

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL DE SOLOS
TROPICAIS COMPACTADOS**

ANGELA CUSTÓDIA GUIMARÃES QUEIROZ

**ORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc.
CO-ORIENTADORA: MÁRCIA MARIA DOS ANJOS MASCARENHA,
DSc.**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.TD-104/15**

BRASÍLIA/DF: MARÇO/2015

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL DE SOLOS
TROPICAIS COMPACTADOS**

ANGELA CUSTÓDIA GUIMARÃES QUEIROZ

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc. (UnB)
ORIENTADOR**

**MÁRCIA MARIA DOS ANJOS MASCARENHA, DSc.(UFG)
(CO-ORIENTADORA)**

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**JUAN FÉLIX RODRÍGUEZ REBOLLEDO, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ANALICE FRANÇA LIMA AMORIM, PhD (UFPE)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**RENATO CABRAL GUIMARAES, DSc. (FURNAS/UEG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 10 de MARÇO de 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

QUEIROZ, ANGELA CUSTÓDIA GUIMARÃES

Estudo do comportamento microestrutural de solos tropicais compactados, Distrito Federal, 2015. xviii, 108p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2015)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Solos tropical 2. Comportamento hidráulico

3. Estrutura 4. Solos compactados

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

QUEIROZ, A. C. G. (2015). Estudo do comportamento microestrutural de solos tropicais compactados, Distrito Federal, 2015. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-104/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 108p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Angela Custódia Guimarães Queiroz

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Estudo do comportamento microestrutural de solos tropicais compactados

GRAU: Doutor ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Angela Custódia Guimarães Queiroz
CLN 409, Bloco C, Apto. 208. Edifício Coplasa Mall, Asa Norte
CEP: 70857-530 Brasília/DF - Brasil
angela.guimaraesqueiroz@gmail.com

RESUMO

Devido às particularidades relacionadas ao comportamento dos solos tropicais, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos buscando uma melhor caracterização desse material, e até mesmo o desenvolvimento de uma teoria específica a este tipo de solo. Todo esse contexto motivou a realização deste trabalho, que teve como principal objetivo avaliar o comportamento microestrutural de um solo tropical compactado em diferentes condições de umidade, energia aplicada e índice de vazios, com o propósito de definir quais as características são intrínsecas do solo e quais são advindas das condições de compactação. Para tal, um amplo programa experimental foi desenvolvido utilizando o solo do Campo Experimental do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. A escolha desse material foi devida à existência de uma extensa base de dados oriunda de pesquisas anteriores, que serviriam como referência para o presente trabalho. Assim, foram definidos diversos pontos de trabalho distribuídos no plano de compactação e realizados sua caracterização geotécnica, mecânica, hidráulica e estrutural. Para a caracterização mecânica e hidráulica foram realizados ensaios de adensamento e determinadas as curvas de retenção pela união dos métodos do papel filtro e da placa de sucção. A caracterização estrutural foi realizada utilizando dois tipos de ensaios: a porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e a microscopia eletrônica de varredura (SEM). Esses ensaios avaliam a estrutura do solo de maneira quantitativa e qualitativa, respectivamente. Os resultados e as análises desses ensaios indicaram que independente do efeito externo aplicado, compactação ou carregamento, a microestrutura do solo não se altera. Sendo assim, algumas simplificações que consideram apenas a macroestrutura do solo como parcela passível de modificação podem ser realizadas, ajudando na análise do comportamento dos solos tropicais.

Palavras chave: solo tropical, comportamento hidráulico e mecânico, estrutura, curva de retenção, distribuição de poros.

Palavras-chave: solo tropical, comportamento hidráulico, estrutura, solo compactado.

ABSTRACT

Due to the peculiarities related to the behavior of tropical soils, several researches have been developed in recent years seeking a better characterization of this material, and even the development of a specific theory to this type of soil. This whole situation motivated to the achievement of this work, which it had as main aim to evaluate the microstructural behavior of a compacted tropical soil at different moisture conditions, applied energy and voids, in order to define which characteristics are intrinsic of the soil and which are arising from compression conditions. To this end, a comprehensive experimental program was developed, using the soil of experimental zone of the Postgraduate Program in Geotechnics from the University of Brasilia. The choice of this material was due to existence of an extensive database derived from previous research that would serve as a reference for the present work. Therefore, several work points distributed in compression plane were defined and performed your structural, hydraulic, mechanical and geotechnical characterization. For a hydraulic and mechanical characterization, oedometer tests were performed and water retention curves were determined by the union of the method of filter paper and suction plate. The structural characterization was realized using two kinds of tests: mercury intrusion pore (MIP) and scanning electron microscopy (SEM). These tests evaluate the soil structural by quantitative and qualitative manner, respectively. The results and analyzes of these trials indicated that regardless of applied external effect, compression or loading, the microstructure of the soil does not change. Thus, some simplifications that consider only the macrostructure of soil as parcel liable to modification can be carried out, helping in the analysis of the behavior of tropical soils.

Key words: tropical soil, hydraulic behavior, structure, compacted soil.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	01
1.1 MOTIVAÇÃO	02
1.2 OBJETIVOS.....	02
1.3 ESCOPO DA TESE	03
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
2.1 SOLOS NÃO SATURADOS.....	05
2.2 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO	09
2.3 TÉCNICAS DE MEDIDAS DE SUCCÃO	15
2.3.1 Placa de Sucção.....	16
2.3.2. Ensaio de Papel Filtro	16
2.3.3 Psicômetros	18
2.4 MODELAGEM DA CURVA DE RETENÇÃO	19
2.5 MICROESTRUTURA DO SOLO	23
2.6 SOLOS COMPACTADOS	26
2.7 RESUMO	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL ESTUDADO	31
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	34
3.2.1 Caracterização Geotécnica	35
3.2.2 Compactação	35
3.2.3 Adensamento Oedométrico	35
3.2.4 Determinação dos Pontos de Trabalho.....	36
3.2.5 Preparação dos Corpos de Prova.....	38
3.2.6 Ensaio de Placa de Sucção	40
3.2.7 Ensaio de Papel Filtro	41

3.2.8 WP4.....	42
3.2.9 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP).....	43
3.2.10 Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM).....	45
3.3 RESUMO	47
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	48
4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	48
4.2 DISCUSSÃO SOBRE A VARIABILIDADE DO ÍNDICE DE VAZIOS.....	49
4.3 CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA-MECÂNICA E MICROESTRUTURAL	53
4.3.1 Influência da Umidade no Comportamento Hidráulico e na Estrutura.....	53
4.3.2 Influência do Carregamento no Comportamento Hidráulico e na Estrutura.....	61
4.3.3 Influência da Energia Aplicada no Comportamento Hidráulico e na Estrutura.....	72
4.4 RESUMO	78
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	79
5.1 PROPOSTA DE CORREÇÃO DA CURVA DE COMPACTAÇÃO.....	79
5.2 DISTRIBUIÇÃO DE POROS A PARTIR DA CURVA DE RETENÇÃO DO SOLO....	81
5.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS POROS	89
5.4 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE AJUSTE DAS CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS POROS.....	95
5.5 RESUMO	97
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
6.1 CONCLUSÕES.....	98
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	100
REFERÊNCIAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Forma da Curva de Retenção de Água do Solo Segundo a Distribuição do Tamanho dos Poros (modificado de Marinho, 2005).....	09
Figura 2.2 – Variação da Sucção com a Plasticidade (modificado de Marinho, 2005)	10
Figura 2.3 – Influência do Ciclo de Molhagem e Secagem no Comportamento do Solo Durante um Carregamento Isotrópico (modificado de Wheeler <i>et al.</i> , 2003).....	11
Figura 2.4 – Histerese Hidráulica na Curva de Retenção de Água do Solo (modificado de Wheeler <i>et al.</i> , 2003).....	12
Figura 2.5 – Ciclos de Molhagem e Secagem sob Condições Oedométricas (modificado de Wheeler <i>et al.</i> , 2003).....	12
Figura 2.6 – Histerese na Curva de Retenção de Água no Solo da Cidade de Brasília (Otálvaro, 2013)	13
Figura 2.7 – Curvas de Retenção de Água do Solo para $e = 0,45 - 0,60$ (modificado de Airò Farulla <i>et al.</i> , 2011)	14
Figura 2.8 – Valores de Entrada de Ar e Água com a Variação do Índice de Vazios (modificado de Airò Farulla <i>et al.</i> , 2011).....	15
Figura 2.9 – Tipos de fluxo do solo para o papel filtro (Marinho, 1995)	17
Figura 2.10 – WP4C (<i>Dewpoint PotentiaMeter</i>)	18
Figura 2.11 – Esquema do Ensaio de MIP (modificado de Alonso <i>et al.</i> , 2012).....	24
Figura 2.12 – Distribuição de poros a partir da curva de retenção do solo (Mascarenha, 2008)	25
Figura 2.13 – Predição da PSD pela SAIC (Otálvaro, 2013).....	26
Figura 3.1 – Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília	31
Figura 3.2 – Caracterização Física do Solo do Campo Experimental do PPG da UnB	33
Figura 3.3 – Caracterização Física do Solo do Campo Experimental do PPG da UnB	33
Figura 3.4 – Curvas Granulométricas do Solo do Campo Experimental do PPG da UnB a 2 m de Profundidade (Guimarães, 2002).....	34

Figura 3.5 – Curvas de Retenção de Água do Solo do Campo Experimental do PPG da UnB	34
Figura 3.6 – Pontos de Trabalho	36
Figura 3.7 – Pontos de Trabalho Secundário	37
Figura 3.8 – Processo de Preparação dos Corpos-de-Prova.....	39
Figura 3.9 – Prensa de Compactação. Detalhe do Corpo de Prova.....	40
Figura 3.10 – Placa de sucção (modificado de Otálvaro, 2013)	40
Figura 3.11 – Ensaio de Papel Filtro	42
Figura 3.12 – Equipamento WP4C <i>Dewpoint PotentiaMeter</i>	43
Figura 3.13 – Porosímetro Micromeritics AutoPore IV	44
Figura 3.14 – Estufa a vácuo	45
Figura 3.15 – Microscópio eletrônico de varredura Jeol (JSM – 6610).....	46
Figura 3.16 – Equipamento para metalização <i>Denton Vacuum (Desk V)</i>	47
Figura 4.1 – Curva Granulométrica com e sem Defloculante	48
Figura 4.2 – Curva de Compactação	49
Figura 4.3 – Índice de Vazios do MIP versus Índice de Vazios Teórico	51
Figura 4.4 – Pontos de Trabalho	53
Figura 4.5 – Curvas de Retenção em Função da Umidade (w) e do Grau de Saturação (Sr) ..	54
Figura 4.6 – Curva de Retenção em Função do Grau de Saturação (Silva, 2009).....	55
Figura 4.7 – Ajustes das Curvas de Retenção em Função da Umidade	56
Figura 4.8 – Curva Acumulada de Tamanho dos Poros e seus Ajustes	57

Figura 4.9 – Microscopias Eletrônicas de Varredura.....	58
Figura 4.10 – Densidade de Tamanho dos poros (PSD)	60
Figura 4.11 – Influência do Método de Compactação na Condutividade Hidráulica de uma Argila Siltosa (Mitchell e Soga, 2005).....	61
Figura 4.12 – Pontos de Trabalho	61
Figura 4.13 – Curvas de Adensamento. (a) Natural. (b) Saturado	62
Figura 4.14 – Curvas de Retenção em Função da Umidade (w) e do Grau de Saturação (Sr) 63	
Figura 4.15 – Ajustes das Curvas de Retenção em Função da Umidade	64
Figura 4.16 – Curva Acumulada de Tamanho dos Poros e seus Ajustes	67
Figura 4.17 – Densidade de Tamanho dos poros (PSD)	70
Figura 4.18 – Microscopias Eletrônicas de Varredura.....	71
Figura 4.19 – Pontos de Trabalho	73
Figura 4.20 – Curvas de Retenção em Função da Umidade e seus Ajustes. (a) Semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias. (b) Semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios. (c) Semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias. (d) Semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios	73
Figura 4.21 – Curvas Acumuladas de Tamanho dos Poros e PSD. (a) Semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias. (b) Semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios. (c) Semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias. (d) Semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios	75
Figura 4.22 – Microscopias Eletrônicas de Varredura dos pontos A, I, K e E, respectivamente (semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias)	77
Figura 4.23 – Microscopias Eletrônicas de Varredura dos pontos B, I e F, respectivamente (semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios)	77

Figura 4.24 – Microscopias Eletrônicas de Varredura dos pontos B, J e D, respectivamente (semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias)	77
Figura 4.25 – Microscopias Eletrônicas de Varredura dos pontos C, J e G, respectivamente (semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios)	78
Figura 5.1 – Curvas de Retenção de Água do Solo do Campo Experimental do PPG da UnB	79
Figura 5.2 – Curvas de Compactação Convencional e Macroestrutural	80
Figura 5.3 – Curvas Acumuladas de Tamanho dos Poros e PSD do grupo A-B-C-D-E	83
Figura 5.4 – Curvas Acumuladas de Tamanho dos Poros e PSD do grupo F	85
Figura 5.5 – Curvas Acumuladas de Tamanho dos Poros e PSD do grupo I-J-K.....	86
Figura 5.6 – PSD do MIP e do Ajuste do Grupo A-B-C-D-E.....	87
Figura 5.7 – PSD do MIP e do Ajuste do Grupo F	88
Figura 5.8 – PSD do MIP e do Ajuste do Grupo I-J-K	89
Figura 5.9 – Curvas de Distribuição do Tamanho dos Poros Efetivos do Grupo A, B, C, D e E	90
Figura 5.10 – Microscopias Eletrônicas de Varredura dos Pontos A e E	91
Figura 5.11 – Curvas de Distribuição do Tamanho dos Poros Efetivos do Grupo F	91
Figura 5.12 – Curvas de Distribuição do Tamanho dos Poros Efetivos do Grupo G	92
Figura 5.13 – Curvas de Distribuição do Tamanho dos Poros Efetivos do Grupo H	93
Figura 5.14 – Curvas de Distribuição do Tamanho dos Poros Efetivos dos pontos I, J e K....	94
Figura 5.15 – Variação dos Parâmetros de Ajuste do Grupo A-B-C-D-E	95
Figura 5.16 – Variação dos Parâmetros de Ajuste do Grupo F.....	95

Figura 5.17 – Variação dos Parâmetros de Ajuste do Grupo G	96
Figura 5.18 – Variação dos Parâmetros de Ajuste do Grupo H	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Equações de Ajuste para a Curva de Retenção (modificado de Borges, 2010) ..20	
Tabela 3.1 – Pontos de Trabalho38	
Tabela 3.2 – Ensaios Realizados47	
Tabela 4.1 – Caracterização Geotécnica48	
Tabela 4.2 – Índice de Vazios do MIP e Teórico50	
Tabela 4.3 – Índice de Vazios: Relações Estatísticas.....52	
Tabela 4.4 – Parâmetros Analisados dos Grupos de Trabalho.....53	
Tabela 4.5 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção.....56	
Tabela 4.6 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho de Poros59	
Tabela 4.7 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho de Poros com Microestrutura Constante59	
Tabela 4.8 – Cargas dos Pontos de Trabalho62	
Tabela 4.9 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção.....65	
Tabela 4.10 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho de Poros68	
Tabela 4.11 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho de Poros com Microestrutura Constante69	
Tabela 4.12 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção do Grupo AIKE.....74	
Tabela 4.13 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção do Grupo BIF74	
Tabela 4.14 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção do Grupo BJD74	
Tabela 4.15 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção do Grupo CJG74	

Tabela 4.16 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho dos Poros do Grupo AIKE	76
Tabela 4.17 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho dos Poros do Grupo BIF.....	76
Tabela 4.18 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho dos Poros do Grupo BJD.....	76
Tabela 4.19 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho dos Poros do Grupo CJG.....	77
Tabela 5.1 – Coeficientes de não Uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) do Grupo A, B, C, D e E.....	91
Tabela 5.2 – Coeficientes de não Uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) do Grupo F.....	92
Tabela 5.3 – Coeficientes de não Uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) do Grupo G.....	92
Tabela 5.4 – Coeficientes de não Uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) do Grupo H.....	93
Tabela 5.5 – Coeficientes de não Uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) dos pontos I, J e K.....	94
Tabela 5.6 – Comparativo do CNU e CC com Alteração da Energia.....	94
Tabela 5.7 – Coeficientes a , b e R^2	97

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CC	Coefficiente de curvatura
CH	Argila inorgânica de alta plasticidade
CL	Argila de baixa plasticidade
CNU	Coefficiente de não uniformidade
D	Diâmetro do poro
e	Índice de vazios
e_m	Índice de vazios dos microporos
e_M	Índice de vazios dos macroporos
e_{max}	Índice de vazios máximo
e_{min}	Índice de vazios mínimo
e_{nw}	Índice de vazios preenchido de mercúrio
G_s	Gravidade específica
IP	Índice de Plasticidade
kPa	Quilo Pascal

LL	Limite de liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MIP	Mercury Intrusion Porosimetry (Porosimetria por Intrusão de Mercúrio)
NBR	Norma Brasileira
n	Porosidade
n_m	Parâmetro de ajuste associados com a uniformidade do tamanho dos microporos
n_M	Parâmetro de ajuste associados com a uniformidade do tamanho dos macroporos
P	Pressão absoluta aplicada
PEG	Polietileno de glicol
PPG-UnB	Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília
PSD	Densidade do tamanho de poros
s	Sucção
SEM	Microscopia eletrônica de varredura
S_e	Saturação efetiva
S_{nw}	Saturação do solo preenchido por mercúrio
S_r	Saturação

T_s	Tensão superficial do fluido utilizado
$u_a - u_w$	sucção
UFG	Universidade Federal de Goiás
W	umidade do solo
w_M	Umidade retida no macroporo
w_m	Umidade retida no microporo
$w_{m\acute{a}x}$	Umidade de saturação da amostra
WP4	Dewpoint PotentiaMeter
α	Ângulo de contato da interface fluido-ar para o sólido
α_m	Parâmetro de ajuste relacionado com tamanho de poro dominante na micro
α_M	Parâmetro de ajuste relacionado com tamanho de poro dominante na macro
β	Ângulo de contato
γ_s	Peso específico dos sólidos
γ_d	Peso específico aparente seco
γ_{hg}	Tensão superficial do mercúrio
θ_s	Teor de umidade volumétrico saturada
θ_r	Teor de umidade volumétrico residual

λ_w	Tensão superficial da água
ρ	Densidade do fluido molhante
ϕ_{hg}	Ângulo de contato entre o mercúrio e a amostra
ϕ_w	Ângulo de contato entre a água e a amostra

1 INTRODUÇÃO

Os solos tropicais possuem peculiaridades em relação aos solos de origem temperada devido às condições climáticas nas quais são formados, apresentando estrutura e composição químico-mineralógica diferenciada. Estas características influenciam diretamente os comportamentos mecânico e hidráulico dos solos, tanto naturais como compactados.

Os sistemas de classificação de solos existentes são ineficientes em se tratando dos solos tropicais, visto que estes foram desenvolvidos tendo como base os solos de climas temperados, onde a microestrutura e a mineralogia são mais simples que a dos solos tropicais. Nesse contexto, Nogami e Villibor (1980) desenvolveram o sistema MCT de classificação de solos tropicais, que segundo seus idealizadores consegue identificar os diversos tipos de solos tropicais e prever suas qualidades. No entanto, esse método apresenta problemas por ser empírico e, de acordo com Peixoto *et al.* (1996) os parâmetros que compõem esta classificação não possuem repetitividade, independente do modelo e do nível de confiança adotado.

Após diversos estudos realizados nesses solos acredita-se que se tenha conhecimento suficiente para propor uma sistemática de caracterização real desse tipo de solo. Um dos principais problemas em se criar esse novo sistema é a necessidade de algo simples, rápido e com poucos ensaios. No entanto, o solo tropical é um material complexo, que não se consegue desvendar somente com ensaios de granulometria e limites de consistência. Talvez o excesso de simplificação seja o principal erro cometido até o momento.

Assim como as classificações, o controle de compactação também foi um procedimento importado, e não desenvolvido especificamente para os solos tropicais. É de conhecimento geral que o controle realizado pelo grau de compactação e umidade não é a melhor forma de garantir as propriedades geotécnicas de um maciço compactado. No entanto, por falta de um procedimento rápido, que garanta a liberação das camadas compactadas com a agilidade que a obra exige, e eficiente, este método arcaico continua a ser empregado.

Estruturas geotécnicas como aterros, barragens de terra e estruturas de contenção são construídas com solos compactados, que em teoria apresentam-se não saturados. Estas estruturas são constantemente projetadas utilizando os conceitos da mecânica dos solos clássica. No entanto, o comportamento dos solos não saturados não pode ser explicado adequadamente por esses conceitos, podendo surgir problemas posteriores. Assim, nas

últimas décadas, o estudo dos solos não saturados foi alavancado. Nessa evolução diversas técnicas experimentais e uma teoria apropriada têm sido desenvolvidas, visando analisar o comportamento desses solos.

Inicialmente, os comportamentos mecânico e hidráulico eram estudados separadamente, mas seus resultados apontaram para uma dependência entre estes. Assim, os trabalhos recentes os analisam de maneira conjunta, acoplando os dois aspectos para uma melhor compreensão da situação (Gallipoli *et al.*, 2003; Wheeler *et al.*, 2003; Sheng *et al.*, 2004). Fato mais recente é a inclusão do aspecto estrutural nessa análise, fazendo com que ela fique ainda mais completa (Romero *et al.*, 2011; Della Vecchia *et al.*, 2013).

Deste modo, uma linha de pesquisa que vem ganhando força é a que incorpora a caracterização microestrutural ao comportamento hidromecânico, buscando utilizar esses conhecimentos para uma melhor caracterização dos solos, como alternativas para os sistemas de classificação e controle de compactação convencionais.

1.1 MOTIVAÇÃO

A aplicação de solos tropicais como material de construção, de aterros e de outras obras, requer um melhor entendimento do seu comportamento. Para isso é necessária a caracterização mecânica, hidráulica e microestrutural desses materiais. Porém, para que isso possa ser utilizado na prática, é necessário que as técnicas de caracterização sejam associadas e adicionadas a sistemas de classificação, de modo a criar uma metodologia padronizada.

Devido ao grande número de variáveis existentes, são necessários estudos que permitam identificar quais características mecânicas, hidráulicas e microestruturais são mais úteis na identificação do comportamento macroscópico dos solos. Neste contexto, o Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (PPG-UnB) vem desenvolvendo pesquisas que visam suprir tal demanda, tais como Mascarenha (2008), Silva (2009), Otálvaro (2013) e Borges (2014).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o comportamento hidro-mecânico-estrutural de um solo tropical compactado em diferentes condições de umidade, energia aplicada e índice de vazios, buscando quais características são intrínsecas do solo e quais são associadas às condições de compactação.

Como objetivos específicos têm-se:

- Gerar matrizes de curvas de retenção e porosimetria para diferentes valores de índice de vazios e umidade de compactação;
- Avaliar como mudanças na densidade, impostas por carregamentos e molhagem, influenciam nas curvas de retenção e porosimetria;
- Realizar a modelagem numérica das curvas de retenção e porosimetria de modo a avaliar como os parâmetros do modelo podem ser utilizados na caracterização do solo;
- Avaliar a metodologia de obtenção das curvas de porosimetria a partir das curvas de retenção;
- Iniciar uma proposta de correção da curva de compactação.

1.3 ESCOPO DA TESE

Esta tese está estruturada em seis capítulos:

Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo apresenta o panorama atual de conhecimento dos solos tropicais compactados (não saturados), justificando a realização desta pesquisa. Os objetivos desta tese também são apresentados.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura, buscando introduzir os conceitos básicos necessários ao desenvolvimento e entendimento dessa pesquisa. Os assuntos abordados foram: os solos não saturados, a curva de retenção de água do solo e sua modelagem, as técnicas de controle e medida de sucção, a microestrutura do solo, e as principais características dos solos compactados.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

As principais características do solo estudado e as metodologias empregadas na execução do programa experimental são apresentadas neste capítulo.

Capítulo 4 – Apresentação dos Resultados

São apresentados neste capítulo os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica, compactação, adensamento, curva de retenção (papel filtro + placa de sucção e WP4 + placa de sucção), porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), microscopia eletrônica de varredura (SEM), e suas respectivas análises.

Capítulo 5 – Discussão dos Resultados

Este capítulo apresenta uma discussão dos principais resultados obtidos e apresentados no capítulo 4. São eles: proposta de correção da curva de compactação, considerando apenas os vazios associados à macroestrutura; aplicação da metodologia desenvolvida por Mascarenha (2008) de obtenção da distribuição de poros utilizando a curva de retenção; análise quantitativa da distribuição dos poros macroestruturais; e, análise da variação dos parâmetros de ajuste das curvas de distribuição do tamanho dos poros.

Capítulo 6 – Conclusões

São apresentadas as principais conclusões oriundas das avaliações e análises realizadas neste trabalho, além de algumas sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda os principais conceitos dos solos não saturados, da curva de retenção de água dos solos, e o comportamento e estrutura dos solos compactados. Esta abordagem visa conceituar e caracterizar o solo utilizado na pesquisa.

2.1 SOLOS NÃO SATURADOS

Os solos são encontrados na natureza com uma estrutura multifásica. No caso dos solos não saturados essa estrutura é formada por partículas de solo, água, ar e película contráctil (Fredlund e Rahardjo, 1993).

O comportamento mecânico dos solos não saturados é fortemente influenciado pela sucção. De uma maneira simplificada, esta pode ser definida como a pressão isotrópica da água intersticial, que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais.

Diversos pesquisadores, como Gallipoli *et al.* (2003), Wheeler e Karube (1996), entre outros, destacaram que a sucção pode influenciar o comportamento mecânico de um solo de duas maneiras: modificando a tensão no esqueleto sólido por meio de alterações na pressão média do fluido que atua nos poros do solo; e, causando forças adicionais de ligação nos contatos entre as partículas, muitas vezes atribuído ao fenômeno de capilaridade, por gerar os meniscos d'água.

A sucção varia inversamente com a quantidade de água, ou seja, ela tende a zero quando o solo atinge o estado de total saturação ($S = 100\%$), e a um valor máximo quando o grau de saturação tende a zero. A relação entre a quantidade de água armazenada no solo e a sucção atuante é definida como curva de retenção de água do solo (SWRC).

Diversos fatores podem vir a influenciar a curva de retenção. Entre eles pode-se citar: a composição granulométrica, a mineralogia, a estrutura e o efeito da temperatura. Além desses merece destaque a história de tensões a que o solo foi submetido, incluindo tanto as aplicações de tensões efetivas (mecanicamente aplicadas), bem como as trajetórias de secagem e molhagem, aumentando e reduzindo a sucção, respectivamente.

Devido a necessidade de se conhecer o mecanismo de deformação do esqueleto sólido dos solos iniciou-se o estudo das tensões que governam essa deformação. Em 1936 Terzaghi

identificou a tensão efetiva como responsável pela deformação e resistência dos solos saturados (Pereira *et al.*, 2011). Essa descoberta significou um grande avanço na mecânica dos solos saturados, visto que ela caracterizava o comportamento mecânico desse tipo de solo com apenas uma variável de tensão.

No entanto, o princípio das tensões efetivas era válido somente para os solos saturados. Assim, Bishop (1959) iniciou o seu estudo sobre a validade do conceito de tensão efetiva em solos não saturados. Este autor propôs adicionar um parâmetro de ponderação (χ) na equação de tensão efetiva tradicional (Equação 2.1). Este parâmetro é função do grau de saturação, da estrutura do solo, de ciclos de molhagem/secagem ou alterações de tensões (Alonso *et al.*, 2010).

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi s \quad (2.1)$$

onde σ é a tensão total, u_a é a pressão de ar e s é a sucção. Porém, esta proposta não conseguia explicar o fenômeno do colapso do solo. Este fato inviabilizou a utilização direta dessa proposta, mas embasou estudos posteriores, como os de Bishop e Blight (1963), Blight (1965), Burland (1965), Aitchison (1967), Hassanizadeh e Gray (1979), Hassanizadeh e Gray (1980), Lewis e Schrefler (1998), Hutter *et al.* (1999), Coussy (2004), Ehlers e Ammann (2004), Borja (2006), Coussy (2007) e Borja e Koliji (2009) (Fuentes e Triantafyllidis, 2013).

Os estudos iniciais concluíram que os solos não saturados precisavam necessariamente de duas variáveis de tensão independentes para serem descritos adequadamente. Assim, definiram para tal a tensão líquida e a sucção (Alonso *et al.*, 2010).

Posteriormente, Fredlund e Morgenstern (1977) utilizando ensaios de *null tests* indicaram a tensão líquida e a sucção mátrica como as duas variáveis mais representativas desse tipo de solo.

Posteriormente outros autores continuaram estudando a sugestão de Bishop (1959) como alternativa à tensão líquida (Kohgo *et al.* (1993), Sheng *et al.* (1994), Loret e Khalili (2000, 2002)). Essa nova variável, chamada de tensão efetiva generalizada ou tensão de Bishop, foi então aceita como uma das variáveis de estado, mas continuava precisando da sucção para a completa caracterização (Alonso *et al.*, 2010).

De acordo com Fuentes e Triantafyllidis (2013), se o solo é idealizado como um material trifásico, composto por ar, água e sólidos (não considerando as interfaces), e a

compressibilidade intrínseca de cada fase é ignorada, então a tensão de Bishop pode ser reconhecida como um trabalho conjugado de energia com a taxa de deformação do sólido e o parâmetro de Bishop é igual ao grau de saturação. Houlsby (1997), Borja (2006), Coussy (2004) e Coussy (2007) aplicaram essa teoria à tensão de Bishop, encontrando uma nova equação para a tensão efetiva (Equação 2.2).

$$\sigma' = \sigma - \rho_g + S_r s \quad (2.2)$$

onde σ' e σ são as tensões efetiva e total, respectivamente; ρ_g é a pressão no gás (ar); s é a sucção; e S_r é o grau de saturação. Vale ressaltar que Bishop (1959) não considerou $\chi = S_r$, o que é feito na Equação 2.2.

Essa consideração apresenta problemas quando utilizada em solos finos, visto que estes mantêm valores consideráveis de grau de saturação mesmo a altas sucções. Isto ocorre devido ao grau de saturação S_r destes solos ser o resultado da combinação de duas componentes: grau de saturação macroscópico, S_r^M , referente a água presente nos macroporos; e, grau de saturação microscópico, S_r^m , referente a água que ocupa os microporos. Este último é considerado constante independente da tensão aplicada. Assim, é mais adequado fazer χ igual ao grau de saturação efetivo S_r^e (Equação 2.3), que corresponde à parcela de S_r que realmente se altera (Alonso et al., 2010).

$$S_r^e = \left\langle \frac{S_r - S_r^m}{1 - S_r^m} \right\rangle \quad (2.3)$$

No entanto, essa hipótese não é consistente com a teoria de trabalho conjugado de energia. Acredita-se que o problema esteja em não se considerar a água livre e a residual duas fases distintas, com suas respectivas propriedades. Nesse contexto, Fuentes e Triantafyllidis (2013) derivaram uma expressão que descreve a taxa de densidade de energia interna para solos não saturados, a fim de identificar as variáveis de energia conjugada para solos não saturados com umidade residual.

Lu e Likos (2006), citado por Song (2014), propuseram o conceito de tensão de sucção para caracterizar a sucção matricial de forma mais eficaz e clarear a sua influência sobre a tensão efetiva e a resistência ao cisalhamento do solo não saturado. Este conceito representa o estado de tensão para o solo não saturado utilizando uma única variável de tensão, expandindo o principio das tensões efetivas de Terzaghi (1943) e de Bishop (1959) e expressa o estado de tensão usando a curva característica sucção-tensão (SWCCs). Diversas pesquisas (Lu *et al.*,

2009, e Kim *et al.*, 2010) têm investigado a aplicabilidade e a validade da tensão de sucção obtida utilizando este conceito. Lu e Likos (2006) e Lu *et al.* (2010) propuseram a tensão efetiva do solo não saturado através da aplicação da tensão de sucção com uma forma semelhante à da equação da tensão efetiva clássica de Terzaghi (Equação 2.4 e 2.5).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (2.4)$$

$$\sigma^s = -(u_a - u_w)S_e \quad (2.5)$$

onde σ' , σ e σ^s são as tensões efetiva, total e de sucção, respectivamente; u_a é a pressão no ar; u_w é a pressão na água; e, S_e é o grau de saturação efetivo.

Toda essa discussão sobre tensão efetiva em solos não saturados está ligada ao desenvolvimento de modelos constitutivos capazes de representar adequadamente o comportamento dos solos nesta condição.

Roscoe *et al.* (1958), aplicando a teoria da plasticidade e da termodinâmica ao princípio das tensões efetivas de Terzaghi, formulou um modelo matemático chamado de Cam-clay. Em 1990, Alonso *et al.* propôs uma extensão desse modelo, mas destinado aos solos não saturados, denominado BBM (Modelo Básico de Barcelona). O BBM reafirmou a necessidade de duas variáveis de estado independentes, e não apenas uma como no caso dos solos saturados. As variáveis utilizadas nesse modelo foram a tensão líquida e a sucção mátrica (Pereira *et al.*, 2011).

Nos anos posteriores diversos modelos constitutivos destinados aos solos não saturados foram formulados (Gallipoli *et al.*, 2003, Wheeler *et al.*, 2003, Sheng *et al.*, 2004, Alonso *et al.*, 2010, Chiu *et al.*, 2014). Estes se baseavam, em sua maioria, no BBM, mas adicionaram algumas características do comportamento não saturado, como efeitos do teor de umidade, índice de vazios, grau de saturação e histerese.

O comportamento mecânico e hidráulico dos solos não saturados deve ser estudado em conjunto, e não isoladamente, haja vista a total dependência entre eles: Pereira (1996), Romero (1999), Camapum de Carvalho e Leroueil (2000), Kaway (2000), Gallipoli *et al.* (2003), Cordão Neto (2005), Chiu *et al.* (2014).

Essa dependência pode ser verificada analisando a influência do S_r no comportamento dos solos não saturados. Este parâmetro influencia o comportamento hidráulico por meio da

sucção, e o comportamento mecânico por meio das forças de contato entre as partículas (Wheeler *et al.*, 2003).

Uma maneira de se acoplar esses comportamentos é utilizar a curva de retenção do solo (SWRC) em ambas as análises, pois como observado anteriormente, a sucção influencia a parte hidráulica e se relaciona com o grau de saturação, que também influencia a parte mecânica. Assim, em uma última análise, pode-se considerar que a SWRC controla o comportamento mecânico.

2.2 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO

A curva de retenção de água do solo representa graficamente a relação entre a quantidade de água presente nos vazios do solo e a sucção. Essa quantidade de água pode ser expressa em termos de umidade gravimétrica (w), umidade volumétrica (θ_w), grau de saturação (S_r) ou índice de água (e_w).

Segundo Marinho (2005) a maioria das curvas de retenção de água do solo possuem formato em “S”, e esse formato é influenciado diretamente pela distribuição de poros do material. A Figura 2.1 apresenta formas gerais de curva de retenção de acordo com a sua distribuição de poros. Ela apresenta três condições em que os poros podem ser encontrados: tamanho dos poros uniforme (a, b); dois tamanhos predominantes, também chamado de bimodal (c); e, presença de vários tamanhos, multimodal (d).

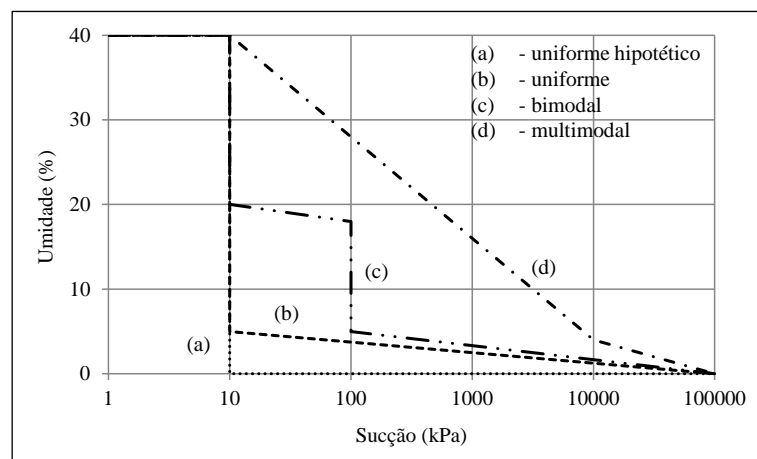


Figura 2.1 – Forma da Curva de Retenção de Água do Solo Segundo a Distribuição do Tamanho dos Poros (modificado de Marinho, 2005).

Marinho (2005) apresentou também a influência da plasticidade do solo em suas propriedades de retenção de água, conforme pode ser verificado na Figura 2.2, em que a inclinação da curva altera com o limite de liquidez quando a sucção é representada em escala log.

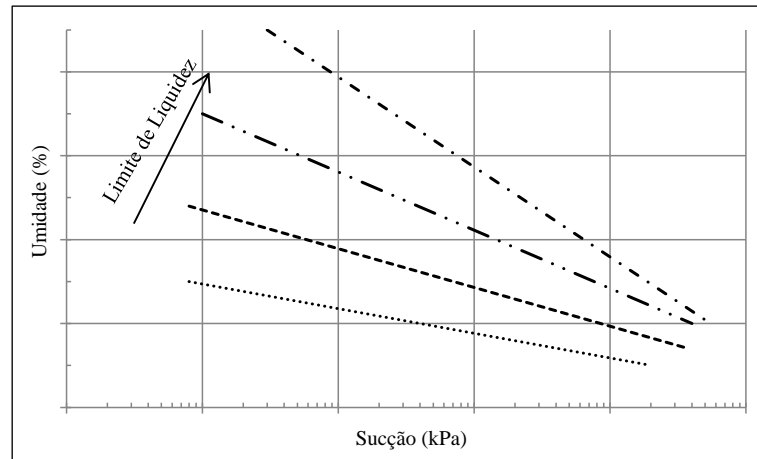


Figura 2.2 – Variação da Sucção com a Plasticidade (modificado de Marinho, 2005).

A forma da curva de retenção de um determinado solo é o reflexo do volume e da distribuição de seus poros, e de sua adsorção e estrutura. Assim, para pequenos valores de sucção, o efeito da capilaridade e a distribuição dos poros determinam o teor de água presente no solo. No entanto, para elevados valores de sucção, a textura e a superfície específica possuem uma maior influência que a estrutura do solo, considerando que a água esteja adsorvida nas partículas sólidas (Soares, 2005).

A água presente no solo pode estar armazenada de duas maneiras: na macroestrutura, em forma de água livre e meniscos, onde a sucção atuante está relacionada à capilaridade; ou, na microestrutura, como água adsorvida; a sucção, nessas condições, são governadas pelas ligações físico-químicas (Romero e Vaunat, 2000). Assim, pode-se concluir que o teor de umidade do solo é o somatório de duas contribuições, ou seja, do teor de umidade macroscópico (w^M) e do teor de umidade microscópico (w^m). Este fato é bem definido nas curvas de retenção de água do solo, possibilitando ao usuário um perfeito entendimento dos limites de atuação de cada tipo de umidade.

Acreditava-se que a curva de retenção era única para um dado solo. No entanto, Gallipoli *et al.* (2003) afirmam que variações no índice de vazios produzem alterações nos poros do solo e em suas interconexões, modificando consequentemente o grau de saturação. Assim, a relação $S_r \times s$ não é única para um solo, pois depende do índice de vazios.

Nesse contexto Gallipoli *et al.* (2003) sugerem a inclusão da variação do grau de saturação nas análises das curvas de retenção, adotando a Equação 2.6.

$$S_r = S_r(s, v) \quad (2.6)$$

onde v é o volume específico ($v = 1 + e$), e s é a sucção. Isso significa que para cada valor de v existiria uma SWRC diferente, ou seja, a curva se deslocaria para baixo com o aumento de v .

A Figura 2.3, apresentada por Wheeler *et al.* (2003), demonstra a influência do volume específico no grau de saturação utilizando resultados de ensaios realizados por Sharma (1998). Uma amostra de bentonita compactada foi carregada/descarregada de maneira isotrópica, a uma sucção constante de 200 kPa, fazendo com que ocorressem deformações volumétricas irreversíveis (ciclo a-b-c). Em seguida essa amostra foi submetida a um ciclo de molhagem/secagem, que não é apresentado na figura (c-d-e-). Um novo carregamento/descarregamento foi realizado, nas mesmas condições anteriores (e-f-g), porém elevando a tensão líquida a aproximadamente 250 kPa. Com a sucção constante, o caminho seguido pelo grau de saturação foi analisado. O S_r aumenta com a diminuição do volume específico devido à diminuição dos vazios e de suas interconexões, mas durante o descarregamento, onde uma parcela das deformações geradas são recuperadas, ele não o acompanha nas mesmas proporções.

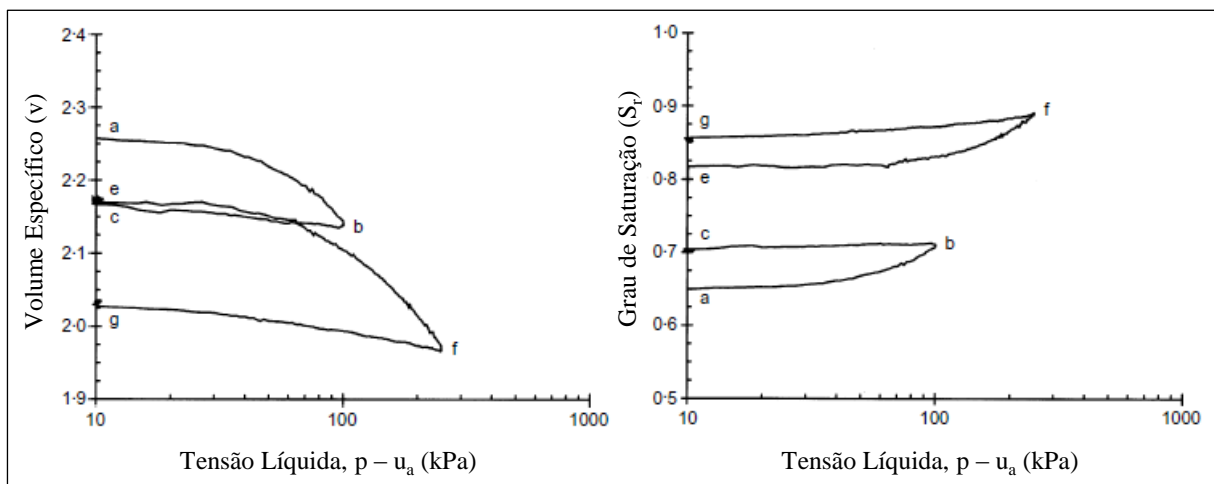


Figura 2.3 – Influência do Ciclo de Molhagem e Secagem no Comportamento do Solo Durante um Carregamento Isotrópico (modificado de Wheeler *et al.*, 2003).

Wheeler *et al.* (2003) acrescenta a influência da histerese hidráulica, que é a dependência entre S_r e o caminho de tensão seguido (umedecimento/secagem), na curva de retenção de água do solo. Na Figura 2.4 pode-se observar que durante a trajetória de secagem, de um solo

saturado, este permanece saturado até que a sucção alcance um valor chamado de valor de entrada de ar (AEV). Nesse trecho da curva o comportamento tensão-deformação é representado pelo princípio das tensões efetivas. Na trajetória de molhagem, para os mesmos valores de sucção, o solo apresenta-se em condição não saturada, não podendo mais ser representado pela tensão efetiva convencional.

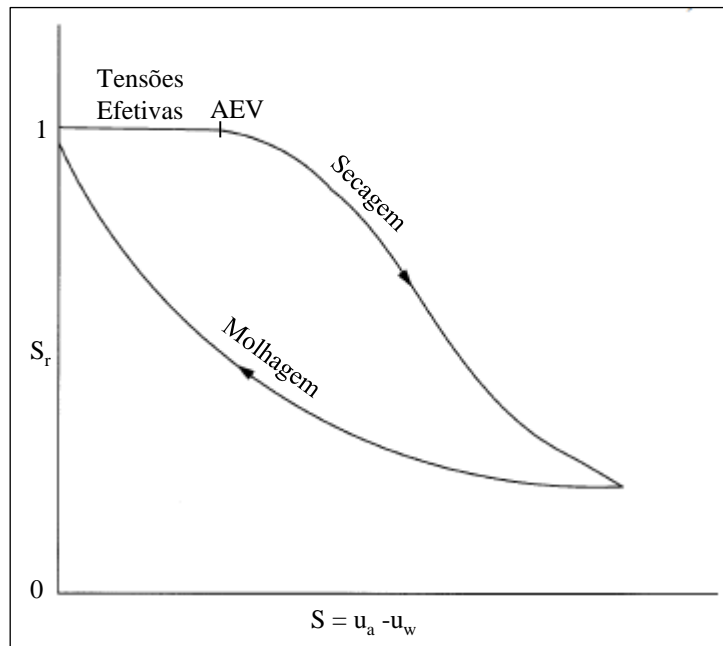


Figura 2.4 – Histerese Hidráulica na Curva de Retenção de Água do Solo (modificado de Wheeler *et al.*, 2003).

Durante estes ciclos de molhagem e secagem ocorrem alterações volumétricas irreversíveis, como pode ser verificado na Figura 2.5.

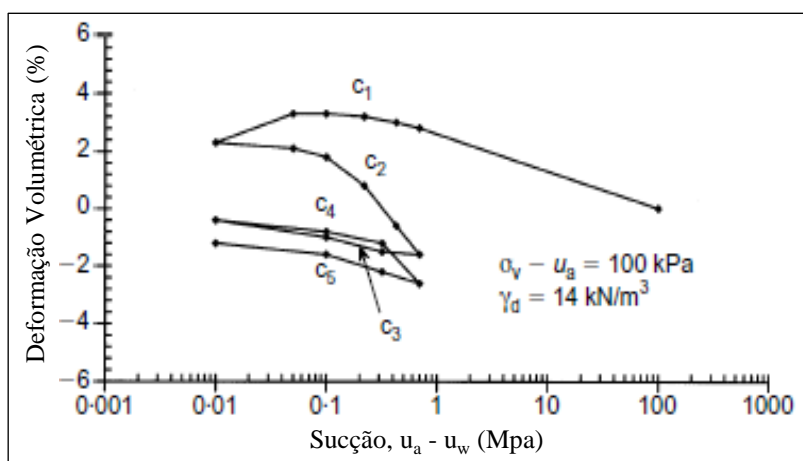


Figura 2.5 – Ciclos de Molhagem e Secagem sob Condições Oedométricas (modificado de Wheeler *et al.*, 2003).

Durante a primeira trajetória de molhagem (C_1) o solo apresentou uma expansão inicial seguida de uma retração. Conforme estudos realizados por Sharma (1998) e Sharma e

Wheeler (2000) esta expansão não é devida a presença de argilo-minerais expansivos, como se acreditava, e simplesmente devida a alteração na tensão efetiva. Nos ciclos subsequentes ocorrem compressões volumétricas irreversíveis durante as trajetórias de secagem (C_2 e C_4), que diminuem de magnitude com a continuidade dos ciclos (Wheeler *et al.*, 2003).

A alteração do S_r após ciclos de molhagem e secagem (histerese) explica o seu aumento entre os pontos “c” e “e”, apresentados na Figura 2.3. Naquele ensaio, entre os carregamentos/descarregamentos (a-b-c/e-f-g), somente foi realizado um ciclo de molhagem e secagem.

Estudos recentes, como Pedroso e Williams (2010), Khosravi e McCartney (2012), Chiu *et al.* (2014), apontam uma influencia marcante da historia hidráulica na resistência ao cisalhamento e na rigidez dos solos não saturados. Rahardjo *et al.* (2004) afirmam que a diferença na resistência é devida a diferença no grau de saturação resultante da historia hidráulica sofrida pelo solo.

No entanto, Otalvaro (2013) apresenta curvas de retenção de agua do solo da cidade de Brasília, em trajetórias de molhagem e secagem, onde a histerese observada pode ser considerada desprezível (Figura 2.6).

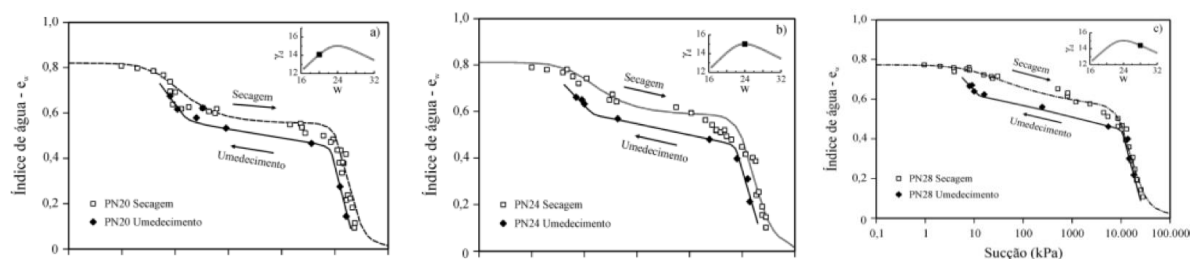


Figura 2.6 – Histerese na curva de retenção de agua no solo da cidade de Brasília (Otalvaro, 2013).

Airò Farulla *et al.* (2011) estudaram a influência do índice de vazios na propriedade de retenção de água do solo, considerando a histerese hidráulica. Essa pesquisa utilizou amostras de uma argila compactada com diferentes características iniciais, tais como: umidade (w), peso específico aparente seco (γ_d), índice de vazios (e) e grau de saturação (S_r). Para que uma ampla escala de valores de sucção pudesse ser obtida, foram combinadas duas técnicas de obtenção das curvas de retenção (equilíbrio de vapor e translação de eixo) em trajetórias de molhagem e secagem. Os resultados encontrados indicaram que para altos valores de sucção o índice de vazios não exerce influência considerável na curva de retenção, enquanto que para baixos valores essa influência é marcante, fazendo com que as curvas se desloquem para a

direita e afastem-se umas das outras com o aumento do índice de vazios, em ambas as trajetórias (Figura 2.7). O efeito da histerese hidráulica também pode ser notado.

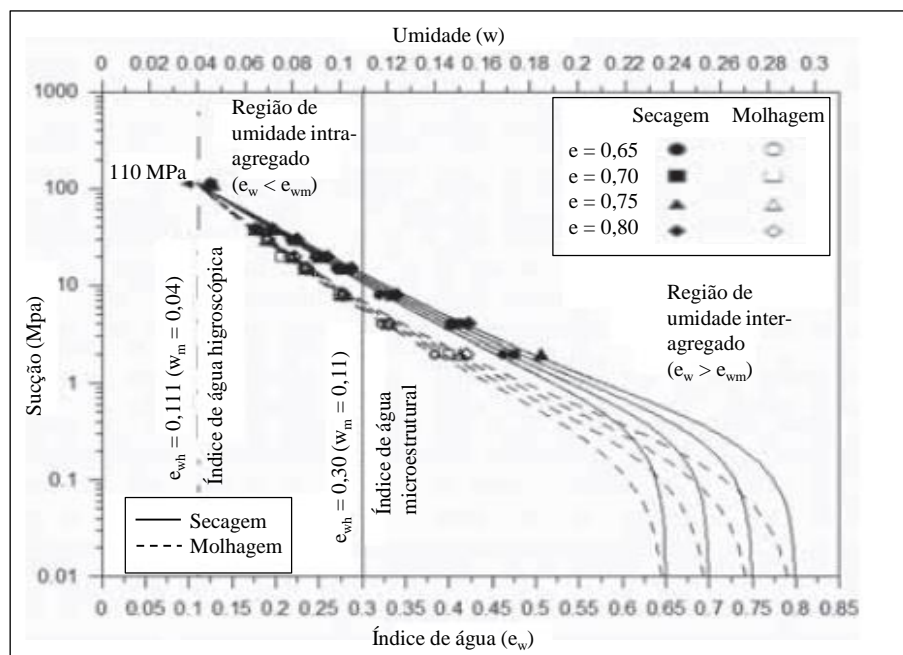


Figura 2.7 – Curvas de Retenção de Água do Solo para $e = 0,45 - 0,60$ (modificado de Airò Farulla *et al.*, 2011).

A interpretação destes resultados considerando a distribuição de poros do material justifica de forma adequada o comportamento observado. Para a região onde alterações no índice de vazios implicam em alterações da curva de retenção, ou seja, à baixas sucções, o mecanismo de armazenamento dominante é a capilaridade, a qual é dependente do índice de vazios e das ações mecânicas capazes de modificar o volume do macroporo.

Na região onde alterações no índice de vazios não conseguem influenciar as propriedades de retenção (para altas sucções), as forças de adsorção são as responsáveis pelo armazenamento. As forças de adsorção dependem das propriedades mineralógicas da argila, como superfície específica, e de suas consequências, como a plasticidade. Esse comportamento tem sido observado em diversos trabalhos (Romero, 1999; Zhou e Yu, 2004; Salager *et al.* 2007; Romero *et al.* 2011; Salager *et al.* 2013).

Airò Farulla *et al.* (2011) também analisaram a influência do índice de vazios nos valores de entrada de ar (AEV) e de água (WEV), confirmando a tendência de decréscimo com o aumento de e (Figura 2.8). Além disso, visando uma caracterização quantitativa da histerese hidráulica os autores propuseram o índice de histerese (HI), que é obtido pela Equação 2.7.

$$HI = 1 - \frac{A_w}{A_d} \quad (2.7)$$

onde, A_w e A_d são as áreas obtidas pela integração das curvas de molhagem e secagem, respectivamente. Para os dados considerados, este índice apresenta uma dependência linear com os valores de índice de vazios.

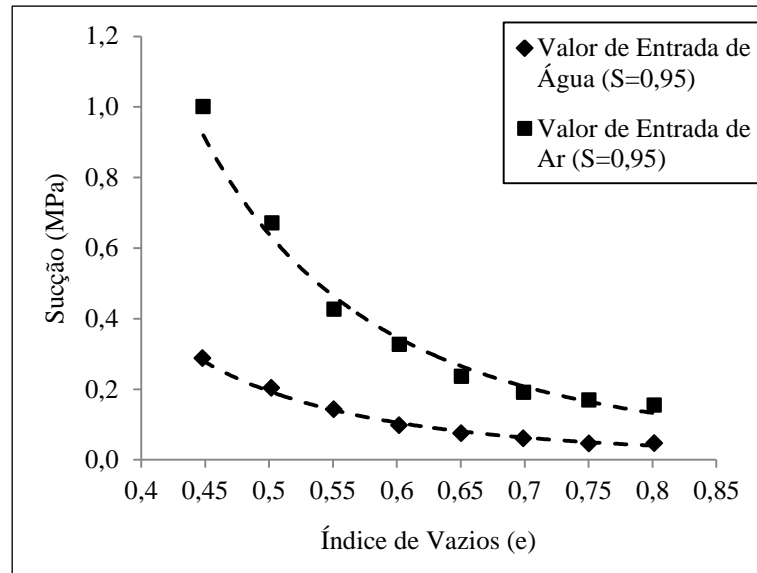


Figura 2.8 – Valores de Entrada de Ar e Água com a Variação do Índice de Vazios (modificado de Airò Farulla *et al.*, 2011).

2.3 TÉCNICAS DE MEDIDAS DE SUCÇÃO

O desenvolvimento de pesquisas relacionadas a solos não saturados se deve em parte aos avanços nas técnicas de ensaio, que permitem simular em laboratório as condições de não saturação encontradas em campo. Os equipamentos disponíveis para o estudo do comportamento hidromecânico desses solos podem utilizar três diferentes técnicas para a determinação ou imposição da sucção: técnica de translação de eixos, osmótica e equilíbrio de vapor. As primeiras determinam sucção matricial, pela transferência e equilíbrio dos fluxos de água líquida. No método de equilíbrio de vapor a sucção determinada é a total, pela transferência de vapor.

Existem várias técnicas e equipamentos para se determinar a sucção, podendo ser divididos em métodos diretos e indiretos.

Os métodos diretos medem a umidade relativa do solo, que corresponde à sucção total, e a energia de tração da fase líquida do solo, que é a sucção mátrica. Como exemplo de equipamentos que utilizam esse método tem-se: placa de sucção, câmara de pressão e tensiômetro.

Os métodos indiretos relacionam a umidade em um meio poroso, em contato ou não com o solo, aos fenômenos físicos. O ensaio de papel filtro, ponto de congelamento, sensor de condutividade térmica e o psicrômetro são baseados nesse método.

A seguir uma breve discussão sobre os métodos de medidas de sucção empregados nesse trabalho será apresentada.

2.3.1 Placa de Sucção

Neste método uma amostra é colocada em contato com uma placa porosa, saturada, cujo valor de entrada de ar é superior à sucção que se deseja medir. Uma diferença de pressão é estabelecida na placa, aplicando diretamente uma sucção à parte inferior do sistema, enquanto a parte superior mantém-se à pressão atmosférica. Após o tempo necessário para atingir o equilíbrio hidráulico, retira-se a amostra e determina-se a umidade. Nessa técnica determina-se apenas a sucção matricial do solo, pois a placa é permeável aos íons dissolvidos na água (Presa *et al.*, 1988).

Um dos principais problemas dessa técnica é a cavitação que tende a acontecer quando as pressões se aproximam de -1 atm, dificultando assim a determinação de pressões negativas na água. A utilização de um disco cerâmico de alto valor de entrada de ar e a aplicação da técnica de translação de eixos pode resolver esse problema, sendo esse novo método denominado de célula de pressão. Esse disco cerâmico pode ser substituído por uma membrana de celulose, quando deseja-se aumentar ao máximo o valor de sucção a ser medido no ensaio (Murrieta e Camapum de Carvalho, 1995).

2.3.2 Ensaio de Papel Filtro

O ensaio de papel filtro consiste em colocar uma amostra de solo em contato com um papel filtro, de calibração conhecida, em um ambiente hermeticamente fechado até que o sistema entre em equilíbrio.

Em todas as técnicas utilizadas para a determinação da sucção é necessário que ocorra fluxo de água entre o solo e o sistema de medição. No ensaio de papel filtro o fluxo pode ocorrer de duas maneiras: por meio de vapor ou por capilaridade, como mostra a Figura 2.9.

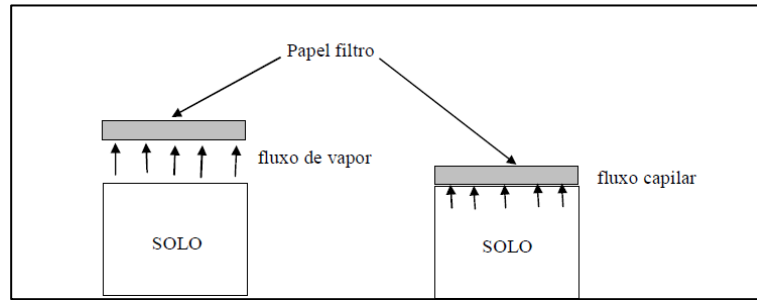


Figura 2.9 – Tipos de fluxo do solo para o papel filtro (Marinho, 1995).

Na situação onde o fluxo ocorre por meio de vapor, a sucção que será medida é a total, visto que para a saída das moléculas de água do interior do solo, estas deverão vencer as forças capilares e osmóticas (agem devido à presença de sais).

No caso em que ocorre fluxo por capilaridade a sucção mátrica é determinada, pois o fluxo ocorre através das partículas de solo e das fibras do papel filtro, sem que haja influência das forças causadas pela presença de sais dissolvidos na água (osmótica).

Os papéis filtro mais utilizados são o Whatman nº42 e o Schleicher e Schuell nº589. Diversos autores, como Chandler e Gutierrez (1986) e Leong *et al.* (2002), relatam em seus trabalhos que o papel Whatman nº42 é o mais indicado, visto sua espessura, tamanho de poros, entre outras características (Soares, 2005). No entanto, Borges *et al.* (2010), após realizar um estudo sobre o papel filtro Quanty, afirma que este pode ser empregado para medição de sucção pelo método de papel filtro.

Chandler *et al.* (1992) apresentaram duas equações para serem usadas como calibração para o Whatman nº42 (Marinho, 1995). São elas:

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05 - 2,48 \log w)}, \text{ para } w > 47\% \quad (2.8)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84 - 0,0622 w)}, \text{ para } w \leq 47\% \quad (2.9)$$

Borges *et al.* (2010) em seu estudo, anteriormente mencionado, apresenta a calibração para o Quanty:

$$\text{Sucção (kPa)} = e^{[(161,44 - w) / 24,07]}, \text{ para } w > 55\% \quad (2.10)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = e^{[(79,782 - w) / 6,26]}, \text{ para } w \leq 55\% \quad (2.11)$$

Onde, w é a umidade do papel filtro.

Outro fator extremamente importante para uma correta determinação da sucção pelo método do papel filtro é o tempo de equilíbrio. Segundo Marinho (1995) para a determinação da sucção matricial o tempo de equilíbrio de 7 dias é suficiente, mas para a sucção total este tempo é função do nível de sucção atuante. Considerando a faixa de valores de sucção que interessam a engenharia geotécnica, esse tempo é de 15 dias.

O ensaio de papel filtro consagrou-se pela simplicidade e economia. No entanto, o seu uso requer muito cuidado em sua execução, principalmente na determinação do teor de umidade do papel, e em sua interpretação, visto que os resultados estão intimamente relacionados aos procedimentos realizados.

2.3.3 Psicrômetros (WP4C)

Os psicrômetros são dispositivos capazes de medir a sucção atuante no solo utilizando dados de umidade relativa. Nessa pesquisa foi utilizado o equipamento WP4C (*Dewpoint PotentiaMeter*), que será apresentado a seguir.

O WP4C (Figura 2.10) é baseado na técnica do ponto de orvalho, que é a temperatura à qual o vapor de água presente no ar passa para o estado líquido na forma de pequenas gotas por condensação.



Figura 2.10 - WP4C (*Dewpoint PotentiaMeter*)

Esse equipamento mede o potencial hídrico pelo equilíbrio da fase água da amostra com a

fase vapor em uma câmara fechada. Quando o potencial de água da amostra e o ar da câmara entram em equilíbrio, as temperaturas do ar e da amostra são determinadas. E suas respectivas pressões de vapor no momento em que ocorre a condensação. Utilizando a Equação 2.12 o potencial de água da amostra é encontrado (Rocha, 2013).

$$\psi = \frac{RT}{M} \ln \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2.12)$$

Onde, ρ é a pressão de vapor do ar; ρ_0 é a pressão de condensação em uma determinada temperatura (calculada a partir da temperatura da amostra); R é a constante dos gases (8,31 J/mol K); T é a temperatura em Kelvin da amostra; e, M é a massa molecular da água.

O WP4C mede sucção total, em uma escala de 0 a 300 MPa, com a precisão variando com o intervalo de leitura. As principais desvantagens apresentadas por esse método são a pequena dimensão da amostra e a grande influência da variação de temperatura do ambiente em que se realiza o ensaio em seu resultado.

2.4 MODELAGEM DA CURVA DE RETENÇÃO

Os modelos de ajuste para as curvas de retenção são utilizados para representar os dados obtidos em laboratório, visto que estes se apresentam, por diversas vezes, de forma desconexa.

A necessidade de se utilizar tais ajustes vai além da representação gráfica, pois é também uma exigência quando se deseja aplicar modelagem numérica para extrapolar e interpolar os resultados experimentais onde estes não existem.

As equações de ajuste podem ser lineares ou não lineares, com formulação matemática mais rigorosa ou mais simplificada, utilizarem conceitos elastoplásticos ou não. No entanto, o objetivo é comum: reproduzir parte das feições da curva de retenção, incluindo a forma e alguns parâmetros de referência, como umidade de saturação (w_{sat}), valor de sucção onde surgem os primeiros vazios não preenchidos totalmente por água (AEV), teor de umidade residual (w_{res}) e razão de variação da umidade com a sucção (λ_s) (Otalvaro, 2013).

A Tabela 2.1 apresenta um resumo das principais equações de ajuste para a curva de retenção apresentadas na literatura.

Tabela 2.1 – Equações de Ajuste para a Curva de Retenção (modificado de Borges, 2010).

ITEM	NOME	EQUAÇÃO	PARÂMETROS
1	Gardner (1958)	$\theta(\psi) = \frac{\theta_s}{1 + a\psi^n}$	a, n
2	Brooks e Corey (1964)	$\theta(\psi) = \theta_s \text{ para } \psi \leq \psi_{ae}$ $\theta(\psi) = \theta_s \left(\frac{\psi}{a}\right)^{-n} \text{ para } \psi > \psi_{ae}$	a, n
3	King (1965)	$\theta(\psi) = \theta_s \left[\frac{\cosh\left(\frac{\psi}{\psi_0}\right)^b - \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_s + \theta_r} \cosh(a)}{\cosh\left(\frac{\psi}{\psi_0}\right)^b + \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_s + \theta_r} \cosh(a)} \right]$	Ψ_0, a, b, θ_r
4	Brutsaert (1966)	$\theta(\psi) = \theta_s / \left(1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right)$	a, n
5	van Genuchten (1980)	$\theta(\psi) = \theta_s / [1 + (a\psi)^n]^m$	a, m, n
6	van Genuchten – Mualem (1980)	$\theta(\psi) = \theta_s / [1 + (a\psi)^n]^{(1 - \frac{1}{n})}$	a, n
7	Genuchten – Burdin (1980)	$\theta(\psi) = \theta_s / [1 + (a\psi)^n]^{(1 - \frac{2}{n})}$	a, n
8	Equação Tani (1982)	$\theta(\psi) = \theta_s \left(1 + \frac{a - \psi}{a - n}\right) \exp\left(-\frac{a - \psi}{a - n}\right)$	a, n
9	Equação Boltzman (1984)	$\theta(\psi) = \theta_s \text{ para } \psi \leq \psi_{ae}$ $\theta(\psi) = \theta_s \exp\left(\frac{a - \psi}{n}\right) \text{ para } \psi > \psi_{ae}$	a, n

10	Equação Fermi (1987)	$\theta(\psi) = \frac{\theta_s}{1 + \exp\left(\frac{\psi-a}{n}\right)}$	a, n
11	Fredlund e Xing (1994)	$\theta_w = \theta_s / \left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m$	a, n, m
12	Durner (1994)	$e_w = \sum_{i=1}^N \frac{e^i}{[1 + (a_i \cdot s)^{n_i}]^{1-1/n_i}}$	a _i , n _i
13	Pereira e Fredlund (1996)	$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{c} \right)^b \right]^a}$	a, b, c, Θ_r
14	Feng e M. Fredlund (1999)	$\theta(\psi) = \frac{\theta_s b + c \psi^d}{b + \psi^d}$	b, c, d
15	Romero e Vaunat (2000)	$w = w_{sat} C_{u_a-u_w} \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^m$ $C_{u_a-u_w} = \left\{ 1 - \frac{\ln \left[1 + \frac{(u_a - u_w)}{a} \right]}{\ln 2} \right\}^m$	a, n, m, α
16	Gitirana Jr. e Fredlund (2004)	$\theta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 + (\psi / \sqrt{\psi_b \psi_{res}})^d} + \theta_2$	a, Ψ_{res} , Ψ_b , Θ
17	Camapum de Carvalho e Leroueil (2004)	Curva de retenção dada em função de S_r versus e^*pF , sendo $pF = \log(u_a - u_w)$, em cmca	-
18	Cordão Neto (2005)	$S_r = b + c \cdot \log(e) + \frac{1 - (b + c \cdot \log(e))}{\left(1 + \frac{u_a - u_w}{d} \right)^f}$	b, c, d, f

		$(dS_r)^e = -\frac{k_s}{s^*} ds^*$	
19	Wheeler <i>et al.</i> (2003)	$(dS_r)^p = -(\lambda_s - k_s) \frac{ds_I^*}{s_I^*} = -(\lambda_s - k_s) \frac{ds_D^*}{s_D^*}$	k, λ
<hr/>			
20	Kyokawa (2010)	$f_c(s, S_r, I_w) = I_w F_d(s) + (1 - I_w) F_w(s) - S_r = 0$	I_w
<hr/>			
21	Pedroso e Williams (2010)	$y_w(x) = -\lambda_d x - \frac{1}{\beta_w} \ln(C_3^w + C_2^w e^{C_1^w x})$	λ_d, β_w
<hr/>			
22	Zhou <i>et al.</i> (2012)	$\frac{dS_r^e}{de_i} = -\frac{S_r^e}{e_i} (1 - S_r^e)^\xi$	ξ

Estas equações variam quanto ao número de parâmetros envolvidos, e pode-se dizer que, geralmente, quanto maior o número de parâmetros de ajuste, maior a flexibilidade e capacidade de ajuste da equação (Borges, 2010). Mas, se em excesso perde a sua principal vantagem, que é a simplificação.

Pedroso e Williams (2011) apresentam um técnica automática para a determinação desses parâmetros, baseada na otimização utilizando algoritmos genéticos. O principal objetivo desse trabalho é encontrar os melhores parâmetros, excluindo a influencia do usuário, dada a melhor curva de retenção.

A escolha pela utilização de determinada equação se dá mediante a análise de dois critérios: disponibilidade dos parâmetros requisitados pelo modelo de ajuste e adequação desse modelo ao solo em estudo.

Nesta pesquisa, os resultados obtidos em ensaios de determinação da curva de retenção pelo método do papel filtro serão ajustados pelo método proposto por Durner (1994).

Este autor apresentou uma extensão para a equação proposta por van Genuchten (1980), que era originalmente destinada a curvas unimodais, tornando-a adequada a curvas bi e

multimodais. Esta alteração foi realizada introduzindo fatores de ponderação em uma combinação linear de funções individuais unimodais. O resultado obtido é apresentado na Equação 2.13.

$$w = \frac{w_M}{[1+(\alpha_{M.s})^{n_M}]^{1-\frac{1}{n_M}}} + \frac{w_m}{[1+(\alpha_{m.s})^{n_m}]^{1-\frac{1}{n_m}}} \quad (2.13)$$

Onde os índices M e m indicam que o parâmetro se refere a macro e microestrutura, respectivamente. w é a umidade, α está relacionado ao valor de entrada de ar, n é a inclinação da reta que relaciona umidade e sucção, e s é sucção.

2.5 MICROESTRUTURA DO SOLO

A distribuição de poros do solo pode ser relacionada a diversas características de comportamento deste, como condutividade (água, ar e calor), deformação volumétrica, entre outras (Romero, 1999).

A determinação dessa distribuição de poros pode ser realizada utilizando diversas técnicas, como: granulometria, curva de retenção de água do solo, medições por infravermelho, tomografia, adsorção de nitrogênio, microscopia eletrônica de varredura ambiental (ESEM) e porosimetria por intrusão de mercúrio.

Atualmente, a principal técnica de determinação da distribuição de poros é a porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP). Ela fornece uma representação quantitativa da estrutura de materiais que possuem poros interconectados, que é o caso do solo.

Este método consiste em injetar mercúrio sobre pressão em uma amostra de solo previamente preparada. De posse do volume de mercúrio injetado e da pressão necessária para este procedimento a curva porosimétrica pode ser então traçada, utilizando a Equação 2.14.

$$D = -\frac{1}{P} 4\gamma_{hg} \cos\phi_{hg} \quad (2.14)$$

onde, D é o diâmetro do poro, P é a pressão absoluta aplicada, γ_{hg} é a tensão superficial do mercúrio, e ϕ_{hg} é o ângulo de contato entre o mercúrio e a amostra.

Delage e Lefebvre (1984) sugerem que após a intrusão seja realizada a extrusão do mercúrio, sendo os dados dessa extrusão também calculados pela Equação 2.14. O objetivo desse procedimento é obter a diferença entre a curva de intrusão e a de extrusão, e

consequentemente, a distinção entre os níveis de porosidade existentes, ou seja, os macro e microporos (Figura 2.11). Segundo estes autores durante a injeção o mercúrio preenche todos os poros acessíveis e interconectados, mas na extrusão o mercúrio liberado é somente o dos microporos, pois o mercúrio presente nos macroporos encontra-se preso pelas forças capilares.

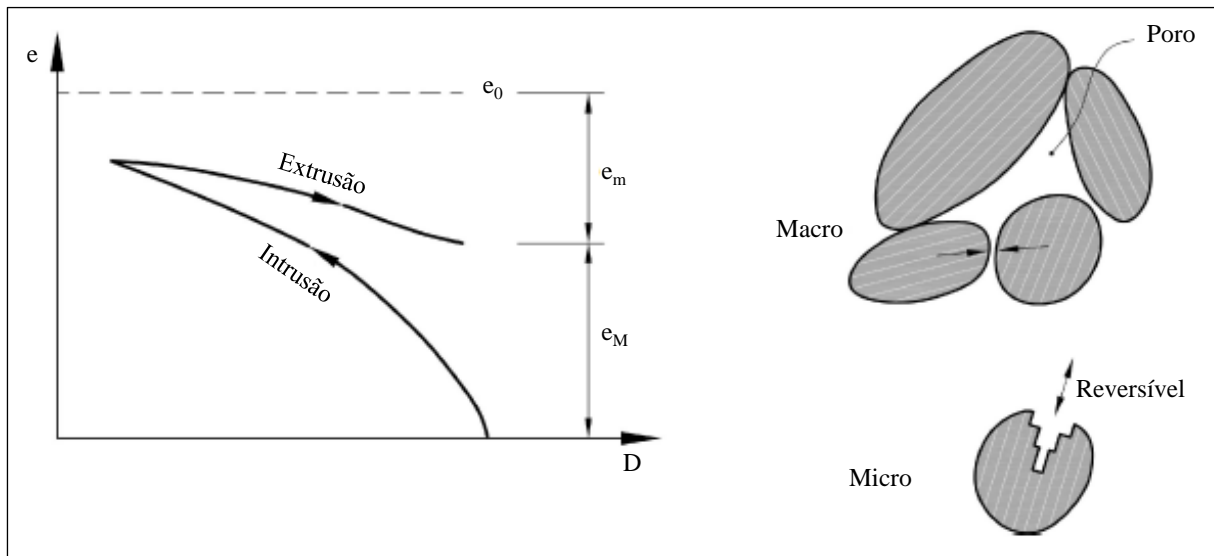


Figura 2.11 – Esquema do Ensaio de MIP (modificado de Alonso *et al.*, 2012).

Como desvantagens desse método, podem ser citados os efeitos da preparação (remoção da umidade) da amostra, o efeito da pressão gerada durante o ensaio na estrutura do solo, e a influência da conexão entre os poros, ou seja, poros maiores acessíveis somente por poros menores (Simms e Yanful, 2004). No entanto, entre os meios disponíveis para a caracterização microestrutural dos solos, o MIP apresenta-se satisfatório.

Diversas pesquisas utilizando a porosimetria por intrusão de mercúrio foram, e continuam sendo, desenvolvidas visando não somente o conhecimento da distribuição e estrutura dos solos, mas principalmente, a influência em seu comportamento hidromecânico. Essa técnica também é muito utilizada na determinação da curva de retenção e da condutividade hidráulica do solo. Entre os estudos realizados nessa área podem ser citados Delage e Lefebvre (1984), Prapaharan *et al.* (1985), Juang e Holtz (1986), Griffiths e Joshi (1989), Delage *et al.* (1996), Romero (1999), Penumadu e Dean (1999), Simms e Yanful (2001), Buenfil (2007), Romero e Simms (2008), Mascarenha (2008), Koliji *et al.* (2010), Sivakumar *et al.* (2010), Alonso *et al.* (2011), Romero (2013), Otalvaro (2013), Borges (2014), Ferrari *et al.* (2014), Ghirian e Fall (2014), Mountassir *et al.* (2014), Saba *et al.* (2014), Wen e Yan (2014), Borges (2014).

Simms e Yanful (2005) desenvolveram um modelo numérico, chamado de DPMN (Deformable pore-network model), que utiliza a caracterização microestrutural, feita por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, para obter parâmetros macroestruturais do solo, como curva de retenção, função de condutividade hidráulica e alterações volumétricas. Modelos semelhantes (Cardoso *et al.* (2013), Masin (2013), Musso *et al.* (2013), Hu *et al.* (2013)), que adicionalmente incorporam a influencia da dupla estrutura no comportamento hidráulico, e até mesmo hidromecânico, têm sido desenvolvidos.

Inicialmente o conhecimento da distribuição de poros de um dado solo visava além da caracterização da parte microestrutural, a obtenção dos parâmetros anteriormente mencionados, visto que os ensaios tradicionais, geralmente, são complexos e demorados; ao passo que o MIP é simples e reflete satisfatoriamente o comportamento hidromecânico dos solos. No entanto, ao longo desses estudos observou-se que a microestrutura não somente reflete, mas influencia esse comportamento.

No Brasil, no entanto, a realização de ensaios de MIP não é tão corriqueira devido à falta do porosímetro por intrusão de mercúrio. Nesse contexto, Mascarenha (2008) desenvolveu um procedimento para a obtenção da distribuição de poros do solo utilizando curvas de retenção, percorrendo o caminho inverso ao realizado por Romero (1999) e Prapaharan *et al.* (1985). Assim, o autor aplicou as Equações 2.15 e 2.16 às curvas de retenção de diversos tipos de solo. Um exemplo dos resultados obtidos está apresentado na Figura 2.12.

$$P = \frac{u_a - u_w}{0,196} \quad (2.15)$$

$$e_{nw} = e(1 - S_r) \quad (2.16)$$

onde, e_{nw} são os valores dos índices de vazios preenchidos por mercúrio.

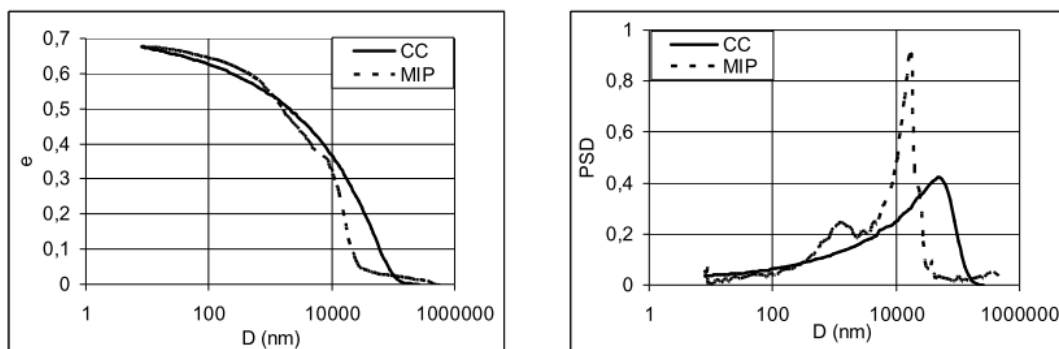


Figura 2.12 – Distribuição de poros a partir da curva de retenção do solo (Mascarenha, 2008).

Segundo Mascarenha (2008), e também analisando a Figura 2.12, a utilização da curva de retenção para a determinação da distribuição de poros do solo se mostra como uma ferramenta eficaz, podendo ser aplicada às bases de dados de curvas características existentes nos centros de pesquisa brasileiros para avaliação.

Otalvaro (2013), baseado no trabalho desenvolvido por Mascarenha (2008), calculou as curvas de densidade de poros (PSD) a partir das curvas de injeção de ar (SAIC), que são o resultado da transformação da curva de retenção de água. Esse método foi empregado em três diferentes tipos de solo, cujos resultados são apresentados na Figura 2.13, que podem ser considerados promissores.

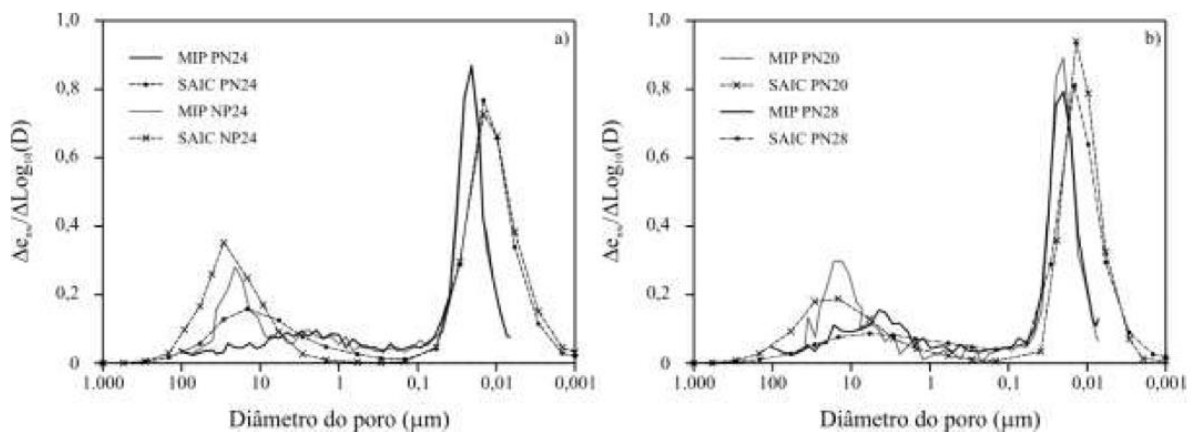


Figura 2.13 – Predição da PSD pela SAIC (Otalvaro, 2013).

De acordo com Otalvaro (2013) a principal diferença entre essa técnica e a desenvolvida por Mascarenha (2008) é o controle na mudança de volume. A preparação das amostras para o MIP evita a mudança de volume através da liofilização. Entretanto, a predição via SAIC permite expansão e contração, visto que esta tem sua origem na curva de retenção.

2.6 SOLOS COMPACTADOS

A compactação é um processo mecânico pelo qual se busca melhorar as características hidráulicas e mecânicas dos solos, reduzindo o seu índice de vazios. Essa redução é realizada expulsando o ar que ocupa os poros. No entanto, esse processo não consegue eliminar todo o ar presente, permanecendo bolhas de ar ocluso no interior da massa de solo, o que confere ao material um estado de não saturação.

O processo de compactação além de alterar o índice de vazios do solo, o induz a uma estrutura específica, que é função do teor de água e da energia adotada. O conhecimento dessa

estrutura permite uma análise qualitativa do seu comportamento geomecânico, que é determinado em ensaios de laboratório ou de campo (Martinez, 2003).

A compactação dos solos representa uma forma de modificação do posicionamento de suas partículas. A maior ou menor presença de água vai influenciar a forma como essas partículas vão se posicionar quando um carregamento for aplicado. Entende-se como fábrica essa disposição das partículas do solo. Ao conjunto, fábrica e possíveis ligações cimentícias existentes, dá-se o nome de estrutura (Reis, 2010).

Existem alguns princípios que relacionam a fábrica, a estrutura dos solos e suas propriedades mecânicas. Estas propriedades explicam os diferentes comportamentos dos solos compactados no ramo seco (estrutura floculada) e dos solos compactados no ramo úmido (estrutura dispersa). Mitchell e Soga (2005) apresentam alguns desses princípios:

- Sob uma determinada tensão de adensamento, um solo compactado no ramo seco possui densidade menor do que o mesmo solo compactado no ramo úmido;
- Para um mesmo índice de vazios, um solo compactado no ramo seco é mais rígido que o mesmo solo compactado no ramo úmido (presença de sucções maiores no ramo seco);
- Após a tensão de pré-adensamento, incrementos de tensão causam maiores modificações na estrutura dos solos compactados no ramo seco do que na estrutura de solos compactados no ramo úmido;
- A variação de diâmetros dos poros e o seu diâmetro médio é menor nos solos compactados no ramo úmido do que nos solos compactados no ramo seco;
- Duas amostras de um solo compactado podem ter estruturas diferentes para o mesmo estado de tensão efetiva e índice de vazios, se forem compactados do lado seco ou do lado úmido. Nesse caso o comportamento tensão-deformação também será diferente, podendo ser medido através do OCR.

Assim, fica evidente que as características do solo compactado, como resistência ao cisalhamento, deformabilidade, permeabilidade e retenção de água, dependem das condições de umidade em que esse processo aconteceu.

A estrutura dos solos compactados é um fator determinante no coeficiente de permeabilidade desses materiais. Para a mesma umidade, a permeabilidade é tanto menor quanto mais compacto estiver o solo, o que é devido simplesmente ao seu menor índice de vazios. Para a mesma densidade, a permeabilidade diminui com o aumento do teor de umidade, mesmo o índice de vazios sendo constante. A explicação para esse comportamento pode ser encontrada na teoria da estrutura dos solos compactados proposta por Lambe (1958), na qual postula-se que a compactação executada no ramo seco configura uma estrutura floculada, com a formação de agregações e grandes vazios entre si (macroporos), por onde a água pode percolar com facilidade; e quando realizada no ramo úmido forma uma estrutura dispersa, com as agregações tendendo a se desfazer, ou mesmo, a se aproximarem, e a água precisando percolar pelos microporos. Desta forma, a permeabilidade no ponto de umidade ótima, ou superior, é menor do que no ramo seco.

A compressibilidade dos solos compactados é menor quanto maior for a sua densidade e menor o teor de umidade. A menor compressibilidade dos solos mais secos é resultado da estrutura e da sucção atuante no material, devido à não saturação.

Segundo Gens (1996), citado por Martinez (2003), a resistência ao cisalhamento é aumentada pela sucção, devido ao efeito estabilizante das forças inter-granulares. Ensaio de laboratório têm mostrado que, com o aumento da sucção, a coesão aparente aumenta e o ângulo de atrito interno permanece aproximadamente constante.

A resistência ao cisalhamento do solo é função do índice de vazios, que é dependente da natureza da estrutura do solo. As tensões aplicadas, e conseqüentemente as deformações sofridas, influenciam no rearranjo das partículas. Entretanto, deve ser considerado, além do índice de vazios associado à densidade, o tipo e distribuição dos poros originados pela estrutura, que, por sua vez, também é função da umidade (Morgenstern e Tchalenko, 1967, citado por Martinez, 2003).

Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2012) a estrutura do solo compactado está relacionada à localização desse material. Assim, para os solos compactados de regiões temperadas e frias a teoria proposta por Lambe (1962), na qual foi baseada o conceito de Mitchell e Soga (2005), descreve adequadamente a estrutura formada. No entanto, para os solos tropicais profundamente intemperizados essa teoria não se aplica.

Nestes solos a estrutura tende a ser do tipo simples, como no caso dos solos granulares, devido à agregação das partículas de argila. A distribuição de poros pode variar de bimodal a unimodal, dependendo da energia de compactação utilizada. Geralmente, o aumento da energia de compactação ocasiona uma redução dos macroporos. No entanto, de acordo com Farias *et al.* (2011) a estrutura interna dos agregados, os microporos, permanece inalterada, pois a compactação semi-estática não consegue afetar esta região dos solos profundamente intemperizados. Sridharan *et al.* (1971), *apud* Tarantino & De Col (2009), Buenfil *et al.* (2004) e Romero *et al.* (2011), estudando diferentes tipos de solo, chegaram a mesma conclusão. Quanto à forma da curva de compactação, ela é afetada pela estabilidade dos agregados. Vale ressaltar que os agregados tornam-se particularmente resistentes quando a sucção atua ao nível de microporos, ou seja, a baixas umidades e elevadas sucções (Camapum de Carvalho *et al.*, 2012).

Para os solos tropicais residuais jovens, tanto a estrutura como a forma da curva de compactação tende a seguir a teoria de Lambe (1962). A distribuição de poros pode variar de uniformes a bem graduados, a depender da textura e da energia de compactação (Camapum de Carvalho *et al.*, 2012).

Alonso *et al.* (2012) visando analisar a influência da microestrutura no comportamento dos solos compactados apresentaram os resultados de ensaios de MIP em amostras compactadas submetidas a diferentes trajetórias de tensão e sucção. Esses resultados indicam que o formato bimodal da distribuição de poros induzido pelo processo de compactação é mantido, independente da trajetória aplicada. Concluiu-se também que essas mesmas trajetórias modificam principalmente a macroporosidade, mas, em solos altamente plásticos, os microporos também podem ser afetados. Assim, os efeitos da microestrutura devem ser introduzidos na modelagem realística dos solos compactados. Como para a completa caracterização estrutural dos solos, diversos parâmetros se fazem necessários, os autores propuseram o conceito de variável de estado microestrutural (ξ_m), apresentada na Equação 2.17.

$$\xi_m = \frac{e_m}{e} \quad (2.17)$$

Onde, e_m é o índice de vazios da microestrutura e e o índice de vazios total.

Essa nova variável de estado se torna interessante à medida que ela consegue descrever adequadamente a parte microestrutural e se relaciona à tensão efetiva para solos não

saturados, por meio do grau de saturação efetivo. Assim, os efeitos da microestrutura passam a ser considerados. O ξ_m também se relaciona ao plano de compactação convencional (γ_d, w), crescendo tanto com o peso específico aparente seco quanto com a umidade.

2.7 RESUMO

Neste capítulo foi apresentado o referencial teórico necessário ao desenvolvimento da pesquisa. Foram abordados temas como: os princípios dos solos não saturados, com a evolução do estudo da tensão efetiva destinada especificamente a este tipo de solo; conceitos sobre a curva de retenção de água do solo, enfatizando a influência das principais características dos solos nessa relação; as técnicas de medidas de sucção empregadas neste trabalho, como o ensaio de placa de sucção, papel filtro e psicrômetro; uma retrospectiva histórica dos principais modelos de ajuste da curva de retenção desenvolvidos ao longo dos anos, e mais detalhadamente o modelo adotado por essa pesquisa; a importância do entendimento da microestrutura do solo, com os seus principais métodos de estudo, e detalhes sobre o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP); as principais características dos solos compactados, principalmente no que se refere a estrutura induzida por esse processo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as principais características do solo estudado e a metodologia empregada na execução do programa experimental. Foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, compactação, adensamento, curvas de retenção pelo método do papel filtro, placa de sucção e WP4, porosimetria por intrusão de mercúrio e microscopia eletrônica de varredura. O objetivo principal desse programa experimental foi verificar o comportamento da curva de retenção do solo quando este é submetido a mudanças em seu teor de umidade, índice de vazios (carregamento) e energia aplicada.

3.1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL ESTUDADO

O local escolhido para a coleta do solo a ser utilizado nesta pesquisa foi o Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília – PPG/UnB (Figura 3.1). Essa escolha está relacionada à grande quantidade de estudos desenvolvidos neste solo nos últimos anos, como os de Guimaraes (2002), Mascarenha (2003), Silva (2007), Silva (2009), Silva (2012), Borges (2014), dentre outros.



Figura 3.1 – Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.

Guimaraes (2002) dividiu o subsolo do campo experimental em três horizontes:

- 0 a 3,5 m: areia silto-argilosa, com predominância de gibbsita, presença de macroporos devido a grande quantidade de agregações, IP médio de 10. Nesta zona ocorrem as maiores variações de umidade ao longo do ano;
- 3,5 a 8,5 m: as propriedades físicas, mineralógicas e microestruturais vão gradualmente se alterando até encontrar o solo residual mais jovem a 8,5 m de

profundidade, com o teor de gibbsita, a porosidade e a macroporosidade diminuindo;

- A partir de 8,5 m: solo com textura mais siltosa, com aumento do IP, estrutura com distribuição de poros mais homogênea, e sem a presença da gibbsita.

Nesse estudo foram coletadas aproximadamente 500 kg de amostras deformadas a 1,70 m de profundidade, ou seja, na primeira camada. Segundo Camapum de Carvalho e Mortari (1994) essa primeira camada, de solo residual laterítico, apresenta uma estrutura bastante porosa, não saturada e com baixa capacidade de suporte. Mascarenha (2003) obteve resultados de provas de carga em estacas com valores da ordem de 300 kN.

Esse solo também é instável quando submetido a variação no estado de tensão e saturação, apresentando um comportamento colapsível. Como na maioria das regiões tropicais, o solo do campo experimental do PPG/UnB apresenta características peculiares e comportamento geotécnico distinto, consequência dos processos de lixiviação e laterização ocorridos desde a sua gênese (Camapum de Carvalho e Mortari, 1994).

As Figuras 3.2 a 3.4 mostram diversas características desse solo, confirmando a descrição apresentada anteriormente. Acredita-se que a elevada porosidade apresentada nas amostras naturais somente é possível devido a presença das cimentações oriundas dos óxidos de ferro e alumínio e também das pontes de argila. Silva (2009) almejava estudar este solo compactado em condições similares a do campo, mas não conseguiu manter esse nível de porosidade, visto que uma vez destruída essas cimentações, essa parcela de resistência é perdida.

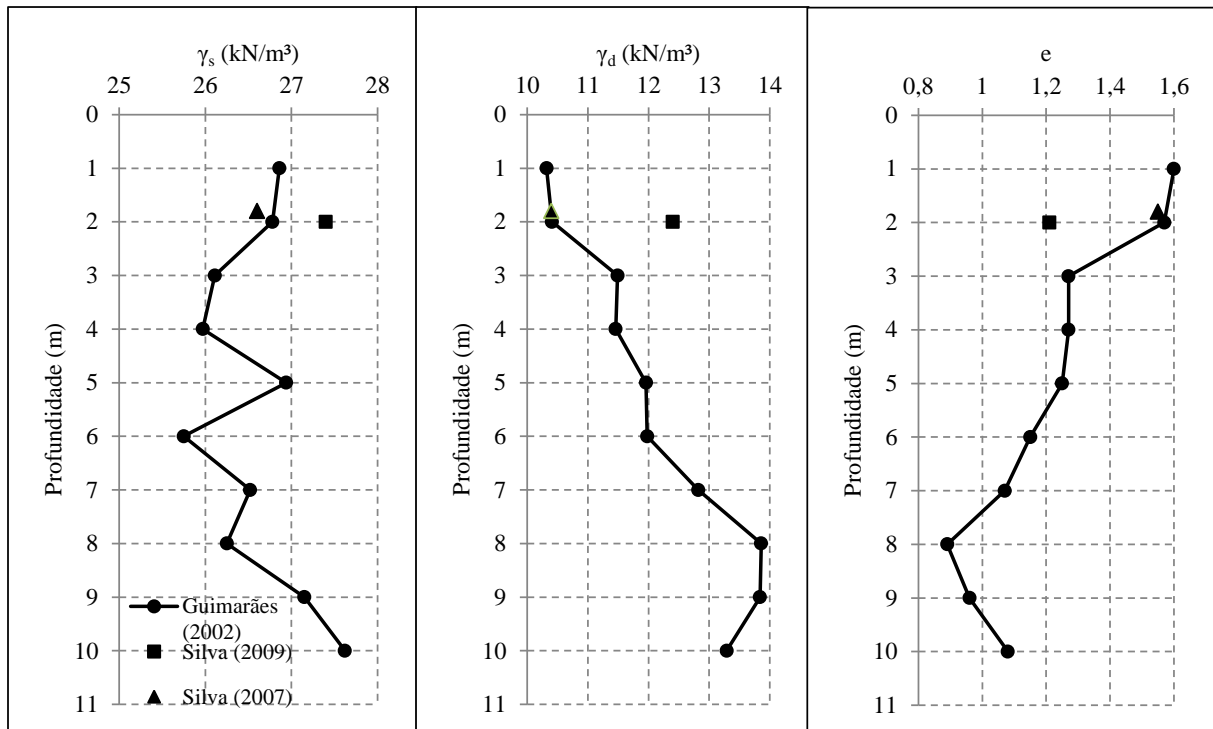


Figura 3.2 – Caracterização Física do Solo do Campo Experimental do PPG da UnB.

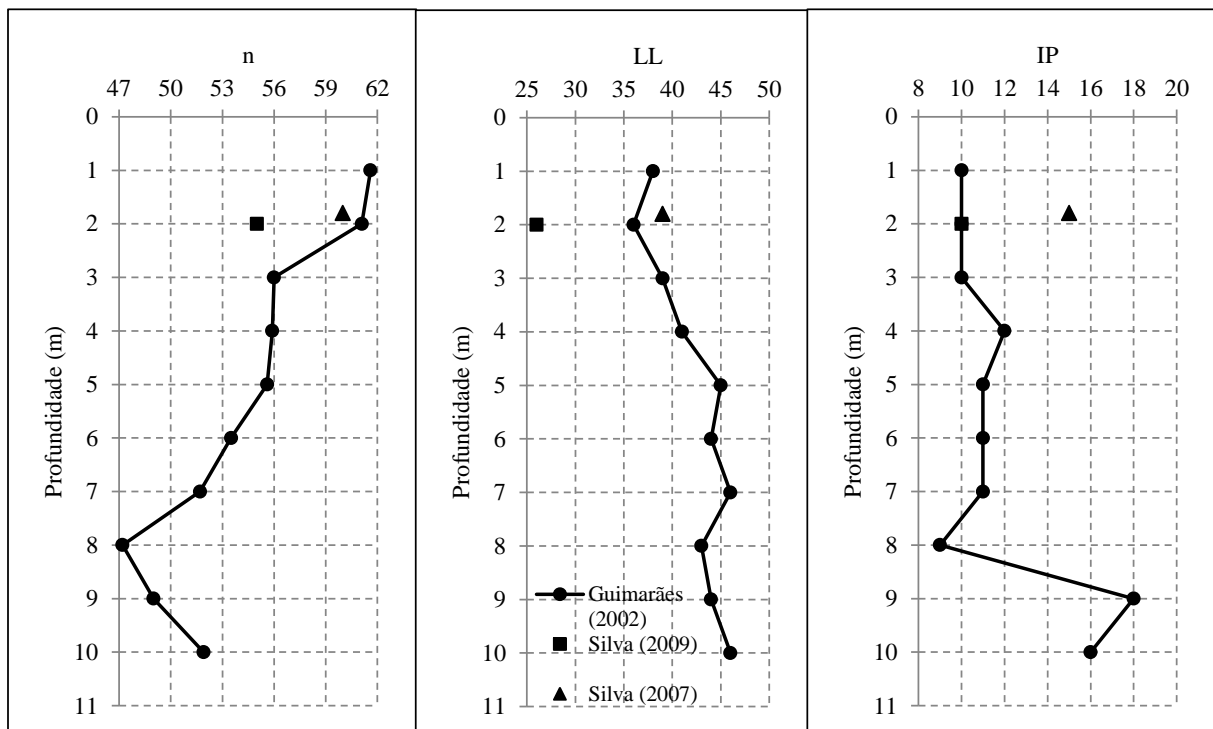


Figura 3.3 – Caracterização Física do Solo do Campo Experimental do PPG da UnB.

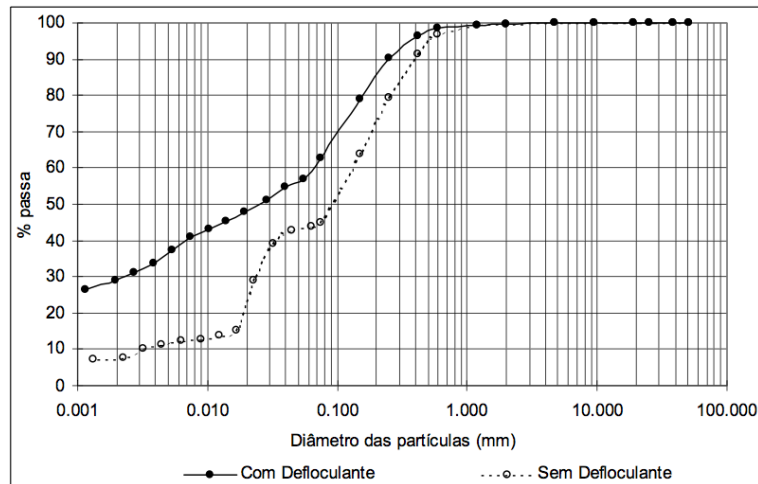


Figura 3.4 – Curvas Granulométricas do Solo do Campo Experimental do PPG da UnB a 2 m de Profundidade (Guimarães, 2002).

A Figura 3.5 apresenta as curvas de retenção em relação ao índice de água obtidas por Guimarães (2002), Silva (2007), Silva (2009) e Borges (2014). O solo utilizado por esses autores foi retirado a uma profundidade de 2 m no Campo Experimental do PPG em Geotecnia/UnB. Analisando a Figura 3.5 constata-se que a micro porosidade se mantém constante, independente de a amostra estar compactada, em estado natural ou lama. Além desses trabalhos, Otalvaro (2013), utilizando solo semelhante, chegou a mesma conclusão. Este autor observou ainda que a micro estrutura do solo intemperizado de Brasília não era afetada mesmo por carregamentos da ordem de 2000 kPa.

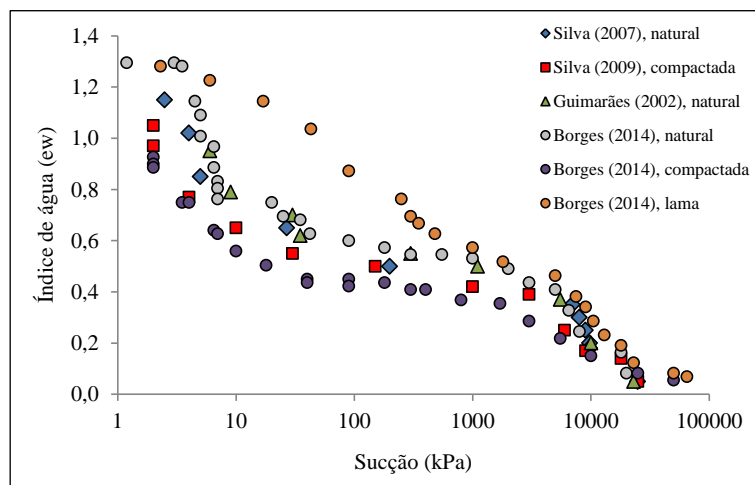


Figura 3.5 – Curvas de Retenção de Água do Solo do Campo Experimental do PPG da UnB.

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesta pesquisa foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, para a identificação das propriedades físicas; ensaios de compactação, para o conhecimento dos parâmetros de

compactação; ensaios de adensamento oedométrico, para conhecer a deformabilidade destes materiais; ensaios de papel filtro, placa de sucção e WP4, para a determinação da curva de retenção; e, ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e microscopia eletrônica de varredura (SEM), para a caracterização microestrutural.

3.2.1 Caracterização Geotécnica

Todos os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados em conformidade com as especificações existentes nas normas da Associação Brasileira de Norma Técnicas (ABNT), sendo eles: preparação das amostras utilizadas (NBR 6457, ABNT 1986); Umidade higroscópica (w), NBR 6457/1986; Peso específico dos sólidos (γ_s), NBR 6508/1984; Limite de liquidez (LL), NBR 6459/1984; Limite de plasticidade (LP), NBR 7180/1984; Análise Granulométrica com e sem defloculante, NBR 7181/1984.

3.2.2 Compactação

O material para o ensaio de compactação foi previamente preparado segundo as recomendações da NBR 6457/1986, com secagem até a umidade higroscópica. De acordo com Pessoa *et al.* (2005) esse procedimento pode apresentar resultados distintos daqueles obtidos para as condições de campo. No entanto, nesta pesquisa optou-se por utilizar o procedimento previsto em norma a fim de criar um banco de dados padronizados, visando possíveis relações com outros dados.

A curva de compactação foi determinada para a Energia Próctor Normal, conforme a norma NBR 7182/86 (Solo – Ensaio de Compactação), sem reuso de material, para garantir a integridade dos grãos e das agregações de argila.

3.2.3 Adensamento Oedométrico

Os ensaios de adensamento oedométrico (NBR 12007/MB 3336/90) foram realizados em prensa convencional, em condição natural, atingindo até 1600 kPa de carregamento. Os corpos-de-prova foram mantidos na prensa sob um carregamento de 12,5 kPa por 24 h, antes do início efetivo do ensaio, para garantir o perfeito contato entre a prensa e o capacete do topo da amostra.

3.2.4 Determinação dos Pontos de Trabalho

A partir da curva de compactação foram definidos os pontos de trabalho primários, ou seja, os pares de valores de massa específica aparente seca e umidade, apresentados na Figura 3.6. A quantidade e a disposição desses pontos foram determinadas visando conhecer o comportamento hidráulico e estrutural do solo no plano de compactação e obter pontos com iguais valores de massa específica e outros com iguais teores de umidade, respectivamente.

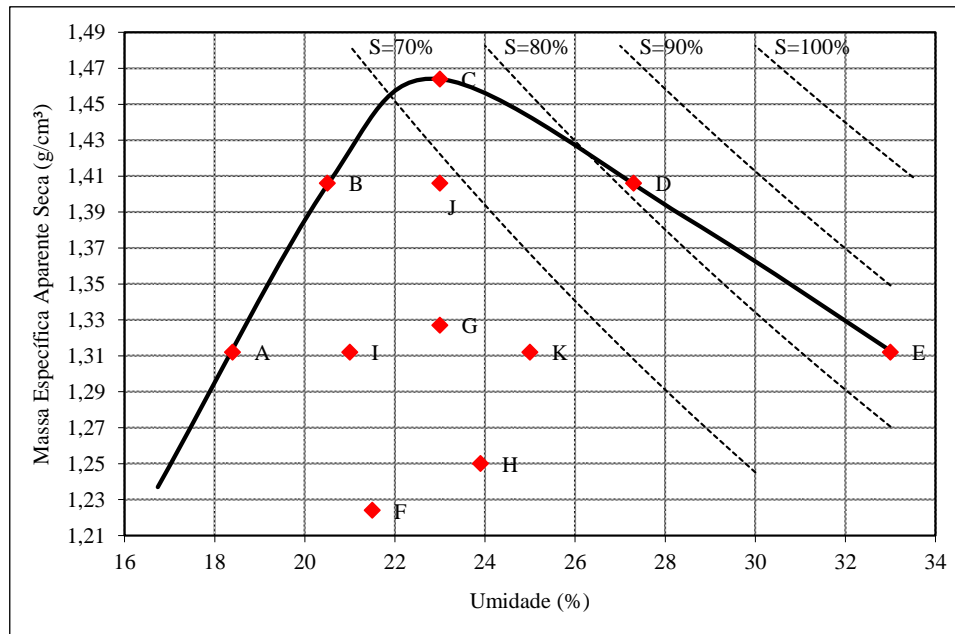


Figura 3.6 – Pontos de Trabalho.

Os pontos A, B, C, D, E (situados na curva de compactação), e I, J e K foram tomados como pontos de trabalho primários. Utilizando seus valores de índice de vazios e de umidade foram preparados os corpos-de-prova para a determinação das curvas de retenção, do MIP e do SEM.

Para os pontos fora da curva, F, G e H, foram realizados ensaios de adensamento convencional, em estado natural, visando obter as curvas de compressibilidade e determinar os pontos de trabalho secundários, apresentados na Figura 3.7. Para estes pontos (secundários) também foram determinadas as curvas de retenção e realizados ensaios de MIP e SEM.

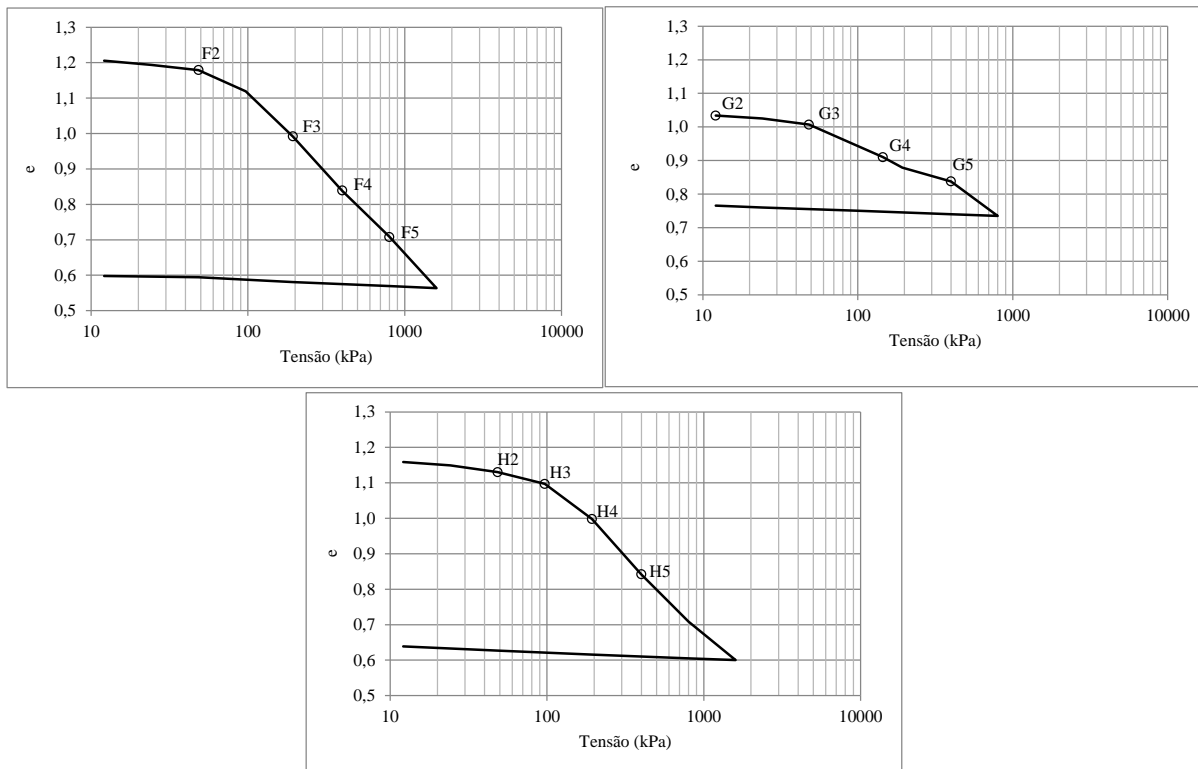


Figura 3.7 – Pontos de Trabalho Secundário.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo com os valores de umidade e índice de vazios de todos os pontos de trabalho utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3.1 – Pontos de Trabalho.

Ponto de Trabalho	w (%)	e
A	18,4	1,077
B	20,5	0,938
C	23,0	0,861
D	27,3	0,938
E	33,0	1,077
F	21,5	1,230
F2	21,5	1,179
F3	21,5	0,992
F4	21,5	0,839
F5	21,5	0,708
G	23,0	1,050
G2	23,0	1,034
G3	23,0	1,007
G4	23,0	0,910
G5	23,0	0,838
H	23,9	1,180
H2	23,9	1,130
H3	23,9	1,097
H4	23,9	0,998
H5	23,9	0,842
I	21,0	1,077
J	23,0	0,938
K	25,0	1,077

3.2.5 Preparação dos Corpos de Prova

Para a realização dos ensaios de placa de sucção, papel filtro, WP4, adensamento, MIP e SEM foram moldados corpos de prova seguindo procedimentos restritos para que as condições desejadas (e e w) fossem alcançadas. O processo de preparação está ilustrado na Figura 3.8.

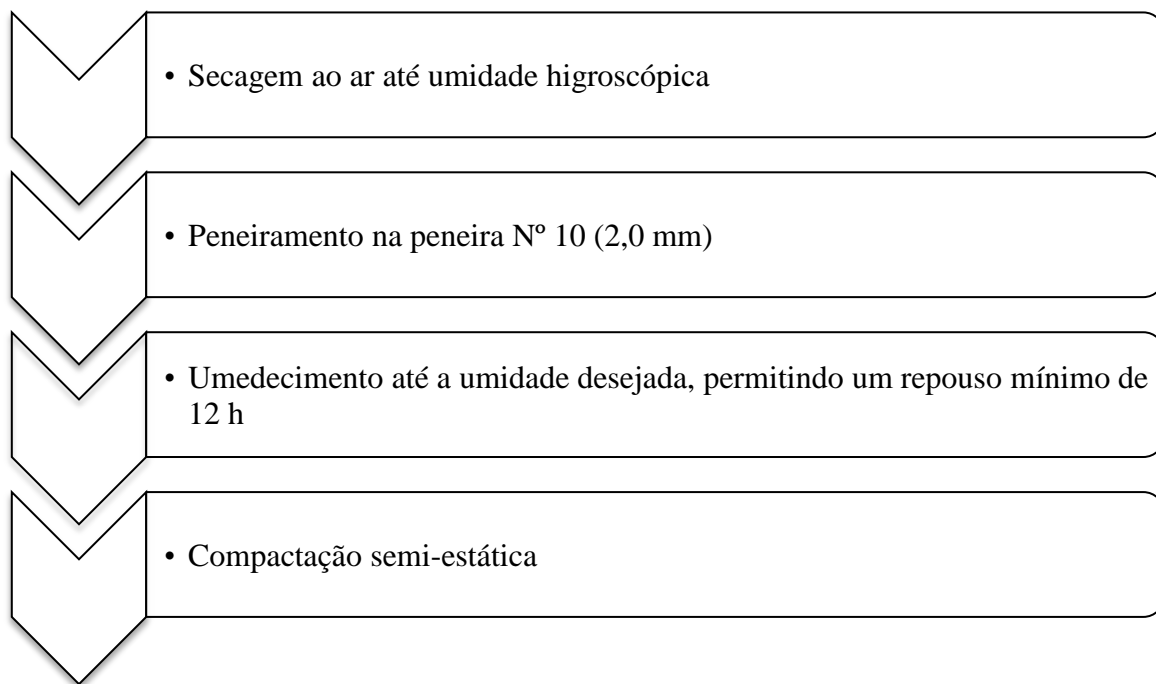


Figura 3.8 – Processo de Preparação dos Corpos-de-Prova.

O peneiramento na peneira N° 10 (2,0 mm) foi determinado de acordo com a metodologia utilizada por Silva (2009).

A escolha do método de compactação foi realizada baseando-se no estudo de Camapum de Carvalho *et al.* (1987), que considera que esse método proporciona uma maior repetição das propriedades dos solos e ainda se ajusta ao comportamento dos solos compactados em campo. A compactação foi realizada em um cilindro pequeno (1000 cm³), utilizando uma prensa do ensaio de CBR e Marshall, dividindo o material em três camadas, controlando a massa e o volume para garantir o índice de vazios (grau de saturação) desejado. Vale ressaltar que a compactação ocorreu em um único sentido, e a velocidade e a tensão aplicada não foram controladas, variando de ponto para ponto.

Após a compactação os corpos de prova para a execução dos ensaios foram moldados (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Prensa de Compactação. Detalhe do Corpo de Prova.

3.2.6 Ensaio de Placa de Sucção

Para valores de sucção até 16 kPa, a curva de retenção foi determinada utilizando uma placa de sucção desenvolvida por Otalvaro (2013), apresentada na Figura 3.10.

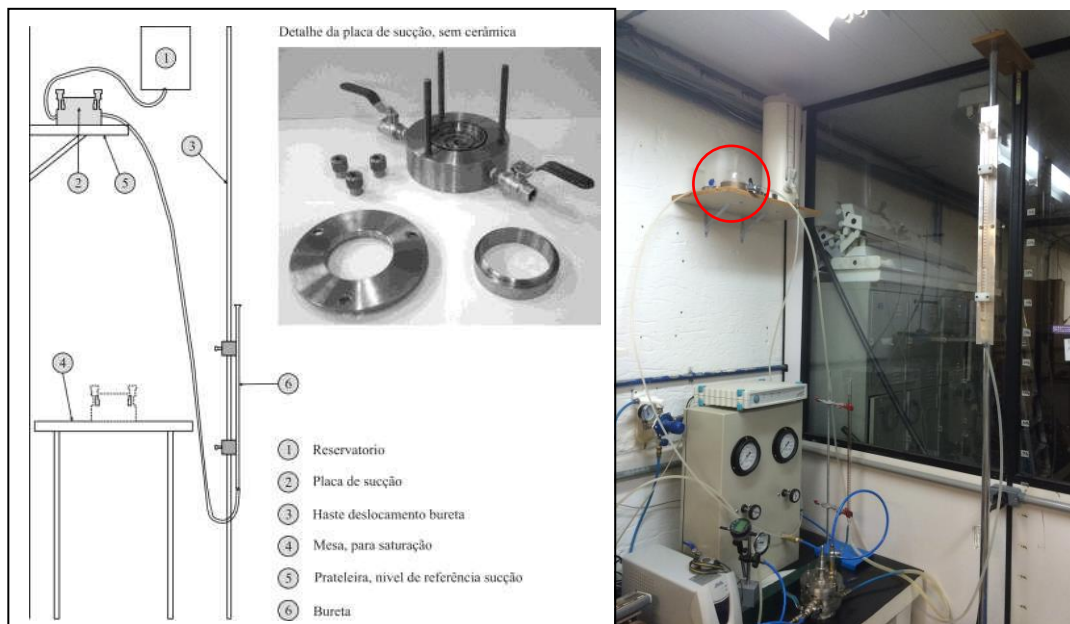


Figura 3.10 – Placa de sucção (modificado de Otalvaro, 2013).

O princípio de funcionamento dessa técnica consiste em aplicar diretamente uma carga hidráulica negativa na parte inferior da amostra, mantendo a parte superior sob condições atmosféricas.

O procedimento de ensaio seguiu as recomendações propostas por Otalvaro (2013), em trajetória de secagem, para os vinte e três (23) pontos de trabalho. A amostra previamente saturada foi colocada na célula do equipamento e a altura relativa da bureta com relação à placa foi ajustada, gerando a sucção desejada. A mudança de volume na bureta foi observada até que o equilíbrio do sistema fosse verificado, e assim, a sucção corrigida. Uma observação importante é que a bureta era vedada em sua parte superior para evitar evaporação.

3.2.7 Ensaio de Papel Filtro

Existem diversos métodos de obtenção da curva de retenção dos solos. Nesta pesquisa foram utilizadas, em conjunto, as técnicas de papel filtro (com medida de sucção matricial) e a placa de sucção. A combinação de métodos é necessária quando deseja-se abranger toda a faixa de variação de sucção dos solos do Distrito Federal, visto que estes apresentam curvas bimodais, com valores de sucção de 1 kPa até 30.000 kPa (Guimarães, 2002; Silva, 2007; Otalvaro, 2013). Uma das principais limitações dessa técnica é a considerável variabilidade que ela apresenta, visto os procedimentos de ensaio serem altamente influenciáveis pelo executor e também pelo ambiente.

Os ensaios de papel filtro foram realizados de acordo com a metodologia proposta por Marinho (1995). Eles seguiram trajetórias de umedecimento, e utilizaram o papel filtro Quanty, com as seguintes especificações: papel filtro quantitativo JP42, faixa azul, gramatura de 80 g/m², permeabilidade ao ar de 3 l/s.m² e 18,5 cm de diâmetro.

Foram determinadas vinte e duas (22) curvas de retenção: cinco (5) curvas referentes aos pontos situados na curva de compactação (pontos A, B, C, D e E da Figura 3.6), três (3) dos pontos I-J-K e quatorze (14) relativas aos pontos obtidos nos ensaios de adensamento (Pontos F, G e H da Figura 3.7). Para as primeiras cinco curvas foram moldados 16 cp's, com aproximadamente 5 cm de diâmetro e 1 cm de altura, para a determinação de cada curva de retenção. Nas demais, a curva foi obtida com nove cp's, devido à reduzida quantidade de solo disponível. Vale ressaltar que o ponto H5 teve a sua curva de retenção determinada utilizando a placa de sucção e o WP4 por motivos operacionais.

A medida de sucção matricial foi executada colocando sobre as amostras, nas umidades desejadas, três papéis filtro cortados em círculos com o mesmo diâmetro dos CP's. Na sequência, o conjunto foi envolvido em duas camadas de filme plástico e uma camada de papel alumínio, devidamente isolados com fita adesiva. As amostras foram então acondicionadas em caixa de isopor lacrada para atingir o equilíbrio de sucção. O tempo de permanência das amostras em caixa de isopor foi de 15 a 17 dias. Após o tempo destinado a estabilização da sucção nas amostras a caixa de isopor foi aberta e os papéis filtro do meio retirados, com o auxílio de uma pinça, e imediatamente pesados. Em seguida foi pesado o papel filtro superior. Eles foram então encaminhados à estufa para a determinação de sua massa seca e, conseqüentemente, de sua umidade. Após a pesagem dos papéis filtro de cada CP, os mesmos foram submetidos ao ensaio da balança hidrostática, para determinação do peso específico aparente do solo, e posteriormente, da umidade (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Ensaio de Papel Filtro.

Para o cálculo da sucção foram utilizadas as equações propostas por Borges *et al.* (2010), apresentadas no Capítulo 2, referente a Revisão Bibliográfica.

3.2.8 WP4

WP4 é um tipo de psicrômetro que mede a sucção total atuante utilizando dados de umidade relativa. Nesta pesquisa foi utilizado o equipamento WP4C *Dewpoint PotentiaMeter*, apresentado na Figura 3.12.



Figura 3.12 – Equipamento WP4C *Dewpoint Potentiometer*.

Foi determinada uma única curva de retenção (H5) por meio do WP4, visto que este equipamento não estava disponível na UnB, sendo adquirido somente na fase final de realização dos ensaios.

O corpo de prova foi preparado conforme descrito anteriormente e moldado para encobrir o fundo do molde metálico e não ultrapassar a metade de sua altura, como pode ser visto na Figura 3.12. Um único cp foi utilizado para a determinação da curva de retenção, seguindo trajetória de secagem.

3.2.9 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (MIP)

Para a caracterização microestrutural foram realizados ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), utilizando o equipamento AutoPore IV 9500 Micromeritics (Figura 3.13), disponível na Universidade de los Andes (Bogotá, Colômbia).

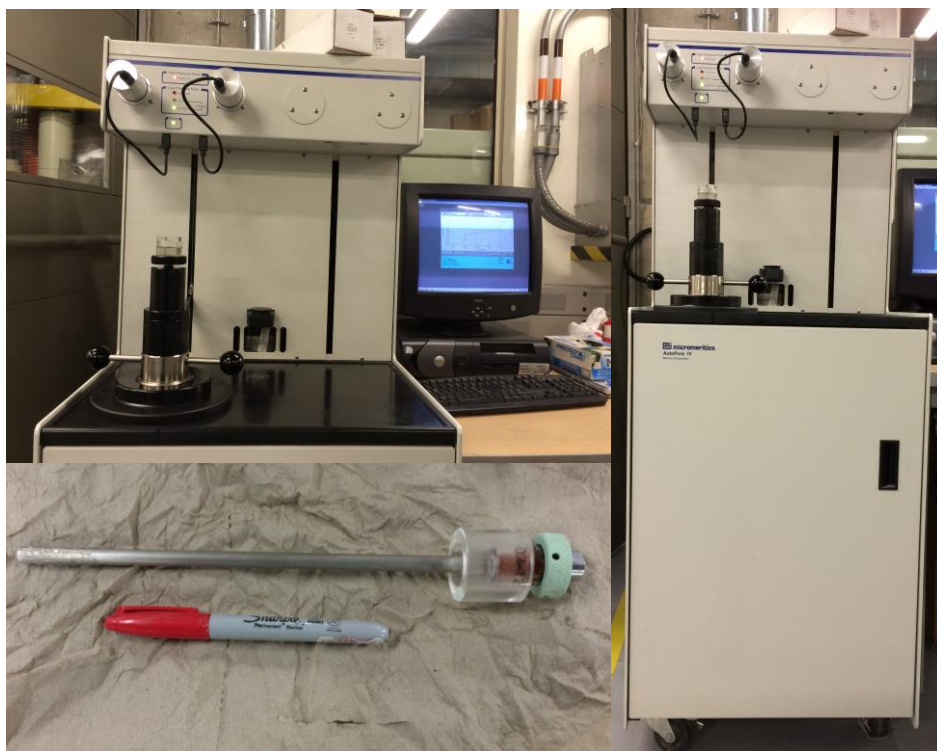


Figura 3.13 – Porosímetro Micromeritics AutoPore IV.

A porosimetria por intrusão de mercúrio é baseada na teoria do fluido não molhante, onde o mercúrio não flui espontaneamente através dos poros, necessitando de pressão para tal.

Foram realizados ensaios de MIP para os vinte e três (23) pontos de trabalho. As amostras utilizadas possuíam formato cúbico, com aproximadamente 1 cm^3 de volume, desidratadas pelo processo de liofilização. Esse processo consiste em congelar a água presente no solo utilizando nitrogênio líquido e, em seguida, removê-la levando o material a uma estufa à vácuo (Figura 3.14), onde a água em estado sólido passará diretamente para o estado gasoso. De acordo com Penumadu e Dean (2000) durante a passagem do estado líquido para o sólido não ocorrem expansões lineares da fase a ser formada, preservando o máximo possível a estrutura original.



Figura 3.14 – Estufa a vácuo.

A execução desse ensaio é relativamente simples. A amostra, previamente preparada, é colocada no penetrômetro (Figura 3.13), que é então preenchido com mercúrio. A este líquido não molhante é aplicada uma pressão, fazendo com que ele penetre nos poros do solo. Com o volume de mercúrio injetado e a pressão necessária para tal, a curva de distribuição do tamanho dos poros é obtida.

A realização do ensaio de MIP visa obter informações sobre o tamanho e distribuição dos poros do solo e validar a metodologia de previsão de distribuição de poros utilizando a curva de retenção proposta por Mascarenha (2008).

3.2.10 Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM)

Para uma análise qualitativa da microestrutura do solo a técnica de microscopia eletrônica de varredura (SEM) foi utilizada. Essas análises foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução, da Universidade Federal de Goiás (LabMic/UFG). O microscópio usado foi um Jeol, JSM – 6610, equipado com EDS, *Thermo scientific NSS Spectral Imaging* (Figura 3.15).

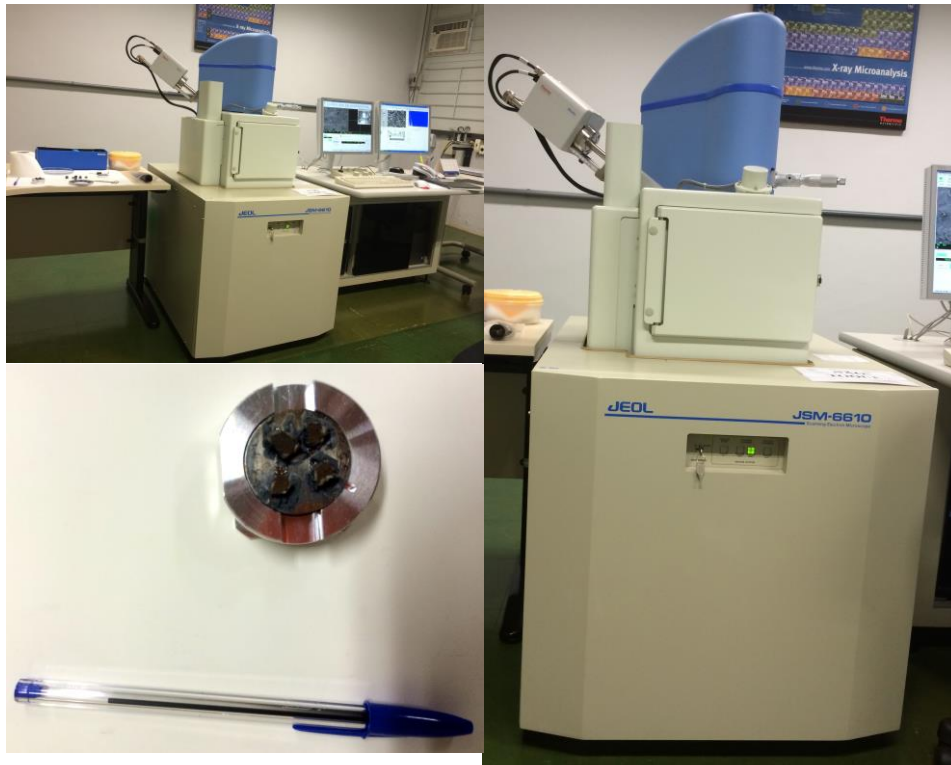


Figura 3.15 – Microscópio eletrônico de varredura Jeol (JSM – 6610).

O microscópio eletrônico de varredura é um tipo de microscópio eletrônico capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. As imagens criadas por esse equipamento possuem uma aparência tridimensional característica, úteis para a avaliação da estrutura superficial de uma dada amostra.

Foram analisados os mesmos pontos de trabalho estudados pelo MIP, com as amostras preparadas de maneira análoga. No entanto, um cuidado especial foi tomado para que a superfície a ser estudada não fosse modelada por estilete, e sim por uma quebra manual da amostra, para que esta não ficasse plana.

Como o solo é um espécime sólido não condutivo, as amostras foram cobertas com uma camada ultrafina de material eletricamente condutivo (ouro). Esse procedimento, chamado de metalização, é feito para prevenir a acumulação de campos elétricos estáticos no espécime devido a irradiação elétrica durante a produção da imagem. O sistema usado para a deposição de filmes de ouro foi o *Denton Vacuum (Desk V)*, apresentado na Figura 3.16.

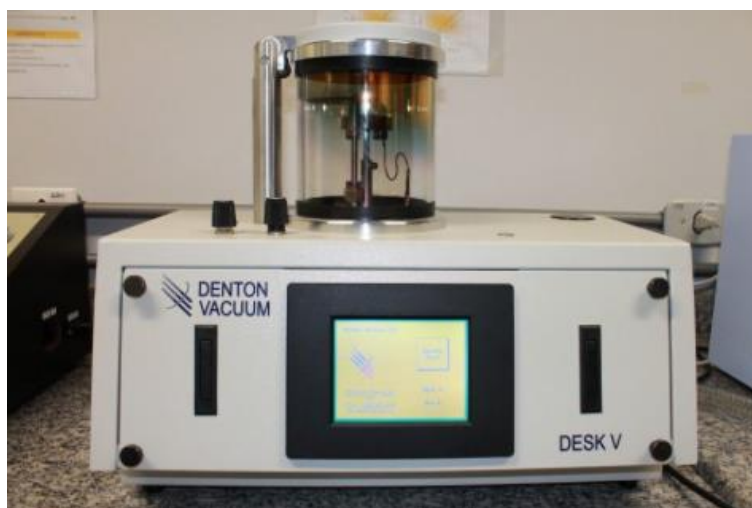


Figura 3.16 – Equipamento para metalização *Denton Vacuum (Desk V)*.

3.3 RESUMO

Neste capítulo foram apresentadas as principais características do solo utilizado na pesquisa, que é proveniente do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (PPG-UnB). Foram também apresentadas as metodologias empregadas na execução do programa experimental, que compreendeu ensaios de: caracterização geotécnica; compactação e adensamento, para a caracterização mecânica; ensaios de papel filtro, placa de sucção e WP4 para a determinação das curvas de retenção; porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e microscopia eletrônica de varredura (SEM) para a caracterização microestrutural. A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos ensaios realizados em cada ponto. Vale ressaltar que este programa experimental tinha como objetivo avaliar o comportamento hidro-mecânico-estrutural de um solo tropical compactado em diferentes condições de umidade, energia aplicada e índice de vazios.

Tabela 3.2 Relação de Ensaios Realizados.

Pontos de Trabalho	Ensaios Realizados
A-B-C-D-E	Papel Filtro, Placa de sucção, MIP e SEM
F-G-H	Adensamento, Papel Filtro, Placa de sucção, MIP e SEM
F2-F3-F4-F5	Papel Filtro, Placa de sucção, MIP e SEM
G2-G3-G4-G5	Papel Filtro, Placa de sucção, MIP e SEM
H2-H3-H4-H5	Papel Filtro, Placa de sucção, MIP e SEM
I-J-K	Papel Filtro, Placa de sucção, MIP e SEM

4 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica, compactação, adensamento, curvas de retenção, MIP e SEM, realizados para a avaliação do comportamento do solo mediante alterações em seu índice de vazios, teor de umidade e energia aplicada.

4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica realizados nessa pesquisa.

Tabela 4.1 – Caracterização Geotécnica.

Parâmetro	LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ_s (kN/m ³)	SUCS
	42	25	17	27,25	CL-ML

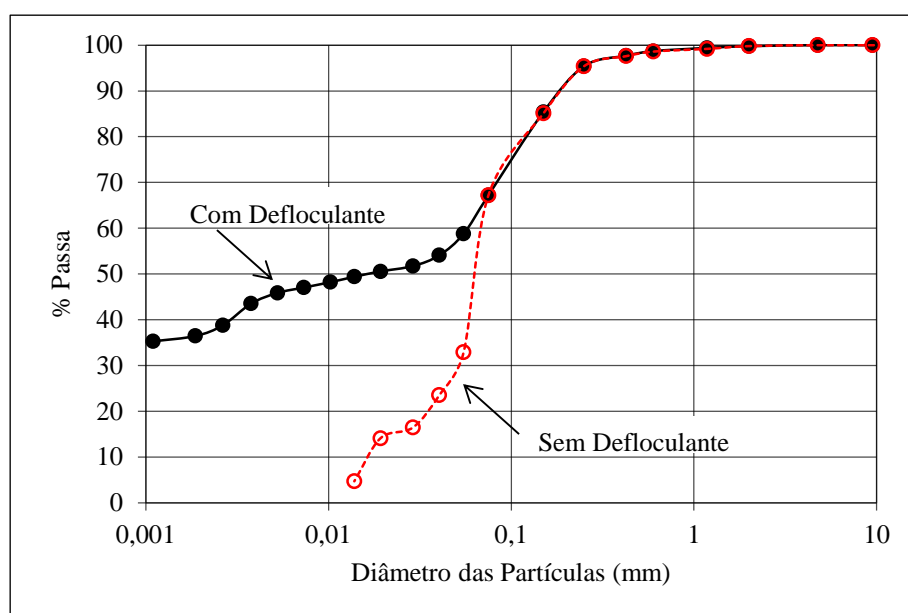


Figura 4.1 – Curva Granulométrica com e sem Defloculante.

O peso específico dos grãos do solo foi de 27,25 kN/m³, semelhante ao encontrado por Silva (2009). Com relação aos limites de consistência, os valores de LL e IP determinados são similares aos obtidos por Silva (2007), na faixa de 42% e 17%, respectivamente.

A granulometria apresenta grandes diferenças quando feitas com e sem defloculante, análogo aos resultados obtidos por Guimarães (2002). Segundo esse autor, o ensaio realizado sem o defloculante reflete melhor a situação em campo, onde a parcela de argila presente no solo

forma microagregados, gerando uma estrutura bimodal, com a presença de macro e microporos.

A Figura 4.2 apresenta a curva obtida no ensaio de compactação Proctor Normal. Os valores de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima foram de 14,64 kN/m³ e 23%, respectivamente, e são semelhantes aos determinados por Silva (2009). Este ponto possui grau de saturação de aproximadamente 75%, e os pontos no ramo úmido entre 80 e 90%.

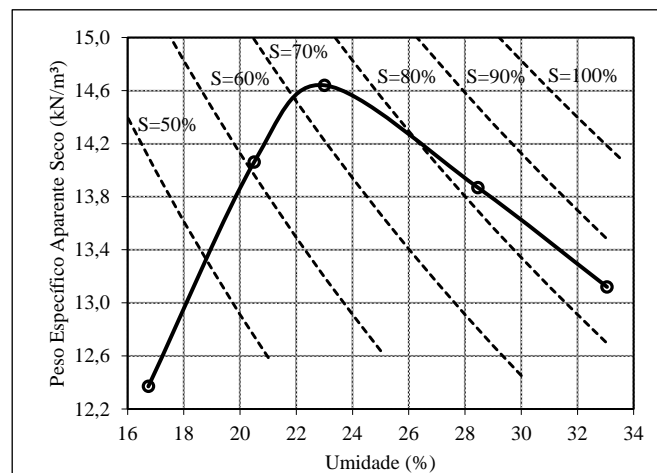


Figura 4.2 – Curva de Compactação.

4.2 DISCUSSÃO SOBRE A VARIABILIDADE DO ÍNDICE DE VAZIOS

Como o parâmetro índice de vazios estará presente em todas as análises desse trabalho, uma breve discussão sobre ele será realizada a seguir. Do ponto de vista de análise microestrutural, os valores de índice de vazios apresentados na Tabela 4.2 são coerentes, com os valores teóricos ligeiramente superiores aos encontrados no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP). Isto acontece devido ao mercúrio, dependendo do arranjo dos poros, não conseguir penetrar em todos. A Figura 4.3 ilustra melhor a relação índice de vazios do MIP *versus* índice de vazios teórico.

Tabela 4.2 – Índice de Vazios do MIP e Teórico.

Ponto	e_{mip}	$e_{teórico}$	Erro (%)
A	0,850	1,077	21,0
B	0,877	0,938	6,5
C	0,785	0,861	8,8
D	0,930	0,938	0,9
E	1,079	1,077	0,2
F	1,069	1,230	13,1
F2	1,068	1,179	9,5
F3	0,876	0,992	11,7
F4	0,788	0,839	6,1
F5	0,666	0,708	5,9
G	0,998	1,050	4,9
G2	0,886	1,034	14,4
G3	0,938	1,007	6,9
G4	0,782	0,910	14,1
G5	0,790	0,838	5,7
H	1,104	1,180	6,4
H2	1,043	1,130	7,7
H3	1,034	1,097	5,8
H4	0,974	0,998	2,4
H5	0,833	0,842	1,1
I	1,018	1,077	5,4
J	0,850	0,938	9,4
K	0,982	1,077	8,8

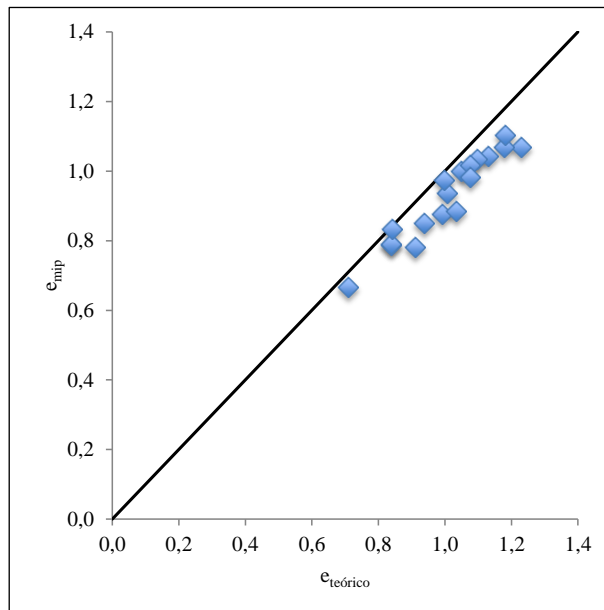


Figura 4.3 – Índice de Vazios do MIP *versus* Índice de Vazios Teórico.

Existia uma preocupação com as amostras mais úmidas, por acreditar que o processo de preparação (compactação estática) não permitisse que houvesse um adensamento completo destas. Porém, analisando os resultados apresentados na Tabela 4.2 e na Figura 4.3 não se verifica diferenças consideráveis, podendo classificar o processo de preparação de amostras empregado como satisfatório.

Outra preocupação era com a variabilidade dentro do corpo-de-prova, por esse ser compactado em três camadas, que provavelmente não apresentam índice de vazios idêntico. Além disso, para o ensaio de papel filtro são necessários mais de um corpo-de-prova. Assim, a Tabela 4.3 apresenta as relações estatísticas (média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação) dos índices de vazios das amostras utilizadas no ensaio de papel filtro. Analisando os resultados obtidos verifica-se que os coeficientes de variação (CV) encontram-se entre 2 e 10. De acordo com Lacasse e Nadim (1996), o CV para o índice de vazios geralmente apresenta-se entre 7 e 30. Segundo Harr (1996), sob o ponto de vista da engenharia e como regra geral, os coeficientes de variação abaixo de 10% são considerados baixo, entre 15 e 30% moderados e superiores a 30% elevados. Sendo assim pode-se dizer que os índices de vazios estudados variaram dentro de uma faixa aceitável.

Tabela 4.3 – Índice de Vazios: Relações Estatísticas.

PONTOS	e _{Papel Filtro}			
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	VARIÂNCIA	COEF. VARIAÇÃO (%)
A	1,07	0,07	0,005	6,51
B	0,93	0,05	0,002	5,21
C	0,84	0,06	0,004	7,53
D	0,88	0,07	0,004	7,38
E	0,96	0,05	0,003	5,43
F	1,25	0,04	0,002	3,46
F2	1,14	0,08	0,006	6,93
F3	0,96	0,03	0,001	3,07
F4	0,78	0,03	0,001	4,28
F5	0,69	0,04	0,002	5,92
G	1,04	0,03	0,001	3,32
G2	0,96	0,06	0,003	5,96
G3	0,94	0,06	0,004	6,55
G4	0,83	0,04	0,001	4,60
G5	0,77	0,02	0,000	2,29
H	1,15	0,04	0,002	3,38
H2	1,06	0,04	0,002	4,01
H3	1,05	0,04	0,001	3,35
H4	1,08	0,10	0,010	9,26
I	0,99	0,07	0,005	6,93
J	0,88	0,03	0,001	3,73
K	0,99	0,10	0,010	9,85

Outra questão a ser considerada é a variabilidade da estrutura ao longo do corpo-de-prova. No entanto, ela não será analisada neste trabalho por falta de tempo hábil. Assim, a premissa desta tese é que o corpo-de-prova é homogêneo do ponto de vista de estrutura, e as análises aqui realizadas serão válidas se esta for verdadeira.

4.3 CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA-MECÂNICA E MICROESTRUTURAL

É de conhecimento do meio geotécnico que o teor de umidade e a energia aplicada são fatores que influenciam o processo de compactação do solo. Além disso, solos compactados são frequentemente submetidos a carregamentos. Visando entender como esses aspectos afetam o comportamento hidromecânico e a estrutura dos solos, os resultados das curvas de retenção, MIP, SEM e adensamento serão apresentados a seguir, divididos em três grupos: umidade, carregamento e energia aplicada; conforme ilustrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros Analisados dos Grupos de Trabalho.

Grupos	Parâmetro Constante	Parâmetro Variável
ABCDE	Energia	Umidade e Índice de vazios
Grupos F-G-H	Umidade	Índice de vazios
AIKE / BJD	Índice de vazios	Umidade e Energia
BIF / CJG	Umidade	Índice de vazios e Energia

4.3.1 INFLUÊNCIA DA UMIDADE NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E NA ESTRUTURA

A seguir serão apresentados os resultados de curva de retenção, porosimetria por intrusão de mercúrio e microscopia eletrônica de varredura, dos pontos que possuem a mesma energia de compactação e diferentes umidades (Figura 4.4). Pretende-se assim avaliar a influência da umidade na estrutura induzida pela compactação e, conseqüentemente, em seu comportamento hidráulico.

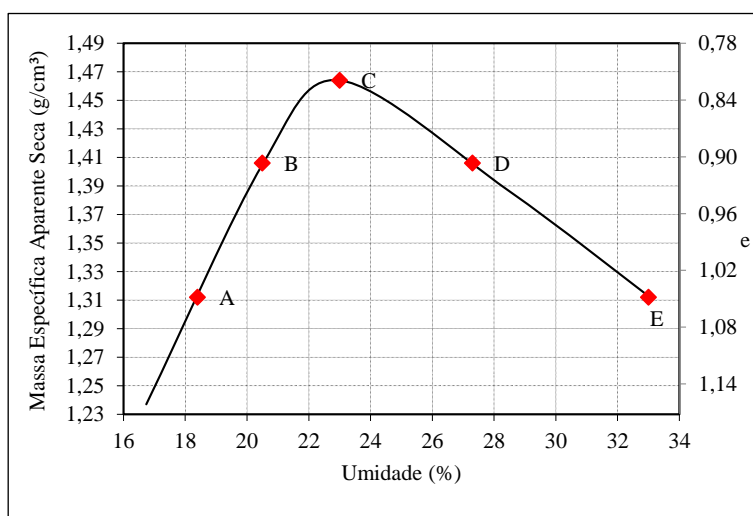


Figura 4.4 – Pontos de Trabalho.

A Figura 4.5 apresenta as curvas de retenção em função da umidade e do grau de saturação. Analisando a relação entre a sucção e a umidade pode-se notar que estas exibem comportamento típico de solos com estrutura bimodal, evidenciado pelas curvas em forma de S. O patamar entre a micro e a macroestrutura é coincidente em todas as curvas, indicando uma uniformidade nos microporos. O valor de entrada de ar (AEV) nos macroporos não apresenta uma tendência com a variação da umidade, mas sim com o índice de vazios, aumentando até chegar ao ponto ótimo e voltando a diminuir, mas não na mesma proporção. Essas observações podem ser melhor visualizadas na Tabela 4.5. A consequência notada pelo aumento no teor de umidade foi uma suavização na forma em S da curva. Para altos valores de sucção as curvas convergem, com exceção do ponto B, provavelmente devido a erros durante a realização do ensaio de papel filtro dessa amostra. Nas análises subsequentes esse ponto continuará destoando dos demais.

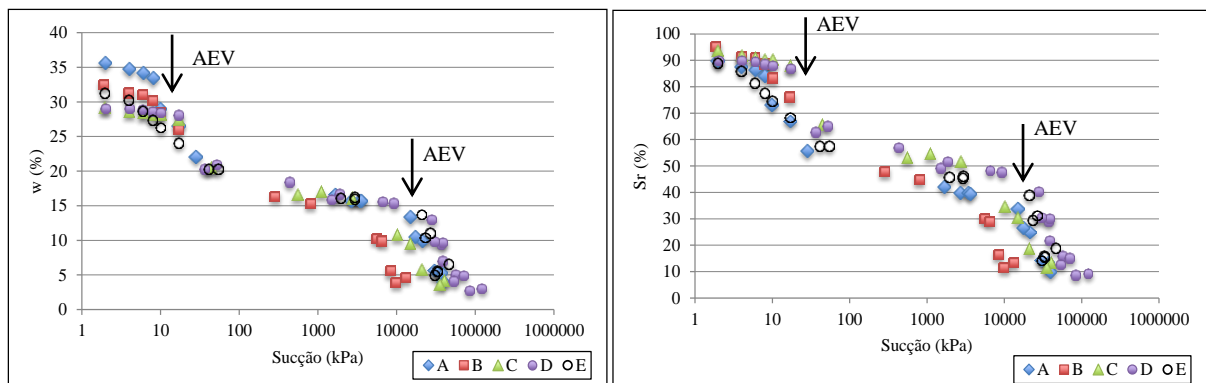


Figura 4.5 – Curvas de Retenção em Função da Umidade (w) e do Grau de Saturação (S_r).

Também é possível observar na Figura 4.5 um vazio entre o intervalo de 50 kPa e 400 kPa, aproximadamente. Isso acontece devido à existência do patamar acentuado, e é uma característica dos solos da cidade de Brasília. A técnica do papel filtro não consegue obter pontos precisos para fechar esse espaço, não sendo o método mais indicado de determinação da curva de retenção para esse tipo de solo. No entanto, não existia outro método disponível para a realização deste estudo, e o papel filtro foi utilizado apesar de suas limitações.

Com relação às curvas de retenção em função do grau de saturação, vale ressaltar que estas não alcançaram a condição saturada e foram calculadas considerando o índice de vazios médio de cada amostra, apresentado na Tabela 4.3. Esta relação permite avaliar a influência do e (índice de vazios) no comportamento hidráulico, e nesse caso nota-se que as alterações geradas pelo processo de compactação não levaram a alterações significativas nas curvas de

retenção, ou seja, as variações de índice de vazios e umidade não foram suficientes para gerar mudanças de comportamento nessas curvas.

Comparando esses resultados com outros obtidos para o solo de Brasília, é possível compreender outros fenômenos relacionados à estrutura desse solo. Por exemplo, Borges (2014) utilizando o mesmo tipo de solo deste estudo, porém modificando as estruturas (solo natural, compactado e lama), obteve resultados de curvas de retenção convergindo na região da microestrutura. Estes resultados são mostrados no capítulo 3. Otlvaro (2013), utilizando solo semelhante compactado em diferentes pontos, também apresentou resultados de curvas de retenção com a microestrutura constante. Nos resultados observados por Silva (2009) variações produzidas por carregamento alteraram significativamente a relação S_r versus sucção, transladando a curva, como pode ser visto na Figura 4.6. Neste trabalho as mudanças que ocorreram ao longo da curva podem ser consideradas suaves, ou mesmo estatísticas.

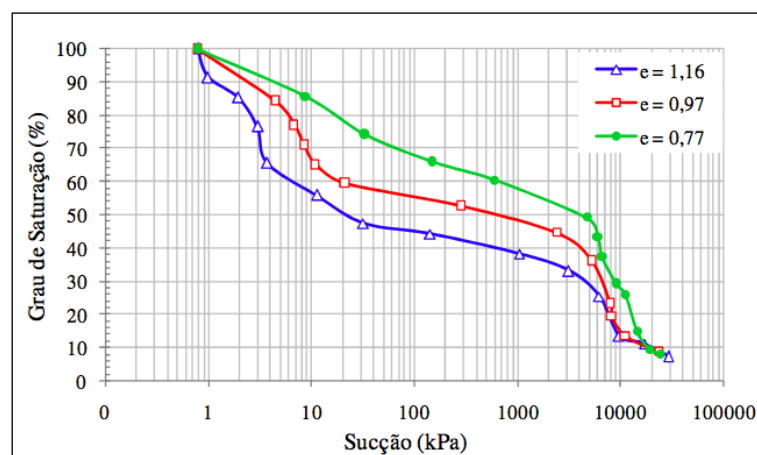


Figura 4.6 – Curva de Retenção em Função do Grau de Saturação (Silva, 2009).

Para melhor entender esse comportamento, as curvas obtidas experimentalmente foram ajustadas utilizando o modelo proposto por Durner (1994), apresentado no Capítulo 2. Analisando a Figura 4.7, que apresenta esses ajustes, verifica-se que o modelo conseguiu representar satisfatoriamente os dados experimentais. Na região relacionada à microestrutura, não foi observado influência da umidade de compactação na curva de retenção. Essa análise considerou as limitações do ensaio de papel filtro, com todas as variáveis envolvidas no processo, concluindo que a diferença apresentada pode ser qualificada como uma variabilidade natural. A preservação da micro independente da umidade já era esperada, visto que nessa região a água presente encontra-se adsorvida e assim, não há variação.

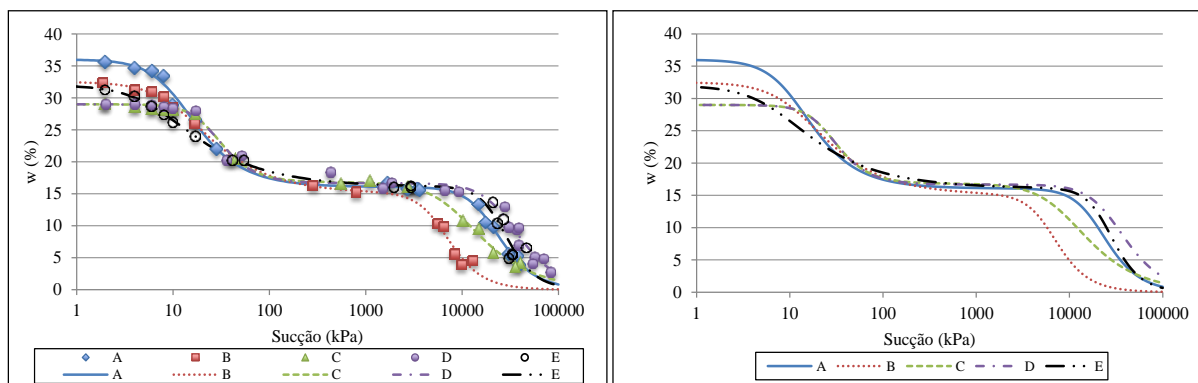


Figura 4.7 – Ajustes das Curvas de Retenção em Função da Umidade.

Para baixos valores de sucção, na região da macroestrutura, percebem-se pequenas alterações, que apresentam uma tendência de variação de acordo com o índice de vazios, e não com a umidade. A umidade de saturação e o valor de entrada de ar (AEV) são diretamente proporcionais ao índice de vazios (Tabela 4.5).

Essa ideia é corroborada pelos parâmetros de ajuste utilizados, apresentados na Tabela 4.5. Estes permanecem praticamente constantes para toda a microestrutura, com mudanças na macro. Vale ressaltar que os parâmetros da macroestrutura dos pontos C e D estão muito próximos, refletindo o que pode ser visto no gráfico da Figura 4.7. Os valores do coeficiente de determinação, mais conhecido como R^2 , confirmam a adequação do modelo utilizado ao tipo de solo estudado.

Tabela 4.5 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção.

PONTOS	PARÂMETROS						
	w_M	α_M	n_M	w_m	α_m	n_m	R^2
A	19,935	0,089	2,220	16,065	5,1E-05	2,815	0,996
B	17,445	0,080	1,873	15,055	1,7E-04	2,967	0,996
C	12,187	0,039	2,927	16,813	1,1E-04	2,026	0,998
D	12,330	0,039	2,901	16,670	3,4E-05	2,545	0,988
E	15,930	0,139	1,711	16,070	4,0E-05	3,318	0,981

w_M : umidade da macroestrutura α_M : valor relacionado ao AEV da macro n_M : inclinação da reta da macro

w_m : umidade da microestrutura α_m : valor relacionado ao AEV da micro n_m : inclinação da reta da micro

A curva de retenção de um solo traz informações sobre a sua estrutura. Porém, durante a realização do ensaio para a sua determinação pode acontecer retração do índice de vazios do material, afetando a curva. Esse fenômeno dificulta a utilização da curva de retenção como

uma ferramenta de análise da microestrutura. Assim, é possível que não esteja sendo identificadas diferenças significativas na estrutura do solo ao longo da curva de compactação devido a essa retração.

A vantagem do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) para o conhecimento da estrutura do solo é que este a conserva, ao contrário do ensaio de papel filtro. No entanto, este mesmo ponto também pode ser considerado uma desvantagem, visto que no campo isso não acontece.

A influência da umidade de compactação pode ser melhor observada nas curvas acumuladas de intrusão de mercúrio apresentadas na Figura 4.8. Os pontos situados no ramo seco apresentam formato em *S*, característico da bimodalidade, enquanto os pontos do ramo úmido apresentam uma curva mais suave, porém ainda conservando o caráter bimodal. Esse fato pode ser comprovado pelas imagens de microscopia (Figura 4.9). A imagem do ponto C assemelha-se mais aos pontos do ramo seco que aos do ramo úmido, o que também é observado nas curvas de retenção. Vale ressaltar que toda a diferença discutida até então é encontrada na macroestrutura, pois na micro elas convergem.

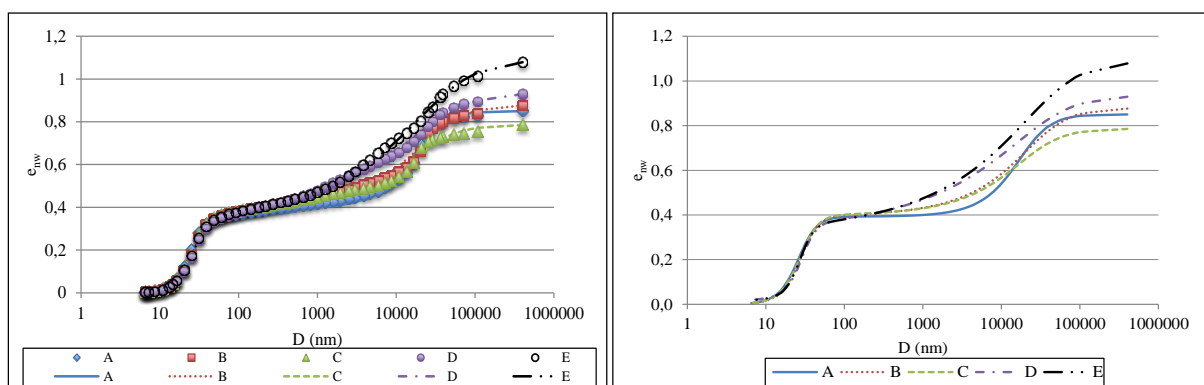


Figura 4.8 – Curva Acumulada de Tamanho dos Poros e seus Ajustes.

Evitando-se o processo de variação volumétrica devido à saída ou entrada de água, conserva-se a estrutura, e fica mais fácil observar a preservação da micro e mais nítido o processo de suavização da curva, que indica uma melhor distribuição dos poros com o aumento da umidade. Porém, isso não acontece na prática, e os resultados da Figura 4.8 exibem o que poderia ser chamado de estrutura estática do solo, devido à ausência de água.

Na Figura 4.9 é possível visualizar a mudança de arranjo quando se vai do ramo seco ao úmido. Comparando somente os pontos A e D isso fica ainda mais evidente. Enquanto no ponto A é possível identificar agregações, no ponto D percebe-se uma constituição mais

homogênea. Cabe lembrar que essas amostras possuem índice de vazios semelhante. O ponto C, embora possua teor de umidade intermediário entre os ramos seco e úmido, apresenta estrutura mais parecida com os pontos situados no ramo seco, como foi observado no MIP.

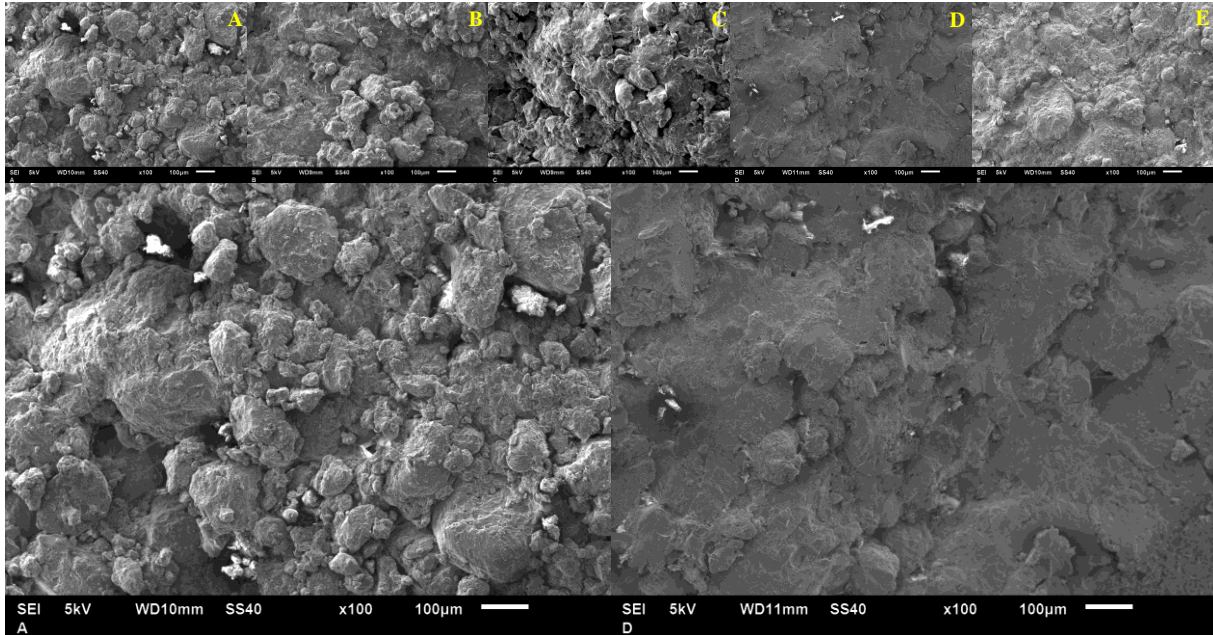


Figura 4.9 – Microscopias Eletrônicas de Varredura.

As curvas acumuladas de tamanho dos poros foram ajustadas utilizando a mesma equação para ajuste da curva de retenção, proposta por Durner (1994), realizadas as devidas alterações (Equação 4.1).

$$e_{nw} = e_m \left[\frac{1}{1+(\alpha_m \cdot D)^{n_m}} \right]^{(1-\frac{1}{n_m})} + e_M \left[\frac{1}{1+(\alpha_M \cdot D)^{n_M}} \right]^{(1-\frac{1}{n_M})} \quad (4.1)$$

Onde, e_{nw} é o índice de vazios intrudido por mercúrio; os subscritos m e M estão relacionados aos micro e macroporos, respectivamente; e é o índice de vazios; α está relacionado ao tamanho do poro dominante; e, n à uniformidade do tamanho dos poros.

Esse ajuste conseguiu representar bem os dados experimentais, com R^2 superior a 0,995, e seus parâmetros são mostrados na Tabela 4.6. A análise dos parâmetros da microestrutura confirma o que está evidenciado nos gráficos, ou seja, que ela permanece praticamente constante independente da umidade.

Tabela 4.6 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho de Poros.

PONTOS	PARÂMETROS						
	e_M	α_M	n_M	e_m	α_m	n_m	R^2
A	0,458	2,2E+04	2,343	0,393	28,484	3,911	0,995
B	0,484	3,4E+04	1,730	0,395	30,271	3,975	0,995
C	0,389	2,8E+04	1,752	0,398	29,641	3,915	0,995
D	0,608	3,9E+04	1,399	0,328	30,026	4,826	0,998
E	0,765	4,7E+04	1,422	0,324	28,469	5,093	0,999

Observando essa regularidade da microestrutura e baseado no trabalho de Borges (2014), foi realizado um segundo ajuste, mantendo os parâmetros dos microporos constantes e iguais à média dos valores do primeiro ajuste. Os resultados desse novo ajuste são apresentados na Tabela 4.7, juntamente com os novos valores de R^2 . Para todos os pontos o coeficiente de determinação foi superior a 0,99, indicando que o modelo manteve sua capacidade de ajustamento.

Tabela 4.7 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho de Poros com Microestrutura Constante.

PONTOS	PARÂMETROS						
	e_M	α_M	n_M	e_m	α_m	n_m	R^2
A	0,458	2,18E+04	2,342	0,393	29,641	3,975	0,995
B	0,487	3,42E+04	1,717	0,393	29,641	3,975	0,995
C	0,394	2,87E+04	1,704	0,393	29,641	3,975	0,995
D	0,540	3,12E+04	1,573	0,393	29,641	3,975	0,995
E	0,692	3,79E+04	1,583	0,393	29,641	3,975	0,997

De maneira análoga ao MIP, foi realizado um segundo ajuste dos parâmetros da curva de retenção, fazendo os parâmetros relacionados à microestrutura constantes e iguais à média do ajuste anterior (Tabela 4.5). Os valores de R^2 encontrados foram superiores a 0,94. No entanto, considerar a microestrutura constante durante o ensaio de papel filtro não é coerente, visto que o processo de retração acontece de maneira diferente para cada tipo de estrutura. No ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio essa simplificação é aceitável por se acreditar não haver retração, devido à desidratação prévia e relativamente instantânea.

O ensaio de MIP fornece também outra importante informação, que é a densidade de tamanho de poros (PSD). A PSD não é outro resultado, mas simplesmente a derivada da distribuição do tamanho dos poros (Equação 4.2). A Figura 4.10 apresenta a relação entre a PSD e o diâmetro dos poros. Verifica-se mais uma vez que a microestrutura permanece constante e que a umidade de compactação altera a distribuição de poros macroestruturais.

$$PSD = \frac{-de}{d(\log D)} \quad (4.2)$$

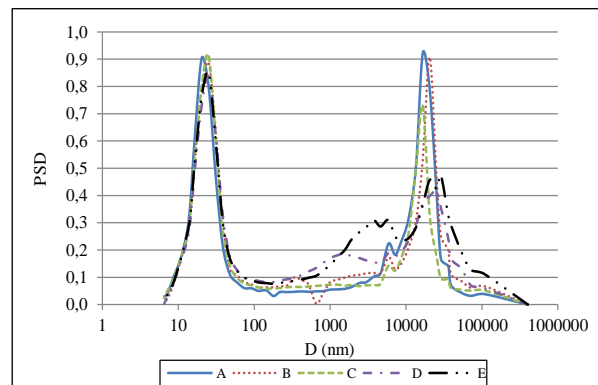


Figura 4.10 – Densidade de Tamanho dos poros (PSD).

Analisando detalhadamente observa-se que os pontos A e B apresentam estrutura bimodal, com quase ausência de alguns tamanhos de poros. Estruturalmente o ponto C está mais próximo dos pontos do ramo seco, A e B, e não intermediário entre o B e D, como era esperado. Esse fato indica uma descontinuidade no comportamento com relação à mudança de umidade. Os pontos situados no ramo úmido, D e E, apresentam estrutura consideravelmente diferente das demais. O solo compactado no ponto E comporta-se como uma argila, com os poros maiores apresentando uma estrutura bimodal. Conclui-se que percorrendo o ramo seco não se encontra notáveis diferenças na estrutura. Porém, percorrendo o ramo úmido, essas diferenças passam a se destacar, como se o solo nesse trecho fosse mais sensível.

Comparando os resultados da Figura 4.10 com os apresentados por Mitchell e Soga (2005), da Figura 4.11, fica mais clara a mudança de comportamento consequência da estrutura induzida pela umidade. Assim como o incremento de umidade aumenta a densidade do material até um valor limite, e a partir daí ele decresce, o mesmo acontece com a permeabilidade. Resumindo, para um mesmo índice de vazios a estrutura do solo e sua permeabilidade dependem do teor de umidade e não somente da porosidade, visto que a forma como os poros estão associados tem fundamental importância na determinação da permeabilidade. Assim, a umidade influencia a estrutura, que influencia a permeabilidade.

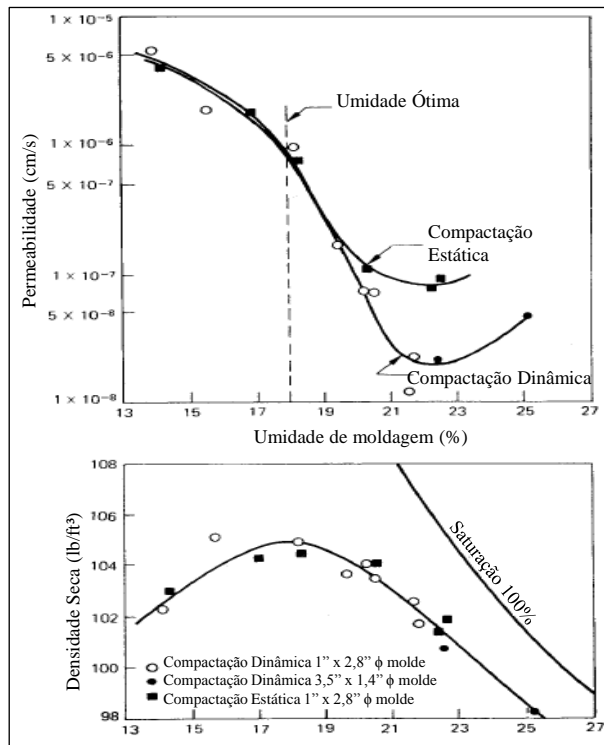


Figura 4.11 – Influência do Método de Compactação na Condutividade Hidráulica de uma Argila Siltosa (Mitchell e Soga, 2005).

4.3.2 INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E NA ESTRUTURA

Neste tópico será analisada a influência do carregamento na estrutura e, conseqüentemente, no comportamento hidráulico e mecânico dos pontos de trabalho F, G e H. A Figura 4.12 apresenta o caminho percorrido pelo índice de vazios no plano e (γ_d) versus teor de umidade, e a Tabela 4.8 a carga correspondente.

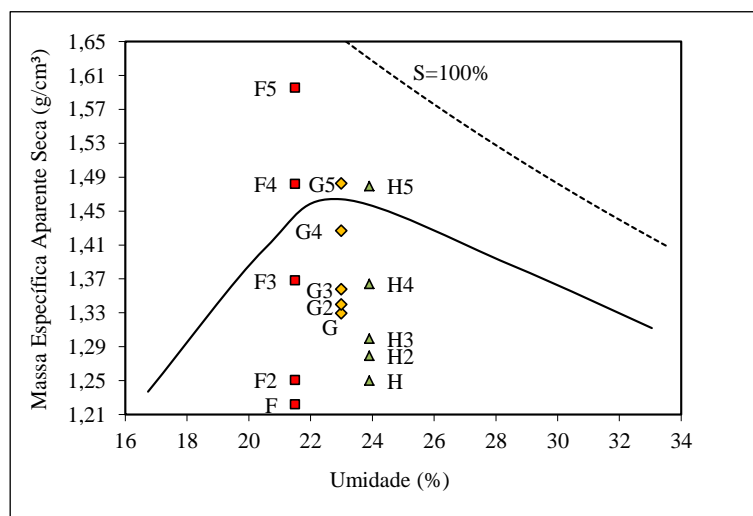


Figura 4.12 – Pontos de Trabalho.

Tabela 4.8 – Cargas dos Pontos de Trabalho.

Ponto	Carga (kPa)
F2	50
F3	200
F4	400
F5	800
G2	12
G3	50
G4	145
G5	400
H2	50
H3	100
H4	200
H5	400

As curvas de adensamento dos pontos em questão estão apresentadas na Figura 4.13. A partir dessas curvas foram determinados os demais pontos de trabalho, mostrados anteriormente na Figura 4.12. Analisando esses resultados verifica-se que as curvas apresentam coerentes entre si. Os pontos F e H, que possuem índice de vazios semelhantes, apresentam comportamento análogo. O ponto G, que dispõe do menor índice de vazios entre os três pontos, exhibe comportamento diferenciado dos demais, possivelmente devido à diferença na quantidade de poros. No entanto, a partir de aproximadamente 400 kPa, esta converge com as outras curvas. Outro fator que possui forte influência na compressibilidade do solo é a sucção.

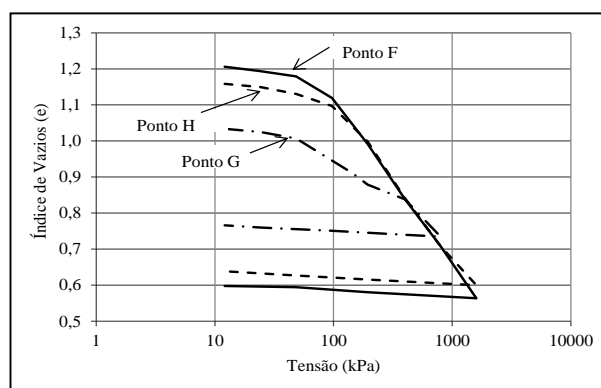


Figura 4.13 – Curvas de Adensamento.

A Figura 4.14 apresenta as curvas de retenção em função da umidade e do grau de saturação. Verifica-se que com a redução do índice de vazios a curva de retenção tenderia a se tornar

unimodal, devido a alterações na macroestrutura, pois novamente a microestrutura permanece aproximadamente constante, com uma pequena variação considerada natural.

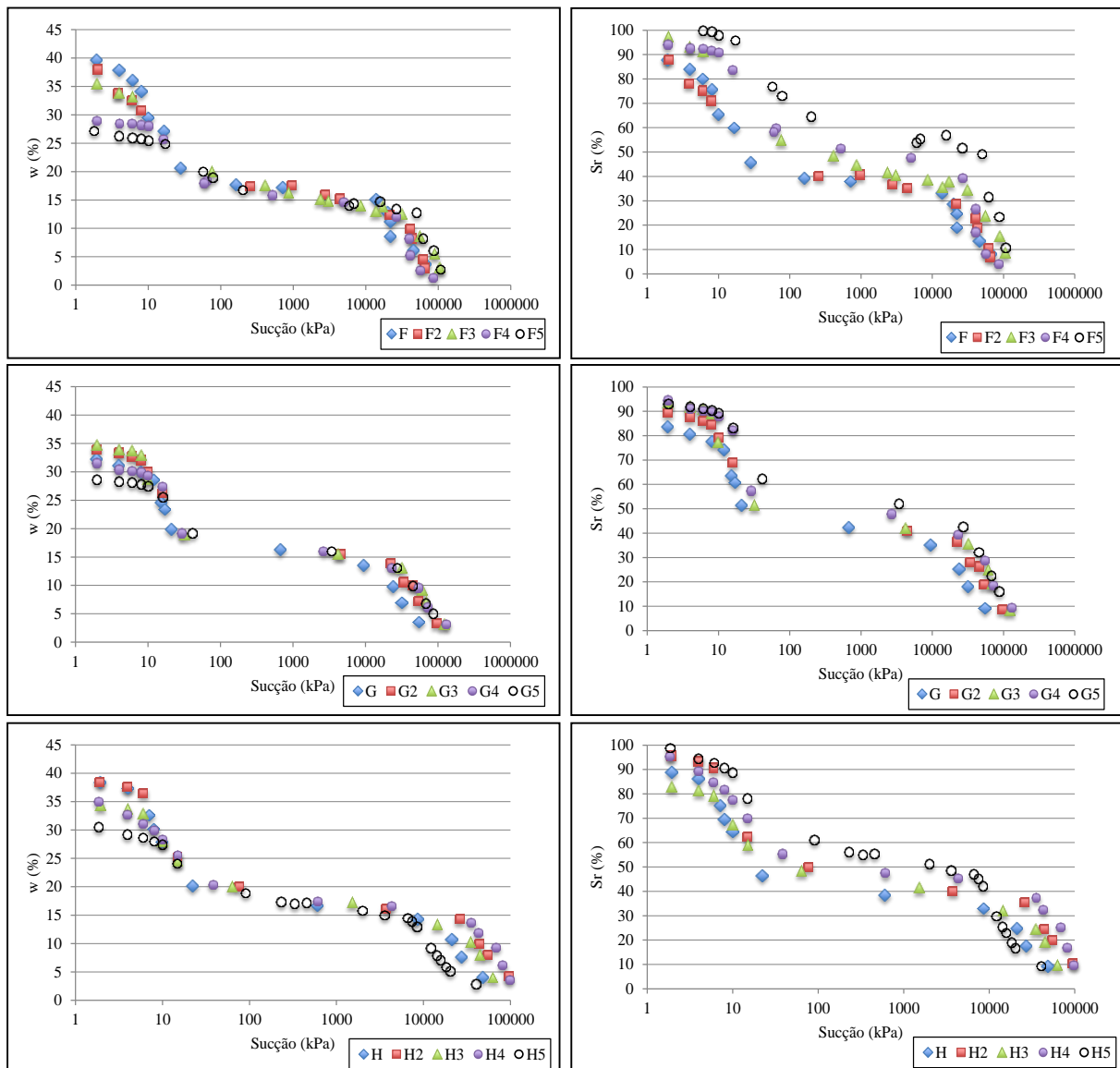


Figura 4.14 – Curvas de Retenção em Função da Umidade (w) e do Grau de Saturação (S_r).

Nos três grupos de trabalho, o segundo e terceiro ponto (F2-F3, H2-H3 e G2-G3) sempre apresentam comportamento similar, diferenciando-se somente a partir do quarto. Esta ocorrência é devido à proximidade dos valores de índice de vazios previamente determinados.

Essas curvas de retenção apresentam um patamar coincidente em torno da umidade de 20%, indicando tratar-se de uma característica do material associada aos microporos. Estes resultados corroboram os apresentados por Otalvaro (2013). Ao contrário dos resultados considerando a influência da umidade, essas curvas de retenção em função do S_r transladam como as apresentadas por Silva (2009) na Figura 4.6.

Apesar de todas as limitações do ensaio de papel filtro, com relação à precisão, pôde-se capturar em todos os grupos: a estabilidade da microestrutura; a modificação estrutural da macro, e conseqüentemente de seus valores de entrada de ar, que pode ser melhor identificada analisando a relação S_r versus sucção (Figura 4.14), mostrada anteriormente.

Esses dados experimentais foram ajustados utilizando a proposta de Durner (1994) e são apresentados na Figura 4.15. Analisando conjuntamente esses gráficos e seus valores de R^2 , expostos na Tabela 4.9 juntamente com os parâmetros de ajuste, conclui-se que o modelo utilizado conseguiu representar adequadamente os dados.

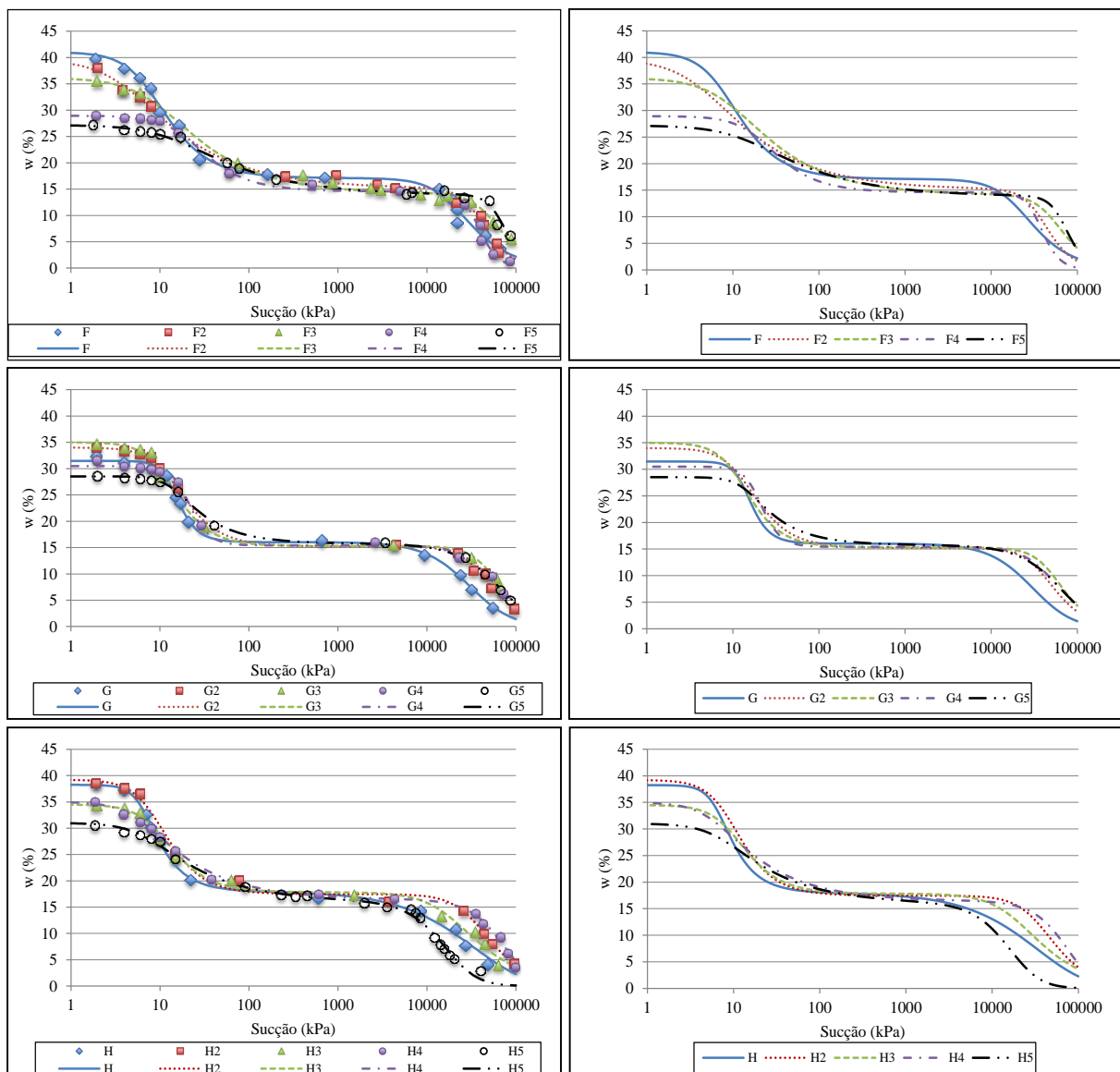


Figura 4.15 – Ajustes das Curvas de Retenção em Função da Umidade.

Tabela 4.9 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção.

PONTOS	PARÂMETROS						
	w_M	α_M	n_M	w_m	α_m	n_m	R^2
F	23,923	0,127	2,259	17,077	4,9E-05	2,296	0,993
F2	24,565	0,231	1,589	15,081	2,6E-05	3,314	0,994
F3	22,012	0,103	1,667	14,096	1,8E-05	2,899	0,996
F4	14,360	0,048	2,218	14,575	2,8E-05	4,534	0,996
F5	13,377	0,067	1,541	13,792	1,4E-05	4,384	0,993
G	15,443	0,072	4,776	16,027	2,7E-05	1,619	0,997
G2	18,810	0,072	2,552	15,190	2,4E-05	2,705	0,998
G3	19,721	0,085	2,697	15,279	1,8E-05	2,882	0,997
G4	15,090	0,050	4,372	15,408	2,3E-05	2,399	0,997
G5	12,793	0,071	3,582	15,733	9,4E-06	1,598	0,999
H	20,250	0,151	4,195	18,000	5,8E-06	0,900	0,997
H2	21,761	0,111	2,589	17,453	2,7E-05	2,433	0,995
H3	16,687	0,100	2,500	17,813	5,2E-05	1,957	0,992
H4	18,599	0,171	2,289	16,401	9,4E-06	2,026	0,997
H5	15,004	0,142	2,178	15,996	4,2E-05	1,837	0,995

Para o solo de Brasília, os carregamentos convencionais, até 800 kPa, não conseguem afetar de maneira significativa a microestrutura, promovendo alterações somente na macro. Essa afirmação também pode ser encontrada em diversos trabalhos recentes, como Otalvaro (2013) e Borges (2014). No entanto, analisando as curvas de retenção que originaram essa teoria, pode-se observar que estas, na realidade, apresentaram uma pequena variação na microestrutura, indicando a existência de uma estreita faixa de variação dos valores de entrada de ar e de inclinação da parte micro da curva. Os índices de vazios, porém, não alteraram significativamente. Essa variação pode ser considerada desprezível em vista das limitações do ensaio de papel filtro. Nesse contexto, a repetição desse estudo utilizando outro método de determinação de curva de retenção, como o WP4, se faz necessária.

Analisando a Tabela 4.9, que mostra os parâmetros de ajuste macroestruturais empregados, verifica-se que as curvas do grupo F apresentam coerentes entre si, com exceção do ponto F2.

Com o carregamento, os valores de w_M diminuíram; os de α_M diminuíram até o ponto F4, mantendo-se constante entre este e o F5; e, os de n_M ficaram relativamente constantes, sem apresentar uma tendência definida. Como esperado, os parâmetros da micro mostraram-se praticamente constantes. Essa uniformidade fica bem ilustrada nas curvas ajustadas, onde a partir do momento em que a água começa a sair dos macroporos, ou seja, do valor de entrada de ar, elas convergem.

Para o grupo G pode-se observar que o carregamento causou efeitos semelhantes aos do F na macroestrutura: redução do w_M ; α_M constante; e, n_M sem tendência definida. Vale ressaltar que a micro manteve-se mais estável que a dos outros grupos. O grupo H apresentou os parâmetros mais distintos dos três: w_M sem tendência definida; α_M constante; e, n_M reduzindo com o carregamento.

Buscando um melhor entendimento da influência do carregamento na estrutura dos solos, foram realizados ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, que estão apresentados na Figura 4.16. Como mencionado anteriormente, para a realização desse ensaio a estrutura é preservada do efeito da contração. Assim, os resultados de porosimetria apresentam de forma mais clara a invariabilidade da microestrutura. Na região da macroestrutura as curvas dos três grupos exibem a mesma tendência, uma redução ou achatamento com o carregamento.

A menor redução foi constatada nas curvas G, possivelmente devido a este grupo possuir o menor valor de índice de vazios, se encontrando mais próximo do ponto ótimo.

As curvas F-F2 e H2-H3 são praticamente coincidentes, reflexo da similaridade dos valores de índice de vazios, que por sua vez é resultado do local que o ponto se encontra na curva de adensamento, antes ou após a tensão de pré-adensamento. Essa semelhança nos valores de e também ocorre nos pontos G2-G3, onde a curva G3 encontra-se acima da curva G2.

Na Figura 4.16 também são apresentados os ajustes das curvas acumuladas do tamanho dos poros, utilizando a equação proposta por Durner (1994), descrita anteriormente na Equação 4.1. Esses ajustes representaram adequadamente os dados experimentais, podendo ser comprovado visualmente através das curvas e pelos valores de R^2 , presentes na Tabela 4.10, junto aos parâmetros adotados.

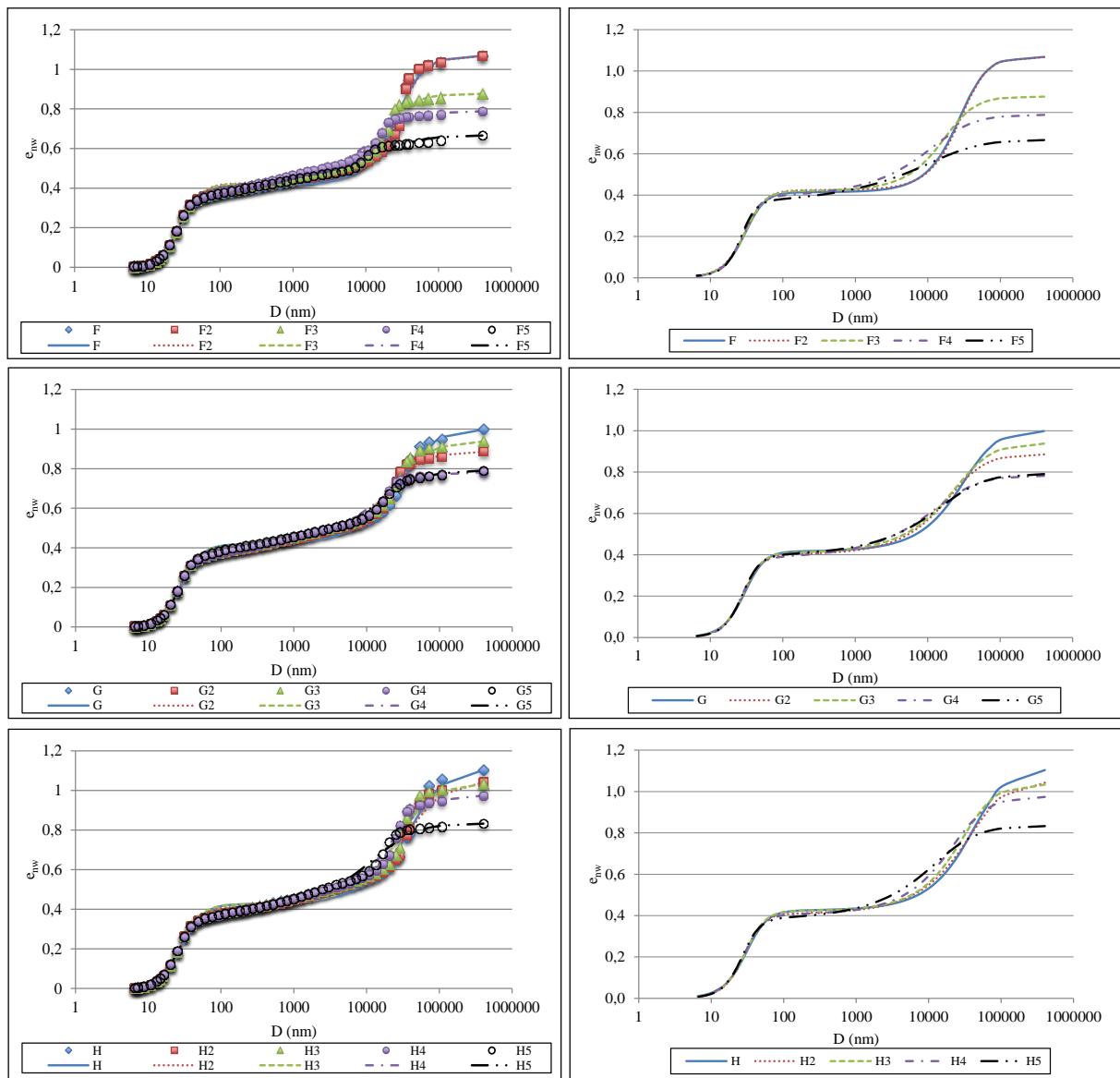


Figura 4.16 – Curva Acumulada de Tamanho dos Poros e seus Ajustes.

Esses parâmetros corroboram o conceito de microestrutura constante, visto que estes apresentam uma variação mínima. Deste modo, um novo ajuste foi realizado mantendo os parâmetros dos microporos constantes e iguais à média dos valores do primeiro ajuste. Essa técnica foi aplicada aos pontos situados ao longo da curva de compactação, como explicado na seção anterior. Os resultados desse segundo ajuste são apresentados na Tabela 4.11. Para todos os pontos os valores de R^2 foram superiores a 0,98, indicando que o modelo se manteve adequado.

Tabela 4.10 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho de Poros.

PONTOS	PARÂMETROS						
	e_M	α_M	n_M	e_m	α_m	n_m	R^2
F	0,656	3,4E+04	2,473	0,414	34,044	3,382	0,991
F2	0,644	3,5E+04	2,565	0,424	34,329	3,304	0,989
F3	0,457	2,3E+04	2,207	0,420	34,031	3,399	0,992
F4	0,399	2,0E+04	1,676	0,390	30,634	3,801	0,995
F5	0,314	2,5E+04	1,441	0,354	28,416	4,396	0,997
G	0,585	4,3E+04	2,052	0,416	33,763	3,377	0,992
G2	0,487	3,0E+04	1,925	0,401	31,582	3,610	0,992
G3	0,533	3,6E+04	1,862	0,407	31,860	3,562	0,993
G4	0,401	2,3E+04	1,658	0,382	29,943	3,865	0,995
G5	0,399	2,8E+04	1,645	0,393	30,593	3,808	0,997
H	0,686	5,8E+04	2,052	0,425	34,924	3,220	0,990
H2	0,642	5,6E+04	1,879	0,408	31,944	3,546	0,990
H3	0,613	4,1E+04	2,060	0,423	33,528	3,372	0,988
H4	0,571	3,2E+04	1,922	0,405	32,198	3,371	0,991
H5	0,454	2,2E+04	1,681	0,380	29,499	3,754	0,995

Tabela 4.11 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho de Poros com Microestrutura Constante.

PONTOS	PARÂMETROS						
	ϵ_M	α_M	n_M	ϵ_m	α_m	n_m	R^2
F	0,656	3,44E+04	2,473	0,414	34,031	3,399	0,991
F2	0,655	3,62E+04	2,405	0,414	34,031	3,399	0,988
F3	0,463	2,31E+04	2,124	0,414	34,031	3,399	0,992
F4	0,375	1,83E+04	1,859	0,414	34,031	3,399	0,994
F5	0,253	1,83E+04	1,861	0,414	34,031	3,399	0,993
G	0,602	4,68E+04	1,898	0,401	31,582	3,610	0,992
G2	0,487	2,98E+04	1,925	0,401	31,582	3,610	0,992
G3	0,540	3,73E+04	1,806	0,401	31,582	3,610	0,993
G4	0,382	2,15E+04	1,791	0,401	31,582	3,610	0,994
G5	0,391	2,70E+04	1,696	0,401	31,582	3,610	0,997
H	0,706	6,31E+04	1,899	0,408	32,198	3,372	0,989
H2	0,642	5,55E+04	1,879	0,408	32,198	3,372	0,990
H3	0,630	4,35E+04	1,916	0,408	32,198	3,372	0,988
H4	0,568	3,14E+04	1,949	0,408	32,198	3,372	0,991
H5	0,426	1,99E+04	1,872	0,408	32,198	3,372	0,994

Para as curvas de retenção dos grupos F-G-H não foi realizado ajuste considerando a micro constante, por considerar essa simplificação não razoável, devido ao fenômeno da retração mencionada anteriormente para os pontos A, B, C, D e E da curva de compactação.

A Figura 4.17 apresenta as curvas de densidade do tamanho dos poros PSD.

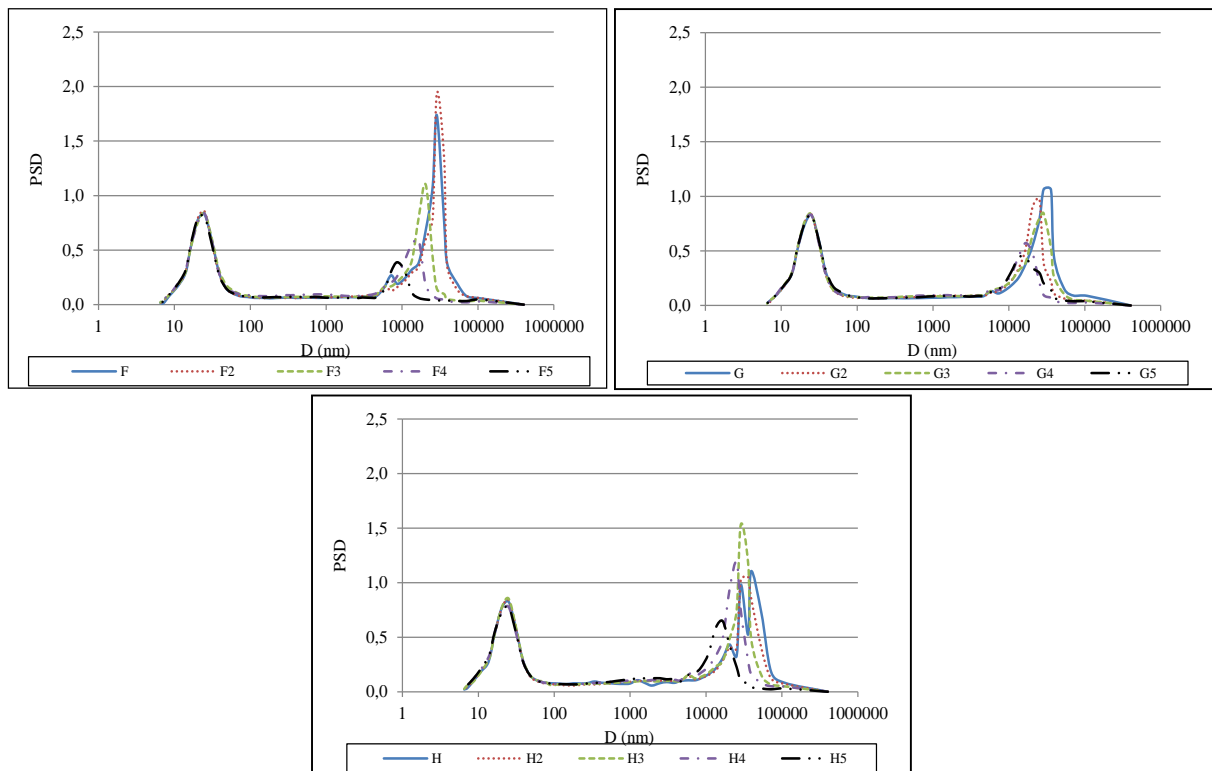


Figura 4.17 – Densidade de Tamanho dos poros (PSD).

Analisando o grupo F observa-se que a macro vai sendo destruída com o carregamento, diminuindo o pico e transladando-o, também. Isso significa que o volume de poros diminui, assim como o seu tamanho. Os picos da macro dos pontos F e F5 possuem aproximadamente uma ordem de grandeza de diferença, mostrando que os poros foram realmente destruídos, e não distribuídos. Novamente, a curva do ponto F2 está acima do F devido à semelhança nos valores de índice de vazios, como discutido anteriormente.

As PSD do grupo G apresentam comportamento semelhante ao F, com redução significativa do poro dominante. O grupo H é o que se mostra mais divergente, com a curva referente ao ponto H3 com o maior pico. As curvas H-H2-H4 estão no mesmo nível, mas com a primeira revelando três vértices nos macroporos. Acredita-se que esses vértices não signifiquem que esse ponto tenha se tornado trimodal, como os pontos D e E, mas sim um problema de cálculo da derivada. Lopes *et al.* (2014) demonstra que o intervalo utilizado no cálculo da PSD (derivada) pode alterar a forma e os valores da curva.

De uma forma geral, acredita-se que com o processo de compactação, aumentando a quantidade de água e mantendo a energia constante, poros são criados pela modificação dos originais, ou melhor, os poros são rearranjados. Por outro lado, carregamentos aparentemente não modificam os poros criando novos, mas os destroem ou os reduzem de tamanho. A Figura

4.18 apresenta os resultados de microscopia eletrônica de varredura com a evolução da estrutura devido ao carregamento.

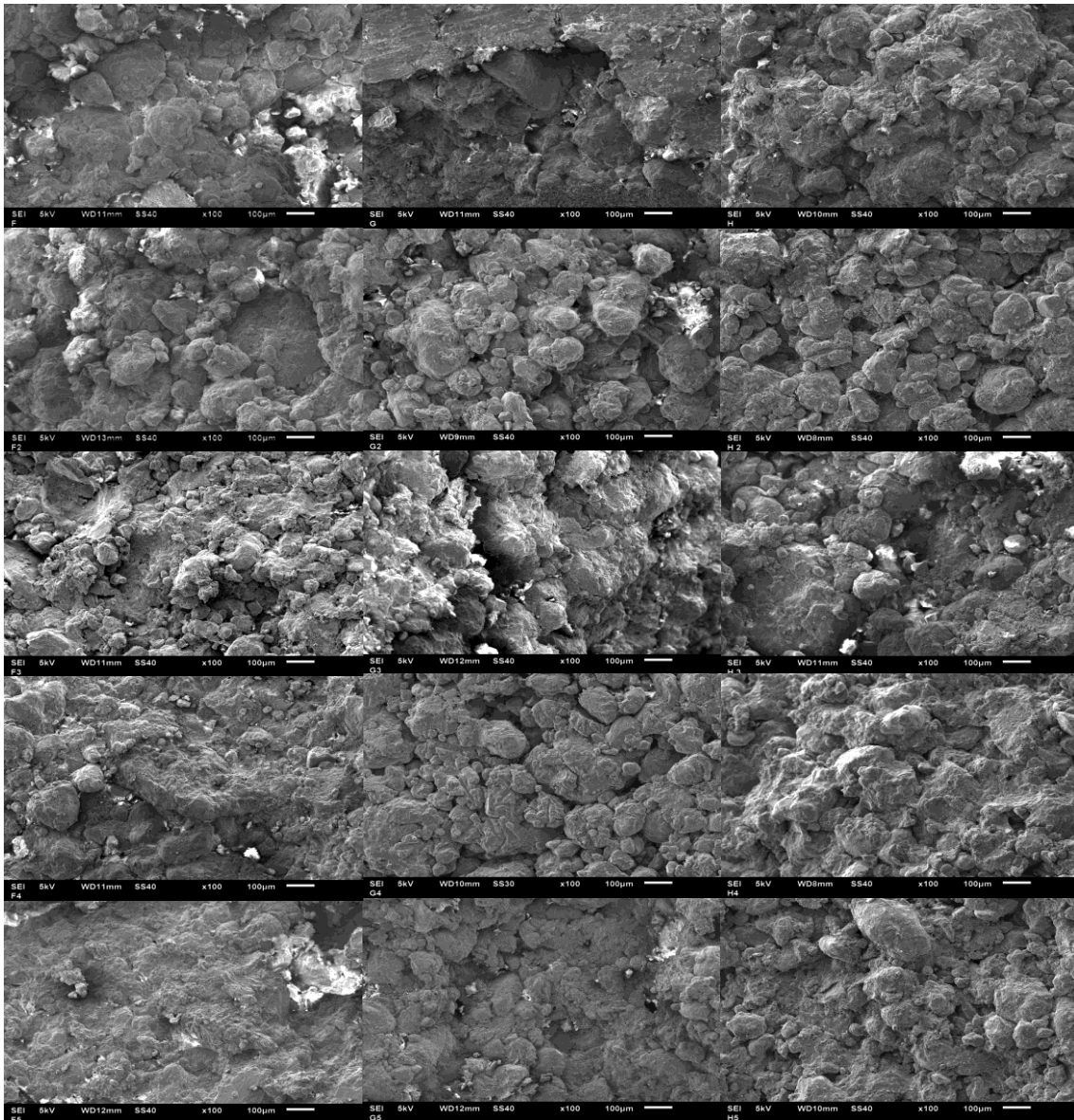


Figura 4.18 – Microscopias Eletrônicas de Varredura.

Nesta pesquisa o solo foi ensaiado em uma condição pós-carregamento, controlando o índice de vazios, e como a amostra estava com a umidade natural, acredita-se que esta permaneceu constante durante o processo. Assim, o procedimento utilizado de obtenção das amostras, através da massa e do volume, conseguiu reproduzir com coerência o processo de carregamento odométrico das amostras F e G, como desejado inicialmente.

Esse fato (umidade constante) justificaria o comportamento não padrão encontrado nas curvas de PSD do grupo H, visto que este é o mais úmido, e talvez precisasse esperar que ocorresse alguma saída de água devido ao processo de adensamento, já que estes se encontravam

próximos a condição saturada . No entanto, analisando os $e_{teórico}$ versus e_{mip} , apresentados na Figura 4.3, não nota-se diferenças consideráveis.

Além disso, o comportamento apresentado pelas curvas de retenção analisadas também corrobora a ideia de Alonso *et al.* (2010) e de outros autores que os níveis de tensão aplicados atualmente não conseguem destruir a microestrutura do solo. Assim, variações no índice de vazios ocasionarão somente alterações nos macroporos, fazendo com que as curvas percam o aspecto bimodal.

Por fim, nota-se que com a diminuição do índice de vazios, por carregamento ou processo de compactação, há a redução dos macroporos. Quando essa redução é fruto de um carregamento, o tamanho do poro dominante e a frequência (PSD) diminuem. No entanto, no caso da compactação, o poro dominante permanece praticamente o mesmo, com alteração de sua frequência, ou seja, o processo faz com que os poros fiquem mais bem graduados. Com relação aos poros microestruturais verifica-se que praticamente não houve alterações, mesmo com a redução do índice de vazios. Essa manutenção da distribuição de poros da microestrutura também foi observada por Simms e Yanful (2002), Romero *et al.* (2005), Buenfil (2007), Otalvaro (2013) e Borges (2014).

4.3.3 INFLUÊNCIA DA ENERGIA APLICADA NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E NA ESTRUTURA

Em seguida serão apresentados os resultados considerando as diferentes energias aplicadas. Foram avaliados quatro grupos: AIKE, BIF, BJD e CJG. A Figura 4.19 mostra a posição dos pontos de trabalho no plano massa específica versus umidade.

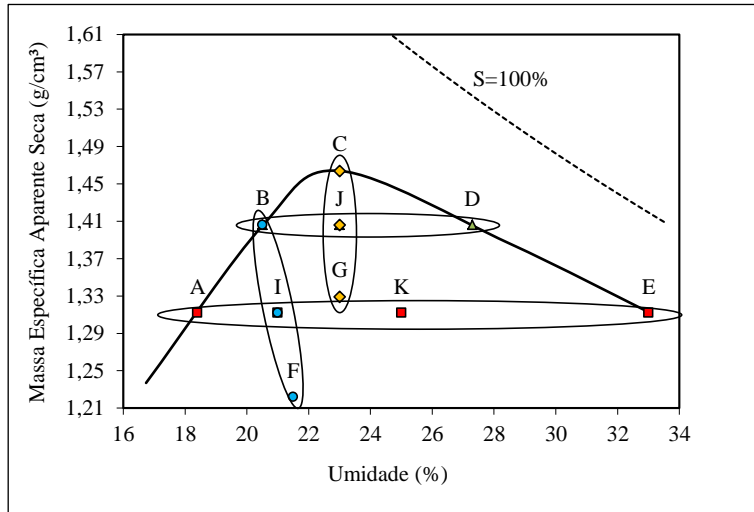


Figura 4.19 – Pontos de Trabalho.

A Figura 4.20 apresenta as curvas de retenção em função da umidade e seus ajustes dos grupos AIKE, BIF, BJD e CJG. Essas curvas apresentam comportamento semelhante ao que foi evidenciado nas análises anteriores, microestrutura relativamente constante e ligeira diferença na macro. Em todas elas a exceção deve-se a curva B, que possivelmente possui problemas de execução, como explicado anteriormente.

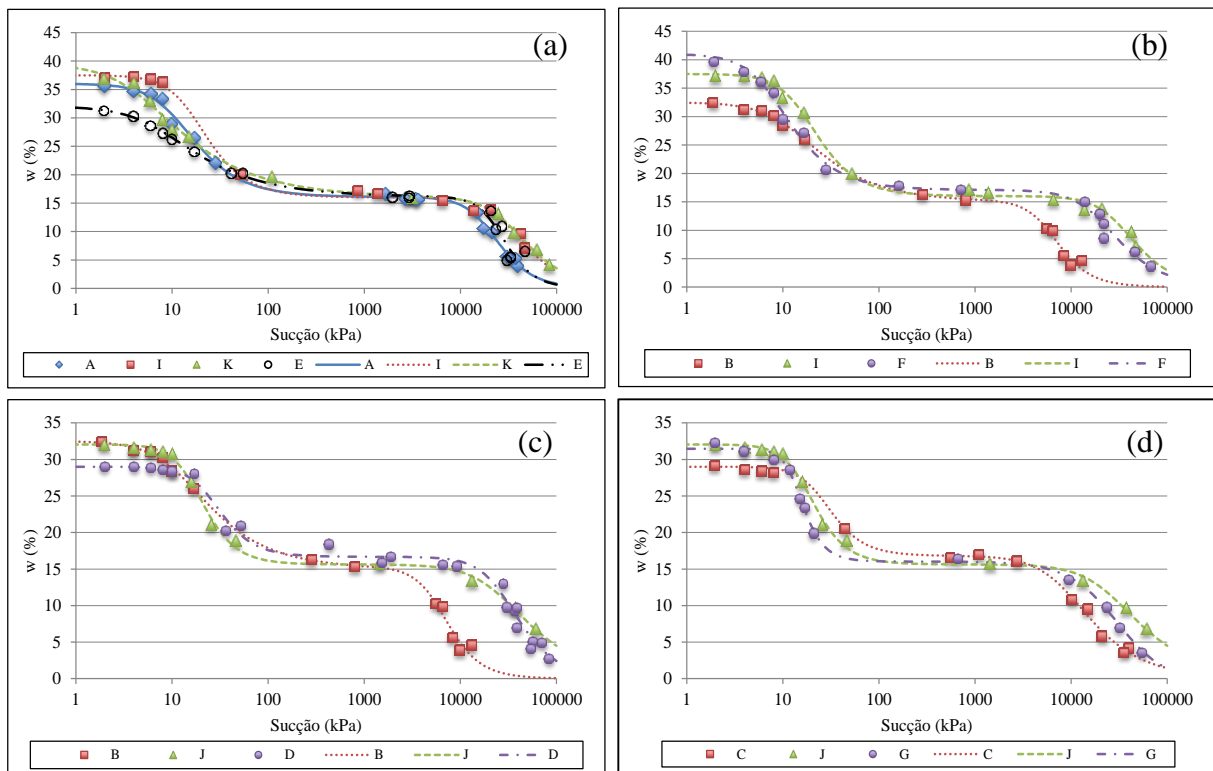


Figura 4.20 – Curvas de Retenção em Função da Umidade e seus Ajustes. (a) Semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias. (b) Semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios. (c) Semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias. (d) Semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios.

As Tabelas 4.12 a 4.15 apresentam os parâmetros de ajuste das curvas de retenção dos quatro grupos analisados.

Tabela 4.12 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção do Grupo AIKE.

PONTOS	PARÂMETROS						
	w_M	α_M	n_M	w_m	α_m	n_m	R^2
A	19,935	0,089	2,220	16,065	5,1E-05	2,815	0,996
I	21,500	0,060	2,500	16,000	3,0E-05	2,500	0,996
K	23,492	0,214	1,647	15,955	3,0E-05	2,353	0,996
E	15,930	0,139	1,711	16,070	4,0E-05	3,318	0,981

Tabela 4.13 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção do Grupo BIF.

PONTOS	PARÂMETROS						
	w_M	α_M	n_M	w_m	α_m	n_m	R^2
B	17,445	0,080	1,873	15,055	1,7E-04	2,967	0,996
I	21,500	0,060	2,500	16,000	3,0E-05	2,500	0,996
F	23,923	0,127	2,259	17,077	4,9E-05	2,296	0,993

Tabela 4.14 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção do Grupo BJD.

PONTOS	PARÂMETROS						
	w_M	α_M	n_M	w_m	α_m	n_m	R^2
B	17,445	0,080	1,873	15,055	1,7E-04	2,967	0,996
J	16,423	0,058	2,965	15,629	3,7E-05	1,918	0,998
D	12,330	0,039	2,901	16,670	3,4E-05	2,545	0,988

Tabela 4.15 – Parâmetros de Ajuste da Curva de Retenção do Grupo CJG.

PONTOS	PARÂMETROS						
	w_M	α_M	n_M	w_m	α_m	n_m	R^2
C	12,187	0,039	2,927	16,813	1,1E-04	2,026	0,998
J	16,423	0,058	2,965	15,629	3,7E-05	1,918	0,998
G	15,443	0,072	4,776	16,027	2,7E-05	1,619	0,997

A Figura 4.21 apresenta as curvas acumuladas de tamanho dos poros, com seus ajustes, e as PSD.

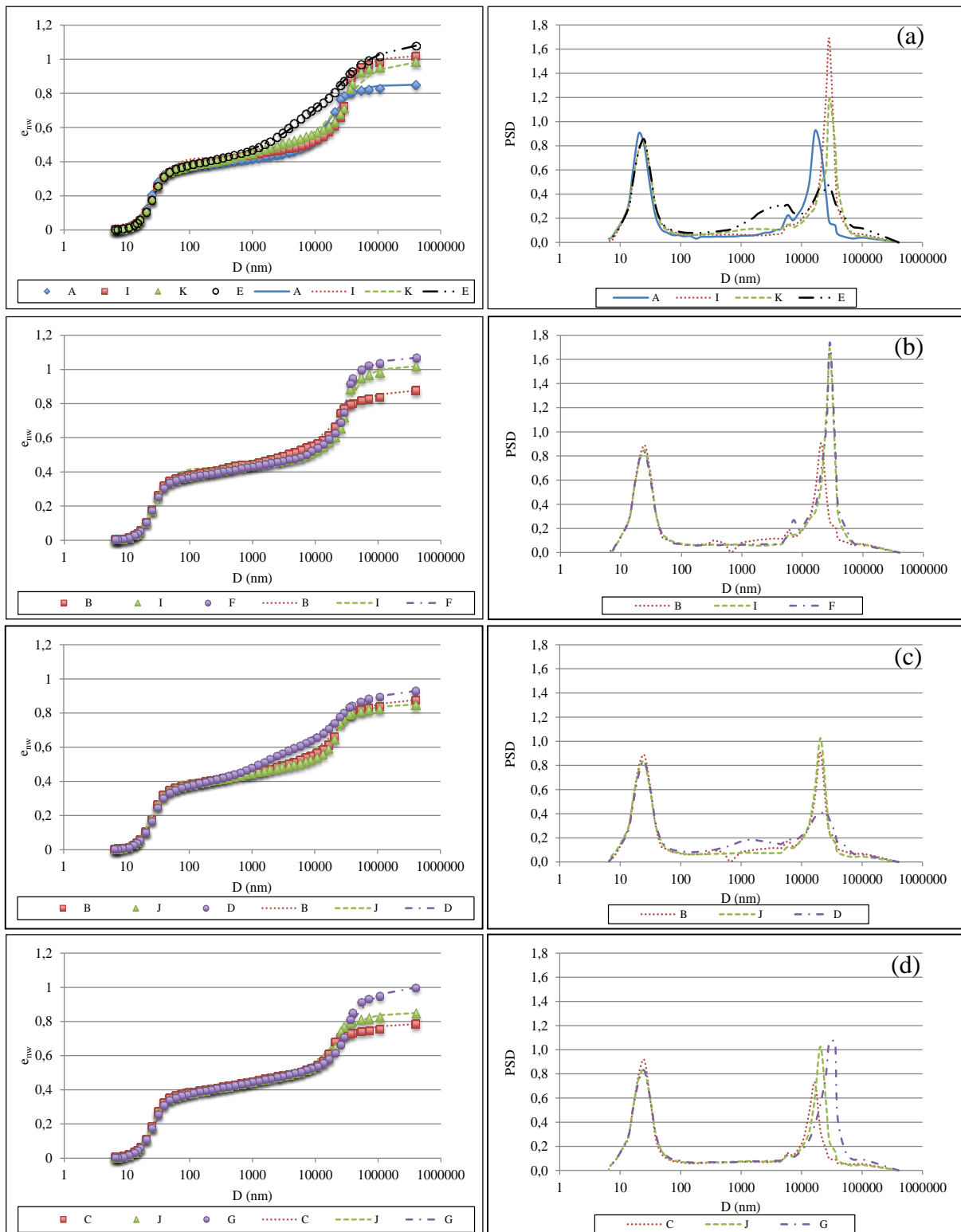


Figura 4.21 – Curvas Acumuladas de Tamanho dos Poros e PSD. (a) Semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias. (b) Semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios. (c) Semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias. (d) Semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios.

Novamente os resultados do MIP evidenciaram a inalterabilidade da microestrutura. Observa-se também que com o aumento da energia, a curva perde gradativamente o aspecto bimodal, devido ao fechamento dos macroporos. Fato semelhante foi observado por Otálvaro (2013), onde segundo este autor, caso o carregamento pudesse continuar indefinidamente a curva acumulada de tamanho de poros final seria unimodal.

O aumento do teor de umidade também produz o mesmo resultado, porém através da homogeneização da matriz argilosa devido a maior quantidade de água disponível nos poros.

As Tabelas 4.16 a 4.19 apresentam os parâmetros de ajuste das curvas acumuladas de tamanho dos poros.

Tabela 4.16 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho dos Poros do Grupo AIKE.

PONTOS	PARÂMETROS						
	e_M	α_M	n_M	e_m	α_m	n_m	R^2
A	0,458	2,2E+04	2,343	0,393	28,484	3,911	0,995
I	0,596	3,5E+04	2,556	0,423	35,014	3,301	0,990
K	0,587	4,5E+04	1,775	0,401	31,085	3,652	0,991
E	0,765	4,7E+04	1,422	0,324	28,469	5,093	0,999

Tabela 4.17 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho dos Poros do Grupo BIF.

PONTOS	PARÂMETROS						
	e_M	α_M	n_M	e_m	α_m	n_m	R^2
B	0,484	3,4E+04	1,730	0,395	30,271	3,975	0,995
I	0,596	3,5E+04	2,556	0,423	35,014	3,301	0,990
F	0,656	3,4E+04	2,473	0,414	34,044	3,382	0,991

Tabela 4.18 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho dos Poros do Grupo BJD.

PONTOS	PARÂMETROS						
	e_M	α_M	n_M	e_m	α_m	n_m	R^2
B	0,484	3,4E+04	1,730	0,395	30,271	3,975	0,995
J	0,440	2,8E+04	2,008	0,411	32,259	3,538	0,992
D	0,608	3,9E+04	1,399	0,328	30,026	4,826	0,998

Tabela 4.19 – Parâmetros de Ajuste da Curva Acumulada de Tamanho dos Poros do Grupo CJG.

PONTOS	PARÂMETROS						
	e_M	α_M	n_M	e_m	α_m	n_m	R^2
C	0,389	2,8E+04	1,752	0,398	29,641	3,915	0,995
J	0,440	2,8E+04	2,008	0,411	32,259	3,538	0,992
G	0,585	4,3E+04	2,052	0,416	33,763	3,377	0,992

As Figuras 4.22 a 4.25 apresentam as microscopias eletrônicas de varredura. A legenda das imagens dos pontos I, J e K mostra nomenclatura diferente das mencionadas na legenda da figura devido à troca das mesmas ter sido realizada posteriormente a realização desse ensaio.

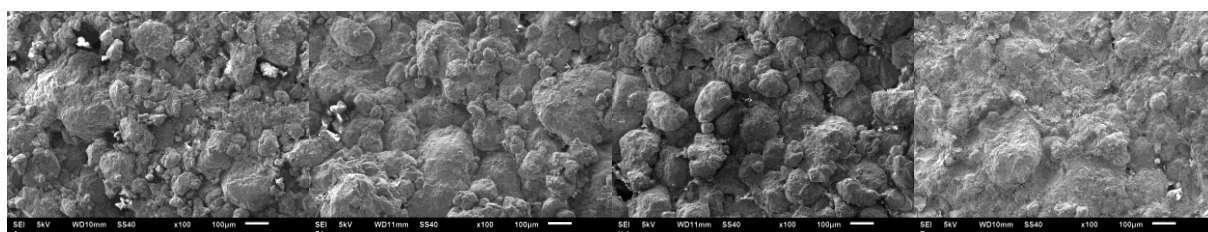


Figura 4.22 – Microscopias Eletrônicas de Varredura dos pontos A, I, K e E, respectivamente (semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias).

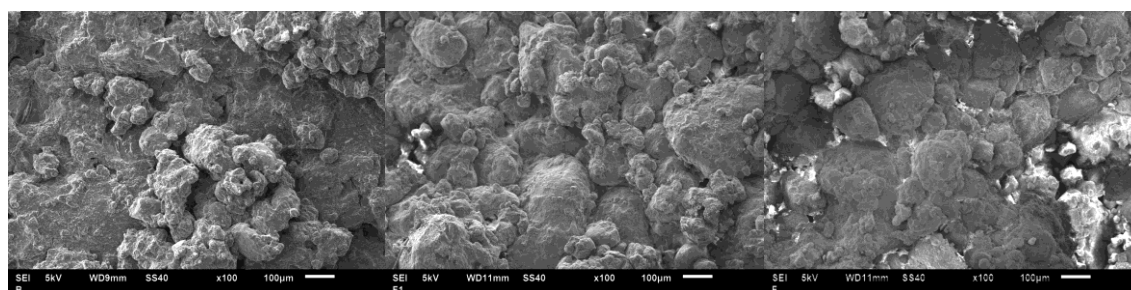


Figura 4.23 – Microscopias Eletrônicas de Varredura dos pontos B, I e F, respectivamente (semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios).

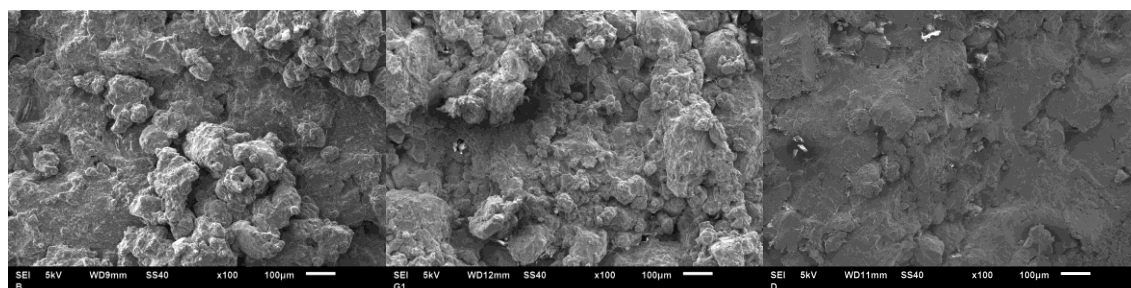


Figura 4.24 – Microscopias Eletrônicas de Varredura dos pontos B, J e D, respectivamente (semelhante índice de vazios e diferentes umidades e energias).

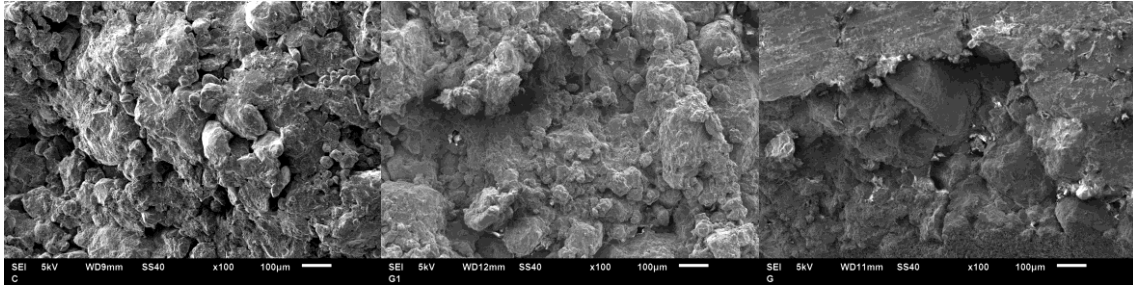


Figura 4.25 – Microscopias Eletrônicas de Varredura dos pontos C, J e G, respectivamente (semelhante umidade e diferentes energias e índice de vazios).

4.4 RESUMO

Buscando avaliar o comportamento hidro-mecânico-estrutural de um solo tropical compactado, neste capítulo foram apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica, compactação, adensamento, curvas de retenção, porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e microscopia eletrônica de varredura (SEM). Esses resultados foram organizados conforme o parâmetro variável em análise, os quais foram: umidade, carregamento e energia aplicada. Também foi apresentada uma discussão sobre a variabilidade do índice de vazios nas amostras, visando garantir a representatividade da pesquisa.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada uma discussão dos resultados obtidos nesta pesquisa e exibidos no capítulo 4. Os tópicos principais abordados são: uma proposta de correção da curva de compactação, considerando apenas os vazios associados à macroestrutura; a aplicação da metodologia desenvolvida por Mascarenha (2008) de obtenção da distribuição de poros utilizando a curva de retenção; uma análise quantitativa da distribuição dos poros macroestruturais; e, uma análise da variação dos parâmetros de ajuste das curvas de distribuição do tamanho dos poros. Parte das análises aqui apresentadas tem como objetivo oferecer uma interpretação mais quantitativa aos resultados experimentais associados ao estudo da estrutura do solo.

5.1 PROPOSTA DE CORREÇÃO DA CURVA DE COMPACTAÇÃO

A partir das análises realizadas no Capítulo 4 e dos trabalhos desenvolvidos por Otálvaro (2013) e Borges (2014), pode-se dizer que o solo da cidade de Brasília não apresenta variação significativa da microestrutura, ou dos microporos, mesmo sob efeitos de carregamentos ou diferentes condições de compactação. Isso pode ser visualizado quando as curvas de retenção do solo obtidas para amostras com diferentes condições são comparadas (Figura 5.1).

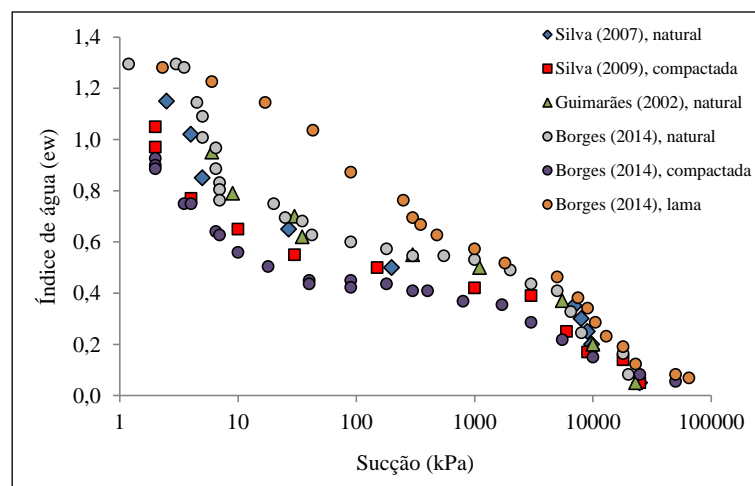


Figura 5.1 – Curvas de Retenção de Água do Solo do Campo Experimental do PPG da UnB.

Após as diversas pesquisas indicando que a microestrutura do solo não se altera, independente do efeito externo aplicado, surgiu uma dúvida com relação à utilização da curva de compactação convencional na prática da engenharia. Seria mais apropriado utilizar uma curva de compactação que considerasse apenas a parcela da estrutura que se modifica, ou seja, o índice de vazios macroestrutural, ou macroporos. Acredita-se que essa nova informação

consiga representar de maneira mais fiel o que realmente ocorre no solo. Considerando que a massa de sólido não é alterada e que do volume total deve ser extraído o volume de vazios da microestrutura, tem-se a Equação 5.1.

$$\gamma_d^* = \frac{M_s}{V_t - V_v^m} = \frac{\gamma_s}{1 + e^M} \quad (5.1)$$

Onde M_s é a massa de sólidos, V_t é o volume total, V_v^m é o volume de vazios da microestrutura. Dessa forma, um novo peso específico aparente seco foi calculado, considerando somente o índice de vazios macroestrutural. Além disso, o valor de umidade considerado também foi recalculado, considerando que a água armazenada nos microporos não é trocada com o meio durante o processo de compactação. Assim, o novo valor de umidade foi encontrado subtraindo do teor de umidade de compactação convencional a parcela correspondente à umidade microestrutural, determinada no ajuste das curvas de retenção. A Figura 5.2 apresenta as curvas de compactação convencional e modificada para considerar somente os efeitos advindos das variações na macroestrutura.

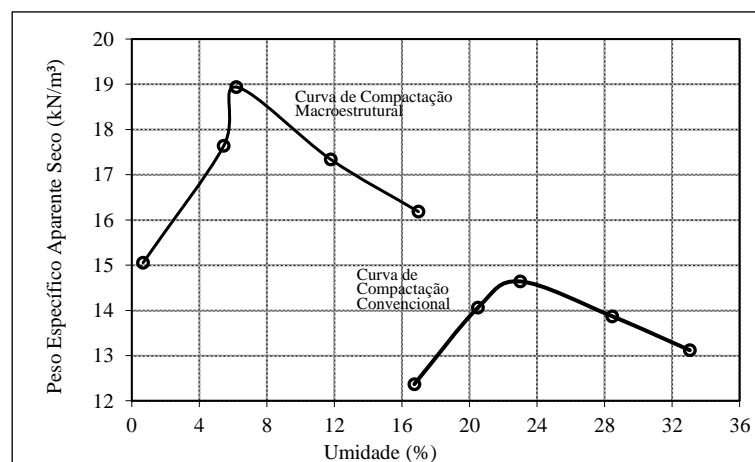


Figura 5.2 – Curvas de Compactação Convencional e Macroestrutural.

A nova curva se desloca para cima e para a esquerda com relação à curva convencional, como se um acréscimo de energia houvesse ocorrido. Esse deslocamento ajuda a entender alguns aspectos apresentados e discutidos no capítulo 4. Por exemplo, nos resultados de porosimetria e microscopia não era possível identificar diferenças significativas entre as amostras B e C, localizadas sobre o ramo seco da curva de compactação.

Outro ponto que merece destaque é o fato de o ponto C, que corresponde à umidade ótima, ter características mais próximas às amostras do ramo seco que do úmido, apesar de ter valor de

umidade intermediário entre estes. Na curva modificada, a umidade ótima está mais próxima dos valores do ramo seco.

Finalmente, observa-se que utilizar os valores da curva de compactação padrão para o cálculo do grau de compactação, ou controle de compactação, pode não ser realista, uma vez que o valor do volume de vazios que realmente pode ser modificado pela aplicação da energia de compactação e da umidade é somente o dos macroporos, e não o total. Assim, faz-se necessário uma maior investigação sobre este tema.

5.2 DISTRIBUIÇÃO DE POROS A PARTIR DA CURVA DE RETENÇÃO DO SOLO

De acordo com Prapaharan *et al.* (1985), a técnica da porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) pode ser utilizada na determinação da curva de retenção de um solo, visto que a pressão de injeção do mercúrio pode se relacionar a pressão de ar em uma amostra saturada. Mascarenha (2008), utilizando esse princípio, propôs o caminho inverso, a definição da distribuição de poros do solo por meio da curva de retenção. O ajuste dos valores experimentais do par umidade-sucção utilizando uma equação facilita a transformação. Vale ressaltar que essa previsão é tão adequada quanto for o modelo de ajuste utilizado.

Para o ajuste das curvas de retenção foi utilizado o método proposto por Durner (1994). Este autor apresentou uma extensão para a equação de van Genuchten (1980), originalmente destinada a curvas unimodais, tornando-a adequada a curvas bi e multimodais (Equação 5.2).

$$w = \frac{w_M}{[1+(\alpha_M \cdot s)^{n_M}]^{1-\frac{1}{n_M}}} + \frac{w_m}{[1+(\alpha_m \cdot s)^{n_m}]^{1-\frac{1}{n_m}}} \quad (5.2)$$

Para o ajuste das curvas acumuladas de tamanho dos poros experimentais foi utilizada a Equação 5.3. Essa equação é a mesma apresentada por Durner (1994), porém escrita em função do diâmetro, e não mais de umidade.

$$e_{nw} = e_m \left[\frac{1}{1+(\alpha_m \cdot D)^{n_m}} \right]^{(1-\frac{1}{n_m})} + e_M \left[\frac{1}{1+(\alpha_M \cdot D)^{n_M}} \right]^{(1-\frac{1}{n_M})} \quad (5.3)$$

Os parâmetros α , n , s e D , estando os dois primeiros presentes em ambas as equações, significam: α está relacionado ao valor de entrada de ar na Equação 5.2 e ao ponto de inflexão da curva na Equação 5.3; n é a distribuição de poros para os dois casos; s e D pertencem a primeira e a segunda equação, respectivamente, e representam a sucção e o diâmetro. As equações possuem os dois modos, macro (M) e microestruturais (m).

Nesse contexto, a distribuição de poros utilizando a curva de retenção (CR) foi determinada. Otálvaro (2013) propôs duas correções quando da transformação das curvas de retenção em curvas de porosimetria. A primeira considera os efeitos de contração e expansão devido a entrada e saída de água, e a segunda supõe que a água armazenada nos microporos não obedece mais ao fenômeno de capilaridade e sim de adsorção.

Nestas análises as correções propostas por Otálvaro (2013) não foram consideradas por dois motivos: ausência de informações sobre como as diferentes amostras variavam de volume durante os processos de secagem e molhagem; e, objetivo da análise. Comparando as curvas obtidas pelo MIP com as obtidas a partir da curva de retenção é possível observar o efeito da variação de volume e da adsorção nas diferentes amostras.

A Figura 5.3 apresenta as curvas acumuladas de tamanho dos poros e as PSD do grupo A-B-C-D-E obtidas pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e pela técnica desenvolvida por Mascarenha (2008).

Analisando os pontos A e B verifica-se que a previsão pela curva de retenção é assertiva no diâmetro do poro dominante da macroestrutura, mas não consegue determinar corretamente a frequência (PSD). Com relação à micro, ela não consegue uma aproximação da curva experimental em nenhum dos dois aspectos (diâmetro e frequência). Novamente, nas curvas acumuladas de tamanho dos poros, a microestrutura não é coincidente devido à água desse modo não ser controlada pelos fenômenos capilares, sendo este o princípio fundamental do ensaio de MIP. Na microestrutura, como já foi mencionado, o fenômeno que controla a movimentação da água está associado a adsorção.

Ainda nos pontos A e B, o índice de vazios previsto pela curva de retenção é superior ao valor determinado experimentalmente pelo MIP. Neste caso, vale ressaltar que o MIP não consegue preencher todos os vazios, sendo razoável que a previsão pela curva de retenção seja superior. Porém, isso não foi observado em diversas amostras, o que demonstra que essa conclusão, apesar de factível, não é conclusiva. Por exemplo, para o ponto B a previsão foi bastante adequada. Independente do valor final do índice de vazios, para os pontos A, B e C houve uma boa concordância das formas entre as curvas obtidas pelos dois métodos.

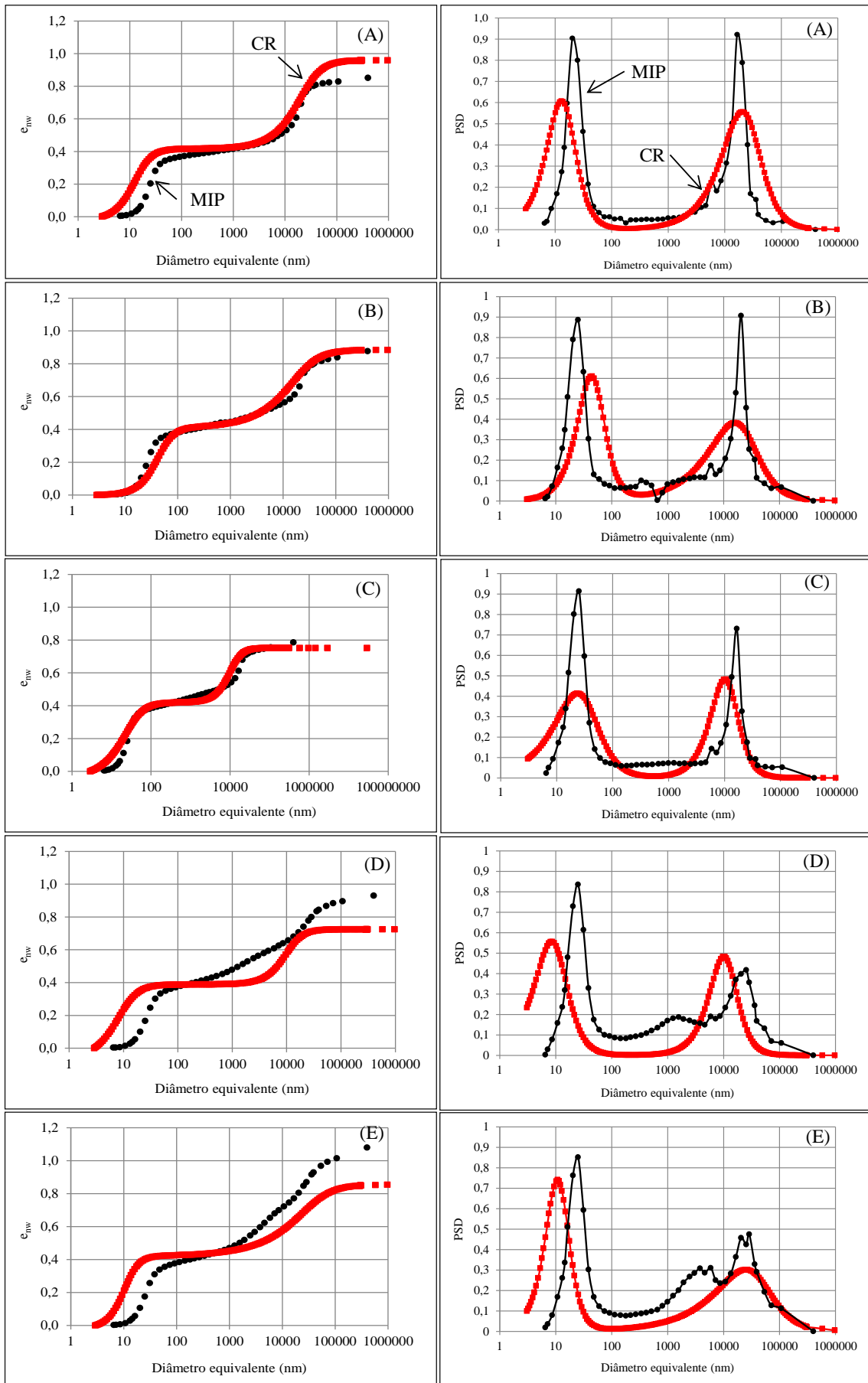


Figura 5.3 – Curvas Acumuladas de Tamanho dos Poros e PSD do grupo A-B-C-D-E.

A previsão pela curva de retenção do ponto C, diferentemente dos pontos A e B, conseguiu indicar corretamente o diâmetro do poro dominante microestrutural. No entanto, sua frequência e as feições macroestruturais não foram tão bem representadas.

Para os pontos D e E o método de previsão não conseguiu capturar satisfatoriamente nenhum aspecto das curvas experimentais. Isto é devido ao fato que o ajuste da curva de retenção foi realizado considerando o solo bimodal. No entanto, ao analisarmos os resultados do MIP, fica evidente que o aumento do teor de umidade tornou a amostra trimodal, ou seja, com três poros que se destacam em comparação aos outros. Isso impossibilitou as comparações, uma vez que a equação de ajuste utilizada para modelar as curvas de retenção não foram trimodais, pois os dados experimentais não apontavam tal necessidade. Esses resultados indicando uma curva bimodal podem ser consequência da metodologia empregada (papel filtro), e caso um método mais preciso fosse utilizado o aspecto multimodal pudesse ser capturado. Além disso, aparentemente os efeitos da adsorção são mais fortes para as amostras no ramo úmido. No entanto, infelizmente não há dados experimentais suficientes para determinar as razões para tal efeito.

A Figura 5.4 apresenta a distribuição de poros do grupo F, obtidas pelo MIP e pelo método de Mascarenha (2008). Os grupos G e H não serão apresentados neste trabalho, visto que os seus resultados e, conseqüentemente, as suas análises são similares ao ponto F. Os pontos relacionados ao grupo F se diferenciam dos pontos A-B-C-D-E por ter uma variação do índice de vazios mantendo a umidade constante. O ponto F apresenta uma boa concordância entre as curvas de distribuição de poros obtidas pelas duas técnicas. É possível observar que o efeito da adsorção na microestrutura é maior que os efeitos da variação volumétrica na macroestrutura. Como o ponto F encontra-se próximo ao ramo seco, os resultados são semelhantes.

Novamente, verifica-se que a técnica de previsão da distribuição de poros pela curva de retenção consegue determinar corretamente o diâmetro do poro dominante da macroestrutura, mas o mesmo não ocorre com a frequência. Isso é observado em todos os pontos do grupo F. Na microestrutura essa técnica não conseguiu identificar os aspectos (diâmetro e frequência) da curva experimental. Com o carregamento, as curvas acumuladas de tamanho dos poros vão gradativamente se distanciando, devido a melhor graduação dos poros que a carga proporciona. Esse mesmo comportamento não é verificado nas curvas de retenção.

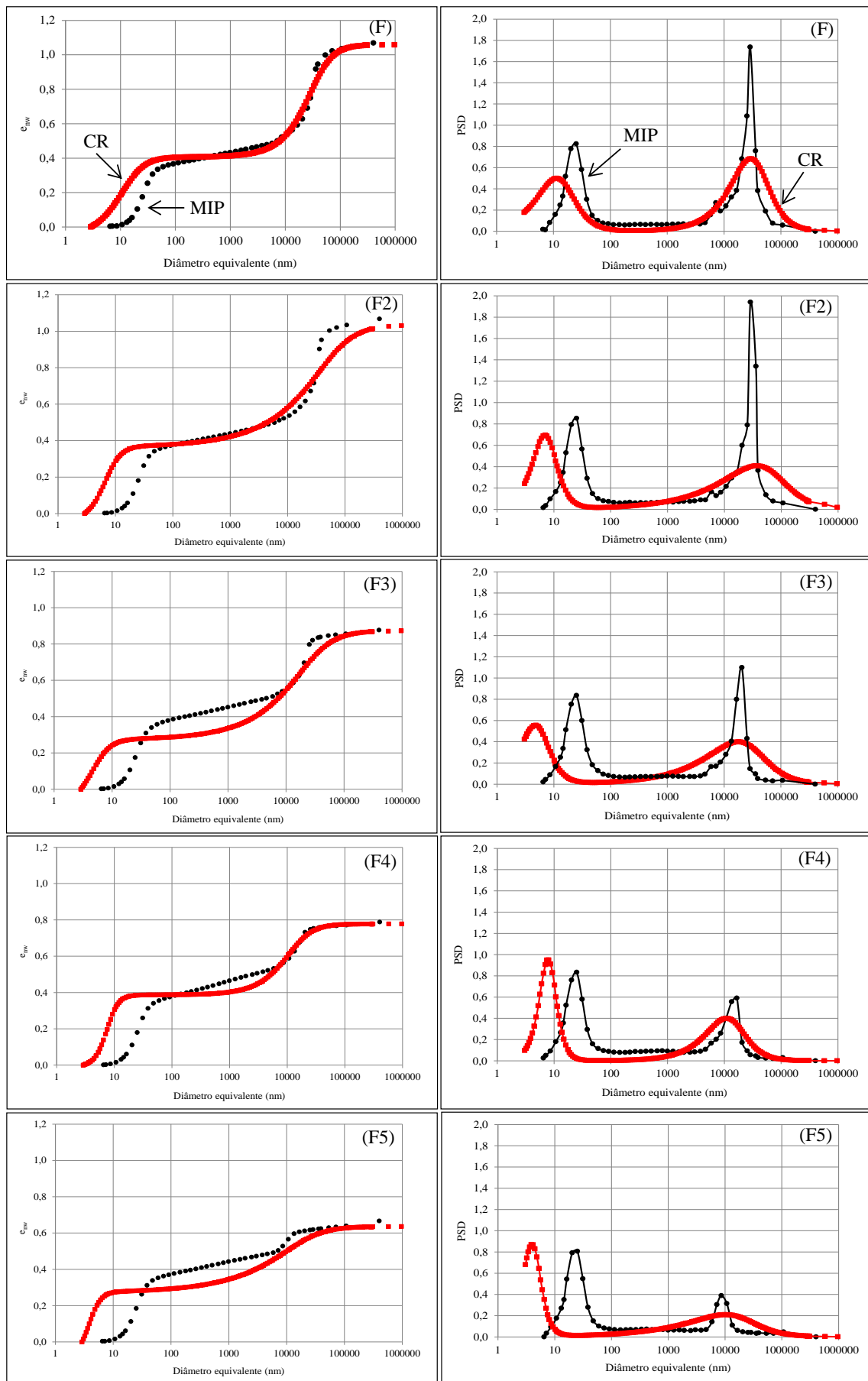


Figura 5.4 – Curvas Acumuladas de Tamanho dos Poros e PSD do grupo F.

A Figura 5.5 apresenta a distribuição de poros do grupo I, J e K, obtidas pelo MIP e pela curva de retenção. As análises realizadas para os grupos anteriores se aplicam também neste caso. É interessante notar que há uma diferenciação na forma das curvas, e não somente nos valores. Os resultados obtidos pelas curvas de retenção apresentam uma estrutura mais uniforme, ou seja, uma distribuição de poros mais uniformes do que as medidas pelo MIP. A técnica utilizada para obtenção da curva de retenção (papel filtro) possui uma influência que não permite distinguir seus efeitos na previsão da curva de porosimetria. A falta de controle do que acontece com o volume da amostra durante o processo de umedecimento, a utilização de varias amostras e a própria variabilidade da técnica impedem que seja feita uma correta distinção entre os fenômenos, impossibilitando assim o tratamento destes.

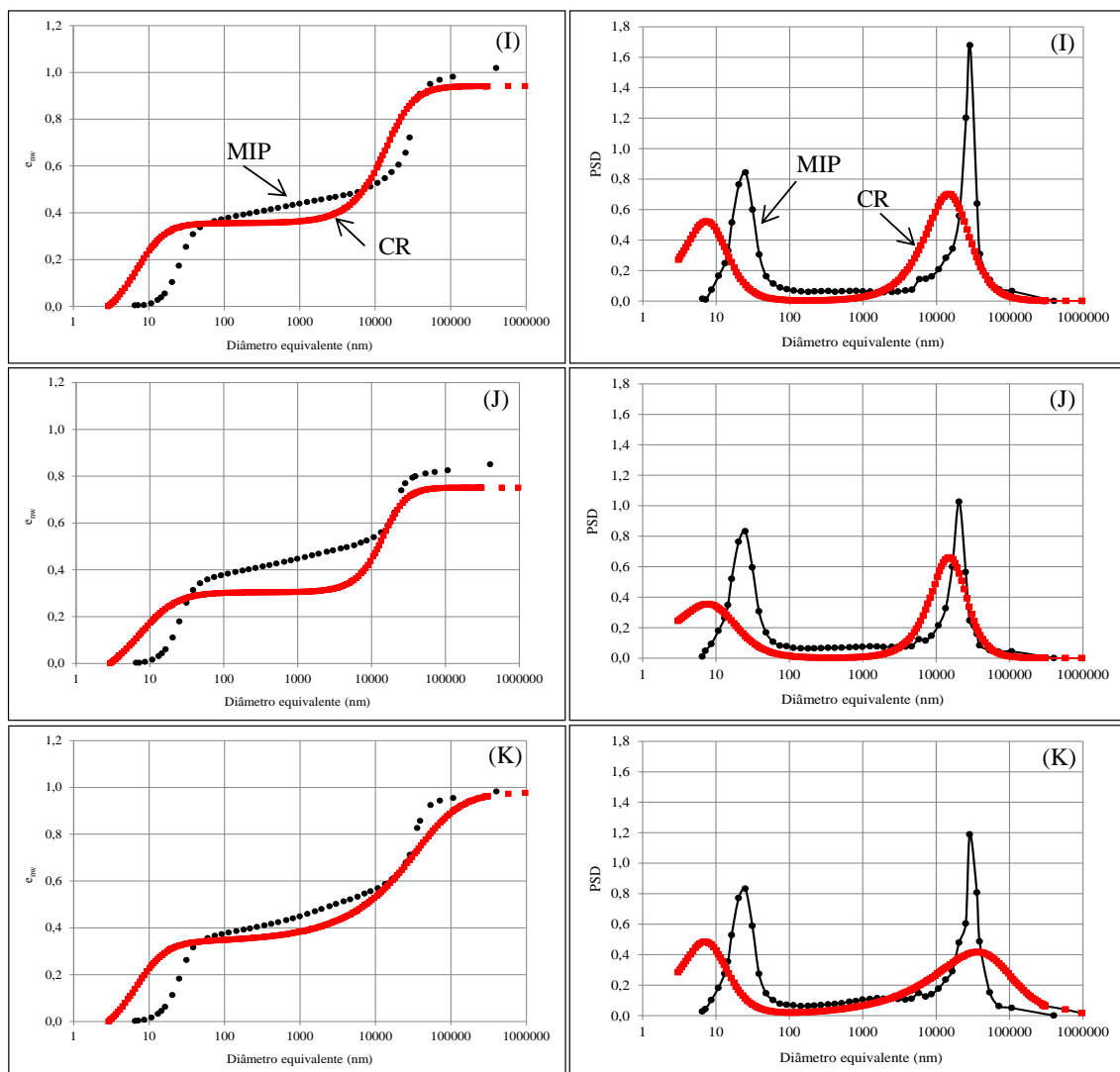


Figura 5.5 – Curvas Acumuladas de Tamanho dos Poros e PSD do grupo I-J-K.

Até então foram comparados os resultados experimentais do MIP com a previsão advinda do ajuste da curva de retenção. Lopes *et al.* (2014) verificou que o intervalo selecionado para o

cálculo é de extrema importância. Assim, se para uma curva está sendo usada uma função contínua, que é o ajuste da Equação 5.2, e na outra os dados discretos, nessa comparação há problemas. Dessa forma as Figuras 5.6 a 5.8 apresentam as curvas de distribuição dos poros oriundas dos ajustes dos dados experimentais do MIP e da curva de retenção.

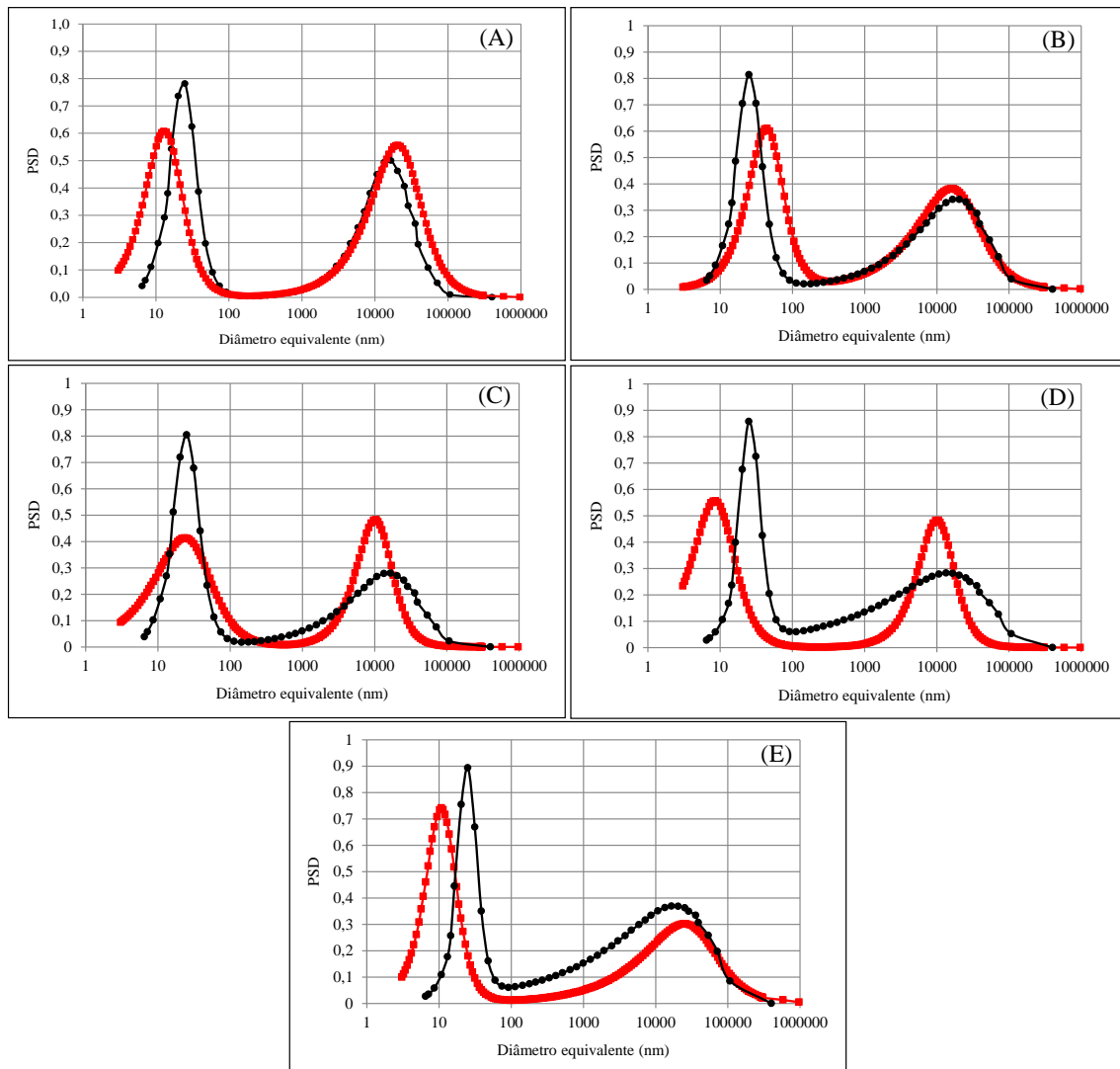


Figura 5.6 – PSD do MIP e do Ajuste do Grupo A-B-C-D-E.

Verifica-se que a boa previsão do diâmetro do poro dominante macroestrutural se manteve, e adicionalmente o cálculo da frequência melhorou consideravelmente. Porém, nenhum benefício foi observado na micro. Cabe destacar que a água armazenada nos microporos não está submetida ao regime capilar, hipótese que é utilizada para associar a pressão de injeção do mercúrio com o diâmetro dos poros. Desta forma, é necessária uma correção para uma previsão adequada.

De uma forma geral, a resposta obtida utilizando o ajuste da curva de retenção para determinar a distribuição de poros foi melhor. Porém isso não significa que este é o

procedimento correto, visto que a modelagem pode mascarar a realidade, e simplesmente transladar as curvas de um espaço para outro.

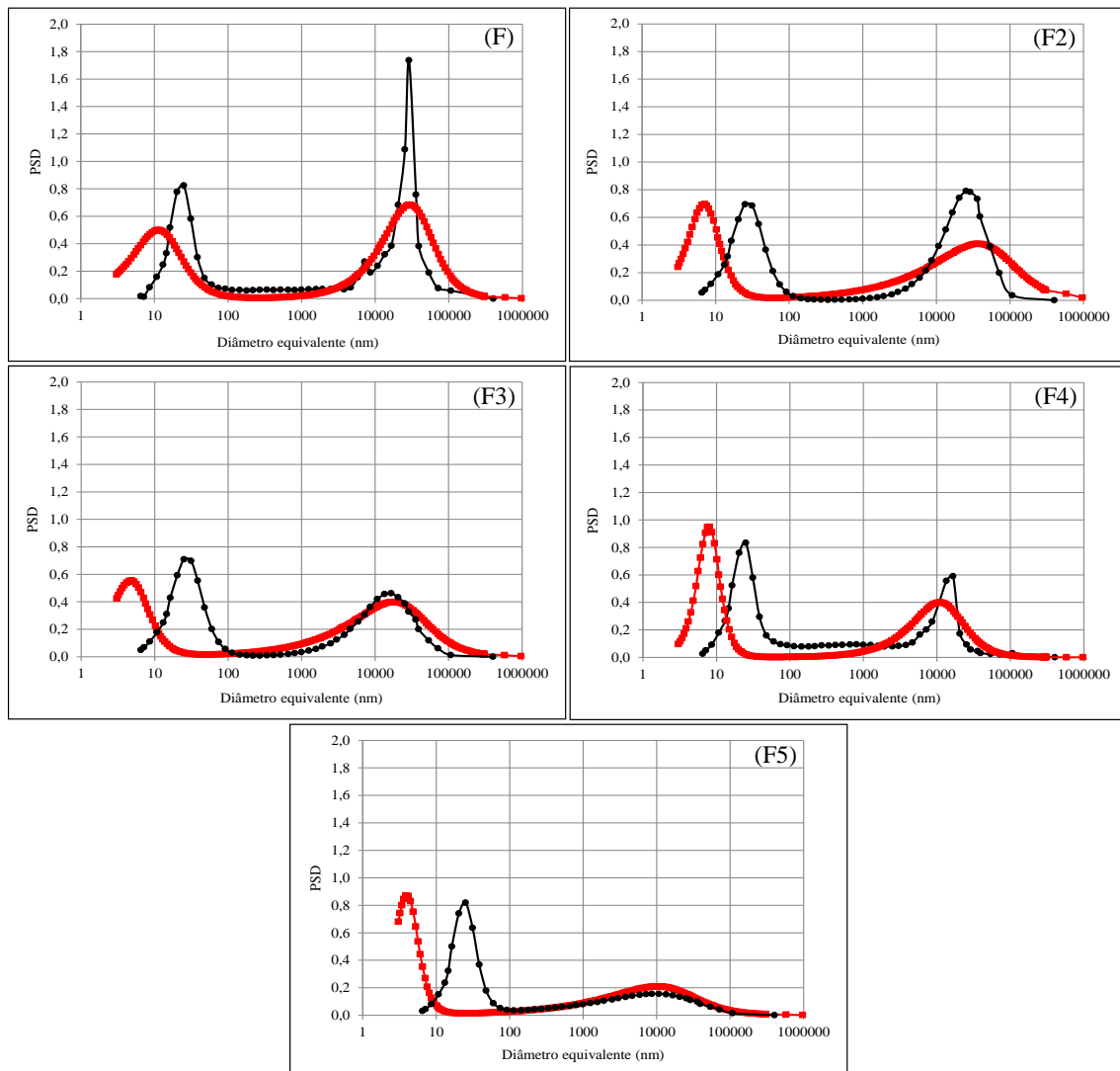


Figura 5.7 – PSD do MIP e do Ajuste do Grupo F.

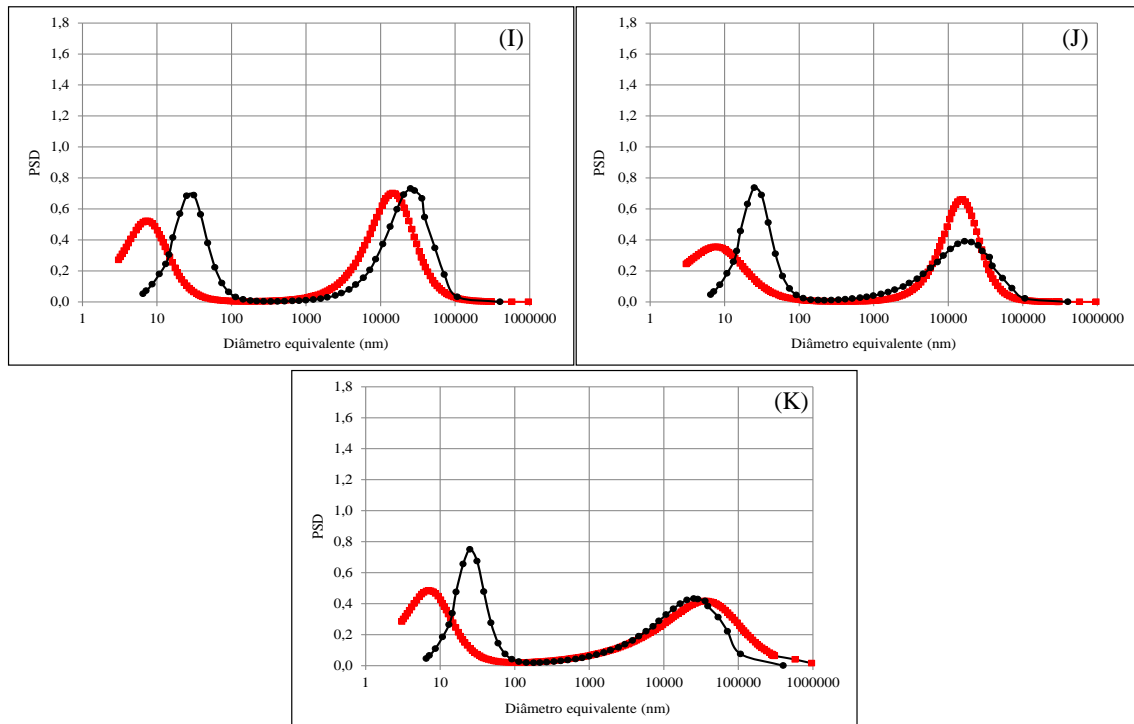


Figura 5.8 – PSD do MIP e do Ajuste do Grupo I-J-K.

5.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS POROS

Considerando que a microestrutura não varia, ou que essa variação é desprezível, uma nova análise associada à variação dos poros efetivos pode ser realizada utilizando um índice de vazios relativo ou efetivo, definido pela Equação 5.4.

$$e_r = \frac{(e_{nw} - e_{min})}{(e_{max} - e_{min})} \quad (5.4)$$

Onde, e_{nw} é o índice de vazios preenchido por mercúrio; e_{max} o maior índice de vazios calculado no ajuste; e, e_{min} o índice de vazios da micro (e_m) calculado no ajuste.

A curva de distribuição do tamanho dos poros efetivos assemelha-se à curva de distribuição de grãos, mais conhecida como curva granulométrica. Devido a essa semelhança, os coeficientes de não uniformidade (CNU) e de curvatura (CC), utilizados na análise das curvas granulométricas, foram calculados para essa nova curva. Esses coeficientes estão apresentados nas Equações 5.5 e 5.6.

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (5.5)$$

$$CC = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \times D_{60})} \quad (5.6)$$

Onde D_{10} , D_{30} e D_{60} são os diâmetros pelos quais passam 10%, 30% e 60% das partículas, respectivamente.

A Figura 5.9 apresenta as curvas de distribuição do tamanho dos poros efetivos do grupo A-B-C-D-E, ou seja, os pontos sobre a curva de compactação. Os coeficientes CNU e CC estão apresentados na Tabela 5.1, juntamente com o parâmetro n_M da Equação 5.3. Analisando-os pode ser verificado que o coeficiente de não uniformidade (CNU) aumenta com o teor de umidade. Os valores obtidos para o coeficiente de curvatura (CC) não indicam um padrão com a umidade e nem a presença de descontinuidades na curva ($CC > 1$). O parâmetro n_M , que indica a distribuição de poros do material, diminui com o aumento da umidade, considerando a microestrutura constante ou não. Assim, pode-se concluir que o aumento da umidade torna a distribuição de poros do solo mais bem graduada. A interseção que ocorre entre as curvas em aproximadamente 15 μm de diâmetro não possui significado físico identificado. Porém, é possível observar que a quantidade de poros maiores que 15 μm tende a diminuir com a compactação, enquanto os menores tendem a surgir, como ilustrado na Figura 5.10.

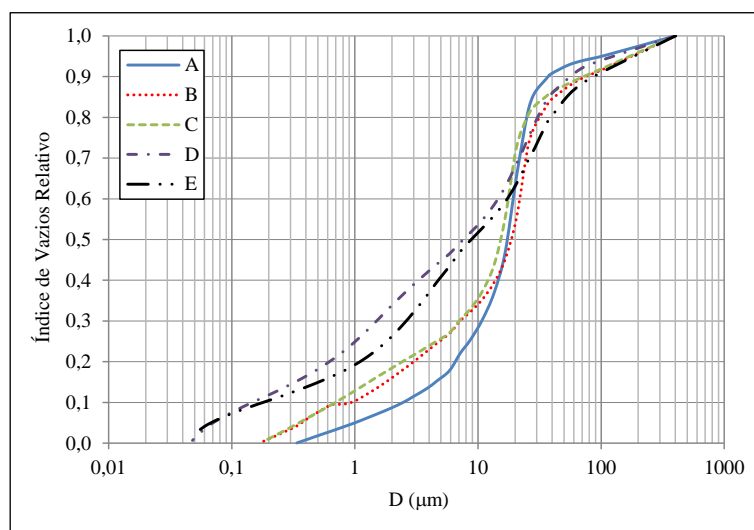


Figura 5.9 – Curvas de Distribuição do Tamanho dos Poros Efetivos do Grupo A, B, C, D e E.

As Figuras 5.11 a 5.13 apresentam as curvas de distribuição do tamanho dos poros efetivos dos grupos F, G e H para diferentes carregamentos. Os coeficientes CNU, CC e n_M estão apresentados nas Tabelas 5.2 a 5.4. O mesmo efeito causado pela umidade pode ser notado para o carregamento, onde o fechamento dos poros fez com que estes se tornassem melhor graduados. Isto pode ser observado tanto nas curvas, como nos valores de CNU, CC e n_M

mostrados nas tabelas, para os três grupos. Essas curvas também não apresentam sinais de descontinuidades.

Tabela 5.1 – Coeficientes de não Uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) do Grupo A, B, C, D e E.

AMOSTRAS	PARÂMETROS						
	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	CNU	CC	n _M	n _M (*mc)
A	2,50	12,0	20	8,0	2,9	2,343	2,342
B	1,00	7,0	22	22,0	2,2	1,730	1,717
C	0,70	7,0	18	25,7	3,9	1,752	1,704
D	0,15	1,6	15	100,0	1,1	1,399	1,573
E	0,18	2,7	18	100,0	2,3	1,422	1,583

*mc: microestrutura constante

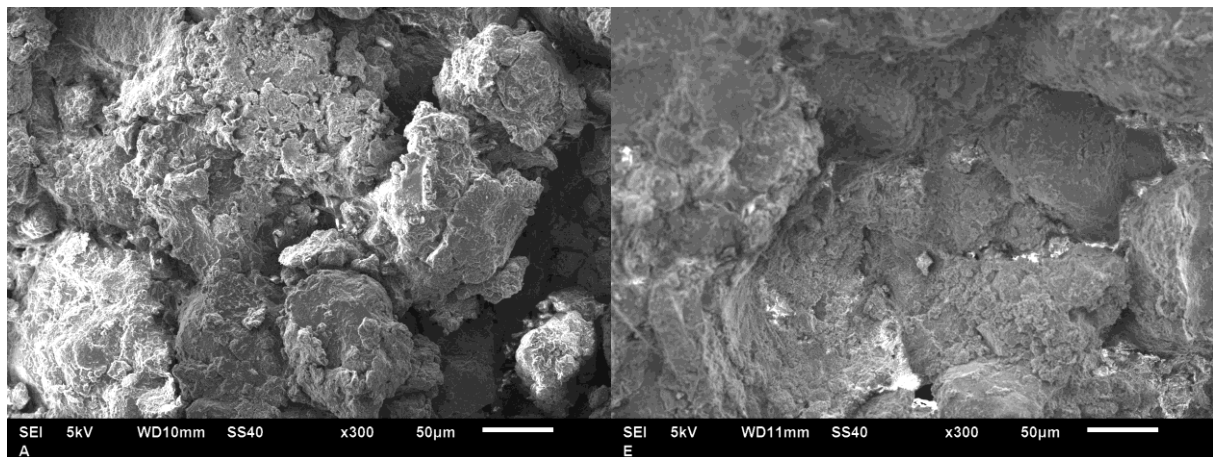


Figura 5.10 – Microscopias Eletrônicas de Varredura dos Pontos A e E.

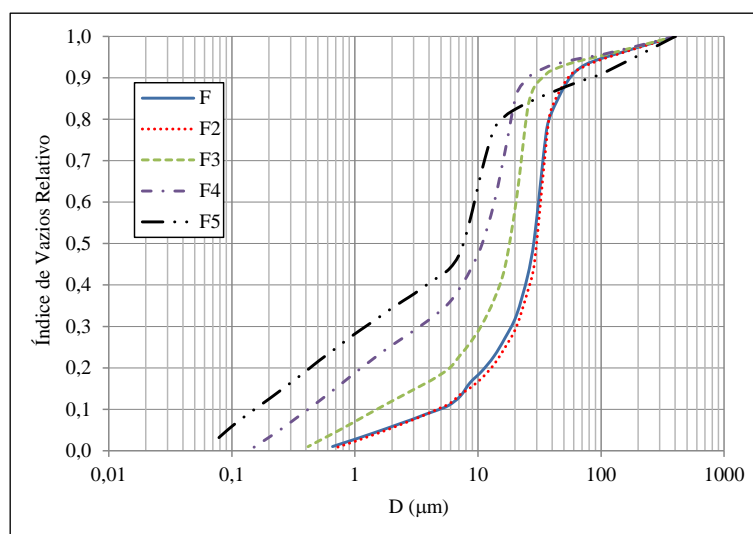


Figura 5.11 – Curvas de Distribuição do Tamanho dos Poros Efetivos do Grupo F.

Tabela 5.2 – Coeficientes de não Uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) do Grupo F.

AMOSTRAS	PARÂMETROS						
	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	CNU	CC	n _M	n _M (mc)
F	4,50	19,0	31,0	6,9	2,6	2,473	2,473
F2	4,50	20,0	31,0	6,9	2,9	2,565	2,405
F3	1,50	11,0	20,0	13,3	4,0	2,207	2,124
F4	0,40	3,5	14,0	35,0	2,2	1,676	1,859
F5	0,17	1,3	9,5	55,9	1,0	1,441	1,861

*mc: microestrutura constante

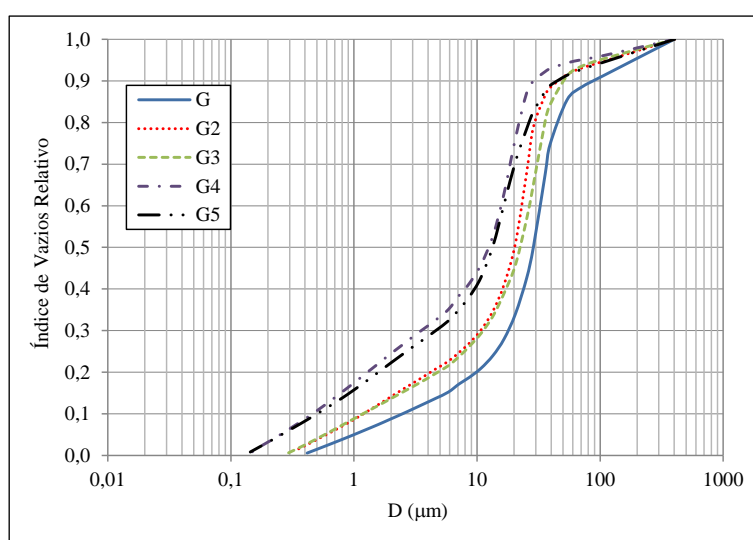


Figura 5.12 – Curvas de Distribuição do Tamanho dos Poros Efetivos do Grupo G.

Tabela 5.3 – Coeficientes de não Uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) do Grupo G.

AMOSTRAS	PARÂMETROS						
	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	CNU	CC	n _M	n _M (mc)
G	2,40	18,0	32	13,3	4,2	2,052	1,898
G2	1,20	12,0	23	19,2	5,2	1,925	1,925
G3	1,20	12,0	27	22,5	4,4	1,862	1,806
G4	0,46	3,5	16	34,8	1,7	1,658	1,791
G5	0,46	4,5	17	37,0	2,6	1,645	1,696

*mc: microestrutura constante

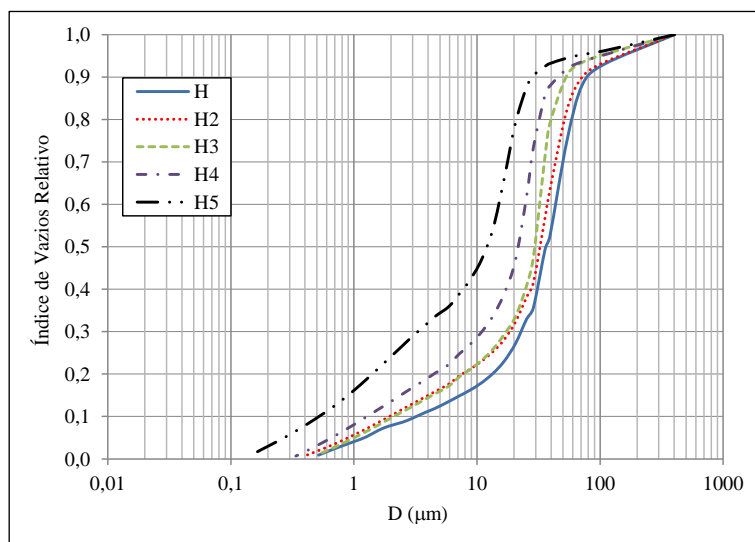


Figura 5.13 – Curvas de Distribuição do Tamanho dos Poros Efetivos do Grupo H.

Tabela 5.4 – Coeficientes de não Uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) do Grupo H.

AMOSTRAS	PARÂMETROS						
	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	CNU	CC	n _M	n _M (mc)
H	3,3	23	44	13,3	3,6	2,052	1,899
H2	2,0	19	38	19,0	4,8	1,879	1,879
H3	2,0	18	32	16,0	5,1	2,060	1,916
H4	1,3	11	25	19,2	3,7	1,922	1,949
H5	0,5	3,4	16	32,0	1,4	1,681	1,872

*mc: microestrutura constante

A Figura 5.14 e a Tabela 5.5 apresentam as curvas de distribuição do tamanho dos poros efetivos e os coeficientes CNU, CC e n_M dos pontos I, J e K. Esses pontos possuem a configuração de uma curva de compactação, e seu comportamento em relação à distribuição do tamanho dos poros foi similar ao apresentado pelo grupo A-B-C-D-E. O coeficiente de não uniformidade (CNU) crescente com o teor de umidade, ou seja, curvas melhor graduadas, sem indícios de descontinuidades (CC > 1).

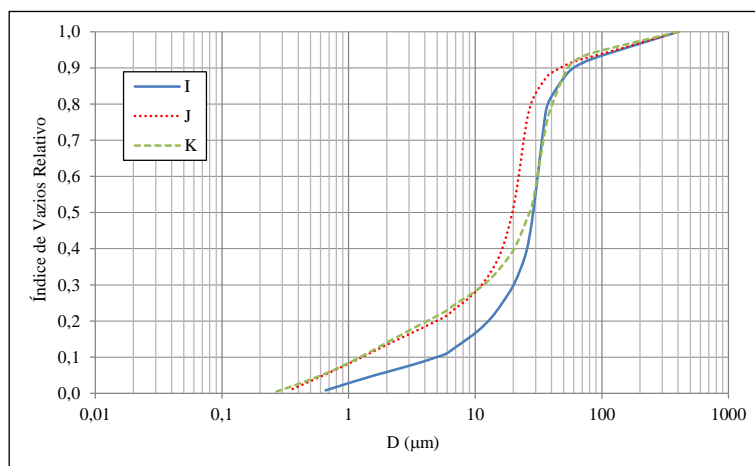


Figura 5.14 – Curvas de Distribuição do Tamanho dos Poros Efetivos dos pontos I, J e K.

Tabela 5.5 – Coeficientes de não Uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) dos pontos I, J e K.

AMOSTRAS	PARÂMETROS					
	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	CNU	CC	n _M
I	5,00	20	31	6,2	2,6	2,556
J	1,30	12	22	16,9	5,0	2,008
K	1,20	12	31	25,8	3,9	1,775

Mantendo a umidade aproximadamente constante e aumentando a energia aplicada o coeficiente de não uniformidade (CNU) cresce, indicando uma melhor graduação dos poros devido ao seu fechamento. O coeficiente de curvatura (CC) não apresenta tendência com alteração da energia. A Tabela 5.6 apresenta os valores dos parâmetros supracitados.

Tabela 5.6 – Comparativo do CNU e CC com Alteração da Energia.

ENERGIA	PONTOS	CNU	CC	ENERGIA	PONTOS	CNU	CC
↑	C	25,7	3,9	↑	B	24,4	2,5
	J	16,9	5,0		I	6,2	2,6
	G	13,3	4,2		F	6,9	2,6

Analisando as Tabelas 5.1 a 5.5 verifica-se que o parâmetro n_M é capaz de avaliar a uniformidade da curva assim como o CNU. Assim não seria mais necessário o cálculo deste último parâmetro, visto que o n_M fornecido no ajuste da curva de distribuição de poros já conseguiria informar tal característica.

Vale ressaltar que todas essas análises de distribuição do tamanho dos poros efetivos e suas variações estão relacionadas aos macroporos, visto esta ser a região que realmente se altera.

5.4 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE AJUSTE DAS CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS POROS

De posse das informações obtidas para a curva de distribuição de poros, uma ferramenta importante seria um modelo que permitisse a avaliação dessa curva para qualquer carregamento. Assumindo que a microestrutura se mantém constante, seria necessário determinar apenas os parâmetros para a macroestrutura (e_M , α_M , n_M).

Para a avaliação da variação dos parâmetros de ajuste das curvas de distribuição do tamanho dos poros foi considerada a microestrutura constante. As Figuras 5.15 a 5.18 apresentam a variação dos parâmetros α (poro dominante) e n (distribuição de poros) com o índice de vazios, todos relacionados à macroestrutura .

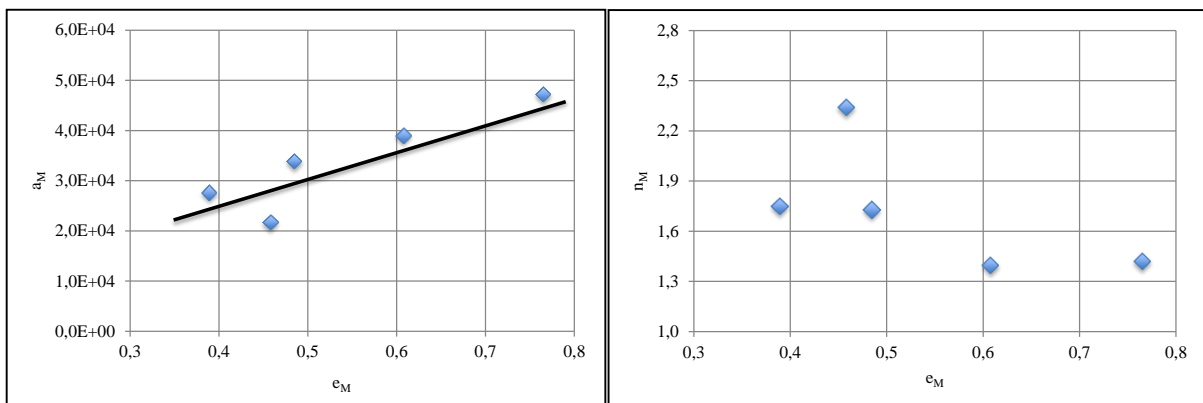


Figura 5.15 – Variação dos Parâmetros de Ajuste do Grupo A-B-C-D-E.

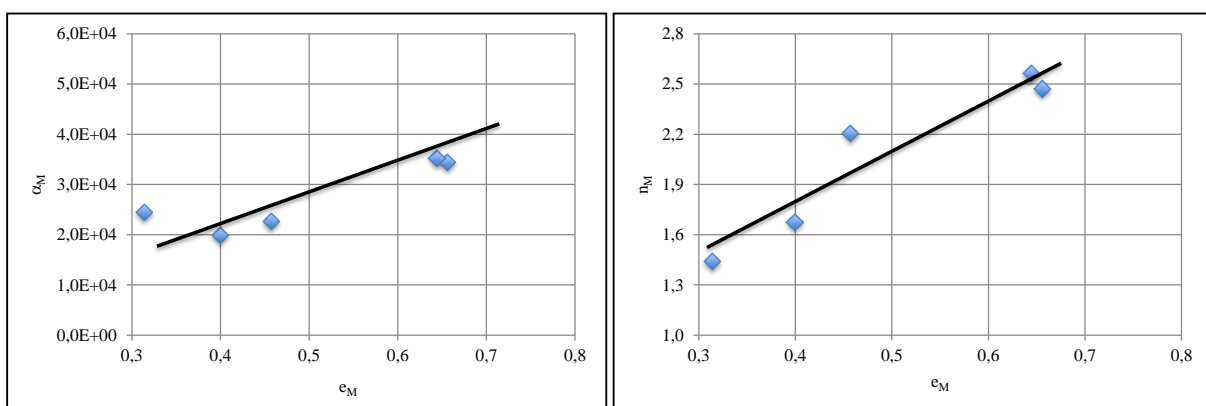


Figura 5.16 – Variação dos Parâmetros de Ajuste do Grupo F.

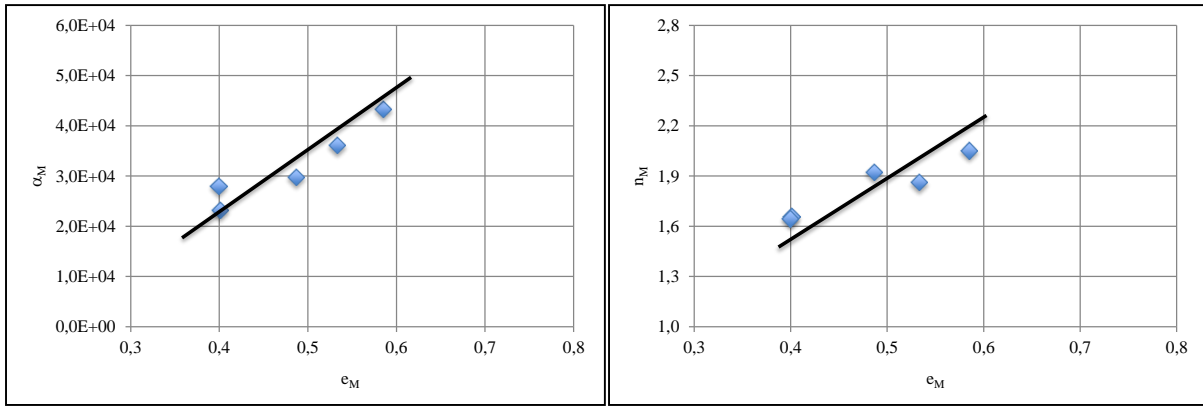


Figura 5.17 – Variação dos Parâmetros de Ajuste do Grupo G.

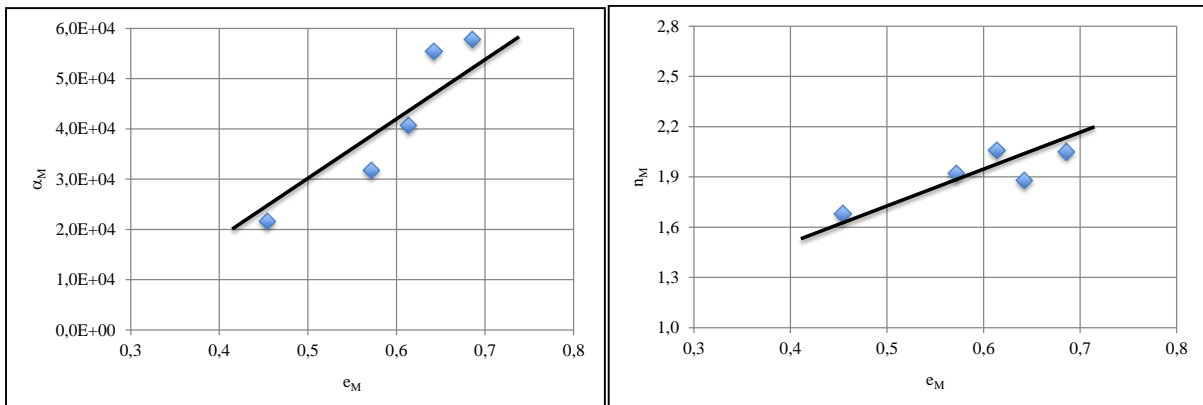


Figura 5.18 – Variação dos Parâmetros de Ajuste do Grupo H.

Analisando a relação α_M versus e_M verifica-se fortes evidências de que existe uma relação linear entre o diâmetro do poro dominante e o índice de vazios, ambos da macro, independente da solicitação externa sofrida (compactação ou carregamento).

Com relação ao parâmetro n_M , também pode-se observar uma relação linear entre este e o índice de vazios da macro, com exceção do grupo A-B-C-D-E que não apresentou tendência definida. Porém, cabe destacar que os pontos D e E apresentaram curvas trimodais e o ajuste realizado utilizou uma equação bimodal.

Assim, o fato de que existe uma tendência entre os parâmetros α e n com o índice de vazios, ambos da macroestrutura, fica claro, no entanto ela não é única. Este estudo poderá ser continuado em pesquisas futuras visando ampliar o entendimento entre a relação variável macroscópica versus parâmetro microscópico. A Tabela 5.7 apresenta os coeficientes angulares e lineares da reta de ajuste (a e b) e os valores de R^2 das equações das retas apresentadas nas Figuras 5.15 a 5.18.

Tabela 5.7 – Coeficientes a , b e R^2 .

GRUPOS	α_M			η_M		
	a	b	R^2	a	b	R^2
A-B-C-D-E	60231	1366	0,814	-	-	-
F	40520	7368	0,764	3,1157	0,5337	0,909
G	90729	-11560	0,897	2,0290	0,8525	0,894
H	165008	-56367	0,894	1,4812	1,0399	0,716

5.5 RESUMO

Neste capítulo foram apresentadas as principais discussões dos resultados obtidos na pesquisa. Foi sugerida uma correção da curva de compactação, considerando somente os poros relativos à macroestrutura, visto esta ser a parcela que realmente se altera com a compactação e o carregamento. Também foram discutidos: a aplicação da metodologia desenvolvida por Mascarenha (2008), acrescentando a análise entre ajustes; uma análise quantitativa da distribuição dos poros macroestruturais, buscando um parâmetro de aferição da uniformidade da curva; e, uma análise da variação dos parâmetros de ajuste das curvas de distribuição do tamanho dos poros, visando entender as relações entre as variáveis macroscópicas e os parâmetros microscópicos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para alcançar o objetivo principal desta tese, que era avaliar o comportamento hidromecânico-estrutural de um solo tropical compactado em diferentes condições de umidade, energia aplicada e índice de vazios, foi realizada uma ampla campanha experimental. Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas com a realização destes ensaios, e também sugestões de temas para estudos futuros, que embora relacionados a esta pesquisa, não puderam ser desenvolvidos.

6.1 CONCLUSÕES

- A qualidade dos modelos constitutivos destinados aos solos não saturados está intimamente relacionada à capacidade de representação das variáveis de tensão adotadas (teoria de tensão efetiva em solos não saturados);
- A curva de retenção de água do solo é reflexo das características intrínsecas do material e de sua história de tensões (solicitações mecânico e hidráulicas, tanto internas como externas);
- Para a obtenção de uma caracterização hidráulica (curva de retenção) adequada, a utilização conjunta de diferentes técnicas de medidas de sucção se faz necessária, visto as limitações que cada uma delas possui;
- O desenvolvimento de modelos de ajuste da curva de retenção adequados ao tipo de material em estudo é muito importante para uma previsão de comportamento verídica. Adicionalmente, a determinação dos parâmetros desse modelo de maneira cuidadosa também é imprescindível para a qualidade dos resultados;
- É de extrema importância o entendimento da microestrutura dos solos, e como ela se relaciona com o comportamento hidráulico e mecânico destes. Nesse sentido, uma técnica que consiga definir satisfatoriamente a estrutura deverá ser empregada para uma completa caracterização dos solos;
- A teoria da estrutura do solo compactado proposta por Lambe (1958) pode ser válida para os solos das regiões frias, para onde o mesmo foi desenvolvido. No entanto, para os solos tropicais essa teoria não se aplica;
- O solo do Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (PPG-UnB) é muito bem caracterizado, consequência das diversas pesquisas realizadas utilizando este material. Ele é reconhecido como um solo

residual laterítico, com elevada porosidade e baixa capacidade de suporte, com IP das primeiras camadas em torno de 10;

- O ensaio de papel filtro é um método simples de medição de sucção. No entanto, ele possui algumas limitações devidas a forte influência do operador e do ambiente nos resultados;
- O ensaio de WP4 é uma excelente alternativa ao ensaio de papel filtro, visto que esse exclui consideravelmente a influência do operador e do ambiente, além da rapidez na realização dos ensaios;
- O ensaio de placa de sucção fornece resultados satisfatórios na escala de 1 a 16 kPa, onde outros métodos, como o papel filtro e o WP4, não conseguem atuar;
- O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) é um dos métodos de estudo da microestrutura mais empregado atualmente;
- A microscopia eletrônica de varredura é uma boa ferramenta na análise qualitativa da estrutura dos solos;
- Neste trabalho, independente do efeito externo aplicado (compactação e carregamento), a microestrutura do solo não se alterou;
- O processo de preparação de amostras empregado conseguiu representar satisfatoriamente a metodologia planejada;
- Os índices de vazios dos corpos de prova variaram dentro de uma faixa aceitável;
- O aumento no teor de umidade suaviza a forma em S da curva de retenção;
- O modelo de ajuste proposto por Durner (1994) ajusta adequadamente os resultados experimentais de curva de retenção e de distribuição de poros do solo em estudo;
- Acredita-se que o processo de compactação rearranja os macroporos pela modificação dos originais;
- O carregamento aparentemente não cria novos poros, mas os destroem ou os reduzem de tamanho;
- Seria mais adequado utilizar uma curva de compactação que considerasse apenas os macroporos, visto que esta é a parcela que realmente se altera;
- O método proposto por Mascarenha (2008), de determinação da curva de distribuição de poros pela curva de retenção, é assertivo no diâmetro do poro dominante da macroestrutura, mas não consegue determinar corretamente a frequência (PSD), e nenhum dos dois aspectos (diâmetro e frequência) da micro;

- Em solos trimodais, a previsão de Mascarenha (2008) não consegue capturar satisfatoriamente nenhum dos aspectos das curvas experimentais;
- Comparando os ajustes dos resultados experimentais do MIP com a previsão advinda do ajuste da curva de retenção verifica-se uma boa previsão do diâmetro do poro dominante macroestrutural, e uma melhora no cálculo da frequência. Porém, nenhum benefício foi observado para a micro;
- O aumento do teor de umidade e da energia aplicada torna a distribuição de poros do solo mais bem graduada;
- O coeficiente de não uniformidade (CNU) avalia o quão bem graduada é uma curva. No entanto, o parâmetro n_M também é capaz de fazer essa avaliação.
- Existe uma tendência entre os parâmetros α_M e n_M com o índice de vazios. No entanto, ela não é única.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Nesta pesquisa as curvas de retenção foram determinadas utilizando as técnicas de papel filtro e placa de sucção. Somente uma curva foi determinada utilizando o WP4. Sugere-se a realização de um trabalho semelhante que utilize o WP4 para a determinação de todas as curvas de retenção.
- Estudar a variabilidade do corpo de prova, sob o ponto de vista de estrutura;
- Estudar a tendência entre os parâmetros α e n com o índice de vazios, ambos da macroestrutura, visando ampliar o entendimento dessas relações.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457: Amostras de Solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984, 6 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6508: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984, 8 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984, 13 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: Solo - ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986, 10 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. MB 3336: Solo - ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990, 13 p.
- Airò Farulla, C., Battiato, A., Ferrari, A. (2011). The void ratio dependency of the retention behavior for a compacted clay. *Unsaturated Soils*, Alonso & Gens (eds), Taylor & Francis Group, London: 417-422.
- Alonso, E. E., Pereira, J. M., Vaunat, J., & Olivella, S. (2010). A microstructurally based effective stress for unsaturated soils. *Géotechnique*, 60(12), 913–925. doi:10.1680/geot.8.P.002
- Alonso, E. E., Romero, E., & Hoffmann, C. (2011). Hydromechanical behaviour of compacted granular expansive mixtures: experimental and constitutive study. *Géotechnique*, 61(4), 329–344. doi:10.1680/geot.2011.61.4.329
- Alonso, E. E., Pinyol, N. M., & Gens, A. (2012). Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling. *Géotechnique*, 1–16. doi:10.1680/geot.11.P.134
- Barrera, M. B. (2002). Estudio Experimental del Comportamiento Hidro-mecánico de Suelos Colapsables. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia de Terreno e Cartografia, Universidade Politécnic da Catalunia, Barcelona, 480 p.
- Bishop, A. W. & Donald, I.B. (1961). The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus. *Proc. of the 5th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris: 13-21.
- Borges, C. R., Gitirana, G. F. N., Vargas, C. A. L. & Guimarães, R. C. (2010). Uso de um papel filtro de baixo custo na determinação de curvas características. XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica COBRAMSEG, Gramado, RS.

- Borges, C. R. (2014). Estudo microestrutural do comportamento hidromecânico do solo de Brasília-DF, Distrito Federal, 2014. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-102/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 111p.
- Buenfil, C. M., Romero, E., Lloret, A. & Gens, A. (2004). Experimental study on the hydromechanical behaviour of a silty clay. Proc. 2nd Int. Workshop on Unsaturated Soils, Anacapri, 15–29.
- Buenfil, C. M. B. (2007). Caracterización Experimental del Comportamiento Hidromecánico de una Arcilla Compactada. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia de Terreno e Cartografia, Universidade Politécnica da Catalunia, Barcelona, 466 p.
- Camapum de Carvalho, J., Crispel, J.J., Mieussens, C. & Nardone, A. (1987). Reconstituição de Corpos de Prova em Laboratório – Teoria e Prática Operacional. Relatório de Pesquisa, LPC nº 145, Laboratório Regional de Toulouse, Toulouse, França, 88 p.
- Camapum de Carvalho, J., Mortari, D. (1994). Caracterização geotécnica de solos porosos do Distrito Federal. III Simpósio Brasileiro de Escavações Subterrâneas, Brasília. p. 109-122.
- Camapum de Carvalho, J. & Leroueil, S. (2000). Modelo de normalização da curva característica. 32º Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, DF, 1:96-106.
- Camapum de Carvalho, J., Marinho, F. A. M., Oliveira, O. M., Gitirana, G. de F. N. Jr. (2012). Contribuição ao Entendimento do Comportamento dos Solos Não Saturados. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica COBRAMSEG, Porto de Galinhas, Pe.
- Cardoso, R., Alonso, E. E., Maranha das Neves, E. (2013). A constitutive model for compacted expansive and bonded marls. *Géotechnique*, 13: 1116–1130.
- Chiu, C. F., Ni, X. W., Zhang, L. S. (2014). Effect of hydraulic hysteresis on shear strength of unsaturated clay and its prediction using a water retention surface. *Engineering Geology*, 173: 66–73.
- Cordão Neto, M. P. (2005). Análise hidro-mecânica de barragens de terra construídas com materiais colapsíveis. Tese de Doutorado, Publicação G.TD – 028/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152 p.
- Delage, P. e Lefebvre, G. (1984). Study of the structure of a sensitive champlain clay and of its evolution during consolidation. *Canadian Geotechnique Journal*, 21: 21-35.
- Delage, P., Audiguier M., Cui, Y. J., Howatt, M. D. (1996). Microstructure of a compacted silt. *Canadian Geotechnique Journal*, 33: 150-158.
- Delage, P., Romero, E. Tarantino, A. (2008). Recent developments in the techniques of controlling and measuring suction in unsaturated soils. Proc. 1st Eur. Conf. Unsaturated Soils, Dirham, UK, London, ISBN 978-0-415-47692-8, 519-523.

- Della Vecchia, G., Jommi, C., Romero, E. (2013). A fully coupled elastic-plastic hydromechanical model for compacted soils accounting for clay activity. *Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37, 503–535.
- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Res.*, 30, 211–223.
- Escário, V. & Saez, J. (1973). Measured of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction. *Proc. 3º Int. Conf. Expansive Soils*, Haifa: 195-200.
- Farias, W. M., Camapum de Carvalho, J., da Silva, G. F., Campos, I. C. O., Santos Neto, P. M. (2011). Influência da Compactação nos micro e mesoporos nanoestruturados e na área superficial específica de um solo laterítico. VII Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, Pirenópolis, GO.
- Ferrari, A., Seiphoori, A., Rüedi, J., Laloui, L. (2014). Shot-clay MX-80 bentonite: An assessment of the hydro-mechanical behaviour. *Engineering Geology*, 173: 10–18.
- Fredlund, D G, & Morgenstern, N. R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Engineering Division*, GT5(103), 447–466.
- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, New York, United States of America, 517 p. Fredlund, D.G. & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 521-532.
- Fuentes, W., Triantafyllidis, Th. (2013). On the effective stress for unsaturated soils with residual water. *Géotechnique (Technical Note)*, 16: 1451–1455.
- Gallipoli, D., Wheeler, S. J. & Karstunen, M. (2003). Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil. *Géotechnique*, 53: 105-112.
- Ghirian, A., Fall, M. (2014). Coupled thermo-hydro-mechanical–chemical behaviour of cemented paste backfill in column experiments Part II: Mechanical, chemical and microstructural processes and characteristics. *Engineering Geology*, 170: 11–23.
- Guimarães, R.C. (2002). *Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-091A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.
- Griffiths, F.J. & Joshi, R.C (1989). Changes in pore size distribution due to consolidation of clays. *Géotechnique*, 39 (1): 159-167.
- Ho, Y.F. & Fredlund, D.G. (1982). A multistage triaxial test for insaturated soils. *Geotechnical Testing Journal*, 5 (½): 18-25.
- Hu, R., Chen, Y.-F., Liu, H.-H., Zhou, C.-B. (2013). A water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity model for deformable soils: consideration of the change in pore-size distribution. *Geotechnique* 63, N 16: 1389–1405.

- Juang, C.H. & Holtz, R.D. (1986). Fabric, pore size distribution and permeability of sandy soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112 (9): 855-868.
- Kaway, K., Kato, S. & Karube (2000). The model of water retention curve considering effects of void ratio. *Proceedings of the Asian Conference of Unsaturated Soils, Singapore*: 329-334.
- Khosravi, A. & McCartney, J. S. (2012). Impact of Hydraulic Hysteresis on the Small-Strain Shear Modulus of Unsaturated Soils. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138 (11): 1326–1333.
- Kim, B. S., Shibuya, S., Park, S. W., Kato, S. (2010). Application of suction stress for estimating unsaturated shear strength of soils using direct shear testing under low confining pressure. *Can. Geotech. J.* 47 (9), 955–970.
- Koliji, A, Laloui, L., & Vulliet, L. (2010). Constitutive modeling of unsaturated aggregated soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34(17), 1846–1876. doi:10.1002/nag.888
- Lacasse, S., Nadim, F. (1996). Uncertainties in characterising soil properties. In: *Proceedings of the 1996 Conference on Uncertainty in the Geologic Environment, UNCERTAINTY'96, Madison, Wisc., 31 July – 3 August 1996. ASCE, New York. Part 1, pp. 49–75.*
- Lambe, T. W. (1958). The engineering behaviour of compacted clay. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE* 84, No. SM2, 1-35.
- Lopes, B. C. F. L., Tarantino, A., Cordão Neto, M. P. (2014). An Approach to detect micro- and macro-porosity from MIP data. *Unsaturated Soils: Research & Applications, Sydney: Easychar, v. 1, p. 1-10.*
- Lu, N., Kim, T. H., Sture, S., Likos, W. J. (2009). Tensile strength of unsaturated sand. *Journal Eng. Mech. ASCE* 135 (12): 1410–1419.
- Lu, N., Godt, J. W., Wu, D. T. (2010). A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. *Water Resource Res.* 46, W05515.
- Marinho, F.A.M.(1995) A técnica do papel filtro para medição de sucção. *Encontro sobre Solos Não Saturados, Rio Grande do Sul, 1: 112-125.*
- Marinho, F. A. M. (2005). Nature of Soil–Water Characteristic Curve for Plastic Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(5), 654–661. doi:10.1061/(ASCE)1090- 0241(2005)131:5(654)
- Martinez, G.S.S. (2003). *Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Lateríticos da Formação Barreiras. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, RS, 266p.*
- Mascarenha, M.M.A. (2003). *Influência do Recarregamento e da Sucção na Capacidade de*

- Carga de Estacas Escavadas em Solos Porosos Colapsíveis. Dissertação de Mestrado, Publicação n G.DM-098A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.
- Mascarenha, M.M.A. (2008). Influência da Microestrutura no Comportamento Hidromecânico de uma Argila Siltosa não Saturada Incluindo Pequenas Deformações. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-056/08, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 158 p.
- Mašín, D. (2013). Double structure hydromechanical coupling formalism and a model for unsaturated expansive clays. *Engineering Geology* 165: 73–88.
- Mitchell, J. K., Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (Third., p. 577). New Jersey: John Wiley & Sons, INC.
- Mountassir, G. E., Sánchez, M., Romero, E. (2014). An experimental study on the compaction and collapsible behaviour of a flood defence embankment fill. *Engineering Geology*, 179: 132–145.
- Murrieta, P. & Camapum de Carvalho, J. (1995). Métodos para medir sucção em solos não saturados. *Encontro Sobre Solos não-Saturados*, Porto Alegre, RS: 143-158.
- Musso, G., Romero, E. e Della Vecchia, G. (2013). Double-structure effects on the chemo-hydro-mechanical behaviour of a compacted active clay. *Geotechnique* 63, N 3: 206–220.
- Nogami, J. S., Villibor, D. F. (1980). Caracterização e Classificação Gerais de Solos para Pavimentação: Limitação do Método Tradicional, Apresentação de uma Nova Sistemática. *Anais da XV Reunião Anual de Pavimentação, ABPV*. Belo Horizonte, MG.
- Otálvaro, I. F. C. (2013). Comportamento Hidromecânico de um Solo Tropical Compactado, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 122 p.
- Pedroso, D. M. e Williams, D. J. (2010). A novel approach for modelling soil–water characteristic curves with hysteresis. *Computers and Geotechnics*. 37: 374–380.
- Pedroso, D. M. e Williams, D. J. (2011). Automatic calibration of soil–water characteristic curves using genetic algorithms. *Computers and Geotechnics*. 38: 330–340.
- Peixoto, A. S. P., Fabbri, G. T. P., Nogueira, J. B. (1996). Uma Avaliação da Repetitividade dos Parâmetros que Compõem a Classificação MCT. *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE*, 8. Vol. 1, Rio de Janeiro, p. 251-259.
- Penumadu, D. & Dean, J. (1999). Compressibility effect in evaluating the pore-size distribution of kaolin clay using mercury intrusion porosimetry. *Canadian Geotechnical Journal*, 37: 393-405.

- Penumadu, D., Dean, J. (2000). Compressibility effect in evaluating the pore-size distribution of kaolin clay using mercury intrusion porosimetry. *Canadian Geotechnical Journal*, 37: 393–405.
- Pereira, J. H. F. (1996). Numerical Analysis of the Mechanical Behavior of Collapsing Earth Dams During First Reservoir Filling. University of Saskatchewan.
- Pereira A. (2006). Resistência ao Cisalhamento de Solos não Saturados: Análise Experimental e Teórica. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 153 p.
- Pereira, J. M., Coussy, O., Alonso, E. E., Vaunat, J., Olivella, S. (2011). Is the degree of saturation a good candidate for Bishop's χ parameter? *Unsaturated Soils*, Alonso & Gens (eds), Taylor & Francis Group, London: 913-919.
- Pessoa, F.H.C., Camapum de Carvalho, J. & Gouveia, L.A. (2005). Análise das propriedades físico-químicas, microestruturais e mecânica de um solo fino estabilizado com cal. II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, Goiânia, 1: 251-260.
- Prapaharam, S., Altschaeffl, A. G., & Dempsey, B. J. (1985). Moisture curve of compacted clay: mercury intrusion method. *Journal of Geotechnical and Engineering*, 111(9), 1139–1143.
- Presca, E. P., Lins, A.H.P. , Campos, L.E.P. , Ignatius, S.G. , Camapum de Carvalho, J. , Dias, R. D. (1988). Ensaio de laboratório em solos parcialmente saturados. Simpósio Sobre Novos Conceitos em Ensaio de Campo e Laboratório em Geotecnia, Rio de Janeiro, ABMS,1:251-278.
- Rahardjo, H., Yang, H., Leong, E. C., Fredlund, D. G. (2004). Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curves of sandy soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 41 (5): 908-920.
- Reis, A. M. S. (2010). Comportamento hidromecânico de um solo compactado com diferentes teores de umidade e mesmo índice de vazios. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Aeródromos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Rocha, M. F. (2013). Influência do perfil de sucção em obras de contenção em solos não saturados. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás. 271 p.
- Rodrigues, R. A. (2007). Modelação das Deformações por Colapso Devidas à Ascensão de Lençol Freático. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), São Carlos. 262 p.
- Romero, E. (1999). Characterisation and Thermo Hydro-mechanical Behaviour of Unsaturated Boom Clay: An Experimental Study. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Romero, E. e Vaunat, J. (2000). Retention curves of deformable clays. *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*, Tarantino & Mancuso (eds.), Balkema, Rotterdam: 91-106.
- Romero, E., Hoffmann, C., Castellanos, E., Suriol, J. e Lloret, A (2005). Microstructural changes of compacted bentonite induced by hydro-mechanical actions. *Advances in Understanding Engineered Clay Barriers*, E.E., Alonso & A. Ledesma (eds.), Taylor & Francis Group, London: 193-202.
- Romero, E. & Simms, P.H (2008). Microstructure investigation in unsaturated soils: A review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy. *Geotech. Geol. Eng.* DOI 10.1007/s10706-008-9204-5.
- Romero, E., Della Vecchia, G., Jommi, C. (2011). An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Géotechnique*, 61: 313–328.
- Romero, E. (2013). A microstructural insight into clayey soils and their hydraulic properties. *Engineering Geology* 165: 3–19.
- Saba, S., Delage, P., Lenoir, N., Cui, Y. J., Tang, A. M., Barnichon, J-D. (2014). Further insight into the microstructure of compacted bentonite–sand mixture. *Engineering Geology*, 168: 141–148.
- Salager, S., Youssoufi, M. S. El., Saix, C. (2007). Experimental study of the water retention curve as a function of void ratio. *Computer Applications in Geotechnical Engineering*, GSP 157: 1-10.
- Salager, S., Nuth, M., Ferrari, A., Laloui, L. (2013). Investigation into water retention behaviour of deformable soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 50: 200-208.
- Sheng, D., Sloan, S. W. & Gens, A. (2004). A constitutive model for unsaturated soils: thermomechanical and computational aspects. *Computational Mechanics Journal*: 453-465.
- Silva, J. P. (2007). Estudos Preliminares para a implantação de trincheiras de infiltração. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-154A/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.
- Silva, M. T. M. G. (2009). Metodologia para Determinação de Parâmetros para Solos Não Saturados Utilizando Ensaio com Umidade Conhecida. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98 p.
- Silva, J. P. (2012). Estruturas de Infiltração com Utilização de Materiais Alternativos no Controle de Alagamentos, Inundações e Prevenção de Processos Erosivos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-074/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 215p.
- Simms, P.H. & Yanful, E.K. (2001). Measurement and estimation of pore shrinkage and pore distribution in a clayey till during soil-water characteristic curve tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 741-754.

- Simms, P.H. & Yanful, E.K. (2002). Predicting soil-water characteristic curves of compacted plastic soils from measured pore-size distributions. *Géotechnique*, 52 (4): 269-278.
- Simms, P. H., Yanful, E. K. (2004). A discussion of the application of mercury intrusion porosimetry for the investigation of soils, including an evaluation of its use to estimate volume change in compacted clayey soils. *Géotechnique* 54(6): 421–426.
- Simms P.H. & Yanful, E.K. (2005). A pore-network model for hydromechanical coupling in unsaturated compacted clayey soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 42: 499–514.
- Sivakumar, V., Sivakumar, R., Boyd, J. & Mackinnon, P. (2010). Mechanical behaviour of unsaturated kaolin (with isotropic and anisotropic stress history). Part 1: wetting and compression behaviour. *Géotechnique* 60(8): 581–594.
- Soares, R. M., (2005) Resistência ao Cisalhamento de um solo coluvionar não saturado do Rio de Janeiro, RJ. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, 2005.
- Song, Y. S., (2014). Suction stress in unsaturated sand at different relative densities. *Engineering Geology*, 176: 1–10.
- Soto, M.A.A (2004). Comparação entre Métodos de Imposição e Controle de Sucção em Ensaios com Solos não Saturados (2004). Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 206 p.
- Tarantino, A., de Col, E. (2009). Compaction behaviour of clay. *Géotechnique*, 59, 1: 75–77.
- Tarantino, A., Mountassir, G. El. (2013). Making unsaturated soil mechanics accessible for engineers: Preliminary hydraulic–mechanical characterisation & stability assessment. *Engineering Geology*, 165: 89–104.
- Vaunat, J. Romero, E. e Jommi, C. (2000). An elastoplastic hydromechanical model for unsaturated soils. *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*, Tarantino & Mancuso (eds.). Balkema, Rotterdam: 121-138.
- Wen, B. P., Yan, Y. J. (2014). Influence of structure on shear characteristics of the unsaturated loess in Lanzhou, China. *Engineering Geology*, 168: 46–58.
- Wheeler, S. J. & Karube, D. (1996). Constitutive modeling. Proc. 1st Conference on Unsaturated Soils, Paris. Balkema, 3: 1323-1356.
- Wheeler, S. J., Sharma, R. S. & Buisson, M. S. R. (2003). Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*, 53: 41-54.
- Zhou, J., Yu, J. (2004). Influences affecting the soil-water characteristic curve. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, 6A(8): 797-804.