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

KAMILA FURTADO CUPERTINO

ANÁLISE DE CURVAS DE CALIBRAÇÃO UTILIZADAS NO MÉTODO DO PAPEL FILTRO PARA ESTIMAR A SUCÇÃO MATRICIAL EM SOLOS NÃO SATURADOS

VITÓRIA 2013

KAMILA FURTADO CUPERTINO

ANÁLISE DE CURVAS DE CALIBRAÇÃO UTILIZADAS NO MÉTODO DO PAPEL FILTRO PARA ESTIMAR A SUCÇÃO MATRICIAL EM SOLOS NÃO SATURADOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na área de concentração em Estruturas/Geotecnia.

VITÓRIA 2013

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

Cupertino, Kamila Furtado, 1986-

C974a Análise de curvas de calibração utilizadas no método do papel filtro para estimar a sucção matricial em solos não saturados / Indicação de responsabilidade. – 2014. 102 f. : il.

Orientador: Kátia Vanessa Bicalho.

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

1. Solos - Testes 2. Solos - Potencial matricial. 3. Solos -Umidade. 4. Calibração. I. Bicalho, Kátia Vanessa. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

Kamila Furtado Cupertino

ANÁLISE DE CURVAS DE CALIBRAÇÃO UTILIZADAS NO MÉTODO DO PAPEL FILTRO PARA ESTIMAR A SUCÇÃO MATRICIAL EM SOLOS NÃO SATURADOS

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 21 de março de 2013 por:

Katia amessa Bicallio

Profa. Dra. Kátia Vanessa Bicalho Doutora em Engenharia Civil Orjentadora - UFES Mur Prof. Dr. Bruno Teixeira Dantas Douthr em Engenharia Civil Membro Interno - UFES

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires Doutor em Engenharia Civil Membro Interno – UFES

Prof. Dr. Aflelmo Inácio Bertolde Doutor em Estatística Membro Interno - VFES

man

Prof. Dr. Celso Romanel Doutor em Engenharia Civil Membro Externo – PUC/RIO

RESUMO

A sucção em solos não saturados (SNS) é uma das principais variáveis envolvidas no estudo do comportamento hidromecânico destes solos. Existem várias técnicas de determinação da sucção em SNS, e o método do papel filtro (MPF) é provavelmente um dos métodos mais simples disponíveis para estimar uma ampla variação de sucção em SNS (30 kPa a 30000 kPa). O MPF consiste basicamente em colocar o papel filtro em contato, direto ou indireto, com amostra do solo não saturado, em um ambiente fechado, até atingirem o equilíbrio de pressão. O equilíbrio é alcançado quando cessar o fluxo de fluido (sucção matricial) ou vapor (sucção total). Uma vez atingido o equilíbrio de pressão, a sucção do solo será a mesma do papel filtro, e conhecida a relação entre o teor de umidade gravimétrica e a sucção do papel filtro é possível estimar a sucção do solo. Essa relação é denominada de curva de calibração do papel filtro e define a curva de retenção da água no papel filtro. Várias calibrações para o papel filtro têm sido publicadas na literatura, e existe significativa discrepância entre elas. A maioria das calibrações publicadas é chamada bilinear (ou seja, duas diferentes equações lineares para representar altos e baixos níveis de sucções) com um ponto de inflexão ocorrendo entre 60 kPa e 120 kPa (correspondentes valores de umidades gravimétricas entre 40 e 50%). A possibilidade de definir uma função de calibração para o papel filtro do tipo Whatman Nº 42 com uma transição suave entre os altos e baixos níveis de sucções é avaliada neste estudo. Esta função é obtida a partir de funções de calibração já publicadas e avaliadas neste trabalho (i. e., pseudoamostras ou pontos artificiais). A ideia é de representar o melhor ajuste existente a partir de sete funções de calibração já publicadas para o papel filtro Whatman N° 42 (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002; ASTM D5298-03). A variabilidade da calibração sugerida em relação às sete calibrações publicadas é quantificada com a utilização de ferramentas estatísticas. Comparações entre os valores de sucção obtidos pelo MPF utilizando a calibração sugerida neste trabalho e os resultados obtidos com outras técnicas utilizadas para medir ou controlar sucções em diferentes solos não saturados (Fleureau et al., 2002; Soto, 2004 e Haghighi, 2011) mostram que o MPF aliado a um ajuste de uma curva de calibração pode apresentar resultados satisfatórios.

Palavras-chave: solos não saturados, medição de sucção, método do papel filtro, calibração do papel filtro

ABSTRACT

Soil suction in unsaturated soils (SNS) is one of the main variables involved in the study of the hydro-mechanical behavior of these soils. There are various techniques for determining the SNS suction, and the filter paper method (MPF) is probably one of the simplest method available to estimate a wide variation in suction in unsaturated soils (30 kPa-30000 kPa). The MPF is basically the action of put the filter paper in contact, direct or indirect, with unsaturated soil sample in a closed environment, until they reach the pressure equilibrium. Equilibrium is achieved when the fluid flow ceases (matric suction) or the vapour flow ceases (suction total). Once the pressure equilibrium is reached, the suction of the soil will be the same as filter paper, and with the known relationship between the gravimetric moisture content and suction filter paper is possible to estimate the suction of the soil. This relationship is called calibration curve of the filter paper and defines the water retention curve of the filter paper. Several calibrations to the filter paper have been published in the literature and there is a significant discrepancy between them. Many of the calibrations are called bilinear (ie, two different linear equations) with an inflection point occurring between 60 kPa and 120 kPa (corresponding gravimetric moisture content values between 40 and 50%). The possibility to define a calibration curve for the filter paper Whatman No. 42 using artificial samples is evaluated in this study. The idea is to represent the best fit existing from seven previously published calibration curves the filter paper Whatman No. 42 (Fawcett and Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler and Gutierrez, 1986; Chandler et al. 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 1992; ASTM D5298-03). The variability of the calibration suggested in relation with the published seven calibrations is quantified using statistical tools. The experimental evaluation of the calibration suggested in this work, carried out by comparing the values obtained by the suction MPF and calibration suggested and results obtained with other techniques used to measure or control suction in different unsaturated soils (Fleureau et al., 2002; Soto, 2004 and Haghighi, 2011) shows that MPF with appropriate calibration curve may give satisfactory results.

Keywords: unsaturated soils, soil suction measuring, filter paper method, calibration of filter paper

LISTA DE TABELAS

Γabela 2.1 – Resumo das técnicas comuns de laboratório para medir ou controlar a sucção em solos. 26
Fabela 2.2 – Tempo de equilíbrio sugerido para medida de sucção total, em função do nível desucção.32
Γabela 2.3 – Lista de algumas equações de calibração publicadas para o papel filtro Whatman Nº 42
Γabela 3.1 – Apresentação dos intervalos de umidade e sucção para as curvas de calibraçãoavaliadas41
Γabela 3.2 – Coeficientes de determinação (R ²) das curvas de calibração ajustadas59
Гabela 3.3 – RMSE e ME para o grupo Global68
Гаbela 3.4– RMSE е ME para o grupo Local69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tensão superficial: (a) forças intermoleculares agindo no líquido (b) pressões e tensão superficial agindo numa superfície bi-dimensional
Figura 2.2 – Influência da tensão externa e da sucção nas forças entre as partículas24
Figura 2.3 – Tipos de fluxo entre solo e papel filtro: fluxo de vapor e fluxo capilar29
Figura 2.4 – Representação hipotética do tipo de sucção medida usando a técnica do papel filtro de acordo com o teor de umidade do solo
Figura 2.5 – Fenômeno da histerese na curva de retenção solo-água
Figura 2.6 – Curvas de calibração papel filtro Whatman Nº 42 propostas por Leong et al. (2002) sugerindo equações distintas para a sucção total e matricial
Figura 3.1 – Apresentação das curvas de calibração do grupo Global (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002; ASTM D5298-03)
Figura 3.2 – Apresentação das curvas de calibração do grupo Local (Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002; ASTM D5298-03)
Figura 3.3 – Desvios verticais dos dados observados em relação ao modelo estimado de regressão
Figura 3.4 – Curvas de calibração da literatura que compõem o grupo Global e a curva resultante de regressão linear denominada de Combinado Global Linear
Figura 3.5 – Gráfico 1:1 entre valores de sucção obtidos através do Combinado Global Linear e das sete curvas de calibração propostas na literatura e pertencentes ao grupo Global (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03)
Figura 3.6 – Curvas de calibração da literatura que compõem o grupo Local e a curva resultante de regressão linear denominada de Combinado Local Linear
Figura 3.7 – Gráfico 1:1 entre valores de sucção obtidos através do Combinado Local Linear e das três curvas de calibração propostas na literatura e pertencentes ao grupo Local (Chandler et al., 1992b, Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03)
Figura 3.8 – Equação bilinear resultante da regressão linear proposta para o grupo Global (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) considerando o ponto de inflexão na umidade gravimétrica correspondente a 47%

Figura 3.10 – Gráfico 1:1 entre valores de sucção obtidos através do Combinado Global Exponencial e das sete curvas de calibração propostas na literatura e pertencentes ao grupo Global (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03)......57

Figura 3.18 – Resíduo gerado para os valores de sucção do grupo Global (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e

Chandler, 1993; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) em relação aos valores de umidade Figura 3.19 – Resíduo gerado para os valores de sucção do grupo Local (Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) em relação aos valores de sucção estimados pelo Figura 3.20 – Resíduo gerado para os valores de sucção do grupo Local (Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) em relação aos valores de umidade gravimétrica do Figura 4.1 – Distribuição granulométrica dos grãos de Areia de Perafita utilizado por Fleureau Figura 4.2 – Gráfico dos Intervalos de Confiança entre sucções medidas por Fleureau et al. (2002) pelas Técnicas do Tensiômetro e Medição Osmótica e sucções estimadas pela ASTM D 5298 e pelo Combinado Local Linear (Equação 3.17) para a Areia de Perafita......74 Figura 4.3 – Erro Residual calculado entre as sucções estimadas pelo Combinado Local Linear e ASTM e as sucções medidas por Fleureau et al. (2002) através das Técnicas de Tensiômetro e Medição Osmótica para Areia de Perafita.....75 Figura 4.4 – Gráfico dos Intervalos de Confiança entre sucções medidas por Fleureau et al. (2002) pelas Técnicas de Tensiômetro e Medição Osmótica e sucções estimadas pela ASTM D Figura 4.5 – Erro Residual calculado entre as sucções estimadas pelo Combinado Local Exponencial e ASTM e as sucções medidas por Fleureau et al. (2002) através das Técnicas de Tensiômetro e Medição Osmótica para Areia de Perafita......77 Figura 4.6 - Distribuição granulométrica das partículas do solo Caulim utilizado por Soto (2004) Figura 4.7 - Gráfico dos Intervalos de Confiança entre sucções medidas por Soto (2004) pela Técnica de Translação de Eixos (TE) e sucções estimadas pela ASTM D 5298 e pelo Figura 4.8 - Erro Residual calculado entre as sucções estimadas pelo Combinado Local Exponencial e ASTM e as succões medidas por Soto (2004) através da Técnica de Translação Figura 4.9 - Gráfico dos Intervalos de Confiança entre sucções medidas por Soto (2004) pela medição osmótica (MO) e sucções estimadas pela ASTM D 5298 e pelo Combinado Local

Figura 4.16 – Curvas de retenção da água propostas na literatura Brooks e Corey (1966), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) parametrizadas para o papel filtro Whatman N° 42 e apresentadas com o Combinado Local Exponencial......90

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Romanos	Descrição	Unidade no SI
A, a, B, b	Parâmetros de regressão	-
E	Índice de vazios	-
G	Gravidade específica	-
IC	Limites do intervalo de confiança	-
ME	Erro médio	-
Ν	Número de amostras	-
Р	Pressão parcial de poropressão de água	Ра
P_0	Pressão de saturação do vapor de água	Ра
R	Constante Universal dos gases	Jol/mol.K
R ²	Coeficiente de determinação	-
R _c	Raio de curvatura do menisco	Mm
RMSE	Raiz quadrada do erro médio	-
SQE	Soma dos quadrados dos erros	-
SQT	Soma dos desvios dos quadrados	-
S	Sucção	Pa
S_c	Entrada de ar	-
S_e	Saturação efetiva	-
T	Temperatura absoluta	K
T_{s}	Tensão superficial	Ра
u_a	Pressão do ar	Ра
u_w	Poropressão da água	Pa
V	Volume molecular do vapor de água	m ³
\hat{Y}	Valor de Log de sucção dos combinados	-
Y_{M}	Valor de Log do modelo de literatura	-
W	Umidade gravimétrica	%

Símbolos Gregos	Descrição	Unidade no SI
Е	Termo de erro aleatório	-
$\psi_{\scriptscriptstyle T}$	Potencial total	Pa
$oldsymbol{\psi}_m$	Potencial matricial	Pa
$oldsymbol{\psi}_{os}$	Potencial osmótico	Pa
$oldsymbol{\psi}_{gr}$	Potencial gravitacional	Pa
${m \psi}_{ m int}$	Potencial interno	Pa
π	Sucção osmótica	Ра

SUMÁRIO

1 I	NTRO	DDUÇÃO	15
1.1	0	BJETIVOS	17
2 F	REVIS	ÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	A	IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DOS SOLOS NÃO SATURADOS	18
2.2	SU	JCÇÃO	19
2	2.2.1	Sucção matricial	22
2	2.2.2	Sucção osmótica	24
2	2.2.3	Métodos de determinação da sucção matricial e total	25
2.3	Μ	ÉTODO DO PAPEL FILTRO	28
2	2.3.1	Aspectos importantes do método do papel filtro	30
	2.3.1	.1 Contato entre o papel filtro e o solo	30
	2.3.1	.2 Tempo de equilíbrio entre a sucção no solo e no papel filtro	31
	2.3.1	.3 Determinação de umidade gravimétrica do papel filtro	33
	2.3.1	.4 Tratamento do papel filtro	33
	2.3.1	.5 Quantidade de papel filtro a ser utilizado	33
	2.3.1	.6 Controle de temperatura	34
	2.3.1	.7 Histerese	34
2.4	CI 35	URVAS DE CALIBRAÇÃO PARA O PAPEL FILTRO WHATMAN I	N° 42
3 A CALI	ANÁL] [BRAQ	ISES ESTATÍSTICAS DA VARIABILIDADE DE CURVAS DE ÇÃO PUBLICADAS PARA O PAPEL FILTRO WHATMAN Nº 42	40
3.1	Μ	ETODOLOGIA DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS DE VARIABILID	ADE
	40		
3	.1.1	Curvas de calibração	40
	3.1.1	.1 Definição dos intervalos de umidade e sucção	41
	3.1.1	.2 Avaliação Global e Local	41
3	5.1.2	Regressão Linear	43
3	8.1.3	Regressão exponencial	46

3.1.	4 (Coeficiente de determinação (R ²)47		
3.1.	5 I	Erro Residual		
3.1.	6 I	Raiz quadrada do erro médio48		
3.1.	7 I	Erro médio	48	
3.2	RES	SULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS	19	
3.2.	1 I	ntervalos de sucção e umidade	49	
3.2.	2 0	Curvas de calibração obtidas por regressão linear	50	
3	.2.2.1	Combinado Global Linear	50	
3	.2.2.2	Combinado Local Linear	52	
3	.2.2.3	Curva Bilinear do grupo Global	54	
3.2.	3 (Curvas obtidas por regressão exponencial	55	
3	.2.3.1	Combinado Global Exponencial	55	
3	.2.3.2	Combinado Local Exponencial	57	
3.2.	4 I	Erro residual linear	59	
3	.2.4.1	Combinado Global Linear	59	
3	.2.4.2	Combinado Local Linear	51	
3.2.	5 I	Erro residual exponencial	53	
3	.2.5.1	Combinado Global Exponencial	53	
3	.2.5.2	Combinado Local Exponencial	55	
3.2.	6 I	RMSE e ME do combinado global	57	
3.2.	7 I	RMSE e ME do combinado local	58	
4 AV. SUGER	ALIA IDO I	.ÇÃO EXPERIMENTAL DO MELHOR AJUSTE DE CALIBRAÇÃO PARA O PAPEL FILTRO WHATMAN Nº 42	70	
4.1 POR (AVA OUTI	ALIAÇÃO ENTRE SUCÇÕES ESTIMADAS E SUCÇÕES MEDIDA RAS TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	\S 70	
4.1.	1 I	ntervalo de confiança	70	
4.1. exp	2 N erime	Metodologia de comparação entre dados medidos por outras técnic ntais e dados estimados pela curva de calibração proposta no presente traball 72	as 10	

4.1.3 Avali	ação com dados resultantes da pesquisa de Fleureau et al. (2002) para Areia
de Perafita	
4.1.4 Avali 77	ação com dados resultantes da pesquisa de Soto (2004) para um solo Caulim
4.1.4.1 A 7	Análise com as sucções medidas pela técnica de Translação de Eixos (TE) '9
4.1.4.2 A	Análise com as sucções medidas pela Medição Osmótica (MO)80
4.1.4.3 A Capacidade	Análise com as sucções medidas pela Técnica do Tensiômetro de Alta (TAC)
4.1.5 Avali caulim 84	ação com dados resultantes da pesquisa de Haghighi (2011) para Argila
4.1.6 Síntes técnicas exper	se das avaliações comparativas entre sucções estimadas e medidas por outras imentais
4.2 AVALIA	ÇÃO COM CURVAS DE RETENÇÃO SOLO ÁGUA
MODIFICADA PUBLICADAS	S PARA OS PARÂMETROS DO PAPEL FILTRO WHATMAN Nº 42 NA LITERATURA
CONCLUSÕ	ES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS92
5.1 CONCL	USÕES92
5.2 SUGEST	ÕES PARA PESQUISAS FUTURAS94
REFERÊNCI	[AS96

1 INTRODUÇÃO

Várias obras de engenharia geotécnica envolvem solos não saturados, tais como: aterros compactados, fundações em solos expansivos ou colapsáveis, barragens de terra, contenções de taludes e encostas. Nas últimas décadas várias pesquisas têm sido desenvolvidas buscando compreender o comportamento de solos não saturados visando melhorar e aperfeiçoar os projetos de engenharia. Na zona não-saturada, região na qual os vazios do solo são preenchidos por ar e água, as poropressões podem ser negativas e denominadas de sucções. O aumento dos valores da sucção em períodos de seca modifica o comportamento mecânico dos solos não saturados e pode gerar um significativo aumento na resistência do solo, que pode ser suficiente, por exemplo, para estabilizar um talude natural, mesmo quando seu valor não é muito elevado. Opostamente muitos processos de instabilidade são deflagrados justamente pela diminuição da sucção decorrentes da saturação provocada pelas chuvas (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Para o entendimento do comportamento do solo não saturado na prática de engenharia, tornase necessário o conhecimento da sucção que influencia diretamente importantes propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos não saturados, tais como: variação volumétrica, resistência ao cisalhamento e condutividade hidráulica. A sucção pode ser expressa como o potencial de retenção de água no solo (Buckingham, 2007; Edlefsen e Anderson, 1943; Bolt, 1976; Haghighi, 2011). A sucção total é comumente definida como a soma de duas parcelas, a matricial e a osmótica. O desenvolvimento de métodos teóricos e experimentais para conhecer quantitativamente a sucção do solo tem se tornado um dos mais importantes e ativos tópicos de pesquisa.

Uma descrição detalhada de técnicas experimentais comumente usadas para medir ou controlar sucção em solos não saturados pode ser encontrada em várias publicações (Fredlund e Rahardjo, 1993; Lee e Wray, 1995; Ridley e Wray, 1996; Lu e Likos, 2004; Fredlund et al., 2005; Masrouri et al., 2008; Delage et al., 2008; Sreedeep e Singh, 2011; Toll et al., 2012). As sucções do solo podem ser medidas diretamente ou podem ser determinadas por calibrações prévias (métodos indiretos que correlacionam a sucção com outras variáveis como: temperatura, resistividade, umidade relativa). As diferentes técnicas de medição, por exemplo, translação de eixos, tensiômetros, sensores de condutividade térmica entre outros, variam em termos de custo, complexidade, tipo de sucção e faixa de medição. Devido às dificuldades envolvidas nas medições diretas de sucção, um simples e econômico método de laboratório para estimar sucções é considerado válido e de importância para estudos preliminares de solos não saturados e esses requisitos importantes para a obtenção da sucção em solos são encontrados na aplicação do método do papel filtro.

Este método consiste essencialmente em posicionar o papel filtro em contato com amostra de solo a ser analisada. No instante do equilíbrio de pressões entre o solo analisado e o papel filtro,

a sucção entre esses dois meios será a mesma, entretanto com teor de umidade gravimétrica diferente. Finalmente, conhecida a relação entre o teor de umidade gravimétrica do papel filtro e seu correspondente valor de sucção é possível obter a sucção do solo. Através desse método pode-se medir tanto a sucção total quanto a matricial sendo o modo de contato entre amostra do solo e o papel filtro determinante neste aspecto. Assim, a sucção total será observada quando não houver contato entre o papel filtro e o solo e o equilíbrio de pressões se der por fluxo de vapor, já a sucção matricial será observada quando houver contato entre o papel filtro e a solo e o equilíbrio de pressões se der por fluxo de vapor, já a sucção matricial será observada quando houver contato entre o papel filtro e pressões se der por fluxo te a mostra do solo e o equilíbrio de pressões se der por fluxo te a mostra do solo e o equilíbrio de pressões se der por fluxo capilar.

A relação entre o teor de umidade gravimétrica e a correspondente sucção do papel filtro é denominada de curva de calibração do papel filtro e define a curva de retenção da água no papel filtro. Fredlund e Rahardjo (1993) observam que o papel filtro do tipo Whatman N° 42 é o que apresenta menor variação entre as diferentes calibrações publicadas na literatura, assim, neste trabalho foram avaliadas as curvas de calibrações propostas na literatura para este tipo de papel filtro. Várias calibrações para o papel filtro do tipo Whatman N° 42 têm sido publicadas na literatura (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002; Fleureau et al., 2002; ASTM D5298-03; Agus, 2005; Haghighi, 2011). Bicalho et al. (2009) mostram que mesmo para este tipo de papel filtro (ou seja, o papel filtro do tipo Whatman N° 42) significativas discrepâncias existem entre as curvas de calibração publicadas. Geralmente as calibrações publicadas são do tipo bilineares (ou, duas equações) e apresentam ponto de inflexão nos valores de umidades gravimétricas do papel filtro entre 40 e 50% que corresponde a valores de sucção entre 60 e 120 kPa.

Neste trabalho, inicialmente são apresentadas e comparadas através de métodos estatísticos sete curvas de calibração propostas na literatura para medir a sucção matricial de solos não saturados (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002; ASTM D5298-03) e a seguir são propostas novas curvas de calibrações para o papel filtro Whatman N° 42 definidas através das regressões linear e exponencial considerando pontos artificiais obtidos a partir das sete funções de calibração ja publicadas para os intervalos de sucção definidos pela publicação correspondente e limitado ao intervalo de medida aceitável para a técnica de papel de filtro (i.e., 30-30000 kPa).

Para avaliar experimentalmente as calibrações para o papel filtro Whatman N° 42 obtidas neste trabalho, os valores de sucção estimados pelo método do papel filtro usando essas curvas de calibrações são comparados com os valores de sucção correspondentes medidos por outras técnicas experimentais para diferentes tipos de solos. O uso de funções publicadas na literatura para definir curvas de retenção solo água (ou seja: Brooks e Corey, 1966; van Genuchten, 1980; Fredlund e Xing, 1994) como curvas de calibração para o papel filtro do tipo Whatman N° 42 é também discutido nesta dissertação.

1.1 OBJETIVOS

Reconhecendo a importância das curvas de calibração para o método do papel filtro a fim de estimar a sucção em solos não saturados, este estudo tem como objetivo avaliar a variabilidade observada nas calibrações publicadas para o papel filtro do tipo Whatman N° 42 e definir uma curva de calibração para este tipo de papel filtro com uma transição suave entre os altos e baixos níveis de sucções. Esta curva de calibração é obtida a partir de curvas de calibração já publicadas neste trabalho (i. e., pseudoamostras ou pontos artificiais). Os objetivos específicos são:

- Selecionar curvas de calibração publicadas na literatura com a tentativa de definir um melhor ajuste, através de métodos estatísticos, para o papel filtro do tipo Whatman Nº 42;

- Definir através de ferramentas estatísticas funções de calibração obtidas a partir das curvas de calibração já publicadas e previamente selecionadas neste trabalho;

- Quantificar a variabilidade das calibrações propostas neste trabalho em relação às calibrações publicadas e previamente selecionadas neste trabalho;

Avaliar o uso de funções publicadas na literatura para definir curvas de retenção solo água (ou seja: Brooks e Corey, 1966; van Genuchten, 1980; Fredlund e Xing, 1994) como curvas de calibração para o papel filtro do tipo Whatman Nº 42 e,

- Comparar os valores de sucção estimados pelo método do papel filtro usando as curvas de calibrações propostas neste trabalho com os valores de sucção correspondentes medidos por outras técnicas experimentais para diferentes tipos de solos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica sobre os temas relevantes para o desenvolvimento desta dissertação. A presente Dissertação de Mestrado tem como tema principal o uso do método do papel filtro para estimar sucções em solos não saturados.

2.1 A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DOS SOLOS NÃO SATURADOS

O estudo dos solos não saturados é de reconhecida importância em várias obras de engenharia tais como: aterros compactados, fundação em solos expansivos/colapsáveis, barragens de terra, estabilidade de taludes, estradas, ferrovias e escavações em torno de canteiros envolvem o conhecimento de solos não saturados.

Em termos de ocorrência, os solos não saturados ganham maior relevância em regiões de clima tropical, árido ou semiárido que atingem a mais de dois bilhões de habitantes no planeta. No Brasil, esses solos ocorrem em expressividade, as quais apresentam limitada quantidade de chuva e alta taxa de evaporação durante o ano e ainda onde o setor de infraestrutura e construção civil está em franco desenvolvimento o que radica a preocupação com o estudo de tais solos. (Ministério da Integração Nacional, 2005).

Em contrapartida, as pesquisas referentes aos cinquenta primeiros anos da história da mecânica dos solos foram voltadas para solos saturados e a maioria dos princípios desenvolvidos neste período foi aplicada a solos saturados unicamente. Essa deficiência atualmente propulsiona o desenvolvimento dos principais tópicos relacionados à mecânica dos solos não saturados (Sheng et al., 2008). Também deve ser mencionado que pesquisas relacionadas a aspectos do comportamento de solos não saturados foram conduzidas associadas a problemas geo-ambientais tal como: armazenamento de resíduos e contaminação dos solos. Particularmente, uma atenção especial tem sido dada ao comportamento de solos expansíveis usados como barreiras de proteção para o isolamento de resíduos nucleares (Delage, 2002).

As questões fundamentais que explicam o comportamento dos solos não saturados devem considerar aspectos quanto ao:

- Comportamento da variação de volume associada às variações de sucção e saturação;
- Comportamento da resistência ao cisalhamento associado às variações de sucção e saturação;
- Comportamento hidráulico associado às variações de sucção e saturação (Sheng, 2011).

Isso porque solos não saturados podem experimentar significativas variações de volume com as mudanças de sucção ou grau de saturação. Alguns solos expandem com o umedecimento,

alguns colapsam e em alguns ocorrem ambos dependendo do nível de tensões. As grandes variações volumétricas associadas à mudança de saturação podem resultar em severos danos às fundações e estruturas. A resistência ao cisalhamento dos solos pode mudar drasticamente com as variações do grau de saturação a citar, entre os problemas de engenharia, os desabamentos de terra devido às chuvas. Solos não saturados também apresentam uma peculiaridade hidráulica que traz consequências na concepção de sistemas de proteção e contenção de resíduos industriais e municipais (Sheng, 2011).

Uma revisão detalhada de modelos constitutivos para solos não saturados que levam em consideração as variações de volume, a resistência ao cisalhamento e o comportamento hidráulico associados às variações da sucção e grau de saturação são encontrados nos trabalhos de Delage (2002), Sheng et al. (2008), Baker e Frydman (2009), Sheng (2011) e Zhou et al.(2012). Adicionalmente, esta Dissertação de Mestrado é a terceira desenvolvida na linha de pesquisa de solos não saturados no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, sendo que os trabalhos antecedentes abordaram a influência da interação solo-atmosfera nos perfis de umidade, sucção e temperatura nos perfis de um subsolo não saturado além de estudos das curvas de retenção e condutividade hidráulica estimada pela equação de van Genuchten realizados respectivamente por Vivacqua (2012) e Gonçalves (2012), e que também apresentam referências atuais dentro do domínio de solos não saturados.

Certamente, existe uma necessidade de uma tecnologia adequada para o estudo do comportamento de solos não saturados. Tal tecnologia segundo Fredlund e Rahardjo (1993) deve possuir as seguintes características básicas:

- Prática,
- Não deve possuir um custo elevado de aplicação,
- Ter uma base teórica confiável e
- Estar de acordo com os conceitos convencionais da mecânica dos solos não saturados.

A metodologia aplicada no presente estudo apresenta tais características.

2.2 SUCÇÃO

Um dos principais fatores de alteração do comportamento mecânico dos solos não saturados é a variação da sucção no solo que afeta tanto a compressibilidade quanto a resistência do solo. Para um melhor entendimento dessa variável, será inicialmente apresentada a definição do potencial de água no solo que fisicamente permitirá a compreensão do termo sucção no solo.

Segundo Baker e Frydman (2009), uma definição moderna e formal do termo sucção vem da caracterização do parâmetro densidade do potencial de água no solo: razão entre a quantidade de energia presente no sistema (água) e uma quantidade característica da água no solo. Esse

valor de energia determina o transporte reversível e isotérmico de uma quantidade de água de um local de acumulação para um local isento (apresentando valores característicos de elevação e pressão atmosférica). De forma prática, existindo uma variação do potencial de água entre vazios distintos do solo haverá uma movimentação das parcelas de água do ponto de maior potencial para o ponto de menor potencial.

A quantidade característica de água (parte da razão que define a densidade do potencial, apresentado anteriormente) pode ser apresentada sob três diferentes formas: massa, peso e volume. Cada quantidade característica definirá um potencial. A energia pela massa resulta no potencial químico com unidades de J/kg. A energia pelo peso resulta na carga total de água no solo em metros. Finalmente, a energia pelo volume resulta numa variável com unidades de pressão, em Pa, por exemplo. As três definições são fisicamente equivalentes e possuem formulações que as relacionam com constantes como a massa específica da água e a gravidade.

Esse último potencial (ψ_T , em Pa) é habitualmente aplicado na determinação da movimentação das parcelas de água nos meios porosos de solos. A condição de diferença de pressão entre essas diferentes parcelas de água no solo define a movimentação da água e a introdução do termo sucção. É conveniente separar o potencial dito total (ψ_T) numa somatória, por exemplo, como definido abaixo onde mais parcelas podem ser incluídas:

$$\psi_T = \psi_m + \psi_{os} + \psi_{gr}$$

Onde ψ_m é o potencial matricial e representa a interação da água tanto com a partícula do solo quanto com a fase gasosa, ψ_{os} é o potencial osmótico que depende da concentração de sais na água bruta e $\psi_{gr} = \rho gz$ é o potencial gravitacional com *z* representando a elevação relativa de um referencial arbitrário.

Da equação 2.1 pode-se explicitar uma parcela chamada de potencial interno ($\psi_{int} = \psi_m + \psi_{os}$) que representa todas as componentes associadas às fontes que são internas ao elemento do solo e que possuem interesse na presente pesquisa. Geralmente as técnicas usuais medem o potencial interno (ψ_{int}) ou o potencial matricial (ψ_m), isto é, sucção total e sucção matricial, respectivamente, e o potencial gravitacional (ψ_{gr}) não é relevante na caracterização constitutiva dos solos (Baker e Frydman, 2009).

Apesar de usualmente utilizado nos métodos apresentados em publicações, o termo "sucção" não representa a medida de tensão de tração da água no solo, mas sim a medida de seu potencial (estado de energia da água no solo). Esse esclarecimento torna-se conveniente e nesta

dissertação será utilizado o termo sucção seja para se referir ao potencial de água no solo medido pelas técnicas publicadas na literatura (translação de eixos, tensiômetros, placas de pressão, método do papel filtro...), ou seja, para as definições sequenciais.

De acordo com Lee e Wray (1995) a sucção pode ser definida como uma quantidade energética que avalia a capacidade do solo em reter água. Quando a água migra dentro de um solo não saturado, será adsorvida ou retida por ele. Para desprender essa água é necessária uma energia externa. O valor da energia aplicada por unidade de volume de água é a sucção.

No trabalho de Rainwater et al. (2010) a sucção do solo é definida como a pressão negativa dentro dos espaços vazios entre as partículas do solo na qual aumenta com a diminuição do teor de umidade e é também função do tamanho, forma e química da partícula do solo.

Haghighi (2011) reitera que a sucção pode ser expressa como potencial do solo para atração de água e que também é comumente associada à energia requerida para remover um volume unitário de água de uma matriz de solo a um local de referência com água líquida e pura à pressão atmosférica. Sob uma condição de equilíbrio, a sucção total pode ser relacionada à umidade relativa da fase gasosa em contato direto com a água pura pela equação de Kelvin:

$$\psi_{\rm int} = \frac{RT}{V} \ln \left(\frac{P}{P_0}\right)$$
 2.2

Onde ψ_{int} é definida como a sucção total, R é a constante universal do gases (8,314 J.mol⁻¹ .K⁻¹), T é a temperatura absoluta em Kelvin, V é o volume molecular de vapor de água (0,01802 m³mol⁻¹), P/P_0 é a umidade relativa, P é a pressão parcial de poro-vapor de água em Pa, e P_0 é a pressão de saturação do vapor de água ao longo de uma superfície plana de água deionizada a mesma temperatura em Pa. Da Equação 2.2 entende-se que, considerando T_s constante, haverá uma variação da sucção total desde que ocorra uma variação umidade relativa da fase gasosa dentro do solo não saturado (Haghighi et al., 2011).

Conforme apresentado anteriormente, a sucção total consiste na soma de duas componentes

 $(\psi_{int} = \psi_m + \psi_{os})$: a parcela de sucção matricial (ψ_m) e a parcela de sucção osmótica (ψ_{os}) que é similar ao seguinte somatório:

$$\psi_{\text{int}} = (u_a - u_w) + \pi$$

onde $(u_a - u_w)$ equivale à parcela de sucção matricial e π à sucção osmótica. A pressão matricial é resultado dos efeitos de adsorção e capilaridade da água no solo enquanto que a sucção osmótica é relacionada à presença de sais na água e uma descrição detalhada desses fenômenos será apresentada nas seções seguintes.

2.2.1 Sucção matricial

A sucção matricial (ψ_m) pode ser expressa como:

$$\psi_m = \psi_{ad}(h) + \psi_{cp}(k) \tag{2.4}$$

onde Ψ_{ad} é a contribuição da adsorção no potencial matricial em uma camada de espessura h de água adsorvida, e Ψ_{cp} é a contribuição da capilaridade com k representando a curvatura da interface ar – água (Baker e Frydman, 2009).

De acordo com o trabalho de Hillel (1998) as contribuições da água capilar e da água adsorvida não podem ser consideradas separadamente uma vez que os efeitos capilares e de adsorção são usualmente interligados. Foi notado ainda que numa situação de equilíbrio hidráulico, os potenciais referentes à água adsorvida e a capilaridade pertencerão ao mesmo potencial e assim seus efeito não poderão ser distinguidos. Hillel (1998) observou que para valores sucção matricial até 100 kPa os efeitos da capilaridade são mais importantes e essa situação se inverte com o aumento da sucção matricial onde os efeitos da adsorção prevalecem.

Existe a prática de ignorar a componente de adsorção do potencial matricial na interpretação de resultados de ensaios que podem estar relacionados com a convicção de que o curto alcance das forças de adsorção faz o termo adsorção significativo somente para umidades muito baixas, que frequentemente não interessa na prática da engenharia (Baker e Frydman, 2009).

O estudo do fenômeno capilar é diretamente relacionado à tensão superficial da água e depende da temperatura. Essa tensão superficial (T_s) é causada pelo desequilíbrio de forças intermoleculares agindo nas moléculas da interface ar – água. Essa interface é conhecida como membrana contráctil (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Uma molécula de água no interior da membrana contráctil sofre a ação de forças moleculares da água na interface e também em locais mais profundos que são balanceadas pela resistência à compressão da água – Figura 2.1(a). A tensão superficial (T_s) é tangencial à membrana contráctil e faz com que essa se comporte elasticamente e quando sujeita a diferentes pressões

em cada lado. Sob um aspecto bidimensional, a membrana assume uma curvatura côncava voltada para o lado de maior pressão e exerce uma tensão na membrana de modo a atingir o equilíbrio.

Em um solo não saturado, poros de pequenos raios agem como tubos capilares e capazes de manter água retida no solo acima do lençol freático. Quanto menor o raio do tubo, maior a curvatura e maior a ascensão capilar. A pressão do ar, u_a , que geralmente é a atmosférica, dentro dos tubos capilares é maior do que a pressão da água, u_w . A diferença de pressão, $u_a - u_w$, é referida como sucção matricial e pode ser calculada usando a equação de Young-Laplace – Figura 2.1(b):

$$u_a - u_w = \frac{2T_s}{R_c}$$

Enquanto a sucção matricial do solo aumenta, o raio de curvatura da membrana contráctil diminui. A membrana contráctil curva é frequentemente chamada de menisco. Quando a diferença de pressão entre a poropressão do ar e a poropressão da água tende a zero, o raio de curvatura, R_C, tende ao infinito. Portanto, uma interface plana ar-água existe quando a sucção matricial tende a zero (Fredlund e Rahardjo, 1993).



Figura 2.1 – Tensão superficial: (a) forças intermoleculares agindo no líquido (b) pressões e tensão superficial agindo numa superfície bidimensional

Fonte: Adaptado de Freudlund e Rahardjo (1993).

Os poros que não são completamente preenchidos com água apresentam menisco nos pontos de contato entre as partículas de solo e a influência de tais meniscos na resposta global dos solos tem sido discutida em várias pesquisas (Fisher, 1926; Jennings e Burland, 1962; Burland, 1965; Wheeler e Karube, 1995), que tem considerado um modelo idealizado (partículas esféricas de mesmo tamanho) conforme mostra a Figura 2.2. A presença do menisco no contato entre as partículas resulta numa força adicional entre as mesmas, a qual aumenta a estabilidade do solo não saturado. A resistência do solo à compressão e à expansão aumenta devido à presença da

sucção. Caso haja remoção dessa camada de água entre as partículas causada, por exemplo, pelo umedecimento do solo resulta no deslizamento entre as partículas e o colapso da estrutura.

A influência do aumento da sucção matricial pode ser considerada equivalente ao aumento do valor da tensão efetiva de um solo completamente saturado desde que a força normal entre as partículas aumente e a diminuição da sucção matricial funcionaria como uma redução da tensão efetiva porque isso aumenta a possibilidade de deslizamento e elasticidade.

Essa força adicional causada pelos meniscos aumenta sutilmente com o aumento da sucção. Com o aumento da sucção, mais poros entre as partículas tornam-se preenchidos por ar e é maior também o número de contatos entre partículas influenciado pelos meniscos (Haghighi, 2011).



Figura 2.2 – Influência da tensão externa e da sucção nas forças entre as partículas.

Fonte: Wheeler e Karube (1995).

2.2.2 Sucção osmótica

A sucção osmótica é definida como a energia adicional requerida para remover um volume unitário de água na fase líquida do solo devido à presença de sais dissolvidos além de quantitativamente ser definida como a diferença entre a sucção total e matricial.

A presença de sais dissolvidos na água dos solos resulta num aumento da energia requerida para extrair uma molécula de água da fase líquida no solo e então o valor de equilíbrio da pressão de vapor (umidade relativa) no espaço acima da interface água-ar reduz e essa redução é relacionada com a concentração de solução salina (Haghighi, 2011).

O fenômeno osmótico pode ocorrer em solos não saturados e saturados. A presença de sucção osmótica em um solo é determinada por agentes naturais, como a vegetação (que induz um fluxo osmótico através da diferença de concentração de sais que existe entre a planta e a água

do solo), ou artificialmente depositado no meio, como um contaminante líquido colocado em contato com o solo (Marinho, 1994).

Entretanto, a sucção osmótica é desprezada na maioria dos problemas geotécnicos que envolvem solos não saturados (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Algumas razões para este fato podem ser destacadas, como: (i) um solo granular e livre de sais não tem sucção osmótica e a sucção total é igual à sucção matricial (Smith e Smith, 1998); (ii) as variações na sucção osmótica têm efeito sobre o comportamento mecânico e hidráulico do solo, entretanto, o efeito desta variação não é tão significativo quanto ao produzido por uma alteração na sucção matricial (Fredlund, 2002), e (iii) na maioria dos solos não saturados, a concentração de sal no poro, quando presente, é relativamente baixa ou praticamente não varia com as alterações ambientais (Zhan, 2003).

2.2.3 Métodos de determinação da sucção matricial e total

Descrições detalhadas de 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). A

Tabela 2.1 apresenta algumas das técnicas utilizadas para a determinação de sucção em solos dividindo-as em técnicas de medição e outras técnicas de controle ou imposição do valor de sucção.

As técnicas para medir a sucção total do solo incluem técnicas que medem umidade: psicrômetros, higrômetros, sensores polimétricos (capacitância ou resistência) e a técnica do papel filtro sem contato.

As técnicas usadas para controlar a sucção matricial numa amostra de solo incluem o método da placa de pressão, o método da coluna e o método da centrífuga (Masrouri et al., 2005). O método da placa de pressão utiliza pedras de cerâmica porosas que permitem a aplicação de poropressão e pressão de ar separadamente (Richards, 1941; Hilf, 1956; Bocking e Fredlund, 1980). O método da coluna de solo consiste em variar o lençol freático numa coluna de solo a fim de aplicar forças de capilaridade no solo. A técnica do equilíbrio de vapor utiliza soluções salinas ou ácidas para controlar a sucção total de intervalo entre 3 e 100 MPa (Masrouri et al., 2005).

As técnicas também se diferenciam pela componente de sucção a ser medida, isto é, sucção matricial ou sucção total do solo. Técnicas para medir a sucção matricial incluem tensiômetros, sensores de condutividade (elétrica ou térmica) e a técnica do papel filtro com contato. Os tensiômetros de alta capacidade são usados para medir a poropressão negativa da água até 15 MPa (Ridley e Burland, 1993). Os sensores de condutividade térmica ou elétrica medem a

sucção matricial de até 4MPa e são usados para relacionar indiretamente a condutividade elétrica ou térmica de um meio poroso incorporado à uma massa de solo não saturado (Phene et al. 1971, Fredlund e Wong 1989). A técnica do papel filtro se baseia em medir o teor de umidade gravimétrica do papel filtro em equilíbrio com o solo não saturado (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002; Fleureau et al., 2002; ASTM D5298-03).

Essas técnicas ainda podem ser basicamente classificadas em dois tipos: medições diretas e medições indiretas. Dispositivos que medem a sucção diretamente fazem de fato medições da poropressão da água, entretanto essas medidas estão restritas a níveis muito baixos de sucção (tensiômetro) ou, para níveis mais altos, é necessário aumentar a pressão do ar (placa de pressão). Dispositivos que são usados para medir níveis altos de sucção na pressão atmosférica são chamados de indiretos porque são calibrados por meio de outra propriedade física como a umidade, absorção ou resistência elétrica (Ridley e Burland, 1993).

	Técnica	Componente	Sucção medida de/Sucção	Intervalo de
Teemea		da sucção	controlada com	sucção (kPa)
	Tensiômetro de	Matricial	Poroprossão de águe	0 • 100
סה הַפֿאוהסע	Alta Capacidade	Maulciai	r oropressao da agua	0 a 100
	Condutividade	Matricial	Condutividada tórmica	100 - 4000
	elétrica e térmica	Maulciai	Conductividade termica	100 a 4000
	Papel filtro	Matricial/Total	Conteúdo de água do papel	30 a 30000

Tabela 2.1 – Resumo das técnicas comuns de laboratório para medir ou controlar a sucção em solos.

	Psicrômetro.			
	higrômetro,			
	sensores	Total	Umidade de vapor	100 a 100000
	poliméricos	Total		
	(resistores ou			
	capacitores)			
ื่อ ตากกอีก	Placa de pressão	Matricial	Poropressão do ar	10 a 1500
	Coluna de solo	Matricial/Total	Carga negativa da água	0 a 100
	Translação de Eixos	Matricial	Poropressão do ar	10 a 1500
, פוה	Centrífuga	Matricial	Força centrífuga	10 a 1500
ntr	Osmótica	Matricial	Pressão osmótica	0 a 1000
٢	Equilíbrio de	Total	Solvoão colino	3000 a
	vapor	Totai Soluçao Salili		100000

Fonte: Adaptado de Masrouri et al. (2005).

Além da técnica do papel filtro, objetivo de análise do presente trabalho, que será detalhada na seção ----, resultados de três adicionais técnicas experimentais de medição e/ou controle da sucção são utilizados em análises comparativas. Essas técnicas avaliadas são: técnica da translação de eixos, técnica osmótica e tensiômetros. O parágrafo a seguir descreve uma apresentação sucinta segundo o texto publicado por Soto (2004) dessas técnicas permitindo uma compreensão mais adequada do capítulo 4 desta dissertação em que os valores de sucção estimados pelos MPF são comparados com os valores de sucção medidos por outras técnicas para diferentes tipos de solos.

Soto (2004) descreve que a técnica da translação de eixos é empregada nos equipamentos de placa de pressão que são utilizados para determinar a capacidade de retenção de água no solo. A técnica consiste na mudança do referencial de pressão (pressão atmosférica), ou seja, aumenta-se artificialmente a pressão do ar existente nos poros do solo. Admitindo-se que isto produz igual aumento da pressão de água a diferença entre os dois permanece, ou seja, permanece a sucção e a pressão na água é aumentada levando a valores mensuráveis. A técnica osmótica controla a sucção matricial do solo em até 10 kPa usando soluções de polietilenoglicol. O tensiômetro de alta capacidade tem como principal vantagem a medição de sucção superiores a 100 kPa sem a ocorrência de cavitação. A técnica baseia-se na transmissão da pressão da água numa ponta porosa em equilíbrio com o solo até o sistema de medição de pressão. O tempo de resposta é muito rápido em relação a outros tensiômetros. Não há a imposição de pressão na fase gasosa, a medição é feita em condições naturais.

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 escala

pF ($pF = \log_{10} hs$), que corresponde ao logaritmo decimal da sucção expressa em centímetros de água 1 pF = 0,1 mca (Moncada, 2004).

Como resultado do emprego das técnicas de medição de sucção matricial e total, tem-se a curva de retenção, ou seja, uma função que correlaciona a quantidade de água dentro dos poros do solo com a energia necessária para sua retirada (sucção). A quantidade de água no solo pode ser representada pelo teor de umidade gravimétrica, teor de umidade volumétrica ou grau de saturação, já a sucção expressa na curva característica pode ser a total ou matricial. Uma revisão aprofundada sobre a curva de retenção do solo é encontrada na dissertação de Gonçalves (2012).

2.3 MÉTODO DO PAPEL FILTRO

No presente trabalho, é abordado o método do papel filtro com contato por se tratar de uma técnica indireta, para estimar a sucção matricial do solo, de baixo custo, de precisão razoável e por ser um método tecnicamente simples que pode ser empregado em um amplo intervalo de sucção no solo (Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Houston et al., 1994; Leong et al., 2002).

Shull (1916) foi provavelmente o primeiro pesquisador a utilizar o fenômeno de absorção como ferramenta para medir a sucção e em seus experimentos ele empregava sementes como um material absorvente e sua intenção foi medir a força com que as partículas de solo de espessuras variadas retinham a umidade a diferentes níveis de secagem (Marinho e Oliveira, 2006).

Gadner (1937) adotou o mesmo método utilizado por Shull (1916), entretanto empregou o papel filtro como material absorvente sendo o primeiro a introduzir a curva de calibração como um meio indireto de determinação de sucção em solos. Desde então, muitas pesquisas foram feitas sobre o uso de papel filtro para estimativa de sucção em solos não saturados (Fawcett e Collis-George, 1967; Al-Khafaf e Hanks, 1974; Hamblin, 1981; Greacen et al., 1982; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Leong et al., 1992; Houston et al., 1994; Marinho, 1994; Ridley e Wray, 1996; Marinho e Oliveira, 2006; Bulut, 2008)

O princípio de método, basicamente, é de que quando dois materiais porosos são colocados em contato em um ambiente fechado, eles trocarão água entre si até alcançarem a condição de equilíbrio entre si. Desta forma, quando um solo úmido é colocado em contato com o papel filtro seco, este último absorverá água até que o sistema entre em equilíbrio de sucção. No estado de equilíbrio o fluxo de água cessa e o valor de sucção é suposto como sendo igual para os dois materiais, embora seus teores de umidade sejam diferentes. Logo, conhecendo a relação de sucção e umidade do papel filtro, através de uma curva de calibração, é possível determinar esta relação também para o solo.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993) quando o equilíbrio é dado através de contato (fluxo capilar ou de líquido) o teor de água corresponde ao valor de sucção matricial do solo e quando o equilíbrio é dado sem contato (fluxo de vapor) o teor de água corresponde ao valor de sucção total do solo. A Figura 2.3 apresenta os dois tipos de fluxo possíveis para o método do papel filtro.

Na situação em que o equilíbrio é dado por fluxo de vapor, as moléculas de água têm de escapar do solo vencendo a sucção matricial e também a possível sucção osmótica devido à presença de sais absorvidos. O espaço de ar deixado entre a água do solo e o papel filtro (Figura 2.3) oferece uma barreira para os sais, permitindo somente o fluxo de vapor da água (Marinho e Oliveira, 2006). Depois que o equilíbrio é estabelecido entre o papel filtro e o solo, o teor de água do disco de papel filtro é medido. O teor de umidade gravimétrica do papel filtro é convertido em sucção usando uma curva de calibração previamente elaborada para tipo de papel filtro utilizado.

No fluxo capilar o solo troca livremente com o papel filtro água e solutos (Bail e Liu, 2012).

Se o fluxo ocorre somente por transferência de vapor, o método do papel filtro mede a sucção total do solo, desde que sejam incorporadas as componentes de sucção matricial e osmótica retidas nas moléculas de água. Quando o fluxo ocorre por capilaridade, a sucção matricial é que esta sendo medida e, neste caso, a componente osmótica não atua como uma força de retenção adicional para a água durante sua transferência para o a papel filtro (Marinho e Oliveira, 2006).

Num sistema solo-papel filtro pode ocorrer a absorção de água pelo solo ou a perda de água para o solo, contudo o método do papel filtro geralmente é usado no sentido de o papel absorver água do solo.



Figura 2.3 – Tipos de fluxo entre solo e papel filtro: fluxo de vapor e fluxo capilar.

Fonte: Adaptado de Marinho (1994).

No geral, o método do papel filtro é um dos mais utilizados para medir a sucção em solos no laboratório, entretanto este método tem recebido críticas, pois embora existam aqueles que preferem o método também existem os que não o aprovam e essa controvérsia esta relacionada à simplicidade dada ao método (Marinho e Gomes, 2011). Ele não requer instrumentos sofisticados e consiste em utilizar recipientes pequenos metálicos, uma caixa isolada, uma balança de precisão e estufa de secagem sendo que a largura do recipiente tem de ser capaz de comportar ao menos 200g de amostra de solo. Outra vantagem do método do papel filtro é que ele não se baseia em pressões de ar elevadas, como a técnica de translação de eixos, e permite que o solo seja testado em condições muito próximas ao solo in situ (Ridley et al., 2003) além de ser uma técnica de baixo custo e medir considerável intervalo de sucção (Rainwater et al., 2011).

A norma ASTM para o método do papel filtro (D 5298-03) descreve o procedimento para obter os valores aproximados da sucção no solo e são usados na prática tanto para medir a sucção total como a componente matricial. A seguir são descritos alguns aspectos relevantes no uso da técnica do papel filtro.

2.3.1 Aspectos importantes do método do papel filtro

2.3.1.1 Contato entre o papel filtro e o solo

O papel filtro pode estar medindo sucção total ou sucção matricial dependendo do grau de contato entre o solo e o papel de filtro. É essencial um íntimo contato entre a amostra e o papel filtro para determinação de sucção matricial através do método do papel filtro, caso contrário, a transferência de água ocorrerá parcialmente através da fase de vapor e o tempo necessário para atingir o equilíbrio irá aumentar.

Ridley et al. (2003) recomendam colocar um papel filtro de diâmetro de 70 mm em íntimo contato com o topo e a borda da amostra de solo para a determinação de valores de sucções matriciais em solos não saturados. Cada papel de filtro é então mantido no local com um pequeno disco de Perspex.

No trabalho de Marinho e Gomes (2011) são discutidas as consequências da falta de contato tanto em medidas de sucção matricial quanto em medidas de sucção total. A Figura 2.4 apresenta três curvas de retenção esquemáticas do solo: uma representando o papel filtro em contato perfeito, medindo a sucção matricial (linha sólida), outro para a sucção total, onde não há contato efetivo (linha tracejada), e o terceiro apresentando uma mistura para os valores correspondendo ao estágio entre sucção matricial e total (linha pontilhada). Esse gráfico mostra que para altos teores de umidade no solo, o papel filtro pode ser utilizado para medir a sucção matricial do solo, para um tempo de equilíbrio adequado. A partir de um certo valor (ponto A)

de umidade o papel filtro começa a apresentar perda de contato com a água do solo e o tempo de equilíbrio usado pode não ser suficiente para permitir que a umidade atinja um valor de equilíbrio. Há um intervalo de sucção que contempla sucção matricial e total. Quando a umidade do solo é reduzida a abaixo de um valor crítico a água não está mais em contato com o papel filtro (ponto B) e a sucção medida é a sucção total mesmo estando o papel filtro em contato físico com os grãos de solo. Esse comportamento pode dar a impressão que a sucção osmótica está diminuindo. Porém, essa tendência indica que a habilidade de medir o valor real de sucção matricial é inadequada.

Marinho e Gomes (2011) concluem que a causa da inadequada medida de sucção são a falta de contato (devido à irregularidade da superfície da amostra e /ou a textura do solo) e um inadequado tempo de equilíbrio.



Figura 2.4 – Representação hipotética do tipo de sucção medida usando a técnica do papel filtro de acordo com o teor de umidade do solo.

Fonte: Adaptado de Marinho e Gomes (2011).

2.3.1.2 Tempo de equilíbrio entre a sucção no solo e no papel filtro

Pesquisadores da universidade Imperial College em Londres recomendam colocar a amostra de solo envolvida em três camadas de filme plástico aderente dentro de dois sacos plásticos selados e armazenados em um ambiente com temperatura controlada para atingir o equilíbrio entre o solo e o papel filtro (Chandler e Gutirrez, 1986; Chandler et al., 1992; Ridley et al. 2003).

O tempo necessário para que a sucção no solo e no papel filtro atinja a situação de equilíbrio 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 as condições ambientes (ASTM D 5298-03).

A norma americana ASTM D 5298-03 recomenda, para as condições normalmente encontradas na mecânica dos solos, um período de 7 (sete) dias para permitir que a sucção no solo e no papel filtro atinjam a situação de equilíbrio. Para o papel de filtro em direto contato com a água presente nos poros do solo a pequenos valores de sucção (< 50 kPa) Greacen et al. (1987) mostram que a maioria da água é absorvida nos primeiros minutos e depois tende lentamente a atingir o equilíbrio em aproximadamente 7 dias.

Segundo Marinho (1994) o tempo de equilíbrio deveria ser levado em consideração em curvas de calibração e que, para medidas de sucção matricial, o tempo de equilíbrio de 7 dias é suficiente e para sucções totais é sugerido o tempo de equilíbrio conforme apresentado na Tabela 2.2.

Sucção total (kPa)	Tempo de equilíbrio sugerido
0 - 100	> 30 dias
100 - 250	30 dias
250 - 1000	15 dias
1000 - 3000	7 dias

Tabela 2.2 – Tempo de equilíbrio sugerido para medida de sucção total, em função do nível de sucção.

Fonte: Marinho (1994).

Schreiner (1988) sugere que para medições de sucção total, uma semana não é um adequado tempo de equilíbrio. Ridley et al. (2003) mencionam que, quando o papel filtro não esta mantendo um contato direto com a amostra de solo, para 200 kPa o tempo para atingir as condições de equilíbrio é de aproximadamente 14 dias e mostram que o valor da umidade do papel filtro para um valor de sucção total igual a 200 kPa aumentou de aproximadamente 35% (tempo para as condições de equilíbrio igual a 7 dias) para aproximadamente 40% (tempo para as condições de equilíbrio igual a 14 dias) utilizando o método do papel filtro sem contato direto entre o solo e o papel filtro.

2.3.1.3 Determinação de umidade gravimétrica do papel filtro

Um dos mais importantes aspectos para obter uma boa determinação de sucção é garantir que o papel filtro, após atingir o equilíbrio seja removido do ambiente fechado à condição de não sofrer grande variação de umidade. Chandler e Gutierrez (1986) recomendam que o processo de pesagem seja feito o mais rápido possível (30s). Schreiner (1988) e Ridley et al. (2003) sugerem o uso de sacos plásticos leves e com lacre para pesar o papel filtro depois de remover o contato com o solo e também durante a pesagem após a estufa. Ridley et al. (2003) sugerem a utilização do mesmo saco plástico, com massa predeterminada, para pesagem do papel antes e após a colocação na estufa a 105 °C. É recomendado para a pesagem o uso de uma balança com a precisão de 0.0001 g (ASTM D 5298-03; Likos e Lu, 2002; Ridley et al., 2003). O papel filtro deve ser colocado na estufa a 105 °C por no mínimo 2 horas (ASTM D 5298-03).

2.3.1.4 Tratamento do papel filtro

Em alguns casos, para inibir a presença de fungos e de decomposição biológica, um tratamento no papel filtro é necessário (por exemplo, o uso de 0.005 % de HgCl₂). Hamblin (1981) e Chandler e Gutirrez (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 e do período de tempo necessário para as condições de equilíbrio entre o solo e o papel filtro. Período de tempo para atingir as condições de equilíbrio superior a 30 dias, em solos inorgânicos, pode induzir ataque bacteriológico (Marinho, 1994).

2.3.1.5 Quantidade de papel filtro a ser utilizado

Quando o papel filtro é removido da amostra de solo, o solo preso ao papel filtro deve ser rapidamente retirado. Al-Khafaf e Hanks (1974) usaram um papel absorvente para proteger solo preso ao papel filtro. Hamblin (1981) observou que o tempo de equilíbrio do papel de filtro em contato com o solo depende do número de papel utilizado. Ele sugere o uso de um único papel de filtro, considerando que o erro devido à presença de solo no papel filtro no final do processo é menor que o erro devido a longos períodos para atingir as condições de equilíbrio ou se tentativas forem feitas para limpar o papel filtro. 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 existe algum solo preso ao papel quando este é colocado dentro do saco plástico.

2.3.1.6 Controle de temperatura

É importante manter bom controle de temperatura durante a determinação de umidade do papel filtro, uma vez que a variação na temperatura ambiente irá causar evaporação e condensação, o que irá interferir no processo de transferência de umidade. Al-Khafaf e Hanks (1974) concluem que a temperatura absoluta não tem muita influência na umidade de equilíbrio do papel filtro. Entretanto, foi observado que para variações de temperatura de 2°C, condensação ocorre, e este problema é particularmente importante para valores de sucção menores que 1,5 MPa. A normalização americana da ASTM D 5298-03 sugere uma variação máxima de 3°C a uma temperatura nominal de 20°C. Haghighi et al. (2011) analisou o efeito da temperatura na determinação de uma curva de calibração utilizando o papel filtro Whatman Nº 42 para um solo argiloso. Os experimentos foram realizados considerando temperaturas de 10°C, 25°C e 50°C. Em seus resultados foi observado que, dada uma sucção, o teor de umidade gravimétrica diminui com o aumento da temperatura e, em outras palavras, a capacidade de retenção da água no solo diminui com o aumento da temperatura.

Esses resultados concordam com os obtidos por pesquisas similares realizadas em areias compactas (Romero et al., 2001; Villar e Lloret, 2004; Olchitzky, 2002; Tang e Cui, 2005; Uchaipichat e Khalili, 2009).

2.3.1.7 Histerese

O papel filtro é um material poroso e apresenta curvas de calibração diferentes para o umedecimento (papel inicialmente seco) e secagem (papel inicialmente úmido) conforme é ilustrado na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Fenômeno da histerese na curva de retenção solo-água. Fonte: Adaptado de Lu e Likos (2004).

Quando o papel filtro está úmido o fluxo de água 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 será do solo para o papel.

O fenômeno da histerese no papel filtro não influencia na medida da sucção do solo desde que seja usada uma correta curva de calibração no sentido de secar ou no sentido de umedecer o papel filtro (Muñoz et al., 2010).

No trabalho de Muñoz et al. (2010) foram analisadas duas abordagens para o método do papel filtro. A primeira realizou o método a partir de um papel filtro seco conforme sugere a norma ASTM (D 5298-03) e a segunda abordagem proposta por Parcevaux (1980) consistiu em utilizar um papel filtro inicialmente úmido. Os resultados mostraram a presença do fenômeno da histerese.

2.4 CURVAS DE CALIBRAÇÃO PARA O PAPEL FILTRO WHATMAN Nº 42

Os dois papéis filtro mais utilizados para a determinação da sucção do solo são o Whatman N°42 e o Schleicher e Schuell N° 589. Entretanto, o papel filtro Whatman N° 42 é mais
apropriado para o uso por ser mais espesso e por apresentar um tamanho de poro pequeno (Chandler e Gutierrez, 1986) e, portanto, escolhido para análise no presente trabalho. Esses parâmetros são de melhor valia na análise do fluxo capilar através da formação de tubos capilares, ou seja, maiores alturas e menores diâmetros.

Várias funções de calibração para o papel filtro do tipo Whatman Nº 42 já foram publicados na literatura. A Equação a seguir apresenta a estrutura da função da curva de calibração mais usual (Bicalho et al., 2009):

$$Log_{10}(sucção) = A - B.w(\%)$$
 2.6

onde $Log_{10}(sucção)$ é função logarítmica para os valores de sucção, A e B são constantes obtidas através da calibração e w é o teor de água gravimétrica do papel filtro no equilíbrio. Em geral, as curvas de calibração são compostas por duas equações, que indicam a diferente sensibilidade da resposta do papel filtro para altos e baixos níveis de sucção (Moncada, 2004).

O procedimento de calibração para o papel filtro consiste em atingir o seu equilíbrio com uma sucção conhecida. Após alcançar este equilíbrio, o papel filtro é pesado e seco em estufa. O teor de umidade gravimétrica é então obtido e relacionado à sucção gerada. Várias medidas são necessárias para cobrir um intervalo necessário de sucção (Marinho e Oliveira, 2006).

Algumas curvas de calibração propostas na literatura serão apresentadas nesta seção. Fawcett e Collis-George (1967) propuseram uma curva de calibração para o papel filtro do tipo Whatman Nº 42 em que utilizaram oito lotes diferentes. De acordo com Marinho (1994) eles trataram o papel filtro com solução de 0,005% de HgCl₂ para interromper o crescimento de fungos e bactérias.

Hamblin (1981) realizou calibrações para dois lotes de papel filtro do tipo Whatman Nº 42. 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. A calibração foi realizada usando placas de sucção (até 7 kPa), placa de pressão (até 70 kPa), membrana de pressão (até 1,5 MPa) e dessecador (para sucções acima de 5 MPa) (Marinho e Oliveira, 2006) e o resultado obtido teve boa concordância com a curva de calibração proposta por Fawcett e Collis-George (1967).

Chandler e Gutierrez (1986) apresentaram uma curva de calibração para o papel filtro Whatman Nº 42 para o intervalo de sucção de 80 kPa a 6000 kPa que incluíam os seus próprios resultados e também os resultados de Fawcett e Collis-George (1967) e de Hamblin (1981) (Bicalho,

2009). Para sucções inferiores a 80 kPa os resultados obtiveram uma variabilidade considerável, e o método tornou-se incerto (Chandler e Gutierrez,1986).

Mais tarde, uma curva de calibração para o papel filtro do tipo Whatman Nº 42 para sucções abaixo de 80 kPa foram apresentadas por Chandler et al. (1992). A calibração também incluiu pontos obtidos por Fawcett e Collis-George (1967) e Hamblin (1981) (Marinho e Oliveira, 2006). Crilly e Chandler (1993) também propuseram uma curva de calibração para o papel filtro do tipo Whatman Nº 42.

Leong et al. (2002) apresentaram duas curvas de calibração mostradas na Figura 2.6 : uma foi obtida usando placa de pressão e outra usando soluções salinas como fonte de produção de sucção via umidade relativa. Eles sugeriram que a curva de calibração para sucção total fosse diferente da curva de calibração para sucção matricial (Marinho e Oliveira, 2006). Entretanto, é recomendado um cuidado durante o uso de curvas de calibração publicadas para sucção total, uma vez que tais curvas esperadas são válidas somente para o tempo de equalização usado durante a calibração correspondente. Se o equilíbrio entre o papel filtro e o solo ainda não foi alcançado, a curva de calibração para sucção total pode fornecer valores de sucção total menores do que sucção matricial, produzindo um valor negativo de sucções osmóticas que não é real (Bicalho et al., 2009).

A norma técnica internacional da ASTM (D 5298-03) padroniza uma curva de calibração bilinear para o papel filtro Whatman N° 42.



Teor de umidade gravimétrica (%)

Figura 2.6 – Curvas de calibração papel filtro Whatman Nº 42 propostas por Leong et al. (2002) sugerindo equações distintas para a sucção total e matricial.

Fonte: Adaptado de Leong et al. (2002).

A Tabela 2.3 apresenta algumas das equações de calibração propostas para o papel filtro do tipo Whatman N° 42. Fredlund (1992) mostra que existe uma tendência de convergência entre a sucção total e matricial para altos valores de sucção, ou baixos teores de umidade. Isto pode ser explicado, tendo em vista que, para umidades baixas, a transferência de umidade entre o solo e o papel filtro ocorre predominantemente por fluxo de vapor (Moncada, 2004).

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	$15 \le w \le 47$	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

Tabela 2.3 – Lista de algumas equações de calibração publicadas para o papel filtro Whatman Nº 42.

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

3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DA VARIABILIDADE DE CURVAS DE CALIBRAÇÃO PUBLICADAS PARA O PAPEL FILTRO WHATMAN N° 42

Este capítulo descreve os métodos estatísticos utilizados para avaliar as principais curvas de calibração propostas para o método do papel filtro do tipo Whatman N° 42. São apresentados os resultados das análises estatísticas que incluem a determinação de uma nova curva do tipo não linear gerada para representar as curvas de calibração propostas na literatura.

3.1 METODOLOGIA DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS DE VARIABILIDADE

3.1.1 Curvas de calibração

Devido à importância do uso adequado da curva de calibração foi feito uma avaliação das principais equações propostas e utilizadas para o papel filtro do tipo Whatman Nº 42. Foram selecionadas as equações propostas para determinação da sucção matricial uma vez que a sucção osmótica não é significante para a maioria dos valores de sucção total observados nas obras de engenharia. A Tabela 3.1 apresenta as referências, as correspondentes equações incluindo a equação proposta pela norma ASTM D5298-03, valores máximo e mínimo de sucção e umidade gravimétrica do papel filtro. A forma de obtenção dos valores (limites de sucção e limites umidade gravimétrica do papel filtro) apresentados nesta tabela está descrita na subseção 2.4. Os valores utilizados no presente trabalho oriundos das pesquisas de referência previamente citadas foram denominados de pontos artificiais ou pseudoamostras. Tal nomeação se justifica pelo fato de não estar considerando os pontos experimentais utilizados em cada trabalho mas sim os valores definidos pela curva de calibração calculada por cada autor.

Referência	Curva de calibração	Teor Mínimo de umidade gravimétrica(%)	Teor Máximo de umidade gravimétrica(%)	Sucção Mínima (kPa)	Sucção Máxima (kPa)
Fawcett e Collis- George (1967)	5,327-0,0779 w	21,7	45,3	1145,5	30000,0
Hamblin (1981)	6,281-0,0822 w	21,9	58,4	30	30000,0
Chandler e Gutierrez (1986)	5,85-0,0622 w	22,0	47,4	80,0	30000,0
Chandler et al. (1992b)	4,84-0,0622 w	5,9	47,0	80,0	30000,0
	6,05-2,48 log(w)	47,0	69,8	30,0	80,0
Crilly e Chandler	4,84-0,0622 w	15,0	47,0	82,5	8072,4
(1993)	6,05-2,48 log (w)	47,0	69,8	30,0	80,0
Leong et al. (2002)	4,945-0,0673 w	7,0	47,0	60,5	30000,0
	2,909-0,0229 w	47,0	62,5	30,0	68,0
ASTM D5298-03	5,327-0,0779 w	10,9	45,3	62,8	30000,0
	2,412-0,0135 w	45,3	69,3	30,0	63,2

Tabela 3.1 - Apresentação dos intervalos de umidade e sucção para as curvas de calibração avaliadas

3.1.1.1 Definição dos intervalos de umidade e sucção

Conforme observado na Tabela 2.3 a maioria das referências, inclusive a norma ASTM, propuseram curvas de calibração de acordo com o intervalo de umidade do papel medido, entretanto não foram especificados os valores máximos e mínimos de referência. Assim, no presente trabalho, foram calculados e incluídos na Tabela 3.1 os valores de sucção limites sugeridos para o método do papel filtro com contato (ou seja, entre 30 e 30000 kPa) e os correspondentes valores de umidade gravimétrica do papel filtro determinados a partir da curva de calibração proposta.

3.1.1.2 Avaliação Global e Local

As curvas de calibração do papel filtro Whatman Nº 42 avaliadas neste trabalho foram agrupadas de duas formas distintas. Inicialmente, foram avaliadas todas as curvas apresentadas

na Tabela 3.1 e denominado neste estudo de grupo Global. A Figura 3.1 apresenta as curvas de calibração definidas para o grupo Global. As funções foram plotadas assumindo acréscimos unitários de umidade gravimétrica do papel filtro dentro dos intervalos definidos previamente. As variações observadas nas equações propostas podem ser decorrentes de uso de técnicas diferentes de medição da sucção do papel filtro, falhas mecânicas, diferentes lotes de papel filtro (embora atualmente os fabricantes tenham buscado minimizar esta variação) ou, ainda decorrentes de variações aleatórias (devidas ao acaso). Para a minimização de erros sistemáticos, ou seja, aqueles gerados por fontes identificáveis, e que, portanto podem ser eliminados ou compensados, destaca-se, como de fundamental importância, a padronização dos procedimentos técnicos a serem adotados durante a determinação das curvas de calibração. Fredlund e Rahardjo (1993) observam que este tipo de papel filtro é o que apresenta menor variação entre as diferentes calibrações publicadas na literatura.



Figura 3.1 – Apresentação das curvas de calibração do grupo Global (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al.,

2002; ASTM D5298-03).

A curva de calibração de Chandler et al. (1992b) foi proposta incluindo pontos das curvas de calibração de Fawcett e Collis-George (1957) e Hamblin (1985) além dos dados de Gutierrez (1985). Crilly e Chandler (1993) apresentam a mesma curva de calibração da de Chandler et al. (1992b) porém para intervalos de teor de umidade gravimétrica menores.

Considerando que a curva de calibração proposta por Chandler et al. (1992b) tem sido amplamente usada na literatura e além disso utilizou dados de outras curvas de calibração que compõem o grupo Global, foi avaliado neste estudo um segundo grupo de curvas de calibração propostas por Chandler et al. (1992b), Leong et al. (2002) e a norma ASTM D5298 – 03. A Figura 3.2 apresenta as curvas de calibração pertencentes ao grupo denominado neste estudo de Local.



Figura 3.2 – Apresentação das curvas de calibração do grupo Local (Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002; ASTM D5298-03).

3.1.2 Regressão Linear

Visando obter uma correlação linear entre as curvas de calibração do grupo global foi feita uma análise de regressão das funções consideradas no grupo.

Esta técnica estatística é utilizada para modelar e investigar a relação entre duas ou mais variáveis (Montgomery e Runger, 2003). Desta forma, é conhecido que os valores de sucção são inversamente proporcionais aos valores de umidade gravimétrica medidos no papel filtro. Esta relação já apresentada na Figura 3.1 pelos estudos de referência foi avaliada neste trabalho como um diagrama de dispersão no qual cada par (Umidade, Log (sucção)) foi representado como um ponto plotado em um sistema bidimensional de coordenadas.

A inspeção do diagrama indica que, embora nenhuma curva simples passe exatamente em todos os pontos, há uma forte indicação de que os pontos repousam aleatoriamente dispersos em uma linha reta (Montgomery e Runger, 2003). Deste modo, foi considerado que para um valor fixo de umidade, no eixo X, o valor real do Log(Sucção) fosse determinado pela função do valor observado médio mais um termo de erro aleatório tal que:

$$LOG_{10}(sucção) = A + B.w(\%) + \varepsilon$$

sendo A a inclinação e B a interseção da linha simplificadamente denominados de coeficientes de regressão e \mathcal{E} o termo de erro aleatório.

Os parâmetros $A \in B$ foram estimados a fim de minimizar a soma dos quadrados dos desvios verticais como exemplificado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Desvios verticais dos dados observados em relação ao modelo estimado de regressão. Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2003).

Este critério de estimativa é chamado de método dos mínimos quadrados e assim os n pares de umidade e Log (sucção) foram então expressos como segue:

$$Log_{10}(sucção)_i = A + B.w(\%)_i + \mathcal{E}_i, \qquad i = 1, 2, ..., n$$
 3.2

A soma dos quadrados dos erros dos valores observados em relação à linha de regressão foi calculada tal que:

$$L = \sum_{i=1}^{n} \mathcal{E}_{i}^{2} = \sum_{i=1}^{n} (Log_{10}(sucção) - A - Bw(\%)_{i})^{2}$$
3.3

As estimativas pontuais de $A \in B$, representadas por $a \in b$, e denominadas estimativas dos mínimos quadrados, são os valores utilizados para minimizar L.

Esses valores de minimização a e b foram identificados tomando-se derivadas parciais de L em relação à a e be igualando-os a zero conforme visto nas equações a seguir:

$$\frac{\partial L}{\partial A}\Big|_{a,b} = -2\sum_{i=1}^{n} (Log_{10}(suc \zeta \tilde{a} o)_i - a - bw(\%)_i) = 0$$
3.4

$$\frac{\partial L}{\partial B}\Big|_{a,b} = -2\sum_{i=1}^{n} (Log_{10}(sucção)_i - a - bw(\%)_i)w(\%)_i = 0$$
3.5

A solução das Equações 3.4 e 3.5 resultou nas estimativas dos mínimos quadrados $a \in b \in (?)$ por consequência obteve-se a linha estimada de regressão tal que:

$$Log_{10}(sucção) = a + b.w(\%)$$
3.6

O modelo empírico obtido pela regressão linear do grupo Global foi denominado de Combinado Global Linear. Assim também outra correlação foi obtida para o grupo local sendo tratado neste trabalho de Combinado Local Linear.

Primeiramente, as duas curvas obtidas por regressão linear, a partir das curvas bilineares propostas na literatura, foram propostas para um intervalo contínuo de umidade. Em seguida, foi gerada uma equação bilinear para o grupo Global para intervalos de umidade gravimétrica do papel filtro w \leq 47% e w > 47% para avaliar o ajuste nessas condições.

Neste estudo foi calculado um modelo alternativo aos modelos lineares usuais propostos para curvas de calibração a fim de verificar a possibilidade da não linearidade entre os pares de Umidade e Log (sucção).

Na seção anterior os dados foram tratados através de modelos estatísticos lineares, onde os pares de dados são convertidos em uma linha reta. Quando um modelo estatístico não linear (onde são aplicadas funções exponenciais, potenciais ou recíprocas) pode ser expresso por uma linha reta ele é chamado de intrinsecamente linear. Deste modo, a função exponencial apresentada na Equação 3.7 pode ser considerada intrinsecamente linear uma vez que ela pode ser transformada numa linha reta através da transformação logarítmica:

$$Log_{10}(sucção)' = \ln(LOG_{10}(sucção))$$
$$LOG_{10}(sucção) = Ae^{Bw(\%)}\varepsilon$$
3.7

E o resultado desta transformação é dado por:

$$Log_{10}(succao)' = B_0 + B_1 w(\%)' + \mathcal{E}'$$
 3.8

onde $B_0 = \ln(A)$, $B_1 = B$ e $\mathcal{E}' = \ln(\mathcal{E})$.

A maior vantagem de um modelo intrinsecamente linear é que os parâmetros B_0 e B_1 do modelo transformado podem ser estimados de imediato por meio do princípio dos mínimos quadrados (Devore, 2006). Para isso, $Log_{10}(sucção)_i'$ e $w(\%)_i'$ devem ser substituídos na fórmula dos estimadores pontuais *a* e *b* dos parâmetros B_0 e B_1 , respectivamente, conforme as equações abaixo:

$$a = \frac{\sum w(\%)_{i} Log_{10}(sucção)_{i} - \sum w(\%)_{i} \sum Log_{10}(sucção)_{i} / n}{\sum (w(\%)_{i})^{2} - (w(\%)_{i})^{2} / n}$$
3.9

$$b = \frac{\sum Log_{10}(sucção)_i' - a\sum w(\%)_i'}{n}$$
3.10

A solução das Equações 3.9 e 3.10 resulta no modelo não linear exponencial tal que:

$$Log_{10}(sucção) = e^b e^{aw(\%)}$$
3.11

O processo descrito foi realizado com os dados dos grupos Global e Local cujas funções ajustadas foram denominadas, respectivamente, de Combinado Global Exponencial e Combinado Local Exponencial.

3.1.4 Coeficiente de determinação (R²)

O coeficiente de determinação representado por R² é definido segundo a equação:

$$R^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT}$$
3.12

onde *SQE* é a soma dos quadrados dos erros e *SQT* é a soma dos desvios quadrados. O valor deste coeficiente é interpretado como a proporção da variação do Log (sucção) observada que pode ser explicada pelos modelos de regressão. Quanto maior o valor de R² mais o modelo de regressão consegue explicar a variação de Log (Sucção). Para todos os modelos Combinados foram calculados os valores do coeficiente de determinação.

3.1.5 Erro Residual

As curvas de calibração advindas dos modelos de regressão linear e exponencial foram utilizadas numa tentativa de compará-las com as curvas de calibração da literatura. A princípio, foi calculado o erro residual do valor de Log (Sucção) dos combinados Globais e Locais em relação às curvas de calibração avaliadas neste estudo tal que:

(verificar espaçamento entre as equações em todo o texto)

$$\varepsilon = Y - Y_M$$
 3.13

Onde *Y* corresponde ao valor do Log (sucção) do combinado e Y_M é o valor do Log (Sucção) do modelo da literatura. A análise foi feita segundo o critério de que os erros residuais oriundos da regressão devam ser distribuídos de forma aproximadamente normal. Ou seja, para verificar se um modelo de regressão é adequado estudam-se as discrepâncias entre os valores observados e os valores ajustados (Bussab e Morettin, 2010) Esta referencia falta na lista. Então, um teste de normalidade é efetuado com a distribuição dos resíduos da regressão. Para o presente estudo foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk que é muito adequado para esse tipo de análise e para a quantidade de dados amostrais avaliados. O teste de normalidade indicará para o número de amostras e nível de confiança esperado se a hipótese de normalidade é aceita. Para as quatro comparações efetuadas no presente trabalho é apresentado o resultado desse teste de normalidade.

3.1.6 Raiz quadrada do erro médio

A raiz quadrada do erro médio (*RMSE*) entre os valores de sucção estimados pela função combinada e os valores estimados pelas curvas de calibração avaliadas neste estudo é definida segundo a equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\hat{Y} - Y_M)^2}$$
3.14

onde N corresponde ao número de pontos avaliados.

Foi calculado um valor numérico de *RMSE* em relação a cada curva de calibração avaliada tanto para o grupo Global quanto para o grupo Local. Tais valores de erro foram utilizados para avaliar os ajustes linear e exponencial calculados através do coeficiente de correlação (R²). O intervalo de pontos analisados foi limitado ao intervalo do teor de umidade.

3.1.7 Erro médio

O erro médio entre os valores de sucção estimados pela função combinada e os valores estimados por cada função de calibração avaliada neste trabalho foram calculados conforme a equação a seguir:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\hat{Y} - Y_M)$$
3.15

Desta forma, foi obtido o erro médio para o grupo Global e Local nos modelos linear e exponencial.

3.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Nesta seção são apresentadas as principais análises feitas das curvas de calibração para o método do papel filtro do tipo Whatman N° 42 selecionadas neste trabalho. As calibrações selecionadas (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al.,1993; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03), têm sido referência na proposição de calibrações na estimação da sucção em solos não saturados através do MPF.

Inicialmente, são apresentados os intervalos de sucção e umidade para cada calibração avaliada neste trabalho e que serve de dados para as novas equações obtidas pelo melhor ajuste, segundo o conceito do método dos mínimos quadrados o qual foi descrito na metodologia desta dissertação (Seção 3.1). De posse das equações lineares e exponenciais, uma avaliação é proposta utilizando as ferramentas estatísticas apresentadas anteriormente, como o erro médio.

3.2.1 Intervalos de sucção e umidade

A Tabela 3.1 apresenta um resumo de todas as curvas de calibração avaliadas neste trabalho. O critério para obter os valores máximos e mínimos correspondentes ao teor de umidade gravimétrica foi diferenciado para cada curva de calibração, porque em algumas pesquisas foram definidos diferentes intervalos de variação, ou seja, alguns usam intervalos de sucção e outros a intervalos de teor de umidade gravimétrica do papel filtro.

Em estudos onde não foram definidos nem intervalo de umidade, nem intervalo para sucção, foi adotado o intervalo de precisão de medição para sucções sugeridas para o método do papel filtro com contato, ou seja, entre 30 e 30000 kPa.

Os dados exibidos na Tabela 3.1 serviram de base para realizar as regressões lineares e exponenciais neste trabalho. Assim, como equações resultantes, elas abrangem para teor de umidade gravimétrica o intervalo entre 5,9 e 69,8 % e o intervalo de sucção entre 30 e 30000 kPa próprio para o método do papel filtro com contato.

3.2.2 Curvas de calibração obtidas por regressão linear

Nesta seção são apresentadas as relações obtidas após a aplicação de regressão linear em curvas características encontradas na literatura para o papel filtro Whatman N° 42. A regressão do tipo linear objetivou analisar as curvas de calibração conforme elas são encontradas na literatura, ou seja, numa relação linear entre o Log (sucção) e o teor de umidade gravimétrica.

Para isso, as análises são divididas em dois grupos: o Global e o Local. O grupo Global corresponde às curvas de calibração propostas na Figura 3.1. Cada curva de calibração serviu como dado de entrada, dentro dos limites de sucção e umidade estabelecidos na mesma tabela, a fim de gerar as regressões.

3.2.2.1 Combinado Global Linear

A Equação 3.16 apresenta o resultado da regressão linear obtida para o grupo Global Linear. Este grupo é formado pelas principais equações sugeridas na literatura para o método do papel filtro, i.e., Fawcett e Collis-George (1967), Hamblin (1981), Chandler e Gutierrez (1986), Chandler et al. (1993), Leong et al. (2002) e ASTM D5298-03.

$$Log_{10}(Succao) = 4,9278 - 0,0557w$$

O coeficiente de determinação (\mathbb{R}^2) foi calculado para auxiliar na avaliação da regressão apresentada a partir de outras calibrações. Esse coeficiente representa o grau de ajuste da Equação 3.16 em relação a base de dados. O coeficiente varia de 0 a 1 sendo que quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste e menor a dispersão entre os dados. (colocar no mesmo paragrafo)O valor do \mathbb{R}^2 encontrado foi de 0,828.

A Figura 3.4 apresenta a curva de regressão do Combinado Global Linear plotado conjuntamente a todas as curvas de calibração avaliadas nesse grupo. Neste gráfico, as curvas propostas na literatura não estão diferenciadas entre si, pois foram utilizadas de maneira equivalente como fonte de dados para Equação 3.16.



Figura 3.4 – Curvas de calibração da literatura que compõem o grupo Global e a curva resultante de regressão linear denominada de Combinado Global Linear.

A Figura 3.5 apresenta os pares Combinado Global Linear e dados de sucção da literatura. Observa-se que a curva de calibração proposta neste trabalho ajustou-se melhor às referências de Hamblin (1981) para menores sucções; Chandler et al. (1992b), Crilly e Chandler (1993), Leong et al. (2002) e ASTM D5298-03 para valores de sucção superiores a 10000 kPa. A reta inclinada de cor preta também plotada neste gráfico serve para auxiliar na comparação com os dados das equações. Quanto mais próximo desta linha melhor a correlação está representada.



Equação resultante de regressão do Combinado Global Linear

Figura 3.5 – Gráfico 1:1 entre valores de sucção obtidos através do Combinado Global Linear e das sete curvas de calibração propostas na literatura e pertencentes ao grupo Global (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03).

Esta análise indica que a partir de sucções maiores que 10000 kPa não existe diferença acentuada na escolha entre Fawcett e Collis-George (1967), Chandler e Gutierrez (1986), Leong et at. (2002) e ASTM D5298-03 como curva de calibração para o papel filtro Whatman N° 42. Essa faixa corresponde a valores de umidade gravimétrica do papel filtro de até, aproximadamente, 20%.

Uma maior discordância entre as equações é percebida no ponto tênue que divide as "bilineares (?)" equações, i.e., de umidade gravimétrica em torno de 47% que corresponde a sucções de 50 - 100 kPa.

3.2.2.2 Combinado Local Linear

Para o grupo Local, definido pelas curvas de calibrações de Chandler et al (1993), Leong et at. (2002) e ASTM D5298-03, que são muito utilizadas na literatura, obteve-se como produto de regressão linear a curva de calibração a seguir denominada Combinado Local Linear:

$$Log_{10}(Sucção) = 4,6412 - 0,0534w$$

No cálculo do coeficiente de determinação, foi encontrado o valor 0,9523. Este valor indica a existência de uma acentuada correlação entre as curvas da literatura e a da ASTM D5298-03. A curva pode ser visualizada na Figura 3.6 com as outras equações que compõem o grupo Local.



Figura 3.6 – Curvas de calibração da literatura que compõem o grupo Local e a curva resultante de regressão linear denominada de Combinado Local Linear.

Ao comparar os valores de sucção do combinado Local linear com os valores provenientes das curvas de calibração do grupo Local, observa-se um melhor ajuste entre os intervalos de sucção conforme apresentado na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Gráfico 1:1 entre valores de sucção obtidos através do Combinado Local Linear e das três curvas de calibração propostas na literatura e pertencentes ao grupo Local.

Esse resultado sugere a correspondência numérica entre as equações da literatura, tornando-se irrelevante a escolha de qualquer uma delas para fins de aplicação.

Quando são comparadas as equações 3.16 e 3.17, observa-se que a curva de calibração do Combinado Local Linear apresenta um ajuste melhor quando comparado à curva de calibração do Combinado Global Linear. Este desempenho está associado à disposição das curvas de calibração do grupo Global linear que, apesar de possuírem dados em comum, são mais dispersos entre si do que as curvas do grupo Local.

3.2.2.3 Curva Bilinear do grupo Global

Aplicação de regressão linear para o grupo Global resultou numa equação bilinear apresentando a seguinte equação para umidades $\leq 47\%$:

 $Log_{10}(Sucção) = 5,201 - 0,062w$

 $Log_{10}(Sucção) = 2,909 - 0,0021w$



A Figura 3.8 apresenta o gráfico do estudo bilinear gerado para o grupo Global.

Figura 3.8 – Equação bilinear resultante da regressão linear proposta para o grupo Global considerando o ponto de inflexão na umidade gravimétrica correspondente a 47%. (como você já definiu no texto não precisa reescrever nos títulos das figuras, corrigir isto em todos os títulos de figuras)

A regressão bilinear foi proposta no intuito representar um bom ajuste para as equações encontradas na literatura e auxiliar na análise entre estas. Entretanto, observa-se no ponto de inflexão onde para umidades muito próximas (em torno de 47%) os valores de sucção são muito dispersos. Voce discutiu a descontinuidade observada na figura 3.8?

3.2.3 Curvas obtidas por regressão exponencial

3.2.3.1 Combinado Global Exponencial

Após o cálculo dos modelos de regressão linear, deu-se início as estimativas dos modelos exponenciais.

A motivação para esta análise deu-se devido ao principal inconveniente de utilizar curvas de calibrações "bilineares". Isto porque nos pontos de inflexão (em torno de 47% de umidade gravimétrica) decimais medidos de umidade ocasionam diferença considerável entre os valores

de sucção obtidos, dai a importância de obter uma curva contínua. Além disso, o caráter de ajuste do tipo exponencial foi escolhido fazendo referência a algumas equações, propostas na literatura, para a curva de retenção da água no solo (Brooks e Corey,1966, van Genuchten, 1980 e Fredlund e Xing 1994).

Assim, a Equação 3.20 apresenta o resultado da regressão exponencial para o grupo Global. O coeficiente de determinação obtido para esta análise foi de 0,85.

$$Log_{10}(Succao) = 5.9146e^{-0.021w}$$
 3.20



A Figura 3.9 apresenta os pontos plotados desta regressão.comentar a figura....

Figura 3.9 – Curvas de calibração da literatura que compõem o grupo Global e a curva resultante de regressão exponencial denominada de Combinado Global Exponencial.

Na Figura 3.10 estão plotados os valores numéricos da sucção do conjunto de curvas de calibração propostas na literatura denominado neste trabalho de grupo Global, além dos valores de sucção resultantes da Equação 4.3 (Combinado Global Exponencial).

O gráfico mostra uma boa correlação entre o combinado Global e as curvas propostas por Chandler et al. (1992b), Crilly e Chandler (1993), Leong et al. (2002) e ASTM. Optar por alguma das quatro últimas equações ao lugar das calibrações de Fawcett e Collis-George (1967), Chandler e Gutierrez (1986) e Hamblin (1981) resultará em marcantes diferenças a nível de aplicação dessas sucções na prática de engenharia.



Figura 3.10 – R 1:1 entre valores de sucção obtidos através do Combinado Global Exponencial e das sete curvas de calibração propostas na literatura e pertencentes ao grupo Global.

3.2.3.2 Combinado Local Exponencial

Para o grupo Local, obteve-se a curva de calibração exponencial tal que:

$$Log_{10}(Sucção) = 5,328e^{-0,022w}$$
 3.21

O coeficiente de determinação encontrado foi 0,976 e a plotagem desta curva de calibração é exibida na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Curvas de calibração da literatura que compõem o grupo Local (Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) e a curva resultante de regressão exponencial denominada de Combinado Local Exponencial.

A Figura 3.12 apresenta o gráfico comparativo entre os valores de sucção. O pior ajuste encontra-se em altas sucções (acima de 5000 kPa) e na faixa onde existe o ponto de inflexão nas equações (entre 80 e 350 kPa).



Equação Resultante de Regressão do Combinado Local Exponencial

Figura 3.12 – Gráfico 1:1 entre valores de sucção obtidos através do Combinado Local Exponencial e das três curvas de calibração propostas na literatura e pertencentes ao grupo Local (Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03).

Novamente, o grupo Local apresentou melhor ajuste em relação ao grupo Global. Atribui-se isso às semelhanças existentes durante o processo de pesquisa que resultou nas curvas de calibração dos autores Chandler et al. (1992b), Leong et al. (2002) e da norma ASTM.

Outra análise apresentada deve-se às regressões exponenciais quando comparadas às regressões lineares para curvas de calibração em papéis filtro. A Tabela 3.2 mostra um resumo dos coeficientes de determinação obtidos.

Curra de calibração	Coeficiente de determinação		
Curva de canoração	Linear	Exponencial	
Combinado Global	0,828	0,850	
Combinado Local	0,952	0,976	

Tabela 3.2 - Coeficientes de determinação (R²) das curvas de calibração ajustadas.

Os valores de R^2 calculados mostram uma melhor adequação nas regressões exponenciais em relação às lineares. Esses resultados concordam com o uso de curvas contínuas ao lugar de lineares conforme é proposto na apresentação de curvas de retenção de água nos solos nos trabalhos de Brooks e Corey (1966), van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994), por exemplo.

3.2.4 Erro residual linear

Uma alternativa de ponderar o comportamento das curvas de calibração ajustadas deu-se através do cálculo dos erros residuais conforme a metodologia apresentada na seção 3.1.5. Os valores numéricos dos resíduos são plotados juntamente aos valores de sucção estimada pelo Combinado a que se referem e, em gráfico posterior, são plotados com o teor de umidade gravimétrica atribuído ao papel filtro.

3.2.4.1 Combinado Global Linear

A Figura 3.13 apresenta os erros residuais lineares gerados para o grupo Global. Nesta análise, são plotadas as diferenças numéricas dos valores de sucção obtidos com as curvas de calibração que compõem o grupo Global em relação à Equação 3.16 (Combinado Global Linear).



Figura 3.13 – Resíduo gerado para os valores de sucção do grupo Global (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) em relação aos valores de sucção estimados pelo Combinado Global Linear (Equação 3.16).

O aspecto do gráfico indica que não houve boa adequação do modelo ajustado em relação às curvas de calibração do grupo Global estando os valores numéricos do erro residual inseridos num pequeno intervalo residual [-0,75; +0,75]. Para valores de sucção menores que aproximadamente 300 kPa os erros residuais apresentados para as equações de ASTM D5298-03, Chandler et al. (1992b), Leong et al. (1992) e Crilly e Chandler (1993) estão próximos uma vez que as calibrações apresentaram resultados similares (Figura 3.1). A mesma discussão pode ser aplicada à semelhança existente entre os resíduos das curvas de calibração Fawcett e Collis-George (1967) e Chandler e Gutierrez (1986). Finalmente, os valores de erro residual de Hamblin (1981) destoam dos demais, o que também é facilmente verificado na Figura 3.1.

A Figura 3.14 apresenta o erro residual plotado com o teor de umidade gravimétrica. As curvas características propostas por Fawcett e Collis-George (1967), Hamblin (1981) e Crilly e Chandler (1993) são as que apresentam menor semelhança em relação ao ajuste do Combinado Global Linear por estarem dispersas do eixo "zero" da Figura 3.13 e da Figura 3.14.



Figura 3.14 – Resíduo gerado para os valores de sucção do grupo Global (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) em relação aos valores de umidade gravimétrica do papel filtro.

O teste de normalidade efetuado para os valores de erro residual para o Combinado Global Linear indicou uma distribuição não aproximada à normalidade para tais dados. Chegou-se a tal conclusão a partir do cálculo do valor de estatística de Shapiro-Wilk, igual a 0,856 inferior ao valor esperado para um nível de significância igual a 0,05. Isso indica que a regressão linear não é a melhor opção para esses dados.

3.2.4.2 Combinado Local Linear

A Figura 3.15 e Figura 3.16 mostram o comportamento do erro residual no grupo Local, respectivamente em relação à sucção e umidade gravimétrica do papel filtro. A disposição dos erros residuais é semelhante ao do grupo Global onde o modelo ajustado não foi considerado adequado para representar o comportamento numérico das curvas deste grupo.

Na Figura 3.15, para baixos valores de sucção (menores que aproximadamente 120 kPa) os erros residuais (conforme metodologia de cálculo apresentada na seção 3.1.5) apresentados para as calibrações pelas curvas de calibração do grupo Local (Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) estão próximos, uma vez que as calibrações propostas apresentam resultados similares conforme mostra a Figura 3.2. Na Figura 3.15, verifica-se que o modelo Local Linear diverge do Grupo Local em sucções em torno de 180 kPa que correspondem a umidades gravimétricas em torno de 47% (Figura 3.16).

Observa-se que na Figura 3.15 e na Figura 3.16 que a calibração proposta por ASTM D298-03 para valores de sucções maiores que 120 kPa (ou correspondente valores de umidade gravimétrica do papel filtro (w) menores que 45,3%) apresenta maior variação que a calibração definida neste trabalho como Combinado Local Linear resultante de análise de regressão linear, tal que para valores de sucção no intervalo 120-1000 kPa a calibração proposta pela ASTM apresenta erro residual positivo enquanto que para valores de sucção superiores a 1000 kPa os valores do erro são negativos.



Figura 3.15 – Resíduo gerado para os valores de sucção do grupo Local (Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) em relação aos valores de sucção estimados pelo Combinado Local Linear (Equação 3.17).



Figura 3.16 – Resíduo gerado para os valores de sucção do grupo Local (Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) em relação aos valores de umidade gravimétrica do papel filtro.

Um aspecto a ser considerado na avaliação do grupo Local refere-se à redução do intervalo de erro residual [-0,5; +0,5]. Isso mostra uma melhor concordância entre as equações do grupo Local tornando-as análogas na escolha para a prática na engenharia.

Em contrapartida ao teste realizado no Combinado Global Linear, os resíduos testados no caso do Combinado Local Linear apresentaram um valor da estatística do teste de Shapiro-Wilk superior ao esperado indicando uma distribuição aproximadamente normal, sendo esse valor 0,982.

3.2.5 Erro residual exponencial

As seções seguintes apresentam as análises de erro residual realizadas para os resultados dos ajustes das regressões exponenciais dos grupos Global (Equação 3.20) e Local (Equação 3.21). Os valores numéricos dos resíduos são plotados juntamente aos valores de sucção estimada pelo Combinado a que se referem e, em gráfico posterior, são plotados com o teor de umidade gravimétrica atribuído ao papel filtro.

3.2.5.1 Combinado Global Exponencial

A Figura 3.17 mostra os erros residuais relacionados à curva de calibração ajustada pela regressão exponencial para o grupo Global (Equação 3.20). Pelo gráfico, nota-se uma boa adequação do Combinado Global Exponencial relativo às referências de Chandler et al. (1992b) e Crilly e Chandler (1993) para uma variação de 350 a 4500 kPa. No intervalo entre 4500 e 25000 kPa a curva adequou-se melhor à ASTM. O Combinado Global Exponencial não é adequado para representar as curvas de calibração propostas por Fawcett e Collis-George (1967), Hamblin (1981) e Chandler e Gutierrez (1986).



Figura 3.17 – Resíduo gerado para os valores de sucção do grupo Global (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) em relação aos valores de sucção estimados pelo Combinado Global Exponencial (Equação 3.20).

Ocorre uma melhor adequação do Combinado Global Exponencial num intervalo de teor de umidade gravimétrica entre 20 e 50% com exceção as curvas de calibração proposta por Fawcett e Collis-George (1967), Hamblin (1981) e Chandler e Gutierrez (1986) conforme exibido na Figura 3.18.



Figura 3.18 – Resíduo gerado para os valores de sucção do grupo Global em relação aos valores de umidade gravimétrica do papel filtro.

Quando se compara o ajuste do Combinado Global Exponencial para as equações publicadas por Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03 (Figura 3.17 e Figura 3.18) com o do Combinado Global Linear (Figura 3.13 e Figura 3.14) verificam-se piores ajustes para a regressão exponencial. Nestes, os erros atingem intervalos maiores [-1,0; +1,0] e são contrários aos resultados encontrados na análise do coeficiente de determinação (R²) já exibidos na Tabela 3.2.

Novamente para os dados do Combinado Global, agora tratando-se do modelo exponencial, os resíduos não apresentam uma distribuição aproximadamente normal, visto o valor da estatística igual a 0,872, inferior ao esperado no teste considerando-se o número de amostras e o nível de significância considerado.

3.2.5.2 Combinado Local Exponencial

Para o ajuste do Combinado Local Exponencial, avaliou-se que os erros residuais situam-se num intervalo entre [- 0,25; 0,40]. A ASTM D5298-03 apresenta uma maior dispersão em relação a equação de ajuste como é mostrado na Figura 3.19 onde os erros residuais atinge, valores entre 0,40 e -0,25 enquanto as outras curvas mantém próximas ao resíduo zero.



Sucçção [kPa] Equação Resultante de Regressão do Combinado Local Exponencial

Figura 3.19 – Resíduo gerado para os valores de sucção do grupo Local (Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) em relação aos valores de sucção estimados pelo Combinado Local Exponencial (Equação 3.21).

O gráfico apresentado na Figura 3.20 (que tem nas abscissas valores do teor de umidade gravimétrica do papel filtro) tem um aspecto suave com pequeno intervalo de erro residual, o que confirma a boa adequação do Combinado Local Exponencial proposto em relação às curvas de calibração do grupo Local.

Esses resultados alinham-se aos resultados apresentados na análise do coeficiente de determinação (R^2) em que para o grupo Local, a curva de regressão exponencial apresentou melhor ajuste que a curva de regressão linear.



Figura 3.20 – Resíduo gerado para os valores de sucção do grupo Local (Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03) em relação aos valores de umidade gravimétrica do papel filtro.

Os resíduos do Combinado Local Exponencial apresentam dentre os quatro casos testados a distribuição mais próxima da normal, indicando a melhor regressão calculada para os combinados comparados. Foi obtido o valor da estatística igual a 0,986.

Em suma, as regressões calculadas para os Combinados Locais obtiveram resíduos distribuídos de forma normal, enquanto que as regressões propostas para os combinados globais não são as melhores opções para os dados avaliados. Como poderá ser observado posteriormente, a equação proposta para o Combinado Local Exponencial será escolhida em relação ao Local Linear a partir da análise de outros parâmetros estatísticos (erro médio e coeficiente de determinação, por exemplo) que serão apresentados nas seções seguintes.

Os melhores ajustes, de acordo com a avaliação sobre os erros residuais, devem-se ao modelo denominado Combinado Local Exponencial.

3.2.6 RMSE e ME do combinado global

A raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o erro médio (ME) foram calculados (metodologia explicada nas seções 3.1.6 e 3.1.7) entre as funções do Combinado Global e as curvas de calibração avaliadas neste grupo. A Tabela 3.3 apresenta os resultados encontrados.

Deferência	Linear		Exponencial	
Kelerencia	RMSE	ME	RMSE	ME
Fawcett e Collis-George (1967)	0,649	-0,649	0,833	-0,832
Hamblin (1981)	0,357	-0,261	0,497	-0,408
Chandler e Gutierrez (1986)	0,669	-0,668	0,724	-0,695
Chandler et al. (1992)b	0,315	0,206	0,310	0,211
Crilly e Chandler (1993)	0,322	0,196	0,198	0,140
Leong et al. (2002)	0,354	0,326	0,323	0,289
ASTM D5298-03	0,341	0,200	0,215	0,164

Tabela 3.3 - RMSE e ME para o grupo Global

Esta análise mostra que os ajustes do combinado Global obtiveram uma melhor correspondência com as referências de Crilly e Chandler (1992b), Leong et al. (2002) e com a ASTM D5298-03 i.e., para estas equações o RMSE e ME estiveram mais próximos a zero.

Dentre as três referências do grupo Global, destacam-se os valores numéricos da RMSE e do ME gerados a partir da análise de regressão exponencial uma vez que este ajuste apresentou a melhor correlação. Em contrapartida, o combinado Global não se adequou às referências de Fawcett e Collis-George (1967) e Chandler e Gutierrez (1986) tanto na análise linear quanto na análise exponencial sendo atribuídos a estes as piores correlações como também foi verificado na análise do erro residual.

3.2.7 RMSE e ME do combinado local

Um resumo dos valores de RMSE e ME calculados para o grupo Local é apresentado na Tabela 3.4.

Referência	Line	Linear		Exponencial	
	RMSE	ME	RMSE	ME	
Chandler et al. (1992b)	0,182	-0,036	0,092	0,019	
Leong et al. (2002)	0,169	0,066	0,119	0,081	
ASTM D5298-03	0,263	-0,026	0,170	0,004	

Tabela 3.4- RMSE e ME para o grupo Local

De uma maneira geral houve boa correlação dos dois combinados ajustados para o grupo Local. Novamente, as curvas estimadas provenientes da análise exponencial destacaram-se sobre as provenientes da análise linear.

A análise da RMSE indica que a curva estimada se correlaciona melhor com a curva de calibração proposta por Chandler et al. (1992b). Já na análise do ME o modelo proposto adequou-se melhor a curva de calibração proposta pela ASTM.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO MELHOR AJUSTE DE CALIBRAÇÃO SUGERIDO PARA O PAPEL FILTRO WHATMAN Nº 42

Este capítulo apresenta uma avaliação experimental das calibrações obtidas neste trabalho para o papel filtro Whatman N° 42 através das regressões linear (Equação 3.17) e exponencial (Equação 3.21) considerando os pontos artificiais obtidos a partir das sete funções de calibração previamente apresentadas para os intervalos de sucção definidos pela publicação correspondente e limitado ao intervalo de medida aceitável para a técnica de papel de filtro (i.e., 30-30000 kPa).

Foram comparados os valores de sucção estimados pelo método do papel filtro usando as curvas de calibrações propostas neste trabalho com os valores de sucção correspondentes medidos por outras técnicas experimentais para diferentes tipos de solos. Os dados experimentais de sucção foram obtidos nos trabalhos publicados por Fleureau et al. (2002) (publicados por Bicalho et al. (2009)), Soto (2004) e Haghighi (2011). Avalia-se também neste capítulo o uso de funções publicadas na literatura para definir curvas de retenção solo água (Brooks e Corey, 1966; van Genuchten, 1980; Fredlund e Xing, 1994) como curvas de calibração para o papel filtro do tipo Whatman Nº 42.

4.1 AVALIAÇÃO ENTRE SUCÇÕES ESTIMADAS E SUCÇÕES MEDIDAS POR OUTRAS TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

4.1.1 Intervalo de confiança

As análises comparativas (apresentadas nesta seção) entre sucções medidas experimentalmente por outras técnicas experimentais e sucções estimadas pelo método do papel filtro com diferentes curvas de calibração, utilizam-se da teoria estatística de intervalos de confiança para uma melhor compreensão da confiabilidade da distribuição de valores estimados de sucção.

Nos gráficos apresentados nas seções seguintes, para cada valor de sucção medida por uma técnica experimental formam-se pares com valores de sucção correspondentes às estimações feitas pelo método do papel filtro com específicas curvas de calibração do papel filtro Whatman N° 42. Adicionalmente, é plotada a reta 1:1 do valor de sucção medida. Para cada valor de sucção medida infere-se para o valor de sucção estimada o mesmo valor. Ter-se-ia com essa hipotética resposta das variáveis estimadas o melhor resultado possível de comparação, ou seja, as sucções estimadas seriam iguais às sucções medidas experimentalmente por outras técnicas experimentais. Essa metodologia está detalhada na seção seguinte.

Os dados de calibração apresentados referem-se aos resultados obtidos pela regressão do grupo Global Exponencial (Equação 3.17) ou do grupo Local Exponencial (Equação 3.21) e a

estimação de valores de sucção efetuada pela curva de calibração do papel filtro proposta pela norma ASTM D5298-03.

Finalmente, pode ser observada nos gráficos desta seção a presença de faixas de valores superiores e inferiores à reta 1:1. Esses valores são obtidos através do cálculo de intervalos de confiança de valor previsto para a distribuição apresentada (Ryan, 2011). O texto descritivo apresentado nos parágrafos seguintes é aplicável para todos os cálculos de intervalos de confiança presentes na Dissertação.

A ferramenta estatística apresenta os intervalos de confiança dos dados estimados pelas curvas de calibração (denominada variável resposta) relacionados aos dados de sucção medida (denominada variável de controle) (Bussab e Morettin, 2010). O intervalo de confiança de valor previsto estima um intervalo numérico para um dado nível de confiança α (que é um valor de porcentagem), no qual estará contido um valor previsto da variável de resposta. Assim, dentro dos limites máximo e mínimo construídos, α por cento das variáveis de resposta (sucção estimada) estarão consideradas.

Os limites máximo e mínimo (adição ou subtração do valor IC descrito na Equação 4.1) para o intervalo de confiança da distribuição dos valores estimados de sucção pelos valores medidos experimentalmente foi calculado pela Equação 4.1 (Naghettini e Pinto, 2007):

$$IC = t_{1-\frac{\alpha}{2},n-2} S_{\sqrt{1+\frac{1}{N}+\frac{(x'-\overline{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i-\overline{x})^2}}}$$
4.1

onde, t é o valor do t de Student para (1- $\alpha/2$) e (n-2) graus de liberdade, S é o desvio-padrão dado por $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{N-2}}$, N é o número de amostras, x representa a variável de controle e y os valores da variável resposta.

Como pode ser observado na Equação 4.1, o intervalo de confiança considera o valor da variabilidade das variáveis resposta bem como a variabilidade da variável de controle em relação à seu valor médio. A teoria estatística (Bussab e Morettin, 2010) diz que quanto menor forem os limites do intervalo de confiança melhor é a confiabilidade da distribuição. No caso desta dissertação, o intervalo de confiança mais próximo da reta 1:1 classifica tal distribuição de sucções estimadas mais confiável em relação às análises experimentais.

Para os casos testados, os limites foram somados e subtraídos da reta 1:1 para assim definir um intervalo de confiança que representaria os dados presentes próximos ao melhor caso possível com o nível de confiança de 80% para os presentes testes.
4.1.2 Metodologia de comparação entre dados medidos por outras técnicas experimentais e dados estimados pela curva de calibração proposta no presente trabalho

A Figura 4.1 mostra o detalhamento da metodologia utilizada para a obtenção dos gráficos comparativos exibidos nas seções seguinte deste capítulo de resultados.



Figura 4.1 - Metodologia de comparação entre dados experimentais e dados estimados

Como pode ser observado foram necessárias cinco etapas principais. Inicialmente (Etapa 1) dispõe-se de um gráfico (relacionando umidade gravimétrica do solo e sucção matricial) com medições feitas pela técnica do papel filtro e também de outras técnicas experimentais. A partir desse gráfico selecionam-se os pontos disponíveis de medições feitas com a técnica do papel filtro (Etapa 2). A Etapa 3 refere-se à busca pelos valores correspondentes de umidade do papel filtro a partir dos valores de umidade do solo expostos na Etapa 2. Essa conversão é feita através da curva de calibração adotada pela referência. Por exemplo, o trabalho de Soto (2004) utilizou a calibração de Chandler et al. (1992b). O que está sendo feito no presente trabalho é uma retroanálise.

A Etapa 4 consiste em encontrar no gráfico valores de sucção medidos por outras técnicas experimentais a partir dos mesmos pontos selecionados na Etapa 2. Para tal, uma linha horizontal é traçada no gráfico onde as intersecções com as demais técnicas experimentais fornecerão os valores buscados.

Finalmente a Etapa 5 utilizará a umidade do papel filtro calculada na Etapa 3 para ser substituída na equação de calibração proposta no presente trabalho, denominada Combinado Local Exponencial (CLE). Tem-se então ao fim dessa etapa as sucções estimadas e medidas experimentalmente que podem assim ser comparadas.

4.1.3 Avaliação com dados resultantes da pesquisa de Fleureau et al. (2002) para Areia de Perafita

Fleureau et al. (2002) utilizaram outras técnicas (tensiômetro e medição osmótica) para medir e controlar a sucção em areias siltosas compactadas (formada por intemperismo de granito) não saturadas que tem sido utilizada em estradas no norte de Portugal.

O solo ensaiado, também denominado de Areia de Perafita, possui cerca de 20% de grãos menores do que 80 µm com estrutura em camada similar a partículas de argila e valores de limite de liquidez igual a 32,6% e limite de plasticidade igual a 25%. A Figura 4.2 mostra a distribuição granulométrica das partículas de Areia de Perafita avaliada no trabalho de Fleureau et al. (2002).



Figura 4.2 – Distribuição granulométrica das partículas de Areia de Perafita utilizado por Fleureau et al. (2002) em seus experimentos.

Os resultados da curva de retenção solo água obtidos por Fleureau et al. (2002) para a Areia de Perafita utilizando diferentes técnicas de medição de sucção foram utilizados por Bicalho et al. (2009) para avaliar o uso da técnica do papel filtro para estimar sucções na Areia de Perafita.

Para avaliar as curvas de calibração propostas neste trabalho para o grupo Local, os resultados dos valores de sucções determinados por Fleureau et al. (2002) foram comparados com os valores de sucção estimados através do método do papel filtro usando as equações resultantes das regressões linear e exponencial. O erro residual (cf. Seção 3.1.5) foi calculado a fim de melhor avaliar a concordância entre as curvas propostas neste estudo e os dados experimentais de Fleureau et al. (2002).

A Figura 4.3 apresenta a análise 1:1 das medidas de sucção na Areia de Perafita e dos resultados obtidos pela regressão linear do grupo Local (Equação 3.17). Uma porcentagem de 80% do intervalo de confiança (limites máximos e mínimos) foi calculada para auxiliar o estudo das curvas de calibração avaliadas neste trabalho. Os pontos obtidos pela curva de calibração do papel filtro proposta pela norma ASTM D5298-03 também foram inseridos na Figura 4.3.



Sucçções Medidas [kPa] - Fleureau et al. 2002

Figura 4.3 – Gráfico dos Intervalos de Confiança entre sucções medidas por Fleureau et al. (2002) pelas Técnicas do Tensiômetro e Medição Osmótica e sucções estimadas pela ASTM D 5298 e pelo Combinado Local Linear (Equação 3.17) para a Areia de Perafita.

Observa-se que a equação de calibração proposta pela ASTM D5298-03 teve melhor concordância com as sucções medidas em Areias de Perafita em relação aos valores de sucção estimados pelo Combinado Local Linear. Entretanto, pontos de sucção estimados pela ASTM D5298-03 e pela regressão linear apresentaram pontos fora do limite de intervalo de confiança proposto.

A Figura 4.4 apresenta o erro residual obtido entre sucções medidas (pelas técnicas do Tensiômetro e Medição Osmótica aplicada em Areias de Perafita) e estimadas pela ASTM D5298-03 e pelo Combinado Local Linear (Equação 3.17). O erro residual, calculado para valores de sucção estimados pela ASTM D5298-03, situa-se em sua maioria em torno de zero indicando uma melhor correspondência aos valores de sucção obtidos por Fleureau et al. (2002) quando comparado aos valores de sucção estimados pela Equação 3.17 proposta neste trabalho. Em sucções acima de 300 kPa são observadas maiores dispersões entre as sucções medidas (Fleureau, 2002) e estimadas (combinado Local Linear e ASTM D5298) onde há ocorrência de pontos superestimados de sucção com diferenças de até 550 kPa em termos de erro residual.



Figura 4.4 – Erro Residual calculado entre as sucções estimadas pelo Combinado Local Linear e ASTM e as sucções medidas por Fleureau et al. (2002) através das Técnicas de Tensiômetro e Medição Osmótica para Areia de Perafita.

Os valores numéricos das sucções medidas por Fleureau et al. (2002) através das Técnicas de Tensiômetro e Medição Osmótica em areia de Perafita também foram comparados com os valores estimados por regressão exponencial dado pelo Combinado Local Exponencial (Equação 3.21). A Figura 4.5 mostra o gráfico com os valores de sucção medida experimentalmente e estimada pelas curvas de calibração Local Exponencial e ASTM D5298-03. Observa-se que os valores dados pelo Combinado Local Exponencial estão inseridos dentro do intervalo de confiança calculado e, desta forma, mais próximos às sucções medidas quando comparados aos valores estimados pela equação proposta pela a ASTM D5298-03.

Os valores de sucção apresentados em Fleureau et al. (2002) – entre 100 e 400 kPa – são equivalentes a umidades gravimétricas em torno de 47% que representa o ponto mais comum

de inflexão proposto na literatura incluindo a referência da ASTM D5298-03. A maior discrepância observada para a curva proposta pela ASTM D5298-03 em comparação aos resultados do Combinado Local Exponencial pode ser devido a estarmos analisando essa zona de inflexão na curva de calibração. Esta análise demonstra a coerência de utilizar curvas contínuas em detrimento de "bilineares", pois existe uma dispersão quantitativa dos valores de sucção medidas e experimentais que podem acarretar erros na prática.



Figura 4.5 – Gráfico dos Intervalos de Confiança entre sucções medidas por Fleureau et al. (2002) pelas Técnicas de Tensiômetro e Medição Osmótica e sucções estimadas pela ASTM D 5298 e pelo Combinado Local Exponencial (Equação 3.21) para a Areia de Perafita.

Outra análise foi realizada buscando avaliar quantitativamente a dispersão numérica dos valores de sucção estimados pela Equação 3.21 e pela curva de calibração associada à ASTM D5298-03 quando comparadas às sucções medidas por Fleureau et al. (2002) em Areia de Perafita. Utilizou-se a técnica estatística dos erros residuais e os resultados calculados são apresentados na Figura 4.6.

Pelo gráfico mostrado na Figura 4.6, verificam-se diferenças encontradas entre os valores medidos experimentalmente por Fleureau et al. (2002) e curvas de calibração (Combinado Local Exponencial e ASTM D5298-03). Nesta análise, a maior diferença encontrada, entre sucções medidas e estimadas, é atribuída à equação "bilinear" proposta pela ASTM D5298-03 onde, por exemplo, num ponto dado medido por Fleureau et al. (2002) de aproximadamente

300 kPa obtém-se uma diferença superestimada próxima a 500 kPa em termos de sucção estimada pela equação da ASTM D5298-03.

Para sucções menores houve boa correlação tanto pelo Combinado Local Exponencial (Equação 3.21) quanto pela ASTM D5298-03 quando comparados aos resultados experimentais obtidos por Fleureau et al. (2002).



Sucções medidas (kPa) Fleureau et al. (2002)

Figura 4.6 – Erro Residual calculado entre as sucções estimadas pelo Combinado Local Exponencial e ASTM e as sucções medidas por Fleureau et al. (2002) através das Técnicas de Tensiômetro e Medição Osmótica para Areia de Perafita.

4.1.4 Avaliação com dados resultantes da pesquisa de Soto (2004) para um solo Caulim

Soto (2004) realizou análises experimentais para avaliar várias técnicas usuais de medição ou imposição e controle da sucção a fim de comparar suas funcionalidades bem como os resultados por elas fornecidos. As técnicas experimentais realizadas e inseridas nas comparações do presente trabalho foram a de translação de eixos (TE), a osmótica (MO) e a do tensiômetro de alta capacidade (TAC). Uma apresentação sucinta dessas técnicas pode ser encontrada na seção 2.2.3 e detalhadamente no trabalho de Soto (2004).

Na totalidade de seus ensaios experimentais Soto (2004) utilizou dois tipos de solos em sua pesquisa: um de textura siltosa e outro com textura arenosa sendo o primeiro um tipo de caulim comercial enquanto o que solo arenoso é uma amostra de um solo típico de uma região interior do estado de São Paulo, conformada por sedimentos colúvio-aluvionares de idade Cenozóica. Os ensaios de caracterização e compactação das amostras do solo arenoso apresentaram 31%

areia média, 30% areia fina e 30% argila; limite de liquidez de 26% e de plasticidade 19%. E ainda, apresentou massa específica seca máxima de 1.75g/cm³ com umidade ótima de 16.4% no ensaio Proctor normal. Já para o solo caulim comercial de textura siltosa, os ensaios apresentaram 5% de areia fina, 85% de silte e 10% de argila. Os valores de limite de liquidez e limite de plasticidade são, respectivamente, 25 e 16%.

Os dados do solo Caulim com 95% de grau de compactação foram escolhidos para análise em relação aos demais por possuir ajustes da curva de retenção com valores elevados do coeficiente de correlação e principalmente pelo fato de possuir, na faixa de sucções de aplicação da técnica do papel filtro, um maior número de observações experimentais que permita uma comparação mais refinada. A Figura 4.7 mostra a distribuição granulométrica das partículas do solo Caulim utilizado por Soto (2004) e objeto de análise no presente estudo.



Figura 4.7 - Distribuição granulométrica das partículas do solo Caulim utilizado por Soto (2004) em seus experimentos.

A equação do Combinado Local Exponencial (Equação 3.21) obtida neste estudo foi comparada com as sucções medidas por Soto (2004) obtidos pelas técnicas de translação de eixos (TE), de medição osmótica (MO) e tensiômetro de alta capacidade (TAC), solo Caulim, plotados na configuração 1:1 com a inserção de um intervalo de confiança de 80%.

4.1.4.1 Análise com as sucções medidas pela técnica de Translação de Eixos (TE)

A Figura 4.8 apresenta o resultado comparativo entre a equação Local Exponencial e os dados experimentais obtidos por Soto (2004) para o solo Caulim utilizando o técnica de Translação de Eixos (TE) e dessa análise, observa-se boa concordância entre os pares de sucção (estão próximos à relação 1:1) principalmente para os dados inferiores a 100 kPa. Nesta mesma figura, a curva de calibração proposta pela ASTM foi comparada com os dados de Soto (2004) e mostrou igualmente boa concordância com os dados experimentais com os pares comparativos dentro do intervalo de confiança de 80%. Inclusive, o ponto de maior valor de sucção observado (aproximadamente 400 kPa) no gráfico indica uma melhor concordância para a curva de calibração referente à ASTM D5298-03.



Figura 4.8 - Gráfico dos Intervalos de Confiança entre sucções medidas por Soto (2004) pela Técnica de Translação de Eixos (TE) e sucções estimadas pela ASTM D 5298 e pelo Combinado Local Exponencial (Equação 3.21) para o solo Caulim.

Na Figura 4.9 é apresentado o comparativo entre os erros residuais das sucções estimadas pelo Combinado Local Exponencial e pela calibração proposta pela ASTM D5298-03 em relação as sucções medidas por Soto (2004) pela técnica TE. Observa-se que os valores de sucção do Local Exponencial e da ASTM estão subestimados quando comparados a TE obtida por Soto (2004) para o Caulim e que os pontos do Combinado e da ASTM tendem a ficar mais dispersos dos resultados experimentais de Soto (2004) a medida que a sucção aumenta. Em suma, a avaliação pela técnica TE mostrou uma ligeira melhor concordância para a curva de calibração da ASTM D5298-03.



Sucções medidas [kPa] Soto (2004) TE

Figura 4.9 - Erro Residual calculado entre as sucções estimadas pelo Combinado Local Exponencial e ASTM e as sucções medidas por Soto (2004) através da Técnica de Translação de Eixos (TE) para o solo Caulim.

4.1.4.2 Análise com as sucções medidas pela Medição Osmótica (MO)

A análise entre as sucções medidas pela medição osmótica (MO) e as estimativas das curvas de calibrações (i.e. Combinado Local Exponencial e ASTM D5298-03) estão inseridas na Figura 4.10 que mostra a relação 1:1 entre os valores de sucção e intervalos de confiança. Os pontos da ASTM e do Combinado Local Exponencial apresentam-se todos dentro do limite inferior do intervalo de confiança que não aparece no gráfico devido a disposição dos eixos e das particularidades estatísticas do método.



Sucções medidas pela técnica MO [kPa] por Soto (2004)

Figura 4.10 - Gráfico dos Intervalos de Confiança entre sucções medidas por Soto (2004) pela medição osmótica (MO) e sucções estimadas pela ASTM D 5298 e pelo Combinado Local Exponencial (Equação 3.21) para o solo Caulim.

Na análise de erros, os pontos abaixo da linha do eixo zero indicam a subestimação dos valores de sucção do Combinado e da ASTM D5298-03 em relação aos valores apresentados para a MO. Esse resultado é similar ao observado na análise de erros gerados na TE, entretanto os erros entre as sucções medidas e estimadas são maiores na MO (pontos com diferença de 175 kPa) que na TE (pontos com diferença de 90 kPa). Visualiza-se uma maior dispersão quantitativa nos dados de sucção calculados para ASTM conforme mostra a Figura 4.11. Aqui, uma melhor estimação em torno de 50 kPa (ou seja, cerca de 25% do valor máximo de sucção medido) é observado para a curva de calibração do Combinado Local Exponencial.



Figura 4.11 - Erro Residual calculado entre as sucções estimadas pelo Combinado Local Exponencial e ASTM e as sucções medidas por Soto (2004) através da Medição Osmótica (MO) para o solo Caulim.

4.1.4.3 Análise com as sucções medidas pela Técnica do Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC)

A comparação dos dados experimentais da técnica do Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC) realizados por Soto (2004) com os valores de sucção estimados pelas curvas de calibração é apresentada na Figura 4.12. Tanto os dados da equação do Combinado Local Exponencial quanto os dados da ASTM D5298-03 apresentaram pontos ligeiramente fora do intervalo de 80% de confiança sendo que a calibração ASTM 5298-03 mostrou maior dispersão conforme pode ser analisado na Figura 4.13 que relaciona o erro residual com os valores de sucção medidos pela técnica experimental.

Na análise dos erros, o Combinado Local Exponencial apresentou boa concordância nos resultados comparativos com a TAC, isto é, os pontos de sucção não apresentaram dispersão crescente com o aumento da sucção conforme visto na comparação com as técnicas TE e MO e a maior erro numérico entre a sucção estimada pelo Combinado e a sucção medida pela TAC foi de 70 kPa (cerca de 40% do valor máximo de sucção medido).





Figura 4.12 - Gráfico dos Intervalos de Confiança entre sucções medidas por Soto (2004) pela técnica do Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC) e sucções estimadas pela ASTM D 5298 e pelo Combinado Local Exponencial (Equação 3.21) para o solo Caulim.



Sucções medidas [kPa] Soto (2004) TAC

Figura 4.13 - Erro Residual calculado entre as sucções estimadas pelo Combinado Local Exponencial e ASTM e as sucções medidas por Soto (2004) através da Técnica do Tensiômetro de Alta Capacidade (TAC) para o solo Caulim.

4.1.5 Avaliação com dados resultantes da pesquisa de Haghighi (2011) para Argila caulim

O mesmo tipo de análise comparativa apresentada para os trabalhos experimentais de Fleureau et al. (2002) e Soto (2004) para Areia de Perafita e solo Caulim (textura siltosa), respectivamente, é realizada na presente seção considerando os dados experimentais do trabalho de Haghighi (2011). O solo usado nas análises experimentais do estudo de Haghighi (2011) é uma Argila caulim com:

- Limite de liquidez, 55,0%;
- Limite plástico, 31,4%;
- Gravidade específica, 2,64;
- Fração de silte, 58,0%
- Fração de argila, 42,0%
- Peso unitário seco máximo, 15,58 kN/m³
- Teor de umidade ótima no Proctor padrão, 23,8%

O caulim industrial foi fornecido por Whitfield e Son Ltda., da Inglaterra. O penetrômetro de cone foi utilizado para a obtenção do limite de liquidez. O método do hidrômetro foi utilizado para a determinação da distribuição do tamanho das partículas de argila como pode ser visualizado na Figura 4.14. As amostras de solo foram preparadas através da mistura de água deionizada no solo seco para a obtenção do material homogêneo que foi compactado em uma forma para a obtenção do valor inicial do índice de vazios.



Figura 4.14 - Distribuição granulométrica das partículas de Argila caulim utilizado por Haghighi (2011) em seus experimentos.

A Figura 4.15 mostra a análise comparativa dos valores medidos de sucção pela técnica de Translação de Eixos (TE) realizada por Haghighi (2011) e a estimativa através da curva de calibração do Combinado Local Exponencial e da norma ASTM D5298-03. Similarmente ao que foi apresentado nas comparações prévias (trabalhos de Fleureau et al. (2002) e Soto (2004)), limites máximo e mínimo para o intervalo de confiança de 80% foram plotados simultaneamente no gráfico.



Sucções medidas pela técnica TE [kPa] por Haghighi (2011)

Figura 4.15 - Gráfico dos Intervalos de Confiança entre sucções medidas por Haghighi (2011) pela técnica de Translação de Eixos (TE) e sucções estimadas pela ASTM D 5298 e pelo Combinado Local Exponencial (Equação 3.21) para a Argila caulim.

Um total de cinco pontos experimentais pode ser analisado, os quais foram obtidos experimentalmente por Haghighi (2011) através da implementação da técnica TE. Duas tendências podem ser observadas nesse gráfico. Primeiramente para valores de sucção abaixo de 200 kPa ambas as estimativas (presente trabalho e ASTM D5298-03) tem ótima comparação com a curva 1:1 representando a melhor condição possível de estimação. Nessa curva os valores de sucção estimada foram hipoteticamente equalizados à sucção medida. Um segundo momento no gráfico (os dois pontos acima de 200 kPa) expõe uma divergência nos dados em relação à curva ótima 1:1, principalmente para a estimação feita pela ASTM D5298-03.

Os dados estimados pela curva de calibração do presente trabalho se mantêm, para o intervalo de sucções analisadas, dentro dos limites do intervalo de confiança. Em contrapartida, a curva de calibração da norma ASTM D5298-03 apresenta para o ponto de maior sucção um ponto fora dos limites (superestimação da sucção). A Figura 4.16 complementa a análise apresentada nos últimos parágrafos através da apresentação do erro residual dos dados de sucção estimado em relação aos medidos experimentalmente. A ASTM D5298-03 superestima a sucção com valores de aproximadamente 120 kPa (cerca de 25% do valor máximo de sucção medida experimentalmente) quando comparados a sucção da argila caulim calculada pela TE enquanto as sucções estimadas pelo Combinado Local Exponencial apresentam diferenças em torno de 50 kPa (cerca de 12,5% do valor máximo de sucção medida experimentalmente).



Sucções medidas [kPa] Haghighi (2011) TE

Figura 4.16 - Erro Residual calculado entre as sucções estimadas pelo Combinado Local Exponencial e ASTM e as sucções medidas por Haghighi (2011) através da Técnica de Translação de Eixos (TE) para Argila caulim.

4.1.6 Síntese das avaliações comparativas entre sucções estimadas e medidas por outras técnicas experimentais

A Tabela 4.1 apresenta uma síntese dos resultados obtidos na seção 4.1 que realiza a avaliação entre as sucções estimadas por calibrações e medidas por outras técnicas experimentais. Observa-se uma divergência nos resultados obtidos quando se compara as sucções estimadas com técnicas de medição experimental equivalentes. Assim, por exemplo, Fleureau et al. (2002) e Soto (2004) utilizaram em suas análises experimentais a técnica do Tensiômetro que ao ser comparado com o Combinado Local Exponencial e a calibração proposta pela ASTM 5298-03

apresentaram resultados opostos. Os limites do intervalo de confiança apresentado nas comparações com o trabalho de Fleureau et al. (2002) são maiores que os obtidos nas comparações de Soto (2004) o que indica que este último obteve menor dispersão e consequentemente maior concordância entre sucções estimadas e medias experimentalmente. Além disso, nos gráficos apresentados na comparação com Fleureau et al. (2002), os resultados comparados à norma ASTM 5298-03 estivem fora dos limites do intervalo de confiança.

Outra análise pode ser feita com os resultados da técnica da Translação de Eixos realizada por Soto (2004) e Haghighi (2011). Os resultados obtidos por Soto (2004) foram mais coerentes apresentando menores limites do intervalo de confiança e sem a presença de pontos comparativos foram desses limites como ocorreu nas análises com o trabalho de Haghighi (2011).

Tabela 4.1 – Síntese das avaliações comparativas entre sucções estimadas e medidas por outras técnicas experimentais

ReferênciaSoloTécnicaCombinadoTamanho dos contidosReferênciaSoloexperimentalComparadolimites do ICIC

Fleureau et al. (2002)	Areia de Perafita	Tensiômetro + Medição Osmótica	Local Linear	Amplo	ASTM e CLE
			Local Exponencial	Amplo	ASTM
		Translação de Eixos	Local Exponencial	Estreito	-
Soto (2004)	Caulim	Medição Osmótica	Local Exponencial	Amplo	-
		Tensiômetro de Alta Capacidade	Local Exponencial	Estreito	-
Haghighi (2011)	Argila Caulim	Translação de Eixos	Local Exponencial	Amplo	ASTM

*IC: intervalo de confiança; CLE: Combinado Local Exponencial.

4.2 AVALIAÇÃO COM CURVAS DE RETENÇÃO SOLO ÁGUA MODIFICADAS PARA OS PARÂMETROS DO PAPEL FILTRO WHATMAN N° 42 PUBLICADAS NA LITERATURA

Várias funções foram publicadas na literatura para descrever a curva de retenção da água no solo, por exemplo: Gardner (1958), Brooks e Corey (1966), Brutsaert (1966), van Genutchen (1980), McKee e Bumb (1984) e Fredlund e Xing (1994). Estas equações 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 Brooks e Corey (1966), van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994) são frequentemente utilizadas para descrever a curva de retenção da água no solo. Desta maneira, foi realizada uma adaptação destas equações para o papel filtro Whatman N° 42 de modo a avaliar a curva de retenção da água no papel filtro.

A equação de Brooks e Corey (1966) define uma relação entre a saturação efetiva (S_e) e a sucção (s) e divide a curva de retenção em duas zonas, uma para sucções (s) maiores que os valores de entrada de ar (s_c) e outra para sucções menores que os valores de entrada de ar, tal que:

$$s > s_c$$
: $S_e = (s / s_c)^{-\lambda}$ 4.2

$$s \le s_c$$
: $S_e = 1$ 4.3

onde a saturação efetiva é definida por:

$$S_{e} = \frac{(S - S_{r})}{(1 - S_{r})}$$
 4.4

Sendo *S* o grau de saturação correspondente à sucção *s*, S_r a saturação residual, e λ o parâmetro de ajuste da equação de Brooks e Corey (1966).

A Equação 4.2 pode ser reescrita como:

$$s = s_c \left(\frac{(Gw/e - S_r)}{(1 - S_r)}\right)^{-1/\lambda}$$
4.5

onde *G* é a gravidade específica e *e* é o índice de vazios para o papel filtro Whatman N° 42. Marinho e Gomes (2011) sugerem s_c em torno de 4,95 kPa, *G* igual a 1,8 e índice de vazios igual a 2,6 para o papel filtro Whatman N° 42. Os parâmetros utilizados na análise são $\lambda = 0.33$ e S_r igual a 0.

Fredlund et al. (2012) apresentam em seus trabalhos curvas de retenção da água no papel filtro Whatman N° 42 para medidas de sucção matricial. Essas curvas parametrizadas foram obtidas a partir das curvas de retenção propostas por van Genutchen (1980) e Fredlund e Xing (1994) e são mostradas abaixo, respectivamente:

$$s = 0,051 \left[\left(\frac{248}{w} \right)^{9,615} - 1 \right]^{0,473}$$

$$s = 0,23 \left[e^{\left(\frac{268}{w} \right)^x} - e \right]^{2,101}, x = 0,629$$

$$4.7$$

onde w é o teor de umidade gravimétrica do papel filtro.

A Figura 4.17 apresenta as curvas de retenção de Brooks e Corey (1966), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) com os parâmetros do papel filtro Whatman N° 42. Foi incluída nesta

figura o Combinado Local Exponencial que representa o melhor ajuste encontrado entre as principais funções sugeridas na literatura, i.e., Clandler et al. (1992b), Leong et al. (2002) e ASTM D5298-03, para a curva de calibração do papel filtro Whatman Nº 42.



Figura 4.17 – Curvas de retenção da água propostas na literatura Brooks e Corey (1966), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) parametrizadas para o papel filtro Whatman N° 42 e apresentadas com o Combinado Local Exponencial.

De forma geral, as quatro equações plotadas possuem a mesma tendência de variação de sucção com a umidade gravimétrica do papel filtro. O Combinado Local Exponencial apresentou boa (e melhor, comparada às outras curvas) correlação com a curva de retenção de Brooks e Corey (1966) e, para sucções menores que 1000 kPa, mostrou concordância com os resultados de Fredlund e Xing (1994).

Para melhor avaliar a dispersão entre os dados, foi calculado o erro residual entre os valores de Log (sucção) das curvas de retenção propostas na literatura em relação ao Combinado Local Exponencial. O resultado desta análise é apresentado na Figura 4.18.



Figura 4.18 – Erro residual entre os valores de Log (sucção) das curvas de retenção propostas na literatura: Brooks e Corey (1966), van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) parametrizadas para o papel filtro Whatman N° 42 em relação ao Combinado Local Exponencial.

As curvas de retenção propostas na literatura, quando aplicadas ao papel filtro Whatman N° 42, concordam entre si para sucções superiores a 1000 kPa (umidades gravimétricas inferiores a 30%). Em sucções menores há uma clara dispersão observada na curva de retenção proposta por Fredlund e Xing (1994).

Esse resultado pode ser atribuído à condição particular incorporada na equação de Fredlund e Xing (1994) onde em baixas umidades gravimétricas pesquisas sugerem razoável relação linear-horizontal entre sucção e umidade (numa escala semi-logarítmica). Maiores detalhes sobre este estudo é encontrado em Fredlund e Xing (1994).

Recomenda-se cautela ao utilizar as curvas de retenção solo água publicadas na literatura que foram propostas originalmente para a trajetória de secagem como curvas de calibração para o papel filtro que seguem a trajetória de umedecimento. Além disto, fatores observados nas curvas de retenção solo água, por exemplo saturação residual, não deve ser incluído em uma curva de calibração para uma técnica experimental (MPF) que tem limitado o intervalo de medida aceitável, ou seja, entre 30 k kPa e 30000 kPa.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo mostrar a importância do uso adequado das curvas de calibração para o método do papel filtro (MPF), com contato direto entre o papel filtro e a amostra de solo não saturado, proposto para estimar sucção matricial em solos não saturados. Para tanto foi discutido e quantificado a variabilidade observada nas principais calibrações sugeridas na literatura para o MPF com contato. Fredlund e Rahardjo (1993) observam que o papel filtro do tipo Whatman 42 é o que apresenta menor variação entre as diferentes calibrações publicadas na literatura. Além disto, o papel filtro Whatman Nº 42 é mais apropriado para o uso no MPF por ser mais espesso e por apresentar um tamanho de poro pequeno (Chandler e Gutierrez, 1986). Assim, neste trabalho foram avaliadas as curvas de calibrações propostas na literatura para este tipo de papel filtro.

As funções de calibração (trajetória de umedecimento) para o papel filtro do tipo Whatman N° 42 avaliadas neste estudo foram: Fawcett e Collis-George (1967), Hamblin (1981), Chandler e Gutierrez (1986), Crilly e Chandler (1993), Chandler et al. (1992b), Leong et al. (2002) e ASTM D5298-03. Considerável variabilidade é observada entre as equações propostas por Chandler et al. (1992), ASTM D5298-03 e Leong et al. (2002), e as equações propostas por Fawcett e Collis-George (1967), Hamblin (1981) e Chandler e Gutierrez (1986), que parecem superestimar os valores da sucção matricial.

Assim, neste trabalho, as curvas de calibração foram separadas em dois grupos, denominados de Global e Local. O grupo Global reúne todas as sete equações avaliadas neste trabalho e o grupo Local seleciona as equações mais citadas e portanto mais utilizadas para uso do MPF e com menor variabilidade (ou seja: Chandler et al., 1992b; ASTM D5298-03 e Leong et al., 2002). Para cada grupo foram definidas duas novas calibrações para o papel filtro Whatman N° 42, ou seja duas através das regressões lineares (Combinado Global Linear (Equação 3.16) e Combinado Local Linear (Equação 3.17)) e duas através da regressão exponencial (Combinado Global Exponencial (Equação 3.20) e Combinado Local Exponencial (Equação 3.21)) considerando os pontos artificiais obtidos a partir das funções de calibração previamente selecionadas em cada grupo para os intervalos de sucção definidos pela publicação correspondente e limitado ao intervalo de medida aceitável para a técnica de papel de filtro (ou seja entre 30 k kPa e 30000 kPa).

Análises estatísticas (erro residual, cálculo do coeficiente de determinação – R^2 , raiz quadrada do erro médio – RSME e erro médio – ME) foram aplicadas separadamente aos dois grupos implicando um tipo de regressão linear e um tipo de regressão exponencial para ambos os grupos para avaliar a dispersão entre as novas equações e as calibrações publicadas. Dessas análises, os seguintes aspectos foram constatados:

- Os Combinados Linear (Equação 3.17) e Exponencial (Equação 3.21) ajustadas para o grupo Local apresentaram os menores intervalos de erros residuais o que indica que os valores de sucção apresentados estiveram mais próximos aos pontos artificiais que os deram origem e, adicionalmente, foram realizados teste de normalidade de Shapiro Wilk nos erros residuais dos Combinados. Os resultados mostraram que os erros residuais referentes ao Local Linear (Equação 3.17) e ao Local Exponencial (Equação 3.21) apresentaram distribuição aproximadamente normal indicando que essas equações ajustadas são bons resultados de regressão.
- O coeficiente de determinação (R²) calculado para os ajustes realizados neste trabalho foram mais próximos a 1 nos Combinados Exponenciais (Equação 3.20 e 3.21) e este resultado indica que as curvas exponenciais ajustadas representam melhor a relação Log (sucção) x umidade gravimétrica do papel filtro gerados a partir das curvas bilineares de referência (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Crilly e Chandler, 1993; Chandler et al., 1992b; Leong et al., 2002 e ASTM D5298-03).
- A raiz quadrada do erro médio (RSME), que quantifica a dispersão dos valores das curvas de calibração da literatura e dos Combinados em torno da linha 1:1, apresentou valores mais satisfatórios (mais próximos a zero) nas equações Exponenciais (Equação 3.20 e 3.21);
- O erro médio (ME), que indica a exatidão com que os Combinados foram estimados, também apresentou resultados melhores nas equações Exponenciais (Equação 3.20 e 3.21), pois este esteve mais próximo a zero que na análise das equações Lineares (Equação 3.16 e 3.17).

Desta forma, os resultados das avaliações estatísticas mostram que a regressão exponencial do Combinado Local teve melhor concordância com as curvas de calibração publicadas na literatura. A curva bilinear proposta neste trabalho (Equação 3.18 e 3.19) para umidades gravimétricas acima e abaixo de 47% apresentou grande dispersão quantitativa em termos de sucção no ponto de inflexão adotado.

No intuito de comparar os valores de sucções medidas por outras técnicas experimentais, para diferentes tipos de solos, com os valores de sucções estimados para MPF, usando os Combinados propostos neste trabalho que obtiveram melhores resultados pelas análises estatísticas (isto é, Combinado Local Linear e principalmente o Combinado Local Exponencial), foi verificada a aplicabilidade dessas equações com os resultados de obtidos pelos trabalhos de Fleureau et al. (2002), Soto (2004) e Haghighi (2011).

Ao ser comparado com dados experimentais medidos por Fleureau et al. (2002) em Areias de Perafita, o modelo exponencial ajustado para o grupo Local (Equação 3.21) obteve melhor concordância em relação a curva calibração do papel filtro proposta pela norma ASTM D5298-03. Além disso, observou-se que a dispersão numérica entre os dados medidos por Fleureau et

al. (2002) e os dados estimados da norma ASTM D5298-03 pode ser atribuída a inflexão na curva "bilinear", pois nos pontos de transição entre uma equação e outra ocorre grande dispersão numérica dos valores de sucção. A ocorrência deste fato pode superestimar ou subestimar os cálculos que necessitam da sucção do solo em aplicações de engenharia.

Ao comparar as sucções estimadas pelo Combinado Local Exponencial (Equação 3.21), ASTM D5298-03 e os dados experimentais obtidos por Soto (2004) utilizando a técnica de translação de eixos (TE), a osmótica (MO) e a do tensiômetro de alta capacidade (TAC) para medir sucções solo Caulim, foi observado que em todas as análises os valores de sucções estimados são menores em relação às sucções medidas por TE, MO e TAC alcançando diferenças de até 150 kPa principalmente em sucções medidas por TE, MO e TAC acima de 300 kPa.

Os dados de sucções medidas por Haghighi (2011) para Argilas caulim utilizando a técnica de Translação de Eixos (TE) foram comparados com o Combinado Local Exponencial (Equação 3.21) e com a ASTM D5298-03. Foi observado um comportamento similar as discussões obtidas em Fleureau et al. (2002) onde as sucções estimadas (pelo Combinado Local Exponencial e ASTM D5298-03) apresentaram maiores dispersões das sucções medidas a partir de sucções acima de 200 kPa avaliadas experimentalmente por Haghighi (2011).

Curvas de retenção de solo água publicadas (Brooks e Corey, 1966; van Genuchten, 1980; Fredlund e Xing, 1994) foram parametrizadas para o papel filtro Whatman Nº 42 e os resultados foram plotados com a curva exponencial ajustada para o grupo Local (Combinado Local Exponencial). Desta análise, foi verificado que todas as funções concordam entre si para sucções inferiores a 1000 kPa que correspondem a umidades gravimétricas superiores a 30%. Não é verificada a dispersão entre os valores de sucção entre as umidades próximas a 47%, entretanto recomenda-se cautela ao utilizar as curvas de retenção solo água publicadas na literatura propostas para a trajetória de secagem como curvas de calibração para o papel filtro que seguem a trajetória de umedecimento. Além disto, fatores observados nas curvas de retenção solo água como por exemplo saturação residual não deve ser incluído em uma curva de calibração para uma técnica experimental (MPF) que tem limitado o intervalo de medida aceitável, ou seja, entre 30 k kPa e 30000 kPa.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para trabalhos futuros é sugerido:

 Aprimorar o uso do melhor ajuste encontrado para as curvas de calibração avaliadas (Combinado Local Exponencial) através da verificação da comparação dos resultados com outras técnicas experimentais de medição ou controle da sucção. No presente estudo foram avaliadas três técnicas experimentais: medição osmótica, translação de eixos e tensiômetro. Assim, outras técnicas que possuem intervalos de sucção similares ao do papel filtro, como condutividade elétrica ou térmica, coluna de solo e centrífuga, podem ampliar a gama de validação do ajuste proposto;

- A curva de calibração proposta no presente trabalho foi comparada a resultados experimentais utilizando três tipos diferentes de solo. Estima-se a avaliação com solos diferentes aumentando a gama de comparação e de consequente validação;
- A curva de calibração proposta refere-se ao caminho do umedecimento. Propõe-se estudar uma nova curva de calibração para o caminho da secagem, comparando com técnicas experimentais apropriadas;
- Avaliar a inserção do parâmetro temperatura, importante na técnica do papel filtro, como parte integrante da curva de calibração proposta a partir de ensaios experimentais específicos para esse fim presentes na literatura;
- Realizar a aplicação das curvas de calibração bilineares propostas na literatura (Fawcett e Collis-George, 1967; Hamblin, 1981; Chandler e Gutierrez, 1986; Chandler et al., 1992b; Crilly e Chandler, 1993; Leong et al., 2002; ASTM D5298-03) comparativamente ao melhor ajuste de curva de calibração proposto no presente trabalho (Combinado Local Exponencial) em softwares de simulação (GeoStudio desenvolvido por GEOSLOPE International Ltd., por exemplo) para solucionar problemas práticos de engenharia geotécnica. O principal objetivo desse tipo de avaliação é verificar os impactos na prática da escolha entre uma curva ou outra. As curvas de calibração fornecerão dados de sucção no solo analisado. Pretende-se avaliar: a variação volumétrica, resistência ao cisalhamento e condutividade hidráulica de solos não saturados nesses ensaios numéricos.

6 REFERÊNCIAS

AGUS S. An experimental study on hydro-mechanical characteristics of compacted bentonite-sand mixtures. Tese de doutorado, Bauhaus-Univ., Weimar, Alemanha, 2005.

AITCHISON, G. D., Moisture Equilibrium and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas. Statement of the Review Panel, Engineering Concepts of Moisture Equilibrium and Moisture Changes in Soils, Butterworths, London. 1965.

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

ASTM Standard D5298-03. **Standard Test Method for Measurement of Soil Potential** (**Suction**) **Using Filter Paper.** Annual Book of ASTM Standards, Soil and Rock (I), v. 4, n. 8, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

BAKER R., FRYDMAN S., Unsaturated soil mechanics - Critical review of physical foundations. Engineering Geology, v. 106, p. 26-39, 2009.

BARDEN, L; MADEDOR, A. O.; SIDES, G. R., Volume Change Characteristics of Unsaturated Clay.ASCE J. Soil Mech. Found. Div., v. 95, SM1, p. 33-52, 1969.

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 Conferenceon Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009.

BIOT, M. A. General Theory of Three – Dimensional Consolidation.J. Appl. Phys., v. 12, p. 28, 1941.

BISHOP, A. W. The Principle of Effective Stress. TecniskUkeblad, v. 106, n. 39, p. 859-863, 1959.

BISHOP, A. W.; BLIGTH, G. E.Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Unsaturated Soils. Geotechnique, v. 13, n. 3, p. 177-197, 1963.

BISHOP, A. W.; ELDIN, K. G. Undrained Triaxial Tests on Saturated Sands and Their Significance in the General Theory of Shear Strength. Geotechnique, v. 2, p. 13-32, 1950.

BOCKING K., FREDLUND D. Limitations of the axis translation technique. Proc. 4th Int. Conf. Expansive Soils, p. 117-135, 1980.

BOLT G. **Soil physics terminology.** International society of soil science, bulletin 49, p. 16-22, 1976.

BRACKLEY, I. J. A. **Partial Collapse in Unsaturated Expansive Clay.** 5th Reg. Conf. Soil Mech. Found. Eng., South Africa, p. 23-30, 1971.

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

BRUTSAERT. Probability laws for pore size distribution. Soil Sci., v. 101, p. 85-92, 1966.

BUCKINGHAM E. **Studies on the movements of soil moisture.** United States Division of Agriculture. Bureau of soils, v. 38, Washington, DC, USA.

BULUT, R.; LEONG, E. C. Indirect Measurement of Suction. GeotechGeolEng, 2008.

BURLAND, J. **Some Aspects of the Mechanical Behaviour of Partly Saturated Soils**. Proc. Conf. on Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soil Beneath Covered Areas (ed. Aitchison, G.D.), London: Butterworths, p. 270-278 1965.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTOGOMERY-SMITH, G.A low-coast method of assessing clay desiccation for low-rise buildings.Proc. Instn. Civ. Engng, 1992.

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

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.

DELAGE, P. **Experimental unsaturates soil mechanics.** Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, UNSAT' 2002, Recife, Brasil, 2002.

DELAGE P., MARCIAL D., CUI Y. J., RUIZ X. Ageing effects in a compacted bentonite: a microstructure approach, Géotechnique 56(5), 291 – 304, 2006.

EDLEFSEN N., ANDERSON A. Thermodynamics of soil moisture. Hilgardia, v. 15, p. 31-298, 1943.

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, CSIRO Publishing, Collingwood, Australia, v. 7, n. 25, p. 162-167, 1967.

FISHER R., On the capillary forces in an ideal soil; correction of formulae given by Haines. Journal Agric. Science, v. 16, p. 492-505, 1926.

FLEUREAU, J. M.; HADJWARDOYO, S.; DUFOUR-LARIDAN, E.; LANGLOIS, V; GOMES CORREIA, A. Influence of suction on the dynamic properties of a silty sand. Unsaturated Soils, 2002

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. 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.

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

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.

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.

GONÇALVES, F. Estudo das curvas de retenção e condutividade hidráulica estimadas pela equação de Van Genuch

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

HAGHIGHI A., MEDERO G., MARINHO F., MERCIER B., WOODWARD P. **Temperature** effects on suction measurements using the filter paper technique. Geotechnical testing journal, v. 35, 2011.

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

HILF J. An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. Tech. Memo. Bureau of reclamation, design and construction. 1956.

HILLEL D. Environmental soil physics. Academic press, San Diego, California, 1998.

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.

JENNINGS, J. E. A Revised Effective Stress Law for Use in the Prediction of the behavior of Unsaturated Soils. In pore Pressure and Suction in Soils, conf. organized by British Nat. Soc. of Int. Soc. Soil Mech. Found. Eng. At the Inst. of Civil Eng. London, p. 26-30, 1961.

JENNINGS J., BURLAND J., Limitation to the use of effective stress in partly saturated soils. Géotechnique, v. 12, p. 125-144.

LAUGHTON, A. S. The Compaction of Ocean Sediments.Ph.D. dissertation, Univ. of Cambridge, Cambridge, England, 1955.

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

LEONG, E., 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.

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

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.

MARINHO F., GOMES J. The effect of contact on the filter paper method for measuring soil suction. Geotechnical testing journal, v. 35, 2011.

MASROURI, F.; BICALHO, K.; KAWAI K.. Laboratory hydraulic testing in unsaturated soils. Geotechnical and Geological Engineering. 2005

MCKEE C., BUMB A. The importance of unsaturated flow parameters in designing a hazardous waste site. Haardous Waste and Environmental Emergencies, p. 50-58, 1984.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Semiárido**. Relatório final, 2005, acesso em 31/10/10.

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.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MUÑOZ J., PEREIRA J., DELAGE P., CUI Y., Suction measurements on a natural unsaturated soil: a reappraisal of the filter paper method. Unsaturated soil procedures - Fifth Int. Conf. on Unsaturated Soils, Barcelona, 2010.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 561 p.

OLCHITZKY E. Couplage hydromécanique et permeabilité d'une argile gonflante non saurée sous sollicitations hydriques et thermiques. Courbe de sorption et permeabilité à l'eau. Tese de doutorado - École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2002.

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

RAINWATER N., MCDOWELL L., DRUNUM E. Measurement f total soil suction using filter paper: investigation of common filter papers, alternative media and corresponding confidence. Geotechnical testing journal, v. 35, 2011.

RENDULIC, L. Relation between Void Ratio and Effective Principal Stress for a RemouldedSilty Clay. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Chambridge, v. 3, p. 48-51, 1936.

RICHARDS B. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. Soil Sci., v. 51, p. 377-386, 1941.

RICHARDS, B. The Significance of Moisture Flow and Equilibria in Unsaturated Sois in Relation to the Design of Engineering Structures Built on Shallow Foundations in Australia. Presented at the Symp. On Permeability and Capillary, Amer. Soc. Testing Materials, Atlantic City, 1966.

RIDLER, 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.

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.

RYAN, T. Estatística moderna para engenharia. 2ª edição, Montgomery, 2011.

ROMERO E., GENS A., LLORET A. **Temperature effects on the hydraulic behavour of an unsaturated clay.** Geotech. Geol. Eng., v. 19, p. 311-332, 2001.

SHENG D., GENS A., FREDLUND D., SLOAN S., Unsaturated soils: from constitutive modelling to numerical algorithms. Computers and Geotechnics, v. 35, p. 810-824, 2008.

SHENG D., **Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour.** Computers and Geotechnics, v. 38, p. 757-776, 2011.

SKEMPTON, A. W. The Pore Pressure Coefficients, A and B. Geotechnique, v.4, n. 4, p. 143-147, 1954.

SMITH, G. N.; SMITH, I. G. N. Elements de soils mechanics. 7th ed. London Ed.Blackwell science, p. 494, 1998.

SREEDEEP S., SINGH D., ASCE F., **Critical review of the methodologies employed for soil suction measurement.** International Journal of Geomechanics. v. 11, p. 99-104, 2011.

SOTO A., **Comparação entre métodos de imposição de controle de sucção em ensaios com solos não saturados.** Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 2004.

TANG A., CUI Y. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 cay. Can. Geotech. J., v.42, p. 287-296, 2005.

TERZAGHI, K. **The Shear Resistance of Saturated Soils.** 1stInt. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Cambridge, v. 1, p. 54-57, 1936.

TOLL D., LOURENÇO, S., MENDES J. Advances in suction measurements using high suction tensiometers. Engineering Geology, 2012.

UCHAIPICHAT A., KHALILI N. Experimental investigation of Thermo-Hydro-Mechanical behavior of an unsaturated silt. Géotechnique, v. 59, p. 339-353, 2009.

WHEELER, S., KARUBE, D. **State of the art report. Constitutive modeling.** In Proceedings 1st International Conference on Unsaturated Soils, Paris, p. 1323-1356, 1995.

VAN GENUCHTEN M. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci., v. 44, p. 892-898, 1980.

VILLAR M., LLORET A., Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite. Appl. Clay Sci., v. 26, p. 337-350, 2004.

VIVACQUA, G., **Estudo da influência da interação solo-atmosfera nos perfis de umidade, sucção e temperatura de um subsolo não saturado.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.

VIVIAN, J. B. Utilização do método do papel filtro para a determinação das curvas características de um soloscoluvionar não saturado com óleo diesel. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRS, Porto Alegre, 2008.

ZHAN, L. Field and laboratory study of an unsaturated expansive soil associated with rain-induced slope instability. PhD Thesis, Hong Kong University of Science and Technology, 2003.

ZHOU A., SHENG D., SLOAN S., GENS A., Inerpretation of unsaturated soil behaviour in the stress - Saturation space, I: Volume change and water retention behaviour. Computers and Geotechnics, v. 43, p. 178-187, 2012.