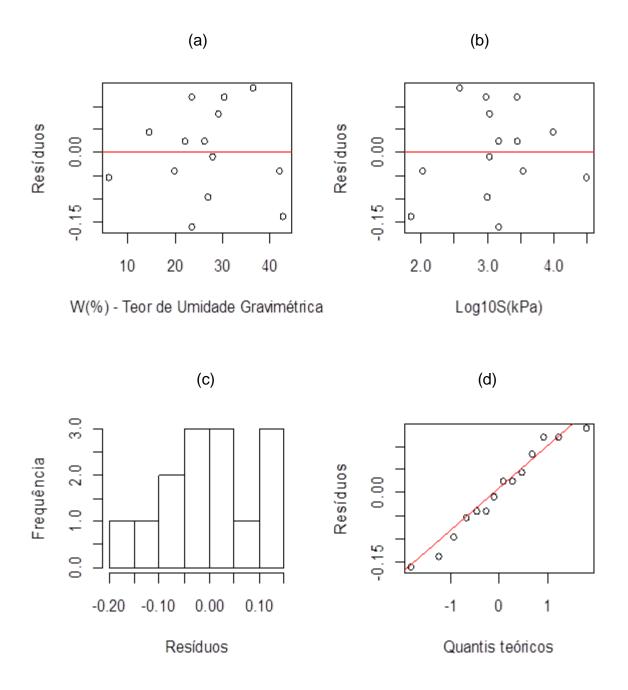


Figura 5.11 - Análise dos resíduos da calibração bilinear proposta por Leong et al. (2002) para w_f ≥47% (a) distribuição dos resíduos em relação w_f; (b) Distribuição dos resíduos em relação a *log(s)*; (c) Histograma ; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)

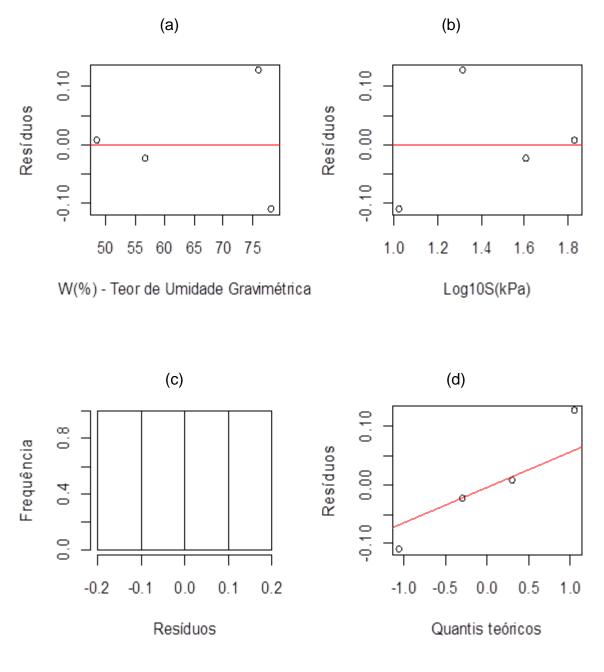


Figura 5.12- Análise dos resíduos da calibração exponencial proposta por Bicalho et al. (2015a) (a) distribuição dos resíduos em relação w_i ; (b) Distribuição dos resíduos em relação a log(s); (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)

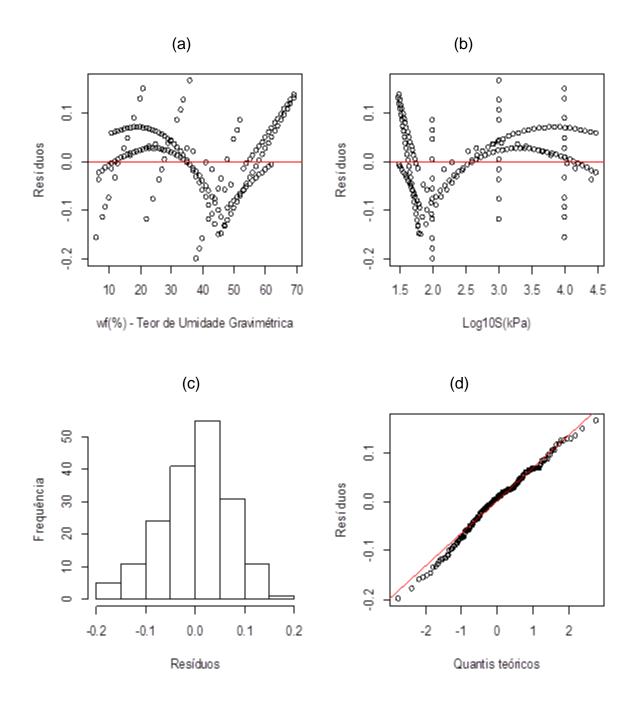


Figura 5.13 - Análise dos resíduos da Calibração exponencial A (Eq. 5.2) obtida neste trabalho (a) distribuição dos resíduos em relação w_i ; (b) Distribuição dos resíduos em relação a log(s); (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)

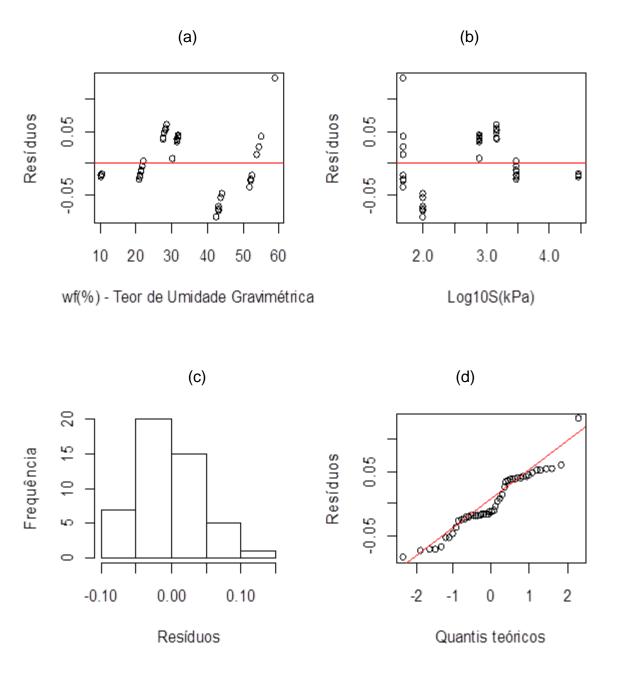
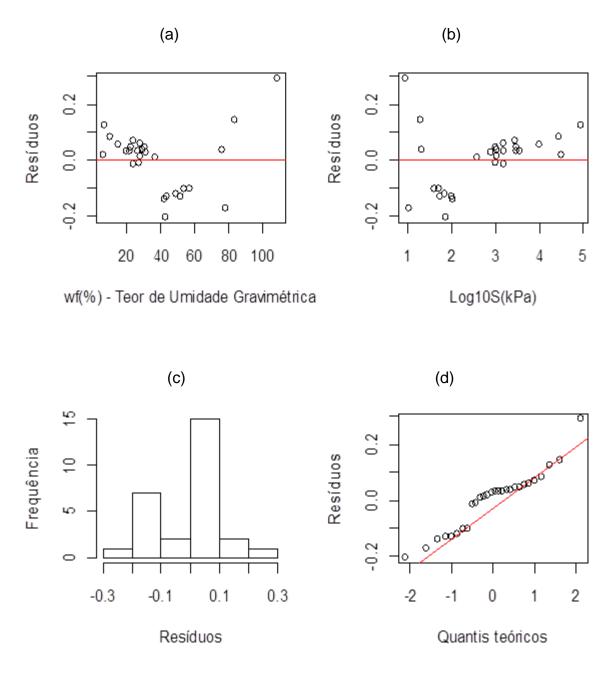
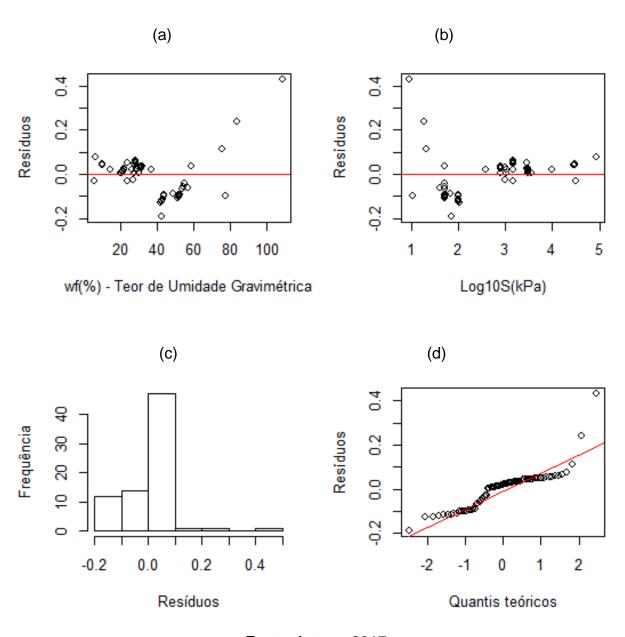


Figura 5.14 - Análise dos resíduos da Calibração exponencial B1 (Eq. 5.3) obtida neste trabalho (a) distribuição dos resíduos em relação w_i ; (b) Distribuição dos resíduos em relação a log(s); (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)



Fonte: Autora, 2017

Figura 5.15 - Análise dos resíduos da Calibração exponencial B2 (Eq. 5.4) obtida neste trabalho (a) distribuição dos resíduos em relação w_f ; (b) Distribuição dos resíduos em relação a log(s); (c) Histograma; (d) Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (gráfico quantil-quantil)



Fonte: Autora, 2017

Observa-se que nos gráficos (a) Resíduos vs wf e (b) Resíduos vs log(s) para as análises dos resíduos das equações propostas pela ASTM D5298-10 (Figura 5.8(a,b) e Figura 5.9(a,b)); das equações propostas por Leong et al.(2002) (Figura 5.10(a,b) e Figura 5.11(a,b)), da calibração B1 (eq. 5.3 deste estudo) na Figura 5.14(a,b), não são verificados comportamentos padronizados entre os seus resíduos. Ao contrário, da padronização observada na análise dos resíduos da calibração proposta por Bicalho et al.(2015a) (Figura 5.12(a,b)) e pela a calibração A (eq. 5.2 deste trabalho) na Figura 5.13(a,b). Nesse sentido, para as calibrações de Bicalho et al. (2015a) e calibração A (Eq. 5.2 deste trabalho) a condição de independência não é satisfeita. E para as equações propostas pela ASTM D5298-10, por Leong et al. (2002) e pela calibração B1 (Eq. 5.3 deste trabalho) e B2 (Eq. 5.4 deste trabalho), em que os pontos dos gráficos analisados são distribuídos de forma aleatória em torno da reta do resíduo nulo, sugere-se que os seus resíduos sejam independentes, de média nula e de variância constante.

O histograma apresentado na Figura 5.12(c) para a calibração investigada proposta por Bicalho *et al* (2015a), apresenta formato de sino o que indica uma distribuição normal dos resíduos. Entretanto, nos histogramas das Figuras 5.8(c); 5.9(c); 5.10(c); 5.11(c); 5.13 (c); 5.14 (c); 5.15 (c); para as calibrações propostas pela ASTM D5298-10; por Leong *et al.* (2002); e pelas calibrações A (eq 5.2), B1 (eq 5.3) e B2 (eq 5.4), respectivamente, não são observados esses formatos de sino. Dessa forma, para essas calibrações, nada se pode concluir quanto a normalidade dos resíduos, em relação à análise gráfica residual realizadas para os histogramas da distribuição de seus respectivos resíduos.

Finalmente, para os resultados das análises gráficas dos resíduos dos gráficos dos quantis teóricos das calibrações investigadas usadas no método do papel filtro em que a distribuição dos resíduos aparentemente possui distribuição normal é observado para os casos, em que a maioria dos seus resíduos observados do gráfico, para determinada calibração investigada, os pontos estão posicionados próximos ou sobre a reta 1:1. A distribuição normal realizada é verificada para a calibração proposta por Leong *et al.*(2002) para w_f <47% na Figura 5.10 (d), para a

calibração proposta por Bicalho *et al.* (2015a) na Figura 5.12(d), para calibração A (Eq 5.2) definida neste trabalho na Figura 5.13 (d), para a Calibração B1 (Eq. 5.3) definida neste trabalho na Figura 5.14 (d) e para a Calibração B2 (Eq. 5.4) definida neste trabalho na Figura 5.15 (d).

A Tabela 5.3 apresenta os resultados do valor-p para os testes de normalidade de Shapiro Wilk para os resíduos das calibrações investigadas usadas no método do papel filtro. Para esses testes serem considerados satisfatórios e a distribuição dos resíduos possuírem distribuição normal, o valor-p deve ser superior a significância de 5%. A Tabela 5.3 mostra que para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk (SW) para as calibrações propostas pela ASTM D5298-10; por Leong *et al.* (2002); por Bicalho et al. (2015a); e pela calibração B1(Eq. 5.3) e B2 (Eq. 5.4) definidas neste estudo, os dados dos resíduos são normalmente distribuídos. E o resultado do teste Shapiro-Wilk (SW) para a calibração A (Eq. 5.2) definida neste estudo mostra que os resíduos não apresentam distribuição normal, portanto a Calibração A (Eq. 5.2) é considerada estatisticamente inválida.

Tabela 5.3 – Resultados do valor p para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para os dados experimentais das calibrações investigadas neste estudo

ASTM D5	298-10	Leong et al. (2002)		
wf<45,3%	wf≥45,3%	wf<47%	wf≥47	
0.7265	0.6604	0.6796	0.8963	
Bicalho et al.	Calibr. A	Calibr. B1	Calibr. B2	
(2015a).	(Eq. 5.2)	(Eq. 5.3)	(Eq. 5.4)	
0.1488	0.02835	0.05813	0.82623	
	wf<45,3% 0.7265 Bicalho et al. (2015a).	0.7265 0.6604 Bicalho et al. (2015a). (Eq. 5.2)	wf<45,3% wf≥45,3% wf<47% 0.7265 0.6604 0.6796 Bicalho et al. (2015a). Calibr. A (Eq. 5.2) (Eq. 5.3)	

Fonte: Autora, 2017

Na Tabela 5.4 apresenta-se o resumo dos resultados das análises estatísticas calculadas e discutidas anteriormente para as calibrações bilineares e exponenciais investigadas neste trabalho.

Tabela 5.4 - Resumo dos resultados obtidos para as análises estatísticas dos ajustes investigados e propostos neste trabalho

(a) Calibrações <i>s-wf</i> bilineares		ASTM D	05298-10	Leong et al. (2002)		
		wf<45,3%	wf≥45,3%	wf<47%	wf≥47	
Observações		10		18		
Qualidade	R ²	$0.9893^{(1)}$	$0.9996^{(1)}$	0.981 ⁽¹⁾	0.921 ⁽¹⁾	
Parâmetros	Teste t	H ₀ rejeitada ⁽²⁾		H ₀ rejeitada ⁽²⁾		
Teste de Normalidade	SW	Dados normalizados		Dados normalizados		
(b) Calibrações s-wf exponenciais		Bicalho et al.	Calibr. A	Calibr. B1	Calibr. B2	
		(2015a).	(Eq. 5.2)	(Eq. 5.3)	(Eq. 5.4)	
Observ	rações	179	6	28	28	
Qualidade	r R2	$0.9627^{(1)}$	$0.982^{(1)}$	0.9426 ⁽¹⁾	0.9541 ⁽¹⁾	
Parâmetros	Teste t	H ₀ rejeitada ⁽²⁾				
Teste de Normalidade		Dados normalizados	Dados não normalizados	Dados normalizados	Dados normalizados	

⁽¹⁾ Qualidade do ajuste proposto válida (R²≈1)

Fonte: Autora, 2017

Em resumo, na Tabela 5.4 para os resultados dos testes de normalidade de Shapiro-Wilk avaliados quanto à distribuição normal dos resíduos (determinados pela diferença entre os valores da sucção controlada do papel filtro obtidos por diferentes técnicas experimentais e os valores da sucção estimados método do papel filtro obtidos pela calibração investigada) que somente para a calibração A (Eq. 5.2 obtida neste trabalho) não possui distribuição normal para a distribuição dos resíduos analisadas.

Observa-se também na Tabela 5.4 para as análises estatísticas calculadas para as calibrações investigadas sugeridas como estatisticamente válidas: propostas pela ASTM D5298-10; por Leong *et al.* (2002); por Bicalho *et al.* (2015a) e pelas calibrações definidas neste estudo: Calibração B1 (Eq. 5.3) e Calibração B2 (Eq. 5.5), que a qualidade do ajuste de todos esses modelos de calibração usadas no método do papel filtro para estimar sucção matricial em solos não saturados (R²≈1) são adequadas. Também é verificado o atendimento da relação linear (e intrinsecamente linear) dos parâmetros para essas equações das calibrações investigadas para o papel filtro W42.

O resumo dos resultados das análises gráficas dos resíduos detalhados anteriormente é apresentado na Tabela 5.5.

⁽²⁾ Relação linear ou intrinsecamente linear é verificada

Tabela 5.5 - Resumo dos resultados das hipóteses atendidas nas análises dos resíduos das calibrações investigadas neste trabalho

		Hipóteses dos resíduos atendidas quanto a				
Calibrações s-w _f	Figura	Normalidade	Média nula	Variância cte	Independência	
ASTM D5298-10 (w _f <45,3%)	Figura 5.8	-	(a) (b)	(a) (b)	(a) (b)	
ASTM D5298-10 (w _f >45,3%)	Figura 5.9	(c) Não atendido	(a) (b)	(a) (b)	(a) (b)	
Leong et al.(2002) (w _f <47%)	Figura 5.10	(d)	(a) (b)	(a) (b)	(a) (b)	
Leong et al.(2002) $(w_f \ge 47\%)$	Figura 5.11	(c) Não atendido	(a) (b)	(a) (b)	(a) (b)	
Bicalho et al.(2015a)	Figura 5.12	(c) (d)	-	-	*(a) (b) Não atendido	
Calibração A (Eq. 5.2)	Figura 5.13	(d)	-	-	*(a) (b) Não atendido	
Calibração B1 (Eq. 5.3)	Figura 5.14	(d)	(a) (b)	(a) (b)	(a) (b)	
Calibração B2 (Eq. 5.4)	Figura 5.15	(d)	(a) (b)	(a) (b)	(a) (b)	

(a) resíduos vs wf %; (b) resíduos vs Logs kPa; (c) Histograma;(d) Quantil-Quantil Fonte: Autora, 2017

No resumo das análises gráficas dos resíduos apresentados na Tabela 5.5 observase que para a calibração proposta pela ASTM D5298-10 para w_i <45,3% as hipóteses dos resíduos são atendidas. Os resíduos são provenientes de uma variável aleatória independente e normalmente distribuída, com média zero e variância constante. Para calibração proposta pela ASTM D5298-10 w_i >45,3% nenhuma conclusão pode ser tirada na análise gráfica quanto à sua normalidade, porém pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk (SW) a normalidade é atendida. Dessa forma a calibração bilinear da ASTM D5298-10 é considerada válida estatisticamente, uma vez que o teste de Shapiro-Wilk é tomador de decisão neste estudo. A calibração bilinear proposta por Leong *et al.* (2002) também é válida estatisticamente, todas as hipóteses dos resíduos são atendidas, bem como a hipótese de normalidade é atendida pelo teste de Shapiro-Wilk.

A Calibração A (Eq. 5.2) obtida neste estudo é considerada inválida estatisticamente, uma vez que o teste de Shapiro-Wilk é tomador de decisão neste estudo, portanto, descarta-se o uso da Calibração A (Eq. 5.2) usadas no método do papel filtro para estimar sucção em solos.

Para as calibrações B1 (Eq. 5.3) e B2 (Eq. 5.4) definidas neste trabalho usada no método do papel filtro em contato, é verificado o atendimento de todas as hipóteses dos resíduos, sendo consideradas válidas estatisticamente, inclusive para o teste de Shapiro-Wilk. Observa-se que quando a Calibrações B1 e B2 (maior quantidade de resultados experimentais) comparadas com a Calibração A (dados experimentais limitados) definidas neste estudo verifica-se que quanto maior a quantidade de dados experimentais de diferentes sucções impostas utilizadas na obtenção da curva de calibração do papel sugere-se uma maior confiabilidade na utilização da mesma tendo em vista que a Calibração A foi considerada estaticamente inválida.

Para a calibração proposta em Bicalho *et al.* (2015a) são verificados comportamentos padronizados entre os resíduos e a condição de independência não é satisfeita. Ao mesmo tempo, verifica-se que distribuição normal é atendida pela análise gráfica dos resíduos (histograma) e pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk a normalidade também é atendida. Dessa forma, observa-se que a calibração proposta por Bicalho et al., 2015a possui validade estatística questionada, apesar de possuir maior quantidade de dados artificiais definidos pelas equações. bilineares (ASTM D5298-10; Chandler et al. (1992); Leong et al. (2002)). Portanto conclui-se que deve se existir um cuidado em utilizar as equações propostas na literatura que normalmente são assumidas estatisticamente válidas para todo o intervalo de sucção, em que se observam pares de pontos (*s-w_f*) diferentes dos pontos experimentais.

Portanto, as calibrações do papel filtro W42 (trajetórias de umedecimento), em que as hipóteses do modelo de regressão são verificadas e consideradas estatisticamente válidas neste estudo são as calibrações investigadas propostas pela ASTM D5298-10, por Leong *et al.* (2002) e pelas Calibrações B1 (Eq. 5.3) e B2 (Eq. 5.4) definidas neste estudo, usadas no método do papel filtro pela técnica em contato.

Quantifica-se a variabilidade dos resíduos entre as calibrações investigadas consideradas válidas estatisticamente neste trabalho na Tabela 5.6 em que são apresentados os valores da raiz quadrada do erro médio (*RMSE*) e do erro médio (*ME*) das mesmas. O intervalo de sucção para os dados experimentais utilizados

para a calibração da proposta pela ASTM D5298-10 varia entre 9 kPa<s<100.000 kPa, já para a calibração proposta por Leong *et al.* (2002) varia entre 10 kPa<s<30.000 kPa. Para as calibrações B1 (Eq. 5.3 deste trabalho) e B2 (Eq. 5.4 deste trabalho) o intervalo varia entre 10 kPa<s<100.000 kPa. Ressalta-se que as calibrações B1 e B2 são obtidas a partir dos dados experimentais utilizados na ASTM D5298-10 (Fawcett e Collis-George (1967) e Greacen *et al.* (1987)) e em Leong *et al.* (2002).

Os valores positivos e negativos de erro médio (ME) na Tabela 5.6 indicam sub ou superestimação das calibrações. A raiz quadrada do erro médio (RMSE) tende a decrescer à medida que R² cresce. O intervalo de w_f para os dados experimentais das calibrações da Tabela 5.6 para a ASTM D5298-10 e a para as calibrações B1 (Eq. 5.3) e B2 (Eq. 5.4) obtidas neste trabalho equivalem entre 6 a 108% e para a calibração de Leong et al. (2002) o intervalo de w_f é de 6% a 79%.

Tabela 5.6 - Valores de *RMSE* e *ME* dos resíduos dos ajustes das calibrações válidas

Referências	Leong et al. (2002)	ASTM D5298-10	Calibr. B1	Calibr. B2
Observações	18	10	28	28
ME	-0.0088	0.0028	0.0435	0.1069
RMSE	0.0892	0.0723	0.2204	0.2806
-		A		

Fonte: Autora, 2017

Na comparação entre os valores da raiz quadrada do erro médio (*RMSE*) através da Tabela 5.6, observa-se que a calibração proposta pela ASTM D5298-10 (menor quantidade de resultados experimentais de sucção impostas) possui a menor amplitude de variabilidade dos resíduos em comparação com as calibrações propostas por Leong et al. (2002) e as Calibrações B1 e B2 definidas neste estudo (maior quantidade de resultados experimentais).

Dessa forma selecionam-se dentre os melhores ajustes obtidos para as calibrações bilineares investigadas (estatisticamente válidas) usadas no método do papel filtro a calibração proposta pela ASTM D5298-10. E para os melhores ajustes obtidos para as calibrações exponenciais investigadas (estatisticamente válidas) a calibração exponencial B1 (Eq. 5.3 deste trabalho). Essas calibrações usadas no método do papel filtro para estimar sucções em solos não saturados são avaliadas

experimentalmente, no próximo item, e comparadas com outras técnicas de medição de sucção em solos não saturados.

5.4 Análise comparativa utilizando as calibrações investigadas

A análise comparativa entre o método do papel filtro e diferentes técnicas experimentais para avaliação das calibrações investigadas utiliza os melhores ajustes sugeridos neste estudo entre as curvas de calibrações (trajetória de umedecimento) investigadas. Os ajustes são definidos pela calibração bilinear proposta pela ASTM D5298-10 e a calibração exponencial B1 (Eq. 5.3) definida neste trabalho. Apresentam-se os resultados da comparação entre os valores de sucção estimados por essas calibrações investigadas usadas no método do papel filtro com os correspondentes valores de sucção medidos por outras técnicas experimentais para diferentes tipos de solos (solo caulim siltoso e laterítico argiloso) e intervalos de sucção.

Para realização da análise comparativa entre o método do papel filtro e diferentes técnicas experimentais para avaliação das calibrações investigadas, utilizam-se curvas de retenção de água nos solos caulim siltoso e laterítico argiloso, sob trajetória de secagem, obtidas pelo método do papel filtro e por diferentes técnicas experimentais de medição da sucção determinados em Soto (2004) e Lucas *et al.* (2011). No subitem 3.2.3 deste trabalho apresenta-se uma revisão bibliográfica das técnicas experimentais utilizadas para obtenção de curvas de retenção de água no solo.

Estudo de Soto (2004)

A curva de retenção de água em solo caulim siltoso obtida em Soto (2004) utilizou o método do papel filtro (denominada por "MPF"), o método de translação de eixos (denominada por "TE") e o tensiômetro de alta capacidade (denominada por "TAC"). Os equipamentos usados pelo método de translação de eixos foram uma câmara de pressão de Richards e uma membrana de pressão. Ambos os equipamentos utilizados são complementares entre si, com relação aos intervalos de sucções medidos. Destaca-se que a pressão máxima permissível da câmara de pressão de Richards utilizada por Soto (2004) era de 500 kPa. E o limite máximo do

equipamento da membrana de pressão utilizado pelo pesquisador foi de 3.000 kPa. Soto (2004) usou para o método do papel filtro a curva de calibração definida por Chandler *et al.* (1992).

Essas técnicas (método de translação de eixos; tensiômetro de alta capacidade e método do papel filtro) foram empregadas em um solo caulim comercial de textura siltosa, objeto deste estudo, entre outros solos analisados por Soto (2004). O solo caulim siltoso é escolhido por possuir elevados valores de coeficiente de correlação correspondentes aos ajustes da curva de retenção de água no solo. E principalmente por possuir uma boa quantidade de observações experimentais medidas para a faixa de valores de sucção desse solo utilizando o método do papel filtro. As amostras utilizadas em Soto (2004) foram compactadas nas condições ótimas da energia Proctor normal com 95% de grau de compactação. Os ensaios de caracterização e compactação das amostras desse solo apresentaram 5% de areia fina, 85% de silte e 10% de argila. O solo caulim siltoso apresentou peso específico seco máximo de 16.90 kN/m com umidade ótima de 17.20% no ensaio Proctor normal. O peso específico dos sólidos desse solo foi equivalente a 28.80 kN/m.

Estudo de Lucas et al. (2011)

Lucas *et al.* (2011) utilizou o método do papel filtro (denominada por "MPF") e a câmara de pressão de Richards (denominada por "CPR") para obtenção da curva de retenção de água em um solo laterítico argiloso. Para o método do papel filtro, os pesquisadores definiram uma calibração do papel filtro W42 específica empregandose soluções salinas, com base no que determina a ASTM D5298-10 e nas orientações sugeridas por Bulut *et al.* (2001). A calibração *s-w_f* obtida por Lucas *et al.* (2012) é definida como:

$$\log(s) = 4,932 - 0,0826w_f \tag{5.4}$$

Para realização das técnicas da *câmara de pressão de Richards* e do método do papel filtro para medir sucção no solo, foram utilizadas amostras indeformadas por Lucas *et al.* (2011). A partir de um solo classificado como solo laterítico argiloso. Os ensaios de caracterização desse solo apresentaram 75% de fração de argila, teor de umidade estado natural de 39%, peso específico dos sólidos equivalente a 29.50

kN/m e peso específico seco de 10,90 kN/m. Na Tabela 5.7 apresentam-se o resumo das propriedades físicas dos dois solos avaliados experimentalmente neste estudo.

Tabela 5.7 - Propriedades físicas de dois solos avaliados experimentalmente

Propriedades dos solos		Solo caulim siltoso	Solo laterítico argiloso
Condições da amostra		Compactado	Indeformado
Fração de argila	%	10.00	75.00
Peso específico dos sólidos (γ _s)	kN/m ³	28.80	29.50
Peso específico seco (γ _d)	kN/m ³	-	10.90
Teor de umidade estado natural (w _{nat})	%	0.30	39.00
Peso específico seco máximo* (γ _{dmáx})	kN/m ³	16.90	-
Teor de umidade ótima* (wót)	%	17.20	-
Porosidade (n)		41.18	63.05

^{*}Condições ótimas da energia proctor normal

Fonte: Soto (2004) e Lucas et al. (2011)

Apresentam-se a análise comparativa entre os valores de sucção do solo caulim siltoso estimados pelo método do papel filtro através da calibração proposta pela ASTM D5298-10 e a Calibração B1 (Eq, 5.3) definida neste trabalho, com os valores de sucção correspondentes medidos pela técnica da translação de eixos (TE) e pelo tensiômetro de alta capacidade (TAC) na Figura 5.14 e na Figura 5.17, respectivamente. Ambas as técnicas foram realizadas em Soto (2004). Nos gráficos das análises comparativas dessas figuras são plotados simultaneamente os limites máximo e mínimo para o intervalo de confiança de 80% na configuração 1:1.

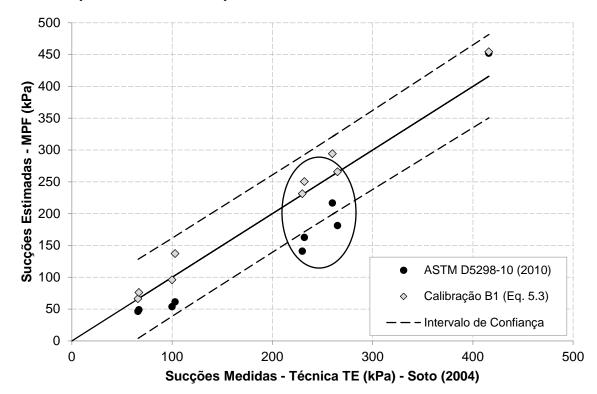
Os resultados obtidos dos valores de sucção do solo caulim siltoso estimados pelo método do papel filtro (MPF) para a calibração proposta pela ASTM D5298-10 e a para a Calibração B1 (Eq. 5.3) definida neste estudo com seus correspondentes valores de sucção medidos em Soto (2004) pelas técnicas de translação de eixos (TE) e do tensiômetro de alta capacidade (TAC) foram apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Valores de s estimados pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medidos pela técnica de TE para o solo caulim siltoso

(24)	s estimadas	s estimadas pelo MPF (kPa)		
<i>W_f</i> (%)	w _f (%) Calibração B1 (Eq. 5.3 deste ASTM D5298 trabalho)		TE Soto (2004)	
55,30	66,00	46,00	66,00	
53,50	76,00	49,00	67,00	
50,60	96,00	54,00	100,00	
46,40	137,00	61,00	103,00	
40,80	231,00	141,00	230,00	
40,00	250,00	163,00	232,00	
39,40	266,00	181,00	265,00	
38,40	294,00	217,00	260,00	
34,30	454,00	452,00	416,00	

Fonte: Autora, 2017

Figura 5.16 – Limites dos intervalos de confiança (80%) entre valores de s estimados pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medidos pela técnica de TE para o solo caulim siltoso



Fonte: Autora, 2017

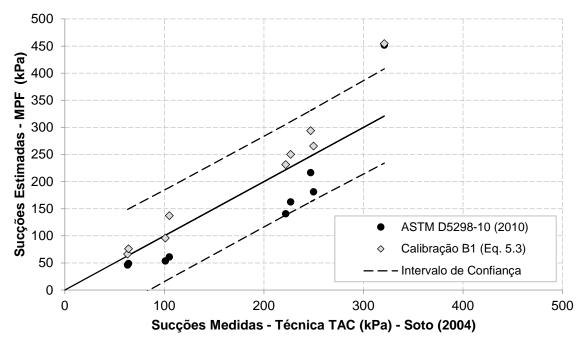
Na Figura 5.16 observa-se boa concordância para a maioria dos resultados comparativos entre os valores de sucção do método do papel filtro estimados pela calibração exponencial B1 (Eq. 5.3) definida neste trabalho e os valores de sucções medidos obtidos no estudo de Soto (2004) para o solo caulim siltoso utilizando o método de translação de eixos. Esses valores de sucção estão próximos à reta 1:1 e todos os pontos referentes as sucções do solo caulim siltoso estão inseridos dentro dos limites do intervalo de confiança (IC). Em contrapartida, para os valores de sucções do método do papel filtro estimados pela curva de calibração bilinear proposta pela ASTM D5298-10, observa-se que, para o intervalo de sucção entre 150 e 250 kPa destacado na Figura 5.16, valores de sucções estimados pela calibração proposta da ASTM D5298-10 estão fora dos limites do intervalo de confiança (IC) de 80%. Nessa análise, a sucção estimada pela calibração proposta da ASTM D5298-10 indica superestimação.

Tabela 5.9 - Valores de s estimados pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medidos pela técnica do TAC para o solo caulim siltoso

	s estimadas pelo	s medidas (kPa)	
	Calibração B1 (Eq.5.3 deste trabalho)	ASTM D5298-10 (2010)	TAC (Soto 2004)
55,30	66,00	46,00	63,00
53,50	76,00	49,00	64,00
50,60	96,00	54,00	101,00
46,40	137,00	61,00	105,00
40,80	231,00	141,00	222,00
40,00	250,00	163,00	227,00
39,40	266,00	181,00	250,00
38,40	294,00	217,00	247,00

Fonte: Autora, 2017

Figura 5.17 - Limites dos intervalos de confiança (80%) entre valores de s estimados pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medidos pela técnica do TAC para o solo caulim siltoso



Fonte: Autora, 2017

Na Figura 5.17 da análise comparativa entre os valores de sucções medidos pela técnica do tensiômetro de alta capacidade e estimado pelo método do papel filtro pelas curvas de calibração bilinear proposta pela ASTM D5298-10 e a Calibração B1 exponencial (Eq. 5.3) definida neste trabalho mostram todos seus valores de sucções estimados para o solo caulim siltoso estão inseridos no intervalo de confiança (IC). Para os valores de sucções do solo estimados usando a calibração proposta pela ASTM 5298-10 observa-se maior dispersão dos pontos, quando comparado com a reta 1:1.

Na Figura 5.16 apresentam-se a análise comparativa entre os valores de sucção do solo laterítico argiloso estimados pelo método do papel filtro através da calibração proposta pela ASTM D5298-10 e proposta pela Calibração B1 (Eq. 5.3) definida neste trabalho com os valores de sucção correspondentes medidos pela câmara de pressão de Richards. Simultaneamente são plotados os limites máximo e mínimo para o intervalo de confiança de 80% na configuração 1:1. Os resultados obtidos dos valores de sucção do solo laterítico argiloso estimados pelo método do papel filtro pela ASTM D5298-10 e a Calibração B1 (Eq. 5.3) definida neste trabalho, com seus

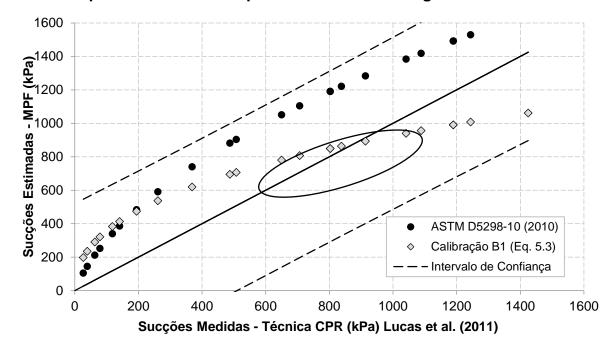
correspondentes valores de sucção medidos em Lucas *et al.* (2001) pela câmara de pressão de Richards , *foram* apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Valores de s estimados pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medidos pela técnica da CPR para o solo laterítico argiloso

w (9/)	s estimadas po (kPa)	elo MPF	s medidas (kPa)	w (9/)	s estimadas p (kPa)		s medidas (kPa)
W_f (%)	Calibração B1	ASTM	CPR	<i>W_f</i> (%)	Calibração B1	ASTM	CPR
	(Eq. 5.3 deste	D5298	(Lucas et		(Eq. 5.3 deste	D5298	(Lucas et
	trabalho)	(2010)	al. 2011)		trabalho)	(2010)	al. 2011)
42,44	197,00	105,00	26,76	29,32	807,00	1104,00	706,78
40,63	235,00	145,00	39,40	28,90	849,00	1191,00	802,75
38,53	290,00	212,00	62,94	28,90	849,00	1191,00	802,75
37,55	321,00	252,00	79,01	28,76	863,00	1221,00	837,91
35,88	383,00	340,00	118,32	28,48	893,00	1283,00	913,45
35,18	413,00	386,00	140,79	28,06	940,00	1384,00	1041,41
33,93	474,00	483,00	194,24	27,92	957,00	1419,00	1088,42
32,81	537,00	591,00	261,21	27,64	990,00	1492,00	1189,68
31,55	620,00	740,00	369,04	27,64	990,00	1492,00	1189,68
30,57	695,00	882,00	487,53	27,50	1008,00	1529,00	1244,17
30,43	706,00	904,00	507,68	27,08	1062,00	1649,00	1425,17
29,60	780,00	1050,00	649,90				

Fonte: Autora, 2017

Figura 5.18 - Limites dos intervalo de confiança (80%) entre valores de s estimados pelo MPF para diferentes calibrações e os correspondentes s medidos pela técnica da CPR para o solo laterítico argiloso



Fonte: Autora, 2017

A análise comparativa da Figura 5.18 mostram todos seus valores de sucções matricial do solo laterítico argiloso estão inseridos no intervalo de confiança para o intervalo (30<s<1500kPa). Observa-se para os valores de sucções estimados pelo método do papel filtro utilizando a calibração proposta pela Calibração B1 (Eq. 5.3) definida neste trabalho sugere uma ótima comparação com os valores de sucções medidos pela câmara de pressão de Richards, no intervalo de sucção entre 600 a 1.200 kPa, destacado na Figura 5.18 para o solo laterítico argiloso. Essa análise indica que o método do papel filtro em contato utilizando a curva de Calibração exponencial B1 (Eq. 5.3) definida neste trabalho, obteve para o solo laterítico argiloso, valores de sucções estimados aproximadamente equivalentes aos valores de sucções medidos pela câmara de pressão de Richards no intervalo (600 a 1.200 kPa), comparados aos valores de sucções estimados pela calibração bilinear proposta pela ASTM D5298-10 para o papel filtro W42.

A variabilidade entre as sucções estimadas pelo método do papel filtro utilizando a calibração B1 (Eq. 5.3) definida neste trabalho e a calibração sugerida pela ASTM D5298-10 aumenta à medida que o w_f diminui. Essa variabilidade não é significativa para 50% $< w_f < 55\%$ (ou seja, aproximadamente 65< s < 100 kPa) para o solo caulim siltoso com fração argila igual 10% e para 27% $< w_f < 31\%$ (ou seja, aproximadamente 1244 < s < 508 kPa) para o solo laterítico argiloso com fração argila igual 75%, em que os valores estimados pelo método do papel filtro estão próximos das sucções medidas por outras técnicas.

Embora seja necessária a obtenção de maiores intervalos de sucções medidos para as outras técnicas experimentais (translação de eixos, translação de eixos e câmara de pressão de Richards), o que iria auxiliar na avaliação da calibração bilinear proposta pela ASTM D5298-10 e a Calibração exponencial B1 (Eq. 5.3), em geral, as sucções estimadas pelo método do papel filtro utilizando a Calibração exponencial B1 estão inseridos nos limites (superiores e inferiores) do intervalo de confiança, a 80%. Os resultados obtidos nas análises realizadas indicam que o método do papel filtro usado com a Calibração B1 sugerida neste estudo, tem considerável potencial para ser adotado para estimativa de valores de sucção matricial para o solo caulim siltoso e o solo laterítico argiloso no intervalo de 30 kPa<s<1.500 kPa, quando comparada com a calibração bilinear da ASTM D5298-10.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÃO

Esta dissertação avaliou curvas de calibrações "s-w_f" (sucção-teor de umidade gravimétrico do papel filtro), sob trajetória de umedecimento, previamente publicadas na literatura para o papel filtro W42 utilizadas no método do papel filtro em contato para estimar indiretamente sucção matricial em dois diferentes tipos de solos (solo caulim siltoso e laterítico argiloso) e intervalos de variação de sucção. As curvas de calibrações bilineares compostas por duas equações lineares avaliadas para o método do papel filtro foram propostas por ASTM D5298-10; Chandler et al. (1992); Leong et al. (2002). Já as equações exponenciais avaliadas para o método do papel filtro foram propostas por: Van Genuchten (1980); Fredlund e Xing (1994); Bicalho et al. (2015a). Somente os valores de sucção estimados pelo método do papel filtro obtidos pela calibração exponencial proposta por Fredlund e Xing (1994) para s <10.000 kPa não estão inseridos na faixa de erro aceitável pela norma americana ASTM D5298-10 (ou seja, ± 0,25 log(s)).

Neste trabalho, a avaliação estatística foi realizada para as calibrações (trajetórias de umedecimento) investigadas do método do papel filtro em que é possível extrair na literatura seus dados experimentais (sucção controlada por diferentes técnicas experimentais em equilíbrio hidráulico relacionada com o w_f medido) para calibração do papel tipo W42. Avaliaram-se as (i) calibrações bilineares investigadas propostas pela ASTM D5298-10; por Leong et al.,2002; (ii) calibração exponencial proposta por Bicalho et al., 2015a; (iii) e as novas calibrações exponenciais propostas neste estudo: Calibração A (Eq. 5.2), Calibração B1 (Eq. 5.3) e Calibração B2 (Eq. 5.4).

A nova Calibração exponencial A (Eq. 5.2), sob trajetória de umedecimento, definida neste estudo para estimar sucção matricial em solos não saturados pelo método do papel filtro em contato possui uma transição suave entre os altos e baixos valores de sucções. A Calibração A é determinada por regressão linear considerando 6 observações determinados diretamente em Fawcett e Collis-George (1967) para o intervalo de sucção imposta entre 30 kPa e 30.000 kPa. Os dados experimentais foram obtidos pelos pesquisadores utilizando equipamentos convencionais, através

das técnicas de membrana de pressão, placa de pressão e dessecador para o papel tipo W42.

Propõe-se também as novas Calibrações exponenciais B1 (Eq. 5.3) e B2 (Eq 5.4), sob trajetórias de umedecimento, definida neste estudo para estimar sucção matricial em solos não saturados pelo método do papel filtro em contato com uma transição suave entre os altos e baixos valores de sucções. A Calibração B1 e B2 foram determinadas por regressão linear considerando 28 dados experimentais para o intervalo de sucção entre 10 kPa e 100.000 kPa. Os dados experimentais foram determinados diretamente em Greacen et al. (1987); Fawcett e Collis-George (1967) e em Leong et al. (2002) utilizando equipamentos convencionais, através das técnicas de membrana de pressão, placa de pressão e dessecador para obtenção da calibração definida neste estudo para o papel tipo W42.

A diferença entre a calibração B1 e B2 estão nos dados extraídos de Fawcett e Collis-George (1967) em que, para a Calibração B1 (total de 28 valores de w_f) são considerados apenas os dados médios para os w_f medidos por sucção imposta e para a Calibração B2 (total de 77 valores de w_f) são considerados todos os valores de w_f medidos por sucção imposta, porém destaca-se que ambas as calibrações apresentam 28 resultados experimentais diferentes de sucção imposta e possuem maior quantidade de dados experimentais quando comprados com as calibrações bilineares propostas pela ASTM D5298-10 e por Leong et al.,2002 e a Calibração exponencial A (Eq. 5.2) definida neste estudo.

As calibrações investigadas do papel filtro W42 (trajetórias de umedecimento), em que as hipóteses do modelo de regressão são verificadas e que foram consideradas estatisticamente válidas neste estudo propõem: (i) que os modelos das calibrações investigadas para utilização no método do papel filtro indicam aproximadamente 100% de qualidade no ajuste dos dados experimentais utilizados; (ii) que a validade da existência da relação linear e intrinsecamente linear das calibrações bilineares e exponenciais obtidas por regressão linear é verificada; (iii) que a distribuição dos resíduos (determinados pela diferença entre os valores da sucção controlada do papel filtro obtidos por técnicas experimentais especificas e os valores da sucção estimados pelo método do papel filtro obtidos pela calibração investigada) são

provenientes de uma variável aleatória independente e normalmente distribuída, com média zero e variância constante.

As calibrações investigadas do papel filtro W42 consideradas estatisticamente válidas foram as calibrações bilineares investigadas propostas pela ASTM D5298-10; por Leong et al.,2002 e as novas calibrações exponenciais propostas neste estudo: Calibração B1 (Eq. 5.3) e Calibração B2 (Eq. 5.4). A Calibração A (Eq. 5.2), com dados experimentais limitados, foi analisada estatisticamente e concluiu-se que a mesma é considerada estatisticamente inválida.

Observa-se que quando a Calibrações B1 e B2 (maior quantidade de resultados experimentais) comparadas com a Calibração A (dados experimentais limitados) definidas neste estudo verifica-se que quanto maior a quantidade de dados experimentais de diferentes sucções impostas utilizadas na obtenção da curva de calibração do papel sugere-se uma maior confiabilidade na utilização da mesma tendo em vista que a Calibração A foi considerada estaticamente inválida.

Para a calibração exponencial proposta por Bicalho *et al.*(2015a) calibrada para dados artificiais de valores de sucções estimados (w_{fi} =1%, i=1..n) por curvas de calibrações predeterminadas pelos pesquisadores propostas pela ASTM D5298-10; por Leong et al., 2002 e por Chandler et al., 1992, a análise residual estatística mostra que, ao mesmo tempo que as distribuições dos resíduos não possuem condição de independência é verificada distribuição normal dos resíduos, conforme calculados no teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Dessa forma, observa-se que a calibração proposta por Bicalho *et al.*, 2015a possui validade estatística questionada, apesar de possuir maior quantidade de dados artificiais definidos pelas equações. bilineares (ASTM D5298-10; Chandler et al. (1992); Leong et al. (2002)). Portanto, conclui-se que deve se existir um cuidado em utilizar as equações propostas na literatura que normalmente são assumidas estatisticamente válidas para todo o intervalo de sucção, em que se observam pares de pontos (*s-w_i*) diferentes dos pontos experimentais.

Quantifica-se a variabilidade dos resíduos das calibrações investigadas, identificadas como estatisticamente válidas propostas pela ASTM D5298-10, por Leong et al.

(2002) e pela Calibração B1 (Eq. 5.3), para estimar valores de sucção matricial em solos não saturados pelo método do papel filtro em contato. Os resíduos são definidos pelas diferenças entre os valores de sucção controlada do papel filtro obtidas por diferentes técnicas experimentais e a sucção do papel estimada pelas calibrações investigadas. A calibração da ASTM D5298-10 (menor quantidade de resultados experimentais de sucção impostas) possui a menor amplitude de variabilidade dos resíduos em comparação com as calibrações propostas por Leong et al. (2002) e as Calibrações B1 e B2 definidas neste estudo (maior quantidade de resultados experimentais). Dessa forma selecionam-se dentre os melhores ajustes obtidos para as calibrações bilineares investigadas (estatisticamente válidas) usadas no método do papel filtro a calibração proposta pela ASTM D5298-10. E para os obtidos para as calibrações exponenciais investigadas melhores ajustes (estatisticamente válidas) a calibração exponencial B1 (Eq. 5.3 deste trabalho).

A análise comparativa entre o método do papel filtro e diferentes técnicas experimentais para avaliação das calibrações investigadas que possuem o melhor ajuste conforme foi sugerido neste estudo é realizada para a calibração bilinear proposta pela ASTM D5298-10 e para Calibração exponencial B1 (Eq. 5.3) definida neste estudo, usadas no método do papel filtro. Comparam-se os valores de sucção estimados por essas calibrações do método do papel filtro com os valores de sucção correspondentes medidos por outras técnicas experimentais (translação de eixos, tensiômetro de alta capacidade e câmara de pressão de Richards) para diferentes tipos de solos (caulim siltoso e laterítico argiloso) e intervalos de sucção. A análise comparativa sugere uma boa concordância entre os valores de sucção matricial estimados pelo método do papel filtro para a Calibração exponencial B1 (Eq.5.3) definida neste estudo e os valores de sucção medidos por outras técnicas experimentais (translação de eixos, tensiômetro de alta capacidade e câmara de pressão de Richards) de medir sucção para o intervalo de sucção em 30 kPa <s <1.500 kPa nos dois diferentes tipos de solos investigados (caulim siltoso e laterítico argiloso). Os valores de sucção estimados pelo método do papel filtro obtidos pela Calibração B1 (Eq. 5.3) são os valores que melhor se ajustam aos valores de sução medidos por outras técnicas de medir sucção, no intervalo de confiança a 80%.

Os resultados obtidos nas análises realizadas indicam que o método do papel filtro usado com a Calibração exponencial B1 (trajetória de umedecimento) sugerida neste estudo tem considerável potencial para ser adotado para estimativa de valores de sucção matricial em solos não saturados. Entretanto, recomenda-se investigação experimental da calibração sugerida para diferentes intervalos de sucções e solos.

6.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aprimorar o uso da Calibração exponencial B (trajetória de umedecimento) para o papel filtro tipo W42 sugerida neste estudo usadas no método do papel filtro pela técnica em contato para estimar sucção matricial em solos não saturados comparadas por outras técnicas experimentais de valores de sucção medidos, que possuam intervalos de sucção similares ao determinado pelo método do papel filtro. Como por exemplo, as técnicas de medir sucção de condutividade elétrica ou térmica, coluna de solo e centrífuga, ampliando o intervalo de validação do ajuste da calibração exponencial B sugerida neste estudo usada no método do papel filtro.
- Investigar experimentalmente a Calibração exponencial B (trajetória de umedecimento) sugerida neste estudo para estimar sucção matricial em diferentes tipos de solo e intervalos de sucções (i.e, s >1.500 kPa) usadas no método do papel filtro em contato.
- Definir novas curvas de calibração para o método do papel filtro seguindo trajetórias de secagem, através de dados experimentais de valores de sucções controlados por diferentes técnicas experimentais, para o papel filtro inicialmente úmido.
- Investigar diferentes calibrações propostas para o método do papel filtro pela técnica sem contato para estimar sucção total nos solos não saturados.
- Avaliar a inserção do parâmetro temperatura, importante no método do papel filtro, como parte integrante da curva de calibração definida neste estudo, a partir de ensaios experimentais específicos para esse fim presentes na literatura;

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-KHAFAF, S.; HANKS, R. J. Evalution of the Filter Paper Method for Estimating Soil Water Potencial. Soil sci., v. 117, n. 4, p. 194-199, 1974.

ASTM D5298-10. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

BICALHO, K. V.; CUPERTINO, K. F.; BERTOLDE, A. I. **Evaluation of the suction calibration curves for Whatman 42 filter paper.** Proc. first Pan-American. Conf. Unsaturated Soils, Cartagena de Indias, Colombia, p. 225-230, 2013.

BICALHO, K. V.; MARINHO, F. A. M.; FLEUREAU, J. M.; CORREIA, A. G.; FERREIRA, S. Evaluation of filter paper calibrations for indirect determination of soil suctions of unsaturated compacted silty sand.17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009.

BICALHO, K.V.; BERTOLDE, A. I.; CUPERTINO, K. F.; FLEUREAU J.M.; CORREIA A.G. Single-Function Approach to Calibrating Whatman No. 42 Filter Paper Based on Suction Versus Water Content Relationships. Geotechnical Testing Journal, 38 (1), 2015a.

BICALHO, K.V.; CHRYSTELLO, A.C.; CUPERTINO, K. F.; FLEUREAU, J-M.; CORREIA, A.G. Study of Suction-Water Content Calibrations for the Whatman No. 42 Filter Paper. 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, 2015b.

BONAT, W. H.;RIBEIRO Jr, P. J.; ZEVIANI, W. M. **Modelos de Regressão não linear.** 58º RBRAS e 15º SEAGRO, Campina Grande - PB, 2013.

BROOKS R.; COREY A. **Hydraulic properties of porous media**. Hydrology papers. Colorado State University, 1964.

BULUT, R.; LEONG, E. C. Indirect Measurement of Suction. Geotech Geo lEng, 2008.

BULUT, R.; LYTTON, R. L.; WRAY, W. K. **Soil suction measurements by filter paper.** In: GEO-INSTITUTE SHALLOW FOUNDATION AND SOIL PROPERTIES, 2001, Houston. Proceedings. Houston: Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers, p.243-261. 2001.

BULUT, R.; WRAY, W.K. Free energy of water-suction-infilter papers. Geotech. Test. J., 28:355-364, 2005.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. Estatística Básica. 6ª edição, Saraiva: 2011.

CAMAPUN, J.; GITIRANA Jr, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. . **Solos não saturados no contexto geotécnico.** 1. ed. São Paulo: ABMS, v. 1. 804p . 2015.

CAMPOS, T.M.P.; DELGADO, C.C.; TIBANA, S.; AGUILAR, S.A.S.; FONSECA, E.C. **Determinação da Curva Característica de Sucção em Laboratório**. In: 1ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas — 1ª COBRAE, Rio de Janeiro, Anais p. 835-851, 1992.

CHANDLER R.J.; GUTIERREZ C.I. The filter paper method of suction measurement, Geotechnique 36 (2) 265-268, 1986.

CHANDLER, R.J.; CRILLY, M.S.; MONTGOMERY-SMITH, G. - "A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings". - Proc. of the Institute of Civil Engineering, 92 - n.2 - pp.82-89, 1992.

CRILLY, M. S.; CHANDLER, R. J.A. **Method of Determining the State of Desiccation in Clay Soils.** Building Research Establishment Information Paper, BRE Press, Bracknell Berkshire, United Kingdom, v. 4, n. 93, p.1-4, 1993.

CUPERTINO K. F. Análise de Curvas de Calibração utilizadas no método do papel filtro para estimar a Sucção matricial em Solos não saturados.

Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, 2013.

FAWCETT, R.G.; COLLIS-GEORGE, N. A filter-paper method for determining the moisture characteristics of soil. Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry, n.7. pp.162-167, 1967.

FREDLUND, D. G. Use of soil-water characteristic curves in the implementation of unsaturated soil mechanics. In: 3rd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT, Recife, 2002.

FREDLUND D.,; XING A. **Equations for the soil water characteristic curve.** Can. Geotech J., v. 31, p. 521-532, 1994.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. **Stress state variable for unsaturated soils.** Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASGE, v. 103, p. 447-466, 1977.

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

GARDNER R. A method of measuring the capillary tension of the soil moisture over a wide moisture range. Soil Sci., v. 43, p. 277-283, 1937.

GEHLING, W.Y.Y. **Ensaios de laboratório de campo.** 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos –SP p.513-523, 2004

GOMES, J. E. S. Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo, SP, 2007.

GREACEN, E. L.; WALKER, G. R.; COOK, P. G. Evaluation of the filter paper method for measuring soil water suction. In: International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status, p. 137-143, 1987.

HAGHIGHI A. **Thermo-hydro-mechanical behavior of kaolin clay.** Tese de doutorado, Heriot Watt University, Inglaterra, 2011.

HAMBLIN, A. P. Filter Paper Method for Routine Measurement of Field Water Potential. J. Hydrol., v. 53, p. 355-360, 1981.

HILF, J. W. **An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils.** Denver, 1956. 109 p. (Doutorado - Faculty of the Graduate Scholl of the University of Colorado), 1956.

HOUSTON, S. L.; HOUSTON, W. N.; WAGNER, A. M. Laboratory Filter Paper Suction Measurements. Geotech. Test. J. v. 17, n. 2, p. 185-194, 1994.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. (1969). **Soil Mechanics,** John Wiley & Sons Inc. New York. 553p

LEE, H. C.; WRAY, W. K. **Techniques to evaluate soil suction – a vital unsaturated soil water variable.** International conference on unsaturated soils, Paris, 1995.

LEONG, E.C; HE, L.; RAHARDJO, H. Factors Affecting the Filter Paper Method for Total and Matric Suction. Measurements.Geotech.Test. J., v. 25, n. 3, p 322-332, 2002.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba: P. L. Libradi, 509 p. 2000.

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated Soils Mechanics.** John Wiley and Sons, p. 556, 2004.

LUCAS, J.F.R.; TAVARES M., H., F.; CARDOSO L.; CÁSSARO F., A., M. Curva De Retenção de Água no Solo pelo Método Do Papel-Filtro Rev. Bras. Ciênc. Solo vol.35 no.6, Viçosa, 2011.

MARINHO F.A.M. **Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados.** Concurso de Livre-Docência na especialidade "Geomecânica" do
Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. EPUSP. 2005

MARINHO, F. **Shrinkage behavior of some plastic clays.** PhD Thesis, Imperial College, University of London, 1994.

MARINHO, F; OLIVEIRA, O. M. **The filter paper method revised.** ASTM Geotechnical Testing Journal, USA, 2006.

MCQUEEN, I.S.; MILLER, R.F. Calibration and evaluation of a wide-range gravimetric method for measuringmoisture stress. Soil Science, vol.106, n.3 - pp.225-231. 1968.

MEYER, P. L. **Probabilidade: Aplicações à Estatística**, segunda edição, Livros técnicos e Científicos Editora,1983.

MILLER, C.J.; YESILLER, N.; YALDO, K.; MERAYYAN, S. Impact of Soil Type and Compaction Conditions on Soil Water Characteristic. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.128, no 9. p.733-742, 2002.

MONCADA, M. P. H. Estudo em laboratório de características de colapso e transporte de solutos associados à infiltração de licor cáustico em um solo laterítico. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUCRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MURRAY R. S. Estatística. 3. ed. São Paulo: Makron, 1994.

NAGHETTINI, M.; PINTO, J. D. A. Hidrologia estatística. CPRM, 2007.

PETERNELLI, L. A.; MELLO, M. P. Conhecendo o R: uma visão estatística. Viçosa: UFV, 2007. 181p. (Cadernos didáticos;118) ISBN 9788572693011

POWER, K. C.; VAPANALLI, S. K.; GARGA, V. N. A revised Contact Filter Paper Method. Geotechnical Testing Journal, v. 31, n. 6, 2008.

REICHARDT, K. Processos de Transferência no Sistema Solo - Planta - Atmosfera, 4ª ed. Campinas: Fund. Cargill. 466p.,1985.

RIDLEY A.; DINEEN K.; BURLAND J.; VAUGHAN P. Soil matrix suction: some examples of its measurements and application in geotechnical engineering. Geotechnique, v. 52, p. 1293-1322, 2003.

RIDLEY, A. M.; BURLAND, J. B. **A new instrument for the measurement of soil moisture suction.** Geotechnique, v. 43, n. 2, p. 321-324, 1993.

RIDLEY, A. M.; WRAY, W. K. Suction measurement - A review of current theory and practices. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, P. 1293-1322, 1996.

SANTOS, C. R; VILAR, O. M. **Análise paramétrica da estabilidade de taludes em solos não saturados: a influência do tipo de solo.** 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. p.181-188, São Paulo, 2004

SCOTT, D.H. Soil water principles. In: Soil physics: agricultural and environmental applications. Ames: Iowa State University Pressp. 165-212, 2000.

SOTO M. A. A. Comparação entre métodos de imposição de controle de sucção em ensaios com solos não saturados. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Departamento de Geotecnia, São Carlos, SP, 2004.

TORMAN, V. B. L.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. Clinical & Biomedical Research, 32(2), 2012.

VAN GENUCHTEN M., A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci.44 (5), 1980.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E. The Relationship between the Soil-Water Characteristic Curve and the Unsaturated Shear Strength of a Compacted Glacial Till. Geotechnical Testing Journal, Vol. 19, No 3, p. 259-268., 1996

VILAR, O. M.; CINTRA, J. C. A.; PARAGUASSU, A. B. Ensaios de campo e de laboratório em solos não saturados. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: UFRGS, 1995. p. 184-201. 1995.

VIVACQUA, G. P. D. Estudo da influência da interação solo-atmosfera nos perfis de umidade, sucção e temperatura de um subsolo não saturado. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Espirito Santo, ES, 2012.

VIVIAN, J. B. Utilização do método do papel filtro para a determinação das curvas características de um solo coluvionar não saturado contaminado com óleo diesel. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.** International Geophysics Series. 2a. Edição, Estados Unidos da América, Academic Press, v. 91, 627 p. 2006.