

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO DO
COMPORTAMENTO DE BARREIRA CAPILAR
COM UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE
GEOTÊXTEIS**

RAUL FERNANDO POLISSENI GRAÇA

Belo Horizonte

2018

RAUL FERNANDO POLISSENI GRAÇA

**AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO DO
COMPORTAMENTO DE BARREIRA CAPILAR COM
UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE
GEOTÊXTEIS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de mestre em geotecnia.

Orientadora: Prof. Dra. Maria das Graças Gardoni Almeida

Coorientador: Prof. Dr. Lúcio Flávio de Souza Villar

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2018

G729a

Graça, Raul Fernando Polisseni.

Avaliação em laboratório do comportamento de barreira capilar com utilização de diferentes tipos de geotêxteis [manuscrito] / Raul Fernando Polisseni Graça. - 2018.

xxiv, 173 f., enc.: il.

Orientadora: Maria das Graças Gardoni Almeida.

Coorientador: Lúcio Flávio de Souza Villar.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 163-173.

1. Mecânica do solo - Teses. 2. Barreira capilar - Teses. 3. Geotêxteis - Teses. 4. Sucção - Teses. I. Gardoni, Maria das Graças A. II. Villar, Lúcio Flávio de Souza. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624.13(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

**AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO DO COMPORTAMENTO DE
BARREIRA CAPILAR COM UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS
DE GEOTÊXTEIS**

RAUL FERNANDO POLISSENI GRAÇA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração GEOTECNIA.

Aprovada em 08 de agosto de 2018, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Maria das Graças Gardoni Almeida - Orientadora
UFMG


Prof. Ennio Marques Palmeira
UNB


Prof. Karla Cristina Araujo Pimentel Maia
UFMG


Prof. Lucio Flavio de Souza Villar
UFMG

Belo Horizonte, 8 de agosto de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Maria das Graças Gardoni de Almeida, Lúcio Flávio de SouzaVillar, aos professores, colegas e funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia Escola de Engenharia da UFMG, que, cada um ao seu modo contribuiu para a conclusão deste trabalho.

Agradeço a minha esposa Juliana Müller Campos, por todo carinho, dedicação e apoio durante a minha jornada.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	XVII
RESUMO.....	XXIII
ABSTRACT.....	XXIV
1. INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	26
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	26
2. CONTEXTUALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 A ÁGUA E O SOLO NÃO SATURADO.....	27
2.1.1 <i>Sucção</i>	30
2.1.1.1 <i>Sucção matricial</i>	31
2.1.1.2 <i>Sucção osmótica</i>	32
2.1.2 <i>Capilaridade</i>	32
2.1.3 <i>Histerese</i>	35
2.1.4 <i>Cavitação</i>	36
2.1.5 <i>Quantidade de Água</i>	37
2.2 GEOSINTÉTICOS	39
2.2.1 <i>Geotêxtil – Custo, Disponibilidade e Especificação</i>	41
2.2.2 <i>Propriedade hidráulica dos GTNs</i>	42
2.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA EM MEIO POROSO (CCRA)	46
2.3.1 <i>Relação Água e CCRA</i>	47
2.3.2 <i>CCRA e suas Representações</i>	48

2.3.3 CCRA Zoneamentos, Parâmetros e Formatos	50
2.3.4 Fatores que Influenciam na Retenção de Água	54
2.3.5 Equações para as CCRA's	55
2.3.6 Equação de Fredlund e Xing (1994) para ajuste da CCRA	58
2.4 COBERTURA DE DISPOSIÇÃO FINAL	63
2.5 MÉTODOS, APARELHAGENS COMUNS PARA MENSURAÇÃO DE SUCCÃO E DETERMINAÇÃO DA CCRA	71
3. MATERIAIS E MÉTODOS	88
3.1 MATERIAIS CONSTITUINTES DA BARREIRA CAPILAR.....	88
3.1.1 Solo Residual.....	88
3.1.2 Geotêxtil.....	95
3.2 Instrumentação do Ensaio de Coluna de Umedecimento e Secagem	97
3.4 METODOLOGIAS USADAS PARA MONTAGEM DOS ENSAIOS	102
3.4.1 Metodologia do Ensaio de Coluna de Umedecimento e Secagem	102
3.4.2 Coluna Suspensa	106
3.4.3 Papel Filtro para determinação da curva de retenção de água do solo.....	108
3.4.4 Metodologia de Ajuste da CCRA e da Função – k	113
4. RESULTADOS.....	114
4.1 CCRAS DO GTA, DO GTB E DO SOLO RESIDUAL DE SABARÁ PELA COLUNA SUSPensa E PAPEL FILTRO	114
4.2 FUNÇÃO CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA PARA O GTA, O GTB E O SOLO RESIDUAL DE SABARÁ	119
4.3 COLUNA DE UMEDECIMENTO E SECAGEM, TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICO POR TEMPO	122
4.4 SUCCÃO MATRICIAL AO LONGO DO TEMPO NOS CICLOS DE SECAGEM E UMEDECIMENTO	131
4.5 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO TEMPO NA COLUNA DE UMEDECIMENTO E SECAGEM.....	137
4.6 VARIAÇÕES DO TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICO POR SUCCÃO MATRICIAL NOS ENSAIOS DE COLUNA DE UMEDECIMENTO E SECAGEM.....	140

5. DISCUSSÃO.....	156
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.	161
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	163

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Domínio da condição solo saturado e solo não saturado e suas fases (Fredlund, 1996 adaptado).....	28
Figura 2 – Ângulo da água com a superfície quando a adesão supera a coesão (Farias, 2012).....	33
Figura 3 – Ângulo da água com a superfície quando a coesão supera a adesão (Farias, 2012).....	33
Figura 4 – Representação do fenômeno capilaridade considerando o vazio do solo como um tubo (Faria, 2012).....	34
Figura 5 – O efeito pote de tinta para a trajetória de secagem e de umedecimento (Hillel, 1998).....	36
Figura 6 – GTNs diversos (Gardoni, notas de aula 2016).....	40
Figura 7 – Curva característica de retenção da água em grau de saturação em escala linear por sucção em escala logarítmica (Gitirana Jr. <i>et al.</i> , 2015).....	48
Figura 8 – Curva característica de retenção da água em teor de umidade volumétrico em escala linear e sucção em escala logarítmica (Gitirana Jr. <i>et al.</i> , 2015).....	49
Figura 9 – Curva característica de retenção da água em grau de saturação em escala linear e sucção em escala linear (Gitirana Jr. <i>et al.</i> , 2015).....	49
Figura 10 – Curva característica de retenção da água em grau de saturação efetiva em escala linear e sucção em escala logarítmica (Gitirana Jr. <i>et al.</i> , 2015).....	50
Figura 11 – Zoneamento e parâmetros em uma CCRA de representação semi-logarítmica de grau de saturação por sucção. (Gitirana Jr. <i>et al.</i> , 2015).....	51
Figura 12 – CCRA para argila, silte e areia (Fredlund e Xing, 1994 adaptado).	52
Figura 13 – Curva de desorção (trajetória de secagem) e curva de adsorção (trajetória de umedecimento), (Fredlund e Xing, 1994).	53

Figura 14 – Elementos gráficos utilizados na determinação dos parâmetros a, m e n. (Fredlund e Xing, 1994 adaptado).....	61
Figura 15 – a) Comportamento da cobertura resistiva. b) Comportamento da cobertura ET (Zornberg <i>et al.</i>, 2010 adaptado).....	65
Figura 16 – a) Cobertura monolítica. b) Barreira capilar. c) Barreira anisotrópica (Zornberg; McCartney, 2007 adaptado).	66
Figura 17 – Função condutividade hidráulica dos geomateriais e a sucção crítica entre eles (Zornberg; McCartney, 2007 adaptado).	70
Figura 18 – (a) Sensor de matriz granular. (b) <i>Datalogger Watermark Monitor 900M</i> (Marinho <i>et al.</i>, 2015).	75
Figura 19 – Elementos de um tensiômetro (Marinho, 1997).	76
Figura 20 – Representação esquemática do ensaio de coluna suspensa (Marinho <i>et al.</i>, 2015).....	78
Figura 21 – Esquema do aparato de ensaio de coluna suspensa, ASTM D 6836 (2002). .	81
Figura 22 – Ensaio de coluna suspensa modificado para geotêxteis não tecido (Stormont <i>et al.</i>, 1997 adaptado).....	82
Figura 23 – Técnica do papel filtro sem contato (sucção total) e com contato (sucção matricial) (Marinho <i>et al.</i>, 2015).....	83
Figura 24 – Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.	88
Figura 25 – Vista de satélite da região de amostragem do solo residual (Google Earth Pro, 2018).....	89
Figura 26 – Solo residual de rocha granito-gnáissica do complexo Belo Horizonte <i>in situ</i>.	89
Figura 27 – O Cráton do São Francisco, (modificado de Alkmim <i>et al.</i> 1996).	90
Figura 28 – O quadrilátero ferrífero (Renger <i>et al.</i>, 1994).	91

Figura 29 – Apresentação da geologia da região de amostragem do solo residual (modificado de CPRM, 2008 - mapa geológico 1:100.000 – Folha de Belo Horizonte)...	92
Figura 30 – Curva granulométrica do solo residual de Sabará com uso de defloculante hexametáfosfato de sódio 45,7 g do sal por 1000 cm³ de água.	93
Figura 31 – Curva de compactação do solo residual de Sabará, energia de compactação Proctor normal.....	95
Figura 32 – Amostragem na manta de geotêxtil não tecido para a realização dos ensaios de gramatura e espessura.....	96
Figura 33 – Sensor de umidade EC-5 (<i>Decagon devices</i>, 2016).....	98
Figura 34 – Aferição da calibração do sensor de umidade EC-5 com incidência de luz halógena.....	99
Figura 35 – <i>Datalogger Em5b</i> (<i>Decagon devices</i>, 2014).....	99
Figura 36 – Sensor de temperatura 200TS, modelo da Irrometer compatível com o Watermark Monitor 900M e o momento da aferição de sua calibração.....	102
Figura 37 – Coluna de umedecimento e secagem, suas etapas construtivas e trajetórias. a) Colocação do pedrisco; b) Colocação do GTN; c) Solo compactado e escarificado e a inserção do sensor EC-5; d) Colocação da camada de topo de brita zero; e) Ensaio em trajetória de umedecimento e f) Ensaio em trajetória de secagem em detalhe o posicionamento das lâmpadas halógenas.	104
Figura 38 – Esquerda, preparo da lama de solo para inserção dos sensores. Direita, vista frontal da coluna de umedecimento e secagem detalhando a disposição dos locais de inserção dos sensores e o orifício drenante.....	104
Figura 39 – A cima modelos da composição da barreira capilar no ensaio de coluna de umedecimento e secagem. A baixo modelo geral.....	106
Figura 40 – Ensaio de coluna suspensa montado no LabGeo.	107

Figura 41 – Ensaio da coluna suspensa, no detalhe o sobre peso e uma placa crivada amarela e placa crivada vermelha sobre o GTB.....	108
Figura 42 – Preparação do ensaio do papel filtro. a) Anéis metálicos. b) Compactação estática. c) Corpos de prova prontos.....	109
Figura 43 – À esquerda, saturação dos corpos de prova segundo duas frentes. À direita, ensaio na etapa de equalização do solo com o papel filtro envoltos por papel filme e papel alumínio.....	111
Figura 44 – Determinação gráfica dos parâmetros de ajuste da CCRA do GTA empregando o método de Fredlund e Xing (1994).....	115
Figura 45 – Determinação gráfica dos parâmetros de ajuste da CCRA do GTB pelo método de Fredlund e Xing (1994).....	115
Figura 46 – CCRA ajustada do GTA pelo método de Fredlund e Xing (1994).....	116
Figura 47 – CCRA ajustada do GTB pelo método de Fredlund e Xing (1994).....	116
Figura 48 – Determinação gráfica dos parâmetros de ajuste da CCRA do solo residual de Sabará empregando o método de Fredlund e Xing (1994).	118
Figura 49 – CCRA do solo residual ajustada pelo modelo de Fredlund & Xing (1994).118	
Figura 50 – Função condutividade hidráulica do solo residual de Sabará, do GTA e do GTB, trajetória de secagem.	121
Figura 51 – Função condutividade hidráulica do solo residual de Sabará, do GTA e do GTB, trajetória de umedecimento.	121
Figura 52 – Variação do teor de umidade volumétrico em relação ao tempo para topo, meio e base da camada capilar, em coluna de infiltração associada ao GTA.	123
Figura 53 – Variação do teor de umidade volumétrico em relação ao tempo para topo, meio e base da camada capilar, em coluna de infiltração e secagem associada ao GTB, ciclo I.....	125

Figura 54 – Variação do teor de umidade volumétrico em relação ao tempo para topo e meio da camada capilar, em coluna de infiltração e secagem associada ao GTB, Ciclo I.	125
Figura 55 – Variação do teor de umidade volumétrico em relação ao tempo para topo, meio e base da camada capilar, em coluna de infiltração e secagem com GTB, ciclo II.	127
Figura 56 – Variação do teor de umidade volumétrico em relação ao tempo para topo e meio da camada capilar, em coluna de infiltração e secagem com GTB, ciclo II.	127
Figura 57 – Variação do teor de umidade volumétrico em relação ao tempo para topo, meio e base da camada capilar, em coluna de infiltração com GTB, terceiro umedecimento.	128
Figura 58 – Variação do teor de umidade volumétrico na camada capilar sem GTN, ciclo I e ciclo II.	130
Figura 59 – Variação temporal da sucção ao longo da camada capilar com interface com o GTA.	132
Figura 60 – Variação temporal da sucção ao longo da camada capilar com interface com o GTB, primeiro ciclo.	133
Figura 61 – Variação temporal da sucção ao longo da camada capilar desidratada com interface com o GTB, segundo ciclo.	134
Figura 62 – Variação temporal da sucção ao longo da camada capilar com interface com o GTB, terceiro umedecimento.	135
Figura 63 – Variação temporal da sucção ao longo da camada capilar sem interface com o GTN.	136
Figura 64 – Variação da temperatura da camada capilar durante o ensaio coluna umedecimento e secagem com GTA.	137
Figura 65 – Variação da temperatura da camada capilar durante o ensaio coluna umedecimento e secagem com GTB ciclo I.	138

Figura 66 – Variação da temperatura da camada capilar durante o ensaio coluna umedecimento e secagem com GTB ciclo II.	139
Figura 67 – Variação da temperatura da camada capilar durante o ensaio coluna umedecimento e secagem com GTB, umedecimento 3.	139
Figura 68 – Variação da temperatura da camada capilar durante o ensaio coluna umedecimento e secagem sem GTN, ciclo I e II.	140
Figura 69 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTA (topo, meio e base).	141
Figura 70 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTA (topo).	141
Figura 71– Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTA (meio).	142
Figura 72 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTA (base).	142
Figura 73 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo I (topo, meio e base).	143
Figura 74 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo I (meio e base).	143
Figura 75 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo I (topo).	144
Figura 76 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo I (base).	144
Figura 77 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo II (topo, meio e base).	145
Figura 78 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo II. (topo, meio).	146

Figura 79 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo II. (topo).	146
Figura 80 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo II. (base).	147
Figura 81 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, terceiro umedecimento (topo, meio e base).	147
Figura 82 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, terceiro umedecimento (meio e base).	148
Figura 83 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo I (topo, meio e base).	149
Figura 84 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo I (topo).	149
Figura 85 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo I (meio).	150
Figura 86 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo I (base).	150
Figura 87 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo II (topo, meio e base).	151
Figura 88 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo II (topo).	151
Figura 89 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo II (meio).	152
Figura 90 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo II (base).	152
Figura 91 – Comparação entre os teores de umidade volumétricos nos ensaios de coluna de umedecimento e secagem realizados (topo).	153

Figura 92 – Comparação entre os teores de umidade volumétricos nos ensaios de coluna de umedecimento e secagem realizados (meio).	154
Figura 93 – Comparação entre os teores de umidade volumétricos nos ensaios de coluna de umedecimento e secagem realizados (base).	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constituinte (% massa) de alguns tipos de polímeros (Koerner, 2012 adaptado).....	41
Tabela 2 – Equações de ajuste para CCRA (Gitirana Jr. <i>et al.</i> , 2015)	62
Tabela 3 – Propostas para função condutividade hidráulica em solo não saturado, (Dias, 2012 <i>apud</i> Silva, 2014 adaptado)	63
Tabela 4 – Principais técnicas de medir sucção (Marinho, 1997)	73
Tabela 5 – Técnicas de medida e controle de sucção (Masrouri <i>et al.</i> , 2008).....	75
Tabela 6 – Tempo de equilíbrio para sucção total (Marinho, 1994 <i>apud</i> Marinho <i>et al.</i> , 2015).....	84
Tabela 7 – Influência da temperatura na retenção de água pelo ar (Marinho, 1997).....	85
Tabela 8 – Metodologia escolhida por alguns pesquisadores na determinação da CCRA	87
Tabela 9 – Caracterização do solo residual de Sabará.....	93
Tabela 10 – Distribuição granulométrica segundo ABNT do solo residual de Sabará	94
Tabela 11 – Distribuição granulométrica segundo ASTM do solo residual de Sabará ...	94
Tabela 12 – Diâmetros equivalentes em milímetros, coeficiente de não uniformidade (CU) e coeficiente de curvatura (CC) do solo residual de Sabará.....	94
Tabela 13 – Propriedade do GTA e do GTB conforme especificação dos fabricantes	96
Tabela 14 – Valores da gramatura e da espessura obtidas em ensaio no LabGeo e valores informados pelos fabricantes.....	97
Tabela 15 – Composição dos ensaios de coluna de umedecimento e secagem e quantidade de umedecimento e secagem que cada coluna sofreu	105
Tabela 16 – Equações de Chandler <i>et al.</i> (1992) e seus limites de aplicação e aferição..	111

Tabela 17 – Ensaios realizados para a determinação das CCRA's do GTA, do GTB e do solo residual de Sabará.....	112
Tabela 18 – Medidas de umidade relativa do ar para determinada temperatura do ar	112
Tabela 19 – Correspondência entre teor de umidade volumétrico e o grau de saturação para o solo residual.....	112
Tabela 20 – Parâmetros e dados obtidos a partir das CCRA's traçadas pelos ensaios de coluna suspensa para o GTA e o GTB.....	117
Tabela 21 – Parâmetros e dados obtidos a partir das CCRA's traçadas pelos ensaios de coluna suspensa e papel filtro para o solo residual.....	119
Tabela 22 – Parâmetros da função de condutividade hidráulica e as sucções críticas em relação ao solo residual de Sabará	120
Tabela 23 - Relação teor de umidade volumétrico máximo e tempo de ensaio, por coluna monitorada	159

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$a, a_1, a_2, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4, m, n, p, q$ – Parâmetros de ajuste de curva

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AOS – *Apparent Openig Size*

ASTM – *American Society For Testing And Materials*

atm – Atmosfera

C – Calor específico da água; Raio de curvatura da interface ar-água

$C(\psi)$ – Função correção

CBR – *California Bearing Ratio*

CC – Coeficiente de Curvatura

CCRA - Curva Característica de Retenção de Água

CNTP – Condição Normal de Temperatura e Pressão

CU – Coeficiente de não uniformidade

CSV – *Comma Separated Values*

DAM – Drenagem Ácida de Mina

e – Número de Euler

EC-5 – Modelo do sensor de umidade

E. g. – *Exempli gratia*

EPS – Poliestireno expandido

ET – Evapotranspirativa

Et al – *Et alii*

FOS – *Filtration Opening Size*

F. S. – Fator de Segurança

g – Aceleração da gravidade

GCL – *Geosynthetic Clay Liners*

GR – *Gradient Ratio*

GTN – Geotêxtil Não tecido

HCR – Hydraulic Conductivity Ratio

l – Litros

ln – Logaritmo neperiano

LTF – Long-Term Flow

h_a – Carga altimétrica

h_{cp} – Altura do corpo de prova

h_p – Carga piezométrica;

h_t – Carga total

h_w – Altura de água na coluna

h_t – Altura total da coluna

k_n – Coeficiente de permeabilidade normal ao plano

k_p – Coeficiente de permeabilidade no plano

kg – Quilo grama

kPa – Quilo Pascal

k_r – Coeficiente de condutividade hidráulica relativa

k_{sat} – Coeficiente de condutividade hidráulica saturada

$k_{\tilde{n}sat}$, k_w – Coeficiente de condutividade hidráulica não saturada

M_s – Massa de sólidos

M_w – Massa de água

MPa – Mega Pascal

mm – Milímetro

M – Número de medidas; Massa molecular da água

M_{su} – Massa do solo úmido após equilíbrio do sistema

M_{ss} – Massa do solo seco obtida ao término do ensaio

n – Porosidade

NA – Nível de Água

$O(a, m, n)$ – Função objetivo

OS – *Opening Size*

O_{95} – *Opening Size 95%*

PEAD – Polietileno de alta densidade

PELBD – Polietileno linear de baixa densidade

PET – Poliéster

PVC – Cloreto de polivinila

P – Permissividade

ψ – Potencial; Sucção total

ψ_{ads} – Potencial de adsorção

ψ_t – Potencial total

ψ_c – Potencial cinético

ψ_{cap} – Potencial capilar

ψ_p – Potencial piezométrico

ψ_a – Potencial altimétrico ou energia potencial do campo gravitacional

ψ_{aev}, ψ_b – Sucção matricial de valor de entrada de ar

ψ_{ag} – Sucção matricial de valor de entrada de água

ψ_i – Sucção no ponto de inflexão

ψ_k – Potencial térmico

ψ_m – Potencial matricial

ψ_{max} – Sucção matricial máxima

ψ_{osm} – Potencial osmótico

ψ_{pn} – Potencial pneumático

$\psi_r; \psi_{res}$ – Sucção residual

h – Variável da integração

H_c - Ascensão capilar

p_v – Pressão parcial de vapor do ar

p_{v0} – Pressão parcial de saturação de vapor de ar

$r; R$ – Raio do poro.

R – Constante universal dos gases perfeitos

R_m – Raio do menisco

R_{max} – Raio máximo do poro

R_{min} – Raio mínimo do poro

S – Grau de saturação

SM – Areia siltosa

s^* – Inclinação da tangente no ponto de inflexão

S_p – inclinação da CCRA no ponto p, equidistante ao teor de umidade volumétrico saturado e ao teor de umidade volumétrico residual.

S_e – Grau de saturação efetivo

S_{res} – Grau de saturação na condição residual

S_{sr} – Grau de saturação do solo residual

SUCS – Sistema Unificado de Classificação do Solo

t – Espessura do geotêxtil

T – Temperatura

T_g – Temperatura de transição vítrea

T_m – Temperatura de fusão

T_s – Tensão superficial

TDR – Time Domain Reflectometry

u – Pressão na água intersticial

y – Cota; Variável de integração

π – Pi

θ – Ângulo do menisco com a superfície; Teor de umidade volumétrico; Transmissividade

θ_0 – Teor de umidade volumétrico inicial
 θ_r – Teor de umidade volumétrico residual
 θ_s – Teor de umidade volumétrico saturado
 Θ – Teor de umidade volumétrico normalizado
 Θ_i – Teor de umidade volumétrico normalizado de inflexão
 u_a – Pressão exercida pelo ar atmosférico
 $(u_a - u_w)_m$ – Sucção matricial média
 \bar{u}_a – Pressão de ar mais pressão atmosférica
 u_{ar} – Pressão no ar intersticial
 u_m – Pressão na água intersticial devido à sucção matricial
 u_{osm} – Pressão na água intersticial devido à sucção osmótica
 u_w – Pressão da água livre
 \bar{u}_w – Pressão de água livre mais pressão atmosférica
 UR – Umidade relativa do ar
 v – Velocidade
 V_a – Volume de ar
 V_s – Volume de sólidos
 V_t – Volume total
 V_v – Volume de vazio
 V_w – Volume de água
 w – Teor de umidade gravimétrico
 γ_w – Peso específico da água.
 z – Componente piezométrica
 ρ_w – Densidade da água; massa específica da água
 ρ_s – Massa específica dos sólidos
 p_c – Pressão capilar de entrada de ar

λ – Índice da distribuição de tamanho dos poros

°C – Grau Celsius

°F – Grau Fahrenheit

RESUMO

A cobertura evapotranspirativa do tipo barreira capilar é uma tecnologia empregada com sucesso em climas semiárido e árido e em locais com elevadas taxas de evaporação. Elas são utilizadas como cobertura final de resíduos sólidos e rejeitos de mineração, com a função de controle de fluxo, percolação basal de água e fluxo de gás, em meio não saturado. Essas coberturas consideram o contraste de permeabilidade de seus constituintes, um solo sobrepõe um solo mais grosso. A substituição do solo mais grosso por um geotêxtil não tecido (GTN) vem conferindo ao sistema barreira capilar uma melhoria em seu desempenho. O presente trabalho simulou e avaliou barreiras capilares em laboratório associadas aos GTNs, através de ensaios de umedecimento e secagem em colunas de solo monitoradas por sensores de umidade, de temperatura e de pressão. Foram confeccionadas três configurações distintas de barreira capilar: duas com geotêxteis de diferentes marcas, composição, espessura e gramatura, e uma com pedregulho fino. A camada capilar de todas as barreiras foi um solo residual areia siltosa com argila. As curvas características de retenção de água (CCRAs) do solo residual foram determinadas, uma parte pelo ensaio de coluna suspensa e outra parte pelo ensaio de papel filtro. As CCRAs dos GTNs foram obtidas por ensaio de coluna suspensa. As CCRAs tiveram seus ajustes conforme proposto por Fredlund e Xing (1994) e delas foram estimadas as funções condutividade hidráulica segundo o modelo de Van Genuchten (1980) e Mualem (1976). Através das intercessões entre as curvas de função condutividade hidráulica do solo e dos GTNs obteve-se a sucção crítica solo-GTN. Os ensaios de coluna do solo associados aos geotêxteis apresentaram resultados similares e proporcionaram maior retenção de água na porção média da camada capilar que a coluna de solo sem geotêxtil, sendo que esta conferiu maiores teores de umidade na porção inferior da camada capilar. Os GTNs apresentaram CCRAs com pronunciada histerese. As curvas de dessorção e adsorção ocorreram para valores de sucção inferiores a 5 kPa. O solo residual teve suas CCRAs apresentando histerese menos pronunciada que os GTNs e a sucção residual na casa dos milhares de kPa. Os ensaios da pesquisa seguiram as trajetórias de secagem e umedecimento, o que possibilitou a avaliação da trajetória de umedecimento, a trajetória mais crítica para uma cobertura evapotranspirativa do tipo barreira capilar.

Palavras-chave: barreira capilar, cobertura evapotranspirativa, curva característica de retenção de água, ensaio de coluna suspensa, ensaio de papel filtro, sucção.

ABSTRACT

Evapotranspirative capillary barrier coverage is a technology successfully employed in semi-arid and arid climates and in locations with high evaporation rates. They are used as final cover of solid waste and mining tailings, with the function of flow control, basal water percolation and gas flow, in unsaturated medium. These coverings consider the permeability contrast of their constituents, a soil overlaps a thicker soil, replacing the thicker soil with a nonwoven geotextile (NGT) has been giving the capillary barrier system an improvement in its performance. The present thesis simulated and evaluated capillary barriers in the laboratory associated to NGTs, through wet-drying tests in soil columns monitored by humidity, temperature and pressure sensors. Three different capillary barrier configurations were made, two with geotextiles of different brands, composition, thickness and weight, and one with fine gravel. The capillary layer of all the barriers was the residual sandy soil with clay. The water retention characteristic curves (WRCCs) of the residual soil were determined, one part by the hanging column test and the other by the filter paper test. The NGT WRCCs were obtained by hanging column test. The WRCCs had their adjustments as proposed by Fredlund and Xing (1994) and from them were estimated the hydraulic conductivity functions according to Van Genuchten 1980 e Mualem (1976) model, which made possible the graphic determination of the critical suctions. The soil column tests associated with the geotextiles presented similar results and provided higher water retention in the middle portion of the capillary layer than the soil column without geotextile, which gave higher moisture content in the basal portion of the capillary layer when compared to other barriers. The NGTs presented WRCCs with pronounced hysteresis. The desorption and adsorption curves occurred for suction values lower than 5 kPa. The residual soil presented WRCCs with hysteresis less pronounced than NGTs and residual suction in the thousands of kPa. The research trials considered drying and wetting trajectory, which allows the evaluation of the most critical trajectory for a work involving these materials.

Keywords: capillary barrier, evapotranspirative coverage, filter paper testing, hanging column testing, suction, water retention characteristic curve.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento obtido no estudo dos solos saturados pela mecânica dos solos clássica pode ser útil quando estendido ao universo dos solos não saturados. Simplificadamente, essas condições de saturação são separadas pelo nível de água (NA). Abaixo do NA, o solo encontra-se saturado com a água livre, logo acima do NA, tem-se a franja capilar, trecho saturado sem água livre e, sobre a franja capilar, encontra-se o solo não saturado propriamente dito (FREDLUND, 1996).

Várias obras de engenharia intervêm nos solos, que podem estar em situação tanto saturada quanto não saturada ou migrando de uma situação à outra (FREDLUND, 1996), como no caso das coberturas evapotranspirativas.

A barreira capilar, um tipo de cobertura evapotranspirativa (ET), é uma tecnologia que vem sendo empregada com sucesso em climas semiárido e árido. É utilizada como cobertura final de resíduos sólidos, resíduos e rejeitos de mineração, com a função de controle de fluxo, tanto na percolação de água para dentro do reservatório quanto no controle de fluxo de gás oriundo da decomposição de resíduos. Na realidade, o controle da percolação na parte inferior da cobertura é alcançado pela retenção de líquido nos períodos úmidos ou pela drenagem lateral, retornando à atmosfera por evapotranspiração em períodos de estiagem (ZORNBERG *et al.* 2010). Atualmente, essa tecnologia foi testada com sucesso em clima subtropical monçônico, que possui quatro estações distintas, primavera curta e chuvosa, verão úmido e quente, outono fresco com baixa precipitação e inverno pouco frio. Embora possua um volume de pluviosidade na estação chuvosa muito superior ao volume de chuva dos climas áridos e semiáridos, sua taxa de evapotranspiração é muito elevada, garantindo o sucesso da barreira capilar (ZHANG *et al.*, 2016).

A barreira capilar é projetada com o contraste de permeabilidade de seus constituintes, basicamente, o solo fino sobrepondo ao solo grosso. A substituição do solo grosso por um geotêxtil não tecido (GTN) vem conferindo ao sistema barreira capilar uma melhoria em seu desempenho (PICKLES; ZORNBERG, 2012; ZORNBERG *et al.*, 2016; DE LIMA *et al.* 2017). Essa substituição pode ser vantajosa, devido o GTN ser um material de espessura reduzida, leve, com controle de qualidade de fábrica, de fácil instalação em campo, baixo preço, disponível no mercado, ampla variedade e durável.

Os estudos de barreira capilar utilizando geossintéticos estão em fase inicial no Brasil com poucos trabalhos publicados e, mundialmente, existem poucos resultados de CCRA para geossintéticos, comparando com variedade de tipos de geossintéticos disponíveis no mercado (PICKLES e ZORNBERG, 2012).

Os solos e os geotêxteis retêm água de forma diferente. A retenção de água dependerá das características química e estrutural do material e da situação de contorno que esteja sujeito.

1.1 Objetivos do Trabalho

Objetivo geral:

Avaliação de barreiras capilares em laboratório utilizando geotêxteis não tecidos de diferentes gramaturas e composições na interface camada capilar e bloco capilar.

Objetivos específicos:

- Simular em pequena escala barreiras capilares com e sem geotêxteis para verificação comportamental do sistema barreira capilar e, comparação dos resultados.
- Realizar ensaio de coluna de umedecimento e secagem monitorada por sensores de umidade, tensão e temperatura.
- Realizar o ensaio de coluna suspensa e papel filtro para o solo constituinte da barreira.
- Realizar o ensaio de coluna suspensa adaptado para o geotêxtil não tecido.
- Obter as CCRA e função condutividade hidráulica da camada capilar e dos geotêxteis.
- Obter a sucção crítica para rompimento da barreira capilar.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação se divide em seis capítulos. O primeiro capítulo introduz o assunto que será abordado, a motivação da pesquisa e os objetivos a serem alcançados. No capítulo 2 foram revisados conceitos técnicos e metodologias para execução da pesquisa. Os materiais utilizados na pesquisa e métodos adotados encontram-se no terceiro capítulo. Os resultados dos ensaios realizados estão disponíveis no capítulo 4. O capítulo 5 discute sobre os resultados obtidos. O sexto capítulo conclui a pesquisa e sugere novos trabalhos.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo contempla a contextualização dos geomateriais empregados nessa dissertação, revisão de conceitos e metodologias básicas para entendimento do desenvolvimento da pesquisa.

2.1 A Água e o Solo não Saturado

A água interage com o solo de distintas maneiras, sendo proposta uma classificação da água conforme seu comportamento no solo (VARGAS, 1977 *apud*, FARIAS, 2012):

- Água gravitacional ou livre é a água que flui, está livre pela comunicação dos poros até a saturação, responde à força gravitacional deslocando para camadas mais profundas;
- Água capilar é a água retida por tensão superficial, no solo, preenchendo com continuidade os espaços capilares;
- Água higroscópica é a água associada ao efeito da dupla camada elétrica na superfície coloidal dos solos, sendo que sua mobilidade se restringe ao estado de vapor;
- A água adsorvida é a água retida na superfície dos minerais devido à grande afinidade entre a água e o mineral constituinte do solo.

A mecânica dos solos clássica enfatiza muito a situação de solo em condições de saturação total com água, uma vez que em muitas obras de engenharia esse é o cenário mais crítico e que deverá ser contornado. Solo saturado é uma simplificação do solo não saturado, possuindo entre eles distinções em classificação e métodos de análise. O tratamento discreto em solo saturado e não saturado é conveniente à mecânica dos solos clássica. O conhecimento obtido dos solos saturados pode ser útil quando estendido ao universo dos solos não saturados. Essas realidades são separadas pelo nível de água livre.

Assume-se que, abaixo do NA, o comportamento do solo saturado (duas fases, líquida e sólida) é governado pela tensão efetiva, enquanto que o solo não saturado (quatro fases, líquida, sólida, gasosa e membrana contrátil), disposto acima do NA é controlado pela tensão

normal líquida e sucção matricial (FREDLUND, 1996). A região superposta ao NA é denominada zona vadosa. A franja capilar pode ocorrer logo acima do NA, onde o grau de saturação aproxima-se dos 100%, sua espessura varia sendo maior para solos mais finos. Nessa zona capilar assume-se que a fase aquosa é contínua enquanto a fase ar é geralmente descontínua. Sobre a franja capilar tem-se uma zona com a fase ar e fase água contínuas, o grau de saturação para essa região situa-se entre 20 e 90 por cento influenciados pela condição de contorno e tipo de solo. Sobrepondo a zona de duas fases, o solo se torna seco e a água será em fase descontínua enquanto a fase ar se manterá contínua, Figura 1 (FREDLUND, 1996).

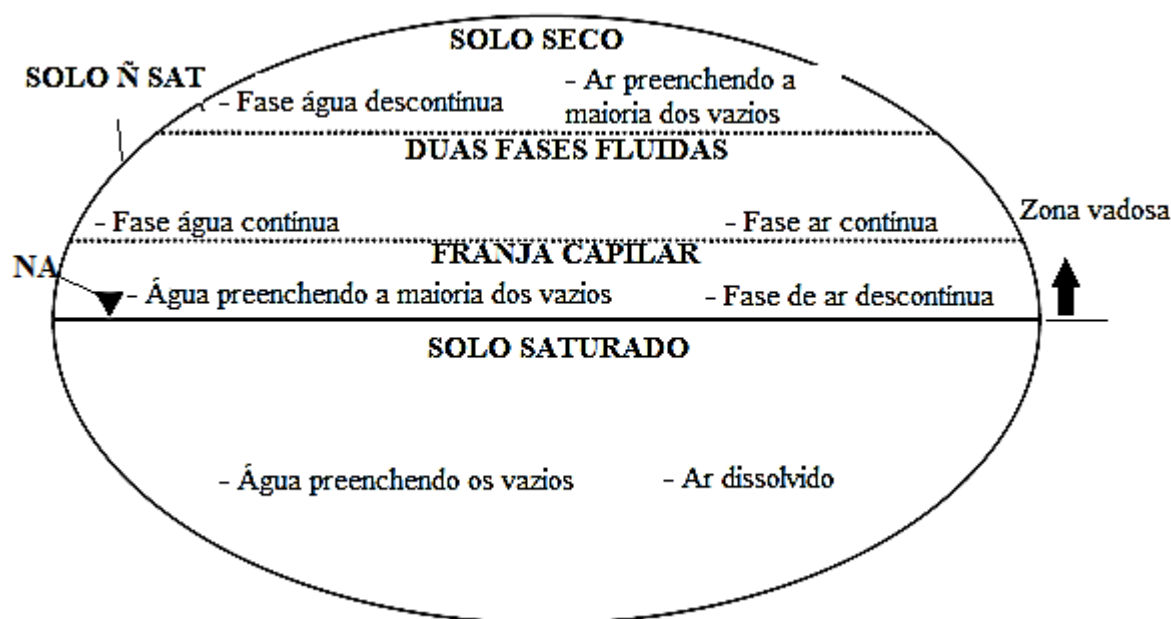


Figura 1 – Domínio da condição solo saturado e solo não saturado e suas fases (Fredlund, 1996 adaptado).

Dentre os solos não saturados, alguns são sabidamente reconhecidos como problemáticos para os engenheiros como as argilas de média à alta plasticidade, solos *loess* e solos residuais saprolíticos (FREDLUND, 1996).

Em solos saturados assume-se que a energia associada a uma quantia de água ou contaminante resulta da velocidade de escoamento, da posição espacial e da interação entre água e outros componentes presentes. Em solos não saturados, outros potenciais de energia da água deverão ser agregados. A soma dos diversos potenciais da água resulta no potencial total (REICHARDT, 1985, *apud* ORTIGÃO, 2007; MACHADO; VILAR, 2015).

Os potenciais de energia livre para água do solo não saturado costumam ser representados em termos de potencial equivalente ou pressão de sucção. O potencial total de água no solo é representado por uma porção infinitesimal de água que sofre um trabalho útil, o qual transporta água pura na condição normal de temperatura e pressão – CNTP – reversível e isotermicamente até uma posição de interesse. O potencial padrão é definido para água pura na CNTP em um *datum* escolhido. O potencial total da água é fornecido pelo somatório de seus potenciais, Equação (1) (MACHADO; VILAR, 2015).

$$\psi_t = \psi_c + \psi_p + \psi_a + \psi_k + \psi_m + \psi_{osm} + \psi_{pn} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

ψ_t – Potencial total; ψ_c – Potencial cinético; ψ_p – Potencial piezométrico; ψ_a – Potencial altimétrico ou energia potencial do campo gravitacional; ψ_k – Potencial térmico; ψ_m – Potencial matricial; ψ_{osm} – Potencial osmótico e ψ_{pn} – Potencial pneumático.

O estado de energia livre solo-água pode ser mensurado em termo de pressão de vapor parcial (EDLEFSEN; ANDERSON, 1943). A equação de potencial de água no solo não saturado é oriunda da equação de energia de Bernoulli acrescida de outros potenciais relevantes à particularidade do meio e do fluido. O potencial matricial da água no solo (ψ_m) é a resultante do potencial capilar da água no solo (ψ_{cap}) e do potencial de adsorção da água no solo (ψ_{ads}) (MACHADO; VILAR, 2015). A adsorção e a capilaridade são responsáveis pela retenção de água em solos não saturados, opondo à ação da gravidade (DE LIMA *et. al.*, 2015).

O potencial total também pode ser representado em função de carga hidráulica e densidade de energia por massa (MACHADO; VILAR, 2015), Equação (2).

$$\psi_t = CT + z + \frac{v^2}{2g} + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{u_{ar}}{\gamma_w} + \frac{u_m}{\gamma_w} + \frac{u_{osm}}{\gamma_w} \quad \text{Equação (2)}$$

C – Calor específico da água; g – Força da gravidade; T – Temperatura; u – Pressão na água intersticial; u_{ar} – Pressão no ar intersticial; u_m – Pressão na água intersticial devido à sucção matricial; u_{osm} – Pressão na água intersticial devido à sucção osmótica; v – Velocidade; γ_w – Peso específico da água e Z – Componente piezométrica.

O fluxo de água no solo, meio poroso, deve-se à diferença de energia interna e a posição das moléculas do fluido no meio.

2.1.1 Sucção

A pressão isotrópica da água intersticial do solo como reação a interações físico-químicas onde acarreta a absorção ou liberação de água pelo sistema água-solo e depende de condições climatológicas e do grau de saturação do solo é denominada sucção. A sucção em termodinâmica é associada à energia livre. O *datum* referencial da energia livre no solo é a água pura sem menisco na interface ar-água. Em solos não saturados, a energia livre da água sempre é negativa, inferior à pressão atmosférica, chegando ao seu máximo, zero, quando o solo satura (MARINHO 1997).

A sucção é característica de solos não saturados e um dos fatores de controle de sua mecânica, todavia podem ser encontradas em solos saturados (*e. g.* imposta por algum fator externo ou devido à diferença de concentração de soluto presente). Os solos não são o único material susceptível a sofrer sucção, materiais porosos (cerâmica, geotêxtil, concreto, entre outros) também estão sujeitos a tais pressões e mudanças comportamentais consequentes (MARINHO 1997). As propriedades como condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento, compressibilidade e potencial de expansão de solos não saturados são função da sucção, ressaltando, dessa forma, sua importância (SINGH; SREEDEEP, 2011).

Duas distintas influências da sucção no comportamento mecânico do solo devem ser completamente reconhecidas (FREDLUND, 1996):

- A sucção modifica a tensão normal e tangencial do esqueleto do solo através da mudança da poropressão média;
- A sucção fornece uma força normal adicional de ligação entre os contatos das partículas, consequente de capilaridade ou membrana contrátil.

A sucção se divide em sucção matricial (capilaridade e força de adsorção) e a sucção osmótica (composição) (Marinho, 1997).

2.1.1.1 Sucção matricial

Sucção matricial, capilaridade e adsorção, representam a pressão relativa negativa da água intersticial, ou seja, a pressão do ar (atm) menos pressão da água, e depende da matriz do solo, por isso seu nome (MARINHO, 1997).

A capilaridade do solo deve-se a suas características físico-químicas (meniscos nos poros), enquanto a adsorção, características químicas mineralógicas (forças de adsorção). A membrana contrátil é formada pela tensão superficial da água e superfície como resposta à tensão capilar, que causa atração entre as partículas. O efeito contrátil é atribuído às forças de Van der Waals, pressão e evapotranspiração. O solo contrai ao reduzir sua umidade devido à capilaridade. Sua contração cessa com a entrada de ar para solos não expansíveis, o que não ocorre com os solos expansíveis que ainda sofrem ajustes volumétricos.

Alguns fatores influem na sucção (CAMAPUM de CARVALHO *et al.*, 2015):

- Estado de tensões do solo;
- Granulometria;
- Arranjo estrutural;
- Mineralogia;
- Porosidade total;
- Distribuição dos poros;
- Matéria orgânica.

A coesão é a atração entre moléculas iguais e a adesão é a atração entre moléculas distintas. A adesão da água em superfícies coloidais é forte e de difícil remoção, já quando as moléculas de água se distanciam dessas superfícies e estão unidas por coesão possuem boa mobilidade, formando aglomerados que, com as quebras das pontes de hidrogênio, modificam de dimensão e realizam novas pontes em um processo dinâmico. A coesão aparente do solo e a plasticidade nas argilas são influenciadas pela adesão e coesão. Outra forma de coesão, não atribuídas às forças de Van der Waals, são as devidas à cimentação entre partículas, pontes de argila, interações químicas e interações orgânicas diversas. (FARIAS, 2012; CAMAPUM de CARVALHO *et al.*, 2015).

Para sucções com valores superiores a 1500 kPa, a sucção matricial e a total são assumidas com o mesmo valor (FREDLUND; XING, 1994).

2.1.1.2 Sucção osmótica

Sucção osmótica é definida como a pressão gerada por diferença de concentração do fluido. É a sucção devido ao teor químico em água. Geralmente é fornecida pela diferença entre a sucção total e a sucção matricial (MARINHO 1997).

Para pequenas variações no teor de umidade, a sucção osmótica costuma ser assumida como constante, mas nunca deve ser negligenciada quando envolver contaminação de solos ou amplitudes maiores na variação do teor de umidade por evaporação (GITIRANA JR *et al.*, 2015). Ordinariamente, a variação na sucção osmótica apresenta menores valores que para a sucção matricial (MARINHO, 1997).

2.1.2 Capilaridade

A capilaridade é um fenômeno conhecido pela movimentação de fluido decorrente de propriedades adesiva e coesiva entre as interfaces fluido-sólido-ar (FARIAS, 2012). O fluxo capilar pode causar redução na sucção (MCCARTNEY *et al.* 2008). Para entendimento do comportamento da sucção no solo, é importante o conhecimento da propriedade da tensão superficial do líquido, a qual o confere o efeito de membrana elástica. Na porção superficial de um líquido, a coesão está restrita à lateral e à camada inferior, acarretando em tensão superficial (FARIAS, 2012). As pontes de hidrogênio da água conferem tensão superficial neste líquido muitas vezes superior a outros líquidos como, por exemplo, o álcool etílico (BRADY; WEIL, 2008 *apud*, FARIAS, 2012).

Na formação do menisco, a força resultante da força coesiva e adesiva é sempre normal à superfície do menisco formado, estabelecendo o equilíbrio necessário. O menisco formado possui uma área maior que se fosse uma superfície plana o que corresponde um armazenamento de energia potencial (MARINHO, 1997). Em superfícies hidrofílicas, a adesão é superior à coesão da água, causando o espalhamento da mesma com um ângulo de contato água-superfície agudo, sendo esse ângulo zerado em situações extremas, onde a adesão é muito superior à coesão, como pode ser visto na Figura 2 (FARIAS, 2012). No caso do contato da gota de água com superfície plana hidrofóbica, onde é maior a coesão em

detrimento à adesão, ocorre à forma esférica da gota com ângulo obtuso, o que é mostrado na Figura 3 (FARIAS 2012).

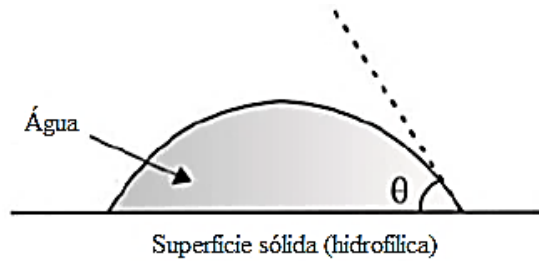


Figura 2 – Ângulo da água com a superfície quando a adesão supera a coesão (Farias, 2012).

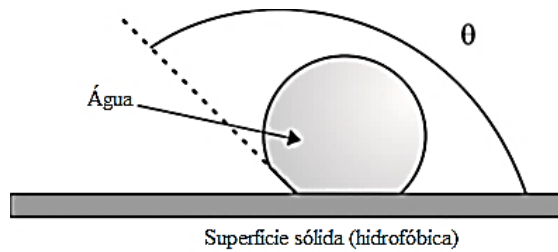


Figura 3 – Ângulo da água com a superfície quando a coesão supera a adesão (Farias, 2012).

A representação do efeito da capilaridade no solo em 3D pode ser feita simplificadamente por um tubo de vidro de diâmetro pequeno e a água. Por adesão, a água se espalhará na superfície de vidro do tubo e, por coesão e consequente tensão superficial, formará o menisco água-ar. Para esses materiais considerados (água e vidro), a interação apresenta-se por baixo ângulo de contato e menisco de forma convexa. O ar atmosférico exerce uma pressão (u_a) e se torna menor que a pressão da água livre (u_w) em cota inferior ao do menisco formado, com isso o líquido sofre um fluxo ascendente que cessará quando com a contribuição do peso da água U_w se iguale a U_a , como representado na Figura 4 (FARIAS, 2012).

A ascensão capilar (H_c) para um tubo cilíndrico pode ser calculada pelo equilíbrio das forças ascendentes com as descendentes pela Equação (3) (FARIAS, 2012).

$$T_s 2\pi r \cos \theta = \rho_w H_c \pi r^2 g \tag{Equação (3)}$$

Sendo a força ascendente o resultado do produto da tensão superficial (T_s), da circunferência do tubo relativa ao contato tubo-menisco capilar ($2\pi r$) e ($\cos \theta$), o componente y para força

ascendente. A força descendente é o produto da densidade da água (ρ_w), da aceleração da gravidade (g) e do volume de água ($H_c \pi r^2$), conforme Equação (4) (FARIAS, 2012).

$$H_c = \frac{2T_s \cos \theta}{r\rho_w g} \quad \text{Equação (4)}$$

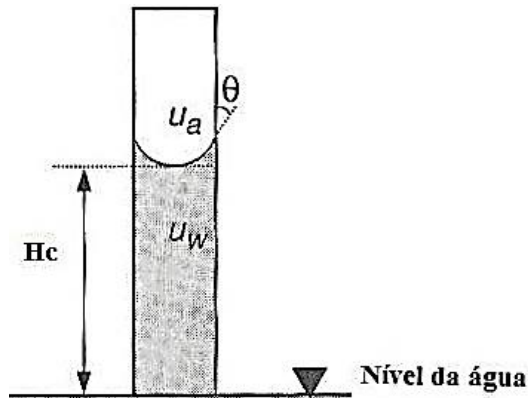


Figura 4 – Representação do fenômeno capilaridade considerando o vazio do solo como um tubo (Faria, 2012).

O solo em trajetória de secagem terá espaços porosos preenchidos por ar, sendo a pressão capilar de entrada de ar (p_c) dependente do tamanho do poro e estimada, por analogia a capilaridade em tubo cilíndrico, pela Equação (5) (FARIAS, 2012), onde R é o raio do poro.

$$p_c = \frac{2T_s \cos \theta}{R} \quad \text{Equação (5)}$$

A tensão superficial varia com a temperatura sendo menor para maiores temperaturas.

Desde que não ocorra ar ocluído (rápida infiltração, por exemplo) os poros de maiores dimensões terão sua água deslocada preferencialmente que os poros de menores dimensões. Em trajetória de secagem os meniscos capilares podem imprimir uma coesão aparente ao solo uma vez que o menisco capilar gera força atrativa entre os grãos do solo.

Considerando a carga hidráulica constante no sistema, a poropressão pode ser calculada em qualquer ponto da coluna capilar, visto que esta é estática (GITIRANA JR *et al.*, 2015). Conforme Figura 4, a poropressão relaciona-se com a cota (γ), Equação (6).

$$u_{(y)} = -\gamma_w y \quad \text{Equação (6)}$$

A sucção matricial no topo da coluna é fornecida pela Equação (7).

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_m} \quad \text{Equação (7)}$$

R_m – Raio de curvatura do menisco.

Considerando três dimensões, onde o menisco possui dois raios de curvatura ortogonais entre si, e utilizando a equação de Laplace, obtém a Equação (8) (GITIRANA JR *et al.*, 2015).

$$(u_a - u_w) = T_s \left(\frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{R_{m2}} \right) \quad \text{Equação (8)}$$

A Equação 8 se torna $(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_m}$ quando os raios do menisco são iguais. Isso ocorre em capilares cilíndricos, que apesar de não ocorrer fielmente em materiais porosos, sua aproximação simplifica a compreensão da capacidade de retenção da água desses materiais.

O modelo capilar, embora didático para demonstrar a pressão negativa da água em capilares, se limita a solos inertes e não consideram a heterogeneidade, forma e tamanho dos capilares do solo, o que resulta em histerese. Em solos argilosos a sucção matricial pode ser fortemente influenciada pela força de adsorção. (MARINHO, 1997). A histerese é uma resposta distinta para a retenção de água no solo, conforme a trajetória escolhida, secagem ou umedecimento (DE LIMA *et al.*, 2015).

2.1.3 Histerese

Histerese é um fenômeno onde valores iguais de quantidade de água no solo (ou outro material poroso) correspondem a potenciais matriciais diferentes dependendo se para chegar a esses valores de quantidade de água o solo foi umedecido ou seco (KLAR 1984)

Em condição não saturada, as propriedades mecânicas do solo e os potenciais energéticos da água estão fortemente relacionados, sendo um evento de umedecimento ou secagem capaz de alterar o comportamento do solo (MACHADO; VILAR, 2015). Na histerese, para uma mesma sucção a quantidade de água retida no solo é maior na secagem do que no

umedecimento (SOUSA, 2006). A histerese é atribuída principalmente a não uniformidade de distribuição dos poros por tamanho, efeito pote de tinta “*Ink bottle effect*” (HILLEL, 1998), a variação do ângulo de contato líquido-sólido conforme o material umedece ou seca e ao ar aprisionado nos poros, o que reduz a capacidade de reter água no material (MARINHO *et al*, 2015). Segundo Childs (1969, *apud* SOUSA, 2006), o efeito de histerese é, provavelmente, menos pronunciado na representação pela curva da condutividade hidráulica *versus* umidade.

O efeito pote de tinta relaciona o tamanho do poro e a sucção. Ao tomar um solo seco e iniciar sua umidificação, a sucção, hipoteticamente, decresce para $\psi_{(R)} = \frac{2T_s}{R} \cos(\alpha)$ no poro maior, onde T_s é a tensão superficial. Na trajetória de umedecimento os menores poros são preenchidos preferencialmente, seguidos pelo preenchimento dos poros maiores, que necessitam de maior energia para o feito. Ao tomar um solo saturado e iniciar a sua trajetória de secagem, a sucção atinge o valor de $\psi_{(r)} = \frac{2T_s}{r} \cos(\alpha)$, sendo os menores poros os últimos a serem esvaziados, Figura 5.

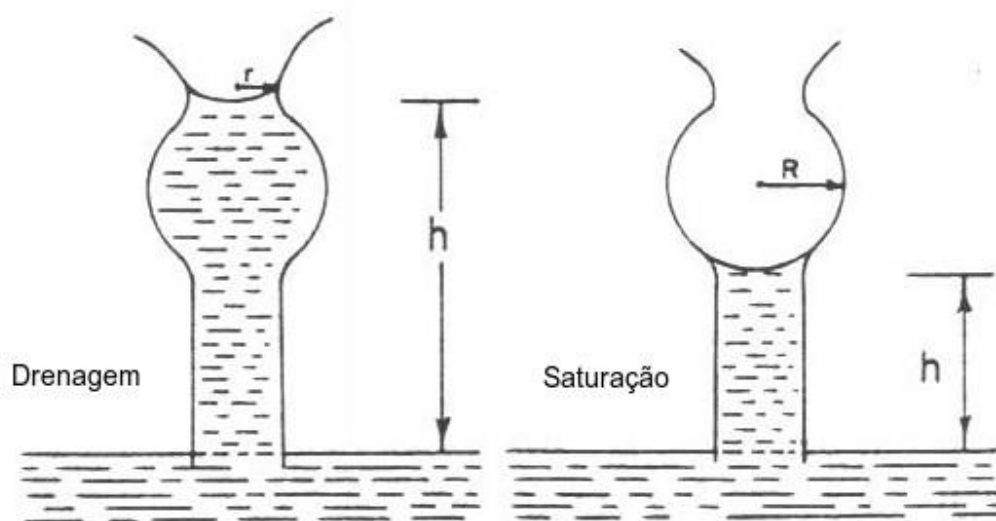


Figura 5 – O efeito pote de tinta para a trajetória de secagem e de umedecimento (Hillel, 1998).

2.1.4 Cavitação

A cavitação é o fenômeno de formação de bolhas ou cavidades macroscópicas em um líquido. Essas bolhas (cavidades) podem ser novas ou formadas a partir de bolhas (cavidades) menores não vistas a olho nu (Young, 1989). A cavitação associa-se a fenômenos de superfície, visto que a água por si só é capaz de suportar trações na ordem de MPa (MARINHO, 1997).

Quatro formas de induzir o crescimento de bolha na água foram propostas por Young (1989), sendo que podem ocorrer isoladamente ou em combinações:

- Cavitação gasosa – Bolha preenchida com gás, por redução de pressão ou aumento de temperatura;
- Cavitação vaporosa – Bolha preenchida por vapor, por redução de pressão ou aumento de temperatura;
- Desgasificação – Bolha preenchida com gás, por difusão (gás sai do líquido);
- Ebulição – Bolha preenchida por vapor, por elevação suficiente da temperatura.

A pressão atmosférica não influi na sucção matricial, conforme indicado na Equação (9), mas influi na cavitação em águas não desaeradas (GITIRANA JR *et al*, 2015).

$$(\bar{u}_a - \bar{u}_w) = [(u_a + u_{atm}) - (u_w + u_{atm})] = (u_a - u_w) \quad \text{Equação (9)}$$

Núcleos de cavitação podem ocorrer e são classificados em homogêneos ou heterogêneos. Os homogêneos ocorrem no líquido puro e os heterogêneos, por impurezas ou ação de radiação no líquido. Os núcleos heterogêneos são os mais comuns e maiores causadores de cavitação em medidores de sucção (CHARLES; BRUCE, 2007). Marinho e Sousa Pinto (1997, *apud* CHARLES; BRUCE, 2007) acreditaram na eliminação de núcleos de cavitação por atuação química.

2.1.5 Quantidade de Água

Na mecânica dos solos, a quantificação de água no solo se dá principalmente pelo teor de umidade gravimétrico, teor de umidade volumétrico e grau de saturação. A mensuração de água em solo pode ser extrapolada para materiais geossintéticos.

O teor de umidade gravimétrico trata-se de uma relação de massa onde o teor de umidade gravimétrico (w) é a razão entre a massa de “água” (M_w) pela massa de sólidos (M_s), Equação (10). É um parâmetro de fácil aquisição, usado tanto em curvas de retenção quanto em curvas de contração (GITIRANA JR. *et al.*, 2015).

$$w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{V_w \rho_w}{V_s \rho_s} \quad \text{Equação (10)}$$

V_w – Volume de água;

ρ_w – Massa específica da água;

V_s – Volume de sólidos;

ρ_s – Massa específica dos sólidos.

O teor de umidade volumétrico (θ) é uma relação de volume dado pela razão entre o volume de “água” (V_w) e o volume total (V_t), Equação (11). É um parâmetro utilizado em curvas de retenção e na previsão da condutividade hidráulica em meio não saturado, sendo dessa forma útil no estudo de percolação em meios não saturados e para cálculo de balanço de massa de água (GITIRANA JR. *et al.*, 2015). Zornberg *et al.* (2010) afirmam que o fluxo de água em meio não saturado é mais complexo que em meio saturado. A condutividade hidráulica em meio não saturado muda com a variação do grau de saturação do meio (nível de sucção), o que influi fortemente na taxa de fluxo de água.

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad \text{Equação (11)}$$

Pode-se relacionar θ com a altura de “água” (h_w) disponível em uma coluna de material e a altura total da coluna (h_t) da seguinte forma (GITIRANA JR. *et al.*, 2015), Equação (12):

$$h_w = \theta h_t \quad \text{Equação (12)}$$

A altura de água no solo é relacionada com o volume de precipitação. Para exemplo, a infiltração de 100 mm de precipitação em uma coluna de 1 metro de profundidade produz um acréscimo de 10% de θ . Sendo assim, a quantidade necessária de água (Δh_w) para a saturação completa de uma coluna de água com teor de umidade volumétrico inicial (θ_0) conhecido será, Equação (13).

$$\Delta h_w = (n - \theta_0) h_t \quad \text{Equação (13)}$$

n – Porosidade, igual ao teor de umidade volumétrico do solo saturado (V_v/V_t).

A relação entre V_w e V_v , fornece o grau de saturação (S) (GITIRANA JR. *et al.*, 2015), Equação (14).

$$S = \frac{V_w}{V_v}; V_v = V_a + V_w \quad \text{Equação (14)}$$

V_a – Volume de ar.

O grau de saturação também pode ser utilizado na definição do valor de entrada de ar e na inferência da condutividade hidráulica do solo não saturado.

2.2 Geossintéticos

Conforme ASTM D4439 (2000), geossintético é um material polimérico industrializado usado com solo, rocha ou outro material correlato à engenharia geotécnica como parte integrante de obras antrópicas, estruturas ou sistemas. Teve um avanço significativo com o desenvolvimento da engenharia dos materiais e possuem uma grande variedade de aplicação em diversas áreas como engenharia geotécnica, engenharia de transportes, meio ambiente, hidráulica e outros usos particulares (KOERNER, 2012).

A indústria plástica é quase integralmente responsável pelo fornecimento dos materiais utilizados na produção dos geossintéticos, por meio dos polímeros feitos de hidrocarbonetos, embora exista o uso ocasional de fibra de vidro, borracha e materiais naturais. Geopolímero seria um termo aceitável, entretanto, a expressão geossintético surgiu antes e se popularizou no meio profissional (KOERNER, 2012).

Beckham e Mills (1935) relatam que as primeiras tentativas de utilização de tecidos no reforço de rodovia datam de 1926, pelo *South Caroline Highway Department*. Esses mesmos autores são os precursores da definição da função separação e função reforço, tal e qual são conhecidas hoje (KOERNER, 2012).

Segundo Koerner (2012), os geossintéticos desempenham 5 principais funções: separação, reforço, filtração, drenagem e barreira. O uso de geossintéticos visa basicamente a atender dois objetivos: Melhoria qualitativa da obra e ser mais viável economicamente quando comparado a soluções e materiais tradicionais (KOERNER, 2012).

Existe uma grande variedade de geossintéticos que podem ser agrupados segundo alguma característica preponderante e, os principais tipos de geossintéticos são: geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompostos, geocompostos argilosos (*Geosynthetic Clay Liners* “GCL”), geotubos e geoexpandidos. A presente revisão terá seu enfoque no material sintético que é empregado nessa pesquisa, que são os GTNs.

Os geotêxteis são materiais têxteis constituídos por fibras sintéticas ao invés de naturais, o que garante maior durabilidade. São compostos por fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios. Suas fibras são flexíveis, compondo material poroso e tecido (tecelagem padrão) ou não tecido (emaranhamento aleatório de fibra constituinte), ou tricotado. O principal é que são materiais bastante porosos que viabilizam o fluxo de líquido através de seu plano normal tal como pela sua espessura. Existe uma ampla variedade deste produto disponível no mercado, Figura 6.

Os GTN sempre executam ao menos uma dessas quatro funções: separação, reforço, filtração e / ou drenagem (KOERNER, 2012). Os geotêxteis, às vezes, são utilizados para além de uma única função. Todas as funções, independente de primária, secundária, terciária entre outras, devem ser avaliadas (KOERNER, 2005).



Figura 6 – GTNs diversos (Gardoni, notas de aula 2016).

Os polímeros mais utilizados na confecção de geossintéticos são: polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno linear de baixa densidade (PELBD), cloreto de polivinila (PVC),

poliéster (PET), poliestireno expandido (EPS), polietileno cloro sulfonado e polímeros termorrígidos (e. g. dieno-etileno-propileno).

Os principais tipos de polímeros utilizados na confecção dos geotêxteis são: polipropileno ($\cong 92\%$), poliéster ($\cong 5\%$), polietileno ($\cong 2\%$) e poliamida ($\cong 1\%$) (KOERNER, 2005).

Nenhum produto geossintético é integralmente formado pela resina polimérica associada ao seu nome. Misturados ou elaborados com esta, podem conter aditivos para cumprir os mais diversos propósitos. Os aditivos podem ser tanto líquidos quanto particulados e subordinadamente fibrosos. São utilizados como protetores de raio ultravioleta, antioxidante, estabilizador termal, plastificantes, biocidas, retardadores de chama, lubrificantes, corantes, agentes expansivo ou agente antiestático (KOERNER, 2012).

A proporção pecentral do polímero, preenchimento e aditivos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Constituinte (% massa) de alguns tipos de polímeros (Koerner, 2012 adaptado).

Tipo de polímero	Polímero	Enchimento	Negro fumo ou pigmento	Aditivo
Polietileno	95 – 98	0	2 – 3	0,5 – 2,0
Polipropileno	85 – 96	0 – 13	2 – 3	1 – 2
Poliéster	96 – 98	0	2 – 3	0,5 – 1

2.2.1 Geotêxtil – Custo, Disponibilidade e Especificação

O geotêxtil é um geossintético permeável, composto por material têxtil, com aplicações já consolidadas e desenvolvimento regular de novas aplicações. A vastidão de aplicação se justifica pela variedade elevada do produto. Três fatores orientam no projeto com geotêxtil: o custo e disponibilidade, especificação do produto e a função que irá desempenhar. Dá-se o crédito como percursos do estudo das aplicações de geossintético aos países Holanda e Inglaterra (KOERNER, 2012).

Projetar, por custo e disponibilidade, é intuitivo, onde o recurso financeiro e disponibilidade do produto com melhores propriedades para a aplicação se conciliam. O que deve levar em conta são as condições severas que o produto pode sofrer e sua durabilidade (KOERNER, 2012).

Ao projetar por especificação, a aplicação destinada ao geotêxtil é listada e relacionada com as propriedades física, mecânica, hidráulica e de resistência. Essa aplicação costuma estar relacionada com a principal função que o geotêxtil irá desempenhar. É um método que permite a conferência do valor verificado em campo e a variação do valor do controle de qualidade do geotêxtil fabricado (KOERNER, 2012).

Para se projetar pela função em que o geotêxtil irá exercer, avalia-se, por ensaio, a principal função de aplicação e determina o valor numérico da propriedade disponível, este valor dividido pelo valor numérico da propriedade solicitada (projeto) fornece o fator de segurança (F. S.), Equação (15).

$$F.S. = \frac{\textit{Propriedade disponível}}{\textit{Propriedade solicitada}} \quad \text{Equação (15)}$$

$$F.S. > 1$$

O valor mínimo do fator de segurança é 1 e deve ser adequado conforme o tipo de obra em que é aplicado, as condições de contorno e de risco.

Após a obtenção do fator de segurança favorável, a escolha do produto pode ser orientada pela disponibilidade do geotêxtil e pelo seu preço (KOERNER, 2012).

2.2.2 Propriedade hidráulica dos GTNs

Os geotêxteis possuem propriedades física, hidráulica, mecânica e de desempenho que devem ser levadas em consideração na elaboração de um projeto. As propriedades hidráulicas de um material influem na forma como a percolação de um fluido ocorre por ele ou através dele. Para GTNs, as propriedades hidráulicas de porosidade, abertura aparente e / ou abertura equivalente, permissividade e transmissividade são relevantes e definidas em Koerner (2005) e encontradas em catálogos de geotêxteis, servindo de ponto inicial de partida para a escolha do produto adequado. Os GTNs possuem poros maiores que a maioria dos solos, e espera-se que tenham comportamento hidráulico similar ao solo grosso, isto é, a condutividade

hidráulica é elevada quando saturado e reduzida ou inexistente em quase toda condição não saturada (STORMONT *et al.*, 2001). Quando comparado com a maioria dos solos, os geotêxteis possuem certa uniformidade de tamanho de poros (PALMEIRA; GARDONI, 2002).

A função de filtração em geotêxtil envolve fluxo de fluido através de seu plano normal e deve reter material a montante do geotêxtil, ou seja, o geotêxtil deve ser estruturado de forma que permita ao mesmo tempo a permeabilidade do fluido e a retenção das partículas desejadas. A consistência do fluxo na interface solo-geotêxtil deve garantir, durante a vida útil da obra, que não ocorrerá colmatação, a tal ponto que a função para qual foi projetado não seja comprometida (KOERNER, 2005).

Há um limite para a dimensão do espaço de vazios que permitem o fluxo do líquido, visto que quando ultrapassado, as partículas de solo à montante do geotêxtil começam a passar pelos vazios do geotêxtil e isso pode levar a ocorrência de *piping* na camada de solo.

A função de filtração é a mais utilizada dentre as funções dos geotêxtil industrializados, e se adequadamente empregado, pode ser a solução para muitos problemas com fluxos de líquidos. A filtração é influenciada pelo tipo de geotêxtil, tipo de solo e regime de fluxo.

Alguns geotêxteis usados como filtro são relativamente espessos e compressíveis. A permissividade é obtida pela relação da permeabilidade normal com a espessura do material (KOERNER, 2005), Equação (16):

$$P = \frac{k_n}{t} \quad \text{Equação (16)}$$

P – Permissividade;

k_n – Coeficiente de permeabilidade normal ao plano do filtro;

t – Espessura do geotêxtil.

Os ensaios de permeabilidade em geotêxtil seguem procedimentos parecidos com ensaios de permeabilidade para solo (KOERNER, 2012).

Os projetos de retenção de solo comparam granulometria do solo com tamanho de abertura (OS) do geotêxtil. Nos Estados Unidos da América, o método que determina o tamanho de

abertura (OS) é feito por peneiramento a seco, obtendo o valor do tamanho de abertura aparente (AOS), o método de peneiramento úmido por aspersão também é utilizado e fornece o valor do tamanho de abertura aparente. No Canadá e Europa, o método utilizado para determinação da abertura de filtração era peneiramento úmido hidrodinâmico, fornecendo o tamanho da abertura de filtração (FOS) este método foi substituído pelo método de peneiramento úmido por aspersão (KOERNER, 2012).

Em longo prazo, a colmatação parcial do geotêxtil é esperada. Existem manuais para avaliação da colmatação para casos que não sejam nem severos nem críticos. Contudo, o ideal é a execução de ensaio, *LTF (long-term flow)*, *GR (gradiente ratio test)* e *HCR (hydraulic conductivity ratio)* para o conjunto escolhido solo-geotêxtil. O ensaio *LTF* pode ser muito demorado (dezenas de dias) principalmente para solos finos, todavia é um bom indicador para escolha do geotêxtil ideal e podem ser realizados vários ensaios ao mesmo tempo, as amostras são submetidas a fluxo em carga constante. O ensaio *GR* é mais expedito que o ensaio *LTF* e ao invés de mensurar a taxa de fluxo, como o ensaio *LTF*, mede a carga hidráulica em diferentes posições na coluna solo-geotêxtil. O ensaio *HCR* avalia não só a condição de colmatação excessiva com também avalia a condição de perda de solo e equilíbrio é obtido pela razão entre a permeabilidade do solo-geotêxtil e a permeabilidade do solo (KOERNER, 2012).

Algumas características podem propiciar a colmatação do filtro:

- Solo fino mal graduado, solo não coesivo, solo *loess*, rocha cominuída e fino de pedreiras;
- Solos não coesivos com graduação interrompida sobre gradiente hidráulico elevado;
- Argila dispersiva ao longo tempo ao individualizar suas partículas. O que é menos problemático para argilas não dispersivas que tendem a manter o solo a jusante com estruturação intacta;
- Águas muito alcalinas podem acarretar precipitados que se depositam no geotêxtil;
- Muitas partículas sólidas em suspensão (fluxo turbulento) no líquido podem cegar ou colmatar o geotêxtil.
- Muitas partículas sólidas em suspensão em conjunto com teor elevado de micro-organismo (lixiviado, resíduo agrícola) no líquido podem proliferar no geotêxtil causando cegamento ou colmatação.

Para todas essas situações, a abertura dos poros do geotêxtil deve permitir que o material fino (partículas e /ou micro-organismo) passe, sem ser retido pelo filtro.

Os geotêxteis também podem atuar como dreno, quando suas fibras se dispõem de forma que a que a percolação ao longo do seu corpo seja atendida. Para compreensão da função dreno do geotêxtil, o conceito transmissividade tem que estar bem consolidado. Transmissividade refere-se à permeabilidade no plano do geotêxtil. Os geotêxteis não tecidos são materiais de elevada compressibilidade, sendo a transmissividade definida matematicamente pela Equação (17) (KOERNER, 2012).

$$\theta = k_p t \quad \text{Equação (17)}$$

θ – Transmissividade;

k_p – Coeficiente de permeabilidade no plano;

t – Espessura do geotêxtil para uma determinada tensão normal.

A transmissividade sobre condições parcialmente saturadas é função da sucção (não um valor isolado). O acréscimo de tensão normal causa decréscimo na transmissividade para todos os valores de sucção. Os geotêxteis não tecidos possuem a propriedade de sifonagem, que é a capacidade de manter a transmissividade do material já saturado sob pequenas sucções (STORMONT *et al.*, 2001).

A compatibilidade de fluxo em longo prazo também segue o critério usado para função filtro. Estudos considerando a influência das altas tensões de confinamento nos critérios de retenção de partículas pelos GTNs, comportamento filtrante de geossintéticos sujeitos a pressão e da influência da quebra de grãos na capacidade de retenção de água de solo granular, já foram realizados por alguns pesquisadores (PALMEIRA; GARDONI, 2000 *apud* DE LIMA, 2014; GARDONI, 2000; GAO *et al.*, 2016). Gardoni (2000) averiguou o comportamento dos geossintéticos em condições de uso virgens e impregnados, filtração e drenagem sob tensão normal, verificando suas características físicas, hidráulicas e de filtro e efetuou ensaios com tensões normais elevadas (2000 kPa), o que é significativo para o estudo dos geossintéticos em obras de terra ou pilhas de rejeito.

Stormont *et al.* (1997) ensaiaram geotêxteis não tecidos agulhados de polipropileno na condição de primeiro uso (novo) e na condição de limpo, ou seja, com remoção de

surfactantes usados no processo de fabricação para retirada de óleos de encimagem. Tinha GTN de filamentos contínuos e de filamentos descontínuos. As curvas de retenção da água foram encontradas para cada amostra e a histerese foi considerada. As amostras de geotêxteis novos retiveram mais água em resposta às iguais sucções aplicadas ao geotêxteis limpos, na trajetória de umedecimento. Próximo à sucção 0, as amostras virgens encontraram-se quase saturada, por outro lado, as amostras limpas não atingiram 20% de saturação. A histerese em amostras novas (virgens) com filamentos descontínuos foi mais perceptível que a histerese das amostras com filamentos contínuos. Já para as amostras limpas, os resultados foram mais próximos, visto que os surfactantes impregnados do material novo influenciaram no comportamento do material durante seu umedecimento. As condições das fibras interferem nas curvas características de retenção de água, em especial se forem limpas para remoção de cobertura superficiais oriundas do processo de fabricação ou remoção de partículas de solo, caso exista alguma inserida nas fibras do geotêxtil (HENRY; HOLTZ, 1997; STORMONT; MORRIS 2000, *apud* STORMONT *et al.*, 2001).

2.3 Curva Característica de Retenção de Água em Meio Poroso (CCRA)

A CCRA do solo é geralmente expressa na trajetória de secagem, devido a difícil obtenção da CCRA do solo na trajetória de umedecimento (Sousa, 2006). Conforme a norma ASTM D 6836 (2002), curvas de retenção de água são utilizadas para caracterização hidrológica, da resistência ao cisalhamento e compressibilidade de um solo não saturado, tal como complementam estudos hidrodinâmicos e auxiliam a estimativa de condutividade hidráulica não saturada a partir da condutividade hidráulica saturada conhecida.

A curva de retenção de água relaciona a energia de retenção da água e o teor de umidade (Barreto *et al.* 2012). Em outras palavras, é o quantificador do armazenamento da água no solo ou em outro material poroso, e ilustra como se comporta a água no interior do material poroso e a energia necessária para remover essa água. A sucção matricial desempenha a maior influência nessa retenção. Os poros grandes condicionam curvas com variação não linear com acentuada variação do teor de umidade para suave variação na sucção. E no material fino, a curva já demonstram redução mais branda do teor de umidade com acréscimo da sucção (De Lima *et al.* 2015). Para o geotêxtil, sua curva característica de retenção de água relata a

capacidade de armazenamento ou variação de volume de água em seus poros influenciados por variação de pressão capilar (De Lima *et al.*, 2014).

A maioria dos processos em solos não saturados pode ser no mínimo parcialmente compreendida conforme a curva de retenção de água relativa a esses solos (PICKLES; ZORNBERG, 2012; GITIRANA JR *et al.*, 2015). As curvas de retenção de água podem ser representadas de diferentes maneiras dependendo da forma como é expresso o estado de tensão do solo e da forma em que é expressa sua quantidade de água. Assim, é importante definir as variáveis que serão utilizadas, pois as informações obtidas dessas curvas dependem delas. O entendimento dos índices físicos e potenciais da água no solo é fundamental, pois eles influem nas distintas curvas características (GITIRANA JR. *et al.*, 2015). A CCRA não é apenas sensível ao tamanho dos poros, composição, densidade e formato do poro do geomaterial, como é sensível também a trajetória escolhida (secagem ou umedecimento) (ZORNBERG; McCARTNEY, 2007).

2.3.1 Relação Água e CCRA

O teor de umidade volumétrico é o mais usual na representação da CCRA. Já o teor de umidade gravimétrico é mais utilizado na engenharia geotécnica prática (GITIRANA JR. *et al.*, 2015). Ainda se utiliza com o mesmo intuito o grau de saturação. Todas essas opções ainda podem ser na forma normalizada, quando o conteúdo de água é relativo à condição residual do teor de umidade ou mesmo a condição nula. O teor de umidade residual pode ser definido como o teor de umidade para qual a remoção adicional de água só é possível para grandes alterações no valor da sucção matricial (GITIRANA JR. *et al.*, 2015) e podem ser necessários métodos empíricos para sua quantificação. Pelas CCRA, se obtém o teor de umidade residual pela ordenada do ponto de intercessão do prolongamento da tangente ao ponto de inflexão da curva com o prolongamento a reta da condição residual (FREDLUND; XING, 1994).

O valor de sucção máxima pouco menor que 10^6 kPa foi determinado laboratorialmente para uma variedade de solos (CRONEY; COLEMAN, 1961) e sustentado por considerações termodinâmicas de Richards (1965 *apud* FREDLUND; XING, 1994). Croney e Coleman (1961) através de dados experimentais verificaram que depois de alcançado o teor de umidade residual, este decresce linearmente até zero no valor de sucção máxima.

2.3.2 CCRA e suas Representações

As CCRA's auxiliam na predição de alguns parâmetros do solo em condições não saturadas, entre eles a função condutividade hidráulica e a função resistência ao cisalhamento, (FREDLUND; XING, 1994). A Figura 7 é uma representação do grau de saturação, em escala linear pela sucção em escala logarítmica.

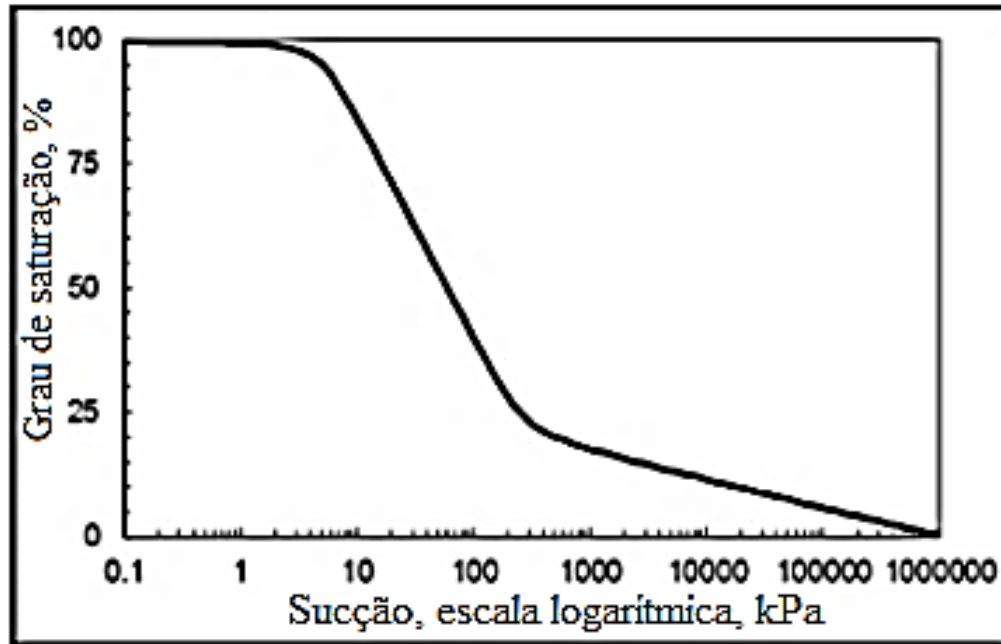


Figura 7 – Curva característica de retenção da água em grau de saturação em escala linear por sucção em escala logarítmica (Gitirana Jr. *et al.*, 2015).

Na Figura 8 a CCRA é em termos do teor de umidade volumétrico. Nessa representação, o valor de teor de umidade volumétrico máximo é o mesmo da porosidade e em solos pouco compressíveis o formato da curva se assemelha ao da curva da Figura 7. Fredlund e Xing (1994), em seu estudo das CCRA's, utilizaram a relação entre teor de umidade volumétrico em escala aritmética e a sucção matricial em escala logarítmica.

A Figura 9 mostra a representação linear relação entre o grau de saturação e a sucção. A identificação dos parâmetros da curva se torna inviável por esse método (GITIRANA JR. *et al.*, 2015).

Outra representação é a semi-logarítmica que relaciona o grau de saturação efetivo (S_e) em escala linear com a sucção em escala logarítmica (GITIRANA JR. *et al.*, 2015), demonstrada na Figura 10, Equação (18).

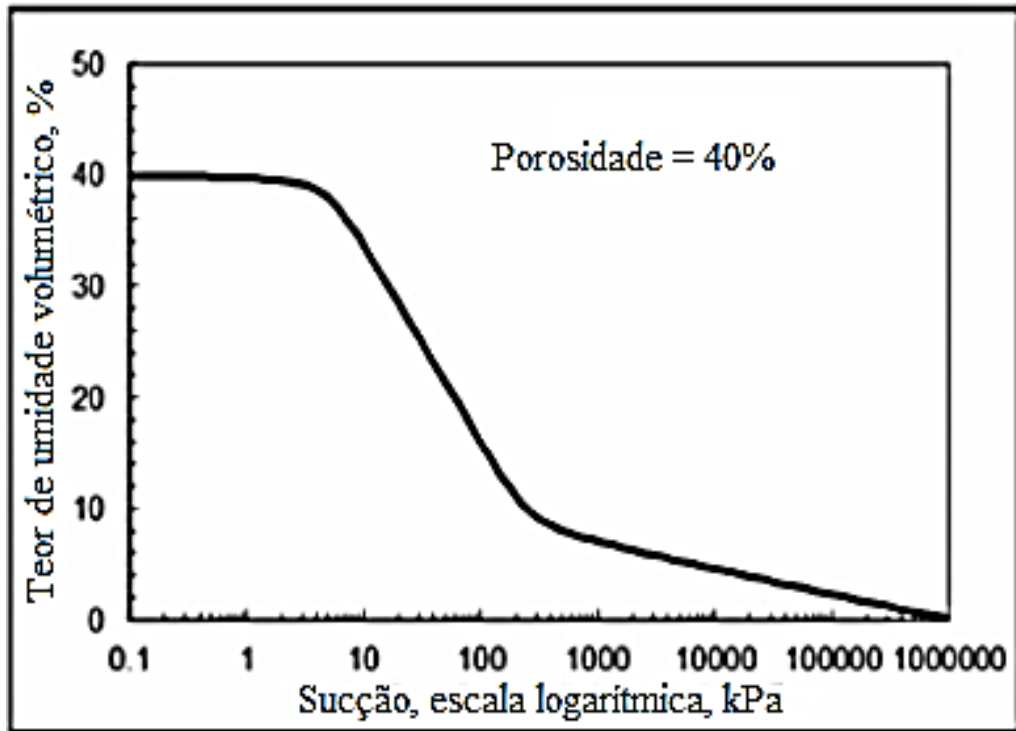


Figura 8 – Curva característica de retenção da água em teor de umidade volumétrica em escala linear e sucção em escala logarítmica (Gitirana Jr. *et al.*, 2015).

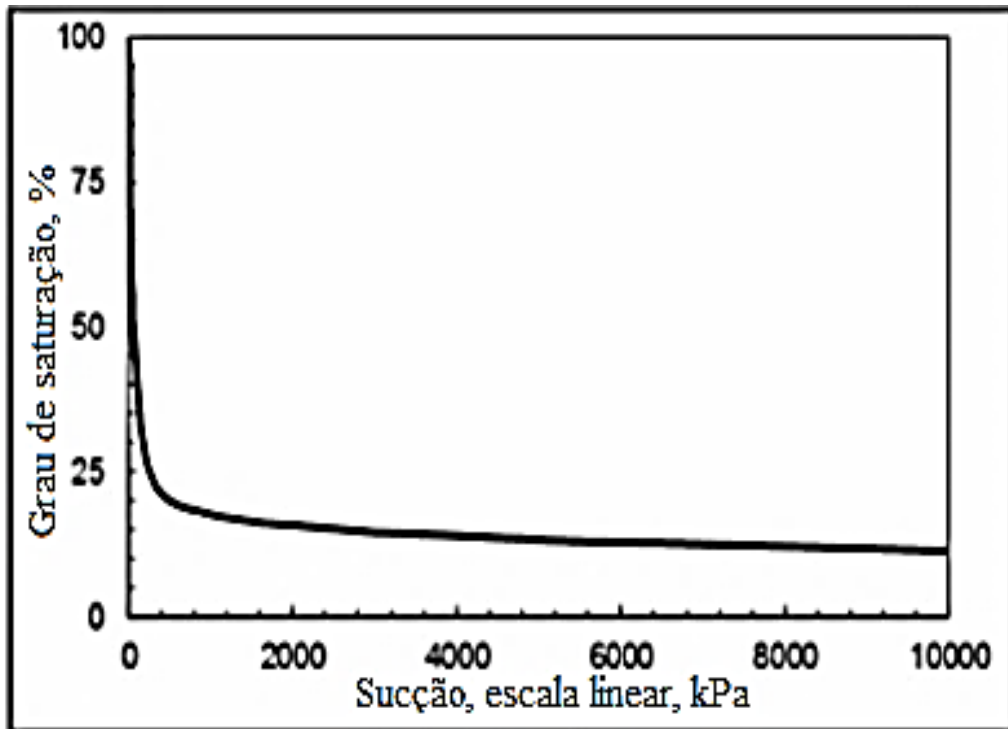


Figura 9 – Curva característica de retenção da água em grau de saturação em escala linear e sucção em escala linear (Gitirana Jr. *et al.*, 2015).

$$S_e = \frac{S - S_{res}}{1 - S_{res}}$$

Equação (18)

Onde:

S_{res} – Grau de saturação na condição residual.

S_e quantifica a água relativamente livre retida no material poroso e foi empregado por Brooks e Corey (1964) para inferência da condutividade hidráulica para solos não saturados.

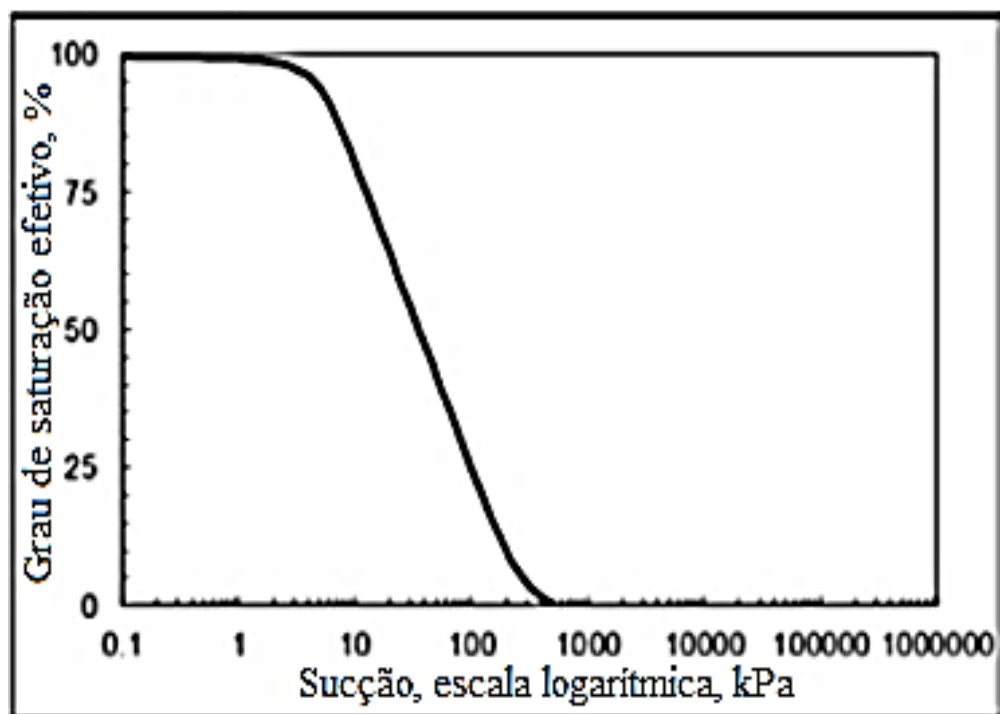


Figura 10 – Curva característica de retenção da água em grau de saturação efetiva em escala linear e sucção em escala logarítmica (Gitirana Jr. *et al.*, 2015).

2.3.3 CCRA Zoneamentos, Parâmetros e Formatos

Através da CCRA diversos parâmetros são estimados e o comportamento do solo não saturado descrito (FREDLUND; XING, 1994). A CCRA pode ser separada em 3 zonas, ver a Figura 11 (GITIRANA JR. *et al.*, 2015):

- Zona saturada – Intervalo de sucção no qual o material encontra-se saturado;

- Zona de desaturação – Intervalo de sucção no qual o material drena, com o acréscimo de sucção, a água relativamente livre nos poros;
- Zona residual – Intervalo de sucção com pouca retirada de água para grande variação de sucção, retirada controlada pelo fluxo de vapor.

A CCRA fornece 3 parâmetros básicos considerando a trajetória de secagem e a quantidade de água (grau de saturação):

- Valor de entrada de ar (ψ_b), $(u_a - u_w)_b$, – Sucção máxima suportada pelos maiores poros do material antes de drenarem;
- Sucção Residual (ψ_{res}), $(u_a - u_w)_{res}$ – Sucção limite de drenagem da água relativamente livre (fluxo líquido), a partir desse ponto a remoção de água exige elevadas sucções sendo controlada por transferência de vapor;
- Grau de saturação residual (S_{res}) – Água restante no material que não drenada em fluxo líquido.

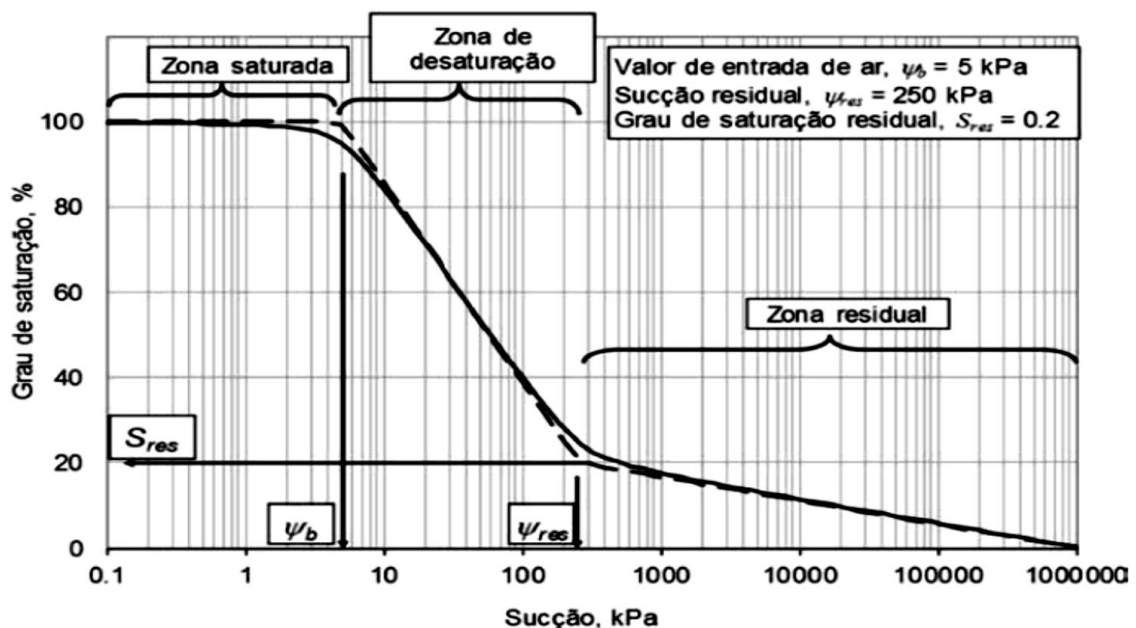


Figura 11 – Zoneamento e parâmetros em uma CCRA de representação semi-logarítmica de grau de saturação por sucção. (Gitirana Jr. *et al.*, 2015).

Os solos de granulometria uniforme, seja argila, silte ou areia, apresentam CCRA's distintas, pois possuem comportamento hidráulico diferente. Generalizando, é comum maiores valores de entrada de ar para as argilas, seguido de menores valores de entrada de ar para siltes e menores ainda para as areias. A condição residual, na CCRA representada por teor de

umidade e sucção semi-logarítmica, é mais facilmente visualizada para o material mais grosso. Na Figura 12 está representado o formato típico das curvas características em função da granulometria do solo.

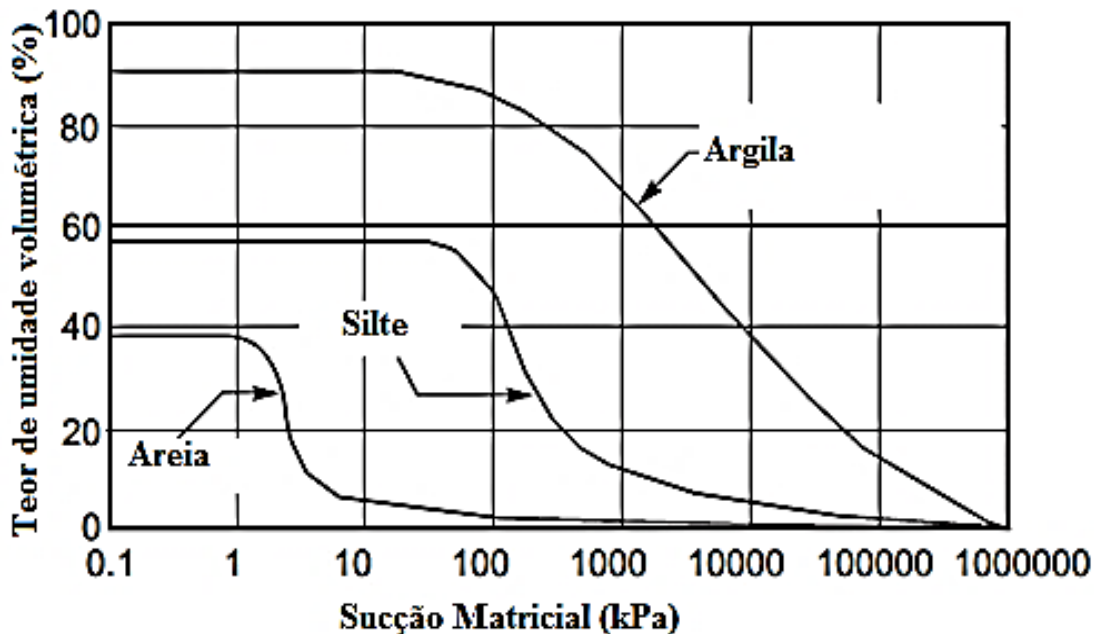


Figura 12 – CCRA para argila, silte e areia (Fredlund e Xing, 1994 adaptado).

Na Figura 13 estão traçadas as trajetórias de umedecimento e secagem para as CCRAs. O evento de secagem é representado pela curva de dessorção que se situa entre a sucção de entrada de ar e a condição de água residual. O evento de umedecimento é representado pela curva de adsorção limitada pela sucção de entrada de água e a condição residual de ar.

A forma da curva de retenção de água para o solo, segundo sua trajetória secagem ou umedecimento é bastante próxima para os solos, enquanto para o geotêxtil, isso não procede. A histerese é mais realçada com maior retenção de água para a mesma sucção na trajetória de secagem do que na trajetória de umedecimento. O valor da entrada de água para o GTN é inferior ao da entrada de ar e, por conseguinte, governa a quebra do sistema capilar solo-GTN (PICKLES; ZORNBERG, 2012) e pode ser estipulada pela altura da ascensão capilar no GTN (STORMONT *et al.*, 2001).

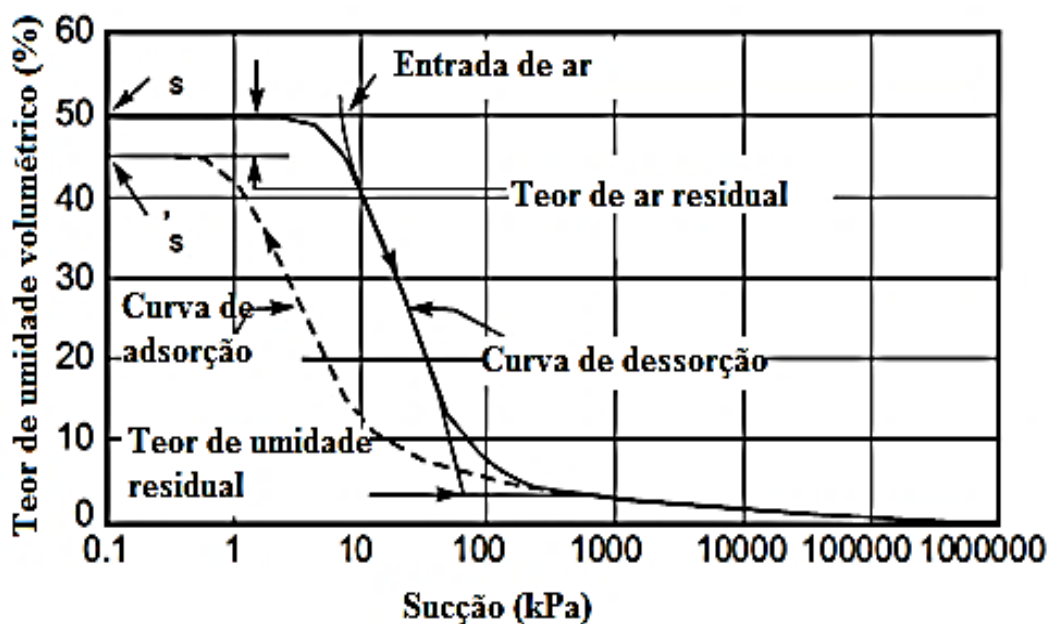


Figura 13 – Curva de dessorção (trajetória de secagem) e curva de adsorção (trajetória de umedecimento), (Fredlund e Xing, 1994).

Influenciadas por fatores físicos e eletroquímicos, as curvas de retenção de água podem possuir apenas uma zona de desaturação, sendo, então, denominadas de curvas unimodais, pois sua derivada primeira gera forma única de sino, similar às distribuições de frequência unimodais. A derivada primeira desse tipo de curva característica de retenção de água serve na avaliação dos tamanhos de poros de material através da distribuição de frequência destes poros.

Material muito plástico podem não apresentar (S_{res}) detectável na curva. Materiais com dois trechos de desaturação são denominados bimodais, a derivada primeira da curva aparenta distribuição bimodal de poros. As duas entradas de ar referem-se a uma família de poros maiores e a outra família de poros menores. Solos tropicais altamente intemperizados costumam apresentar curvas bimodais e são de ampla ocorrência no Brasil. Curvas multimodais também existem, com várias zonas de desaturação e são respostas à distribuição do tamanho de poros e sua composição, entre outros fatores (GITIRANA JR. *et al.*, 2015).

Alguns fatores relacionados à gênese de solos bimodais:

- Distribuição granulométrica aberta;
- Micro e macro poros de origem de agregados intempéricos;

- Lixiviamento do solo;
- Processo biológico;
- Solos compactados com baixa energia no ramo seco.

2.3.4 Fatores que Influenciam na Retenção de Água

A retenção de água em meios porosos é influenciada pela variação de volume, pela distribuição dos poros e pelo grau de intemperismo da camada capilar. O tipo de sucção mensurada interfere na representação dessa água retida (GITIRANA JR. *et al.*, 2015).

A curva de retenção de água obtida pela trajetória de secagem é uma das formas mais simples de observar a retenção de água no material. No caso do solo, fenômenos de capilaridade e eletroquímicos propiciam retenção de água. Em alguns solos argilosos saturados, a perda de água e a variação de volume do solo ocorrem simultaneamente e o solo se mantém saturado, isto é, o solo, ao ser submetido à sucção e sendo compressível, pode sofrer uma redução no volume de vazios e compressão do seu arranjo estrutural e, conseqüentemente, reduzir o armazenamento de água nos poros. Todavia, embora o w e θ decresçam, S pode se manter o mesmo, o que pode gerar curvas distintas dependendo de como é expressa a quantidade de água na curva de retenção. Para obter a curva de retenção é importante medir o volume do material durante a secagem, pois a desaturação ocorre quando a perda de água do material não é mais acompanhada pela variação no volume (GITIRANA JR. *et al.*, 2015).

Em uma trajetória de secagem, os poros maiores tendem a ser drenados primeiro, pois precisam de menores sucções para iniciar esse processo. À medida que a sucção vai aumentando, os poros cada vez menores vão sendo drenados. Por esse princípio, as curvas de retenção de água podem ser traçadas em ensaios de colunas monitoradas (GITIRANA JR. *et al.*, 2015). Modelos de previsão de curva de retenção em materiais granulares a partir de curva granulométrica têm boa resposta, o que não ocorre para material argiloso, que possuem outros mecanismos para a retenção da água e possuem maior complexidade na correlação da distribuição granulométrica com distribuição de tamanhos de poro (GITIRANA JR. *et al.*, 2015). A distribuição dos tamanhos dos poros é susceptível a influência de processos de lixiviação (GITIRANA JR. *et al.*, 2015).

A curva de retenção é muito influenciada pelo grau de intemperismo e este tende a diminuir com a profundidade. A evolução de argilominerais ao longo do perfil vertical do solo influi

substancialmente na curva de retenção, assim como a composição do solo, que é fortemente ditada pela rocha mãe.

Outros fatores que interferem na curva característica de um material é o seu histórico de tensões, compactação e mineralogia. A mineralogia influi na absorção de água pelo mineral, quer devido à capilaridade e / ou devido ao efeito da camada dupla, que ocorrem em materiais argilosos plásticos. Solos plásticos podem manter elevados teores de umidade mesmo a altas sucções (FREDLUND; XING, 1994; GITIRANA JR. *et al.*, 2015). A consolidação do solo influi na curva característica, visto que, acompanhando a redução de volume, ocorre a redução de poros e, conseqüente, aumento de sucção para desprender a água do solo. Determinada condição de compactação do solo gera determinada distribuição de tamanho dos poros e, por conseqüência, determinada curva característica (GITIRANA JR. *et al.*, 2015).

2.3.5 Equações para as CCRAs

Para a maioria dos problemas práticos, a aproximação dos valores de propriedades do solo é necessária na análise a ser realizada, o que confere importância aos métodos empíricos para a estimativa de parâmetros de solo não saturado. Usa-se a relação empírica do coeficiente de condutividade hidráulica do solo saturado e a CCRA para prever a função condutividade hidráulica de um solo não saturado (FREDLUND; XING, 1994).

Fredlund e Xing (1994) propuseram uma equação geral para as CCRAs, com formato de curva de distribuição de frequência integrada, assumindo que os formatos destas variavam conforme a distribuição porosimétrica do solo. Mostraram um bom ajuste para CCRA em areia, silte e argila em faixas de sucção de 0 a 10^6 kPa, fato que não ocorria com as equações existentes até aquele momento, pois estas se limitavam a descrição acurada para determinados intervalos de sucção, não sendo fiável à ampla faixa de sucção.

Fredlund e Xing (1994), ao apresentarem sua proposta de equação, fizeram uma breve revisão bibliográfica de equações empíricas que representem a CCRA. Começaram por Brooks e Corey (1964), que foram um dos pioneiros nesse tipo de equação e sugeriram a Equação (19).

$$\theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \quad \text{Equação (19)}$$

θ – Teor de umidade volumétrico normalizado (adimensional);

ψ – Sucção;

ψ_b – Sucção de entrada de ar;

λ – Índice da distribuição de tamanho dos poros.

Pode-se utilizar o grau de saturação em substituição ao teor de umidade normalizado. A equação de Brooks e Corey (1964) implica em uma descontinuidade acentuada na sucção próxima a saturação. Embora alguns solos granulares possuam brusca alteração a baixa sucção, a maioria dos solos, em especial os de textura média a fina, apresentam curvatura gradual próxima à sucção de entrada de ar.

Considerando a sucção de entrada de ar gradual, Roger e Hornberg (1978) modificaram a equação de Brooks e Corey (1964). Geralmente a CCRA, por essa equação, apresentará um ponto de inflexão onde a inclinação da curva altera de um valor de acréscimo para decréscimo com a redução do teor de umidade volumétrico normalizado.

Nesse ponto, é representado a sucção de inflexão (ψ_i) e o teor de umidade volumétrico normalizado de inflexão (θ_i) em coordenada (θ_i, ψ_i) (FREDLUND; XING, 1994).

Para o intervalo $\theta_i \leq \theta \leq 1$ se descreve a parábola, Equação (20).

$$\psi = -a_4(\theta - b_4)(\theta - 1) \quad \text{Equação (20)}$$

a_4 e b_4 – Parâmetros de ajuste de curva, obtido pelo ponto de inflexão e de saturação.

Willians *et. al.* (1983) adotaram a relação linear entre o logaritmo do teor de umidade volumétrico e o logaritmo da sucção para plotar CCRA de alguns solos Australianos (FREDLUND; XING, 1994), Equação (21).

$$\ln \psi = a_1 + b_1 \ln \theta \quad \text{Equação (21)}$$

a_1 e b_1 – Parâmetros de ajuste de curva.

Mckee e Bumb (1984) propuseram uma relação exponencial entre o teor de umidade normalizado e a sucção (distribuição de Boltzmann) (FREDLUND; XING, 1994), Equação (22).

$$\Theta = e^{-(\psi-a_2)/b_2} \quad \text{Equação (22)}$$

a_2 e b_2 – Parâmetros de ajuste de curva.

As equações de Brooks e Corey (1964) e McKee e Bumb (1984), propostas para valores de sucção superior ao valor de entrada de ar, não são válidas para valores de sucção próximos a saturação zero ou em condições de saturação completa. Bumb (1987) e McKee e Bumb (1987) conseguiram melhores resultados para baixas sucções. Porém, a proposta foi inadequada para valores de elevada sucção, visto o mergulho exponencial da curva para zero nessas condições (FREDLUND; XING, 1994), Equação (23).

$$\Theta = \frac{1}{1 + e^{(\psi-a_3)/b_3}} \quad \text{Equação (23)}$$

a_3 e b_3 – Parâmetro de ajuste de curva.

Van Genuchten (1980) também relacionou a sucção com o teor de umidade normalizado, formulando uma equação mais flexível que as formuladas até aquele momento, Equação (24).

$$\Theta = \left[\frac{1}{1+(p\psi)^n} \right]^m \quad \text{ou} \quad f(\psi) = \frac{mnp(p\psi)^{n-1}}{[1+(p\psi)^n]^{m+1}} \quad \text{Equação (24)}$$

p , n e m – Parâmetros do solo.

Essa fórmula pode ser simplificada correlacionando n e m , onde $m = (1 - 1/n)$, todavia a acuracidade dos resultados é comprometida (FREDLUND; XING, 1994). A equação de Van Genuchten (1980) contempla uma estreita faixa de sucção, não sendo útil para regiões de sucção elevada. Gardner (1958) já tinha proposto uma equação para ajuste de CCRAs, sendo que equação de Van Genuchten (1980) a englobou, Equação (25).

$$\Theta = \frac{1}{1 + q\psi^n} \quad \text{Equação (25)}$$

q – Parâmetro de ajuste de curva, relacionado ao valor de entrada de ar;

n – Parâmetro de curva relacionado à inclinação da CCRA no ponto de inflexão.

Os primeiros modelos (E. g. Brooks e Corey, 1964 e Van Genuchten, 1980) pretendiam ajustar a curva até o valor de umidade residual (GITIRANA JR. *et al.*, 2015).

2.3.6 Equação de Fredlund e Xing (1994) para ajuste da CCRA

As equações anteriores à equação de Fredlund e Xing (1994), mesmo que sutilmente alteradas buscando melhores ajustes, são empíricas e aplicáveis a determinados grupo de solos. Fredlund e Xing (1994) consideraram em seu embasamento teórico que o solo é um conjunto de poros interconectados distribuídos randomicamente. Os poros são caracterizados pelos seus raios. O teor de umidade volumétrico em função do raio pode ser expresso pela Equação (26).

$$\theta(R) = \int_{R_{min}}^R f(r) dr \quad \text{Equação (26)}$$

$\theta(R)$ – Teor de umidade volumétrico quando todos os poros com raio menor ou igual a R estão preenchidos por água;

R_{min} – Menor raio do poro no solo.

O raio (r) possui razão inversa entre a sucção matricial e o raio de curvatura da interface ar-água (C), conforme a lei da capilaridade, Equação (27).

$$r = \frac{C}{\psi} \quad \text{Equação (27)}$$

$C = (2T \cos \varphi)$;

T_s – Tensão superficial da água;

φ – Ângulo de contato entre a água e o solo.

Pode-se, dessa forma, se definir a sucção matricial máxima (ψ_{max}) e a sucção matricial de valor de entrada de ar (ψ_{aev}), Equações (28 e 29).

$$\psi_{max} = \frac{C}{R_{min}} \quad \text{Equação (28)}$$

$$\psi_{aev} = \frac{C}{R_{max}} \quad \text{Equação (29)}$$

Aplicando a lei da capilaridade em $\theta(R) = \int_{R_{min}}^R f(r)dr$, se obtém a equação geral para relacionar o teor de umidade volumétrico e a sucção, a partir distribuição de tamanho de poros para um solo qualquer, Equação (30).

$$\theta(\psi) = \int_{\psi_{max}}^{\psi} f\left(\frac{C}{h}\right) d\left(\frac{C}{h}\right) = \int_{\psi}^{\psi_{max}} f\left(\frac{C}{h}\right) \frac{C}{h^2} dh \quad \text{Equação (30)}$$

h – Variável da integração, representa a sucção.

Fredlund e Xing (1994) avaliaram a equação para situações distintas de distribuição de tamanhos de poros e obtiveram respostas satisfatórias. Dependendo da distribuição porosimétrica, as equações se reduziram a forma similares equações já propostas.

Para a descrição mais acurada da CCRA, foi proposta por eles, a seguinte distribuição, Equação (31).

$$f(\psi) = \frac{mn(\psi/a)^{n-1}}{a[e + (\psi/a)^n]\{\log[e + (\psi/a)^n]\}^{m+1}} \quad \text{Equação (31)}$$

$$a = 1/p$$

Integrando o teor de umidade em função da sucção (limite superior 10^6 kPa) se obtém a Equação (32).

$$\theta = \theta_s \left[\frac{1}{\ln[e + (\psi/a)^n]} \right]^m \quad \text{Equação (32)}$$

θ_s – Teor de umidade volumétrico saturado.

A função correção $C(\psi)$ é dada por Equação (33)

$$C(\psi) = \frac{-\ln(1+\psi/\psi_r)}{\ln(1+1000000/\psi_r)} + 1 \quad \text{Equação (33)}$$

ψ_r – Sucção residual.

A expressão que garante o melhor ajuste, zerando o teor de umidade com o limite superior de sucção, será a Equação (34) (FREDLUND; XING, 1994).

$$\theta(\psi, a, n, m) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e+(\psi/a)^n]\}^m} \quad \text{Equação (34)}$$

a – Parâmetro de ajuste de curva.

O teor de umidade volumétrico residual (θ_r) pode ser obtido pela relação, Equação (35).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\{\ln[e+(\psi/a)^n]\}^m} \quad \text{Equação (35)}$$

A determinação de parâmetros da equação de Fredlund e Xing (1994) pode ser realizada graficamente:

- ψ_r – A sucção correspondente à condição de teor de umidade residual é plotada graficamente na CCRA, localizando o ponto da curva no qual começa a se comportar linearmente com a variação da sucção. Resultados tem demonstrados que valores para sucção residual acima de 1500 kPa são aceitáveis e geralmente encontra-se em intervalo entre 1500 e 3000 kPa.
- Do ponto de inflexão, obtém a sucção na inflexão e o teor de umidade na inflexão. Traçando uma tangente ao ponto de inflexão, os parâmetros a, n, m podem ser definidos pela Figura 14 e Equações (36, 37 e 38).

$$a = \psi_i \quad \text{Equação (36)}$$

$$m = 3,67 \ln \left[\frac{\theta_s C(\psi_i)}{\theta_i} \right] \quad \text{Equação (37)}$$

$$n = \frac{1,31^{m+1}}{mC(\psi_i)} 3,72s^* \quad \text{Equação (38)}$$

s^* – Inclinação da tangente no ponto de inflexão.

Para uma determinação mais acurada dos parâmetros a, n, m , e sendo disponíveis os dados de θ e ψ , pode se utilizar o método do mínimo quadrado, Equação (39).

$$O(a, m, n) = \sum_{i=1}^M [\theta_i - \theta(\psi_i, a, m, n)]^2 \quad \text{Equação (39)}$$

Onde:

$O(a, m, n)$ – Função objetivo;

M – Número de medidas;

θ_i e ψ_i – Valores medidos.

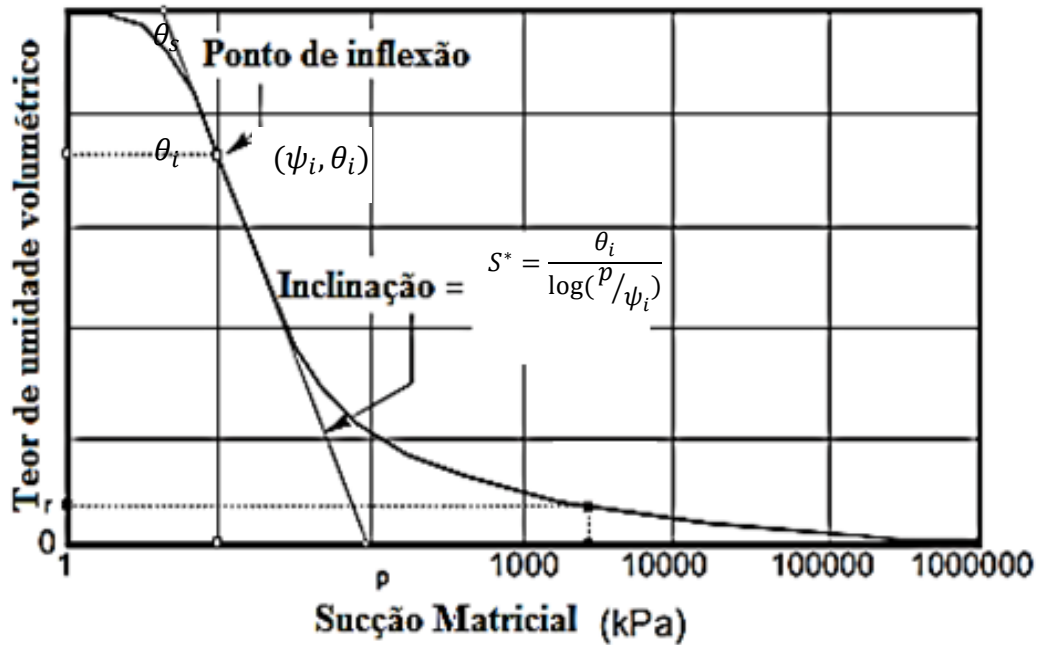


Figura 14 – Elementos gráficos utilizados na determinação dos parâmetros a , m e n . (Fredlund e Xing, 1994 adaptado).

O ajuste de curva pode ser feito substituindo o teor de umidade pelo grau de saturação, variando este de 0 a 1. (FREDLUND; XING, 1994; GITIRANA JR. *et al.*, 2015). A equação de ajuste terá maior flexibilidade quanto maior o número de parâmetros ela conter, porém tem como revés o aumento de sua complexidade (GITIRANA JR. *et al.*, 2015).

Gitirana Jr. e Fredlund (2004), em seu ajuste de curva, utilizaram parâmetros bem peculiares à condição não saturada, facilitando a modelagem estatística da curva de retenção de água e propuseram, também, uma equação para o caso de curvas bimodais.

A Tabela 2 apresenta as principais equações de ajuste, função contínua, para curva característica de retenção de água, e são importantes para inferir as propriedades hidráulicas de solos não saturados e na análise numérica para o fluxo hídrico (GITIRANA JR. *et al.*, 2015).

Tabela 2 – Equações de ajuste para CCRA (Gitirana Jr. *et al.*, 2015)

Autor	Equação	Parâmetros
Gardner (1956)	$\theta_n = 1/(1 + a_g \psi^{n_g})$	a_g, n_g
Brooks e Corey (1964)	$\theta_n = 1$ $\theta_n = (\psi/\psi_b)^{-\lambda_{bc}}$	se $\psi \leq \psi_b$ $\psi_b, -\lambda_{bc}$ se $\psi > \psi_b$
Brutsaert (1966)	$\theta_n = 1/(1 + (\psi/a_b)^{n_b})$	a_b, n_b
Van Genuchten (1980)	$\theta_n = 1/(1 + (a_{vg} \psi)^{n_{vg}})^{m_{vg}}$	a_{vg}, n_{vg}, m_{vg}
McKee e Bumb (1984)	$\theta_n = 1$ $\theta_n = \exp((a_{m1} - \psi)/n_{m1})$	se $\psi \leq \psi_b$ a_{m1}, n_{m1}, ψ_b se $\psi > \psi_b$
McKee e Bumb (1987)	$\theta_n = 1/(1 + \exp((a_{m2} - \psi)/n_{m2}))$	a_{m2}, n_{m2}
Fredlund e Xing (1994)	$\theta(\psi, a, n, m) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e+(\psi/a)^n]\}^m}$ $C(\psi) = \frac{-\ln(1+\psi/\psi_r)}{\ln[1+1000000/\psi_r]} + 1$	a, n, m, ψ_r
Gitirana Jr. e Fredlund (2004) - unimodal	$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + (\frac{\psi}{\sqrt{\psi_b \psi_{res}}})^d} + S_2$	$\psi_b, \psi_{res}, d, S_{res}$

Relacionar o coeficiente de condutividade hidráulica com o teor de umidade volumétrico é possível pela chamada função condutividade hidráulica. A função condutividade hidráulica é influenciada pela característica de retenção da água pelo meio poroso.

Vários pesquisadores propuseram soluções matemáticas para a função condutividade hidráulica e seus parâmetros de ajuste associados (SILVA, 2014). A Tabela 3 apresenta as principais funções de condutividade hidráulicas não saturadas, empíricas e ou obtidas com base em fundamentos de fluxo em meio não saturado. A determinação experimental da função condutividade hidráulica não saturada é trabalhosa, sendo utilizada, assim, a formulação

teórica conforme parâmetros da CCRA e medida da condutividade hidráulica saturada. A função condutividade hidráulica quantifica a redução de fluxo hídrico com o acréscimo da sucção. A sucção é a principal variável utilizada na análise de fluxo de água em solos não saturados (ZORNBERG *et al.*, 2010).

Tabela 3 – Propostas para função condutividade hidráulica em solo não saturado, (Dias, 2012 *apud* Silva, 2014 adaptado)

Autor	Equação	Parâmetros
Richards (1931)	$k(\psi) = a\psi + b$	a
Gardner (1958)	$k(\psi) = k_{sat}e^{-a\psi}$	a
Brooks e Corey (1964)	$k(\psi) = k_{sat}$ $k(\psi) = k_{sat}\left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^{-n}$	ψ_b, n se $\psi \leq \psi_b$ se $\psi \geq \psi_b$
Campbell (1974)	$k(\psi) = k_{sat}\left(\frac{\theta}{\theta_{sat}}\right)^n$	n
Van Genuchten (1980) e Mualem (1976)	$k(\psi) = k_{sat} \frac{\{1-(a\psi)^{n-1}[1+(a\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1+(a\psi)^n]^{\frac{m}{2}}}$	a, m e n
Van Genuchten (1980) e Burdine (1953)	$k(\psi) = k_{sat} \frac{\{1-(a\psi)^{n-2}[1+(a\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1+(a\psi)^n]^{2m}}$	a, m e n
Fredlund e Xing (1994)	$k_r = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_b)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy}$ $k_r = k_{\tilde{n}sat} / k_{sat}$	b, ψ_b

2.4 Cobertura de Disposição Final

Muitas obras de engenharia são assentadas em solos e dispostas na zona vadosa, sendo esta influenciada imensamente por variações climáticas. A porção superior da zona vadosa tem a particularidade de liberar para a atmosfera vapor de água a uma taxa que dependerá da permeabilidade da porção intacta do solo (FREDLUND, 1996).

Conhecer o comportamento de uma camada de solo que retenha e libere água é efetivo para tomada de decisão quando se opta por uma cobertura final do tipo cobertura evapotranspirativa (ET). O projeto de cobertura final para resíduos deve contemplar a evapotranspiração, precipitação, fluxo superficial, retenção de umidade, drenagem lateral e percolação basal. A quantificação do desempenho médio da cobertura pode ser realizada pela mensuração da percolação basal da mesma. O objetivo principal de um sistema de cobertura é o controle da percolação em sua parte inferior. No caso de cobertura de resíduos sólidos, ela deve absorver recalques diferenciais sem comprometer seu desempenho e, se existir a formação de gás, controlar o seu fluxo.

Segundo De Lima (2014), as coberturas se dividem em coberturas resistivas e coberturas evapotranspirativas (ET), sendo estas últimas de interesse nesta pesquisa. Coberturas resistivas têm decaimento no desempenho com o tempo, causado por ressecamento e erosão. Já em coberturas evapotranspirativas, o desempenho tende a melhorar com o tempo, melhorias essas causadas pelo desenvolvimento de vegetação na cobertura (AMORIM, 2008). As coberturas resistivas são compostas por material de baixa condutividade hidráulica (*liner*) que reduzem a percolação na parte inferior. Esse tipo de cobertura visa acréscimo da percolação superficial em detrimento da percolação basal. As coberturas ETs, em sua porção superior, são compostas por vegetações nativas resistentes as sazonalidades climáticas, sendo que o seu desempenho é fortemente influenciado pela evapotranspiração e retenção de umidade. Caso sejam construídas com determinado mergulho (inclinação), a drenagem lateral interna também influenciará significativamente no desempenho da cobertura, Figura 15 (DE LIMA *et al.*, 2015). Devido à dificuldade de desenvolvimento de vegetação em clima seco, uma alternativa como forma de redução de erosão pluvial ou eólica é a substituição da cobertura vegetal por cascalhos (AMORIM, 2008) ou utilização de geocélula com vegetal. Um erro comum é pensar que a água sempre pode infiltrar no solo pela superfície. Na realidade, para o solo indeformado, o fluxo máximo de água que infiltra no solo é igual ao coeficiente de permeabilidade saturada deste. Em superfícies inclinadas, com as camadas superiores de solo fissuradas, com maior coeficiente de permeabilidade, as camadas superficiais podem se tornar saturadas mais facilmente que o solo sotoposto, podendo até mesmo a água escorrer pela camada superior inclinada sem mesmo penetrar no solo indeformado sotoposto. (FREDLUND, 1996).

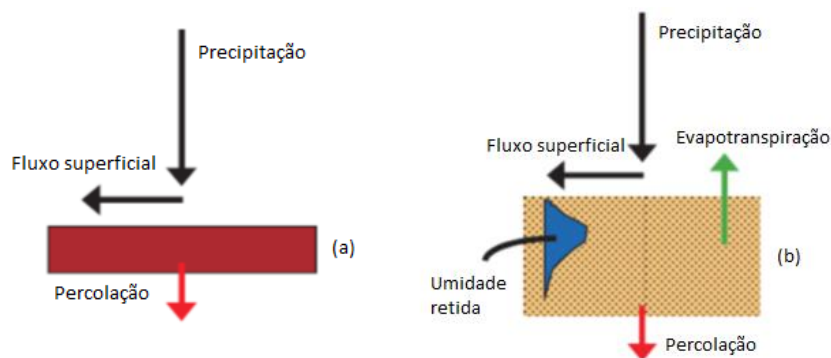


Figura 15 – a) Comportamento da cobertura resistiva. b) Comportamento da cobertura ET (Zornberg *et al.*, 2010 adaptado).

As coberturas resistivas podem ser formadas pelas camadas de controle de erosão, de drenagem e de fundação. A camada para controle de erosão (quase sempre solo orgânico) sobrepõe a camada com baixa condutividade hidráulica (barreira hidráulica), e esta pode ser sobreposta ou não a uma camada de fundação. Pode-se inserir, entre o solo e a barreira hidráulica, uma camada com características de dreno ou, abaixo da barreira hidráulica, uma camada drenante de gás, sendo que em certas coberturas, a própria fundação cumpre esse papel.

O projeto e a construção de Coberturas ETs vêm crescendo expressivamente em regiões áridas e semiáridas (ZORNBERG *et al.*, 2010). As coberturas ETs são divididas em três categorias, coberturas monolíticas, barreiras capilares e barreiras anisotrópicas. A Figura 16 ilustra os tipos de coberturas ETs.

- Coberturas monolíticas – São coberturas compostas por uma camada de solo e a camada de fundação sobrepondo o resíduo.
- Barreiras capilares – São coberturas com a seguinte configuração genérica: a camada superior de solo fino (silte, argila entre outros) sobre material de característica granular (areia, pedregulho, geotêxtil não tecido entre outros). Os parâmetros como inclinação e grau de compactação das camadas influem na qualidade das barreiras capilares (IZZU *et al.*, 2013).
- Barreiras anisotrópicas – São coberturas compostas por substrato vegetativo sobre material drenante, este sobrepondo camada de material fino que se sobrepõe a outro material drenante. Esta é uma solução que demanda maior conhecimento técnico.

As coberturas úmidas são utilizadas como forma de reduzir o fluxo de oxigênio do material isolado. Isso é obtido com a sobreposição de água ao material a ser isolado. (SILVA, 2014).

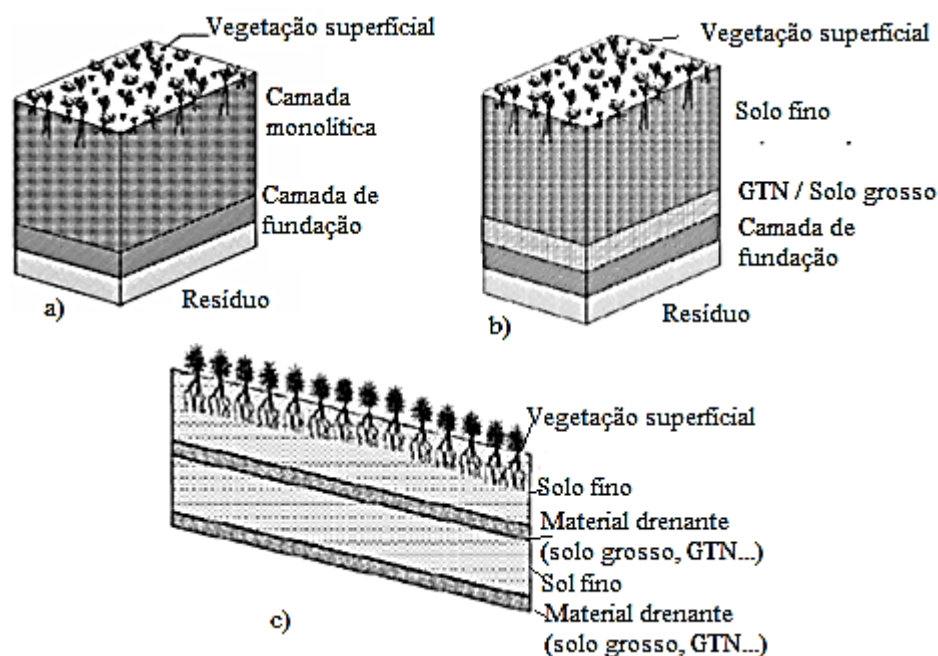


Figura 16 – a) Cobertura monolítica. b) Barreira capilar. c) Barreira anisotrópica (Zornberg; McCartney, 2007 adaptado).

Dentre vários tipos de coberturas, a utilização de solos argilosos compactados e elementos sintéticos, de forma isolada ou combinada, é o mais usual nos aterros sanitários brasileiros (NAGALLI, 2005). Locastro e De Angelis (2016) revisaram várias alternativas de barreiras impermeabilizantes (*Liners*) e suas características, desde os tradicionais solos compactados até o emprego de geossintéticos, e concluíram que de todas as barreiras impermeabilizantes, citadas no artigo, quando utilizadas como *liners* de solo compactado com geossintéticos, tiveram resultados mais favoráveis tanto para segurança quanto para o meio ambiente. Pickles e Zornberg (2012) correlacionaram diferentes propriedades de GTN e seu desempenho, quando é utilizado como constituintes de barreiras capilares, observando a sua origem de fabricação e seu estado de uso. McCartney *et al.* (2008) estudaram o uso de geotêxtil não tecido na função de barreira hidráulica à ascensão capilar e drenagem, observaram que além do barramento hidráulico, o geotêxtil pode agregar ao conjunto outras propriedades tais como proteção, separação e drenagem. De Lima *et al.* (2017) ressaltaram a repetitividade e consistência das propriedades fornecida por produtos industrializados e a viabilidade e

melhoria quando solo granular foi substituído ou agregado a geotêxtil não tecido para formação de barreiras capilares.

O uso de barreira capilar como forma de controle de fluxo de água é considerado uma prática relativamente nova se comparada a outras técnicas tradicionais. Kish (1959 *apud* De Lima *et al.*, 2017) foi o primeiro pesquisador a observar o fenômeno de barreira capilar. As barreiras capilares são sistemas estratificados com solo finos suprapostos ao material granular ou GTN, elas utilizam do contraste do tamanho dos poros dos distintos materiais para reter a água ou retardar percolação em seu contato. A condutividade hidráulica de material granular (incluindo o geotêxtil) decresce abruptamente com a redução do teor de umidade, podendo mesmo um solo granular apresentar a condutividade hidráulica muito menor em comparação a um solo fino (De Lima, 2014). É uma tecnologia empregada para controle de fluxo de água em solos não saturados e são utilizadas como coberturas finais de aterros de resíduos sólidos tal como fechamento de instalações de contenção de resíduos diversos, com principal função a retenção de porção da água da chuva dentro de si.

A retenção de umidade em solos presentes na natureza, em barreiras capilares, pode ser maximizada ou minimizada com auxílio de geotêxteis. O material grosso uniforme garante melhor desempenho da barreira capilar (Silva, 2014). Stormont *et al.*, (1999) verificaram maior eficiência para barreiras constituídas por areia grossa que barreiras constituídas por cascalho fino. O entendimento da dinâmica da barreira capilar permite a melhor análise de retenção de água no solo, o que influencia no comportamento deste e a elaboração do projeto de obra mais criterioso.

Zornberg *et al.* (2016) avaliaram a formação de barreiras capilares no contato solo com geotêxtil não tecido. As barreiras capilares causaram atraso temporário da drenagem e acréscimo na retenção de água pelo solo. Barreiras capilares com geotêxtil costumam apresentar melhor desempenho que barreiras capilares compostas unicamente de solo, pois quando os geotêxteis são inseridos adequadamente no solo, viabilizam uma maior retenção de água pelo sistema de cobertura. Contudo, barreiras capilares podem acarretar em perda e atraso da drenagem, o que nem sempre é desejado, podendo também causar impactos na estabilidade de taludes e muros, em estrutura de solo reforçado, em pavimentos, em sistema de detecção de infiltração de aterros sanitários e na agricultura (ZORNBERG *et al.*, 2010;

ZORNBERG *et al.*, 2016). O desenvolvimento de barreiras capilares usando geossintéticos favorece algumas obras geotécnicas e ambientais em detrimento de outras.

A aplicação de barreiras capilares em aterro sanitário é estudada por pesquisadores com ou sem aplicação de geossintéticos (CATAPRETA *et al.*, 2005; PORTELINHA; TROVATTO, 2014; LOCASTRO; DE ANGELIS, 2016). Na mineração, vem sendo utilizada para isolar rejeitos e estéreis sulfetados de ambientes oxidantes com presença de água, sendo fundamental na mitigação ou prevenção de drenagem ácida de mina (DAM), já que o consumo de oxigênio e a redução total ou parcial de água são fatores inibidores de DAM. Como consequência, ocorre o decréscimo da lixiviação de contaminantes que podem chegar ao lençol freático (O'KANE; BARBOUR, 2003; OLIVEIRA; MARINHO, 2007; AMORIM, 2008; PICKLES; ZORNBERG, 2012; ZORNBERG *et al.*, 2016). Os geotêxteis são amplamente empregados em fechamento de instalações de contenção de resíduos, todavia os estudos são geralmente focados em condições saturadas. Atualmente, existem bases teóricas e de dados que possibilitam melhor entendimento da interação solo geotêxtil em condição não saturada (ZORNBERG *et al.*, 2016).

A cobertura evapotranspirativa, associada a barreiras capilares, podem ser projetadas inclinadas, favorecendo a drenagem lateral no contato solo fino com material granular, já que uma vez vencidas as forças capilares, ocorrem o rompimento da barreira e a consequente infiltração no solo granular (ZORNBERG; MCCARTNEY, 2007). Heibaum (2010, *apud* DE LIMA *et al.*, 2015) define como camada capilar (*capillary layer*), a camada de solo fino que retém a água e bloco capilar (*capillary block*), a camada de material granular grosso que bloqueia a água. Siltes e argilas de baixa plasticidade são os principais solos usados como camada capilar (ZORNBERG *et al.*, 2010).

As principais vantagens das barreiras capilares são: a menor probabilidade de desenvolvimento de trincas de ressecamento, o processo construtivo é simples e pode utilizar de diversos tipos de solos, a baixa necessidade de manutenção e são de baixo custo (ZORNBERG *et al.*, 2010; DE LIMA *et al.*, 2015). Associar essas barreiras a GTN é vantajoso por se tratar de um material com controle de qualidade e de fácil instalação em campo (De Lima *et al.*, 2017). Os recursos naturais nem sempre são economicamente viáveis para construções tradicionais de coberturas finais que utilizam de solo fino compactado

(IZZO *et al.*, 2013). Locastro e Angelis (2016) atribuíram vantagem econômica e ambiental na utilização de barreira capilar como camada de cobertura em aterro sanitário.

As barreiras capilares associadas às coberturas evapotranspirativas podem ter seus desempenhos comprometidos pelo rompimento da barreira capilar, pela possibilidade de migração do material fino e pelas elevadas taxas de precipitação, que podem inviabilizar o barramento hidráulico (CARLSSON, 2002; DWYVER, 2003). Dentre as propriedades hidráulicas dos geossintéticos porosos, de interesse no projeto das barreiras, incluem a curva característica de retenção de água e a função de condutividade hidráulica, que relaciona a condutividade hidráulica do material com diferentes níveis de sucção. A função de condutividade hidráulica fornece a medida do aumento de impedância da fluidez da água com a redução do teor de umidade (ZORNBERG *et al.* 2010). A condutividade hidráulica não saturada é a propriedade mais relevante do estudo para prever o comportamento da barreira capilar (PICKLES; ZORNBERG, 2012). Dentre os fatores que influem na condutividade hidráulica do solo estão a forma e o tamanho das partículas; o índice de vazios; o grau de saturação; a composição das partículas; o arranjo estrutural; viscosidade; densidade e concentração do fluido percolante (DAS, 2008).

A condutividade hidráulica do GTN é influenciada pelo processo de sua fabricação, pelo tamanho de abertura de filtração e pelo ângulo entre água e a fibra têxtil (STORMONT *et al.*, 1997). Para o detalhamento de uma barreira capilar é importante conhecer a sucção crítica associada à ruptura capilar e a diferença comportamental da condutividade hidráulica versus o teor de umidade, entre o bloco capilar e a camada capilar (DE LIMA *et al.*, 2015). A sucção crítica é a sucção para qual o valor da condutividade hidráulica do bloco capilar e da condutividade hidráulica da camada capilar se igualam. Nesse momento, qualquer decréscimo na sucção confere o rompimento da barreira capilar e o fluido do material fino está apto a fluir para o material grosso, ou seja, a quebra da barreira capilar ocorre na interface solo fino com poros relativamente pequenos com o solo ou o geotêxtil que possuem poros relativamente grandes, onde a energia da poropressão deve ser elevada o suficiente para que a água flua no poro maior (MCCARTNEY *et al.*, 2008; ZORNBERG *et al.*, 2010; DE LIMA *et al.* 2017), Figura 17.

O efeito de quebra capilar deve ser levado em consideração em obras em meio não saturado e o seu conceito assume a continuidade de sucção, mesmo na interface de dois materiais

distintos (ZORNBERG; MCCARTNEY, 2007). O projeto apropriado de uma barreira capilar deve sempre ponderar sobre o uso de GTN na interface solo fino-solo granular, uma vez que ele proporciona um acréscimo no desempenho da barreira (ZORNBERG *et al.*, 2010).

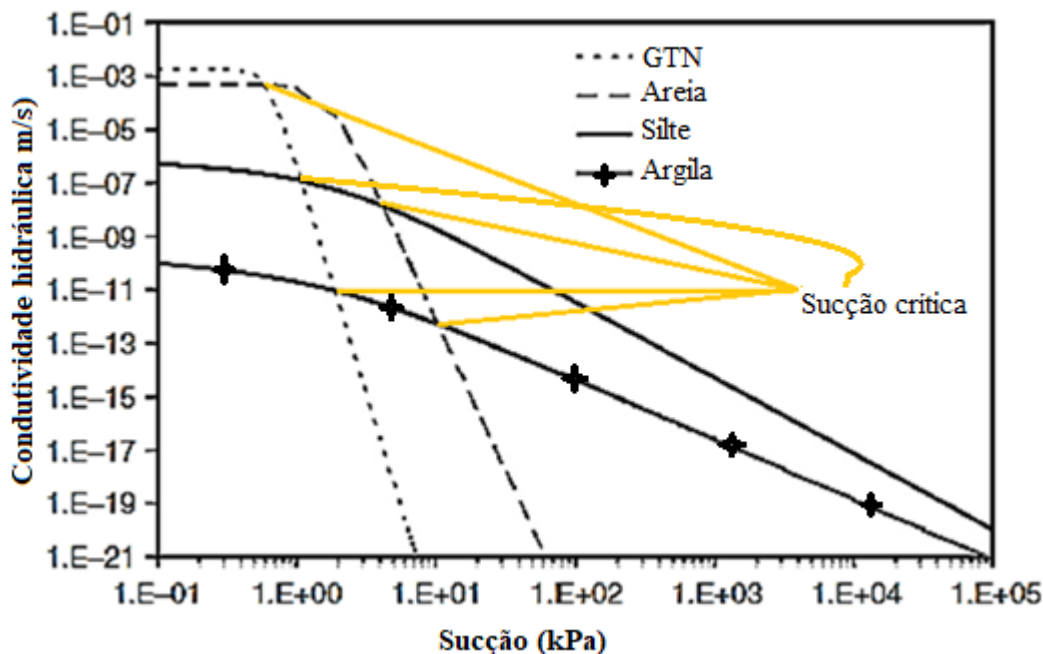


Figura 17 – Função condutividade hidráulica dos geomateriais e a sucção crítica entre eles (Zornberg; McCartney, 2007 adaptado).

Alguns pesquisadores utilizaram de barreiras capilares no desenvolvimento de suas pesquisas. Oliveira e Marinho (2007) simularam uma barreira capilar em coluna de PVC, composta por solo granular sotoposto a solo residual gnáissico, compactados na coluna e instrumentados com tensiômetros e sensores de umidade. Realizaram simulações de chuvas para verificar o desempenho da cobertura ET, isso é, verificar o “run off” e a retenção de água da barreira. Os resultados direcionaram a utilidade destes tipos de ensaios quando for projetar as barreiras capilares reais, embora os autores concordem que as barreiras experimentais, quando feitas em campo, permitem melhor observação, pois estão em ambiente real sujeito a vento, insolação, regime pluviométrico e evaporação.

Silva (2014) construiu lisímetros em escala real e, para isso, utilizou material de pilhas de lixiviação desativadas, estéril britado sobrepondo o rejeito seco com intensão de proteger este do contato com a água. Entre o material fino de pilhas de lixiviação e o estéril britado foi posto GTN para evitar migração de finos e consequentemente a colmatação do estéril britado. Os lisímetros simularam coberturas ETs associadas à barreira capilar,

Portelinha e Trovatto (2014) avaliaram, por ensaio de coluna de infiltração com início em distintos teores de umidade, a quebra da barreira capilar e o desempenho desta. Os pesquisadores usaram solos lateríticos e areia argilosa em interface com geotêxteis não tecidos agulhados de filamentos curtos de poliéster.

2.5 Métodos, Aparelhagens Comuns para Mensuração de Sucção e Determinação da CCRA

Metodologias diferentes são utilizadas tanto para a mensuração da sucção total quanto para a sucção matricial. Diversos fatores como o tipo do solo, amplitude de sucção medida, tempo de equalização e presença de sais ou contaminantes podem influenciar nos resultados das medidas e, por conseguinte na CCRA. A compreensão da metodologia de medição correta para específica variação de sucção é importante para o traçado de uma CCRA mais representativa, inferindo uma melhor compreensão do comportamento do solo não saturado (SINGH; SREEDEEP, 2011).

Os métodos de mensuração da sucção em solos são divididos em métodos diretos e métodos indiretos (AGUS; SCHANZ, 2005):

- Método direto – Mensura sucção matricial. (*e.g.* tensiômetro de sonda com cápsula de cerâmica).
- Método indireto – Mensura sucção matricial, osmótica e total. Usa sensores que medem outros parâmetros, tais como, umidade relativa, resistividade e condutividade e os relacionam por calibração com a sucção.

Uma análise química do solo é primordial quando for realizada mensuração de sucção total. Os métodos podem ser complementares, devendo ser explicitada a metodologia empregada para cada faixa de sucção (SINGH; SREEDEEP, 2011), uma vez que diferentes técnicas podem fornecer resultados similares e / ou continuidade na CCRA.

Haghighi *et al.* (2011) alertaram sobre a importância da escolha da técnica de medida de sucção para garantir a confiabilidade dos dados obtidos. Como exemplo, citaram os métodos que utilizam do conceito de umidade relativa, onde pequenas variações térmicas podem resultar em erros significativos.

As técnicas de campo se restringem a medição da sucção, enquanto as técnicas laboratoriais podem ser controladas com induções da sucção desejada. Independente da instrumentação a curva de retenção de água será obtida em condições de equilíbrio instrumento-sistema, tornando viável a correlação do teor de água no solo e seu estado de tensão. Consideração sobre a determinação da curva de retenção de água segundo a sua trajetória de secagem e de umedecimento é relevante e não se deve negligencia-la. A execução da trajetória de secagem é mais simples e por isso mais comum, todavia é importante direcionar a trajetória conforme a problemática envolvida e ressaltar que a maioria dos problemas em solo não saturado associam-se à trajetória de umedecimento (e. g. colapso e expansão consequente do umedecimento, estabilidade de taludes, ruptura de barreira capilar...). Os ensaios de trajetória de secagem são realizados na determinação de curva de secagem a partir de sucção nula ou a partir de uma sucção inicial não nula. No caso da sucção nula, determina-se a sucção inicial do solo amostrado e, em seguida, satura-se o mesmo vagarosamente. Para situações onde a sucção inicial é muito elevada, como em alguns solos expansivos, a saturação deverá ser feita com vapor de água frio para evitar possíveis trincas na amostra com a absorção da água. A curva de secagem obtida a partir da sucção inicial nula é fornecida com acréscimo de sucção subsequentes. Mesma lógica de procedimento pode ser realizada em trajetórias de umedecimento. Quando a amostra é submetida às duas trajetórias, fornece a CCRA mista, Marinho *et al* (2015).

A tensão de confinamento influi na retenção de água pelo solo, principalmente em solos muito compressíveis. É importante o conhecimento da condição de referência inicial, estado de tensão e estado de volume do solo amostrado natural ou compactado, determinando a sucção inicial e o correspondente teor de umidade e grau de saturação, estendendo essas determinações para o caso de amostra remoldada, que deverá ser representativa da situação de campo. A medição do volume total do corpo de prova em ensaio é necessária para a determinação do volume de água (teor de umidade volumétrico ou grau de saturação), sendo dispensável apenas em material que sofrerá irrisória variação volumétrica, pois nessa situação o volume do corpo de prova é fixo e limitando-se a medir a flutuação do volume de água retida no solo, obtendo-se θ e S .

Na impossibilidade de controlar a liberação de água com o aumento de sucção, é sugerido confeccionar várias amostras para se utilizar a cada sucção desejada e obter o teor de umidade relativo (MARINHO *et al.*, 2015).

A sucção total se mede relacionando a água intersticial com a água pura. Já a sucção matricial relaciona água de mesma composição. As técnicas de medição de sucção matricial e osmótica seguem o mesmo princípio, porém a sucção osmótica é em termos de pressão de vapor parcial (MARINHO, 1997). Algumas técnicas de medição de sucção são listadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais técnicas de medir sucção (Marinho, 1997)

Técnica	Sucção Matricial	Sucção Osmótica	Sucção Total	Intervalo (kPa)
Psicrômetro		X	X	100 - 8000
Papel Filtro	X		X	0 - 29000
Tensiômetro	X		X	0 - 90 0 - 1000
Translação dos Eixos	X			0 - 1500
Condutividade térmica	X			0 - 400
Condutividade elétrica	X			20 -1500

As sucções podem ser medidas por sensores. O sensor é um elemento com capacidade de reação à grandeza a ser detectada e / ou medida. Os sensores podem fornecer medidas diretas ou indiretas e necessitam de calibração (MARINHO, 1997). Os sensores utilizados na medição de sucção podem ser térmicos (e.g. psicrômetro), elétricos e reflectômetros de domínio do tempo e de pressão (manômetros a vácuo, manômetro de mercúrio e transdutor elétrico de pressão). Ao optar pelo uso de sensores, os mesmos devem ser calibrados

diretamente pela sucção, evitando fazer da CCRA um conversor de umidade para a sucção (MARINHO, 1997).

Hipoteticamente, qualquer sistema que forneça acurada correlação de alguma grandeza física com o teor de umidade pode ser utilizado para mensurar sucção. Algumas características de diferentes tipos de sensores de medição de sucção:

- Sensores elétricos – utilizam correlação das propriedades elétricas com o teor de umidade e, conseqüentemente, sucção. Sua curva de calibração é a relação de sucção e resistência elétrica. São pouco utilizados e de difícil calibração, pois depende da condutividade da água que só existirá com a dissolução de sais e é variável conforme a proporção de soluto-solvente.
- TDRs (*Time Domain Reflectometry*) – Determinam o teor de umidade volumétrico por reflexão de onda magnética obtendo a constante dielétrica do solo. Fatores de influência: a porosidade do solo e o teor de sais do solo, podendo ser remediados por incorporação de material cerâmico ao sensor. A calibração específica para cada solo pode ser necessária.
- Manômetros de mercúrio – Não precisam de calibração, apenas de corrigir densidade e altura da coluna de água (STANNARD, 1992 *apud* MARINHO, 1997).
- Manômetros a vácuo – Embora de fácil manutenção, são de baixa acuracidade;
- Transdutores elétricos de pressão – São vantajosos na aquisição de volume considerável de dados e por possibilitarem o monitoramento remoto. Necessitam de pouco fluxo de água para entrar em equilíbrio com o solo, o que possibilita rápida resposta e com baixa interferência da água do aparelho no solo a ser ensaiado.

Nessa pesquisa, foi utilizado o sensor de matriz granular que mensura a resistividade do solo. Este sensor é composto por eletrodos (sensores elétricos) inseridos em quartzo granular, envoltos por membrana e malha de aço e por vezes gesso. A calibração é feita em fábrica, todavia deve ser verificada (MARINHO *et al.*, 2015), Figura 18. O princípio básico dos sensores de matriz granular é a alteração da condutividade hidráulica com a variação do teor de umidade. Estes sensores mensuram de 0 a 239 kPa e só precisam de manutenção caso o solo ou sensor ressequem por completo. Devido ao seu tamanho, seu uso é restrito ao laboratório.



Figura 18 – (a) Sensor de matriz granular. (b) Datalogger Watermark Monitor 900M (Marinho *et al.*, 2015).

Masrouri *et al.*(2008) sintetizaram o estado da arte de vários ensaios laboratoriais para caracterização hidráulica de solos não saturados e resumiram os principais métodos de medida e controle da sucção, Tabela 5.

Tabela 5 – Técnicas de medida e controle de sucção (Masrouri *et al.*, 2008).

Técnica	Componente da sucção	Meio de se medir ou controlar a sucção	Intervalo da sucção (kPa)	Trajetória da sucção disponível	
Por medida de Sucção	Tensiômetro	Matricial	Direta	0-100 (1.500)	
	Sensor de condutividade elétrica/termal	Matricial	Condutividade térmica	10 – 4000	
	Papel filtro	Matricial / total	Teor de umidade do papel	100 – 3000	
	Psicrômetro, higrômetro, sensor de capacitância	Total	Umidade de vapor	100 – 100000	
Por controle de sucção	Placa de pressão	Matricial	Pressão de ar	10 – 1500	Secagem/umedecimento
	Coluna de solo	Matricial/total	Carga hidráulica negativa	0 – 100	Secagem
	Centrífuga	Matricial	Força centrífuga	10 – 1500	Secagem
	Osmótica	Matricial	Pressão osmótica	0 – 1000	Secagem/umedecimento
	Equilíbrio vapor	Total	Solução salina	3000 – 1000000	Secagem/umedecimento

Outro sensor usado na mensuração da sucção matricial de 0 até 100 kPa é o tensiômetro. O limite superior de medida da sucção, por esse sensor, é dado pela cavitação (MARINHO, 1997). A medição direta da sucção matricial nesse dispositivo é possível, pois os sais dissolvidos na água do solo possuem livre acesso no sistema. Os componentes básicos de um tensiômetro podem ser vistos na Figura 19 e são (MARINHO, 1997 e MARINHO *et al.*, 2015):

- Elemento poroso – É um material cerâmico (pedra porosa), tem a função de manter a continuidade hidráulica do sistema. O fluxo mantido entre o tensiômetro-solo determina a rapidez da medição. O valor da entrada de ar da pedra porosa determina a capacidade de manter o sistema de medição sem ar;
- Sensores de medida – As leituras das medidas são geralmente realizadas em manômetros a vácuo, manômetros de mercúrio ou transdutores elétricos de pressão.

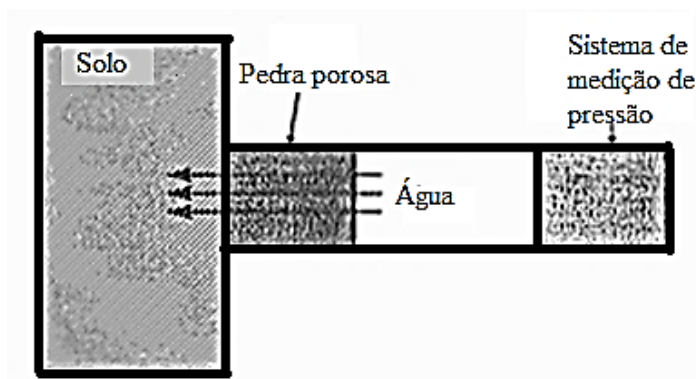


Figura 19 – Elementos de um tensiômetro (Marinho, 1997).

Deve-se tomar cuidado especial com a água usada nos tensiômetros, pois é essa água que fornece a continuidade hidráulica necessária ao bom funcionamento destes equipamentos. Se possível, elimina-se núcleos de cavitação e, na saturação dos tensiômetros, se utiliza de água desaerada e limpa. A pedra porosa deve ser adequadamente saturada, limpa e com as bolhas de ar removidas, garantindo à boa acuracidade do equipamento. Para uma mensuração criteriosa, se verifica a integridade do equipamento, define o referencial de media, calibra e dá a manutenção necessária ao aparelho.

Os psicrômetros também são utilizados na medição da sucção. São transdutores térmicos e, se devidamente calibrados, mensuram a temperatura. Utilizam de propriedades específicas do material para determinação da umidade. São comumente utilizados na medida de sucção total superior a 100 kPa e menores que 10 MPa. O transdutor térmico mais conhecido é o termômetro de mercúrio, que fornece a temperatura conforme sua expansão ou contração. Porém, por causa da sua elevada capacidade térmica, a troca de calor com a amostra é induzida e, com variações rápidas de temperatura, o termômetro não responde. Os psicrômetros elétricos fornecem a sucção total a partir de curva de calibração, que relaciona a mesma com a voltagem. O funcionamento dos psicrômetros elétricos é devido aos efeitos Seebeck e Peltier, que são fenômenos termoelétricos (MARINHO, 1997). Os psicrômetros também são utilizados na determinação de sucção osmótica de água intersticial retirada do solo (MARINHO, 1997).

As técnicas para determinação da curva de retenção de água podem se dividir em dois grupos principais, as técnicas físicas (baixas sucções) e as técnicas termodinâmicas (elevadas sucções). A determinação desta curva, conforme ASTM D6836 (2002), é em processo de secagem e relaciona sucção com teor de umidade volumétrico, teor de umidade gravimétrico ou grau de saturação. Os métodos mais adotados, e de relativa simplicidade laboratorial, para determinação da curva de retenção são (MARINHO *et al.*, 2015):

- Placa de sucção
- Placa de pressão
- Método do Papel Filtro
- Método do equilíbrio vapor

A placa de sucção (coluna suspensa ou funil de Haines) é uma técnica aconselhada, em condições ideais, para experimentos com sucção entre 0 a 70 kPa, todavia pelas condições laboratoriais e problemas de continuidade hidráulica do sistema, o intervalo de sucção pode se restringir de 0 a 40 kPa. O método é acurado para porção inicial da curva de retenção, não representativo para materiais com elevado valor de sucção de entrada de ar. Apenas a curva de secagem é mencionada como medida por Marinho *et al.* (2015), embora, De Lima (2014) realizou ensaios com essa técnica em geotêxteis segundo a trajetória de secagem e a trajetória de umedecimento. As placas de sucção funcionam com o princípio do equilíbrio de carga hidráulica entre dois pontos na coluna do sistema, Figura 20 e Equações (40 e 41).

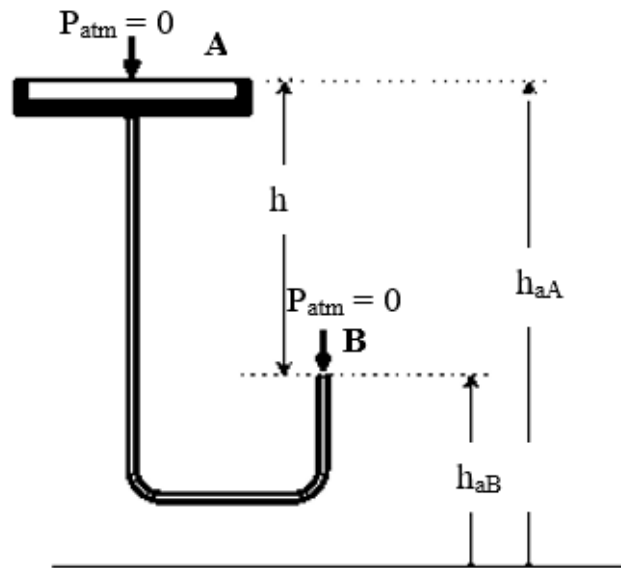


Figura 20 – Representação esquemática do ensaio de coluna suspensa (Marinho *et al.*, 2015).

$$h_{tA} = h_{pA} + h_{aA} \quad \text{Equação (40)}$$

$$h_{tB} = h_{pB} + h_{aB} \quad \text{Equação (41)}$$

Onde:

h_t – Carga total;

h_p – Carga piezométrica;

h_a – Carga altimétrica;

A e B , são pontos no sistema.

Assumindo o equilíbrio entre cargas A e B , e adotando a carga piezométrica em B como nula tem-se a carga piezométrica em A como, Equação (42).

$$h_{pA} = -(h_{aA} - h_{aB}) = -h \quad \text{Equação (42)}$$

Existindo a continuidade hidráulica entre a água do material poroso e a placa de sucção, e a placa sendo capaz de suportar a pressão negativa (sucção) imposta, segue para a Equação (43).

$$(u_a - u_w)_A = h\gamma_w \quad \text{Equação (43)}$$

Assumindo que no equilíbrio a carga hidráulica é constante, a sucção matricial no ponto médio do corpo de prova será conforme a Equação (44).

$$(u_a - u_w)_m = \left(h + \frac{h_{cp}}{2} \right) \gamma_w \quad \text{Equação (44)}$$

Sendo:

$(u_a - u_w)_m$ – Sucção matricial média;

h_{cp} – Altura do corpo de prova.

Geralmente esse ensaio é utilizado para solos granulares de drenagem imediata, com pouca contribuição de finos. Na realização do ensaio da coluna suspensa, aplicam-se várias sucções matriciais e mede-se o teor de umidade relativo a cada sucção. A aplicação da sucção se dará por redução da poropressão da água enquanto a poropressão do gás é mantida na pressão atmosférica. A amostra de solo saturado é posta em contato com placa porosa saturada, um fluxo de água descendente ocorre no sistema, devido à sucção matricial aplicada, até que o teor de umidade de equilíbrio (fim do fluxo) é alcançado. Repetindo o procedimento para várias sucções, com seus respectivos teores de umidade correspondentes, tem-se a curva de retenção desejada na trajetória de secagem. O teor de umidade para determinada sucção aplicada é determinado pelo volume de água “expulso” da amostra e medido em um tubo capilar, sendo que o teor de umidade inicial deve ser conhecido. Cássaro *et al.* (2008) utilizaram esta técnica com sucesso e, substituíram a placa porosa por um solo suficientemente fino garantindo entrada de ar em valores tais que a continuidade hidráulica do ensaio não ficou comprometida.

Diferente de outros ensaios já consagrados na determinação de curva de retenção, que muitas vezes são demorados e usam amostras em demasia para uma obtenção insignificante de

dados, o ensaio de coluna suspensa costuma ser mais rápido e menos dispendioso. Todavia, o ensaio em discussão também é susceptível a percalços como o problema na difusão de ar pela pedra porosa, a variação do volume durante secagem, o umedecimento não controlado e a não representatividade da situação de campo (ZORNBERG *et al.*, 2010).

O valor de entrada de ar da placa de sucção deve ser compatível com o valor máximo de sucção que será imposta. As placas de sucção com elevado valor de entrada de ar, por serem pouco permeáveis, resultam em ensaios mais demorados, com lentidão na liberação da água drenada do material poroso e no equilíbrio do sistema (MARINHO *et al.*, 2015). A placa porosa deve ser testada, tanto para verificar se sua entrada de ar atende o pleito quanto para ver se seus poros estão obstruídos. O solo deve possuir apenas dois fluidos intersticiais sendo um gás e um líquido. Geralmente o gás é o ar e o líquido a água. Ao utilizar outros líquidos, atentar se causam encolhimento ou expansão da matriz do solo. A investigação completa do ensaio deve ser realizada por correlações de campo (ASTM D 6836 2002).

A Figura 21 ilustra o aparelho padrão que é utilizado no ensaio de coluna suspensa, o qual é composto por três partes:

- Câmara da amostra – Câmara composta por funil de vidro ou plástico rígido com placa porosa. O funil é conhecido como Funil Büchner;
- Tubo para medir o fluxo – O tubo capilar se conecta a extremidade fim do funil e ao gerador de sucção. O tubo deve estar livre de sujeira, óleo ou qualquer contaminante e a sua escala deve ter resolução mínima de 1 ml;
- Gerador de sucção – A sucção é gerada por dois reservatórios, nos quais a elevação relativa entre eles é ajustada desenvolvendo um vácuo, que é transmitido ao tubo capilar. A sucção aplicada é medida por um manômetro com resolução de 1 mm de água.

As amostras ensaiadas são contidas por anéis de retenção com altura mínima de 5 mm e diâmetro interno de 25 mm. A espessura da parede deve ser suficiente para reter, mas não deformar as amostras. Os anéis são geralmente feitos de aço inoxidável, acrílico ou cloreto de polivinila (PVC). A forma de saturação dos constituintes, temperatura de laboratório para ensaio, fluido utilizado, cuidados e preparos da amostra são detalhadas na norma ASTM D 6836 (2002).

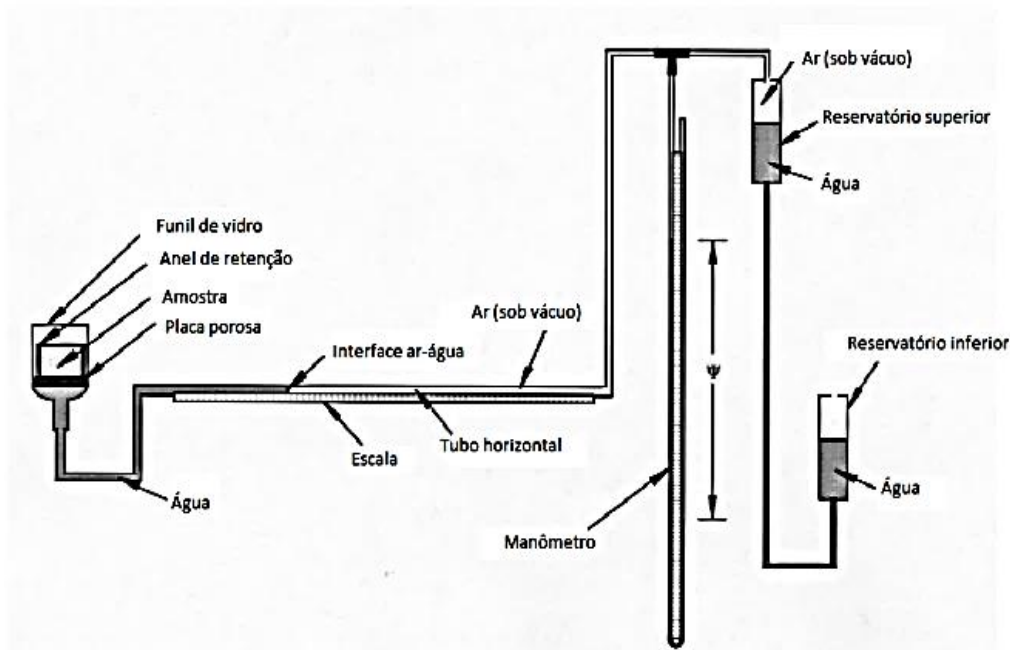


Figura 21 – Esquema do aparato de ensaio de coluna suspensa, ASTM D 6836 (2002).

O teor de umidade da amostra para cada estado do ensaio é fornecido pelas Equações (45 e 46).

$$w(\%) = 100 \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \quad \text{Equação (45)}$$

$$\theta(\%) = 100 \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad \text{Equação (46)}$$

Onde:

M_{su} – Massa do solo úmido após equilíbrio do sistema;

M_{ss} – Massa do solo seco obtida ao término do ensaio.

Stormont *et al.* (1997) foram os pioneiros na metodologia para determinar a curva característica de geossintéticos, em particular geotêxtil não tecido de polipropileno, para isso eles adaptaram o ensaio de coluna suspensa, Figura 22. Por ser um ensaio de elaboração

relativamente simples e de baixo custo pode ser disponibilizado em diversas instituições de ensino e empresas. No Brasil, De Lima (2014) utilizou dessa metodologia em sua tese de doutoramento na Universidade de Brasília.

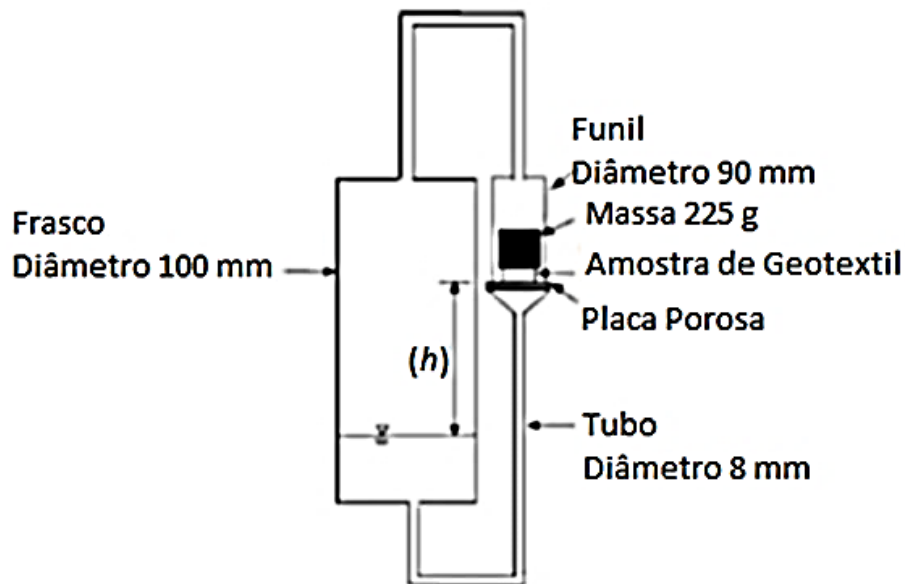


Figura 22 – Ensaio de coluna suspensa modificado para geotêxteis não tecido (Stormont *et al.*, 1997 adaptado).

A cavitação pode ser um grande inconveniente para equipamentos como a placa de sucção e tensiômetros. Contorna-se esse problema na placa de pressão através da técnica da translação dos eixos, a qual altera o referencial de pressão do ar. A sucção matricial é igual à diferença entre pressão de ar e a pressão da água e, embasada nesse princípio, é elaborada a técnica de translação de eixos, técnica esta que também é utilizada em ensaios geotécnicos com oedômetro, compressão triaxial e cisalhamento direto. Essa técnica é empregada tanto para controlar a sucção do ensaio quanto para medir a sucção da amostra de solo (MARINHO, 1997).

Na escolha de uma placa porosa deve observar o seu valor de entrada de ar, pois, para um maior valor de entrada de ar de um material, menor será o tamanho dos seus poros e sua permeabilidade, o que pode inviabilizar o ensaio, uma vez que o tempo de equilíbrio do experimento pode se tornar demasiado longo. Como proposta, sugerem-se para os ensaios elementos porosos de entrada de ar de 100 kPa para areia, 300 kPa para siltes, e 500 a 1500 kPa para argilas. Existem situações especiais como as argilas porosas, solos compactados com baixa energia e certos solos tropicais em que o elemento poroso a ser utilizado tem entrada de

ar de 100 kPa. O material deve ser sempre bem caracterizado para escolha correta do elemento poroso (MARINHO *et al.*, 2015). Os ensaios, a exemplo da placa de sucção, são realizados com aproveitamento da amostra para o estágio seguinte de sucção (materiais coesivos, geotêxteis) ou com a utilização de um novo corpo de prova para cada estágio de sucção do ensaio (materiais granulares) (MARINHO *et al.*, 2015).

Já a técnica do papel filtro é simples e pouco onerosa, indicada para medir sucções entre 10 a 100.000 kPa, todavia a execução de seu ensaio deve ser criteriosa para obter bons resultados. Diferenciando de outros métodos, o papel filtro não impõe sucções controlada. É uma técnica de quantificação indireta da sucção matricial ou total. O ensaio do papel filtro se resume na transferência de água do solo para o papel, até que ambos atinjam o equilíbrio. No contato direto solo-papel, o fluxo capilar vence tensões capilares e se mede a sucção matricial. O fluxo de vapor vencendo forças osmóticas e capilares ocorre quando não há contato solo-papel, fornecendo a sucção total (MARINHO *et al.*, 2015), Figura 23.

O método é fundamentado no equilíbrio de pressão, obtido pela absorção da água do solo, com umidade superior, pelo papel filtro. A produção padronizada do papel filtro permite a confecção de produto com mesmas características de absorção garantindo a confiabilidade do método. A apuração da sucção matricial ou total pode ser realizada em uma mesma amostra, observando que o tempo de equilíbrio será em função da sucção total. Define-se estado de equilíbrio quando o papel filtro e a amostra possuem a mesma sucção (MARINHO 1997; MARINHO *et al.*, 2015).

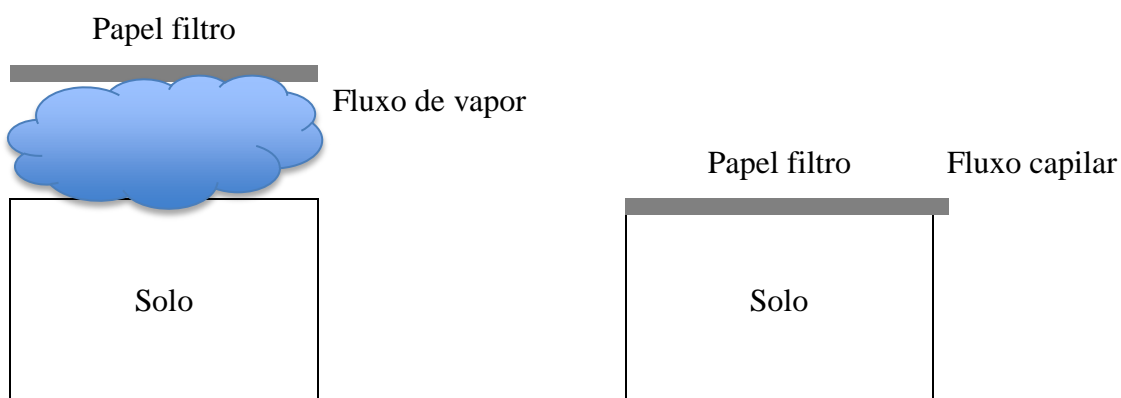


Figura 23 – Técnica do papel filtro sem contato (sucção total) e com contato (sucção matricial) (Marinho *et al.*, 2015).

Respeitando o tempo de equilíbrio na medição da sucção matricial, o grau de contato solo-papel filtro pouco influencia (MARINHO, 1994 *apud* MARINHO, 1997). Para qualquer sucção matricial, o tempo de equilíbrio é de pelo menos 7 dias, já para a sucção total, segue o tempo de equilíbrio necessário como exposto na Tabela 6 (MARINHO *et al.*, 2015).

Tabela 6 – Tempo de equilíbrio para sucção total (Marinho, 1994 *apud* Marinho *et al.*, 2015)

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

Na ASTM D 5298 (2010), a sugestão é secar o papel filtro em estufa durante 16 horas. Esse procedimento é controverso, visto que existem opiniões de que ele afeta o padrão de absorção do papel e, conseqüentemente, provoca a mudança na curva de calibração (MARINHO *et al.*, 2015). A própria curva característica do papel filtro é sua curva de calibração. Ao aplicar a calibração, deve-se atentar para a presença ou não de fungicida no papel (MARINHO, 1997).

Uma metodologia que possibilita a imposição de valores elevados de sucção total é a do equilíbrio vapor. Nesse método, a sucção total é obtida pela umidade relativa do ar (*UR*) (MARINHO *et al.*, 2015), Equação (47).

Onde:

$$UR = \frac{p_v}{p_{v0}} \quad \text{Equação (47)}$$

p_v – Pressão parcial de vapor do ar e p_{v0} – Pressão parcial de saturação de vapor de ar, onde a pressão parcial de saturação de vapor de ar é a máxima pressão parcial antes da condensação e é influenciada pela temperatura.

A umidade relativa do ar e a sucção total se relacionam através da Equação (48).

$$\psi = -\frac{\gamma_w RT}{Mg} \ln(UR) \quad \text{Equação (48)}$$

Onde: ψ – Sucção total; R – Constante universal dos gases perfeitos; T – Temperatura em kelvin; M – Massa molecular da água e g – Aceleração da gravidade.

A umidade relativa (UR) é a razão entre a quantidade de vapor de água atual e a máxima quantidade de vapor que pode ser retido em determinada temperatura. Ela também é representada pela razão entre pressão de vapor parcial e a pressão de saturação de vapor multiplicada por 100. A UR não depende da altitude, embora as pressões de vapores variem com esta. A água também é retida pelo ar e esta retenção é influenciada pela temperatura. A temperatura na qual a máxima quantidade de vapor de água pode ser contida pelo ar é denominada o ponto de orvalho. Quanto mais quente o ar maior a sua capacidade de retenção de vapor de água, Tabela 7 (MARINHO, 1997).

Tabela 7 – Influência da temperatura na retenção de água pelo ar (Marinho, 1997)

Temperatura (°C)	Quantidade de vapor de água/ m ³ de ar (g)
30	30
20	17
10	9

A imposição da sucção pode ser realizada no método de equilíbrio vapor desde que a amostra de solo se equilibre com o ambiente através de soluções saturadas ou com uso de ácidos fornecendo a sucção total. A UR responde diferentemente para diferentes soluções salinas saturadas. O método é usado como medida de referência e para calibração de outros aparelhos (MARINHO *et al.*, 2015). O tempo de equilíbrio para o método do papel filtro também é aplicável na metodologia da UR , ciente que a dimensão e quantidade da amostra podem influir nesse tempo. O ensaio é do tipo não destrutivo, mas se o tempo de equilíbrio for demasiado demorado, ensaios em paralelo podem ser realizados (MARINHO *et al.*, 2015). O

potenciômetro de condensação da água é exemplo de um equipamento que se baseia no princípio da umidade relativa e mensura a sucção total (SINGH; SREEDEEP, 2011).

O ensaio de coluna de solo também é utilizado na determinação de CCRA. Ele ocorre com a imposição de umedecimento ou secagem em uma coluna unidimensional monitorada com sensores de umidade, sucção e temperatura, possibilitando a aquisição de amplo volume de dados para a determinação da CCRA e função condutividade hidráulica. O monitoramento da coluna de solo contribui para o estudo de barreiras capilares, permitindo a avaliação de seu desempenho. A instrumentação geralmente é aferida para sucção matricial, uma vez que esta determina o comportamento do solo (GITIRANA JR. *et al.*, 2015). O ensaio de coluna suspensa é utilizado na determinação da curva característica de GTNs. De lima *et al.* (2014) mostraram que essa técnica é adequada e evidencia a elevada histerese dos GTNs,

A partir da distribuição porosimétrica de um material, pode-se inferir a sua CCRA. Dessa forma, métodos de determinação de distribuição porosimétrica também auxiliam na obtenção da CCRA (FREDLUND; XING, 1994). Os melhores métodos de mensuração de sucção serão aqueles que fornecerem respostas acuradas rápidas e com capacidade de registro constante de ocasionais alterações na sucção (MARINHO, 1997).

Outra forma de avaliar a retenção de água no solo é por instrumentação em campo utilizando lisímetros. Contudo, estes tendem a subestimar a percolação na parte inferior devido à formação de barreira capilar. Zornberg *et al.* (2010) relataram que, muitas vezes, a barreira é erroneamente negligenciada.

A curva de retenção de água e a função de condutividade hidráulica também são importantes propriedades hidráulicas de geotêxteis não tecidos. Um ensaio de fácil execução para caracterização do geotêxtil, não aplicados a solos, é o ensaio de ascensão capilar, onde uma tira do geotêxtil a ser amostrado entra em contato com água e é analisada a ascensão capilar correspondente (ZORNBERG *et al.*, 2010). O ensaio de ascensão capilar refere-se à ascensão paralela ao comprimento do geotêxtil (*in-plane*), cada cota do “capilar” relativa ao nível de água de base possui uma sucção que corresponde ao produto da cota pelo peso específico da água, o que fornece dados suficientes para a determinação de CCRA, onde a poropressão varia com a cota e o teor de umidade dependerá das características do material (GITIRANA JR. *et al.*, 2015). Na Tabela 8, cita-se alguns pesquisadores e a metodologia pela qual determinaram a CCRA.

Tabela 8 – Metodologia escolhida por alguns pesquisadores na determinação da CCRA

Metodologia	Pesquisador
Coluna suspensa	Bareither; Benson (2013), Berg; Illman (2012), De Lima (2014); Feia <i>et al.</i> (2014), McCartney <i>et al.</i> (2008) e Stormont <i>et al.</i> (1997)
Coluna de solo monitorada	Moreira (2011) e Zornberg <i>et al.</i> (2016)
Distribuição porosimétrica	De Lima (2014)
Lisímetro	Moreira (2011)
Papel Filtro	Azam <i>et al.</i> (2015), Ribeiro <i>et al.</i> (2012) e Zornberg <i>et al.</i> (2016)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos empregados nesse trabalho são detalhados nos tópicos contidos nesse capítulo. Foram simuladas em laboratório, através de colunas de solo de umedecimento e secagem, barreiras capilares de solo residual sobrepondo GTNs. O solo residual e os GTNs foram caracterizados e suas CCRA's determinadas pelo ensaio de coluna suspensa (solo residual e GTNs) e pelo ensaio de papel filtro (solo residual). A partir das CCRA's do solo residual e dos GTNs e do monitoramento da coluna de solo de umedecimento e secagem a avaliação da retenção da barreira capilar pode ser realizada, **Figura 24**.

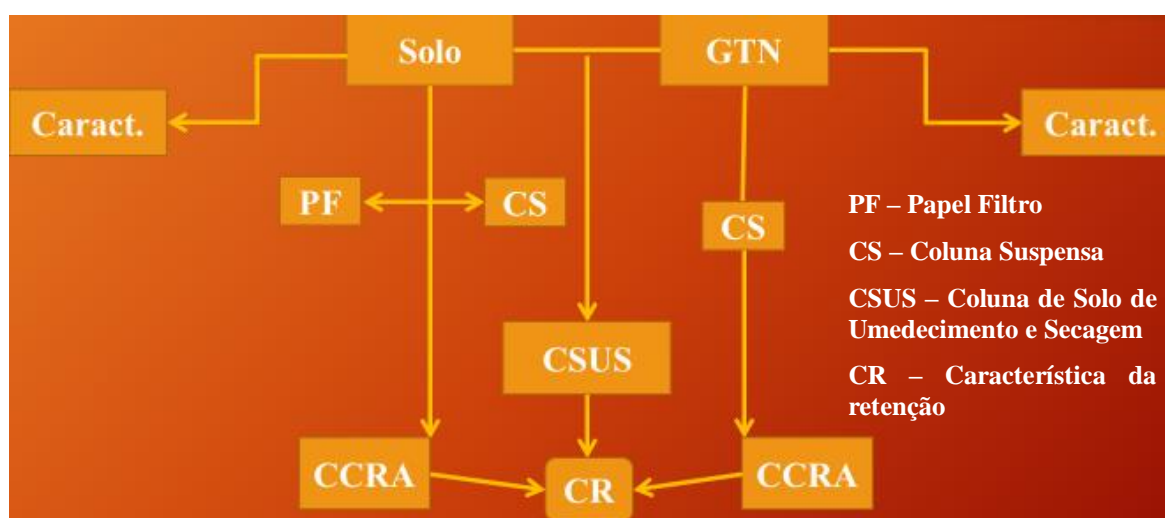


Figura 24 – Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa.

3.1 Materiais Constituintes da Barreira Capilar

Na confecção dos modelos reduzidos de barreiras capilares, foi utilizado solo residual, GTN, pedrisco e brita. As barreiras capilares foram instrumentadas para aferição de sucção matricial, temperatura e teor de umidade volumétrico.

3.1.1 Solo Residual

Um solo residual do Complexo Belo Horizonte (granito – gnaisse) foi o material escolhido para formar a camada capilar da barreira. Ele foi retirado na região de Margazânia, mais especificamente nas coordenadas UTM 617334 m E; 7799565 m S, Fuso 23k e *datum* horizontal de referência WGS 84. A retirada da amostra deformada limitou-se ao horizonte do

intervalo de 1 a 2 metros de profundidade, onde foram retirados aproximadamente 200 kg desse material, Figura 25 e Figura 26.



Figura 25 – Vista de satélite da região de amostragem do solo residual (Google Earth Pro, 2018).



Figura 26 – Solo residual de rocha granito-gnáissica do complexo Belo Horizonte *in situ*.

A Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH – está inserida na zona de clima tropical de altitude com inverno seco, verão úmido e temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, sendo pontualmente relacionada a clima tropical de savana com estação seca de inverno, conforme a classificação de Köppen e Geiger (1928). A precipitação média anual é inferior a 1500 mm e os ventos predominantes possuem direção sudeste oscilante para leste e nordeste ao longo do ano (SÁ JUNIOR, 2009). A maior parte da RMBH assenta-se na porção sul do Cráton do São Francisco. Os crátons são partes de um antigo continente, com relativa estabilidade, e no caso do Cráton citado são cercados por faixas móveis correlatas a orogêneses fanerozóicas (ALKMIM, 2004). Segundo Almeida (1977), o Cráton São Francisco possui como faixas móveis correlatas as de Riacho do Pontal, Sergipana, Araçuaí, Alto Rio Grande, Brasília e Rio Preto (Figura 27) faixas estas influenciadas pela orogênese Brasiliana (700-500 Ma) circundando rochas litosféricas remanescentes de datação arqueanas e paleoproterozóicas que compõem o embasamento cristalino (NOCE *et al.* 1998). No Cráton do São Francisco também ocorrem litotipos de idade paleozóica à meesoproterozóica pertencentes ao Supergrupo Espinhaço, os litotipos de idade neoproterozóica pertencentes ao Supergrupo São Francisco e coberturas fanerozóicas. No caso da RMBH, vasta extensão encontra-se sobre rochas do embasamento e uma pequena porção insere-se no diversificado quadrilátero ferrífero.

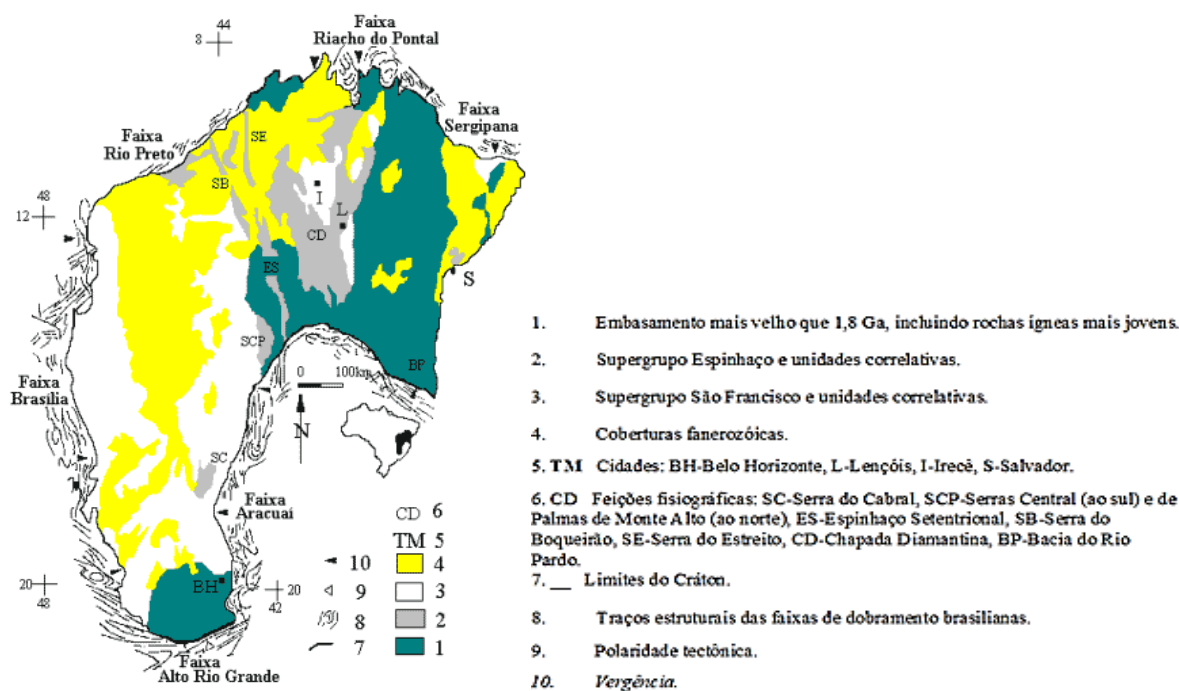


Figura 27 – O Cráton do São Francisco, (modificado de Alkmim *et al.* 1996).

Silva *et al.* (1995), em trabalho realizado em parceria com a prefeitura de Belo Horizonte, explanaram a diversidade do quadrilátero ferrífero composto por complexo granito-gnáissico de idade arqueana, seqüências metavulcano-sedimentares arqueanas do Supergrupo Rio das Velhas, seqüências metassedimentares paleoproterozóicas do Supergrupo Minas e metassedimentos terrígenos do Grupo Itacolomi. Renger *et al.* (1994) ilustraram um esboço do quadrilátero ferrífero, os seus complexos relacionados e sua distribuição estratigráfica, Figura 28.

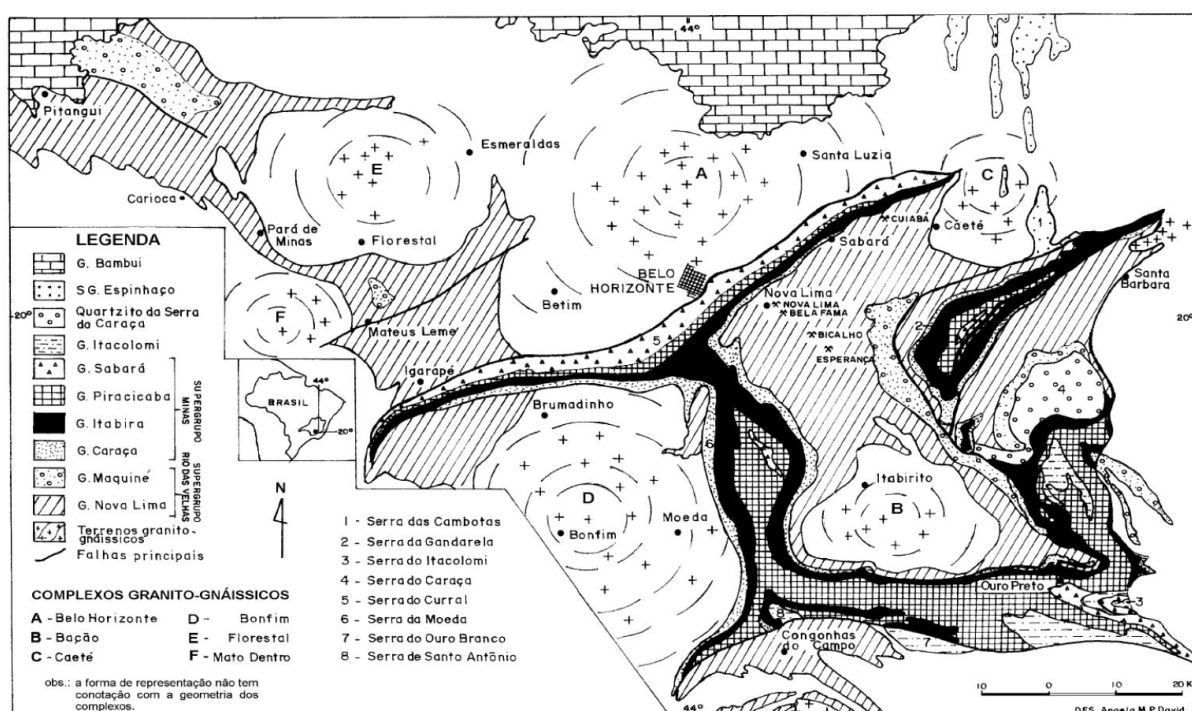


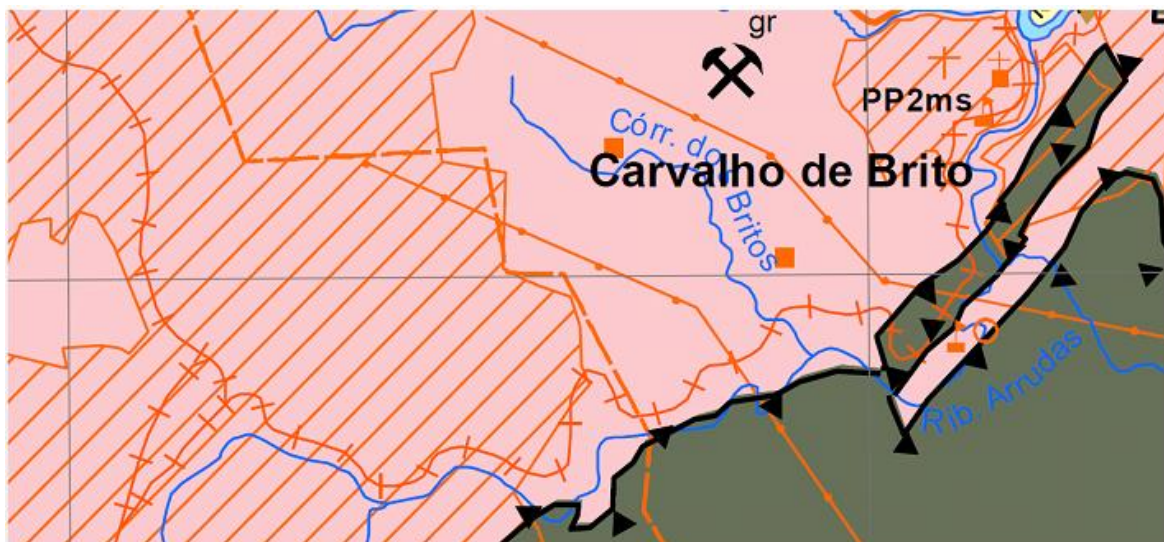
Figura 28 – O quadrilátero ferrífero (Renger *et al.*, 1994).

Os litotipos característicos da área fonte do solo residual utilizado nessa pesquisa foram as rochas do complexo Belo Horizonte. A área encontra-se próxima ao contato do embasamento (complexo Belo Horizonte) com o Grupo Sabará, sobre o complexo Belo Horizonte na região do encontro do córrego dos Britos com o ribeirão Arrudas, Figura 29.

A amostra deformada de solo residual foi hermeticamente condicionada em bombonas de 40 litros e levada para caracterização no Laboratório de Geotecnia na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Os ensaios de caracterização do solo foram realizados conforme as instruções de trabalhos (IT) do Laboratório de Geotecnia da UFMG

que são embasadas pelas normas da ABNT, ASTM, Head (1984) e Head (1986). Foram contemplados os seguintes ensaios:

- Teor de umidade gravimétrico IT- 001 (Head, 1984; ABNT NBR 6457, 1986 e ASTM D2216, 1992).
- Massa específica dos grãos IT – 002 (ABNT NBR 6508, 1984; Head, 1984; ABNT NBR 6457, 1986 e ASTM D 854, 2002).
- Análise granulométrica IT – 008 (ABNT NBR 7181, 1984; Head, 1984; ABNT NBR 6457, 1986 e ASTM D1140, 2000)
- Limite de liquidez IT – 004 (ABNT NBR 6459, 1984; ABNT NBR 6457, 1986; Head, 1992 e ASTM D 4318, 2000)
- Limite de plasticidade IT – 006 (ABNT NBR 7180, 1984; Head, 1992 e ASTM D4318, 2000)
- Compactação Proctor Normal IT – 010 (Head, 1984; ABNT NBR 7182, 1986 e ASTM D 1557, 1991)
- Permeabilidade carga variável IT – 013 (ABNT NBR 14545, 2000 e ASTM D 5084, 2000)



A3bh Complexo Belo Horizonte – Ortognaisses cinza, bandados, com bandas leucocráticas graníticas e mesocráticas granodioríticas, migmatitos e granitoides leucráticos.

PP2ms Grupo Sabará – clorita, xisto, metatufos e metagrauvaca.

Figura 29 – Apresentação da geologia da região de amostragem do solo residual (modificado de CPRM, 2008 - mapa geológico 1:100.000 – Folha de Belo Horizonte).

Na Tabela 9 estão representados os resultados dos ensaios de caracterização do solo residual da região fronteira entre os municípios de Belo Horizonte e Sabará.

Tabela 9 – Caracterização do solo residual de Sabará

Teor de umidade gravimétrico natural (%)	12,7%
Teor de umidade gravimétrico higroscópico (%)	1,0 – 2,0%
Massa específica dos grãos (g/cm³)	2,59
Limite de liquidez (%)	31,8 %
Limite de plasticidade (%)	22%
Índice de plasticidade (%)	9,8%
M. específica aparente seca máxima (g/cm³)	1,8
Umidade ótima (%)	15%
Permeabilidade (cm/s) (saturada)	$4,4 \times 10^{-7}$

A análise granulométrica do solo residual de Sabará foi realizada por peneiramento e sedimentação (com uso de defloculante) e, como resultado, foi gerada a curva granulométrica da Figura 30. O material mostrou-se bem graduado com ligeiro predomínio da fração maior ou igual a areia sobre o material fino.

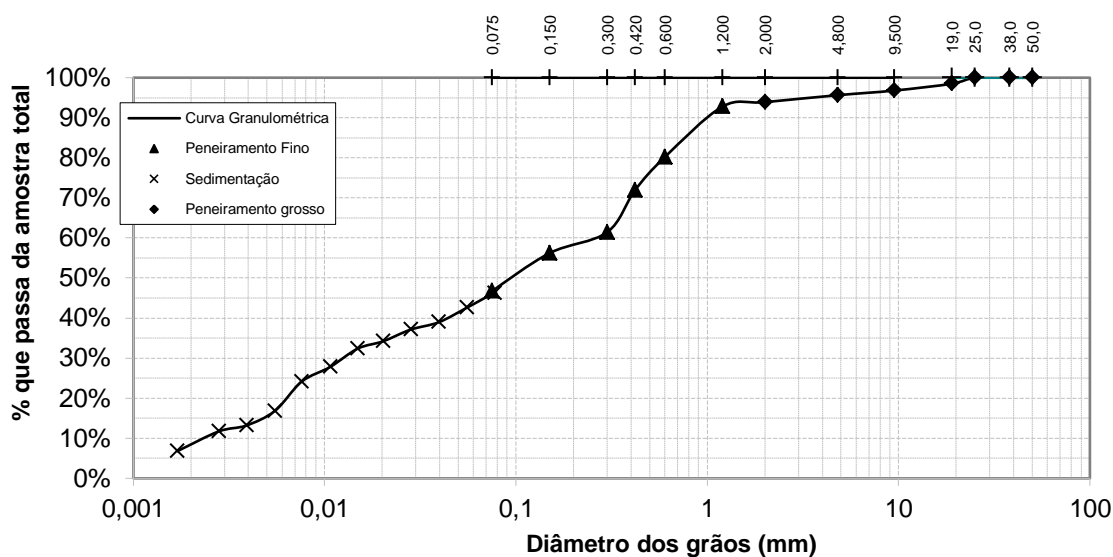


Figura 30 – Curva granulométrica do solo residual de Sabará com uso de defloculante hexametáfosfato de sódio 45,7 g do sal por 1000 cm³ de água.

A partir da curva granulométrica, verificam-se faixas granulométricas conforme ABNT NBR 6502 (1995) e ASTM D 2847 (2000) e diâmetros equivalentes, 10, 15, 30, 50, 60 e 85. Nas Tabela 10,

Tabela 11 e Tabela 12 estão apresentadas as faixas granulométricas e os diâmetros equivalentes. Trata-se de uma areia com silte e subordinadamente argila e segundo o Sistema Unificado de Classificação do Solo – SUCS – é uma areia siltosa (SM).

Tabela 10 – Distribuição granulométrica segundo ABNT do solo residual de Sabará

Pedregulho ($d > 2,0$ mm):	6,1%
Areia ($0,06 < d < 2,0$ mm):	51,3%
Silte ($0,002 < d < 0,06$ mm):	35,8%
Argila ($d < 0,002$ mm):	6,8%

Tabela 11 – Distribuição granulométrica segundo ASTM do solo residual de Sabará

Pedregulho ($d > 4,8$ mm):	4,4%
Areia ($0,075 < d < 4,8$ mm):	49,0%
Silte ($0,002 < d < 0,075$ mm):	39,9%
Argila ($d < 0,002$ mm):	6,8%

Tabela 12 – Diâmetros equivalentes em milímetros, coeficiente de não uniformidade (CU) e coeficiente de curvatura (CC) do solo residual de Sabará

$D_{10} = 0,0025$ mm	$D_{50} = 0,1000$ mm	CU = 120	CC = 0,23
$D_{15} = 0,0050$ mm	$D_{60} = 0,3000$ mm		
$D_{30} = 0,0130$ mm	$D_{85} = 0,8000$ mm		

Na Figura 31 está representada a curva de compactação do solo residual de Sabará. Ela foi obtida pelo ensaio de compactação com o uso do cilindro pequeno e a energia de compactação Proctor normal. Esta mesma energia foi utilizada na compactação da barreira capilar.

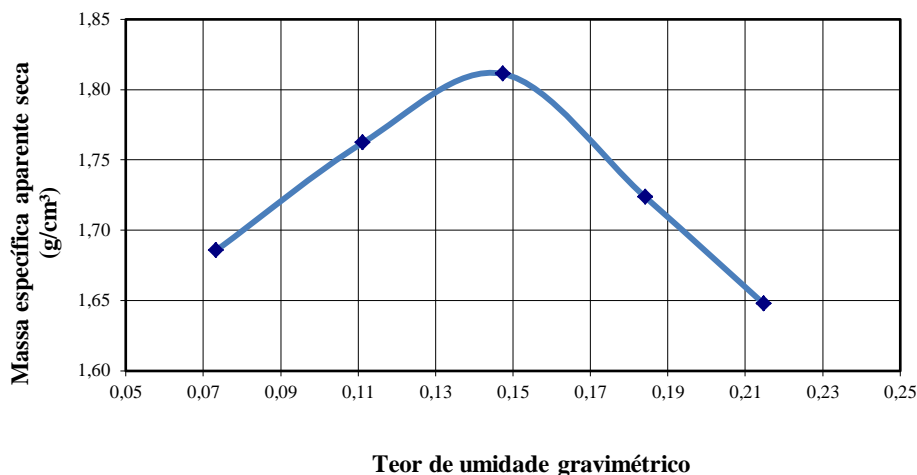


Figura 31 – Curva de compactação do solo residual de Sabará, energia de compactação Proctor normal.

A brita zero e o “pedrisco” também foram materiais utilizados no experimento. O pedrisco apresentou-se uniforme, com cerca de 97% dos grãos retidos na peneira de 2,0 mm, sendo 100% passante na peneira 4,8 mm, classificado pela ASTM D 2847 (2000) como uma areia grossa e pela ABNT NBR 6502 (1995) como pedregulho fino. Esse pedrisco foi utilizado abaixo do geotêxtil, servindo de camada drenante e de suporte.

3.1.2 Geotêxtil

Com intuito de melhoria no desempenho da barreira capilar, foram selecionados dois tipos de geotêxteis não tecidos de gramaturas, composições e fabricantes distintos, sendo um denominado GTB, preto de poliéster com gramatura de 137 g/ m² e espessura 1,27 mm, e o outro denominado GTA, branco de polipropileno com gramatura de 259 g/m² e espessura 2,07 mm. Esses valores foram obtidos em laboratório, conforme ensaios de espessura e gramatura para geotêxteis contemplados pelas ABNT NBR 12569 (1992), ABNT NBR 12568 (2003), ABNT NBR ISO 9863 (2013) e ABNT NBR ISO 9864 (2013). Na Figura 32 está apresentado o momento da amostragem do GTN que foi ensaiado, foram escolhidos pontos aleatórios ao

longo da manta de GTN e, a partir de um molde quadrado de dimensões 100 mm por 100 mm, foram cortadas a amostras.



Figura 32 – Amostragem na manta de geotêxtil não tecido para a realização dos ensaios de gramatura e espessura.

As permeabilidades normais e as aberturas aparentes dos GTNs foram consideradas as especificadas pelos fabricantes, como apresenta a Tabela 13. Na Tabela 14 estão os valores das gramaturas e espessuras fornecidas pelas empresas fabricantes e as aferidas em laboratório. As amostragens, além de contemplar a norma nacional, foram verificadas conforme a distribuição “t” de *Student* bicaudal, com confiança de 95%, pois esta distribuição reflete a maior variabilidade esperada para pequenas amostragens, quando comparada a distribuição normal. Os GTNs foram usados em primeiro uso, isto é, material utilizado com as características de quando saiu da fábrica.

Tabela 13 – Propriedade do GTA e do GTB conforme especificação dos fabricantes

Propriedade hidráulica	GTA	GTB
T. Abertura aparente (95%) (mm) ASTM 4751	0,23	0,23
Permeabilidade normal (cm/s) ASTM 4491 / ABNT NBR 15223	0,23 (ordem de grandeza 10^{-1})	0,44 (ordem de grandeza 10^{-1})
Permissividade* (s^{-1}) ASTM 4491 / ABNT NBR 15223	1,11	3,46

* Obtida pela razão entre permeabilidade normal (fabricante) e espessura determinada no LabGeo

Tabela 14 – Valores da gramatura e da espessura obtidas em ensaio no LabGeo e valores informados pelos fabricantes

Amostra	GTB MA (g/m²)	GTB Esp. (mm)	GTA MA (g/m²)	GTA Esp. (mm)
1	123	1,1	271	2,17
2	116	0,97	250	2,07
3	138	1,29	245	1,95
4	129	1,2	276	2,20
5	124	1,08	247	1,95
6	143	1,36	270	2,09
7	132	1,21	256	2,02
8	158	1,37	251	2,05
9	148	1,31	242	2,01
10	159	1,37	260	2,03
11		1,1	251	2,03
12			275	2,15
13			270	2,22
Média	137	1,27	258,77	2,07
Coefficiente de Variação (%)	10,82	11,35	4,70	4,29
Desvio padrão	16,56	0,32	15,22	0,09
H0	= 130 Não rejeita	= 1,1 Não rejeita	= 250* Não rejeita	=2,1 Não rejeita
H1	> ou < 130	> ou < 1,1	> ou < 250	> ou < 2,1
p – valor (5%)	±2,262	±2,262	±2,179	±2,179
t de Student	1,34	2,071	2,08	-1,07

* Valor inferido visto que o fabricante não fornece mais essa especificação

3.2 Instrumentação do Ensaio de Coluna de Umedecimento e Secagem

As barreiras capilares podem ocorrer por processos naturais ou induzidos por intervenções antrópicas. As simulações e avaliações de barreiras capilares em laboratório são possíveis através de ensaios de coluna de umedecimento e secagem. Estes ensaios precisam ser devidamente monitorados, aferindo tensões, umidades e temperaturas com sensores devidamente calibrados.

O monitoramento da umidade da coluna de umedecimento e secagem foi obtido pelo sensor da Decagon, modelo EC-5, que é um dispositivo que fornece o teor de umidade volumétrico a partir da medição da constante dielétrica do meio no domínio da capacitância e frequência.

Em frequência de 70 MHz, os efeitos de salinidade e texturais são reduzidos, garantindo a precisão desse sensor para a maioria dos solos. Sua calibração de fábrica é satisfatória para os solos em geral (DECAGON DEVICES, 2016). Estes sensores sofrem forte influência dos vazios do solo que estão inseridos, variação de material entre as pontas do sensor, que é em forma de garfo, e a proximidade de grandes massas metálicas, Figura 33.



Figura 33 – Sensor de umidade EC-5 (Decagon devices, 2016).

O aferimento da calibração do sensor de umidade EC-5 foi realizado em uma pequena coluna preenchida com o solo residual saturado de Sabará. Neste solo saturado, foram inseridos os sensores em três profundidades diferentes. O teor de umidade gravimétrico inicial (saturado) do solo foi determinado retirando uma amostra e realizando o ensaio de teor de umidade gravimétrica. O solo foi submetido à trajetória de secagem acelerada pela incidência de calor fornecido por lâmpadas halógenas. A secagem do solo foi feita por dois dias, quando os sensores e *datalogger* foram removidos e novas determinações de teores de umidade gravimétricos foram realizadas, Figura 34.

Os teores de umidade gravimétricos foram convertidos em teores de umidade volumétricos, uma vez que é em termos volumétricos que o sensor fornece os dados, Equação (49). Os resultados confirmaram a aferição de fábrica do sensor.

$$\theta = w(\rho_d/\rho_w)$$

Equação (49)



Figura 34 – Aferição da calibração do sensor de umidade EC-5 com incidência de luz halógena.

O sistema de coleta de dados do teor de umidade volumétrico foi um registrador de dados da Decagon, modelo Em5b, independente (alimentado por baterias AAA), de cinco canais e protegido por uma carcaça branca resistente a moderadas intempéries climáticas, Figura 35 (DECAGON DEVICES, 2014).



Figura 35 – Datalogger Em5b (Decagon devices, 2014).

Duas opções de *software* foram disponibilizadas pelo fabricante para trabalhar com o *datalogger* Em5b, sendo elas o *software* ECH20 Utility e o *software* ECH20 DataTrac.

- ECH20 Utility – É um *software* livre que vem com a compra do *datalogger* e disponível em *websites*, de fácil e rápida instalação. Os arquivos são gerados em formato Excel ou formato de texto com dados processados ou “crus”.
- ECH20 DataTrac – É um *software* para visualização e organização dos dados. Ele fornece além dos dados no formato Excel e formato texto, projeções gráficas dos dados, tabelas de simples visualização e manipulação de dados, resumos do banco de dados, conforme período gráfico selecionado, organização e armazenamento automáticos de dados, relatórios com gráficos e resumos de dados que podem ser impressos ou salvo em PDF.

A opção pela utilização do ECH20 Utility foi devido a sua gratuidade, disponibilidade, simplicidade de manuseio e possibilidade de geração de tabelas em Excel. O intervalo de medição dos sensores foi programado para cada 10 minutos, fornecendo uma autonomia de leitura de aproximadamente 24 dias.

Os sensores de sucção que equiparam a coluna de umedecimento e secagem foram da marca Watermark® modelo 6450WD, Figura 18. O sensor Watermark® 6450WD é um sensor de matriz granular. Ele funciona com a variação do teor de água no solo entre seus eletrodos e possibilita mensuração de sucção de até 239 kPa, (SPECTRUM TECHNOLOGIES, 2010). Para melhor eficácia das suas leituras, se deve reduzir o valor de 1 % da sucção para cada acréscimo unitário de grau Fahrenheit (°F), quando a temperatura for superior a 70 °F (21°C), ou adicionar o valor de 1% para cada decréscimo unitário de grau Fahrenheit, para medidas de temperaturas inferiores a 70 °F (21°C). Os sensores Watermark® 6450WD foram instalados saturados e devidamente ajustados com o solo circundante com a lama do próprio solo que foi produzida e inserida no orifício junto com os sensores, garantindo o melhor contato e resposta no sistema sensores-solo. Os sensores foram saturados por submersão em água de torneira (mesma água utilizada no ensaio), fazendo vários ciclos de umedecimento e secagem, sendo, 30 min de submersão no fluído e 24 horas secando. O último umedecimento, anterior a instalação dos sensores da coluna de umedecimento e secagem, a submersão dos sensores foi

em um intervalo superior a 12 horas. Tal procedimento visou melhorar as respostas do sensor em contato com o solo.

O fabricante garantiu que a calibração do sensor Watermark® 6450WD não é comprometida se feito o uso apropriado do equipamento.

Os sensores de sucção 6450WD foram testados umedecendo e saturando o solo residual Sabará. Durante o teste, nenhum sensor forneceu medida inferior a 8 kPa, apesar de esses sensores serem projetados para medidas de sucção entre 0 e 200 kPa e fornecerem medidas de até 239 kPa. Durante a aferição da calibração dos sensores Watermark® 6450WD, os valores de sucção do solo saturado de 8 a 20 kPa mensurados, foram próximos e coerentes ao valor de sucção de entrada de ar do solo determinada graficamente na CCRA do solo residual, como será visto no capítulo 4.

O sistema de aquisição de dados da sucção foi realizado pelo *datalogger* Watermark Monitor 900M, Figura 18. O *datalogger* disponibilizou 8 portas de entradas que foram compatíveis com os sensores térmicos 200TS (Figura 36) e com os sensores de sucção. Os sensores térmicos 200TS forneceram medidas com precisão de 1 °C. Através do software WaterGraph 3.4, foi possível a configuração do *datalogger*. As três primeiras entradas foram configuradas para o recebimento dos sensores de temperatura, fornecendo respostas na unidade °C. As portas de entrada 4, 5 e 6 foram programadas para o recebimento dos sensores de sucção, fornecendo medidas em kPa, e as portas 7 e 8 foram desconsideradas. Os períodos de medição foram em intervalos de 10 min, o que forneceu uma autonomia de leitura de 28 dias. Uma vantagem desse *datalogger* foi possuir um *display* que permitiu a visualização manual das medidas em tempo real, sem a necessidade de desmontar o equipamento. O software WaterGraph 3.4 possui ferramentas de tratamento gráfico e geração de tabelas. Optou-se, nessa pesquisa, exportar os dados CSV (*comma separated values*) para o Excel e, a partir desse, gerou-se gráficos, uniformizando, assim, os dados de teor de umidade coletados no *datalogger* Em5b.

A aferição da calibração do sensor de temperatura 200TS foi realizada com a confrontação de suas medidas com as medidas obtidas através do termômetro de mercúrio. Em um recipiente com água foram submersos os sensores de temperatura 200TS e o termômetro de mercúrio, a água teve sua temperatura variada por aquecimento e esfriamento. As leituras obtidas com os sensores e o termômetro foram similares às registradas pelo termômetro de mercúrio.

Também foi utilizada água em temperatura conhecida (congelamento) com resposta satisfatória, Figura 36.



Figura 36 – Sensor de temperatura 200TS, modelo da Irrrometer compatível com o Watermark Monitor 900M e o momento da aferição de sua calibração.

3.4 Metodologias usadas para montagem dos ensaios

A avaliação do comportamento da barreira capilar ocorreu com a realização de ensaios de coluna de umedecimento e secagem monitorados simulando diversos arranjos de barreiras capilares em modelo reduzido. A camada capilar e bloco capilar tiveram suas CCRA's determinadas por ensaios de coluna suspensa e papel filtro o que viabilizou a determinação da função condutividade e da sucção crítica.

3.4.1 Metodologia do Ensaio de Coluna de Umedecimento e Secagem

Na simulação e na avaliação de barreiras capilares, foi utilizada uma coluna de PVC cilíndrica de 12 mm de espessura monitorada com sensores de umidade, temperatura e sucção. Os sensores de umidade foram inseridos na camada capilar e na camada de fundação, os demais sensores foram introduzidos apenas na camada capilar. A coluna possuía diâmetro interno aproximado de 254 mm e altura de 415 mm. Como camada de suporte e drenagem, foram utilizados 7,650 kg de pedrisco e a camada capilar foi composta por 19,000 kg de solo residual de Sabará, homogeneizado com a adição de 2850 l de água, o suficiente para

aproximar o solo à umidade ótima (15%). Durante a compactação se verificou os teores de umidade gravimétricos atingidos (14,2% a 16,5%).

Na confecção das colunas de umedecimento e secagem foi posto da base para o topo; o pedrisco, o GTN desejado (realizou-se ensaio sem GTN também), sobre o geotêxtil foi posto o solo residual, sendo este fracionado em seis porções. Cada porção foi inserida separadamente e receberam 46 golpes com o soquete *California Bearing Ratio* – CBR – de 4,536 kg e altura de queda de 457 mm, o número de golpes foi calculado de forma a fornecer a mesma energia de compactação do ensaio Proctor normal. Ao término da compactação de cada camada de solo, ela foi escarificada para melhor entrosamento com a camada adjacente. Em camadas alternadas, durante sua compactação, foram inseridos os sensores de umidade EC-5. A última camada compactada de solo não foi escarificada sendo apenas nivelada com auxílio de martelo de borracha. A camada de topo foi composta por 2,000 kg de brita zero dispersa sobre o solo. Tanto o nivelamento do solo quanto a brita zero dispersa evitaram o fluxo hidráulico preferencial. No topo da coluna foi acoplado um reservatório de água que possuía em seu fundo, um orifício, feito por um alfinete, que viabilizou o gotejamento dessa água sobre a brita. O reservatório de água foi tampado para evitar a evaporação da água, mas uma pequena comunicação com o meio externo foi permitida para manter a água do reservatório sob pressão atmosférica. Após a montagem da coluna, a mesma foi posta sobre uma balança digital que foi utilizada para aferir o peso da coluna de umedecimento e secagem durante os ensaios. O peso inicial da coluna sem e com o reservatório foram medidos e, em seguida, iniciou-se o ensaio pela trajetória de umedecimento com a infiltração de água no solo. Ao término da trajetória de umedecimento iniciou-se a trajetória de secagem, que foi acelerada com a retirada do reservatório e a incidência do calor gerado por duas lâmpadas halógenas, Figura 37.

A configuração final da coluna de umedecimento e secagem apresentou o bloco capilar e camada capilar em cotas aproximadas de 100 mm e 100 a 300 mm, respectivamente. Os quatro sensores de umidade EC-5 foram dispostos nas cotas de 70 mm, 140 mm, 200 mm e 260 mm. Os sensores de sucção e temperatura foram dispostos em 140 mm, 200 mm e 260 mm. A inserção desses sensores ocorreu após a compactação do solo, com auxílio de uma furadeira. Na cota de 10 mm acima da base da coluna, foi feito um orifício drenante de diâmetro de 10 mm, Figura 38.



Figura 37 – Coluna de umedecimento e secagem, suas etapas construtivas e trajetórias. a) Colocação do pedrisco; b) Colocação do GTN; c) Solo compactado e escarificado e a inserção do sensor EC-5; d) Colocação da camada de topo de brita zero; e) Ensaio em trajetória de umedecimento e f) Ensaio em trajetória de secagem em detalhe o posicionamento das lâmpadas halógenas.

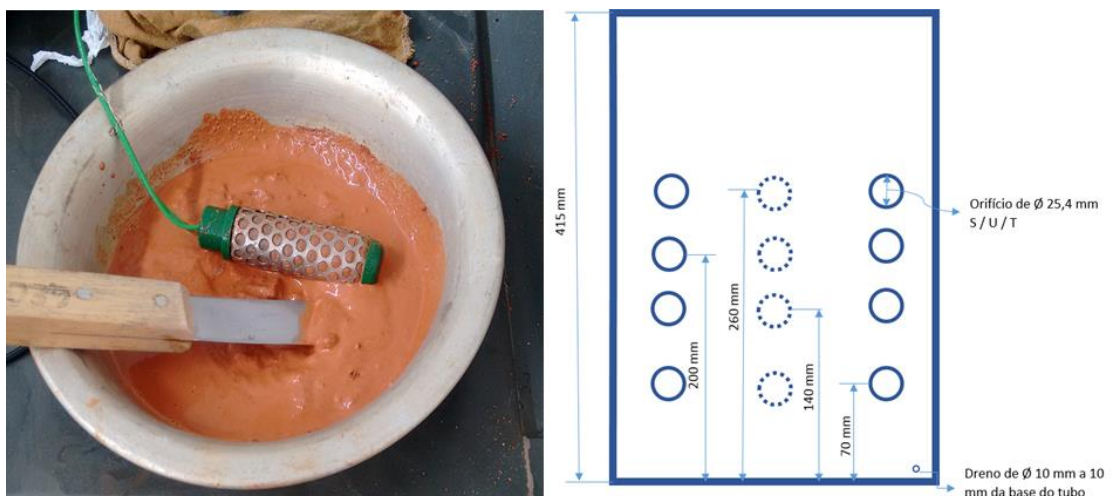


Figura 38 – Esquerda, preparo da lama de solo para inserção dos sensores. Direita, vista frontal da coluna de umedecimento e secagem detalhando a disposição dos locais de inserção dos sensores e o orifício drenante.

A inserção dos sensores de temperatura e sucção acontecia depois de aproximadamente 24 horas da compactação das camadas capilares. Logo em seguida, as trajetórias de umedecimento eram impostas pelo gotejamento de 1,2 l a 1,4 l de água de torneira (até verificar o rompimento da barreira capilar). Com exceção do ensaio de coluna de umedecimento e secagem associado ao GTA, que utilizou inicialmente apenas uma lâmpada halógena para desidratar a camada capilar, todos os ensaios tiveram as trajetórias de secagem potencializadas por duas lâmpadas halógenas desde o início delas. Após a realização da infiltração de água da torneira nas camadas capilares e suas posteriores secagens, os *dataloggers* foram descarregados e os dados salvos em formato Excel. A partir do programa Excel, foram plotados os gráficos correlacionando a temperatura (°C) com o tempo (hora), a sucção matricial (kPa) com o tempo (hora), o teor de umidade volumétrico com o tempo (hora), o teor de umidade volumétrico com a sucção matricial (kPa) para cada coluna montada e a variação do teor de umidade com o tempo (hora) entre as diferentes colunas ensaiadas.

Esquemática e resumidamente, as colunas de umedecimento e secagem possuíam como constituição básica do topo para a base: reservatório de água crivado com tampa; camada composta por brita zero amortecedora do impacto da água; camada capilar, composta pelo solo residual de Sabará; bloco capilar composto por um dos dois tipos de geotêxteis em condição de primeiro uso e na base como fundação-dreno o pedrisco, que na ausência do geotêxtil assumia o papel do bloco capilar. Para avaliação do comportamento das barreiras capilares foram montadas 3 colunas de umedecimento e secagem, duas com GTN diferentes e uma sem GTN, que foram submetidas a um ou mais umedecimento e secagem, conforme, Tabela 15 e Figura 39.

Tabela 15 – Composição dos ensaios de coluna de umedecimento e secagem e quantidade de umedecimento e secagem que cada coluna sofreu

Coluna de umedecimento e secagem	Umedecimento	Secagem
Com GTA	1	1
Com GTB	3	2
Sem GTN	2	2

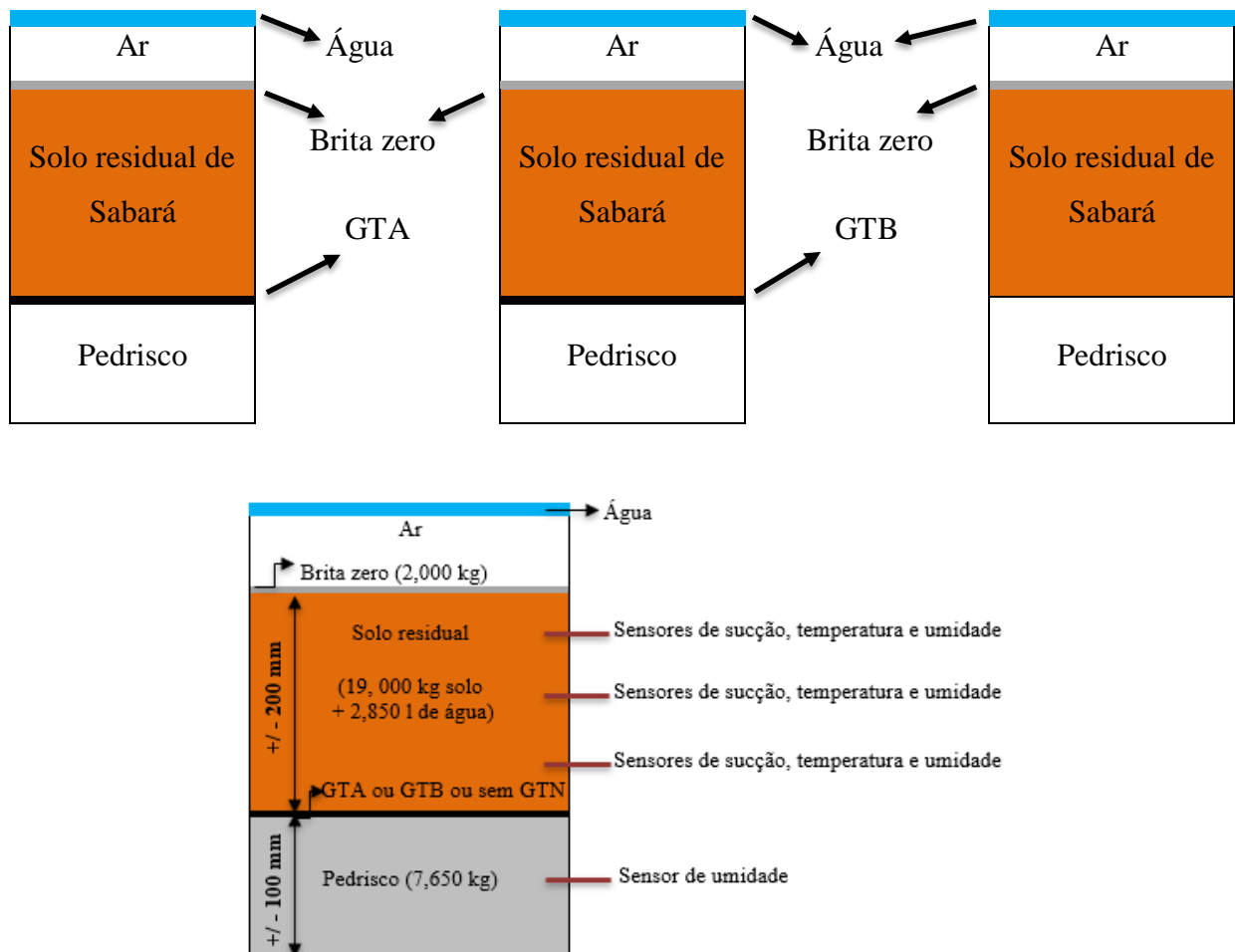


Figura 39 – A cima modelos da composição da barreira capilar no ensaio de coluna de umedecimento e secagem. A baixo modelo geral.

3.4.2 Coluna Suspensa

Como já realizado por outros pesquisadores (STORMONT *et al.* 1997 e DE LIMA, 2014) a determinação das curvas características para os GTNs foi feita pelo ensaio de coluna suspensa (*Hanging Column Apparatus*). Esse ensaio foi adaptado para o geotêxtil a partir do ensaio de coluna suspensa para solos granulares descrito na ASTM D 6836 (2002). Foram realizadas as trajetórias de secagem e de umedecimento. Para a determinação da porção inicial da curva de retenção de água do solo residual de Sabará, também foi utilizado o ensaio da coluna suspensa.

O aparato consistiu de um painel *Wille Geotechnik*, utilizado em ensaios de permeabilidade com carga constante, um reservatório fixado em haste, a qual possibilita a variação de cota do

mesmo, um funil de Büchner Prolab de 125 ml com placa porosa com entrada de ar de 5,5 kPa, porosidade de 10 a 16 micras. A boca superior do funil de diâmetro interno de 56 mm e boca inferior com diâmetro externo de 8 mm, acoplado em uma haste que possibilitou a variação de cota deste. As hastes do funil e do reservatório são paralelas entre si. Folhas de papel milimetradas compuseram o fundo do painel servindo de medidor dos desníveis entre o funil e o reservatório, Figura 40.

O reservatório tinha dimensões bem mais expressivas em comparação com o funil de Büchner e isso minimizou bastante a influência da água drenada da amostra para o reservatório. Para garantir a continuidade hidráulica do sistema GTN-pedra porosa, uma ou duas (dependendo do geotêxtil) placas crivadas foram utilizadas com aplicação de uma carga constante (peso). Como consequência, uma pressão aproximada de 0,92 kPa (peso mais 2 placas crivadas) foi aplicada sobre o GTB, e uma pressão aproximada de 0,91 kPa (peso mais uma placa crivada) foi aplicada sobre o GTA, Figura 41.



Figura 40 – Ensaio de coluna suspensa montado no LabGeo.

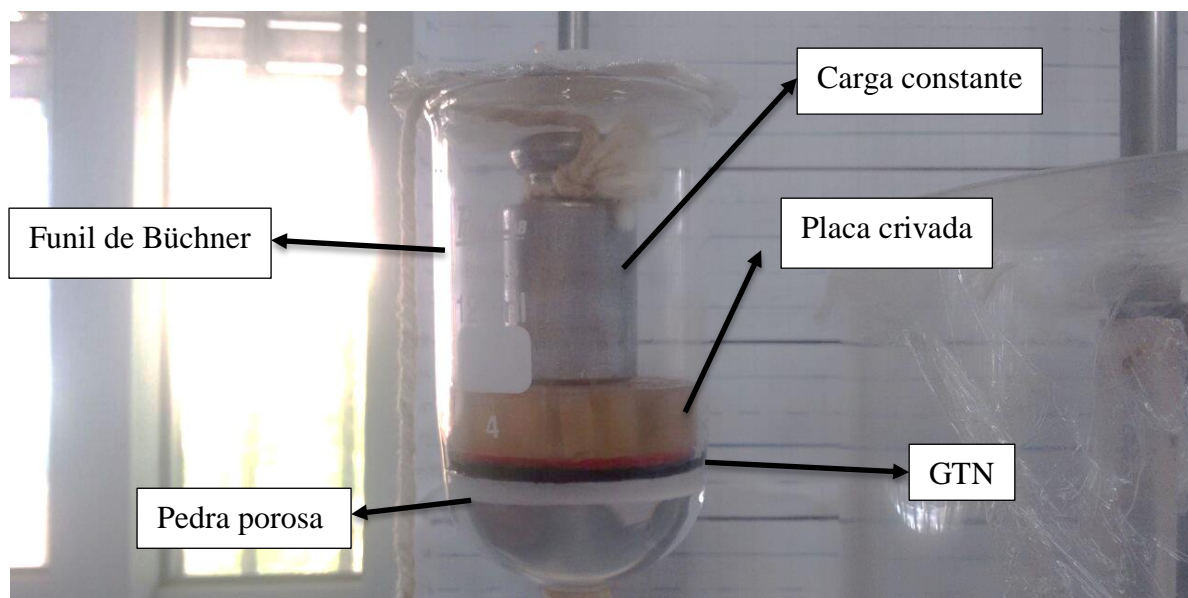


Figura 41 – Ensaio da coluna suspensa, no detalhe o sobre peso e uma placa crivada amarela e placa crivada vermelha sobre o GTB.

Quando o ensaio de coluna suspensa foi realizado para determinação da porção inicial da CCRA do solo residual (até 5,0 kPa), o corpo de prova foi confeccionado em um anel metálico de 35,2 mm de diâmetro e de 26,1 mm de altura e posto no funil de Büchner com um papel filtro entre o corpo de prova do solo residual e a placa porosa.

A água destilada, ultrafiltrada e esterilizada com raios ultravioleta, foi utilizada nesse ensaio, evitando precipitados no sistema. Tanto o reservatório quanto o funil foram vedados com papel filme servindo de tampa para reduzir bastante a influência da evaporação. Todavia, pequena comunicação com o meio externo foi permitida de forma que o sistema se mantivesse sobre influência da pressão atmosférica.

3.4.3 Papel Filtro para determinação da curva de retenção de água do solo

O ensaio de papel filtro foi realizado para a determinação da curva característica de retenção da água do solo residual de Sabará. O ensaio foi balizado pela norma ASTM D5298 (2010) com algumas adaptações. Conforme ASTM D5298 (2010), o ensaio do papel filtro pode ser explicado resumidamente como colocar em recipiente hermético a amostra de solo e o papel filtro em tempo suficiente para equalização de umidade entre eles. O tempo estimado, pela norma, para equalização é de 7 dias. Após a equalização, mede-se o teor de umidade gravimétrico do papel filtro e, via uma curva de calibração fornecida pela norma, é possível

determinar a sucção do papel filtro, que será a mesma do solo, cujo teor de umidade é determinado, obtendo-se um ponto da curva característica de retenção de água deste. Amostras com diferentes graus de saturação são colocadas para equalizar com o papel filtro, permitindo, assim, a determinação da curva de retenção de água do mesmo.

Na execução do ensaio, considerou-se $1,8 \text{ g/cm}^3$ como sendo a massa específica seca máxima do solo residual de Sabará, resultado obtido da curva de compactação do mesmo na energia Proctor Normal. Foram confeccionados 22 corpos de prova do solo, sendo 11 ensaiados na trajetória de umedecimento e 11 ensaiados na trajetória de secagem. O número de corpos de prova foi para fazer a variação em 10% do grau de saturação, cobrindo o intervalo de 0 e 100%. Anéis metálicos com volumes aferidos serviram de moldes para os corpos de prova e, o papel filtro escolhido foi o de marca Whatman #42. Na execução do ensaio, além do solo, papel filtro e anéis metálicos, foram usados: recipientes metálicos para papel filtro; luvas cirúrgicas; papel filme; papel alumínio; caixa de isopor; balança com precisão de 10^{-4} gramas; estufa; pinças; tesouras e lâminas de corte. Todos os anéis foram identificados, pesados e preenchidos com o solo residual de Sabará, considerando sua massa específica seca, e moldados por compactação estática, Figura 42.



Figura 42 – Preparação do ensaio do papel filtro. a) Anéis metálicos. b) Compactação estática. c) Corpos de prova prontos.

A obtenção da CCRA do solo pela trajetória de secagem inicia-se com a saturação 100%, em duas frentes, de 11 corpos de prova, isto é, pelo topo e pela base, concomitantemente. O topo foi saturado por gotejamento e a base, saturada por capilaridade. Para isso, usou-se uma bacia com água e uma pedra porosa parcialmente submersa, sobre a qual a amostra foi colocada. Na saturação da parte inferior, um papel filtro foi posto entre a parte emersa da pedra porosa e a

base do corpo de prova, evitando que este se desfizesse. Após a saturação dos corpos de prova, eles foram embrulhados em camadas de papel filme e realizadas as equalizações de suas umidades, a partir do repouso de 7 dias dos corpos de prova na câmara úmida e dentro de caixas térmicas.

Depois de equalizadas as umidades, foi posto um papel filtro seco, cortado em diâmetro pouco menor que o diâmetro do anel, em contato direto com cada lado dos corpos de prova, isto é, base e topo, uma vez que a sucção de interesse a ser medida era a sucção matricial. Depois de garantido o contato direto papel filtro-corpo de prova, a saturação desejada dos corpos de prova foi controlada pela pesagem dos corpos de prova à medida que estes eram deixados secar. Os corpos de prova que não atingiram as saturações desejadas, em temperatura ambiente e tempo inferior a 8 horas, foram secos na estufa a 105 °C.

Após os corpos de prova terem atingido os graus de saturação entre 0 a 100 %, em intervalo de aproximadamente 10%, eles foram embrulhados em papel filme e em papel alumínio e novamente postos para equalização, juntamente com os papéis filtro em contato, só que desta vez por 15 dias, em uma caixa de isopor e dentro da câmara úmida. Terminada a equalização, os papéis filtros foram retirados com pinça e os mesmos foram postos dentro de recipientes metálicos de massa conhecida, em intervalos menores ou iguais a 5 segundos.

Os papéis filtros foram pesados através de aferições de leituras de massa a cada 10 segundos no primeiro minuto e a cada 30 segundos durante os próximos 4 minutos. Com os dados obtidos, plotou-se um gráfico do peso total do papel filtro pela raiz do tempo, procedimento este descrito em Villar (2002), que permitia a determinação da sua massa no tempo zero, ou seja, no tempo que retirou o papel filtro do contato com a amostra. Para obtenção do peso seco dos papéis filtros, estes foram levados à estufa, em seus recipientes metálicos, por 24 horas e a uma temperatura de 105° C, quando, então, os recipientes com os papéis filtros foram pesados em balança com precisão de 10^{-4} gramas. A partir desse momento, também se monitorou a pesagem a cada 10 segundos no primeiro minuto e a cada 30 segundos durante os próximos 4 minutos e o peso no tempo zero foi também graficamente obtido. Os teores de umidade gravimétricos do topo, do meio e da base dos corpos de prova foram obtidos após a retirada dos papéis filtro. Todos os papéis filtros, ao final de ensaio, estavam identificados quanto ao seu posicionamento (topo ou base) nas amostras para aferição de resultados e da calibração.

Outras 11 amostras do solo residual de Sabará foram utilizadas para a determinação da CCRA pela trajetória de umedecimento. A metodologia se diferencia na parte inicial do ensaio na trajetória de secagem, pois os corpos de prova foram saturados entre 0 e 100% em intervalo de 10% a partir de seu estado seco. Após a saturação dos corpos de prova, nos graus desejados, o ensaio foi conduzido da mesma forma que para trajetória de secagem. Durante as pesagens dos papéis filtros não foi registrada amplitude térmica superior a 2 °C, Figura 43.

As equações de calibração do papel filtro Whatman #42 escolhidas nessa pesquisa foram as equações adotadas por Chandler *et al.* (1992). Conforme estudo realizado por Cupertino (2013) foram estas equações que abrangeram maior faixa de teor de umidade e de medida de sucção quando comparadas as outras equações de calibração propostas por outros autores, Tabela 16.



Figura 43 – À esquerda, saturação dos corpos de prova segundo duas frentes. À direita, ensaio na etapa de equalização do solo com o papel filtro envoltos por papel filme e papel alumínio.

Tabela 16 – Equações de Chandler *et al.* (1992) e seus limites de aplicação e aferição

Referência	w (%)	$\log_{10}(\text{sucção})(kPa)$	w (%)	Sucção(kPa)
	papel filtro		mín – máx	mín - máx
Chandler <i>et al.</i> (1992)	≤ 47	$4,84 - 0,0622w$	5,9 – 47,0	80 – 30000
	≥ 47	$6,05 - 2,48\log(w)$	47,0 – 69,8	30 – 80

Os ensaios de coluna suspensa e papel filtro foram realizados em uma mesma sala do LabGeo (sala A) e os materiais ensaiados estão listados na Tabela 17. Os ensaios de coluna de umedecimento e secagem foram realizados em sala diferente do ensaio de papel filtro, sala B.

As medidas de umidade relativa do ar para específicas temperaturas do ar foram realizadas com higrômetro digital nessas salas e são apresentadas na Tabela 18, A medidas da sala B foram realizadas no topo da camada capilar e temperaturas superiores a 30 °C foram alcançadas graças ao auxílio de lâmpadas halógenas.

Tabela 17 – Ensaios realizados para a determinação das CCRA's do GTA, do GTB e do solo residual de Sabará

Ensaio realizado	GTA	GTB	Solo residual de Sabará
Coluna suspensa	X	X	X
Papel Filtro			X

Tabela 18 – Medidas de umidade relativa do ar para determinada temperatura do ar sala A e sala B

Sala	A			B							
	20	25	30	20	25	30	35	40	50	60	70
Temperatura °C											
Umidade relativa %	46	42	35	48	40	31	28	25	23	23	21

Na Tabela 19 é apresentada a correlação entre teor de umidade volumétrico e o grau de saturação para o solo residual considerando a constância do volume de vazios.

Tabela 19 – Correspondência entre teor de umidade volumétrico e o grau de saturação para o solo residual

θ	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28
S (%)	100	97	94	92	89	86	83	81	78
θ	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19
S (%)	75	72	69	67	64	61	58	56	53
θ	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10
S (%)	50	47	44	42	39	36	33	31	28
θ	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01
S (%)	25	22	19	17	14	11	8	6	3

3.4.4 Metodologia de Ajuste da CCRA e da Função – k

As CCRA's foram ajustadas conforme proposta de Fredlund e Xing (1994), Equações (50 e 51), por esta ter aplicação viável à ampla faixa de sucção. A função condutividade hidráulica foi fornecida conforme proposta de Van Genuchten (1980) e Mualem (1976), Equação 52.

$$\theta(\psi, a, n, m) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e+(\psi/a)^n]\}^m} \quad \text{Equação (50)}$$

$$C(\psi) = \frac{-\ln[1+\psi/\psi_r]}{\ln[1+1000000/\psi_r]} + 1 \quad \text{Equação (51)}$$

$$k_{\text{nsat}}(\psi) = k_{\text{sat}} \frac{\{1 - (a\psi)^{n-1} [1 + (a\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (a\psi)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad \text{Equação (52)}$$

Onde:

a, m e n – Parâmetros de ajuste de curva

k_{sat} – Coeficiente de condutividade hidráulica saturada

k_{nsat} – Coeficiente de condutividade hidráulica não saturada

e – Número de Euler

As funções condutividade foram determinadas pelo método de Van Genuchten (1980) e Mualem (1976) por três motivos: a pequena contribuição argilosa no solo residual, o comportamento hidráulico dos GTNs semelhantes aos solos granulares e simples aquisição gráfica de seus parâmetros. Os parâmetros de ajuste de curva a, m e n da função condutividade hidráulica de Van Genuchten (1980) e Mualem (1976) foram determinadas graficamente e pelas equações 53, 54, 55 e 56.

Onde:

$$S_p = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \left[\frac{d\theta_p}{\log \theta_p} \right] \quad \text{Equação (53)}$$

$$m = 1 - \exp(-0,8S_p) \quad 0 < S_p < 1 \quad \text{Equação (54)}$$

$$m = 1 - \frac{0,5755}{S_p} + \frac{0,1}{S_p^2} + \frac{0,025}{S_p^3} \quad S_p > 1 \quad \text{Equação (55)}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \quad \text{Equação (56)}$$

S_p – inclinação da CCRA no ponto p (equidistante ao θ_s e ao θ_r)

4. RESULTADOS

4.1 CCRA's do GTA, do GTB e do Solo Residual de Sabará pela Coluna Suspensa e Papel Filtro

As curvas características de retenção de água dos GTA e GTB foram determinadas pelo ensaio de coluna suspensa adaptado, assim como a porção inicial da curva característica de retenção de água do solo residual de Sabará. Os dois GTNs apresentaram respostas similares no ensaio e CCRA's unimodais. O tempo de imposição de sucções aos corpos de prova era de aproximadamente 24 horas, sendo os corpos de prova de GTNs e o corpo de prova do solo residual sempre pesados ao término desse tempo e em seguida saturados e novamente disponibilizados à imposição da sucção de interesse, que era gerada através da diferença de nível entre o funil e o reservatório. A temperatura ambiente durante a realização dos ensaios na hora das medidas oscilou entre 22 e 25 °C para o GTB, 24 e 26 °C para o GTA e 24 e 26 °C para o solo residual de Sabará. Ao término dos ensaios na trajetória de secagem, os corpos de prova foram postos em estufa a 105 °C por 48 horas, sendo pesados após esse prazo em balança com resolução de 0,01g. Após os ensaios, os corpos de prova de GTNs mantiveram os mesmos pesos que tinham secos antes do início do ensaio, evidenciando a elevada porosidade dos GTNs e comportamento hidrofóbico da fibra têxtil. O corpo de prova do solo residual antes do início do ensaio estava com sua umidade higroscópica e depois de retirado da estufa apresentou menor peso.

O valor de entrada de ar do GTA esteve próximo a 0,9 kPa e o valor de entrada de ar do GTB foi determinado próximo a 0,8 kPa. As condições residuais de umidade desses GTNs se apresentaram em teor de umidade de 0,05 ($S = 5,6\%$) a 2,0 kPa para o GTA e teor de umidade de 0,03 ($S = 3,5\%$) a 2,5 kPa para o GTB. Na trajetória de umedecimento, os valores de sucção de entrada de água (ψ_{ag}) para os GTNs foram de 0,05 kPa para o GTA e de 0,1 kPa para o GTB. De Lima (2014) registrou, para seus GTNs ensaiados, valores de entrada de ar e de entrada de água e condição residual próximos aos determinados nessa dissertação. Em valores de sucção zero, nessa mesma trajetória, os corpos de prova dos GTNs atingiram valores de teor de umidade próximos aos da saturação. Os parâmetros de ajuste das CCRA's dos GTNs foram obtidos graficamente conforme Fredlund e Xing (1994).

As Figura 44 e Figura 45, apresentam respectivamente, as CCRA's sem ajustes do GTA e do GTB, isto é, com os dados que foram medidos diretamente do ensaio de coluna suspensa, a partir desses dados os parâmetros de ajuste de curva foram obtidos graficamente.

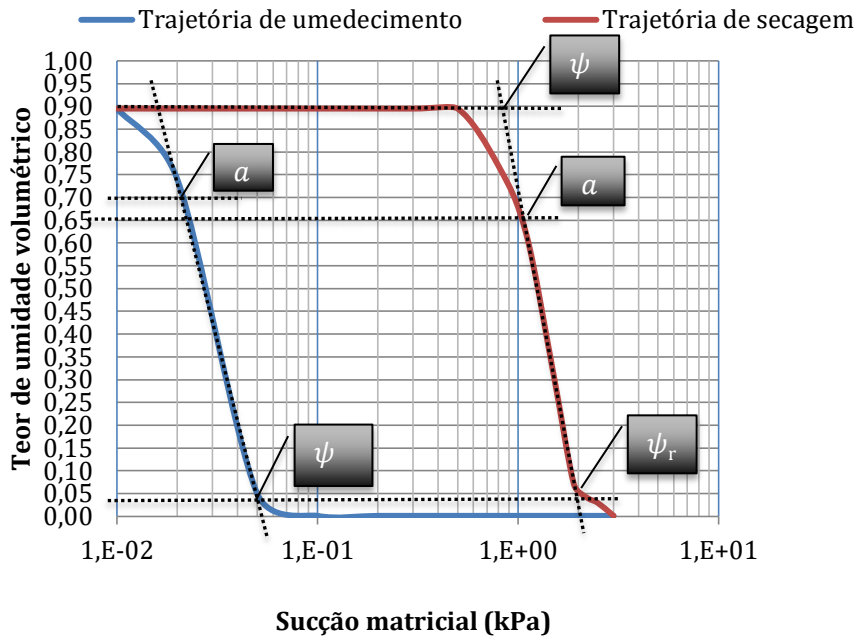


Figura 44 – Determinação gráfica dos parâmetros de ajuste da CCRA do GTA empregando o método de Fredlund e Xing (1994).

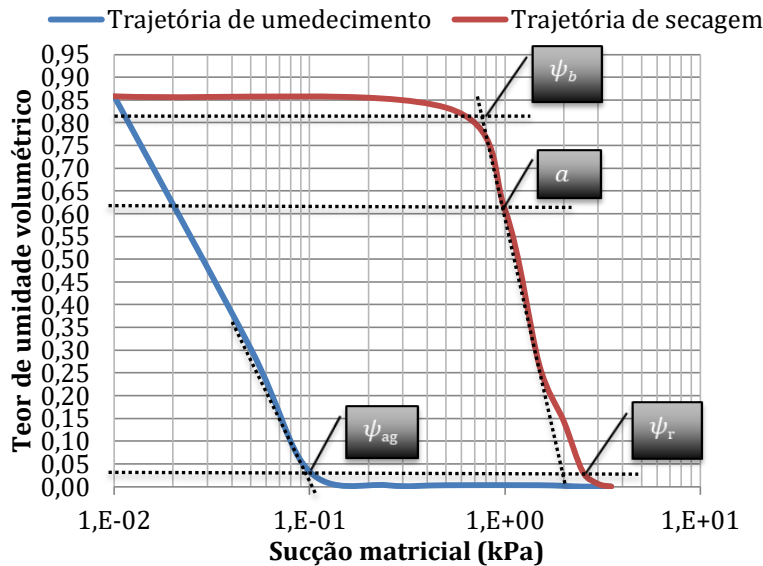


Figura 45 – Determinação gráfica dos parâmetros de ajuste da CCRA do GTB pelo método de Fredlund e Xing (1994).

As Figura 46 e Figura 47 apresentam respectivamente as CCRAs do GTA e do GTB, as linhas contínuas são as CCRAs ajustadas pelo método de Fredlund e Xing (1994) e os pontos são os dados que originaram as CCRA sem o ajuste.

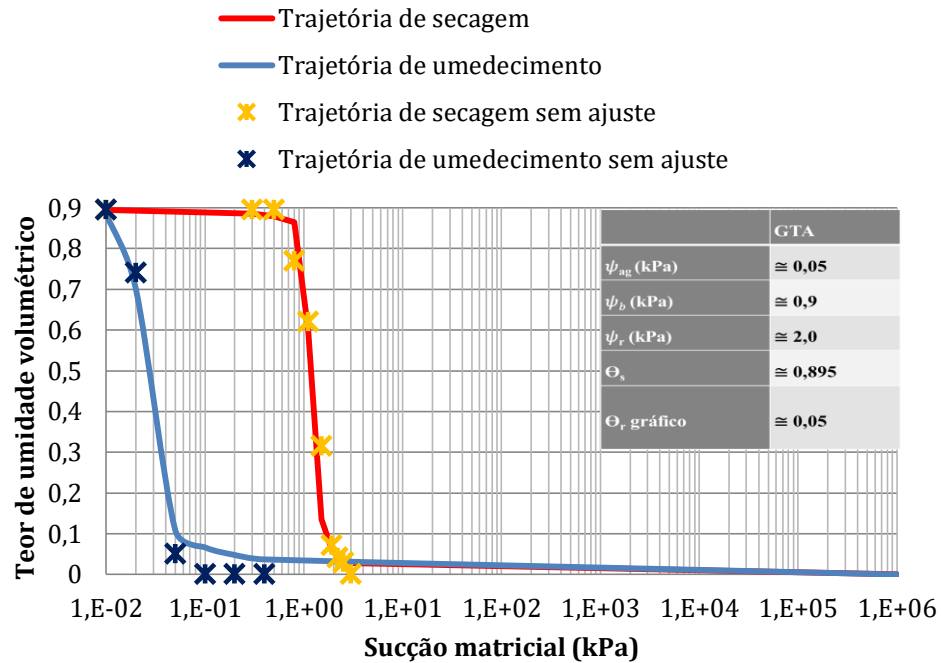


Figura 46 – CCRAs ajustada do GTA pelo método de Fredlund e Xing (1994).

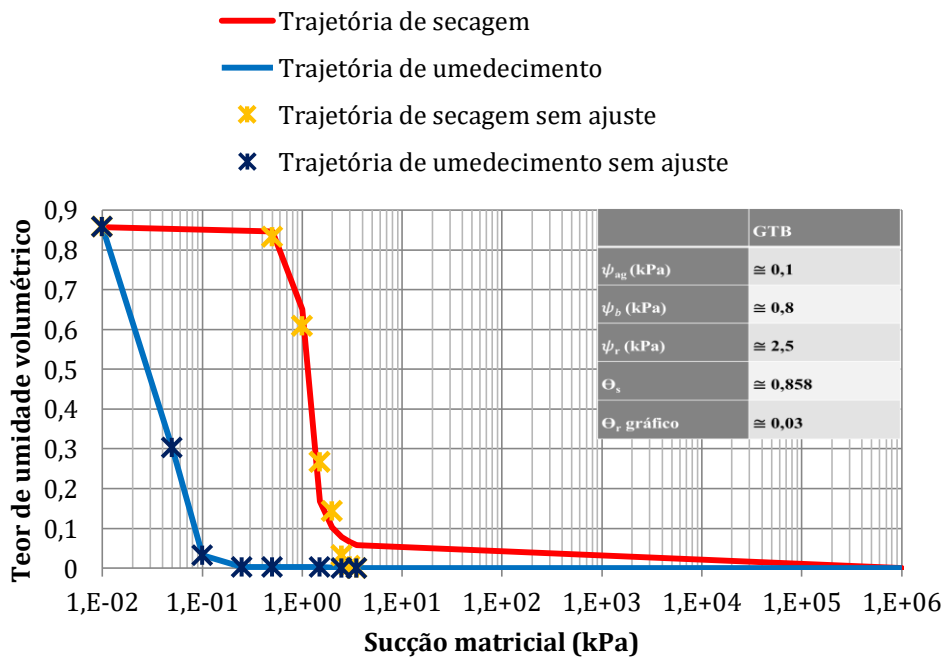


Figura 47 – CCRAs ajustada do GTB pelo método de Fredlund e Xing (1994).

Os parâmetros de ajuste da CCRA do GTA e do GTB e valores de sucção e teor de umidade volumétrico estão listados na Tabela 20.

Tabela 20 – Parâmetros e dados obtidos a partir das CCRA's traçadas pelos ensaios de coluna suspensa para o GTA e o GTB.

	GTA	GTB
ψ_{ag} (kPa)	$\cong 0,05$	$\cong 0,1$
ψ_b (kPa)	$\cong 0,9$	$\cong 0,8$
ψ_r (kPa)	$\cong 2,0$	$\cong 2,5$
Θ_s	$\cong 0,895$	$\cong 0,858$
Θ_r gráfico	$\cong 0,05$	$\cong 0,03$
Θ_i (secagem)	$\cong 0,60$	$\cong 0,65$
C (secagem)	$\cong 0,967$	$\cong 0,974$
a (secagem)	$\cong 1,1$	$\cong 1,0$
m (secagem)	$\cong 1,344$	$\cong 0,922$
S^* (secagem)	$\cong 2,325$	$\cong 1,993$
n (secagem)	$\cong 12,532$	$\cong 13,873$
Θ_i (umedecimento)	$\cong 0,70$	$\cong 0,858$
C (umedecimento)	$\cong 0,980$	1,0
a (umedecimento)	0,02	0
m (umedecimento)	$\cong 0,828$	0,00
S^* (umedecimento)	$\cong 1,759$	0,858
n (umedecimento)	$\cong 13,211$	Indeterminado

C – Fator de correção em função da sucção

A determinação da CCRA do solo residual de Sabará utilizou de dois ensaios distintos, coluna suspensa e papel filtro, nas trajetórias de umedecimento e de secagem. Os parâmetros de ajuste da CCRA do solo residual foram obtidos graficamente conforme proposto por Fredlund e Xing (1994).

A Figura 48 apresenta a CCRA sem ajuste do solo residual, isto é, com os dados que foram obtidos pelo ensaio de coluna suspensa e pelo ensaio do papel filtro, a partir desses ensaios os parâmetros de ajuste de curva foram obtidos graficamente.

A Figura 49 apresenta a CCRA do solo residual, as linhas contínuas é CCRA ajustada pelo método de Fredlund e Xing (1994) e os pontos são os dados que originaram as CCRA sem o ajuste.

Os parâmetros de ajuste da CCRA do solo residual e valores de sucção e teor de umidade volumétrico estão listados na Tabela 21.

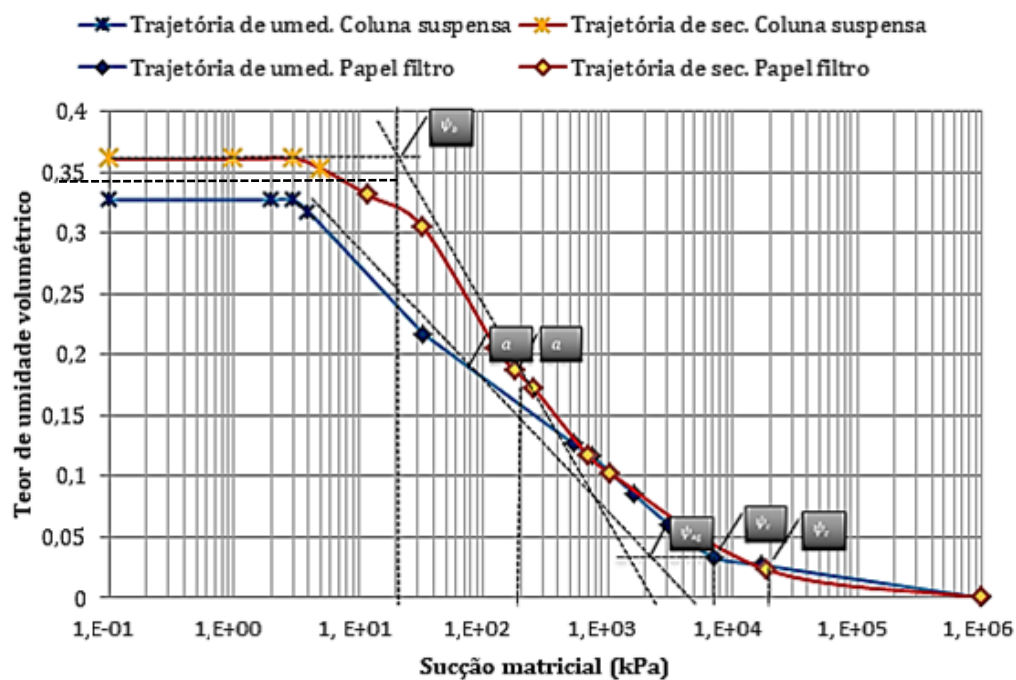


Figura 48 – Determinação gráfica dos parâmetros de ajuste da CCRA do solo residual de Sabará empregando o método de Fredlund e Xing (1994).

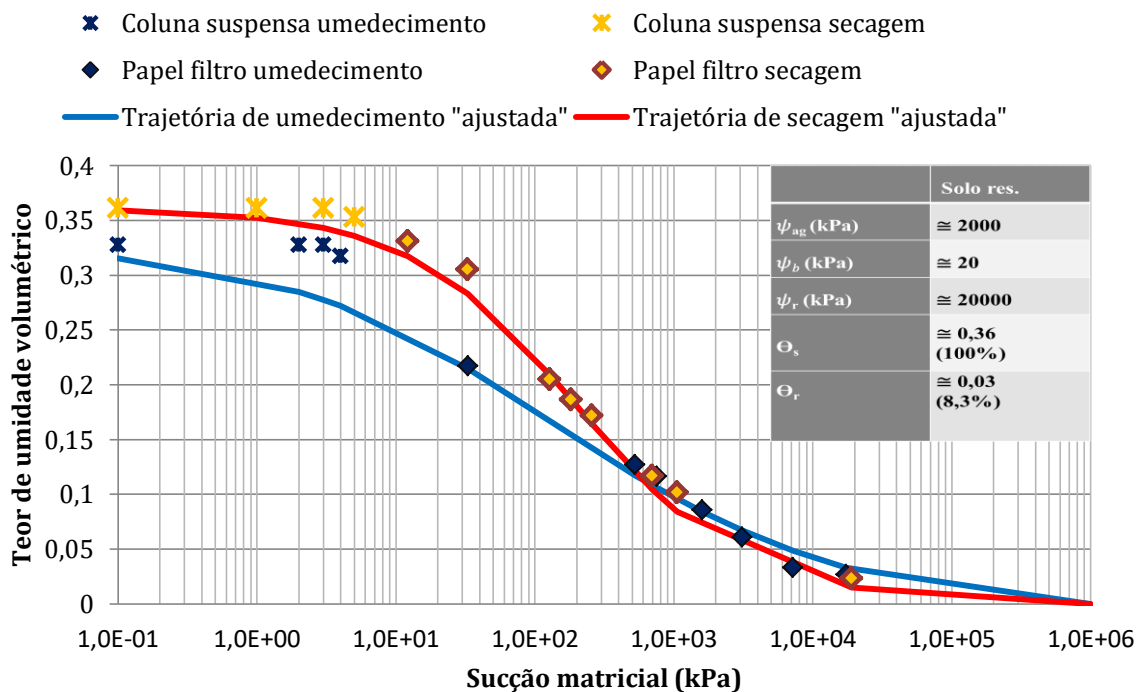


Figura 49 – CCRA do solo residual ajustada pelo modelo de Fredlund & Xing (1994).

Tabela 21 – Parâmetros e dados obtidos a partir das CCRA's traçadas pelos ensaios de coluna suspensa e papel filtro para o solo residual

	Umedecimento	Secagem
ψ_{ag} (kPa)	$\cong 2000$	-
ψ_b (kPa)	-	$\cong 20$
ψ_r (kPa)	$\cong 7000^+$	$\cong 20000$
Θ_s	$\cong 0,33$	$\cong 0,36$
Θ_i	$\cong 0,19$	$\cong 0,18$
C	$\cong 0,998$	$\cong 0,997$
m	$\cong 2,019$	$\cong 2,535$
S*	$\cong 0,108$	$\cong 0,180$
n	$\cong 0,451$	$\cong 0,688$
a	$\cong 70$	$\cong 200$

+ Para fins de ajuste gráfico

4.2 Função Condutividade Hidráulica para o GTA, o GTB e o Solo Residual de Sabará

Na maioria das obras de engenharia, incluindo as barreiras capilares, as trajetórias de umedecimento são mais representativas da situação crítica de campo. Por isso, além das trajetórias de secagem, as trajetórias de umedecimento foram analisadas e também estimadas a função condutividade hidráulica segundo essas trajetórias. Os parâmetros podem possuir variações dependendo da trajetória escolhida. As sucções críticas foram determinadas pela interseção entre as funções condutividade dos GTNs com a função condutividade do solo residual de Sabará pelo método de Van Genuchten (1980) e Mualem (1976). As sucções críticas e os teores de umidade volumétricos críticos para a quebra da barreira capilar com GTA e GTB pela CCRA de secagem foram respectivamente 3,0 kPa, 0,28 (S = 78%) e 4,0

kPa, 0,27 (S = 75%). As sucções críticas e os teores de umidade volumétricos críticos para a quebra da barreira capilar com GTA e GTB pela CCRA de umedecimento foram respectivamente 0,11 kPa, 0,31 (S = 86%) e 0,40 kPa, 0,30 (S = 83%). Os valores do grau de saturação do solo residual associados à quebra da barreira aumentaram em 0,8% quando comparada a trajetória de umedecimento com a trajetória de secagem, Tabela 22 e Figura 50 e Figura 51.

Tabela 22 – Parâmetros da função de condutividade hidráulica e as sucções críticas em relação ao solo residual de Sabará

Parâmetros	GTA	GTB	Solo residual
S secagem	2,325	1,993	0,180
α secagem	1,010	1,044	0,049
m secagem	0,773	0,740	0,134
n secagem	4,405	3,840	1,155
Sucção crítica secagem (kPa)	$\cong 3,000$	$\cong 4,000$	-
θ crítico sec.	0,28	0,27	
S umedecimento	1,759	0,858	0,108
α umedecimento	39,648	58,215	0,223
m umedecimento	0,710	0,497	0,083
n umedecimento	3,445	1,987	1,090
Sucção crítica umedecimento (kPa)	$\cong 0,110$	$\cong 0,400$	-
θ crítico umed.	0,31	0,30	

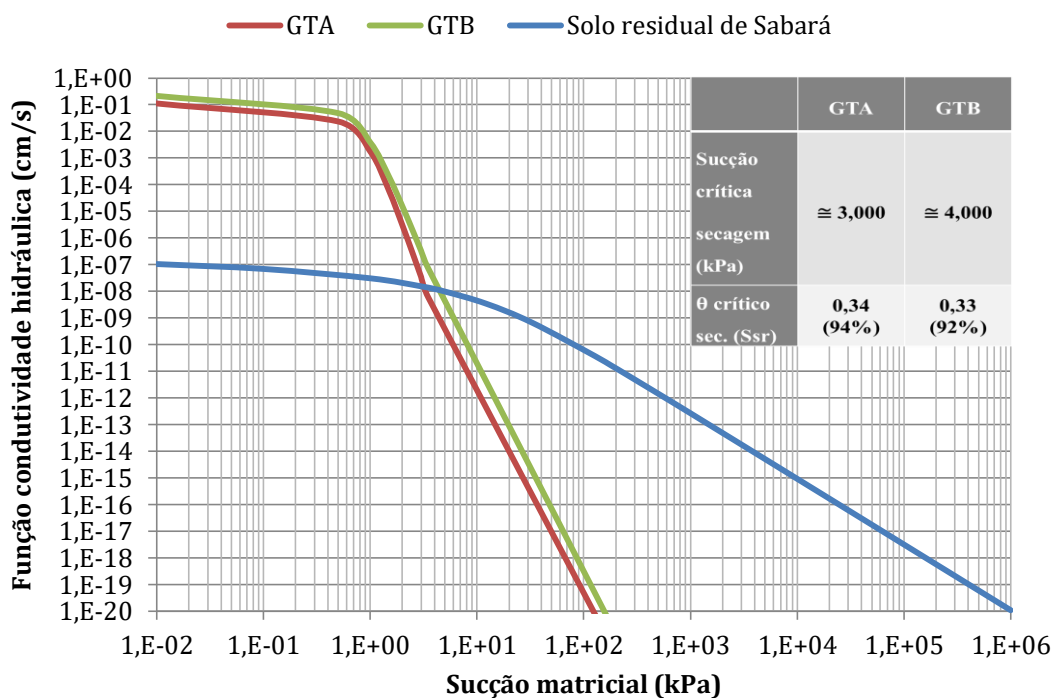


Figura 50 – Função condutividade hidráulica do solo residual de Sabará, do GTA e do GTB, trajetória de secagem.

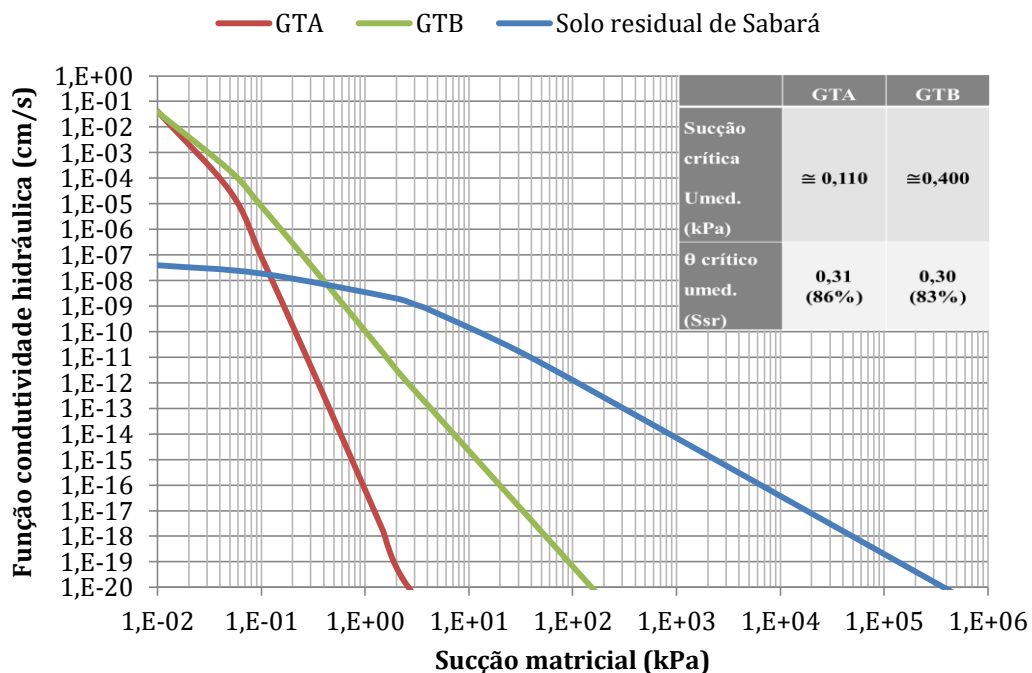


Figura 51 – Função condutividade hidráulica do solo residual de Sabará, do GTA e do GTB, trajetória de umedecimento.

4.3 Coluna de Umedecimento e secagem, Teor de Umidade Volumétrico por Tempo

As curvas determinadas pelo ensaio de coluna de umedecimento e secagem monitorada tiveram sua descrição neste trabalho a partir dos dados obtidos diretamente da instrumentação. Porém curvas ajustadas foram propostas e representadas nos gráficos. Estas curvas ajustadas foram concebidas com a exclusão de pontos discrepantes, tentando preservar o máximo possível o traçado mais marcante dos pontos crus.

A coluna de umedecimento e secagem com GTA iniciou o ensaio pela trajetória de umedecimento com teor de umidade volumétrico inicial médio de 0,26 (S= 73%) igual ao teor de umidade ótimo. Os registros iniciais do teor de umidade volumétricos foram: no topo 0,26 (S = 72%), no meio 0,27 (S = 75%) e na base 0,26 (S = 72%).

A variação da umidade da camada capilar com o tempo representa as trajetórias de umedecimento e secagem as quais as colunas foram submetidas. Os sensores de umidade de topo, meio e base efetuaram os primeiros registros em um intervalo de 0,33 horas após as suas instalações. O sensor de umidade inserido no pedrisco obteve insignificante variação, sendo seus dados desconsiderados, pois, apesar de se observar o rompimento da barreira capilar, pela água saindo no orifício drenante da base da coluna, o sensor não obteve resposta nesse material granular.

Após 1,17 horas do início da infiltração o sensor de umidade do topo começou a identificar a variação do teor de umidade no solo. Esse tempo foi maior para os sensores do meio e da base, sendo, respectivamente, aproximadamente de 2 e 3,7 horas. O teor de umidade volumétrico do topo alcança seu ápice (0,34, “S = 94%”) no intervalo de 16,8 – 20,5 horas do início do ensaio. Entre 30,5 – 36 horas do início, o ensaio registrou o maior teor de umidade volumétrico (0,32, “S = 89%”) no meio da camada capilar. Na base da camada capilar, próximo ao contato com o GTA, o maior teor de umidade volumétrico alcançado (0,31, “S = 86%”) foi relativo ao intervalo 22,5 – 26,3 horas de ensaio.

A secagem iniciou com 20,53 horas de ensaio e foi acelerada com o calor gerado por uma lâmpada halógena que foi ligada em 20,83 horas de ensaio. Outra lâmpada foi ligada em 186,67 horas de ensaio. O que foi notório observar que, entre 96 – 192 horas de ensaio, os teores de umidade volumétricos variaram de forma similar ao longo da barreira, sendo após 192 horas de ensaio mais pronunciada a perda de água na porção superior da camada capilar.

Após 125,5 horas de ensaio, os teores de umidade volumétricos no meio e na base da camada capilar já se igualavam aos teores de umidade volumétricos iniciais dessas regiões, que eram aproximadas e respectivamente, 0,27 (S = 75%) e 0,26 (S = 72%). O teor de umidade volumétrico no topo da camada capilar só retornou ao seu valor inicial 0,26 (S = 72%) após 148,17 horas, Figura 52.

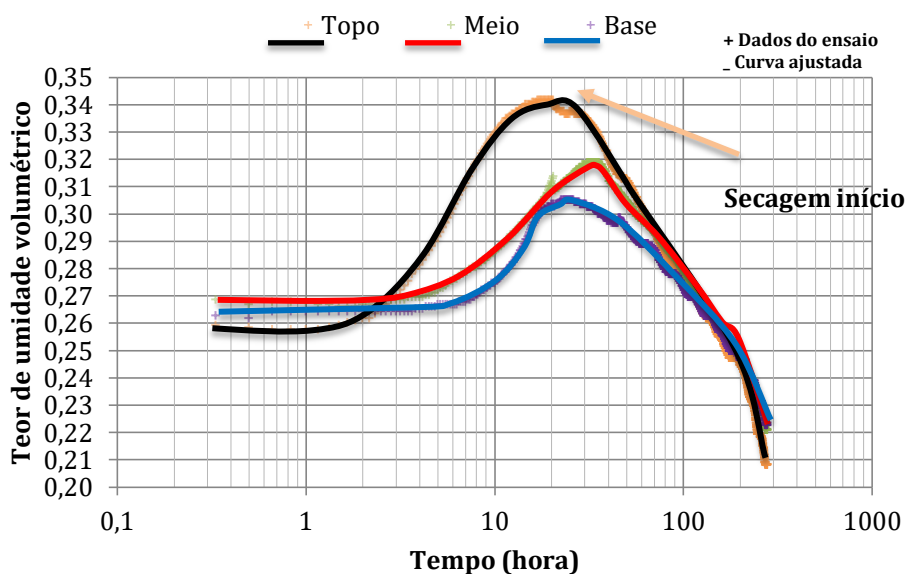


Figura 52 – Variação do teor de umidade volumétrica em relação ao tempo para topo, meio e base da camada capilar, em coluna de infiltração associada ao GTA.

A coluna de umedecimento e secagem com GTB iniciou o ensaio pela trajetória de umedecimento com teor de umidade volumétrica inicial médio de 0,29 (S= 81%) que é superior ao teor de umidade ótimo. Os registros iniciais do teor de umidade volumétricos foram: no topo 0,29 (S = 81%), no meio 0,30 (S = 83%) e na base 0,27 (S = 75%). Os sensores de umidade no topo, no meio e na base da camada capilar começaram a registrar leituras após 0,5 horas de suas instalações.

No topo da camada capilar o acréscimo do teor de umidade volumétrico foi medido em 0,66 horas do início do ensaio. O maior teor de umidade volumétrico alcançado nessa porção foi de aproximados 0,33 (S = 92%) no intervalo de 47,33 – 50 horas de ensaio. Durante o intervalo 50 – 50,33 horas, o teor de umidade volumétrico no topo foi de aproximados 0,31(S = 86%) o

qual se manteve praticamente constante, com pequenas oscilações, até 70,5 horas de ensaio, quando uma oscilação a menor de 0,01 no teor de umidade volumétrico foi registrada e se manteve praticamente constante até 89 horas do ensaio, quando uma nova redução aproximada de 0,01 do teor de umidade volumétrico foi medida seguida de um acréscimo no teor de umidade volumétrico. Em 94,5 horas de ensaio iniciou a trajetória de secagem com registros de teor de umidade volumétrico no topo 0,31 (S= 86%), no meio 0,29(S= 81%) e 0,70 na base. O teor de umidade volumétrico no topo oscilou (0,31 “S = 0,86%” – 0,32 “S = 0,89%”) entre 94,5 – 101,33 horas, quando, então, os valores do teor de umidade volumétrico no topo começaram a reduzir continuamente.

O sensor de umidade da porção mediana da camada capilar com GTB começou a registrar valores de teor de umidade volumétrico, no solo, próximos a 0,29 (S = 81%) no início da trajetória de secagem e registrou medidas decrescentes até 123,83 horas 0,27 (S = 75%). Após esse momento, o sensor umidade começou a registrar medidas crescentes com o passar do tempo até 143,16 horas 0,28 (S = 78%) momento que o teor de umidade volumétrico voltou a ter registro decrescente.

Na base da camada capilar registrou o incremento de 0,01 no teor de umidade em 54 horas de ensaio (0,28, “S = 78”) seguido de um acréscimo anômalo do teor de umidade volumétrico. Essas leituras anômalas de teores de umidade volumétricos (0,70) se mantiveram elevadas e com pouca oscilação mesmo durante a trajetória de secagem, sendo desconsiderada uma vez são quase o dobro do teor de umidade volumétrico da camada capilar saturada (0,36, “S = 100%”).

Após 144 horas de ensaio os teores de umidade volumétricos no topo e no meio da camada capilar já variavam de forma decrescente e similar. Ao término do ensaio (309 horas), os teores de umidade volumétricos no topo e no meio já eram respectivamente, 0,21 (S = 61%) e 0,23 (64%), Figura 53 e Figura 54. O sensor de umidade inserido no pedrisco, como no caso anterior, também obteve insignificante variação, sendo seus dados desconsiderados, pois, apesar de se observar o rompimento da barreira capilar, o sensor não registrou leituras.

Ao término do ciclo I não foram observadas variações de volume e trincas na camada capilar apenas manchas de solo no contato da brita com o solo.

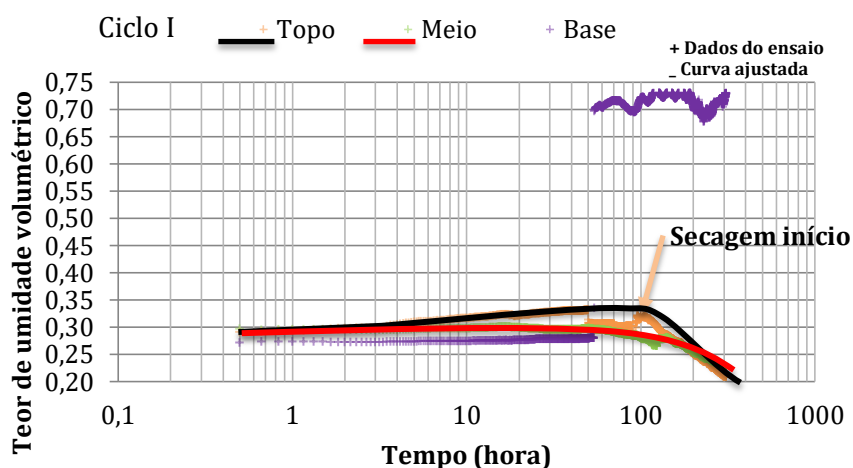


Figura 53 – Variação do teor de umidade volumétrica em relação ao tempo para topo, meio e base da camada capilar, em coluna de infiltração e secagem associada ao GTB, ciclo I.

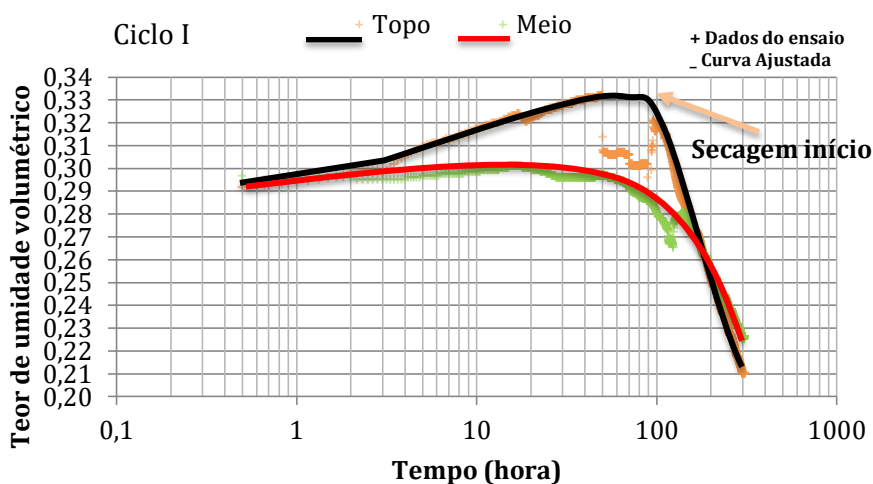


Figura 54 – Variação do teor de umidade volumétrica em relação ao tempo para topo e meio da camada capilar, em coluna de infiltração e secagem associada ao GTB, Ciclo I.

A coluna de umedecimento e secagem associada ao GTB foi submetida a mais uma nova etapa (ciclo II) de umedecimento e secagem, só que este umedecimento foi efetivado com o gotejamento de 2 l de água, visto que camada capilar se encontrava bastante seca inicialmente, registrando teores de umidade volumétrica, no topo e no meio da camada capilar, respectivamente de 0,18 (S = 50%) e 0,21 (S = 58%), média de 0,20 (S = 56%) inferior ao teor de umidade ótimo. O sensor de umidade na base da camada capilar ficou constante durante o início do ensaio, tendo o seu primeiro registro 3,33 horas após o início do

ensaio e em valores próximos a 0,70, considerados anômalos por serem bastante elevados. As lâmpadas halógenas, nesse novo ensaio, foram acionadas e desligadas respectivamente em 172 horas e em 382 horas após o início.

No topo da camada capilar, o acréscimo do teor de umidade volumétrico foi medido em 0,66 horas de ensaio e continuou aumentando até 19,67 horas, atingindo medidas próximas a 0,28 (S = 78%). Após 19,67 horas o teor de umidade volumétrico começou a aumentar de forma mais suave e, entre 104,5-183,33 horas de ensaio, atingiu o seu ápice em aproximados 0,29 (S = 81%) contra os 0,33 (S = 92%) alcançados anteriormente no ciclo I.

Após 183,33 horas de ensaio, no topo da camada capilar, os registros de teor de umidade volumétrico começaram a apresentar decréscimos (aproximadamente em 11,33 horas após o acender das lâmpadas halógenas). Em 384 horas de ensaio, o teor de umidade do topo da camada capilar retornou ao seu valor inicial 0,18 (S = 50%) e a perda de umidade se tornou bem mais lenta, mantendo esse valor aproximado até o término da secagem.

A porção mediana da camada capilar registrou acréscimo de teor de umidade após 4,5 horas do início do ciclo II, até o intervalo de 84 – 120 horas, quando registrou o teor de umidade volumétrico de 0,29 (S = 0,81%). Após 120 horas do início do ciclo II, o sensor de umidade no meio da camada capilar registrou decréscimos até 0,21 (S = 58%) em 384 horas de ensaio, esse registro de teor de umidade foi mantido até o término do ciclo II (425,66 horas).

O teor de umidade medido na porção inferior da camada capilar manteve o registro anômalo (0,65 – 0,73), desde o início do seu registro em 3,33 até 329,67 horas de ensaio. A partir de 329,67 o registro do teor de umidade volumétrico decresceu abruptamente entre 0,66 – 0,24 (S = 67%) até 354,17 horas, quando o teor de umidade registrou decréscimos até o valor de 0,22 (S = 0,61%) no término do ciclo II (425,66 horas).

As Figura 55 e Figura 56 apresentam as variações do teor de umidade volumétrico com o tempo no topo, no meio e na base da camada no ensaio de coluna de umedecimento e secagem com GTB ciclo II.

Mais um umedecimento, o terceiro, foi feito na coluna com GTB. A coluna com GTB iniciou o terceiro umedecimento com teor de umidade volumétrico inicial no topo 0,18 (S = 50%), no meio 0,21 (S = 58%) e na base 0,23 (S = 64%), média 0,21 (S = 58%).

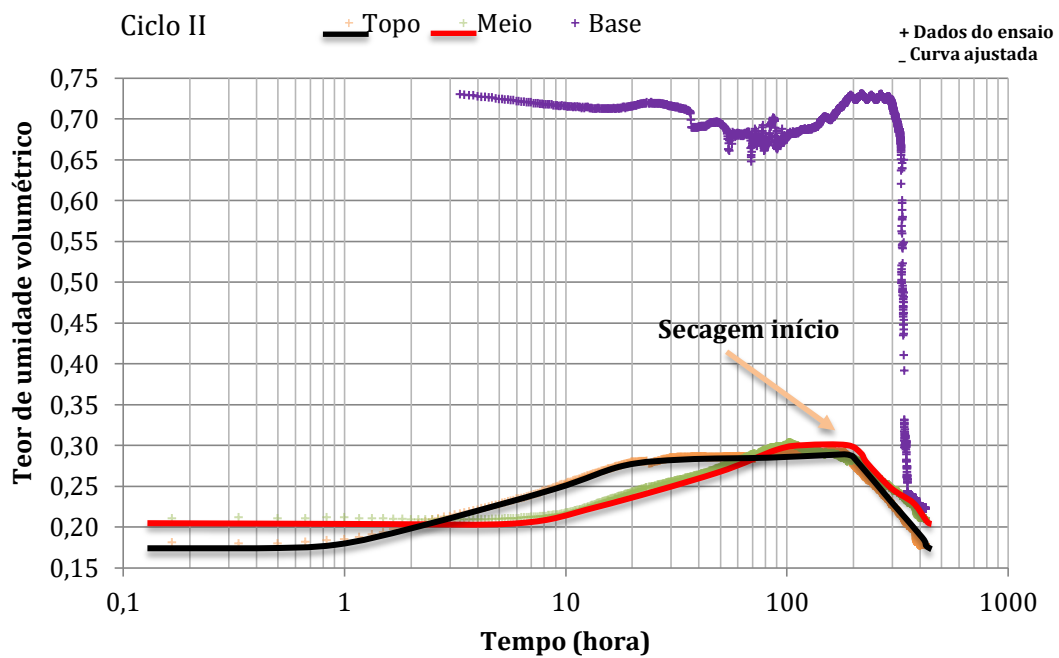


Figura 55 – Variação do teor de umidade volumétrica em relação ao tempo para topo, meio e base da camada capilar, em coluna de infiltração e secagem com GTB, ciclo II.

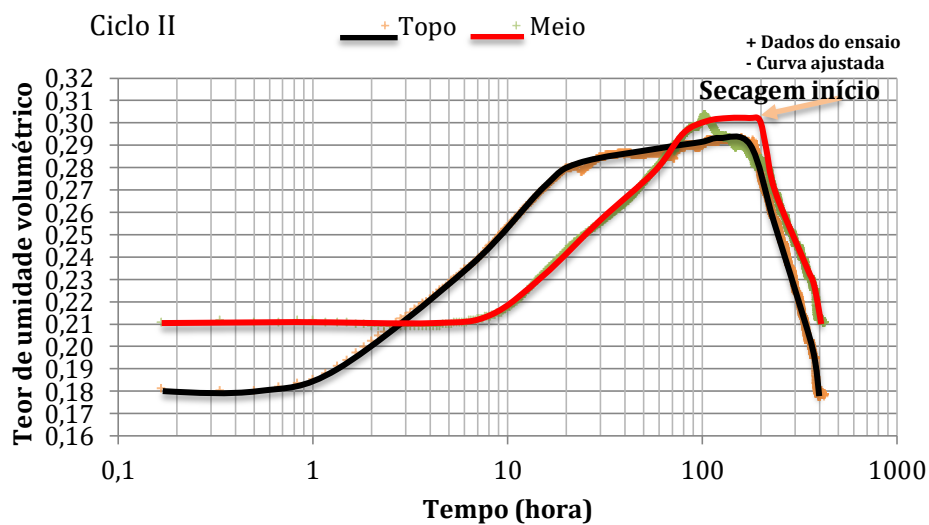


Figura 56 – Variação do teor de umidade volumétrica em relação ao tempo para topo e meio da camada capilar, em coluna de infiltração e secagem com GTB, ciclo II.

Foi observada uma reposta quase que imediata do sensor no topo da camada capilar, mostrando valores crescentes já em 0,5 horas iniciais do umedecimento e uma variação do teor de umidade mais acelerada ao longo do tempo quando comparada os sensores no meio e

na base da camada capilar, que mostraram valores crescentes após 8 horas de ensaio. Em aproximados 48 horas de ensaio, o maior teor de umidade volumétrica (0,31, “S = 86%”) foi medido no sensor do topo. Os maiores teores de umidade volumétrica do meio e da base foram registrados aproximadamente em 96 (meio) e 108 horas (base), com valores respectivos 0,30 (S = 83%) e 0,29 (S = 81%). Notou-se que a variação dos teores de umidade volumétricos ocorreu de forma mais branda, durante o umedecimento, com o aumento da profundidade. Após os registros máximos dos teores de umidade volumétricos no topo, no meio e na base da camada capilar, foram registrados decréscimos nos teores de umidade volumétricos, sendo estes decréscimos mais pronunciados quanto maior a profundidade monitorada da camada capilar. Ao término do ensaio (266,33 horas) o topo estava com teor de umidade volumétrica de 0,30 (S = 83%), o meio 0,28 (S = 78%). O sensor na base da camada capilar parou de registrar em 171,17 horas de ensaio (0,21, “S = 58%”), Figura 57.

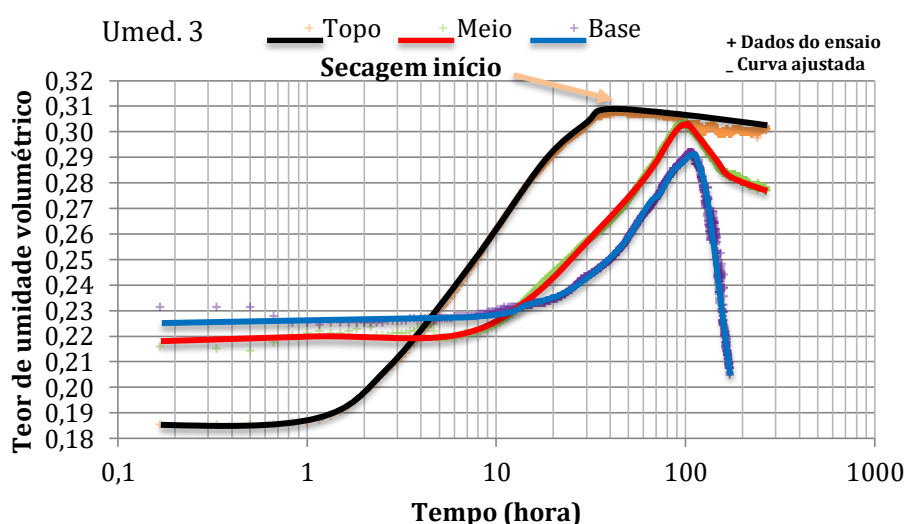


Figura 57 – Variação do teor de umidade volumétrica em relação ao tempo para topo, meio e base da camada capilar, em coluna de infiltração com GTB, terceiro umedecimento.

Ensaio de coluna de umedecimento e secagem também foram realizados sem uso de GTN. Nesses casos, o pedrisco cumpriu o papel de fundação e bloco capilar. Foram realizados dois ciclos de umedecimento e secagem na mesma barreira em um mesmo ensaio.

O ensaio iniciou com camada capilar com teor de umidade volumétrica inicial médio de 0,24 (S= 67%) inferior ao teor de umidade ótimo. Os registros iniciais do teor de umidade

volumétricos foram: no topo 0,26 (S = 72%), no meio 0,18 (S = 50%) e na base 0,27 (S = 75%).

A porção média da camada capilar apresentou valores de teores de umidade volumétricos menores do início até o fim dos ciclos de umedecimento e secagem quando comparada à porção superior e inferior da camada capilar.

Os registros dos teores de umidade volumétricos começaram a variar após 0,66 horas de ensaio. No primeiro ciclo de umedecimento, o topo da camada capilar alcançou seu teor de umidade volumétrico máximo 0,33 (S = 92%) em 24 horas de ensaio e manteve esse valor até 48 horas. Após 48 horas de ensaio a secagem do topo da camada capilar começou a ser registrada e, em 360 horas, o teor de umidade volumétrico médio medido no topo da camada capilar era de 0,24 (S = 67%). Uma nova trajetória de umedecimento foi imposta após 360 horas de ensaio (ciclo II). Os registros iniciais dos teores de umidade volumétricos para o ciclo II foram: no topo 0,24 (S = 67%), no meio 0,17 (S = 47%) e na base 0,27 (S = 75%).

Entre 456 – 480 horas de ensaio o teor de umidade volumétrico no topo era de 0,32 (S = 89%). A partir das 480 horas de ensaio o teor de umidade volumétrico no topo foi registrado entre 0,31 (S = 86%) e 0,30 (S = 83%) até 889,05 horas, quando com auxílio de lâmpadas halógenas, que provocavam um acréscimo de 12 ° C em 30 horas, de 26 ° C para 38 ° C. Ao término do ensaio (1008 horas) o teor de umidade volumétrico no topo era de 0,25 (S = 69%).

No primeiro ciclo de umedecimento, o meio da camada capilar atingiu seu teor de umidade volumétrico máximo 0,24 (S = 67%) em 56,33 horas de ensaio e manteve esse valor até 95,33 horas de ensaio. A partir desse momento, a secagem no meio da camada capilar começou lentamente e em 220,33 horas de ensaio o teor de umidade volumétrico medido no meio da camada capilar foi de 0,23 (S = 64%).

Embora a temperatura medida do meio da camada capilar tivesse se elevado em 192 horas, a sua influência na secagem da camada se fez notar apenas após o nono dia de ensaio (216 horas), quando a trajetória de secagem foi “acelerada” até o dia 16 (384 horas) do ensaio. Neste dia, o registro do teor de umidade volumétrico era de 0,16 (S = 44%).

Após 394,16 horas o meio da camada capilar volta a umedecer e prossegue o umedecimento até o vigésimo terceiro dia de ensaio (552 horas), quando se registrou o teor de umidade volumétrico no meio da camada capilar de 0,25 (S = 69%). Do vigésimo terceiro dia (552

horas) ao início do trigésimo sétimo dia (888 horas) o solo se manteve com um teor de umidade volumétrico médio de 0,24 ($S = 67\%$). Então, uma nova secagem da camada capilar iniciou e, ao término do ensaio, quadragésimo segundo dia (1008 horas) o teor de umidade volumétrico era de 0,19 ($S = 53\%$).

O primeiro umedecimento na base da camada capilar alcançou o seu ápice 0,35 ($S = 97\%$) com 42 horas de ensaio, e manteve esse valor até às 116,83 horas de ensaio. A partir desse momento, a secagem na base da camada capilar começou a ser muito branda, mantendo valores muito próximos a 0,35 até 186,67 horas, quando a base do solo começou a secar mais rápido. No décimo sexto dia (384 horas) do ensaio, o registro do teor de umidade volumétrico foi de 0,26 ($S = 72\%$). A partir do décimo sexto dia (384 horas) a base do solo começa a umidificar e atingiu teor de umidade volumétrica de 0,35 ($S = 97\%$) no vigésimo dia (480 horas) de ensaio e mantém esse teor de umidade até o trigésimo sétimo dia (888 horas), quando o solo começa a secar e continua secando até o término do ensaio no quadragésimo segundo dia (1008 horas) quando registra teor de umidade volumétrico de 0,29 ($S = 81\%$), Figura 58.

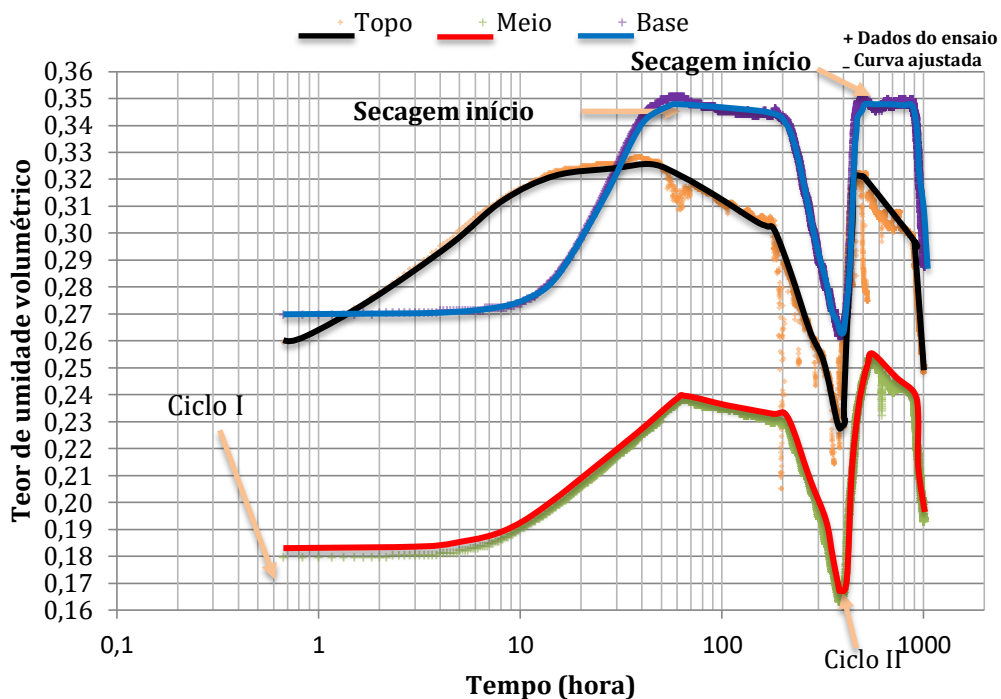


Figura 58 – Variação do teor de umidade volumétrica na camada capilar sem GTN, ciclo I e ciclo II.

4.4 Sucção Matricial ao Longo do Tempo nos Ciclos de Secagem e Umedecimento

A variação da sucção com o tempo nos ensaios com as colunas de umedecimento e secagem, para cada ensaio, foi limitada pelo intervalo de medição do sensor (7 a 239 kPa) e ajustada conforme a temperatura do solo, isto é reduzindo 1 % do valor registrado sucção, entre 7 – 239 kPa, para cada acréscimo de temperatura de 1 grau Fahrenheit (°F), a partir da temperatura de 70° F (21 °C).

As curvas sucção por tempo tiveram sua descrição a partir dos dados obtidos diretamente da instrumentação. Porém curvas ajustadas foram apresentadas nos gráficos. Estas curvas ajustadas foram concebidas com a exclusão de pontos discrepantes, tentando preservar o máximo possível o traçado mais marcante dos pontos crus.

Na coluna de umedecimento e secagem usando o GTA, a variação da sucção matricial medida pelo sensor na porção superior aconteceu 1,17 hora após o início do ensaio, registrando 227 kPa (24 °C). Em 2,16 horas do ensaio, a sucção medida era de 76 kPa. A partir desse momento, a sucção continuou a decrescer com a frente de umedecimento, só que de forma mais branda, até 15,67 horas nesse instante, o sensor registrou 42 kPa e entre 15,67 – 45,83 horas de ensaio, os valores de sucção oscilaram entre 39 – 45 kPa. Às 46 horas de ensaio, quando se registrava uma sucção de 46 kPa iniciou um acréscimo rápido da sucção atingindo o seu máximo em 55,33 horas de ensaio (188 kPa, 33 °C).

No meio da camada capilar começou a ser detectada mudança no valor da sucção matricial (231 kPa, 23 °C) em 10,37 horas decorridas do ensaio e atingiram seus menores patamares de 17 kPa a 20 kPa no intervalo de 25,16 – 45,67 horas. Após 45,67 horas, a secagem do solo acelerou até que alcançou o registro máximo de 192 kPa (32 °C), após 66,83 horas de ensaio.

Na base da camada capilar começou a ser detectada mudança no valor de sucção matricial (231 kPa, 23 °C) em 8,5 horas decorridas do ensaio, os menores valores de sucção registrados no meio da camada capilar foram de 18 kPa e 19 kPa no intervalo de 22,00 – 51,33 horas. A secagem da porção inferior da camada capilar se acentuou após 51,33 horas de ensaio, registrando o valor máximo de sucção detectável de 201 kPa (30 °C) em 75,17 horas de ensaio, Figura 59.

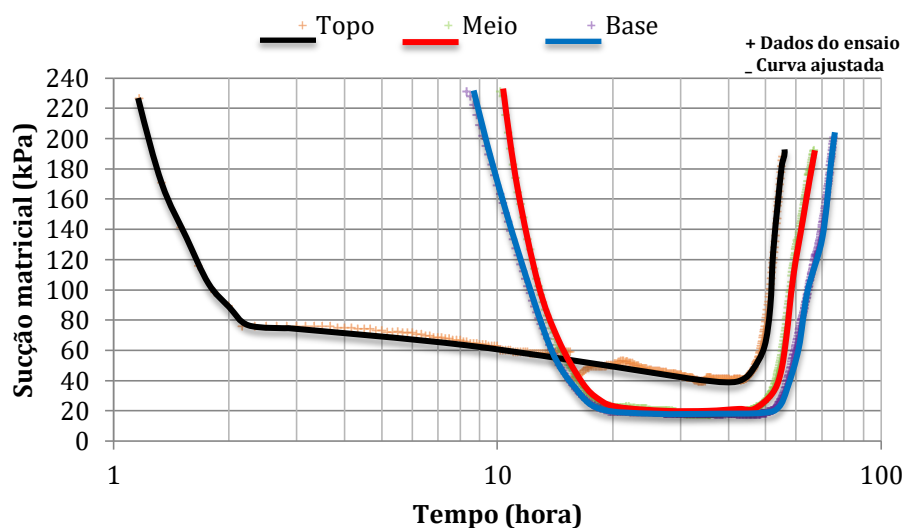


Figura 59 – Variação temporal da sucção ao longo da camada capilar com interface com o GTA.

Na coluna de umedecimento e secagem com GTB, no ciclo I, a medida da variação da sucção matricial pelo sensor da porção superior aconteceu 8,67 horas após o início do ensaio, partindo do valor inicial de 214 kPa (27 °C). Esse valor reduziu substancialmente até 22,83 horas de ensaio (15 kPa), quando a sucção continuou decrescente em média até o tempo de 72,5 horas, quando o sensor mediu 11 kPa, a menor medida para parte superior da camada capilar, e se manteve até o decorrer de 110,5 horas de ensaio. A sucção começou a se elevar após as 110,5 horas, embora as lâmpadas halógenas já tivessem sido ligadas em 94,5 horas de ensaio. Em 122,67 horas de ensaio, um valor de sucção de 162 kPa era registrado, o maior registro possível devido à temperatura do momento (39 °C).

As porções médias e inferiores da camada capilar utilizando o GTB tiveram comportamento similar à porção superior, todavia com influência mais tardia do aumento de temperatura gerado pelo acionamento das lâmpadas halógenas.

A variação da sucção matricial pelo sensor da porção média ocorreu 3,33 horas (214 kPa, 27 °C) após o início do ensaio. A sucção, então, reduziu até os valores de 8 e 9 kPa registrados no intervalo de 96,83 – 116,17 horas de ensaio. A partir de 116,17 horas, o valor da sucção começou a crescer e em 136,33 horas de ensaio registrou valor de 179 kPa (35 °C).

A medida da variação da sucção matricial pelo sensor da porção inferior da camada aconteceu 13 horas após o início do ensaio, momento em que foi registrada uma sucção de 218 kPa (26

°C). Após a sucção reduziu até os valores de 18, 19, 20 kPa, registrados no intervalo entre 74 – 121,17 horas de ensaio. A partir de 121,17 horas, o valor da sucção começou a registrar acréscimos e, em 136,33 horas, registrou valor de 188 kPa (33 °C), Figura 60.

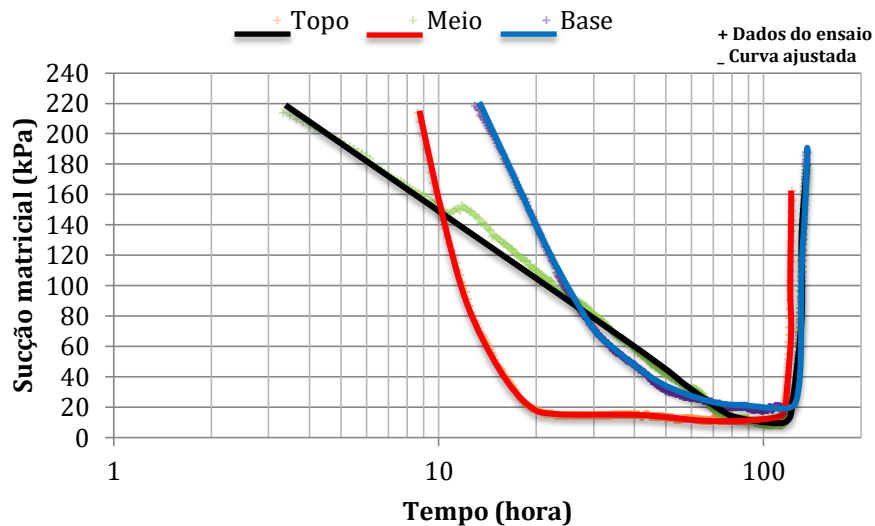


Figura 60 – Variação temporal da sucção ao longo da camada capilar com interface com o GTB, primeiro ciclo.

Um novo ciclo de umedecimento e secagem com camada capilar utilizando o GTB foi realizado e teve resposta similar ao primeiro ensaio. A variação da sucção matricial pelo sensor no topo da camada capilar foi medida 6,66 horas após o início do ensaio, momento em que foi registada uma sucção de 231 kPa (23 °C). A sucção reduziu até os valores de 14, 15, 16, 17 e 18 kPa, registrados no intervalo de 95,5 – 184,67 horas de ensaio. A partir de 184,67 horas, o valor da sucção começou a registrar acréscimos e, em 192,33 horas, registrou o valor de 162 kPa (39 °C), máximo detectável. Embora as lâmpadas halógenas tenham sido ligadas 171,33 horas, a secagem só se intensificou às 184 horas.

No meio e na base da camada capilar, a variação da sucção ocorreu similar à variação no topo da camada capilar, porém com a redução inicial da sucção ocorrendo de maneira mais suave e com influência mais tardia do aumento de temperatura gerado pelo acender das lâmpadas halógenas. A medida da sucção matricial pelo sensor no meio da camada capilar se iniciou em 42,5 horas do início do ensaio registrando 235 kPa (22 °C). A sucção, então, reduziu até 13 kPa às 138,67 horas e foram registrados valores de sucção de 11, 12 e 13 kPa até 187,65

horas. A partir das 187,65 horas, o valor da sucção registrou acréscimos e, em 208,5 horas, registrou valor de 188 kPa (31 ° C), maior medida possível de registrar.

A sucção matricial na base da camada capilar começou a ser registrada às 66,5 horas em 235 kPa (22 ° C) e apresentou uma trajetória decrescente até 168,83 horas, quando o sensor mediu 17 kPa e manteve esse valor até 172,5 horas, momento que iniciou o acréscimo no valor da sucção, que atingiu valor de 196 kPa (máximo de leitura a 31 ° C) em 209,17 horas, Figura 61.

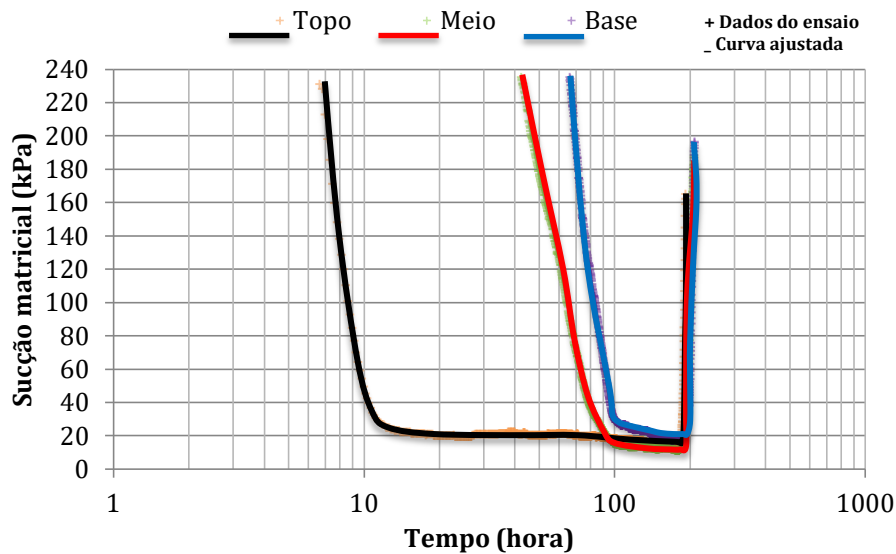


Figura 61 – Variação temporal da sucção ao longo da camada capilar desidratada com interface com o GTB, segundo ciclo.

Durante o terceiro umedecimento da camada capilar com o GTB, os registros de alteração da sucção no topo, no meio e na base da camada capilar se deram respectivamente em 6 horas, 44,17 horas e 69,33 horas de ensaio, quando foram medidos, em mesma ordem, 222 kPa (25 ° C), 235 (22 ° C) e 231 kPa (23 ° C). O ensaio durou 266,33 horas e as sucções de topo, meio e base da camada capilar, registraram seus menores valores 12, 12 e 16 kPa respectivamente, Figura 62.

A variação da sucção matricial também foi monitorada na coluna de umedecimento e secagem sem utilização de geotêxteis. Foram feitos dois ciclos de umedecimento e secagem, sendo que o tempo dos dois ciclos foi considerado contínuo, sem interrupção do cronômetro de um ciclo para o outro.

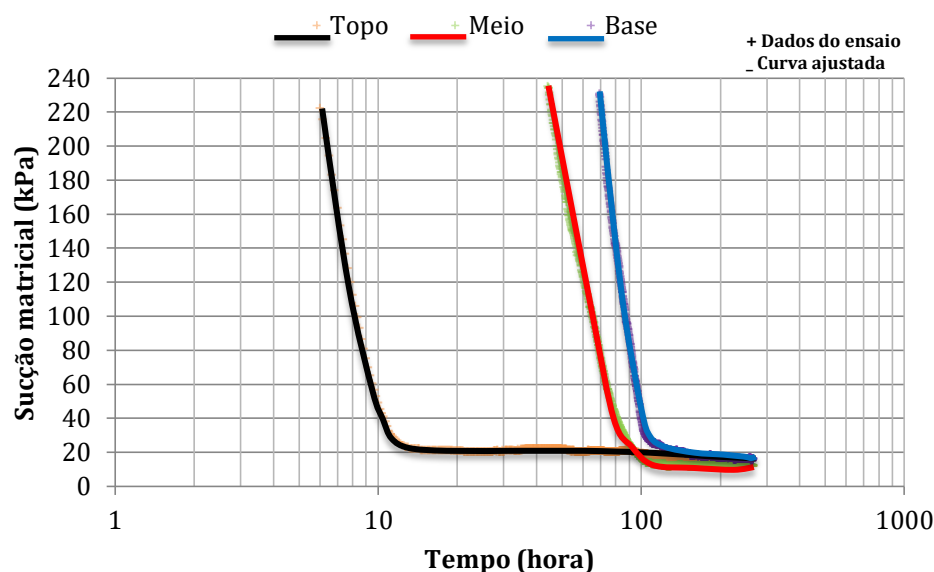


Figura 62 – Variação temporal da sucção ao longo da camada capilar com interface com o GTB, terceiro umedecimento.

Durante o primeiro ciclo de umedecimento, o registro da sucção no topo da camada capilar, foi de 222 kPa (25 °C), em 49,33 horas de ensaio, e manteve a sucção entre valores de 9 a 15 kPa durante o intervalo de 51 – 192,33 horas. O menor valor de sucção medido, 9 kPa, ocorreu em 187, 33 horas de ensaio. Logo no início do oitavo dia (192,33 horas), o valor da sucção começou a crescer rapidamente. Após 12,84 horas (205,17 horas de ensaio), a sucção foi registrada em seu valor máximo medível pelo equipamento 174,95 kPa (36 °C).

O decréscimo de sucção no topo da camada capilar no segundo ciclo iniciou-se 414,67 horas de ensaio (214 kPa, 27 °C) e terminou em 896, 38 horas (11 kPa). Em 911,72 horas, a sucção registrou 166 kPa (38 °C), o máximo medível. Entre 468,83 – 896, 38 horas, os valores de sucção oscilaram entre 10 – 15 kPa, salvo no intervalo entre 657,55 – 715,22 horas, quando os valores da sucção subiram de 16 kPa até 31 kPa e retornam aos 16 kPa na etapa final desse intervalo.

A sucção, no primeiro umedecimento, começou a ser registrada no meio da camada capilar, quando marcava 227 kPa (24 °C), em 20 horas de ensaio. Após 111,67 horas, atingiu menores valores de sucção e os manteve entre os valores de 10 – 16 kPa durante o intervalo de 111,67 – 196,33 horas. O menor valor de sucção medido, 10 kPa, ocorreu em 188,5 horas de ensaio.

A partir de 196,33 horas, o valor da sucção começou a crescer rapidamente. Em 205,17 horas de ensaio, foi registrado o valor máximo da sucção para a temperatura no momento, 192,16 kPa (32 °C).

A segunda faixa de redução de sucção, no meio da camada capilar, iniciou em 428,17 horas de ensaio (227 kPa, 24 °C) e terminou em 896,22 horas (10 kPa). Em 936,22 horas, a sucção já era medida em seu máximo detectável em 184 kPa (39 °C). Entre 500,33 – 899,72 horas, os valores de sucção oscilaram entre 10 e 15 kPa, salvo no intervalo entre 651,38 – 718,22 horas quando os valores da sucção ascenderam de 16 kPa até 23 kPa e retornaram aos 16 kPa na etapa final desse intervalo.

Na base da camada capilar, os decréscimos de valores de sucção até o valor mínimo medido, ocorreram mais lentamente que no meio e no topo da camada capilar. Na base da camada capilar, as variações da sucção registrável se iniciaram em 36,67 horas (235 kPa, 22 °C) no primeiro umedecimento e em 450,5 horas (231 kPa, 23 °C) no segundo umedecimento. As sucções reduziram para 20 kPa (191 horas) e 18 kPa (899,22 horas), primeiro e segundo umedecimento, a partir desses momentos as sucções começaram a registrar acréscimo e seus valores máximos aferíveis que foram respectivamente 192 kPa (243,17 horas, 32 °C) e 196 kPa (943,05 horas, 31 °C), Figura 63.

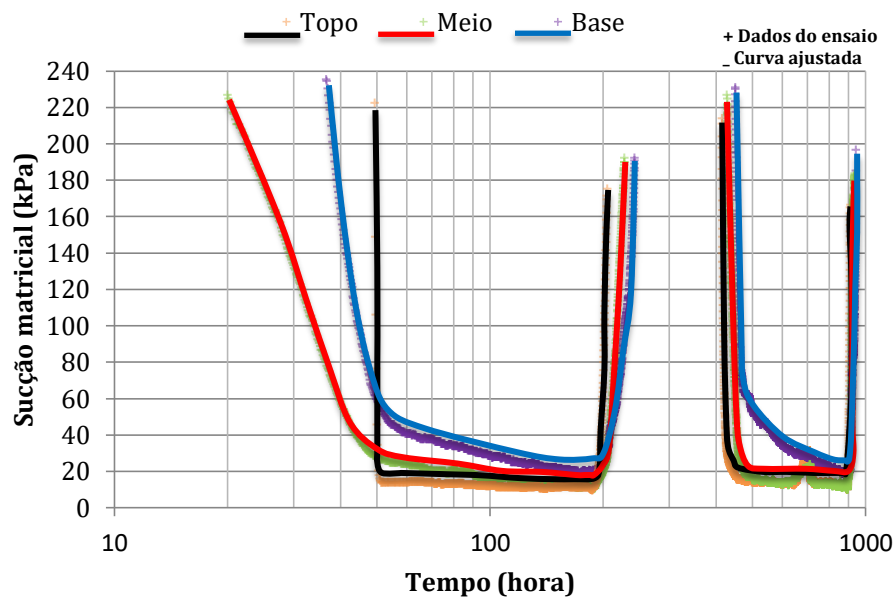


Figura 63 – Variação temporal da sucção ao longo da camada capilar sem interface com o GTN.

4.5 Variação da Temperatura ao Longo do Tempo na Coluna de Umedecimento e Secagem

Sensores de temperatura monitoraram a oscilação de temperatura nas porções inferior, média e superior na camada capilar das colunas de umedecimento e secagem. Além da amplitude térmica diária as medidas também foram influenciadas pelo calor gerado e incidido por lâmpadas halógenas.

No ensaio de infiltração e secagem da coluna de solo com o GTA, as temperaturas da camada capilar apresentaram dois intervalos distintos devido à influência da incidência de calor, primeiro de uma lâmpada halógena e depois de duas lâmpadas halógenas. A primeira lâmpada foi acionada em 20,83 horas (25°C) de ensaio e, em aproximadamente em 43,17 horas de ensaio, o aumento de calor provocado por esta lâmpada chegou ao máximo (34°C). De 43,17 até 186,67 horas de ensaio a temperatura do solo sofreu pequenas oscilações relativas a variações da temperatura ambiente. Em 186,67 horas (33°C), a outra lâmpada foi ligada, contribuindo para o acréscimo de temperatura até aproximadamente 191,17 horas de ensaio (38°C), momento no qual as oscilações de temperatura do solo sofreram maior influência das variações da temperatura ambiente, Figura 64.

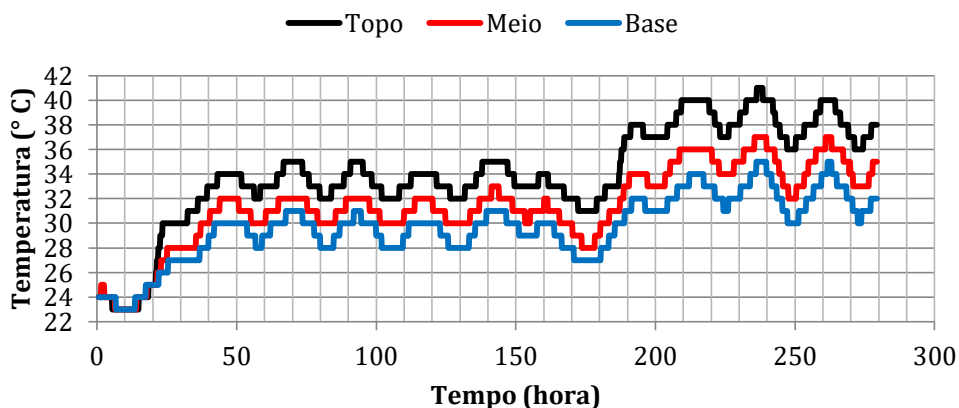


Figura 64 – Variação da temperatura da camada capilar durante o ensaio coluna umedecimento e secagem com GTA.

Nos outros ensaios de coluna de umedecimento e secagem, as duas lâmpadas halógenas foram acionadas ao mesmo tempo, exceto o terceiro umedecimento da coluna com GTB, que não tiveram as lâmpadas acionadas.

No primeiro e segundo ciclo da coluna que utilizou o GTB foram registrados no topo da camada capilar acréscimos significativos de temperatura devido acionamento das lâmpadas halógenas. As lâmpadas foram acionadas em 94,5 horas (26°C) no ciclo I e em 171,33 horas (26°C) no ciclo II. O aumento de calor provocado pelas lâmpadas atingiu o máximo respectivamente em 122,33 horas (39°C) no ciclo I e 194 horas (40°C) no ciclo II. No ciclo I o ensaio foi encerrado às (309 horas) com as lâmpadas acesas e a camada capilar secando.

No ciclo II, as lâmpadas foram desligadas às 382,33 horas (38°C) e, ao término do ensaio em 425,67 horas a temperatura do solo era de 23°C (Figura 65 e Figura 66). Durante o terceiro ciclo de umedecimento da coluna com GTB, as lâmpadas halógenas não foram acionadas e a temperatura foi influenciada unicamente pelas condições climáticas do laboratório, Figura 67.

Os acionamentos das lâmpadas halógenas nos ensaios sem uso de GTN ocorreram respectivamente às 182,83 horas (24°C) no ciclo I e 889,05 horas (26°C) no ciclo II. Às 213,33 horas de ensaio, no primeiro ciclo, a temperatura do topo da camada capilar atingiu 38°C o mesmo valor medido da temperatura do solo em 984,05 horas (38°C), segundo ciclo. As lâmpadas foram desligadas às 375,67 horas (38°C) ciclo I e, no segundo ciclo, ao término do ensaio às 1008 horas (38°C). A influência térmica do uso destas lâmpadas também foi observada no meio e na base das camadas capilares, acompanhando a mesma tendência, todavia em respostas mais lenta e atingindo temperaturas menos elevadas, quanto maior a profundidade, Figura 68.

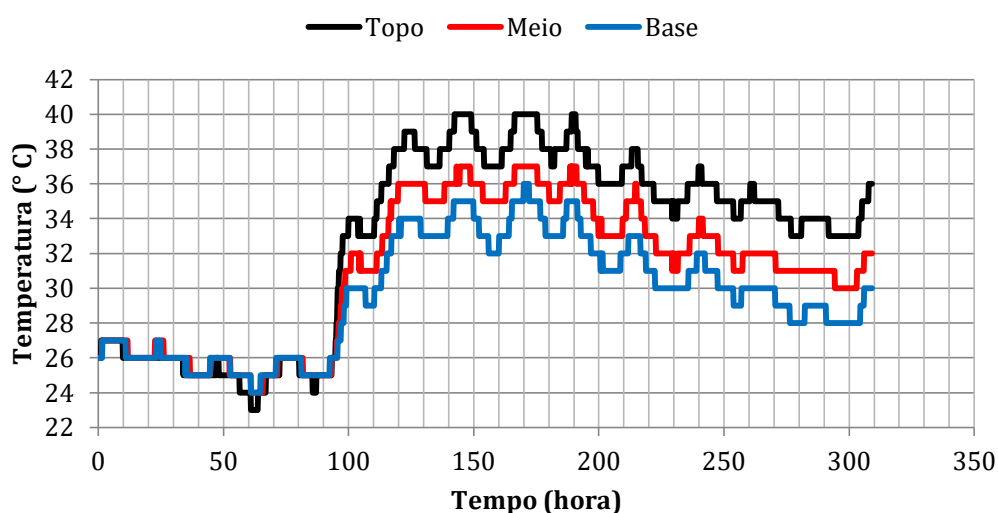


Figura 65 – Variação da temperatura da camada capilar durante o ensaio coluna umedecimento e secagem com GTB ciclo I.

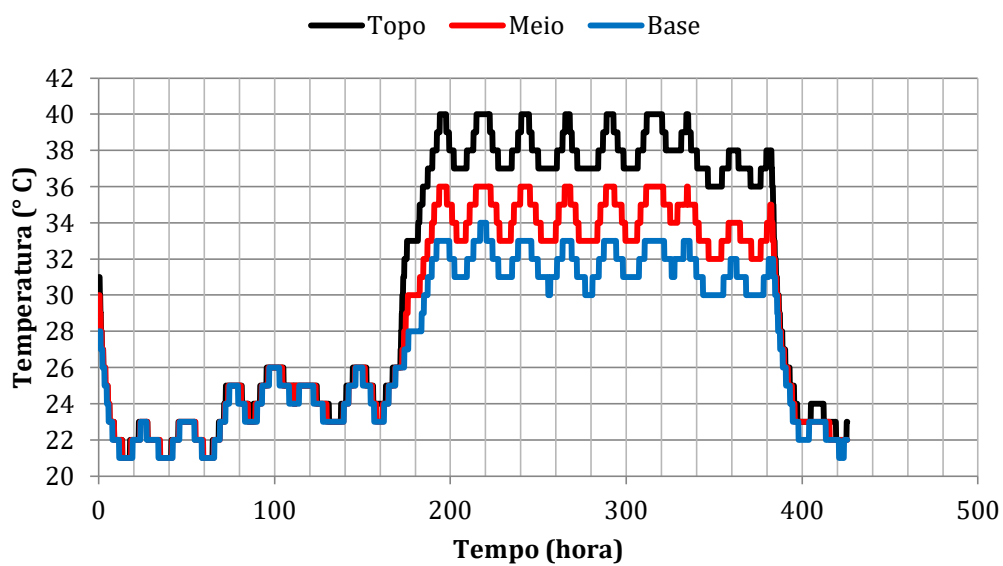


Figura 66 – Variação da temperatura da camada capilar durante o ensaio coluna umedecimento e secagem com GTB ciclo II.

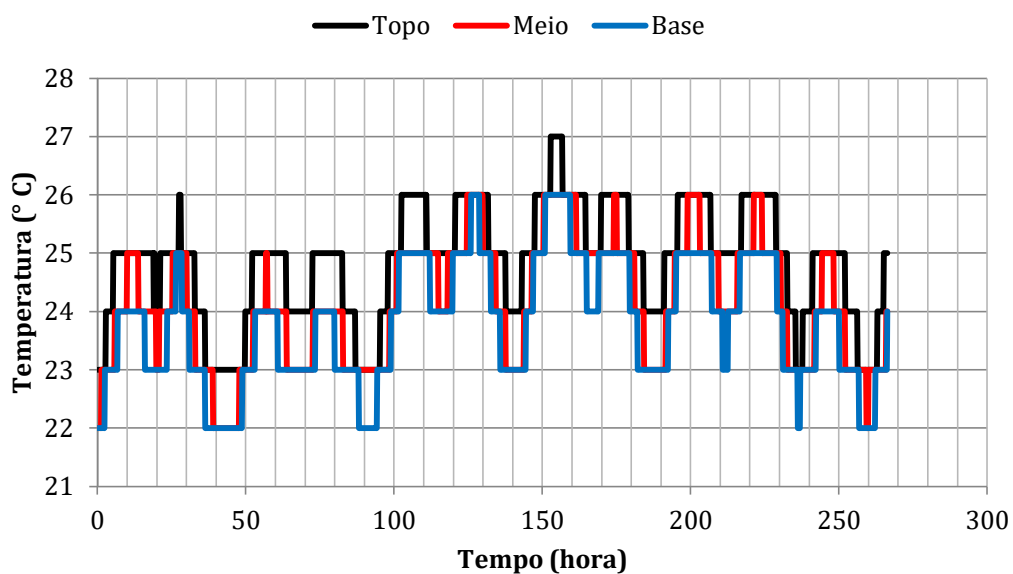


Figura 67 – Variação da temperatura da camada capilar durante o ensaio coluna umedecimento e secagem com GTB, umedecimento 3.

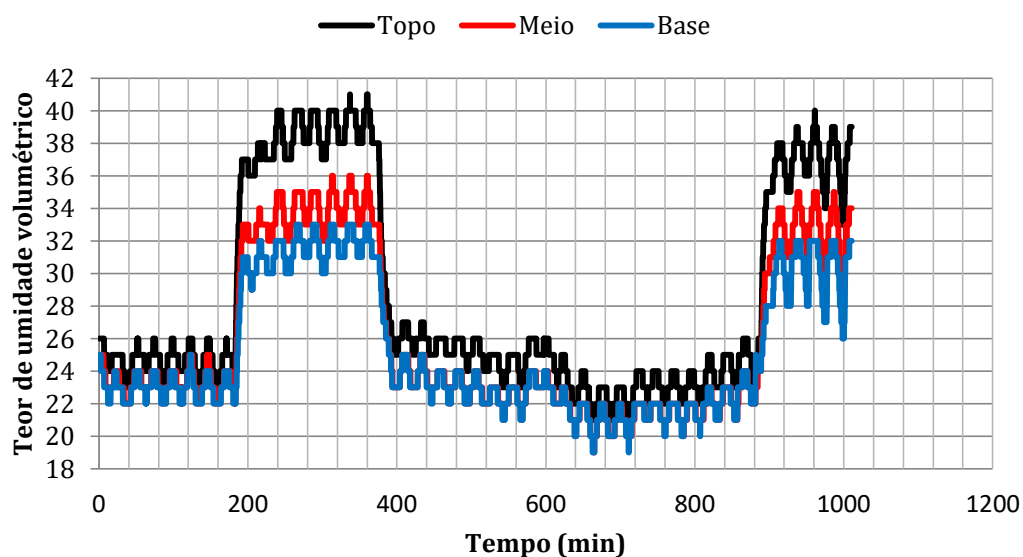


Figura 68 – Variação da temperatura da camada capilar durante o ensaio coluna umedecimento e secagem sem GTN, ciclo I e II.

4.6 Variações do Teor de Umidade Volumétrica por Sucção Matricial nos ensaios de Coluna de Umedecimento e secagem

O monitoramento da sucção matricial e do teor de umidade volumétrica durante os ensaios na coluna de umedecimento e secagem possibilitou a análise da retenção de água no topo, no meio e na base da camada capilar. Relacionou-se o teor de umidade volumétrica em escala linear com a sucção matricial e escala logarítmica, representando a retenção de água para o topo, o meio e a base da camada capilar nos ensaios de coluna de solo realizados.

As curvas foram descritas a partir dos dados obtidos diretamente da instrumentação. Porém curvas ajustadas foram propostas e representadas nos gráficos. Estas curvas ajustadas foram concebidas com a exclusão de pontos discrepantes, tentando preservar o máximo possível o traçado mais marcante dos pontos crus plotados e igualando o teor de umidade volumétrica final da trajetória de umedecimento com o teor de umidade inicial da trajetória de secagem.

O comportamento hidráulico no topo, no meio e na base da camada capilar da coluna de umedecimento e secagem utilizando o GTA seguiu um padrão. Todas as curvas apresentaram histerese, sendo muito mais pronunciada no topo da camada capilar. Entretanto, em valores de sucção inferiores e próximos a 70 kPa no topo, a 30 kPa no meio e a 50 kPa para a base, ocorreu uma “inversão” na histerese, onde um mesmo valor de sucção foi relacionado com

um maior teor de umidade na trajetória de umedecimento do que na trajetória de secagem, Figura 69, Figura 70, Figura 71 e Figura 72.

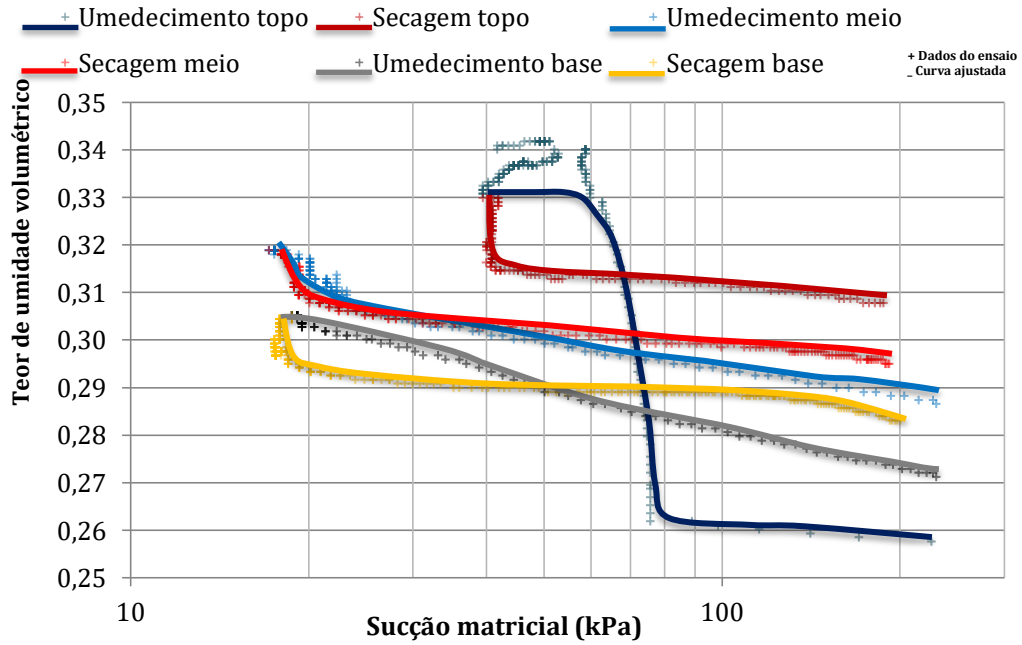


Figura 69 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTA (topo, meio e base).

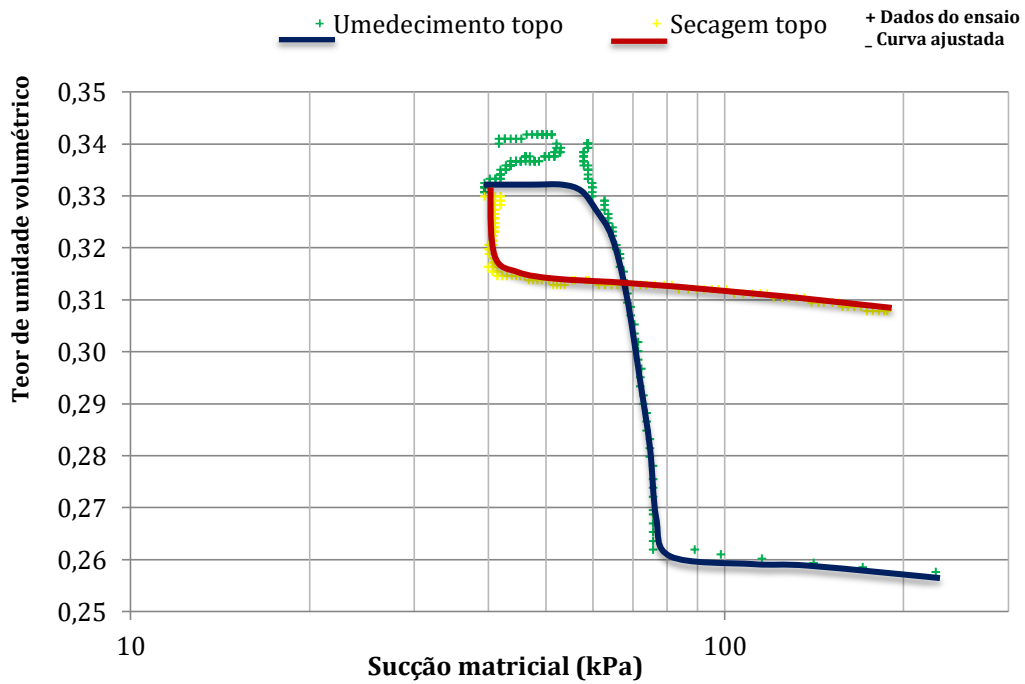


Figura 70 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTA (topo).

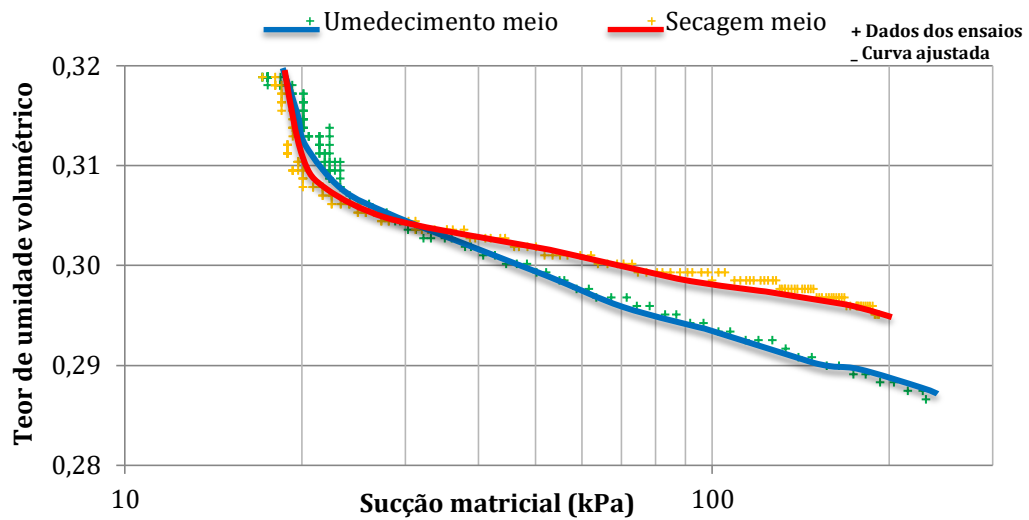


Figura 71– Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTA (meio).

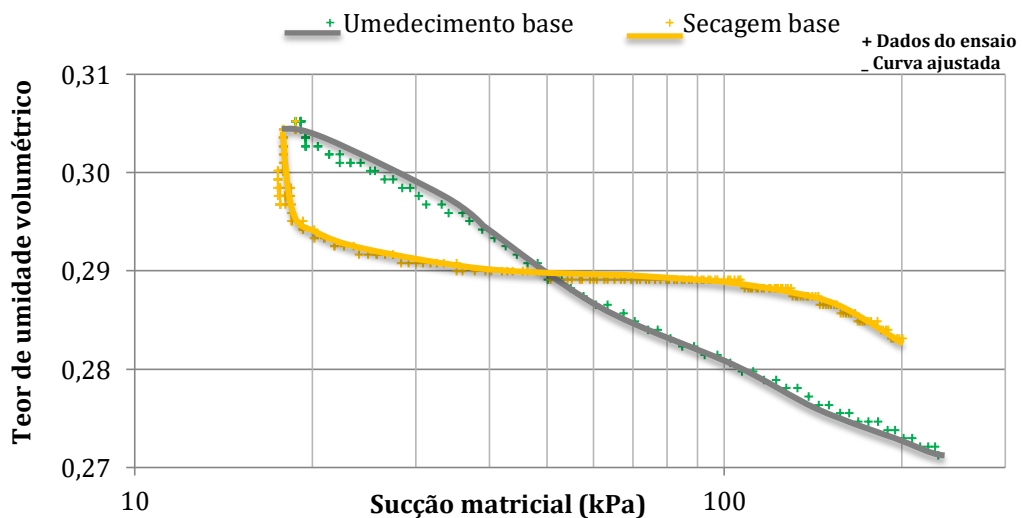


Figura 72 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTA (base).

Nos ensaios de coluna e umedecimento e secagem que utilizaram o GTB, observou-se certa discrepância de valores de umidade na base da camada capilar, quando comparada com as outras porções da camada. No primeiro ciclo de umedecimento e secagem, tanto na porção superior quanto no meio da coluna, ocorreu histerese. Nesse ensaio, quase sempre os maiores teores de umidade para uma mesma sucção estavam relacionados à trajetória de umedecimento, salvo em uma estreita faixa de baixas suções registradas no topo da camada

capilar, onde o maior teor de umidade está associado a menor sucção para trajetória de secagem, Figura 73, Figura 74, Figura 75 e Figura 76.

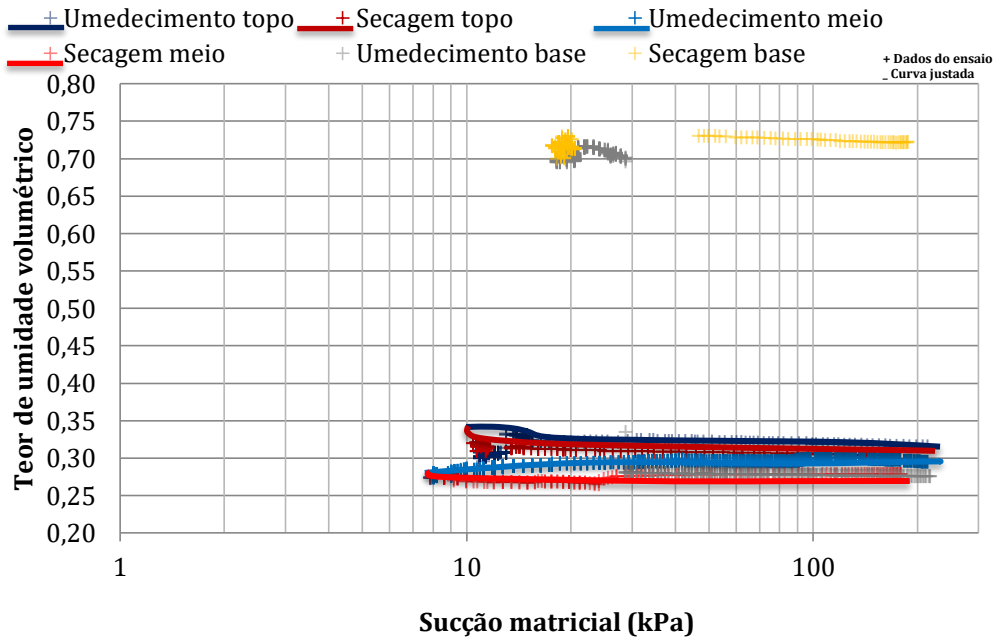


Figura 73 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo I (topo, meio e base).

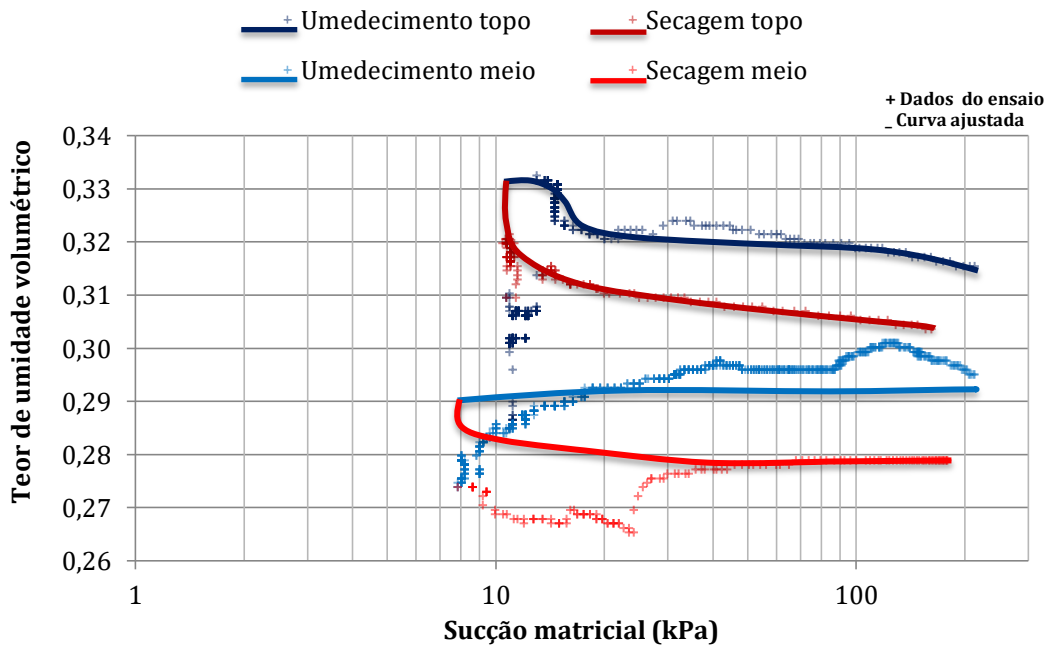


Figura 74 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo I (meio e base).

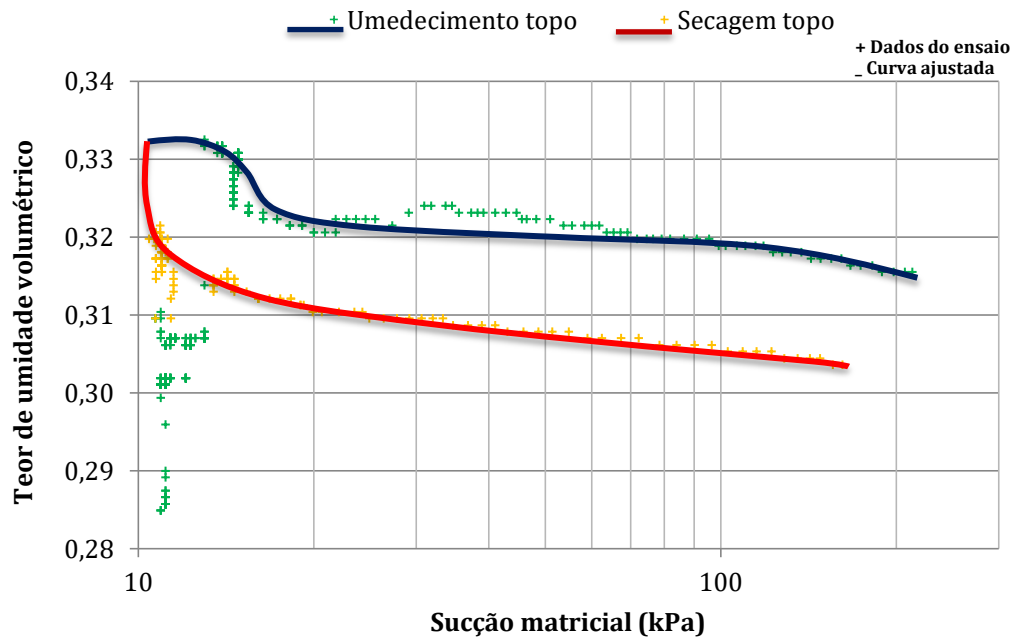


Figura 75 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo I (topo).

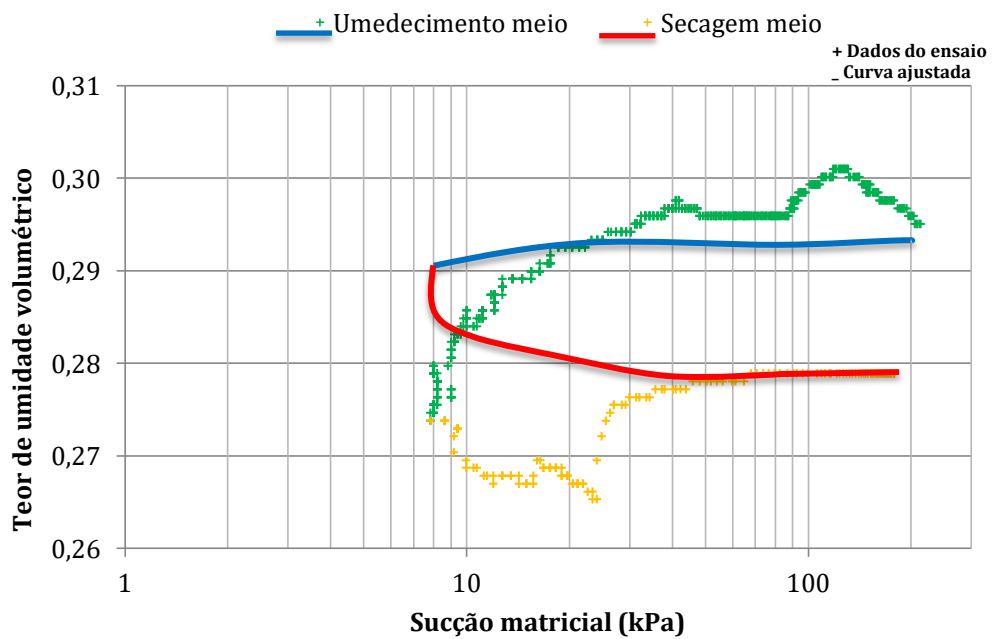


Figura 76 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo I (base).

O segundo ciclo de ensaio na coluna que utilizou o GTB se iniciou com a camada capilar menor teor de umidade que no primeiro ciclo. A histerese na porção superior da camada capilar foi mais pronunciada que na porção média e manteve sempre o padrão, de para uma mesma sucção, maiores teores de umidade foram registrados na trajetória de secagem. No meio da camada capilar, para valores de sucção inferiores a 106 kPa, para uma mesma sucção os maiores teores de umidade volumétricos foram verificados na trajetória de umedecimento. Já para valores de sucção superiores a 106 kPa, para um mesmo valor de sucção, os maiores teores de umidade volumétricos medidos corresponderam à trajetória de secagem, Figura 77, Figura 78, Figura 79 e Figura 80.

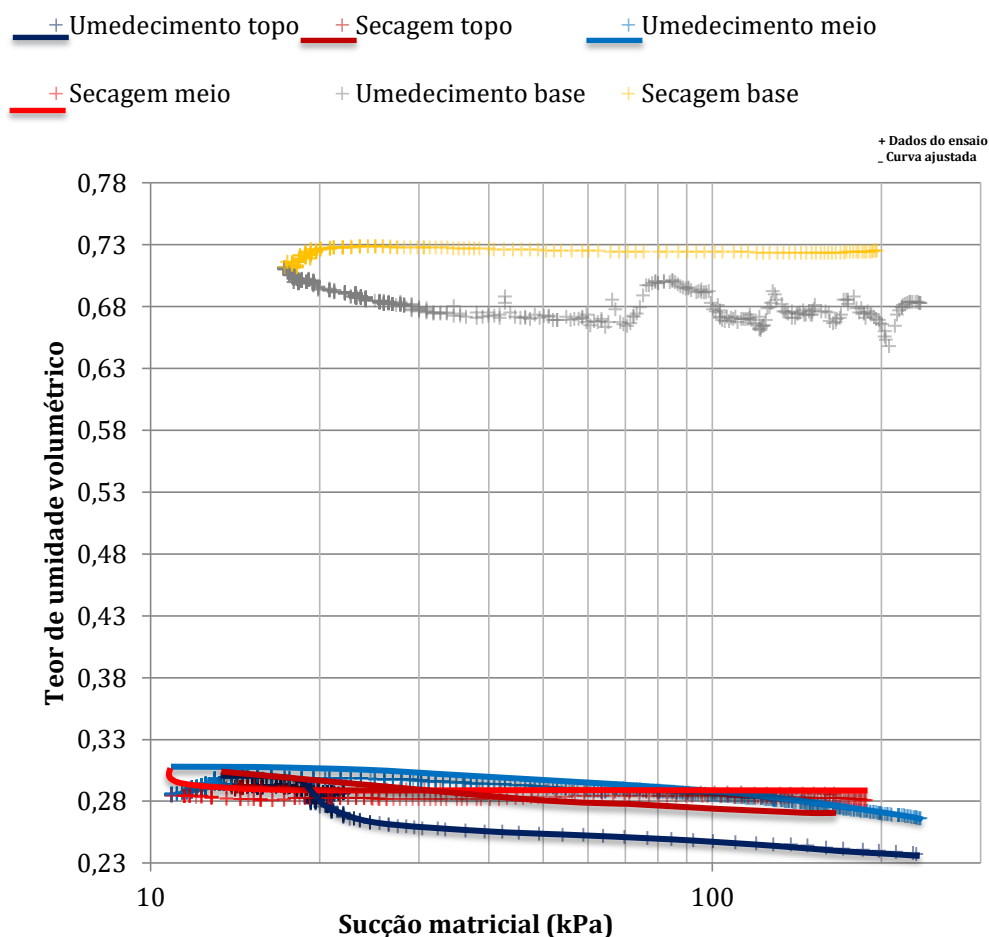


Figura 77 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo II (topo, meio e base).

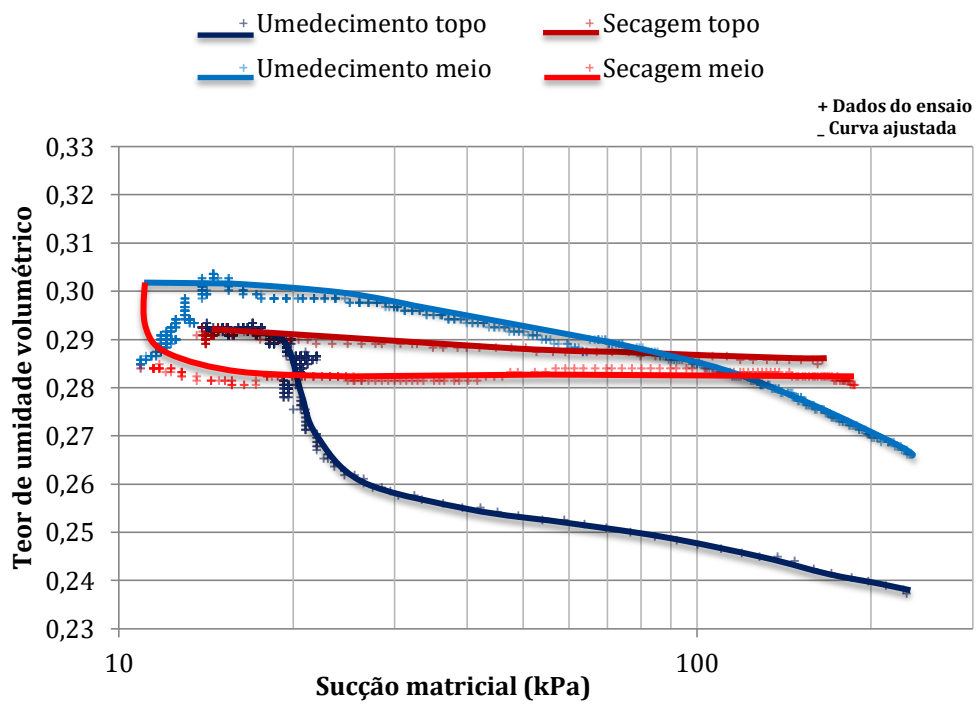


Figura 78 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo II. (topo, meio).

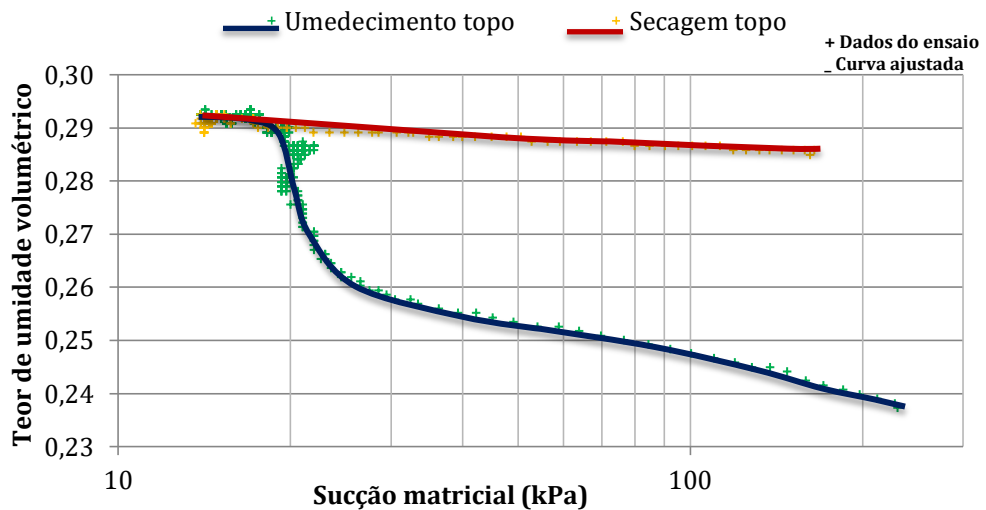


Figura 79 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo II. (topo).

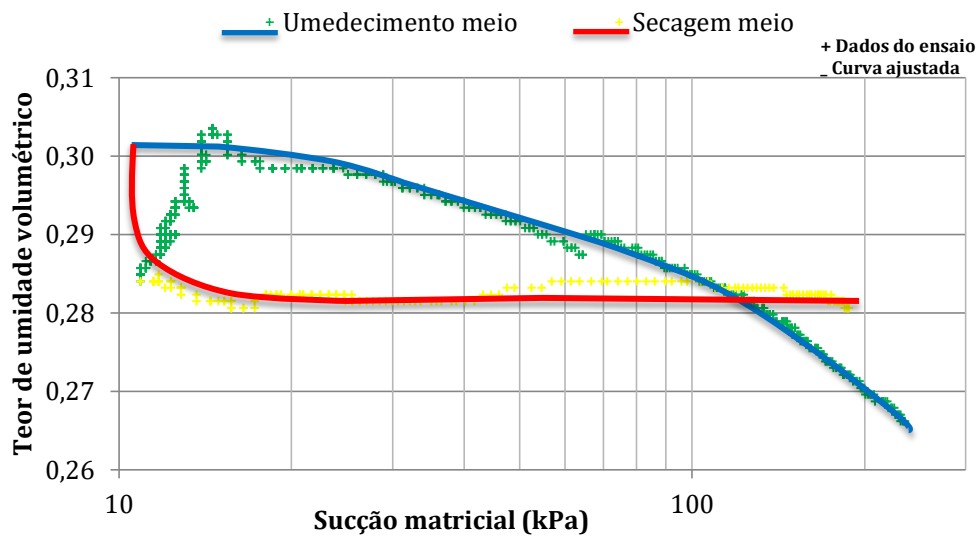


Figura 80 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, ciclo II. (base).

Durante o terceiro umedecimento da coluna com o GTB, a maior retenção de água resultou em menores valores de sucção no topo, no meio e na base camada capilar, até o momento em que essas regiões iniciaram a secagem. Todavia, os baixos valores de sucção se mantiveram, Figura 81 e Figura 82.

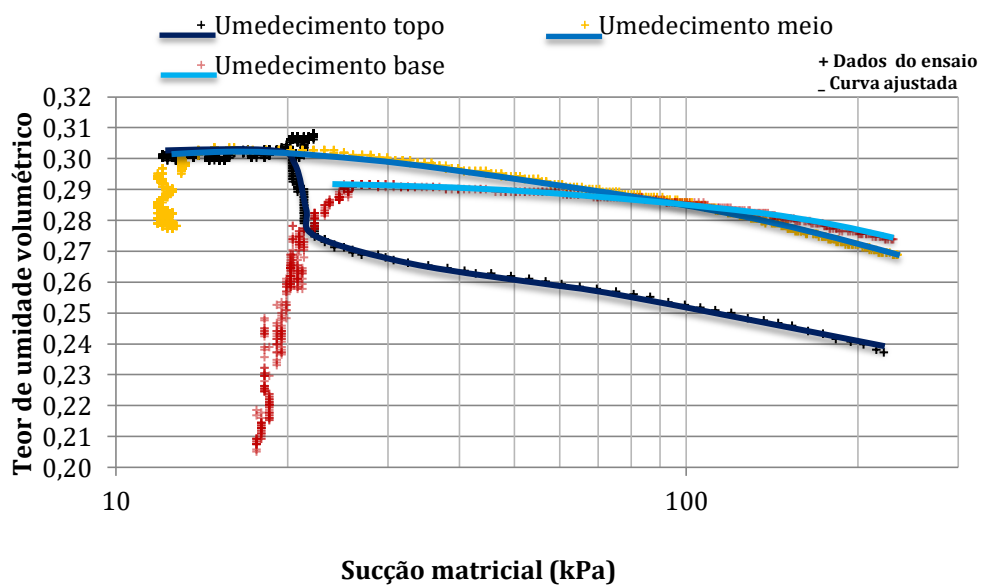


Figura 81 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, terceiro umedecimento (topo, meio e base).

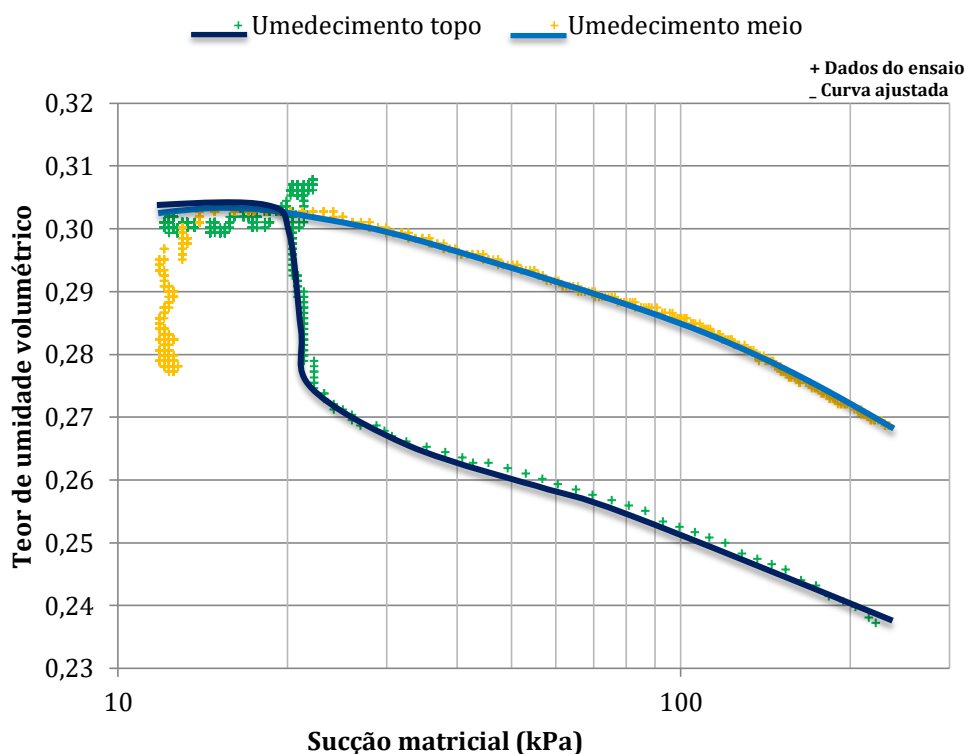


Figura 82 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem com uso do GTB, terceiro umedecimento (meio e base).

Os ensaios de coluna de umedecimento e secagem sem a utilização de GTN apresentaram histerese ao longo da camada capilar de acordo com os valores de sucção e teor de umidade volumétrica medidos. No primeiro ciclo de umedecimento e secagem, a histerese no topo da camada capilar foi maior que a do meio e da base da camada capilar. No topo e no meio da camada capilar, para uma mesma sucção, o teor de umidade volumétrica foi maior na trajetória de umedecimento do que na trajetória de secagem. Esse fato também foi observado na base da camada capilar em valores de sucção inferiores a 33 kPa. Em valores superiores a 33 kPa, para uma mesma sucção, os maiores teores de umidade volumétricos foram associados à trajetória de secagem.

No segundo ciclo de umedecimento e secagem, o mesmo ocorrido no primeiro ciclo foi observado, ou seja, histerese no topo da camada capilar foi maior que a do meio e da base da camada capilar. No topo e na base da camada capilar, para uma mesma sucção, o teor de umidade volumétrica foi maior na trajetória de umedecimento do que na trajetória de secagem. No meio da camada capilar, em valores de sucção inferiores a 24 kPa isso também

foi verificado. Porém, em valores superiores a 24 kPa, para uma mesma sucção, os maiores teores de umidade volumétricos foram associados à trajetória de secagem, Figura 83, Figura 84, Figura 85, Figura 86, Figura 87, Figura 88, Figura 89 e Figura 90.

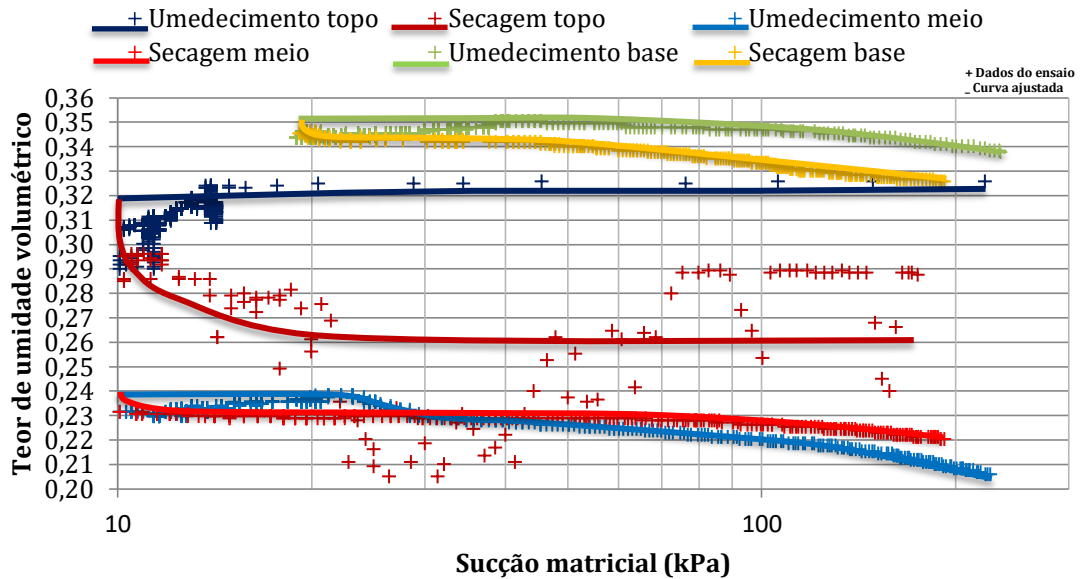


Figura 83 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo I (topo, meio e base).

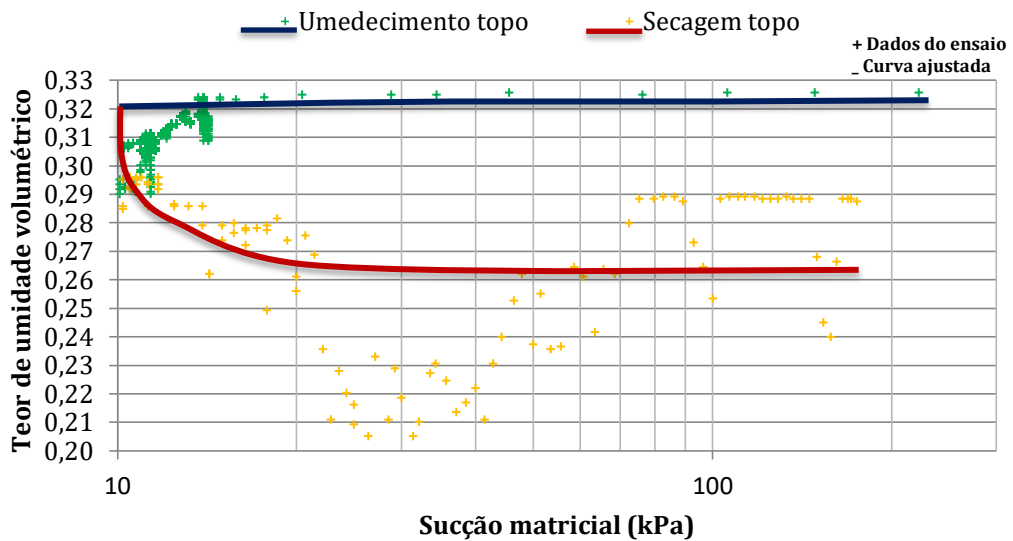


Figura 84 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo I (topo).

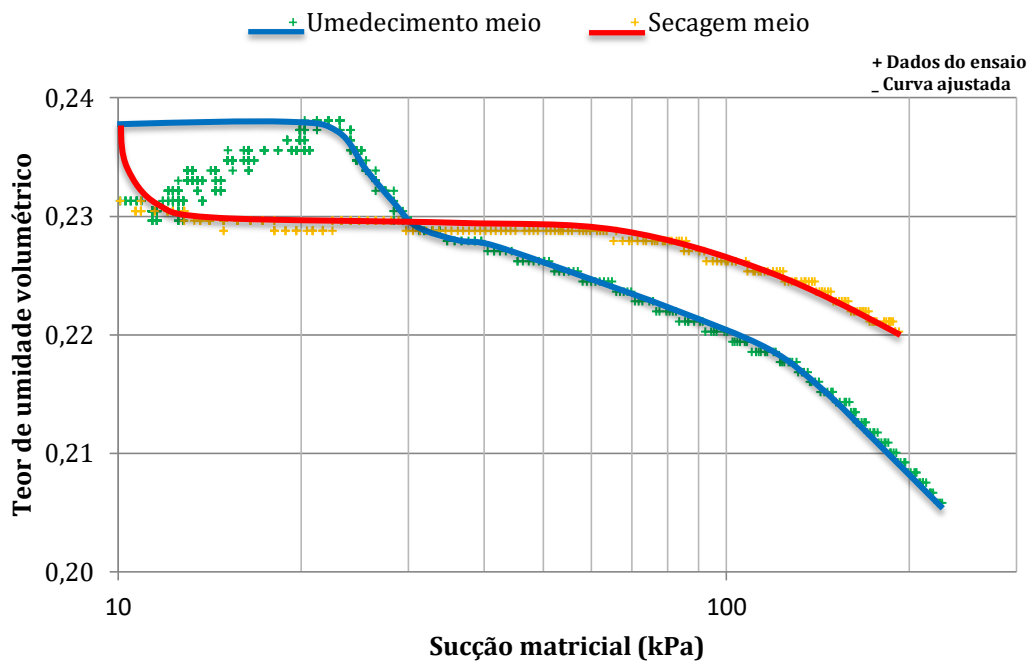


Figura 85 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo I (meio).

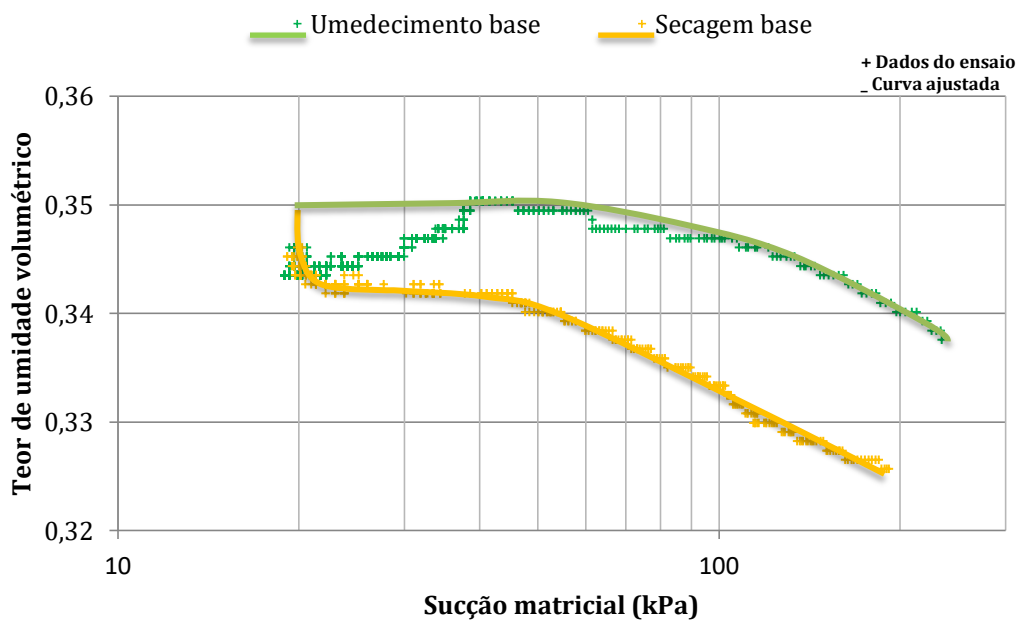


Figura 86 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo I (base).

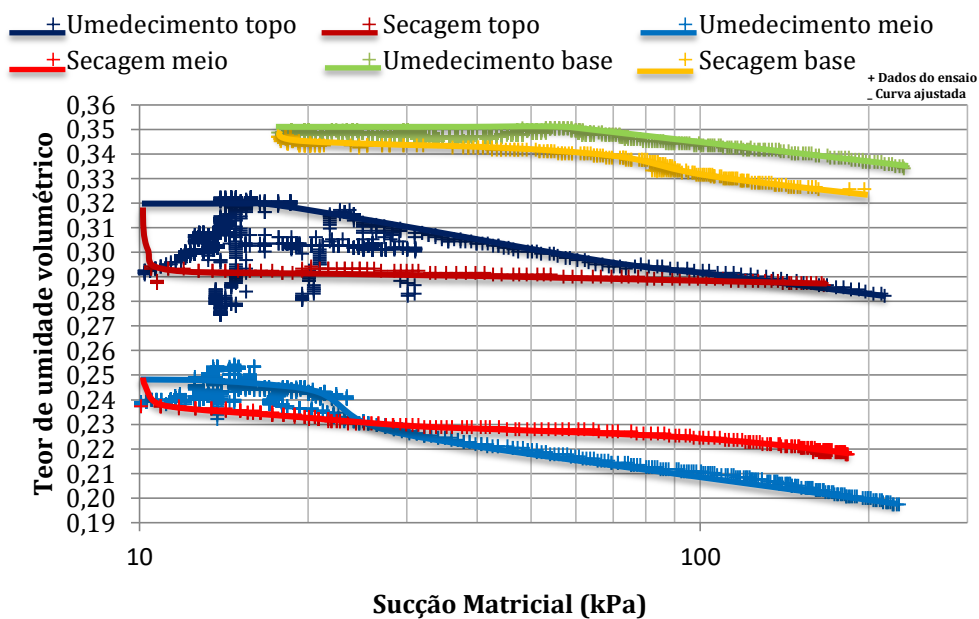


Figura 87 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo II (topo, meio e base).

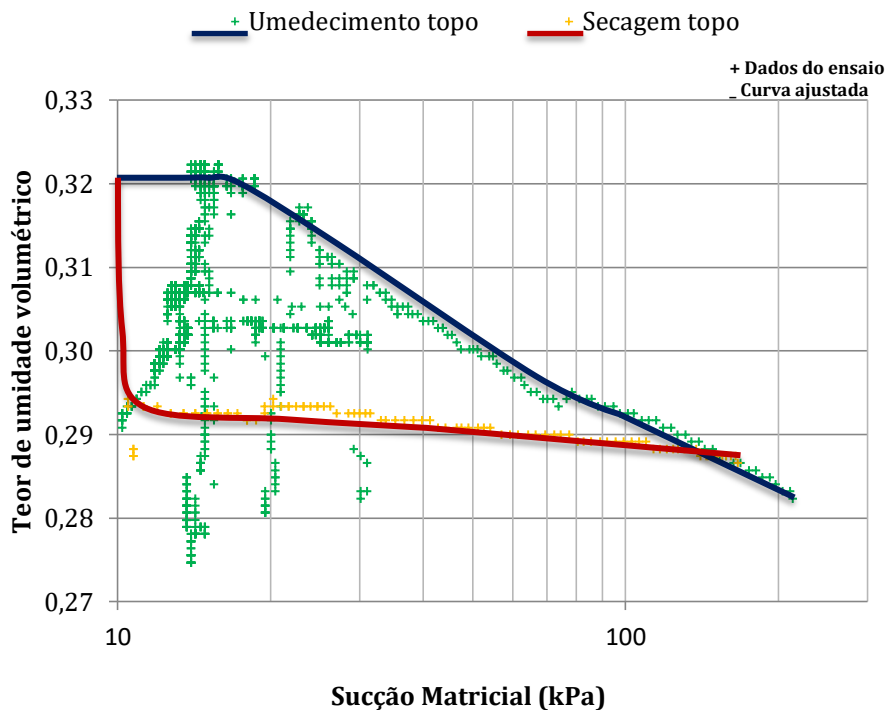


Figura 88 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo II (topo).

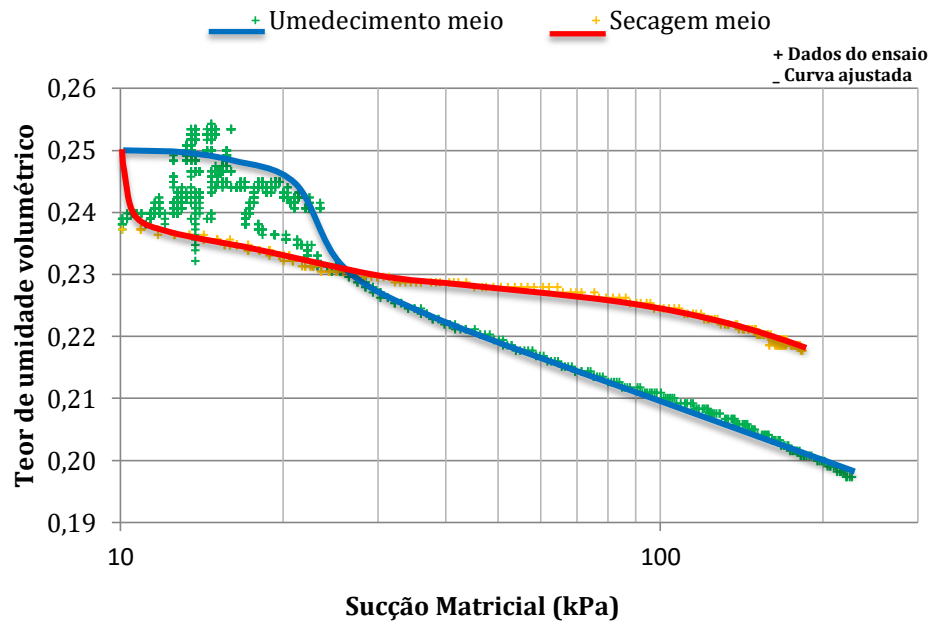


Figura 89 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo II (meio).

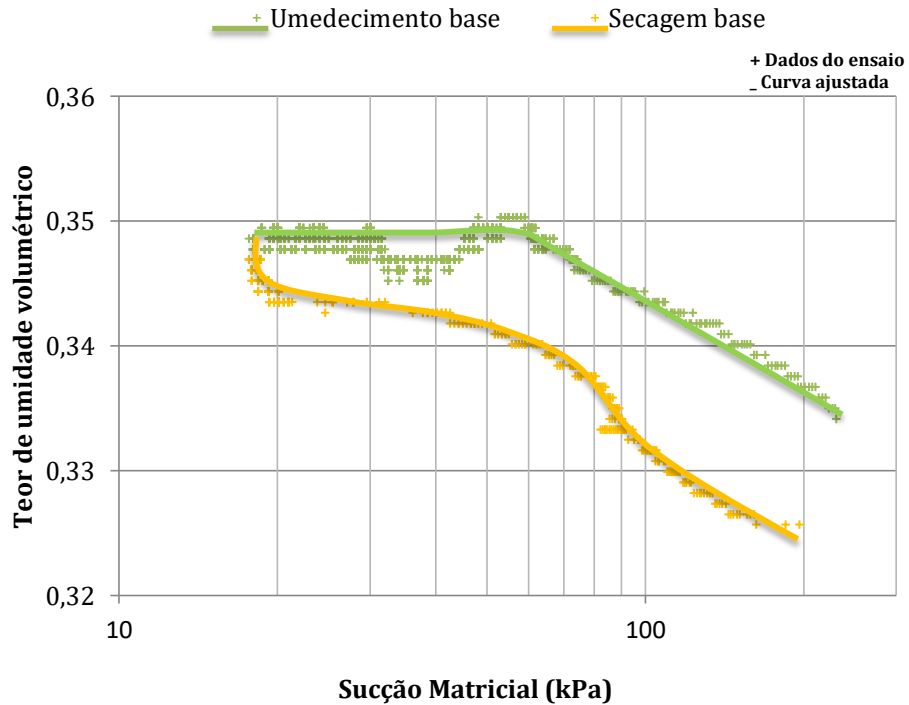


Figura 90 – Retenção de água na coluna de umedecimento e secagem sem uso de GTN, ciclo II (base).

O avanço da frente de água no topo da cama da capilar apresentou resultados similares com os ensaios realizados, exceto o ensaio com GTA que teve o acréscimo na umidade de forma mais rápida. A barreira capilar com GTA atingiu maiores valores de teor de umidade no topo quando comparado com os demais ensaios. As colunas com GTB ciclo 1 tiveram maiores registro do teor de umidade seguida pelas colunas sem GTN ciclo 1, sem GTN ciclo 2, GTB umedecimento 3 e GTB ciclo 2, Figura 91.

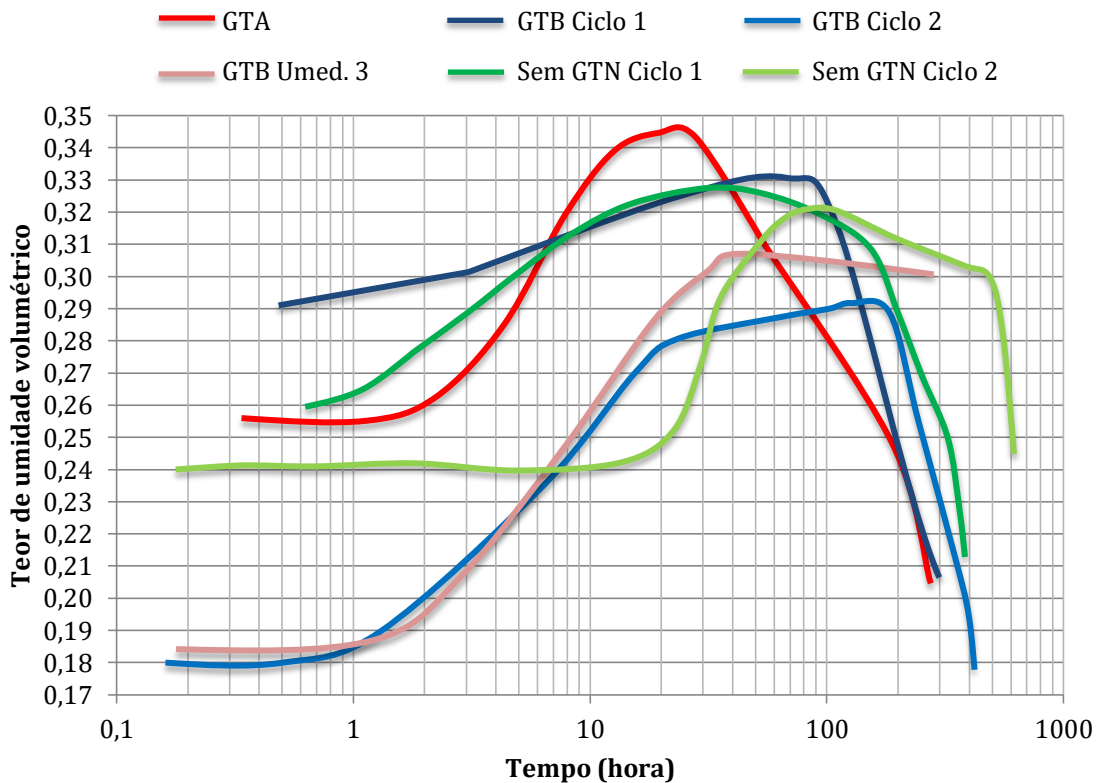


Figura 91 – Comparação entre os teores de umidade volumétricos nos ensaios de coluna de umedecimento e secagem realizados (topo).

Comparando os teores de umidade volumétricos máximos alcançados durante os ensaios de coluna de umedecimento e secagem no meio das camadas capilares, se verificou que o ensaio na coluna utilizando o GTA atingiu maior teor de umidade volumétrica, seguidos em ordem decrescente pelos ensaios nas colunas utilizando o GTB e pelos ensaios nas colunas que não utilizaram o GTN. O Avanço de água no meio da camada capilar, mais lento registrado, ocorreu na barreira capilar sem GTN CI e o mais rápido na barreira capilar com GTA, Figura 92.

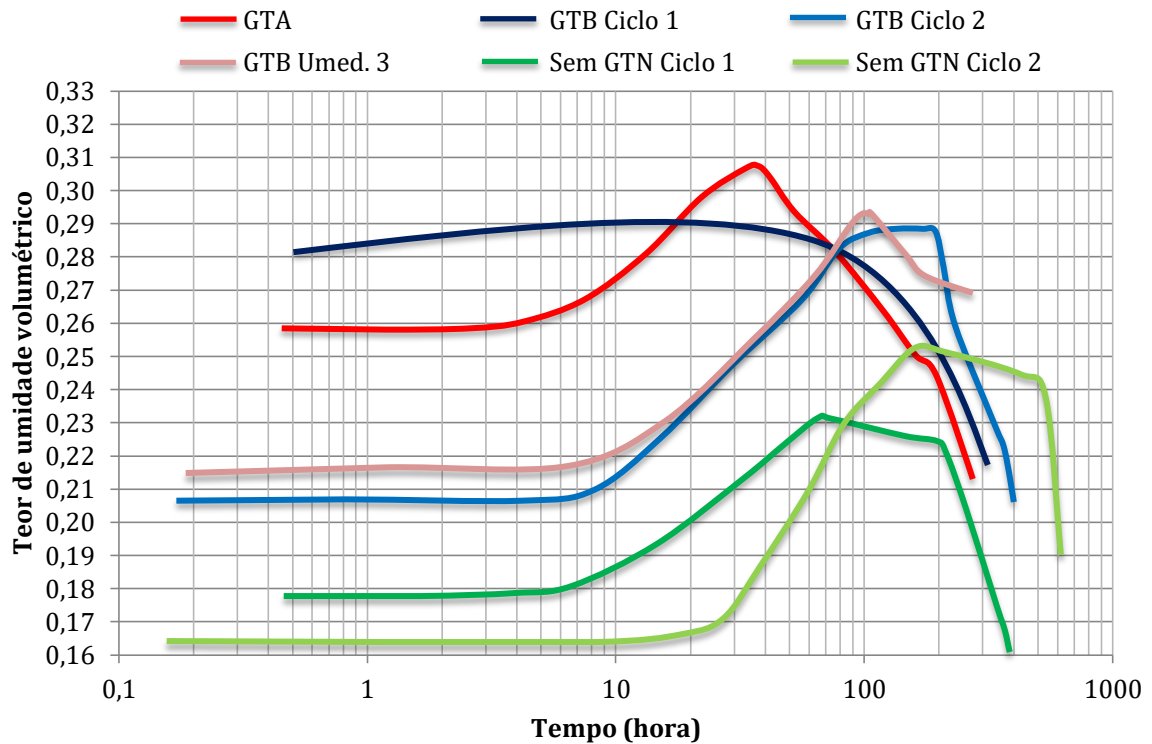


Figura 92 – Comparação entre os teores de umidade volumétricos nos ensaios de coluna de umedecimento e secagem realizados (meio).

Em contrapartida, na base da camada capilar do ensaio sem utilização de GTN, os teores de umidade volumétricos máximo foram maiores quando comparados ao ensaio de que utilizou o GTA. O ensaio de umedecimento 3 com GTB registrou os menores teores de umidade. Na base da camada capilar da coluna com GTB, durante o ciclo 1 e 2, os valores dos teores de umidade volumétricos não foram considerados devido seus registros terem sido considerados anômalos, acima mesmo do valor de saturação. O avanço da água na base das colunas teve registro mais tardio e lento na barreira capilar com o GTB durante o terceiro umedecimento. O avanço da água na base das colunas foi mais adiantado e rápido na barreira capilar com o GTA, Figura 93.

Nos ensaios de coluna de umedecimento e secagem do solo residual de Sabará foram medidos teores de umidade volumétricos entre 0,15 e 0,36 que correspondem à saturação respectiva de 42% e 100%. O ensaio de papel filtro que foi realizado no solo residual entre sua condição seca ($S = 0$) e saturada ($S = 100\%$). A coluna suspensa ensaiou os GTNs desde secos ($S = 0$) a saturados ($S = 100\%$) e mediu valores próximos à saturação para o solo residual. As CCRAs obtidas pelos ensaios de papel filtro em conjunto com a coluna suspensa (solo residual) e

coluna suspensa (GTNs) abrangeram toda a faixa de saturação do material enquanto o ensaio de coluna de umedecimento e secagem se limitou a um intervalo bem menor.

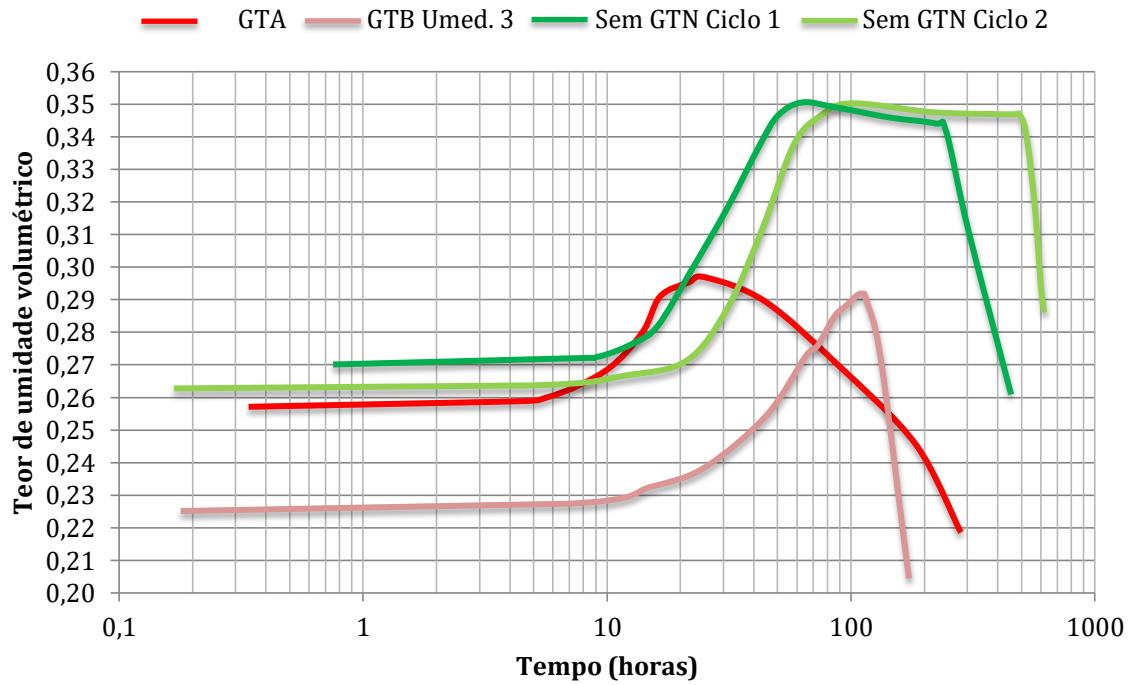


Figura 93 – Comparação entre os teores de umidade volumétricos nos ensaios de coluna de umedecimento e secagem realizados (base).

5. DISCUSSÃO

Alguns critérios e ressalvas couberam na execução dos ensaios dessa pesquisa e nos dados gerados. Nos ensaios de coluna de umedecimento e secagem, foram descartadas as variações volumétricas das camadas capilares, pois estas variações não foram expressivas. Por isso, pode ser considerado que pouca ou nenhuma mudança da estrutura original do solo durante os ciclos de secagem e umedecimento e, conseqüentemente, sem influência na retenção de água no solo ao longo dos ensaios. Os valores discrepantes e anômalos dos teores de umidade volumétricos medidos na base da camada capilar com GTB em todos os ciclos (Figura 53, Figura 55 e Figura 57) sugeriram o mau funcionamento do sensor de umidade nessa região e os dados anômalos foram descartados.

Todos os ensaios de coluna de umedecimento e secagem apresentaram, em algum momento, para uma mesma sucção, maiores teores de umidade quando em trajetória de secagem quando comparando com a trajetória de umedecimento. Isto ocorreu, exceto: no ciclo I realizado na camada capilar com GTB (Figura 74), na porção inferior e superior da camada capilar no ciclo I do ensaio de coluna de umedecimento e secagem sem GTN (Figura 83) e na base da camada capilar no ciclo II do ensaio de coluna de umedecimento e secagem sem GTN (Figura 87). Os ciclos I de umedecimento foram iniciados com os teores de umidade relativamente mais altos que os ciclos II, GTB ciclo I 0,29 (S= 81%), GTB ciclo II 0,20 (S = 56%), sem GTN ciclo I 0,24 (S= 67%) e sem GTN ciclo II 0,21 (S= 58%) e, sempre (exceção à base do ciclo II sem GTN) tiveram maiores valores de teor de umidade para uma mesma sucção quando em trajetória de umedecimento, contrariando Sousa (2006), que define que na histerese, em uma mesma sucção, a água retida no solo é maior na trajetória de secagem do que na trajetória de umedecimento. Todavia, só foram apurados valores de sucção máxima na casa de duas dezenas de kPa. Devido à limitação da instrumentação, não pode ser avaliada a retenção de água pelo solo desde sua condição saturada a condição residual (20000 kPa), o que também prejudicou o ajuste preciso da CCRA utilizando a coluna de umedecimento e secagem monitora e, por conseqüência a inferência da sucção de entrada de água / ar. Ocorrência de lâmina de água sobre a barreira pode ter favorecido o registro de maiores teores de umidade volumétricos para uma mesma sucção quando comparado o evento de secagem ou umedecimento.

A diferença entre os teores de umidade volumétricos máximos registrados nos ensaios de coluna de umedecimento e secagem, que tiveram mais de um ciclo, pode ser consequência de variação de temperatura (solo, água e ar), ar ocluso variação de pulso elétrico do sensor. Ou seja, as pequenas oscilações percentuais dos dados de sucção e umidade, a não mensuração de valores de sucção inferiores a 8 kPa, provavelmente estiveram relacionadas à interação do aparelho com o meio, efeitos termoelétricos (Peltier-Seebeck) ou geométricos (pote de tinta e a retenção de ar).

Na coluna de umedecimento e secagem sem GTN associado, no início do primeiro ciclo na trajetória de umedecimento, o registro da variação da sucção no topo da camada capilar foi mais tardio que no meio (Figura 63), pois o sensor não estava respondendo e teve que ser reajustado ao *datalogger*, quando enfim entrou em funcionamento pleno. Os longos períodos com registros de teores de umidade praticamente constante, apresentados nos ensaios, tiveram como causa a saturação e o excesso de água, o que garantiu a saturação da camada capilar antes de sua secagem.

Nas colunas de umedecimento e secagem não foi verificada, a olho nu, a migração de finos do solo para o “pedrisco” apesar da curva granulométrica do solo apresentar valores de coeficiente de não uniformidade muito elevado, C_u 120 (Figura 30 e Tabela 12). Todavia, a avaliação do nível de colmatção dos GTNs, ao término dos ensaios, não foram efetuadas.

As curvas características de retenção de água foram determinadas para os GTNs e para o solo residual de Sabará. As CCRA's dos GTNs foram obtidas pelo ensaio de coluna suspensa, uma vez que foi o ensaio mais apropriado para determinação da retenção de água em meio com elevada porosidade, 0,895 para o GTA e 0,858 para o GTB. Devido ajuste de curva de retenção de água no geotêxtil ser realizado pelo método de Fredlund e Xing, assumiu a sucção 10^6 kPa para teor de umidade volumétrico igual a zero, embora os GTNs possuam macroporos interconectáveis e fibras hidrofóbicas, sendo muito provável que para sucções bem menores que 10^6 kPa, os GTNs já se encontravam completamente seco, fato reforçado pelo mesmo peso seco medido dos corpos de prova dos GTNs, antes de sua saturação para o ensaio de coluna suspensa, no término da trajetória de secagem e após 48 horas na estufa a 105° C. No GTA e no GTB, os valores de sucção residual determinados graficamente foram respectivamente de 2 e 2,5 kPa e em valores superiores, a 3,5 kPa os corpos de prova já se encontravam seco (Figura 46 e Figura 47).

O ar aprisionado com a trajetória de umedecimento não ocorreu nos GTNs ensaiados. Na trajetória de umedecimento em condição de sucção nula, os corpos de prova atingiram os mesmos teores de umidade volumétricos medidos de quando saturados para início da trajetória de secagem, apesar das fibras hidrofóbicas constituintes dos GTNs. A ascensão capilar no geotêxtil pode ter recebido contribuições da adesão da água do ensaio ao vidro do funil de Büchner, ao arranjo das fibras do geotêxtil. As entradas de águas dos corpos de prova dos GTNs ocorreram em baixos valores de sucção, 0,05 kPa para o GTA e 0,1 kPa para o GTB, e são as entradas de água que governaram a quebra do sistema capilar solo-GTNs. As entradas de água condizem com a função condutividade apresentando valores menores que a sucção crítica, isto é não entra água nos GTNs antes de alcançar a sucção crítica (Figura 46, Figura 47, Figura 50 e Figura 51).

As curvas características de retenção de água dos geotêxteis não tecidos apresentaram valores de entrada de ar de 0,9 kPa para o GTA e de 0,8 kPa para o GTB (Tabela 20). Os corpos de prova dos GTNs, quando ensaiados na coluna suspensa, apresentaram a vantagem de poderem ser reutilizados ao longo de todo o ensaio, ao contrário do ensaio de coluna suspensa em solos granulares, que utiliza corpos de prova destrutivos.

A realização do ensaio de coluna suspensa com água destilada e desaerada é considerada como ideal para caracterizar hidraulicamente os materiais constituintes de uma barreira capilar, todavia, na execução de projetos, se deve reproduzir o mais fielmente o que ocorrerá em campo. Para tal, a utilização de água similar à encontrada em condição de campo é fundamental. No ensaio de coluna suspensa foi utilizada a água destilada e desmineralizada e, devido aos baixos valores de sucção impostos no decorrer do ensaio de coluna suspensa, não ocorreu cavitação no sistema.

A CCRA combinada de medições da coluna suspensa e do papel filtro do solo residual teve sua porção inicial definida pelo ensaio de coluna suspensa, sendo que foi imposta, nesse ensaio, a sucção máxima de 5 kPa. Utilizou-se apenas um corpo de prova para as duas trajetórias do ensaio de coluna suspensa, e a histerese foi notada. Para o início da trajetória de secagem o corpo de prova foi saturado ($S = 100\%$ e $\theta = 0,36$) na trajetória de umedecimento quando o ensaio registrava 0 kPa de sucção o corpo de prova apresentava $S = 92\%$ e $\theta = 0,36$. A CCRA do solo residual, para os valores de sucção superior a 10 kPa, foi obtida pelo ensaio do papel filtro. A condição de sucção residual de água foi atingida em 20000 kPa e a sucção

de entrada de água, em 2000 kPa ($S = 6\%$, $\theta = 0,02$). A histerese para o solo foi menos pronunciada que para os GTNs. A sucção de entrada de ar aproximada obtida graficamente foi de 20 kPa (Figura 49).

Com as curvas características de retenção de água obtidas para o solo residual de Sabará e para os GTNs, tornou-se possível a determinação da função condutividade hidráulica de cada um e, conseqüentemente, a sucção crítica da barreira capilar foi encontrada. Em respostas aos baixos valores de entrada de ar, de sucção residual e de entrada de água para os GTNs, as sucções críticas também apresentaram valores baixos, sendo que na trajetória de secagem foram de 3 kPa para o GTA e 4 kPa para o GTB, na trajetória de umedecimento, 0,11 kPa para o GTA e 0,40 kPa para o GTB (Figura 50 e Figura 51). As baixas sucções críticas correspondentes à trajetória de umedecimento indicaram o rompimento da barreira capilar em condições bem próximas da saturação da camada capilar, o que é reforçado pela comprovação gráfica da equiparação das condutividades hidráulicas não saturadas dos GTN em valor aproximado de $1,0 \times 10^{-8}$ cm/s muito próximo da condutividade hidráulica não saturada de $4,4 \times 10^{-7}$ cm/s para o solo residual de Sabará (Figura 51).

A Barreira capilar com GTA foi a que apresentou melhor desempenho em armazenamento de água, demonstrado pela maior retenção de água ao longo da camada capilar (topo e meio), sendo que no momento que se atingiu o máximo de umidade na base da barreira capilar, a barreira associada ao GTA esteve com maior volume de água retido que os ensaios com GTB e sem GTN, que estavam com volumes similares, Tabela 23.

Tabela 23 - Relação teor de umidade volumétrico máximo e tempo de ensaio, por coluna monitorada

Ensaio	GTA	GTB CI	GTB CII	GTB U III	SGTN CI	SGTN CII
Topo	0,34 (S = 94%)	0,33 (S = 92%)	0,28 (S = 78%)	0,31 (S = 86%)	0,33 (S = 92%)	0,32 (S = 89%)
			0,29 (S = 81%)			
Hora	16,8	47,3	de 19,7 a 104,5	48	24	96
Meio	0,32 (S = 89%)	0,30 (S = 83%)	0,29 (S = 81%)	0,30 (S = 83%)	0,24 (S = 67%)	0,25 (S = 69%)
			84			
Hora	30,5	0,5		96	56,33	92
Base	0,31 (S = 86%)			0,29 (S = 81%)	0,35 (S = 97%)	0,35 (S = 97%)
Hora	22,5			108	42	96

As funções condutividade hidráulica foram determinadas pelo método de Van Genuchten (1980) e Mualem (1976) por três motivos: a pequena contribuição argilosa no solo residual, o comportamento hidráulico dos GTNs semelhantes aos solos granulares e por ser simples a determinação gráfica de seus parâmetros por este método.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A avaliação da retenção de água de camadas capilares, através de ensaios laboratoriais mostrou-se adequada. Os desempenhos das barreiras capilares foram melhorados com associação com GTNs. Quando associada ao GTA a barreira reteve mais água e quando associada ao GTB a frente úmida avançou mais lentamente pela barreira. Os GTNs apesar de possuírem semelhanças entre suas propriedades hidráulicas possuem diferentes composições, e diferentes métodos de fabricação o que pode ocasionar respostas diferentes de retenção de água quando associados à barreira capilar.

Quando comparados os desempenhos com a barreira capilar sem geotêxteis barreiras capilares associadas aos GTNs, na porção média das camadas capilares, atingiram maiores teores de umidade volumétricos que na porção média da camada capilar que utilizou como bloco capilar apenas o “pedrisco”. Isso se deve ao fato de que os GTNs conferiram melhor desempenho à barreira capilar causando a ascensão capilar mais pronunciada que a ascensão capilar da barreira confeccionada apenas com o “pedrisco”.

Na região limítrofe entre a camada capilar e o bloco capilar com GTNs, registraram menores teores de umidade volumétricos que quando em contato direto camada capilar-pedrisco.

As curvas características de retenção de água do solo residual e dos geotêxteis não tecido, determinadas pelos ensaios de coluna suspensa e papel filtro possibilitaram a estimativa das condutividades hidráulicas não saturadas. Nessa dissertação, os métodos laboratoriais (coluna suspensa e papel filtro) de determinação das CCRA e seus ajustes, mostraram-se práticos e podem facilmente auxiliar no projeto de barreiras capilares. Pelo baixo custo do ensaio de coluna suspensa é um fator facilitador para a caracterização da retenção dos GTNs. As barreiras capilares simuladas necessitariam de uma instrumentação com maior precisão e mesmo tempo de resposta, principalmente a baixas sucções, maior intervalo de mensuração (sucção e teor de umidade) e, com menor oscilação dos dados registrados possibilitando a determinação de CCRA para o solo através de colunas de solo monitoradas.

Algumas sugestões cabem para futuros trabalhos como continuação dessa pesquisa, entre elas:

- Ensaiar outros tipos de geotêxteis não tecidos e em diferentes condições de uso, composições e gramaturas;
- Determinar curvas características de retenção de água do solo e do GTNs pelas respectivas distribuições porosimétrica, que podem ser obtidas por ensaios laboratoriais específicos, e comparar estas curvas com as curvas obtidas para os GTNs

(ensaio de coluna suspensa) e para o solo residual de Sabará (ensaio de coluna suspensa e ensaio de papel filtro);

- Analisar a formação dos meniscos no solo residual de Sabará e nos GTNs por meio de microscopia eletrônica;
- Realizar o ensaio de placa de pressão para maior refinamento da CCRA do solo de Sabará, entre valores de 10 a 100 kPa;
- Verificar os critérios de filtro solo-geotêxtil;
- Verificar a calibração dos sensores de umidade considerando diferentes temperaturas;
- Utilizar outros modelos e ou marcas de sensores analisando suas aferições;
- Verificar níveis de colmatação, transmissividade e permissividade dos GTNs após a utilização destes em barreiras capilares;
- Reproduzir em campo estas barreiras capilares e monitorar sua temperatura, tensão e teor de umidade, que serão influenciados diretamente pelo clima e vegetação;
- Confeccionar cobertura monolítica com o solo residual de Sabará e comparar o seu desempenho com barreiras capilares confeccionadas com esse solo;
- Determinar a CCRA do pedrisco e outros materiais granulares e comparar com as CCRA dos GTNs, reproduzindo e comparando barreiras capilares com esses materiais;
- Considerar a adesão da água-vidro durante o ensaio de coluna suspensa;
- Comparar diferentes ajustes de CCRA e modelos de função condutividade hidráulica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUS, S. S.; SCHANZ, T. Comparison of four methods for measuring total suction. *Vadose Zone Journal* v. 4, n° 4. 1087-1095p. 2004.

ALKMIM, F.F. O que faz de um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo. 2004. 17-35 p.

ALKMIM F.F.; CHEMALE JR. F.; ENDO, I. A deformação das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco e seu significado tectônico. *Revista da Escola de Minas*. 49(1) 22-38p. 1996.

ALMEIDA, F.F.M. *O Cráton do São Francisco*. *Revista Brasileira de Geociências*, n° 7. 1977. 349-364p

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 854*: Test Method for Specific Gravity of Solids by Water Pycnometer. 2002. 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 1140*: Standard Test Method for Amount of Material in Soils Finer than the N° 200 (75-um) Sieve. 2000. 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 1557*: Test Method for Laboratory compaction characteristics of Soil Using Modified Efford. 1991. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 2216*: Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock. 1992. 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 2847*: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). 2000. 12p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 4318*: Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. 2000. 11 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 4439*: Standard Terminology for Geosynthetics. 2000. 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 4491*: Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity. 2017. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 4751*: Standard Test Methods for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile. 2016. 9 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 5084*: Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. 2000. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 5298*: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. 2010. 6p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 6836*: Standard test methods for determination of the soil water characteristic curve for desorption using a hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, and/or centrifuge. 2002. 19p.

AMORIM, N.R. *Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na mina Rio Paracatu mineração (RPM)*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. 143 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 6457*: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. São Paulo, 1986. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 6459*: Determinação do limite de liquidez. São Paulo, 1984. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 6502*: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 6508*: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. São Paulo, 1984. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 7180*: Determinação do limite de plasticidade. São Paulo, 1984. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 7181*: Solo – Análise granulométrica. São Paulo, 1984. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 7182*: Solo – Ensaio de compactação. São Paulo, 1986. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 12568*: Geossintéticos – Determinação da massa por unidade de área. São Paulo, 2003. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 12569*: Geotêxteis – Determinação da espessura - Método de ensaio. São Paulo, 1992. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 14545*: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. São Paulo, 2000. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR ISO 9863*: Geossintéticos — Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camada única. São Paulo, 2013. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR ISO 9864: Geossintéticos — Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos*. São Paulo, 2013. 2p.

AZAM, A. M.; CAMERON, D. A.; RAHMAN, M. M. Permanent strain of unsaturated unbound granular materials from construction and demolition waste. *Journal of materials in civil engineering*. v. 27, no. 3, article n° 04014125. 1-12p. 2015.

BAREITHER, C. A.; BENSON, C. H. Evaluation of bouwer-rice large-particle correction procedure for soil water characteristic curves. *Geotechnical testing journal*, Vol. 36, No. 5, 1–15p., 2013

BARRETO, H. B. F.; BATISTA, R. O.; SANTOS, W.O.; FREIRE, F. G. C.; COSTA, F. G. B. Empirical models for estimating water retention curves in soil in Janaúba-MG, Brazil. *Idesia*. v. 30. 71-76 p. 2012.

BECKHAM, W. K.; MILLS, W.H. Cotton-fabric-reinforced roads. *Engineering news-record*. 453-455p. October 3, 1935.

BENJAMIM, C. V. S. Aplicação de geossintéticos em aterros sanitários. *Revista limpeza pública*, n° 73,. Publicação trimestral da Associação Brasileira e Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP. 50-55p. 2010.

BERG, S.J. e ILLMAN, W.A. Improved predictions of saturated and unsaturated zone drawdowns in a heterogeneous unconfined aquifer via transient hydraulic tomography: laboratory sandbox experiments. *Journal of hydrology*, 470–471p, 172–183p. 2012.

BRADY, N.C., WEIL, R.R. *The nature and properties of soils*. Pearson Prentice Hall. 4ª edition. 2008. 975p.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. *Colorado State University Hydrology Paper*, (3). 8-37p. 1964.

BRUTSAERT, W. *Some methods of calculating unsaturated permeability*. Transactions of ASABE, 10: 1967.400-404p.

BUMB, A. C. *Unsteady-state flow of methane and water in coal beds*. PhD Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Wyoming, Laramie. 1987.

BURDINE, N.T. Relative permeability calculation size distribution data. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. V. 198, 71-78p. 1953.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; BARROS, R. T. V. Aterro experimental para disposição de resíduos sólidos urbanos: Caso de Belo Horizonte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23. 18-23 de setembro de 2005 - Campo Grande/MS. *Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Campo Grande. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005. 1-9p..

CARLSSON, E. *Sulphide-rich tailings remediated by soil covers: evaluation of cover efficiency and tailings geochemistry*. Doctoral Thesis, Luleia University of Technology, Luleia, 2002. 192 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; BARBOSA, M. C.; MENDONÇA, R. M. G.; FARIAS W. M.; CARDOSO F. B. F. Propriedades Químicas, Mineralógicas e Estruturais de Solos Naturais e Compactados. In : CAMAPUM, C. J.; GITIRANA JR, G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.(Eds). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 1 ed. São Paulo: ABMS, 2015. v. 1. cap. 3. 39-78p.

CAMPBELL, G.S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117: 311-314p. 1974.

CÁSSARO, F. A. M.; PIRES, L. F.; SANTOS, R. A. dos; GIMÉNEZ, D.; REICHARDT, Funil de Haines modificado: Curvas de retenção de solos próximos à saturação. *Revista brasileira de ciência do solo*, Viçosa, v. 32, 2555-2562p. 2008.

CHANDLER, R. J.; CRILLEY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. *A low-coast method of assessing clay desiccation for low-rise buildings*. Proc. Instn. Civ. Engrs Civ. Engng. 1992, May, 82-89p.

CHARLES, W. W. N.; BRUCE, M. *Advanced unsaturated soil mechanics and engineering*. CRC Press. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. October 25, 2007. 690p.

CHILDS, E. C. *An introduction to the physical basis of soil water phenomena*. London: New York: Sidney: Toronto. Editora John Wiley & Sons Ltd, 1969. 506p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. *Mapa geológico 1:100.000 Folha de Belo Horizonte*. Geólogo Júlio Murilo Martino Pinho. 2008.

CRONEY, D.; COLIMAN, J. D. Pore pressure and suction in soils. *Proceeding in Conference om Pore Pressure and Suction in Soild*, London, 1961. 31-37p

CUPERTINO, K. F. *Análise de curvas de calibração utilizadas no método do papel filtro para estimar a sucção matricial em solos não saturados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2013. 102 fl.

DAS, B. M. *Advanced Soils Mecanics*. 3rd ed. London: Taylor and Francis; 2008. 594p.

DE LIMA, M. J. *Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares*. Tese de Doutorado, Publicação GTD - 095/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p. 2014.

DE LIMA, M. J.; PALMEIRA; E. M.; ZORNBERG, J. G. Determinação de curva de retenção de água de geotêxtil não tecido utilizando ensaio de coluna suspensa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17, setembro de 2014, Goiânia / GO. *Anais do 17º COBRAMSEG*. Goiânia. ABMS, 2014. 7p.

DE LIMA, M. J.; ZORNBERG, J. G.; PALMEIRA; E. M.; Barreiras capilares em coberturas evapotranspirativas. In: : CAMAPUM, C. J.; GITIRANA JR, G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.(Eds). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 1 ed. São Paulo: ABMS, 2015. v. 1. cap. 20. 555-580p .

DE LIMA, M. J.; AZEVEDO, M. M.; ZORNBERG, J. G.; PALMEIRA; E. M.; Capillary barriers incorporating non-woven geotextiles. *Environmental Geotechnics – ICE – Institution of Civil Engineers*. 8p. 2017.

DECAGON DEVICES. *EC-5 soil moisture sensor operator's manual*. Decagon Devices, Inc. 2365 NE Hopkins Court Pullman WA 99163. Version: October 10, 2016 | 11:23:43. 19p.

DECAGON DEVICES. *EM5b Data collection system*. Decagon Devices, Inc. 2365 NE Hopkins Court Pullman WA 99163. Version: August 4, 2014 | 09:29:52. 32p.

DIAS, C.O. *Determinação da condutividade hidráulica de solos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós graduação em Engenharia e Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. 227 f.

DWYER, S.F. *Water balance measurements and computer simulations of landfill covers*. Doctoral Thesis, The University of New Mexico, Albuquerque, 2003. 250 p.

EDLEFSEN, N.E. & ANDERSON, A.B.C. *Thermodynamics of soil moisture*. Hilgardia, v. 15, n° 2. 1943. 31–298p.

FARIAS, W. M. *Processos evolutivos de intemperismo químico e sua ação no comportamento hidromecânico de solos do planalto central*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-077A/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012. 263 p.

FEIA, S.; GHABEZLOO, S; BRUCHON J. F.; SULEM, J.; CANOU, J.; DUPLA, J. C. Experimental evaluation of the pore-access size distribution of sands. *Geotechnical testing journal*, v. 37, n° 4, 1–8p, 2014.

FREDLUND, D.G. *The emergence of unsaturated soil mechanics*. The Fourth Spencer J. Buchanan Lecture, College Station, Texas A&M University Press, 1996, 39p.

FREDLUND, D.G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 521-532p. 1994.

GARDNER, W.R. Representation of soil aggregate size distribution by a logarithmic-normal distribution. *Soil Science Society of America Proceedings*, 20: 151-153p. 1956.

GARDNER, W.R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4): 228–232. 1958.

GARDONI, M. G. A. *Estudo do comportamento dreno-filtrante de geossintéticos sob compressão*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000. 313p.

GARDONI, M. G. A. Utilização de geossintéticos em obras de meio ambiente - Filtração e Drenagem. Notas de Aula da disciplina Geossintéticos, do Mestrado Acadêmico em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2º semestre de 2016.

GAO, S.; ZHANG Y. D.; SONTA, A.; BUSCARNERA, G. Evolution of the water retention characteristics of granular materials subjected to grain crushing. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 9p. April 2016.

GITIRANA JR, G. F.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A.A.; A curva de retenção de água de materiais porosos. In: : CAMAPUM, C. J.; GITIRANA JR, G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.(Eds). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 1 ed. São Paulo: ABMS, 2015. v. 1. cap. 9. 205-230p.

HAGHIGHI, A.; MEDERO, G. M.; MARINHO F. A. M.; WOODWARD, P. K. Discussion of “Critical review of the methodologies employed for soil suction measurement” by S. Sreedeeep and Devendra N. Singh. *International Journal of Geomechanics* v. 11, n° 2, 99–104p. March/April 2011.

Head, K.H. *Manual of Soil Laboratory Testing*. Moisture Content and Index Tests, London, 1984. 59-62p; 140-149p; 175-234p; 302 – 356p.

Head, K.H. *Manual of Soil Laboratory Testing*. Moisture Content and Index tests - Liquid and Plastic Limits, v.1., London, 1992. 78-109p.

HEIBAUM, M. Geosynthetics in agricultural and aquacultural applications. In: 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 2010, Guarujá, Brasil. 2010. *Proceedings of the 9th international conference on geosynthetics*. 2010. 259-271p.

HENRY, K. S.; HOLTZ, R. D. Capillary rise of water in geotextiles. *Proceedings, International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils*, S. Knutsson, Ed., Luleå, Sweden. 15–17 April, 1997. 227–233p.

HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. University of Massachusetts. Amherst, Massachusetts, USA. Academic Press, 1980. 413 p.

HILLEL, D. Introduction to Environmental soil physics. University of Massachusetts. Amherst, Massachusetts, USA. Academic Press, 1998. 771 p.

IZZO, R.L.S.; MAHLER C.F.; ROSE, J. L. Capillary barrier constructed with mechanical biological treatment waste. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 18 (4), 303-312p. 2013.

KLAR, A. E. *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. 1.ed. São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

KISCH, M. The theory of seepage from clay-blanketed reservoirs. *Géotechnique* 9(1): 9–21p. 1959.

KOERNER, R. M. *Designing with geosynthetics*. sixth Edition Vol.I, . Xlibris. eBook 978-1-4628-8290-8. 2012. 508p.

KOERNER, R. M. *Designing with geosynthetics*. Fifth edition, Prentice Hall Publ. Co., Upper Saddle River, NJ. 2005. 799p.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der erde. gotha: verlag justus perthes*. Wall-map 150cmx200cm. 1928.

LOCASTRO, J. K.; DE ANGELIS, B. L. D. Barreiras de impermeabilização: Configurações aplicadas em aterros sanitários. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria*, Santa Maria. v. 20, n° 1, 200-210p. Jan.-abr. 2016.

MACHADO, S. L.; VILAR O. M. Potenciais da água no solo. In: : CAMAPUM, C. J.; GITIRANA JR, G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.(Eds). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 1 ed. São Paulo: ABMS, 2015. v. 1. cap. 4. 79-96p.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3, Rio de Janeiro. *Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, Rio de Janeiro, 1997. v2, 373-398p.

MARINHO, F. A. M.. Medição de sucção com o método do papel filtro. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. *Medição de sucção com o método do papel filtro*. Foz do Iguaçu. 1994. v. 2. 515 – 522p.

MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. ; GITIRANA JR, G. F. N. . Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. In: : CAMAPUM, C. J.; GITIRANA JR, G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C.(Eds). *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 1 ed. São Paulo: ABMS, 2015. v. 1. cap. 10. 231-256p.

MARINHO, F.A.M.; SOUZA PINTO, L.C. Soil suction measurement using a tensiometer. SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENT IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, BALKEMA, Rotterdam. *Proceedings, Symposium On Recent Development In Soil And Pavement Mechanics*, Balkema Rotterdam, 1997. 249-254p.

MASROURI, F.; BICALHO, K. V.; KATSUYUKI, K. Laboratory hydraulic testing in unsaturated soils. *Geotech Geol Eng*, n°26, p 691-704. 2008.

MCCARTNEY, J.S.; VILLAR, L.F.S.; ZORNBERG, J.G. Nonwoven geotextiles as hydraulic barriers to capillary rise. *Proceedings of geoamericas 2008: The 1st pan american geosynthetics conference and exhibition*. Cancún, Mexico. Mar. 2-5. IFAI. 2008. 252-261p.

McKEE, C.R. e BUMB, A.C. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas. *SPE formation Evaluation*, v. 2, n. 04, p. 599-608.1987.

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

MOREIRA, T.B.G. *Avaliação de sistemas de drenagem com geossintéticos para diminuição da umidade no minério de ferro da serra de Carajás*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. 200 p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, Vol. 12 (3). p. 513–522. 1976.

NAGALLI, A. *Diagnóstico e avaliação dos impactos ambientais de aterros de disposição de resíduos no estado do Pará – Estudo de caso dos municípios de Jacarezinho e Barra do Jacaré*. Dissertação de mestrado – UFPR, Curitiba, 2005. 132p.

NOCE, C.M.; MACHADO, N.; TEIXEIRA, W. U-Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (southern São Francisco craton): age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(1): 95-102p. 1998.

ORTIGÃO, J. A. R. *Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos*. 3 ed. Terratek. 2007. 383 p.

O'KANE, M.; BARBOUR, S.L. Predicting field performance of lysimeters used to evaluate cover systems for mine waste. *6th ICARD*, Cairns, QLD, 327 – 329p, julho 2003.

OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. Estudo de barreiras capilares por meio de simulação de chuva em coluna de solo. VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6. Anais. Salvador, 2007.

PALMEIRA, E.; GARDONI, M. Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranes*, v.20, n° 2, 97–115p. 2002.

PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems. *Geosynthetics international*, 7. 406-43p. 2000.

PICKLES, C. B.; ZORNBERG, J. G. Hydraulic Classification of Unsaturated Nonwoven Geotextiles for Use in Capillary Barriers. *Second Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition (GeoAmericas 2012)*. Lima, Perú – May 2012. 13 p.

PORTELINHA, F. H. M.; TROVATTO, A. Avaliação de barreira capilar em interface não saturada solo-geossintéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2014, Goiânia. *Anais do COBRAMSEG 2014*.

REICHARDT, K. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*, Campinas, Fundação Cargill, 1985. 466p.

RENGER, F.E. et al. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, Belo Horizonte. 1994 v.2, n°.1, 11p.

RIBEIRO, V. Q. F.; VILLAR, L. F. S. V.; MENDONÇA, A. A.; CAMPOS, T. M. P. Determinação de parâmetros geotécnicos não saturados de um solo residual compactado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), XVI, Porto de Galinhas/PE. 2012. *Anais do XVI COBRAMSEG*. 2012.

RICHARDS, L.A. Capillary Conduction of Liquids Through Porous Medium. *Journal of Physics*. 1: 318-333p. 1931.

RICHARDS, B G. Measurement of the free energy of soil moisture by the psychrometric technique using thermistors. In: Division of Applied Geomechanics, editor/s. *Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas*. A symposium in print convened by Soil Mechanics Section, CSIRO, in collaboration with the National Building Research Institute and National Institute for Road Research CSIR, South Africa; Sydney, N.S.W.: Butterworths; 1965. 39-46p.

ROGER B.C.; HORNBERGER, G.M. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water resources research*, v. 14, n. 4, 601-604p.

SÁ JUNIOR, A. *Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento de Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2009. 101p.

SINGH, D. N.; SREEDEEP, S. Critical review of the methodologies employed for soil suction measurement. *International Journal of Geomechanics*. 6p.April 2011.

SILVA, A.B.; CARVALHO, E.T.; FANTINEL, L.M.; ROMANO, A.W.; VIANA, C.S.. *Estudos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais integrados no município de Belo Horizonte*. Belo Horizonte, convênio PBH-IGC-FUNDEP. (Relatório Final). 1995. 375p.

SILVA, G. L. A. *Comparação entre modelagem numérica e experimento de campo em escala real para um sistema de cobertura na Mina Fazenda Brasileiro (Bahia)* [manuscrito]. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2014. 90 f.

SILVA, V. R. *Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação*. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003. 171f.

SOUSA, P. S. *Comportamento mecânico e hidráulico de um solo residual do granulito-gnaiss de Salvador e sua aplicação no estudo de mecanismos de instabilização de taludes*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2006. 187p.

- SPECTRUM TECHNOLOGIES. *Watermark Soil Moisture Sensor product manual Item # 6450WD*. Spectrum Technologies Inc. 12360 S. Industrial Dr. East Plainfield, IL 60585. 2010. 11p.
- STANNARD, D. I. Tensiometers - Theory, construction, and use, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, v. 15, n°1, 48-58p. 1992.
- STORMONT, J.; HENRY, K.; EVANS, T. Water retention functions of four nonwoven polypropylene geotextiles. *Geosynthetics International*. 4 (6): 661-672p. 1997.
- STORMONT, J. C. AND MORRIS, C. E. Characterization of unsaturated nonwoven geotextiles. advances in unsaturated geotechnics, C. D. Shackelford, S. L. Huston, and N.-Y. Chang, Eds., Geotechnical Special Publication 99, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp. 153–164. 2000.
- STORMONT, J.C.; STOCKTON, T.; RAY, C. *Development of an geosynthetic unsaturated drainage system to provide buried waste containment*. Report WERC-97-040, New Mexico Waste-management Education and Research Consortium and US Department of Energy, 1999, 20 p.
- STORMONT, J. C.; RAY C.; EVANS, T. M. Transmissivity of a nonwoven polypropylene geotextile under suction. *geotechnical testing journal*. GTJODJ, v. 24,n°.2, 164–171p. June 2001.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* (44). 892-898p. 1980.
- VARGAS, M. *Introdução à Mecânica dos Solos*. Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1977. 509p.
- VERTEMATTI, J. C. *Manual brasileiro de geossintéticos*. Associação Brasileira das Indústrias de. Nãotecidos e Tecidos Técnicos ABINT. Editora Edgard Blucher. 2004. 428p.
- YOUNG, F.R. *Cavitation*. McGraw-Hill Book Company, London. 1989. 418p.
- WILLIAMS, J.; PREBBLE, R.E.; WILLIAMS, W.T. e HIGNETT, C.T. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. *Soil Research*, v. 21, n. 1. 15-32p. 1983.
- ZHANG, W; SUN, C; QIU, Q. *Characterizing of a capillary barrier evapotranspirative cover under high precipitation conditions*. Environ Earth Science 75: 513. 11p. 2016.
- ZORNBERG, J. G.; AZEVEDO, M.M.; PICKLES C. B. Evaluation of the development of capillary barriers at the interface between fine-grained soils and nonwoven geotextiles. Geotechnical Special Publication (GPS) 275. *Geosynthetics, forging a path to bona fide engineering materials*. American Society of Civil Engineers (ASCE). 2016. 159-167p.

ZORNBERG, J. G.; BOUAZZA, A.; MCCARTNEY, J. S. Geosynthetic capillary barriers: current state of knowledge. *Geosynthetics International*.17(5):273–300p. 2010.

ZORNBERG, J. G.; MCCARTNEY, J. S. Evapotranspirative cover systems for waste containment. In: DELLEUR, J. W. (Ed.) *The handbook of groundwater engineering*, 2nd ed. CRC Press, c. 34. 2007. 1144-1175p.