

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Utilização do Método do Papel Filtro para a Determinação das
Curvas Características de um Solo Coluvionar Não Saturado
Contaminado com Óleo Diesel**

Juliana Baum Vivian

Porto Alegre
2008

JULIANA BAUM VIVIAN

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DO PAPEL FILTRO PARA A
DETERMINAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE
UM SOLO COLUVIONAR NÃO SATURADO
CONTAMINADO COM ÓLEO DIESEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Orientação: Prof^a Dr^a. Wai Ying Yuk Gehling. Co-orientação: Prof. PhD. Adriano Virgílio Damiani Bica.

Porto Alegre

2008

V858u Vivian, Juliana Baum

Utilização do método do papel filtro para a determinação das curvas características de um solo coluvionar não saturado contaminado com óleo diesel / Juliana Baum Vivian. – 2008.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2008.

Orientadora: Prof^a.Dr^a. Wai Ying Yuk Gehling

Co-Orientador: Prof. Dr. Adriano Virgílio Damiani Bica

1. Solo não saturado – Ensaios. 2. Solo coluvionar. I. Gehling, Wai Ying Yuk, orient. II. Bica, Adriano Virgílio Damiani, co-orient. III. Título.

CDU-624.131(043)

JULIANA BAUM VIVIAN

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DO PAPEL FILTRO PARA A
DETERMINAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE
UM SOLO COLUVIONAR NÃO SATURADO
CONTAMINADO COM ÓLEO DIESEL**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, na Área de Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de maio de 2008.

Prof. Wai Ying Yuk Gehling
Dr. Universidad Politécnica da Catalunya
Orientadora

Prof. Adriano Virgílio Damiani Bica
PhD. University of Surrey
Co-Orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Cezar Augusto Burkert Bastos (FURG)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Eduardo Dell'Avanzi (UFPR)
Dr. pela University of Colorado at Boulder (Estados Unidos)

Prof. Luiz Antônio Bressani (UFRGS)
PhD. pela University of London (Inglaterra)

Prof. Nelson Oswaldo Luna Caicedo (UFRGS)
Dr. pela Colorado State University (Estados Unidos)

Dedico este trabalho às duas pessoas mais importantes da
minha vida, aos meus pais, Silma e Ivo.

AGRADECIMENTOS

A plena realização desta dissertação não seria possível sem a contribuição de pessoas e instituições. Por isso, não posso deixar de expressar os mais sinceros agradecimentos a todos que contribuíram, colaboraram e participaram desta trajetória, de diferentes formas.

À minha orientadora Wai, agradeço à dedicação, aos constantes incentivos e por acreditar tanto no meu trabalho, até nos momentos em que eu mesma não acreditava. Agradeço, acima de tudo, à amizade que construímos durante esses anos, desde a iniciação científica, e a todas as conversas, conselhos e ensinamentos, não somente geotécnicos, mas ensinamentos de vida. Ao meu co-orientador, Professor Bica, também pela amizade e pela dedicação prestada a este trabalho. Mais do que isso, agradeço às sugestões dadas ao longo de todo o desenvolvimento da dissertação e ao entusiasmo com que me auxiliou na análise dos resultados.

Ao Professor Bressani, agradeço à amizade, à preocupação e ao incentivo, principalmente no início do curso de mestrado. Sem o teu apoio, com certeza este trabalho não teria sequer iniciado. Ao Professor Washington, pela amizade de tantos anos e pelos ensinamentos fundamentais para o meu crescimento profissional e pessoal. Ao Professor Juan Flores, do Instituto de Geociências, pela dedicação e auxílio nos ensaios e nas análises complementares.

Agradeço à UFRGS pela minha formação acadêmica e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelas bolsas de estudo concedidas. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), em especial aos professores da área de geotecnia, agradeço pelos conhecimentos transmitidos. Ao Laboratório de Geotecnologia (LAGEO), por disponibilizar os equipamentos para realização do programa experimental.

Aos colegas e amigos de mestrado: Anderson, Ieda, Leandro, Lucas, Milena, Salete, Tadeu e Talita. Agradeço às horas de estudo e aos bons momentos que passamos juntos. As animadas reuniões da turma ficarão registradas para sempre como os “bons tempos” do mestrado. Em especial, agradeço ao meu grande amigo Daniel, pelo carinho e amizade. Dani, a tua companhia, as nossas conversas e os teus inúmeros conselhos foram, e continuarão sendo muito importantes para mim.

Com muito amor, agradeço ao meu eterno Eduardo, que foi a primeira pessoa a me incentivar na realização deste curso. Muito mais que isso, foi meu companheiro incondicional durante toda a graduação, e, sem ele, com certeza, eu não seria a Engenheira que sou hoje. Dudu, obrigada por ter me feito tão feliz, vou sempre guardar tudo o que me ensinaste como um exemplo de vida. Te amo eternamente, e tu sabes disso.

Aos colegas e amigos do laboratório: Álvaro, Ana Carolina, Camila, Carolina, Jair e Marília. Agradeço aos auxílios prestados e principalmente às horas de descontração, que tornaram mais leve a realização deste trabalho. À minha querida bolsista Jerusa, pelo cuidado com os ensaios, mas principalmente pela amizade que construímos. De forma muito especial, agradeço ao querido Miguel, pelo carinho, companheirismo, dedicação, amizade, por me apoiar em todos os momentos. Mig, tu sabes o quanto és importante para mim, e espero que continuemos sempre por perto.

À bibliotecária Vera, pela ajuda na busca de artigos e teses dos quais necessitei, mas em especial por sempre ter um tempinho para uma agradável conversa. À funcionária do DECIV, Raquel, pela amizade e pelos momentos de descontração nos intervalos. Às funcionárias do PPGEC, Ana Luíza, Carmen, Carolina e Liliane pelo auxílio nos trâmites burocráticos.

À banca examinadora, Prof. Cezar, Prof. Eduardo, Prof. Bressani e Prof. Caicedo, agradeço por aceitarem o convite para participar desta defesa. É uma honra poder contar com a participação de vocês.

Aos meus pais, a quem dedico este trabalho. Mãe, tu sabes o quanto és importante e o quanto significas para mim. És muito mais que mãe: amiga, companheira, “psicóloga”, conselheira, dedicada e carinhosa. És tudo na minha vida. Pai, queria que tu soubesses o quanto me ensinas todos os dias. Agradeço à total dedicação em todos estes anos. Sem tudo o que me proporcionaste, jamais teria atingindo os objetivos que tracei para a minha vida. À minha irmã Bárbara, pela amizade e por sempre acreditar na minha capacidade. Amo muito vocês!

Por fim, agradeço a Deus, pela oportunidade da vida, por todos os aprendizados e por permitir todas as minhas conquistas, como a obtenção deste título de Mestre em Engenharia.

"Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo
começo, qualquer um pode começar agora e fazer um
novo fim".

Francisco Cândido Xavier

RESUMO

VIVIAN, J.B. Utilização do Método do Papel Filtro para a Determinação das Curvas Características de um Solo Coluvionar Não Saturado Contaminado com Óleo Diesel. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Para a determinação do comportamento de um solo não saturado, é necessária a identificação da sua curva característica, que representa a capacidade de armazenamento de água pelo solo em função do valor de sucção imposto. Quando este solo é submetido a algum processo de contaminação, a sua estrutura interna pode ser alterada por processos físico-químicos, modificando, por conseqüência, o seu comportamento. Esta dissertação propõe uma metodologia de ensaio para a determinação de curvas características de sucção total em um solo artificialmente contaminado com diferentes teores de óleo diesel. O programa experimental proposto consiste basicamente na realização do método do papel filtro, através da técnica sem contato entre a amostra e o papel, com algumas modificações em relação às metodologias anteriormente descritas na literatura geotécnica. Foram também executados ensaios para controle e quantificação da evaporação do contaminante ao longo do tempo, e sua possível absorção pelo papel filtro utilizado. Além disso, foram realizados ensaios para a caracterização física, mineralógica e química do solo, antes e após a adição do óleo, com o intuito de constatar as alterações causadas pela contaminação. O material estudado é constituído por sedimentos coluvionares provenientes de arenito da Formação Botucatu, sendo que sua curva característica, sem contaminação, já foi determinada em um estudo anterior, através do método do papel filtro com contato. Para possibilitar comparações entre estes resultados, foram medidos também alguns pontos em amostras não contaminadas, através da técnica proposta nesta dissertação. Estes apresentaram uma satisfatória concordância em relação à curva anteriormente ajustada. Na análise das curvas características do solo contaminado com 2%, 5%, 10% e 15% de óleo diesel, constatou-se a permanência do formato bimodal, sugerindo que a microestrutura e a macroestrutura continuam influenciando na entrada e saída de água do meio. Entretanto, foram identificadas alterações na forma da curva e na extensão dos patamares resultantes, em relação à curva característica sem contaminação, assim como as diferentes localizações dos valores de entrada de ar. Foi verificado que, conforme o aumento do teor de contaminante, há uma gradual tendência ao formato unimodal da curva característica, induzindo a um comportamento de solo tipicamente granular. Este fato foi comprovado nos resultados de microscopia eletrônica, onde se verifica que, com teores menores de óleo, a estrutura do solo encontra-se mais fechada e, à medida que este teor aumenta, a estrutura torna-se mais porosa. Os tempos de equalização para o método de ensaio proposto variaram entre 7 e 30 dias, conforme o nível de sucção da amostra. A avaliação da histerese revelou que, com o aumento do teor de contaminante, há uma pequena redução deste fenômeno. Além disso, os ensaios complementares comprovaram a existência de uma pequena porcentagem de evaporação do óleo diesel, assim como a absorção do mesmo pelo papel filtro, que se apresentou praticamente nula.

Palavras-chave: solo não saturado; contaminação; curva característica.

ABSTRACT

VIVIAN, J.B. Utilização do Método do Papel Filtro para a Determinação das Curvas Características de um Solo Coluvionar Não Saturado Contaminado com Óleo Diesel. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The unsaturated soil behavior can be determined through its soil-water characteristic curve, which represents the capacity of the soil to store water when submitted to different suction levels. When this soil is contaminated, its internal structure can be modified according to physical and chemical processes, thus changing the initial behavior. This dissertation proposes a test methodology to determine the total-suction soil-water characteristic curves of a contaminated soil at different diesel oil contents. The experimental program consisted of using the filter-paper method without contact between the sample and the paper, but with some modifications in relation to previously studied techniques. Some control tests were also carried out to check oil evaporation and its absorption by the filter paper. Besides, the samples were submitted to physical, mineralogical and chemical characterization, before and after contamination, to verify the possible changes. The studied material is a colluvium soil, constituted basically by sandstone, from the Botucatu Formation. This soil was previously studied by the filter-paper method with contact, and its soil water characteristic curve without contamination was already known. To compare the results, the proposed test methodology was also performed with non contaminated samples, showing a satisfactory agreement with the initial curve. The soil-water characteristic curves of this soil with a diesel oil content of 2%, 5%, 10% and 15% showed a "saddle" shape, indicating that both the microstructure and the macrostructure were influenced by the entrance and exit of water through the soil. However, the shape of the curve and the extent of its plateau changed according to the level of contamination. Increasing the oil content, the curve tends to a unimodal shape, with a behavior similar to granular soils. This statement was proved by the microstructure photographs, which showed an increase of sample porosity due to the increase of oil content. The time required to reach suction equilibrium during the tests varied between 7 to 30 days, according to the initial water content of the samples. The observed hysteresis had a small reduction with the increase of oil content. The control tests proved that oil evaporation and its absorption by the filter paper were insignificant in the whole test program.

Key-words: unsaturated soil; contamination; soil-water characteristic curve.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS.....	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	15
LISTA DE SÍMBOLOS.....	16
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 SOLOS NÃO SATURADOS	23
2.1.1 Sucção Mátrica.....	26
2.1.2 Sucção Osmótica.....	27
2.1.3 Curva Característica	29
2.1.3.1 Forma da Curva Característica e Principais Estágios.....	29
2.1.3.2 Equações de Ajuste da Curva Característica	34
2.2 SOLOS NÃO SATURADOS CONTAMINADOS	38
2.2.1 Contaminantes Orgânicos Derivados do Petróleo	38
2.2.2 Solos Contaminados por Derivados do Petróleo	39
2.2.2.1 Características dos Solos Não Saturados Contaminados por NAPLs	39
2.2.2.2 Estudos de Solos Não Saturados Contaminados por NAPLs	40
2.2.3 Curva Característica de Solos Contaminados	42
2.3 MÉTODO DO PAPEL FILTRO.....	45
2.3.1 Calibração do Papel Filtro.....	49
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1 SOLO INVESTIGADO	52
3.2 COLETA DAS AMOSTRAS	53
3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA DO SOLO.....	54
3.3.1 Caracterização Física	54
3.3.2 Caracterização Mineralógica.....	56
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DIESEL.....	57
3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO	58

3.5.1	Análise Básica	58
3.5.2	Análise da Condutividade Elétrica.....	59
3.5.3	Análise de Metais	59
3.6	MICROSCOPIA ÓTICA	60
3.7	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	60
3.8	DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA.....	61
3.8.1	Método do Papel Filtro.....	61
3.8.1.1	Materiais	61
3.8.1.2	Ensaio	62
3.9	ENSAIOS DE CONTROLE	66
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	68
4.1	ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO SOLO.....	68
4.1.1	Difratometria de Raios X	68
4.1.2	Microscopia Ótica	71
4.1.3	Caracterização Química	74
4.2	CURVAS CARACTERÍSTICAS	77
4.2.1	Comparação entre o Método do Papel Filtro com e sem Contato	78
4.2.2	Influência do Grau de Contaminação com Óleo Diesel.....	79
4.2.3	Influência do Tempo de Equilíbrio	84
4.2.4	Influência das Trajetórias de Umedecimento e Secagem – Histerese	86
4.3	ENSAIOS DE CONTROLE	88
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	92
5.1	CONCLUSÕES.....	92
5.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	95
	REFERÊNCIAS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema ilustrativo das componentes de sucção do solo	24
Figura 2: Variação da umidade e da sucção com a profundidade: (a) perfil de subsolo; (b) poro-pressões de água nas zonas não saturada, capilar e saturada; (c) gráfico de grau de saturação versus profundidade; (d) gráfico de poro-pressão de água versus profundidade.	25
Figura 3: Curva característica típica de solos compactados.....	30
Figura 4: Curvas características bimodais: (a) curva de um solo laterítico argilo-arenoso avermelhado; (b) curva de um colúvio arenoso.....	32
Figura 5: Curvas características bimodais de dois solos coluvionares indeformados – Solo RO e Solo AV.....	33
Figura 6: trechos da curva característica bimodal.	34
Figura 7: Configuração dos fluidos água/NAPL/ar no poro do solo: (a) somente fenômenos capilares estão presentes; (b) a amostra é compactada em alta densidade e elevado grau de saturação.	41
Figura 8: Curva de retenção NAPL/solo para amostras: (a) com mesmo teor de umidade e diferentes graus de compactação; e (b) diferentes teores de umidade e mesmo grau de compactação.....	43
Figura 9: Curvas características de sucção mátrica e total para o solo contaminado com licor cáustico em concentrações de $C_1= 20$ g/l, $C_2= 70$ g/l e $C_3= 10$ g/l.....	44
Figura 10: Princípio do método do papel filtro: (a) técnica em contato; (b) técnica sem contato.....	46
Figura 11: Configuração utilizada na técnica sem contato do papel filtro.	47
Figura 12: Câmara de equalização para medição de sucção total e mátrica: (a) câmara desmontada; (b) secção transversal.....	49
Figura 13: Local de coleta das amostras do solo AV (colúvio de arenito).....	53
Figura 14: Curvas granulométricas do solo estudado.	55
Figura 15: Etapas do fechamento das amostras para o método do papel filtro sem contato: (a) amostra de Solo AV com anel O-ring; (b) amostra com tela de PVC e papéis filtro sobrepostos ao O-ring; (c) amostra com anel metálico sobre o conjunto, envolto por filme plástico; e (d) amostra embalada e identificada.....	64
Figura 16: Esquema da metodologia proposta para a técnica sem contato do método do papel filtro.	65
Figura 17: Resultado de difratograma de raio X para amostra de Solo AV natural.....	69

Figura 18: Resultado de difratograma de raio X para amostras da fração fina do Solo AV natural, glicolado e calcinado (partículas menores que 2 μ m).	70
Figura 19: Resultado de fotomicrografia em uma amostra de Solo AV sem contaminante: (a) centro da amostra; e (b) borda da amostra.	71
Figura 20: Resultado de fotomicrografia em uma amostra de Solo AV com 2% de óleo: (a) centro da amostra; e (b) borda da amostra.	72
Figura 21: Resultado de fotomicrografia em uma amostra de Solo AV com 5% de óleo: (a) centro da amostra; e (b) borda da amostra.	72
Figura 22: Resultado de fotomicrografia em uma amostra de Solo AV com 10% de óleo: (a) centro da amostra; e (b) borda da amostra.	73
Figura 23: Resultado de fotomicrografia em uma amostra de Solo AV com 15% de óleo: (a) centro da amostra; e (b) borda da amostra.	73
Figura 24: Pontos obtidos pelo método do papel filtro sem contato, em comparação à curva obtida por Feuerharmel (2007), pelo método com contato.	79
Figura 25: Curvas características obtidas com a técnica do papel filtro sem contato, para as amostras contaminadas com 2%, 5%, 10% e 15%, em função do grau de saturação.	81
Figura 26: Curva característica para o Solo AV sem contaminação (Feuerharmel, 2007) em comparação às curvas características para o Solo AV com diferentes graus de óleo diesel.	83
Figura 27: Influência dos tempos de equilíbrio, nas trajetórias de umedecimento das amostras com 2 e 5% de óleo diesel.	84
Figura 28: Histerese observada para o solo AV com 2 % de óleo.	86
Figura 29: Histerese observada para o Solo AV com 5 % de óleo.	87
Figura 30: Histerese observada para o Solo AV com 10 % de óleo.	87
Figura 31: Histerese observada para o Solo AV com 15 % de óleo.	88
Figura 32: Controle da variação de massa das amostras de Solo AV contaminadas, em função do tempo.	89
Figura 33: Controle da porcentagem de evaporação de óleo diesel das amostras de Solo AV contaminadas, em função do tempo.	89
Figura 34: Controle da absorção do vapor de óleo diesel pelo papel filtro, em função do tempo.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Equações que expressam curvas características unimodais.	35
Tabela 2: Tempo de equilíbrio sugerido para medida de sucção total, em função do nível de sucção.....	48
Tabela 3: Curvas de calibração do papel filtro Whatman Nº 42.	51
Tabela 4: Características físicas do solo estudado (Solo AV).....	55
Tabela 5: Características mineralógicas do solo estudado.	56
Tabela 6: Propriedades do óleo diesel utilizado.	57
Tabela 7: Resultados da análise química em amostras de Solo AV com 0%, 5% e 15% de óleo diesel.	75
Tabela 8: Índices físicos iniciais das amostras de Solo AV utilizadas para a curva característica.	77
Tabela 9: Parâmetros utilizados para realizar o ajuste matemático pela equação de Gitirana Jr e Fredlund (2004).....	80
Tabela 10: Tempos de equalização da técnica proposta, para o Solo AV, de acordo com o grau de saturação.....	85
Tabela 11: Teores iniciais e finais aproximados de óleo diesel no solo, conforme a evaporação detectada nos ensaios de controle.	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: American Society for Testing and Materials

LAGEO: Laboratório de Geotecnologia

NBR: Norma Brasileira Registrada

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RS: estado do Rio Grande do Sul

SC: estado de Santa Catarina

Solo AV: solo coluvionar de arenito

pH: potencial hidrogeniônico

CTC: capacidade de troca catiônica

USEPA: United States Environmental Protection Agency

EPA: Environmental Protection Agency

PVC: Policloreto de Vinila

LISTA DE SÍMBOLOS

u_a : poro-pressão de ar

u_w : poro pressão de água

u_L : poro pressão de LNAPL

u_{aL} : poro pressão referente à interação ar-LNAPL

u_{aw} : poro pressão referente à interação ar-água

u_{Lw} : poro pressão referente à interação LNAPL-água

$(u_a - u_w)$: sucção mátrica

π : sucção osmótica

ψ : sucção total

$(\sigma - u_a)$: tensão normal líquida de ar

$(\sigma - u_w)$: tensão normal líquida de água

$S_{mátrica}$: sucção mátrica

S_c : parcela de sucção mátrica devida a capilaridade

S_{ad} : parcela de sucção mátrica causada pela adsorção

n : número de moléculas por moles de sal

R : constante universal dos gases

T : temperatura absoluta

C : concentração de sal

w : teor de umidade gravimétrico

θ : teor de umidade volumétrico

S_r : grau de saturação

S_{rr} : grau de saturação residual

V_h : volume de hidrocarbonetos presentes nos poros do solo

V_t : volume total de poros no solo

γ_s : peso específico real dos grãos

LL : limite de liquidez

LP : limite de plasticidade

IP : índice de plasticidade

: abertura da malha da peneira

d : distância interplanar

e: índice de vazios

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial será apresentado o problema de pesquisa desta dissertação, enfatizando a motivação e a importância do estudo proposto. Após, estão listados de maneira específica os principais objetivos a serem alcançados e, por fim, é feito o detalhamento dos conteúdos de cada capítulo subsequente.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Os conceitos da Mecânica dos Solos Não Saturados vêm desempenhando um importante papel na compreensão do comportamento hidráulico e mecânico de solos cujas características não se enquadram nas condições impostas pela Mecânica dos Solos Clássica. Por este motivo, diversas pesquisas estão sendo realizadas para que os parâmetros geotécnicos e geoambientais necessários para projetos de engenharia possam ser determinados por essa teoria. Além disso, com a crescente contaminação dos recursos naturais, surgiu a necessidade de estudos que esclarecessem as alterações sofridas por esta no meio ambiente.

De maneira geral, a contaminação de uma área é um grave problema geoambiental, uma vez que afeta o solo, as águas subterrâneas e a vegetação. Quando ocorre o derrame de um contaminante no solo, este inicialmente infiltra na zona não saturada do mesmo, também chamada de zona vadosa, onde é parcialmente retido. Entretanto, as interações entre solo, fluido intersticial, ar e contaminante, que ocorrem nesta região, ainda são pouco conhecidas, devido às poucas pesquisas existentes sobre o tema.

Atualmente, existem inúmeras substâncias passíveis de contaminar e alterar as características do subsolo, por diferentes meios. Entre as mais usuais, estão os derivados de petróleo, devido a sua larga utilização, principalmente como combustíveis e lubrificantes. Um exemplo bastante comum são as áreas onde estão localizados os postos de abastecimento de combustíveis, onde, pela falta de manutenção dos tanques de armazenamento, ocorrem processos de

corrosão ao longo dos anos, seguidos da perfuração dos tanques, espalhando o combustível na subsuperfície e contaminando o ambiente. Outra preocupação é o transporte desses combustíveis, quando, em caso de acidentes, podem provocar sérios danos. Exemplos recentes podem ser citados, como o vazamento de óleo diesel em um acidente ferroviário ocorrido no município de Ijuí, Rio Grande do Sul, no dia 25 de agosto de 2007, onde um trem descarrilou, derramando uma carga de cerca de 54000 litros de combustível, que se espalhou por uma área onde estavam localizadas propriedades rurais. Já no dia 17 de setembro de 2007, cerca de 20000 litros de óleo diesel vazaram de um caminhão acidentado, que transportava o combustível na rodovia RS-135, em Passo Fundo, também no Rio Grande do Sul, espalhando-se pela encosta da mesma, onde também existem propriedades rurais.

Independente da presença de contaminação, o parâmetro fundamental de um solo não saturado, que rege todos os aspectos do seu comportamento, é denominado sucção. A sucção pode ser descrita como uma pressão isotrópica resultante da interação entre os fluidos presentes no interior do solo. Sua magnitude e forma de variação em diferentes níveis de saturação podem ser estabelecidas através da determinação de uma curva característica. O conhecimento dessa variável possibilita a estimativa de propriedades mecânicas e hidráulicas do solo em diferentes condições de umidade, como pode ser verificado nos trabalhos de Van Genuchten (1980), Escario e Jucá (1989), Fredlund *et al.* (1994), Fredlund *et al.* (1996) e Vanapalli *et al.* (1996).

Existem diversas maneiras de obter a relação entre umidade e sucção, como pela técnica do papel filtro, que constitui um procedimento simples e de baixo custo. No caso de solos contaminados, a presença de diferentes substâncias nos poros do solo pode alterar a sucção existente. Entretanto, existem ainda poucos estudos relacionados à avaliação da intensidade e das conseqüências desta modificação. Da mesma forma, são raras as pesquisas que investigaram a validade dos métodos cotidianamente utilizados na determinação da curva característica, para o caso de solos contaminados.

O material utilizado na presente dissertação consiste de um solo coluvionar oriundo de arenito, denominado Solo AV (Feuerharmel, 2003). A região na qual o mesmo está depositado pertence à Bacia Sedimentar do Paraná, entre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Os ensaios de caracterização realizados demonstraram que o Solo AV é um solo argilo-arenoso e encontra-se *in situ* na condição não saturada (Feuerharmel, 2003).

Para estudar a influência do grau de contaminação no comportamento do solo, as amostras foram preparadas com diferentes dosagens de óleo diesel. A obtenção da curva característica foi realizada através do método do papel filtro sem que houvesse contato entre a amostra e o papel. Para isto, foram sugeridas nesta dissertação algumas modificações na metodologia de ensaio, reduzindo o efeito de alguns problemas verificados em técnicas anteriormente propostas. Os resultados obtidos viabilizaram a comparação entre as curvas características determinadas para o mesmo solo sem contaminação, através da técnica do papel filtro com contato, oriundas do estudo de Feuerharmel (2007).

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação de mestrado tem por objetivo principal realizar medidas de sucção total em um solo contaminado com diferentes dosagens de óleo diesel, através da técnica do papel filtro sem contato, assim como comparar os resultados obtidos com as curvas características para o mesmo solo sem contaminação. Desta forma, pode-se analisar a alteração das propriedades do solo na presença do contaminante.

De maneira mais específica, são objetivos deste estudo:

- Avaliar a eficácia do método do papel filtro na medida de valores de sucção total em um solo contaminado com óleo diesel, através da técnica sem contato;
- Comparar as curvas características do Solo AV sem contaminação, obtidas através do método do papel filtro sem contato, estudado nesta dissertação, e da técnica com contato, estudada por Feuerharmel (2007);
- Verificar a validade dos métodos de ajuste das curvas características existentes na literatura, para os pontos obtidos com as amostras contaminadas do Solo AV;
- Ajustar e analisar as curvas características de sucção total para o solo estudado em diferentes níveis de contaminação;
- Constatar a influência do contaminante no comportamento da curva característica, através da comparação com amostras não contaminadas e com diferentes graus de óleo diesel;

- Analisar o tempo de equalização necessário na técnica do papel filtro sem contato para a correta determinação dos pontos da curva característica, em diferentes graus de saturação;
- Verificar a existência de histerese entre as trajetórias de secagem e umedecimento, assim como sua alteração em decorrência dos diferentes teores de óleo diesel;
- Controlar e avaliar a perda de óleo diesel por evaporação e sua possível interferência na determinação dos pontos da curva característica.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos, descritos a seguir.

O assunto em questão é apresentado neste Capítulo 1, enfatizando a importância do estudo dos solos não saturados inserida na problemática geoambiental. Após, estão listados os objetivos da pesquisa.

A seguir, o Capítulo 2 descreve o estudo prévio existente sobre o tema deste trabalho, através de uma revisão bibliográfica estruturada nos tópicos referentes a solos não saturados, solos não saturados contaminados e métodos para a obtenção da curva característica, descrevendo, nesta última parte, o método do papel filtro.

No Capítulo 3 estão detalhados os materiais e as técnicas experimentais utilizados nesta dissertação. Neste item, está apresentada a caracterização física e mineralógica previamente existente do Solo AV, assim como a caracterização do óleo diesel utilizado na moldagem das amostras. Além disso, são descritos também os procedimentos realizados para a execução dos demais ensaios de caracterização física e química no solo natural e contaminado. Na sequência, é feito um detalhamento sobre a metodologia seguida para a determinação das curvas características, com destaque às alterações sugeridas na execução do método do papel filtro sem contato. Por fim, são citados os ensaios complementares realizados para o controle de perda de óleo diesel nas amostras e verificação da possível absorção desse contaminante pelo papel filtro.

Os resultados obtidos pelo programa experimental e suas respectivas análises estão apresentados no Capítulo 4. Inicialmente são explicitados os dados obtidos na caracterização

física e química realizada, como os gráficos resultantes da difratogrametria de raios-X, os ensaios químicos das amostras contaminadas e as imagens obtidas por microscopia eletrônica. Após, as curvas características do Solo AV nas diferentes condições de contaminação são apresentadas e analisadas. Entre os aspectos discutidos, estão: (i) a influência do tempo de equilíbrio na obtenção dos pontos da curva característica; (ii) a influência do nível de contaminação no aspecto final da curva característica; e (iii) a presença de histerese, decorrente das trajetórias de secagem e umedecimento realizadas. No último item do referido capítulo, podem ser visualizados os resultados referentes aos ensaios de controle propostos e suas análises.

O Capítulo 5 é referente às principais conclusões desta dissertação, obtidas após uma minuciosa análise dos resultados, e sua relação com o prévio conhecimento existente na literatura geotécnica. Em seguida, são sugeridos alguns temas relacionados à presente linha de pesquisa, para que possa ser dada continuidade ao trabalho aqui desenvolvido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta um panorama geral sobre os temas abordados nesta dissertação. Desta maneira, estão apresentadas algumas definições consagradas no meio geotécnico, como os conceitos de solos não saturados e suas peculiaridades, e outras ainda divergentes entre os pesquisadores da área de solos não saturados, como os efeitos da contaminação do solo na alteração da sucção total, e como esta pode ser subdividida. Além destas definições, estão descritos também os ensaios e técnicas inerentes ao programa experimental proposto, que foram anteriormente desenvolvidos por diversos autores e encontram-se disponíveis na literatura consultada.

2.1 SOLOS NÃO SATURADOS

Diferentemente dos solos saturados, que constituem um sistema bifásico com partículas sólidas e líquido intersticial, os solos não saturados são caracterizados por um sistema multifásico, composto pelas fases sólida, líquida e gasosa. Alguns autores, como Fredlund e Morgenstern (1977), admitem ainda a existência de uma quarta fase, composta pela interface formada entre as fases líquida e gasosa, denominada membrana contráctil. O conhecimento da constituição e distribuição de cada uma dessas fases na estrutura do solo é essencial para compreender o comportamento do mesmo, em termos de resistência ao cisalhamento, variação volumétrica, condutividade hidráulica, erodibilidade, entre outros. Dentre os materiais que são abrangidos pela teoria da Mecânica dos Solos Não Saturados, incluem-se os solos residuais, os expansivos, os colapsíveis, os compactados e alguns solos sedimentares.

Além das tensões geostáticas comuns aos solos saturados, na condição não saturada surge uma pressão isotrópica resultante da interação entre o líquido e o gás nos poros do solo, denominada sucção. Dentre as diversas definições existentes, Marinho (1994) afirma que a sucção é a pressão isotrópica imposta pelo poro água para absorver mais água. De acordo com o mesmo autor, essa é dividida em duas componentes: (i) a sucção mátrica ($u_a - u_w$), que está

relacionada à matriz do solo, ou seja, a combinação entre o tipo de partícula e o arranjo estrutural; e (ii) a sucção osmótica π , devida à concentração de sais na água do solo. O significado físico da sucção total, mátrica e osmótica foi explicado por Marinho (1994) utilizando o conceito de uma membrana semipermeável (figura 1). A sucção total é a diferença de pressão através de uma membrana semipermeável que separa a água pura de um sistema constituído pelo solo e água intersticial. A membrana semipermeável permite apenas a passagem da água e não dos solutos, e a pressão ocorre devido a uma diferença de concentração química entre a água pura e a água do solo. A sucção mátrica é dada pela diferença de pressão através de uma membrana que separa o sistema solo-água intersticial de uma solução idêntica à da água intersticial, mas sem o solo. Essa membrana é permeável à solução, permitindo a passagem da água e dos solutos. Sendo assim, não há diferença de concentração química nos poros. A sucção osmótica é obtida pela diferença entre as sucções total e mátrica.

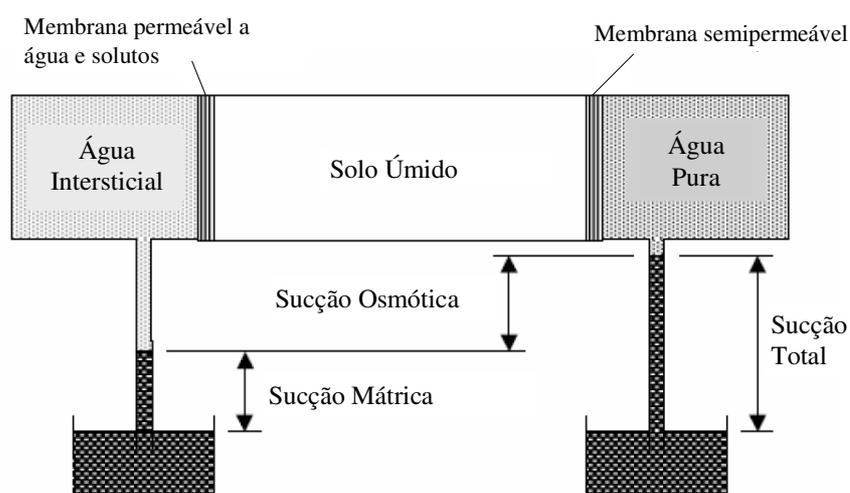


Figura 1: Sistema ilustrativo das componentes de sucção do solo (baseado em Marinho, 1994).

A sucção total ψ é definida pela soma das sucções mátrica e osmótica, de acordo com a equação 1. Embora a sucção governe o comportamento dos solos não saturados, este parâmetro é ainda pouco utilizado nos projetos de engenharia. Houston *et al.* (1994) citam duas razões pelas quais as medidas de sucção não são comumente inseridas nas análises. A primeira está relacionada às poucas publicações existentes sobre correlações entre essa variável e as propriedades básicas dos solos. A segunda refere-se à inexistência de um método padronizado de baixo custo para determinação da sucção. Por este motivo, nos últimos anos,

diversos estudos estão sendo desenvolvidos com o intuito de promover uma maior confiabilidade às medições de sucção, com a melhoria de técnicas e correlações utilizadas.

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (\text{equação 1})$$

A figura 2, publicada por Anderson (1983), mostra esquematicamente a variação do grau de saturação (figura 2(c)) e da sucção (figura 2(d)) ao longo da profundidade de solo em campo. Em geral, os solos encontram-se na condição não saturada quando estão situados acima do nível do lençol freático, possuindo poro-pressão negativa. Este valor resulta basicamente da presença de uma poro-pressão de ar, expressa pelo símbolo u_a , e uma poro-pressão de água, representada por u_w , presente nos poros do solo. Com o aumento da profundidade, a poro-pressão de água se eleva, devido ao maior grau de saturação, e a poro-pressão de ar reduz pela diminuição do gás nos poros do solo (figura 2(b)). A partir da franja capilar, o grau de saturação é máximo e a partir do nível do lençol freático, a poro-pressão de água é positiva (figuras 2(c) e (d)).

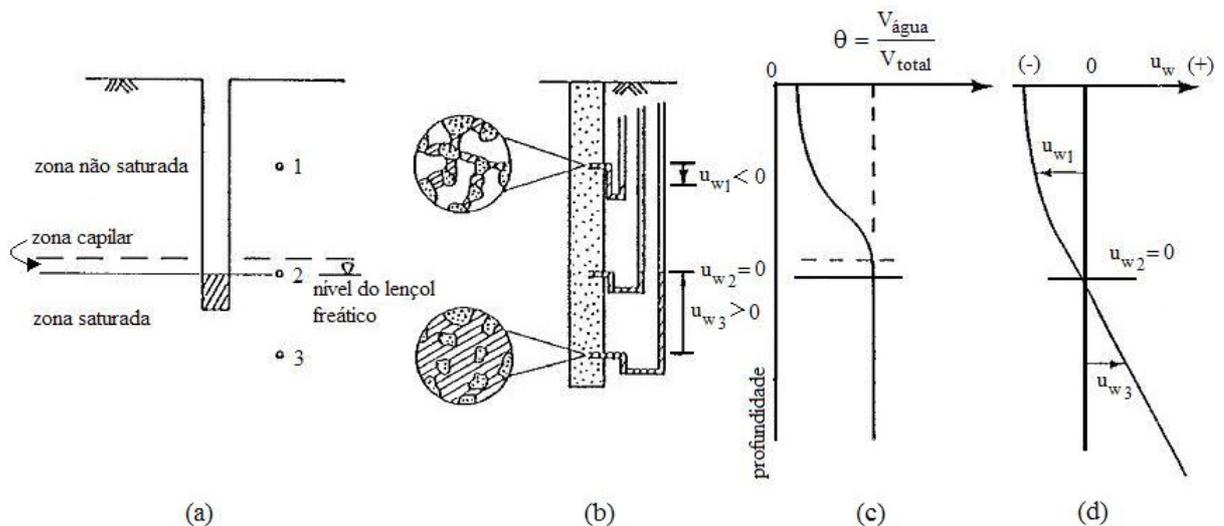


Figura 2: Variação da umidade e da sucção com a profundidade: (a) perfil de subsolo; (b) poro-pressões de água nas zonas não saturada, capilar e saturada; (c) gráfico de grau de saturação versus profundidade; (d) gráfico de poro-pressão de água versus profundidade (Anderson, 1983).

Analogamente aos solos saturados, para descrever a condição em que o solo não saturado se encontra em campo, é possível definir seu estado de tensão. Devido à existência de mais uma variável, deve-se então optar por um par dentre as seguintes tensões, para que seja descrito o estado do solo: (i) tensão normal líquida de água, descrita por $(\sigma - u_w)$; (ii) tensão normal líquida de ar, expressa por $(\sigma - u_a)$; e (iii) sucção, geralmente descrita em termos de sucção mátrica $(u_a - u_w)$. Uma descrição mais detalhada sobre os estados de tensão do solo não saturado é feita por Fredlund e Morgenstern (1977).

2.1.1 Sucção Mátrica

A parcela de sucção definida como sucção mátrica é a pressão negativa desenvolvida na água do solo devida aos efeitos de capilaridade e forças de adsorção. A capilaridade está relacionada à macroestrutura do solo, ou seja, aos poros interconectados que, através dos quais, a água flui devido a gradientes de pressão capilar. A adsorção, por sua vez, está associada à microestrutura do solo, e depende do nível de hidratação dos minerais argilosos (de Campos *et al.*, 1992).

O efeito da capilaridade ocorre pelo fenômeno da ascensão capilar, gerando uma pressão negativa na água que preenche os meniscos. Na superfície deste menisco, a pressão de ar é igual à pressão atmosférica. Desta forma, a diferença entre a pressão de ar (u_a) e a pressão de água (u_w) resulta no valor da sucção mátrica. Entretanto, quando o solo possui partículas finas, como as argilas, as forças de adsorção interferem na componente mátrica da sucção. Assim, a sucção mátrica pode ser representada pela equação 2 (de Campos *et al.*, 1992).

$$S_{mátrica} = S_c + S_{ad} \quad (\text{equação 2})$$

onde: S_c = sucção devido à capilaridade;
 S_{ad} = sucção causada pela adsorção.

Segundo Houston *et al.* (1994), a sucção mátrica corresponde à afinidade do solo com a água na ausência de gradientes de sal na mesma. No caso em que não existem sais no fluido do solo, a sucção osmótica é nula, e, portanto, a sucção mátrica é igual à sucção total. Quando

um solo não possui nenhum tipo de contaminação, o estudo da variação da sucção mátrica é suficiente para a definição dos parâmetros não saturados dos solos.

2.1.2 Sucção Osmótica

A sucção osmótica é definida por Ridley (1995) como sendo a tensão adicional necessária para remover uma molécula de água, devido à presença de sais dissolvidos na fase água. Matematicamente, a sucção osmótica π é expressa pela equação 3 a seguir (Yong e Warkentin, 1965 *apud* Wiebe, 1996).

$$\pi = n \cdot R \cdot T \cdot C \quad (\text{equação 3})$$

onde: n = número de moléculas por moles do sal;

R = constante universal dos gases;

T = temperatura absoluta;

C = concentração do sal.

A parcela osmótica da sucção é consequência de um fluxo osmótico que ocorre na fase líquida do solo, quando nesta estão presentes sais dissolvidos. De acordo com Gray (1969), a ascensão capilar pode atuar como uma “bomba de íons”, fornecendo sais dissolvidos continuamente ao topo da franja capilar, ao mesmo tempo em que a água evapora. Isto resulta em uma concentração de sais no topo da zona capilar e desenvolve um gradiente osmótico que atrai mais água para esta região. Este fenômeno é devido à osmose. Desta forma, uma modificação na concentração ou no tipo de sais presentes provoca uma alteração no comportamento do solo. Bolt (1956) afirma que solos de granulação fina, com argila em sua constituição, têm sua compressibilidade dependente das propriedades mecânicas do solo e da composição química do líquido intersticial. Isto ocorre devido à interação físico-química entre a argila e a fase líquida que causa uma força de repulsão entre as partículas. Segundo Marinho (1994), as mudanças na concentração de sal no solo alteram as características do solo ao modificar a pressão de vapor de água, ou seja, a capacidade de evaporação da mesma. Assim, aumentando a concentração de sal na água do solo, ocorrerá uma maior dificuldade de evaporação das moléculas desta.

Mitchell *et al.* (1973) desenvolveram uma teoria que descreve o fluxo químico-osmótico em solos. Estes autores afirmam que os efeitos químico-osmóticos são significativos no caso de solos de granulação fina e argilas ativas (expansivas), citando diversas implicações na mecânica dos solos. Dentre essas decorrências, são citadas: (i) a presença de sais dissolvidos na água, em contato com argilas expansivas, influencia no comportamento de variação de volume do solo; (ii) é possível estabilizar argilas moles expansivas através de uma estabilização químico-osmótica, ou seja, pela adição de sais no solo; (iii) os efeitos químico-osmóticos podem causar imprecisões nos ensaios de laboratório, quando são utilizados fluidos com diferente constituição da água existente em campo; (iv) uma significativa parcela do fluxo de água subterrâneo através de sedimentos profundos pode ser atribuída a gradientes químicos; e (v) fluxos químico-hidráulicos associados podem ser importantes em aquíferos subterrâneos submetidos à intrusão de água salina.

O fenômeno osmótico pode ocorrer tanto em solos não saturados, como em solos saturados. A presença de sucção osmótica em um solo é determinada pela atuação de agentes naturais, como a vegetação (que induz um fluxo osmótico através da diferença de concentração de sais que existe entre a planta e a água do solo), ou artificialmente depositados no meio, como um contaminante líquido colocado em contato com o solo (Marinho, 1994). O mesmo autor afirma que a sucção osmótica pode ser gerada nos ensaios realizados em laboratório ou em campo, quando amostras são colocadas em contato com um fluido que difere do líquido existente nos poros do solo. Houston *et al.* (1994) verificaram ainda que o potencial osmótico reduz com o aumento do grau de saturação do solo, porém torna-se aproximadamente constante após um determinado teor de umidade.

Marinho (1994) estudou amostras estaticamente compactadas obtidas através da mistura de solo com uma solução de cloreto de sódio. O objetivo do estudo era aumentar a sucção osmótica e observar este efeito nas medidas de sucção mátrica e total. Como resultado, observou-se que, com incrementos de sucção, a diferença entre sucção total e mátrica aumenta, desde que a quantidade de sal adicionado não se altere. Isso ocorre porque há um aumento na concentração do sal, uma vez que há redução da quantidade de água no sistema.

2.1.3 Curva Característica

A curva característica representa a relação existente entre a quantidade de fluido presente nos poros do solo e a sua correspondente sucção. Quando o fluido em estudo é a água, sua quantificação pode ser expressa em termos de teor de umidade gravimétrico (w), teor de umidade volumétrico (θ) ou grau de saturação (S_r). De Campos *et al.* (1992) sugerem a representação da curva em termos de teor de umidade gravimétrico para problemas geotécnicos envolvendo ruptura, assim como o teor de umidade volumétrico para problemas envolvendo deformação em solos não saturados. Dentre os principais fatores que influenciam na forma da curva característica, podem ser citados o tipo de solo (estrutura e agregação), o teor de umidade inicial, o índice de vazios, a textura, a mineralogia, a história de tensões e os métodos de compactação (Vanapalli *et al.*, 1999).

A partir dessa relação constitutiva, é possível estabelecer, de maneira empírica ou teórica, as variações do comportamento do solo não saturado em diferentes condições de umidade. As mudanças podem ocorrer em relação à condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento e a variação volumétrica, ao longo das trajetórias de secagem e umedecimento do solo. Existem diversos estudos referentes a estes temas, como Brooks e Corey (1964), Van Genuchten (1980), Mualem (1986), Fredlund *et al.* (1994) e Agus *et al.* (2003), que utilizaram a curva característica e o coeficiente de condutividade hidráulica saturado para diversos tipos de solos a fim de prever a condutividade hidráulica não saturada a diferentes níveis de sucção. Escario e Jucá (1989), Fredlund *et al.* (1996), Vanapalli *et al.* (1996), Machado e Vilar (1998) e Khalili e Khabbaz (1998) estabeleceram relações entre a curva característica e a resistência ao cisalhamento saturada dos solos estudados, para prever os parâmetros de resistência ao cisalhamento não saturada.

2.1.3.1 Forma da Curva Característica e Principais Estágios

Dependendo do tipo e disposição da estrutura do solo, a curva característica pode apresentar diferentes formas:

- a) Curva unimodal ou curva em formato “S”: constitui o formato mais comum, amplamente estudado pela Mecânica dos Solos Não-Saturados;
- b) Curvas bimodais ou curvas em formato de “sela”: existente em alguns tipos de solos, em especial os não saturados de regiões tropicais e subtropicais. Este

comportamento foi observado em alguns solos residuais e coluvionares, de acordo com o estudo de Feuerharmel *et al.* (2006).

Uma curva característica típica de solos compactados, que, em geral, apresentam formato unimodal, foi apresentada por Vanapalli *et al.* (1999). Na mesma, são identificados os pontos principais da curva (figura 3). A diferença entre as curvas traçadas durante a secagem (dessaturação) e o umedecimento (absorção) é denominada histerese. A histerese ocorre devido a uma série de fatores, como: (i) a geometria não uniforme dos poros interconectados; (ii) a variação do ângulo de contato entre o solo e a água com o avanço do menisco, devido à rugosidade das partículas sólidas; e (iii) a presença de ar aprisionado nos poros, que tende a reduzir o teor de umidade no processo de umedecimento.

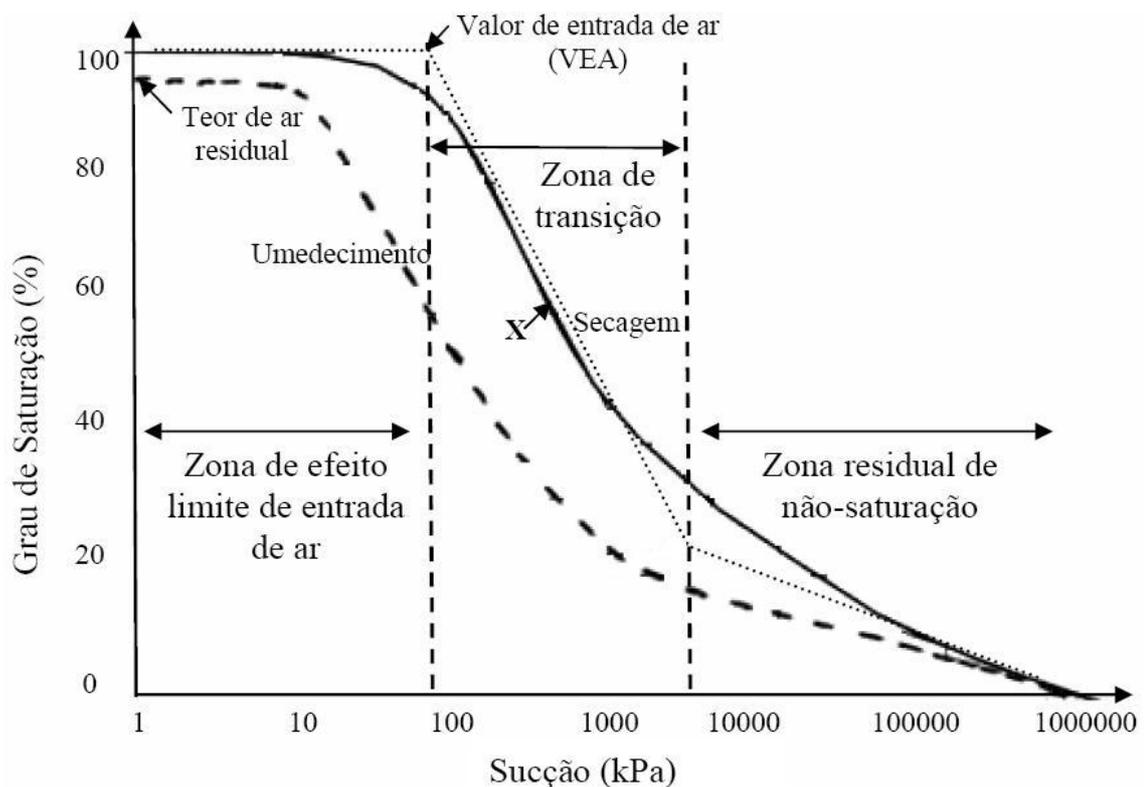


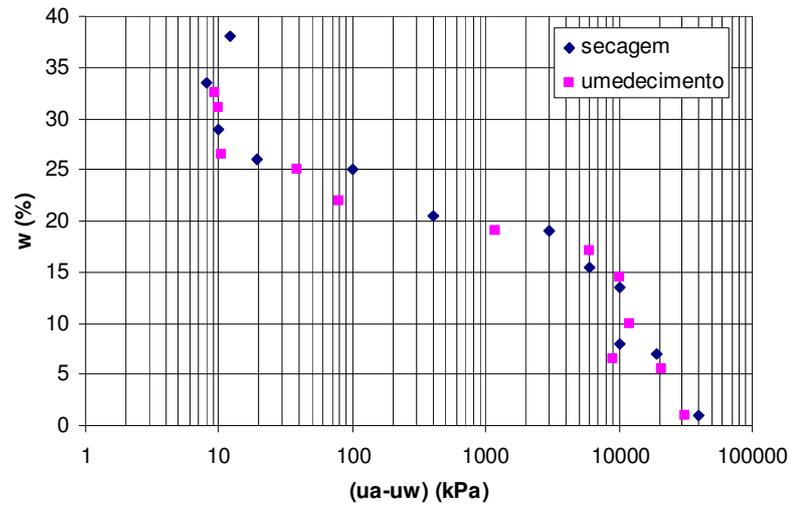
Figura 3: Curva característica típica de solos compactados (Vanapalli *et al.*, 1999).

De acordo com Fredlund e Xing (1994), o valor de entrada de ar representa o nível de sucção a partir do qual o ar começa a entrar nos maiores vazios do solo. O ponto de saturação residual corresponde ao teor de umidade além do qual é necessária uma grande variação de

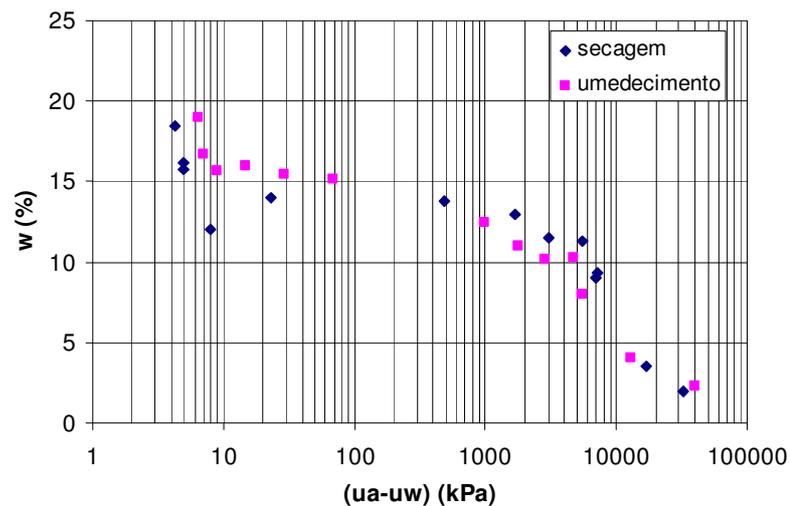
sucção para remover a água ainda presente no solo, pois a fase líquida encontra-se descontínua.

Estes dois pontos delimitam as diferentes regiões da curva característica, que são denominadas: (i) zona de efeito limite de entrada de ar; (ii) zona de transição; e (iii) zona residual de não saturação (Vanapalli *et al.*, 1999). A zona de efeito limite de entrada de ar corresponde ao estágio onde todos os poros encontram-se preenchidos por água, ou seja, o solo está na condição saturada. Nesta etapa, são válidos os conceitos da Mecânica dos Solos Clássica. Na zona de transição, ocorre uma redução significativa do teor de umidade com o aumento da sucção, e o menisco de água começa a perder sua forma contínua nos poros do solo. A zona residual de não saturação é caracterizada pela ocorrência apenas de fluxo de vapor de água. Assim, pequenas variações no teor de umidade acarretam grandes aumentos na sucção.

Entretanto, além do formato unimodal, a curva característica pode apresentar outras formas. No caso de solos residuais e coluvionares indeformados provenientes de regiões tropicais e subtropicais, em sua grande maioria, são originadas curvas características denominadas bimodais, ou em formato de “sela”, como as obtidas por Bastos (1999), Bortoli (1999) e Feuerharmel (2003). Segundo Feuerharmel (2007), a curva com formato bimodal é resultado da distribuição do tamanho dos poros, que apresentam na sua estrutura microporos e macroporos bem definidos. Estas curvas apresentam como características principais: (i) a existência de dois valores distintos de entrada de ar; (ii) a presença de um patamar intermediário (Feuerharmel *et al.*, 2006). Na figura 4(a) está a curva característica obtida por Bastos (1999) para um solo laterítico argilo-arenoso avermelhado, em amostras indeformadas. A figura 4(b) mostra a curva característica de um colúvio arenoso indeformado (Bortoli, 1999). Ambas as relações foram determinadas através o método do papel filtro.



(a)



(b)

Figura 4: Curvas características bimodais: (a) curva de um solo laterítico argilo-arenoso avermelhado (modificado de Bastos, 1999); (b) curva de um colúvio arenoso (modificado de Bortoli, 1999).

Feuerharmel (2003) determinou as curvas características de dois solos coluvionares na condição indeformada, um proveniente de um colúvio de basalto (Solo RO) e outro proveniente de um colúvio de arenito (Solo AV), sendo este último objeto de estudo do presente trabalho. Combinando os métodos do papel filtro e da placa de sucção, foram definidas as curvas características correspondentes, representadas na figura 5.

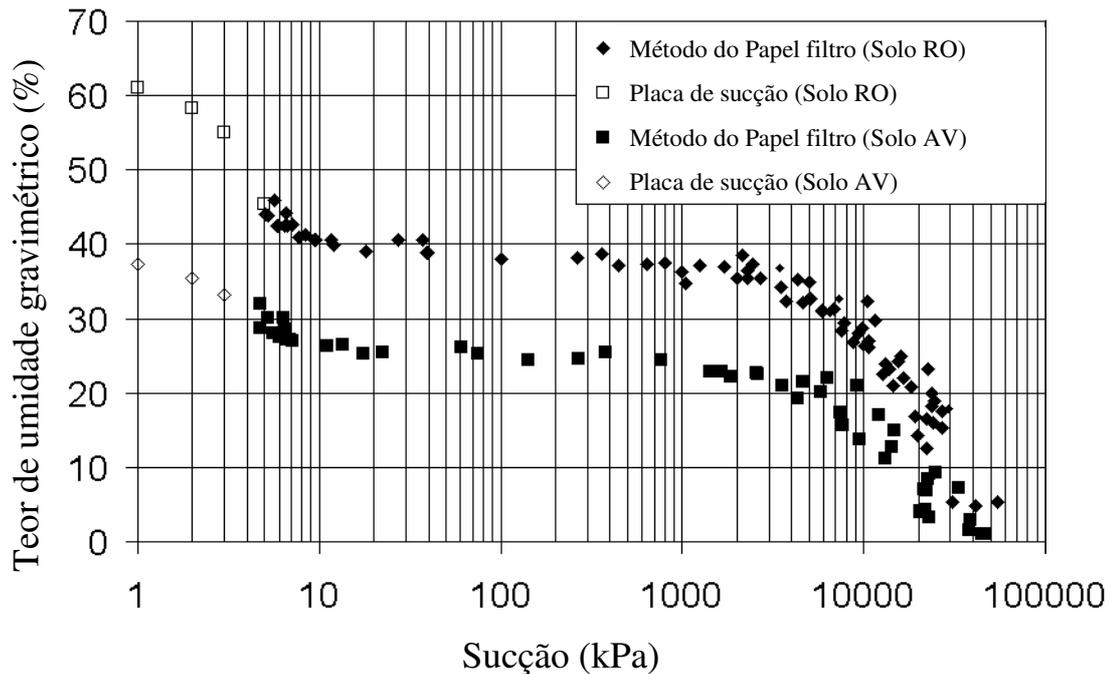


Figura 5: Curvas características bimodais de dois solos coluvionares indeformados – Solo RO e Solo AV (Feuerharmel *et al.*, 2006).

O modelo físico adotado para explicar o formato da curva bimodal foi sugerido por Feuerharmel (2003) como segue. No primeiro trecho da curva, a dessaturação é governada pela macroestrutura, ou seja, os solos que em seu estado natural apresentam grumos ou partículas argilosas fortemente agregadas em tamanho de grãos de areia, tendem a perder água mais facilmente. Após essa zona, há um patamar intermediário, onde o aumento da sucção não provoca uma variação significativa no teor de umidade, pela inexistência de poros de tamanho intermediário e devido à alta capacidade da microestrutura em reter água. O último trecho da curva, que tem início no segundo valor de entrada de ar, caracteriza-se pela redução no grau de saturação devido à retirada progressiva de água da microestrutura do solo, ou seja, do interior dos grumos ou micro-agregados de argila. Um detalhamento destes trechos foi apresentado por Feuerharmel *et al.* (2005), de acordo com a figura 6.

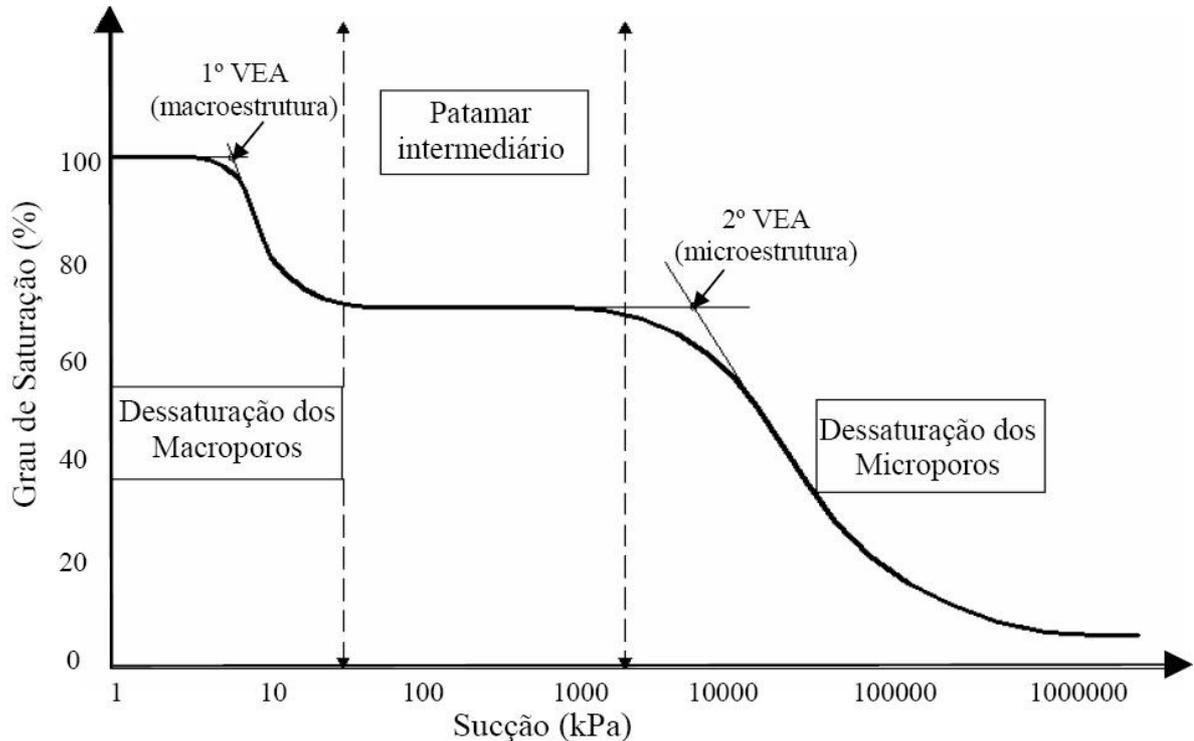


Figura 6: Trechos da curva característica bimodal (Feuerharmel *et al.*, 2005).

2.1.3.2 Equações de Ajuste da Curva Característica

A curva característica, de acordo com sua forma, pode ser representada através de equações, que correlacionam o valor da sucção com a quantidade de água nos poros (teor de umidade ou grau de saturação). Dentre as modelagens existentes na literatura geotécnica, a maioria leva em consideração a forma da curva característica e a distribuição de tamanho de poros. Entretanto, alguns modelos representam estimativas diretas a partir da distribuição granulométrica e de propriedades físicas do solo, sem considerar a influência de aspectos como o arranjo estrutural, estado de tensões, teor de umidade inicial e energia de compactação (Gerscovich, 2001).

Diversos estudos apresentam equações, em geral empíricas, que se caracterizam por serem restritas a determinados tipos de solo ou a pequenos intervalos de sucção, modelando apenas a trajetória de secagem. As principais pesquisas que obtiveram equações para a modelagem de curvas características unimodais estão descritas no trabalho de Fredlund e Xing (1994), como as expressões matemáticas de Gardner (1958), Brooks e Corey (1964), van Genuchten (1980), Williams *et al.* (1983) e McKee e Bumb (1984). Além disso, Fredlund e Xing (1994) propuseram a inclusão de fatores de correção, com o intuito de aumentar o intervalo de sucção

compreendido por estas equações. Esta correção direciona a curva para uma sucção de aproximadamente 1.000.000 kPa quando o teor de umidade se aproxima de zero. Mais recentemente, Galipolli *et al.* (2003) sugeriram uma correção da equação de van Genuchten (1980), para modelar a curva característica em um solo não saturado deformável. As referidas propostas estão resumidas na tabela 1.

Tabela 1: Equações que expressam curvas características unimodais.

Referência	Equação	Variáveis
Gardner (1958)	$\Theta = \frac{1}{1 + q \cdot \psi^\eta}$ <p>sendo $\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)}$</p>	Θ = teor de umidade normalizado; $\theta, \theta_r, \theta_s$ = teores de umidade volumétrico, residual e saturado; ψ = sucção; η e q = parâmetros de ajuste.
Brooks e Corey (1964)	$\Theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda$	λ = índice de distribuição de diâmetro de vazios; ψ_b = sucção correspondente ao valor de entrada de ar.
van Genuchten (1980)	$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right]^m$	α, n e m = parâmetros de ajuste.
Williams <i>et al.</i> (1983)	$\ln \psi = a + b \cdot \ln \theta$	a e b = parâmetros de ajuste.
McKee e Bumb (1984)	$\Theta = e^{-(\psi-a)/b}$	a e b = parâmetros de ajuste.
Fredlund e Xing (1994)	$\Theta = C_\psi \cdot \frac{\theta_s}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^\eta \right] \right]^m}$ <p>sendo $C_\psi = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r} \right)}$</p>	$\psi_0 = 10^6$ kPa; ψ_r = sucção no ponto de saturação residual; $e = 2,718$; $a = \psi_i$; $m = 3,67 \cdot \ln \left(\frac{\theta_s}{\theta_i} \right)$; $n = \frac{1,31^{m+1}}{m \cdot \theta_s} \cdot 3,72 \cdot s \cdot \psi_i$; s = inclinação.

Referência	Equação	Variáveis
Gallipoli <i>et al.</i> (2003)	$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m$ $\alpha = \phi(v - 1)^\psi$	v = volume específico; ϕ, ψ = constantes do solo.

Fonte: Fredlund e Xing (1994); Galipoli *et al.* (2003).

Em relação às curvas características bimodais, no entanto, poucas equações foram sugeridas em estudos prévios. Burger e Shackelford (2001) sugerem o ajuste de curvas características bimodais através de duas funções unimodais distintas, conforme o intervalo de sucção. Para utilizar o método descrito por esses autores, deve-se determinar o ponto de inflexão da curva, localizado no patamar intermediário da mesma, separando-a em dois trechos. Assim, qualquer curva unimodal anteriormente proposta pode ser utilizada para ajustar, de forma independente, cada trecho. Fredlund (1999) apresenta um modelo que descreve as curvas características bimodais, de acordo com a equação 4.

$$S = \left(1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right) \cdot \left(\frac{s_1}{\left\{ \ln \left[\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a_1} \right)^{n_1} \right] \right\}^{m_1}} - \frac{1 - s_1}{\left\{ \ln \left[\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a_2} \right)^{n_2} \right] \right\}^{m_2}} \right) \quad (\text{equação 4})$$

onde: a_1, m_1 e n_1 = parâmetros representativos de valores baixos de sucção;

a_2, m_2 e n_2 = parâmetros representativos de valores altos de sucção;

s_1 = sucção correspondente ao ponto de inflexão;

ψ_r = sucção residual.

Gitirana Jr. e Fredlund (2004) propuseram equações capazes de modelar quaisquer curvas características: (i) as unimodais, com um ou dois pontos de quebra; e (ii) as bimodais, com quatro pontos de quebra. Através deste modelo, é possível representar as trajetórias de secagem e de umedecimento da curva característica. As expressões sugeridas pelos autores

são baseadas na equação geral de uma hipérbole no sistema de coordenadas $[\ln(\psi) - Sr]$, posicionada em um ângulo α e com o centro transladado para fora da origem do sistema de coordenadas. A equação 5, a seguir, é representativa das curvas bimodais com quatro pontos de inflexão, sugerida por Gitirana Jr. e Fredlund (2004).

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b_1} \cdot \psi_{res_1}}} \right)^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{res_1} \cdot \psi_{b_2}}} \right)^{d_2}} + \frac{S_1 - S_2}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b_2} \cdot \psi_{res_2}}} \right)^{d_3}} + S_4 \quad (\text{equação 5})$$

$$\text{onde: } d_j = 2 \cdot \exp \left[1 / \ln \left(\frac{\psi_{j+1}^a}{\psi_j^a} \right) \right];$$

$$\psi_1^a = \psi_{b_1}; \psi_2^a = \psi_{res_1}; \psi_3^a = \psi_{b_2}; \psi_4^a = \psi_{res_2}; \psi_5^a = 10^6;$$

$$j = 1, 2, 3.$$

Na equação 5, os parâmetros S_1 , S_2 , S_3 e S_4 podem ser obtidos pela equação 6.

$$S_i = \frac{\tan \theta_i (1 + r_i^2) \cdot \ln \left(\frac{\psi}{\psi_i^a} \right)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)} + (-1)^i \frac{(1 + \tan^2 \theta_i)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)} \sqrt{r_i^2 \ln^2 \left(\frac{\psi}{\psi_i^a} \right) + \frac{a^2 (1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)}{(1 + \tan^2 \theta_i)}} + S_i^a \quad (\text{equação 6})$$

$$\text{onde: } \theta_i = -(\lambda_{i-1} + \lambda_i) / 2;$$

$$r_i = \tan((\lambda_{i-1} + \lambda_i) / 2);$$

$$\lambda_i = \arctan \left\{ (S_i^a - S_{i+1}^a) / \left[\ln \left(\frac{\psi_{i+1}^a}{\psi_i^a} \right) \right] \right\};$$

$$\lambda_0 = 0;$$

$$S_1^a = 1; S_2^a = S_{res1}; S_3^a = S_b; S_4^a = S_{res2}; S_5^a = 0;$$

$$i = 1, 2, 3, 4.$$

2.2 SOLOS NÃO SATURADOS CONTAMINADOS

A sucção osmótica pode ser facilmente determinada nos casos em que certa concentração de sal encontra-se dissolvida na fase água, quando são mantidas as fases líquida e gasosa nos poros do solo. Entretanto, quando o contaminante é imiscível em água, como é o caso dos derivados do petróleo, há a incorporação de uma nova fase na estrutura do solo. Existem ainda poucos estudos que avaliam estas diferentes configurações, mas o aumento do interesse por questões ambientais nos últimos anos está impulsionando pesquisas sobre as conseqüências da presença de diferentes fases no solo. Isso pode ser verificado em recentes estudos, como Cui *et al.* (2003), Sharma e Mohamed (2003) e Lima e Silva (2005).

2.2.1 Contaminantes Orgânicos Derivados do Petróleo

O petróleo é um composto derivado de matéria orgânica, formado por diversos processos geológicos e biológicos que resultam na produção e acumulação de diferentes tipos de moléculas orgânicas em sedimentos antigos. Em decorrência disto, a composição química do petróleo é complexa e variável, conforme as condições físico-químicas, biológicas e geológicas do ambiente no qual o mesmo é formado.

Entre os principais constituintes do petróleo estão os hidrocarbonetos (compostos orgânicos formados por hidrogênio e carbono), que possuem características apolares, ou seja, apresentam baixa solubilidade em água. Desta forma, esses compostos têm uma maior tendência à associação com as partículas sólidas, podendo ser adsorvidos aos grãos minerais e, como conseqüência, permanecer por um maior período no ambiente. Além desses hidrocarbonetos, o petróleo também é constituído por outros componentes em menor quantidade, tais como: enxofre, nitrogênio, oxigênio e diversos metais.

Os produtos resultantes do refino do petróleo são definidos como substâncias constituídas por uma mistura de compostos químicos orgânicos de diferentes solubilidades, inclusive os hidrocarbonetos (Fetter, 1999). Estes também podem ser classificados como líquidos não miscíveis em água, ou NAPL (*non-aqueous phase liquid*). Esta denominação é ainda subdividida entre as substâncias cujas densidades são menores ou maiores que a da água, classificando-as como LNAPL (*light non-aqueous phase liquid*) ou DNAPL (*dense non-aqueous phase liquid*), respectivamente.

A contaminação do solo por hidrocarbonetos é um grave problema geoambiental, uma vez que afeta o solo, as águas subterrâneas e a vegetação. Os hidrocarbonetos aromáticos, como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, estão presentes em todos os produtos derivados do petróleo. Devido aos seus altos graus de volatilidade, solubilidade e biodegradabilidade, estes compostos são os primeiros a serem esgotados a partir da fase livre da pluma de contaminação. Já os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, presentes no óleo diesel e em óleos lubrificantes, são pouco solúveis, e tendem a permanecer retidos próximo à fonte de contaminação (Fetter, 1999).

2.2.2 Solos Contaminados por Derivados do Petróleo

Como já mencionado, o solo não saturado pode ser visualizado como um sistema trifásico constituído por ar, água e partículas sólidas. Quando há a incorporação de um NAPL a esse sistema, surge uma fase adicional. Hasan (1996) divide as fases de um solo contaminado por NAPL como: (i) Fase ar: com componentes voláteis do contaminante presentes na fase vapor; (ii) Fase aquosa: com uma porção solúvel do contaminante dissolvido na água; (iii) Fase imiscível: parte imiscível do contaminante, caracterizada pela fase adicional; (iv) Fase sólida: eventualmente com algumas substâncias do contaminante adsorvidas na superfície dos grãos.

2.2.2.1 Características dos Solos Não Saturados Contaminados por NAPLs

Hasan (1996) afirma que, quando ocorre um derrame de um hidrocarboneto derivado de petróleo na superfície de um solo não saturado, o NAPL tende a cobrir os grãos minerais e formar um filme em torno dos poros. Se uma quantia suficiente de NAPL está disponível, este tende a ocupar todo o espaço do poro, devido à maior atração pelos grãos minerais em comparação ao ar. Já na porção saturada do solo, a água cobre os grãos minerais do solo e o óleo possui maior afinidade com a matéria orgânica presente.

Uma vez que o NAPL recobre as partículas sólidas do solo não saturado, existe uma alteração nas propriedades físicas do mesmo. Desta forma, as propriedades físico-químicas do contaminante influenciam no grau e na extensão das reações do meio poroso, de acordo com o pH do meio e da capacidade de troca catiônica (CTC) do solo. Além disso, essa interação é condicionada pelas propriedades físicas do solo, como a textura, a porosidade e a condutividade hidráulica (Mercer e Spalding, 1991; Boulding e Barcelona, 1991).

Dependendo das porcentagens relativas do volume dos poros ocupados por diferentes líquidos, o grau de saturação e a condutividade hidráulica serão diferentes em relação a um solo onde está presente somente um líquido. Segundo Hasan (1996), os processos físicos responsáveis por estas diferenças influenciam significativamente o transporte e destino dos NAPLs.

A saturação residual (S_{rr}) em um solo contaminado por NAPL pode ser definida como o volume de hidrocarboneto presente nos poros (V_h), em relação ao volume total dos poros (V_t). Matematicamente, essa pode ser expressa pela equação 7 a seguir.

$$S_{rr} = \frac{V_h}{V_t} \cdot 100 \quad (\text{equação 7})$$

De acordo com Mercer e Cohen (1990) *apud* Hasan (1996), essa definição foi desenvolvida como resultado de estudos relacionados à ocorrência e exploração do petróleo. No contexto das contaminações subterrâneas, a saturação residual pode ser descrita como o grau de saturação em que o NAPL torna-se descontínuo e permanece imobilizado por forças capilares. Existem pesquisas que mostram valores de saturação residual entre 1% e 50% para os hidrocarbonetos. Entretanto, as mesmas revelam que outros fatores, como a porcentagem relativa de silte e argila nos poros e as propriedades do meio permeável, possuem maior influência no controle da saturação residual em relação às propriedades do contaminante.

2.2.2.2 Estudos de Solos Não Saturados Contaminados por NAPLs

Cui *et al.* (2003) realizaram uma investigação experimental sobre as propriedades de retenção e transporte de um óleo hidrocarboneto leve (um LNAPL denominado “*Soltrol*”) em amostras compactadas não saturadas de um silte de baixa plasticidade. Para isso, foi desenvolvida uma célula multifásica especial que permitia o controle independente das pressões de óleo, água e ar. Assim, foi possível gerar as curvas de retenção de óleo das amostras compactadas em diferentes densidades e umidades, além da variação da permeabilidade do óleo com a sucção. A configuração do sistema formado por *Soltrol*, água e ar nos poros do solo, considerando que suas interações são predominantemente de natureza capilar, foi definida no estudo de Cui *et al.* (2001), conforme a figura 7(a). Em solos finos, esta disposição é reforçada pelas ligações

físico-químicas entre a água e a argila. No caso de uma amostra com alta densidade e elevado grau de saturação, a configuração pode aparecer de acordo com a figura 7(b).

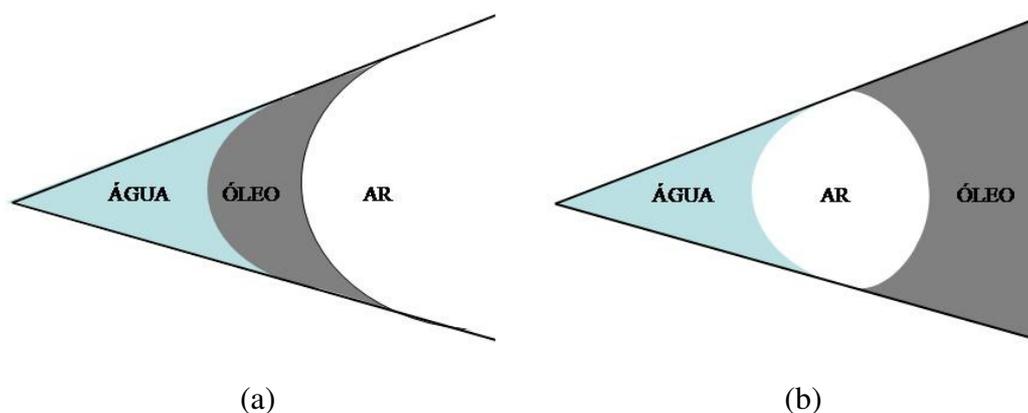


Figura 7: Configuração dos fluidos água/NAPL/ar no poro do solo: (a) somente fenômenos capilares estão presentes; (b) a amostra é compactada em alta densidade e elevado grau de saturação (Cui *et al.*, 2001).

Com os resultados obtidos, Cui *et al.* (2003) observaram que, apesar da ocorrência de uma interação físico-química entre o óleo e o solo, a ação capilar entre o óleo e o ar é o fenômeno que mais influencia nas características de retenção e transporte deste hidrocarboneto. A mesma constatação foi obtida em outros estudos, como em Lenhard e Parker (1988), Ferrand *et al.* (1990) e Busby *et al.* (1995). Estes autores compararam, em areias, as propriedades de retenção entre um sistema de duas fases (ar e NAPL) e um sistema de três fases (ar, água e NAPL). Como conclusão, os mesmos autores determinaram que a sucção capilar gerada pela interação óleo-ar é o parâmetro governante das propriedades de retenção e fluxo do contaminante no interior do solo não saturado.

Sharma e Mohamed (2003) estudaram os mecanismos de migração do LNAPL em uma areia não saturada. Para isso, os autores definiram a sucção mátrica em um sistema multifásico, composto por ar, LNAPL e água nos poros do solo. Neste caso, três interfaces diferentes podem ocorrer (ar-água, ar-LNAPL ou LNAPL-água). O ar é considerado um fluido “não-molhante”, a água um fluido “molhante” e o LNAPL de intermediária “molhabilidade”. Assim, a sucção mátrica é definida como sendo a diferença entre as poro pressões do fluido não-molhante e do fluido molhante na interface, conforme as equações 8 a 10. Segundo os mesmos autores, a sucção mátrica depende da tensão na interface entre dois fluidos e do raio de curvatura do menisco.

$$u_{aw} = u_a - u_w \quad (\text{equação 8})$$

$$u_{aL} = u_a - u_L \quad (\text{equação 9})$$

$$u_{Lw} = u_L - u_w \quad (\text{equação 10})$$

onde: u_{aw} , u_{aL} e u_{Lw} = sucções de ar-água, ar-LNAPL e LNAPL-água, respectivamente;

u_a , u_w e u_L = poro pressões de ar, água e LNAPL, respectivamente.

Ao considerar o sistema multifásico, Sharma e Mohamed (2003) explicitam a mesma configuração mostrada na figura 7(a). Assim, a sucção mátrica das interfaces formadas pode ser expressa pelas equações 9 e 10. A soma entre estas sucções resulta na equação 8, que corresponde à sucção da interface ar-água.

2.2.3 Curva Característica de Solos Contaminados

A curva característica, também chamada de curva de retenção, apesar de ser mais comumente estudada em relação à água presente no solo, pode ser determinada para qualquer fluido existente nos poros. Apesar dos poucos estudos que consideram diferentes fluidos presentes no solo, a crescente preocupação com as contaminações do meio ambiente vem originando pesquisas na área dos solos não saturados, como as de Cui *et al.* (2003) e Moncada (2004).

Cui *et al.* (2003), já citado no item 2.2.2.2, ao avaliar solos contaminados por um óleo derivado do petróleo, estudaram a curva denominada “curva de retenção NAPL/solo” (figura 8). Esta relação, descrita em termos de sucção *versus* grau de saturação do óleo, revela uma informação quantitativa sobre a energia necessária para extrair o contaminante dos vazios do solo. Esta informação é de fundamental importância em estudos geoambientais referentes a técnicas de remediação de áreas contaminadas.

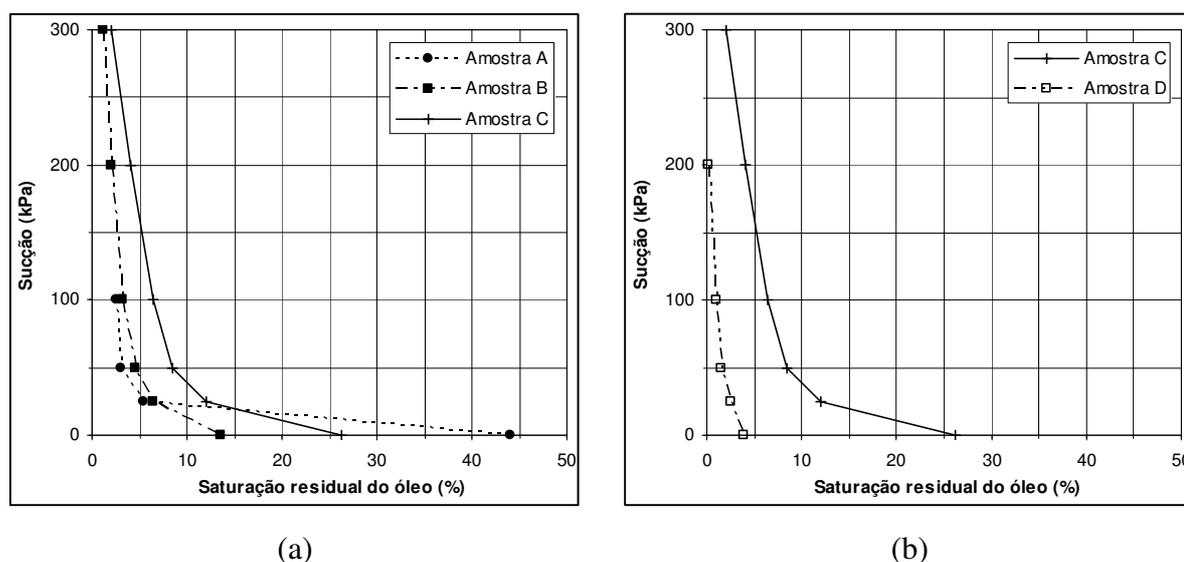


Figura 8: Curva de retenção NAPL/solo para amostras: (a) com mesmo teor de umidade e diferentes graus de compactação; e (b) diferentes teores de umidade e mesmo grau de compactação (baseado em Cui *et al.*, 2003).

A partir dos resultados obtidos, Cui *et al.* (2003) visualizaram que, em um teor de umidade similar, as curvas de retenção são fortemente dependentes da densidade, ou seja, do volume previamente ocupado pelo ar e disponível para a infiltração do óleo. Na figura 8(a), onde as amostras possuem mesmo teor de umidade e diferentes graus de compactação, pode-se observar que o máximo grau de saturação inicial do óleo, igual a 44%, ocorre para a amostra menos compacta (amostra A) e o menor valor ocorre para a amostra mais compacta (amostra B). Já na comparação entre amostras com diferentes teores de umidade e mesmo grau de compactação, representadas pelas amostras C e D, na figura 8(b), é possível constatar que a amostra D possui um menor grau de saturação inicial de óleo. Como esta amostra possui um maior teor de umidade, menos poros estão preenchidos por ar e disponíveis para a infiltração de óleo, justificando o baixo valor obtido, em torno de 3,7% para a saturação do óleo.

Moncada (2004) estudou as características de colapso e o transporte de solutos em um solo laterítico contaminado por licor cáustico. Para isto, a autora realizou uma série de ensaios de laboratório, utilizando as técnicas do papel filtro e ensaios de adensamento. A técnica do papel filtro foi adotada em amostras em diferentes níveis de contaminação, com o intuito de verificar seu efeito nos resultados de sucção mátrica e total. O licor cáustico é uma substância constituída por hidróxido de sódio, ferro, manganês e alumínio. A dissociação destes componentes em íons promove uma série de modificações na macroestrutura do solo, entre

elas a dispersão ou floculação das partículas de argila, dependendo da concentração dos mesmos.

Para os materiais sem contaminação, Moncada (2004) obteve curvas de sucção total e sucção mátrica coincidentes. Entretanto, para os solos contaminados por licor cáustico, houve um aumento de sucção total, o que caracteriza um aumento no teor de sais na água intersticial, conforme a figura 9, para as concentrações C_1 (20 g/l), C_2 (70 g/l) e C_3 (10 g/l). A autora observou a ocorrência de uma pequena alteração do índice de vazios do solo após a contaminação, e, como conseqüência, houve pouca variação da curva de sucção mátrica, visível somente em níveis de sucção elevados. Esses aspectos resultantes comprovam o aumento da sucção osmótica presente nos solos, através da subtração entre sucção total e mátrica.

Pelos resultados obtidos, Moncada (2004) verificou que os valores de sucção total aumentam com o valor da concentração do licor cáustico. Segundo a mesma autora, os acréscimos na sucção osmótica são lineares com a redução da umidade até determinado nível, a partir do qual a sucção osmótica começa a diminuir. Uma explicação plausível para este fato seria o fenômeno de precipitação dos sais a partir de um determinado nível de umidade, que depende da concentração do contaminante.

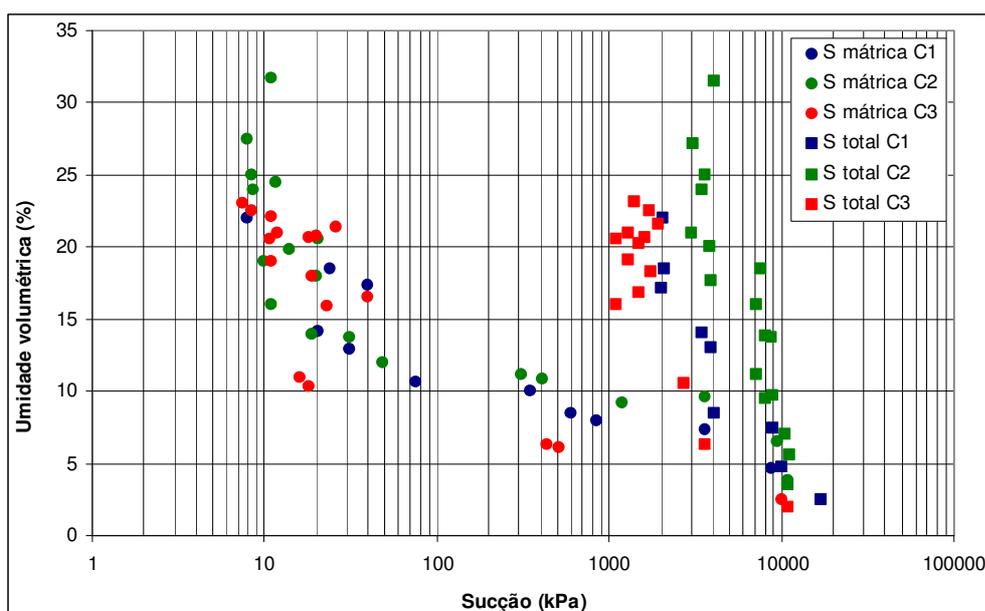


Figura 9: Pontos experimentais medidos para sucção mátrica e total em um solo contaminado com licor cáustico nas concentrações de $C_1= 20$ g/l, $C_2= 70$ g/l e $C_3= 10$ g/l (Moncada, 2004).

2.3 MÉTODO DO PAPEL FILTRO

A curva característica pode ser obtida por diversas técnicas, em campo ou em laboratório, através de métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos resultam nas medidas de sucção sem que sejam necessárias correlações entre esta e outros parâmetros do solo. Os métodos indiretos permitem a determinação da sucção do solo através da sua relação com propriedades de outros materiais. A escolha do melhor método a ser empregado depende do tempo para realização dos ensaios, do equipamento disponível, dos custos envolvidos, da precisão desejada, da complexidade do procedimento, entre outros.

O método do papel filtro constitui um meio indireto para medição de sucção. Segundo Leong *et al.* (2002), entre as principais vantagens da técnica, pode-se citar a simplicidade, o baixo custo e a possibilidade de medir um grande intervalo de sucção. Além disso, a versatilidade desse método permite sua utilização tanto em laboratório como em campo. Os primeiros relatos sobre a utilização de papéis filtro para obter a sucção do solo aparecem nos trabalhos de Hansen (1926) e Gardner (1937), ambos citados por Marinho (1994). Hansen (1926) saturou o papel em uma solução de açúcar antes de mantê-lo em ambiente fechado com a amostra de solo, sem que houvesse contato entre os mesmos. Gardner (1937) foi o pioneiro na utilização do papel filtro como um material absorvente, sem uso de quaisquer soluções para saturá-lo.

O princípio do método consiste em provocar uma transferência de água do solo para um material poroso (papel filtro), até que um equilíbrio seja atingido. O equilíbrio é definido pela igualdade de sucções entre os materiais, porém com diferentes teores de umidade (Marinho, 1994). Desta forma, conhecendo a relação entre sucção e umidade deste material poroso, através de uma curva de calibração, é possível determinar esta relação também para o solo.

Um importante aspecto do método do papel filtro é o fluxo de umidade entre o papel e o solo, que pode ocorrer através de fluxo capilar ou de vapor. O fluxo capilar surge através dos poros do solo e das fibras do papel, sem que a água perca sua continuidade. Este processo ocorre quando o papel filtro está em contato direto com o solo e o procedimento é denominado “método em contato”, conforme a figura 10 (a). Neste caso, a parcela de sucção medida é a sucção mátrica. No fluxo de vapor, as moléculas de água devem sair dos poros do solo pela superação de forças capilares e osmóticas. As forças osmóticas estão presentes em solos que possuem água intersticial contendo sais dissolvidos. Para que esse fluxo ocorra, deve ser

deixado um espaço entre o papel filtro e o solo, de acordo com a figura 10 (b). A camada de ar entre estes materiais constitui uma barreira para os sais, permitindo apenas a saída de vapor de água do solo em direção ao papel. Neste processo, denominado “método sem contato”, o valor medido corresponde à sucção total. A determinação da sucção osmótica é permitida pela subtração entre a sucção total e a sucção mátrica.

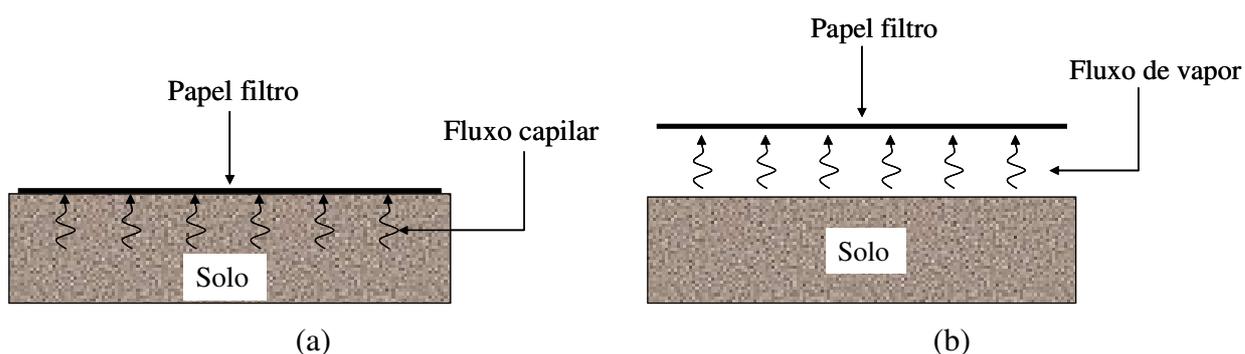


Figura 10: Princípio do método do papel filtro: (a) técnica em contato; (b) técnica sem contato (baseado em Marinho, 1994).

Houston *et al.* (1994) afirmam que, para baixos valores de sucção, a sucção mátrica é mais facilmente medida em relação à sucção total quando o método do papel filtro é utilizado. Isto pode ser explicado devido à baixa sensibilidade do papel filtro às variações de umidade em baixos níveis de sucção, quando esse não possui contato com a amostra. Por outro lado, em altas sucções, a continuidade da água é reduzida pelo baixo teor de umidade, mesmo que o papel e o solo estejam em contato. Neste caso, a migração da água ocorrerá apenas por fluxo de vapor, e as curvas de sucção mátrica e sucção total tendem a coincidir a partir de um determinado nível de umidade.

Durante a execução da técnica do papel filtro, diversos cuidados são necessários. Segundo Sibley e Williams (1990) e Houston *et al.* (1994), a medida eficiente da sucção depende: (i) do tipo de contato entre o papel filtro e o solo; (ii) do tempo deixado para equalização da sucção; (iii) da histerese entre as trajetórias de umedecimento e de secagem; (iv) da correta medida de umidade do papel filtro; (v) do número de papéis utilizado; e (vi) da oscilação de temperatura. Dentre outros cuidados para o método sem contato, Houston *et al.* (1994) ainda reforçam a necessidade de não haver variação de temperatura durante o período de equalização (mínimo de 7 dias) para evitar a ocorrência de condensação e vaporização do fluido no interior do compartimento onde está o sistema solo-papel. Outra precaução a ser

adotada constitui na minimização do espaço deixado acima da amostra de solo. Os mesmos autores ainda recomendam a utilização de amostras de solo com massa mínima de 150 a 200g.

De acordo com a norma ASTM D 5298-94 (ASTM, 1998), para uma medida correta dos pontos da curva característica pelo método do papel filtro, os seguintes cuidados são necessários: (i) o tempo mínimo de equalização requerido para a técnica de 7 dias, dependendo do tipo e magnitude da sucção a ser medida; (ii) o tempo entre a remoção do papel do topo da amostra e sua colocação em um compartimento fechado para pesagem deve estar entre 3 e 5s; e (iii) a temperatura padrão deve ser $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Woodburn e Lucas (1995) recomendam que as variações de temperatura máximas para a medida de sucção mátrica devem ser menores que 3°C , e, para a medida de sucção total, menores que $0,5^{\circ}\text{C}$.

Inúmeros estudos descritos na literatura geotécnica envolvem a utilização do método do papel filtro, e, sendo essa uma técnica que não possui uma padronização aceita mundialmente, existem variações e adaptações realizadas constantemente pelos pesquisadores. Entre os trabalhos mais recentes, que apresentaram uma contribuição para a presente dissertação, podem ser citadas as pesquisas de Marinho (1994), Feuerharmel (2003) e Moncada (2004).

Marinho (1994) realizou, entre outras investigações, um estudo qualitativo para avaliar o efeito da distância entre a fonte de vapor de água e o papel filtro, na técnica sem contato. Os resultados mostraram que essa distância influencia no teor de umidade do papel para um dado tempo de equilíbrio. A configuração resultante, utilizada por Marinho (1994) nos ensaios do papel filtro sem contato, está esquematizada na figura 11.

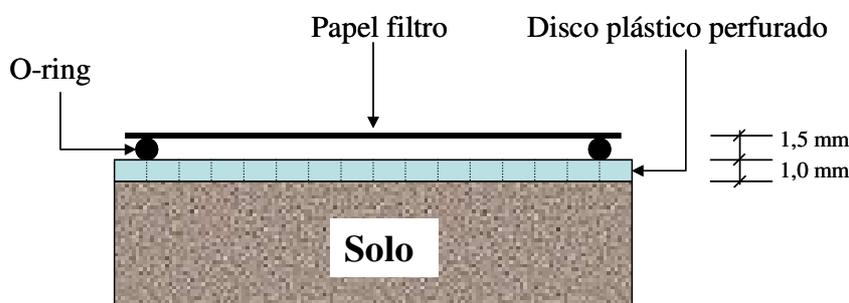


Figura 11: Configuração utilizada na técnica sem contato do papel filtro (baseado em Marinho, 1994).

Outra tendência observada no ensaio está relacionada ao tempo de equilíbrio requerido, que pode ser menor para amostras com maior sucção. O mesmo autor ainda afirma que a curva de calibração de Chandler e Gutierrez (1986) pode ser utilizada para atribuir valores de sucção total, desde que o tempo de equilíbrio seja adequado. Os tempos de equilíbrio sugeridos estão na tabela 2.

Tabela 2: Tempo de equilíbrio sugerido para medida de sucção total, em função do nível de sucção.

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

Fonte: Marinho (1994).

Como já citado anteriormente, Feuerharmel (2003) determinou as curvas características de dois solos coluvionares na condição indeformada através do método do papel filtro. Nesse estudo, foi possível realizar medições de sucção mátrica, pela técnica em contato, entre 5 kPa e 30 000 kPa. Foram utilizadas diversas amostras (50 mm de diâmetro e 20 mm de altura), com teor de umidade inicial de campo, sendo que algumas seguiram a trajetória de umedecimento, e outras, a trajetória de secagem. O papel filtro utilizado foi o Whatman N° 42, diretamente retirado da caixa. As amostras foram mantidas durante um tempo de equalização entre 4 e 7 dias, conforme o nível de sucção. Para complementar a curva característica, as medidas de sucção menores que 5 kPa foram determinadas pelo método da placa de sucção. Os resultados obtidos indicaram que as curvas características dos referidos solos são do tipo bimodal (descritas no item 2.1.3.1 desta dissertação). Além disso, verificou-se que os métodos do papel filtro e da placa de sucção podem ser utilizados em conjunto para a obtenção da curva característica, resultando em valores satisfatórios nos diferentes níveis de sucção.

Moncada (2004) utilizou o método do papel filtro para estudar as curvas características de um solo laterítico contaminado por licor cáustico. A autora utilizou amostras de 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura, sendo o papel Whatman N° 42 seco ao ar e cortado no mesmo

diâmetro da amostra de solo. As amostras não contaminadas foram avaliadas na condição indeformada e as contaminadas eram resultantes dos ensaios edométricos realizados previamente. Estas últimas foram colocadas em uma câmara de equalização (figura 12(a)) e mantidas dentro de um recipiente de isopor em câmara úmida com temperatura controlada, durante um período mínimo de 7 dias, conforme o nível de sucção da amostra. A figura 12(b) mostra um esquema transversal da câmara de equalização desenvolvida, onde foram medidas a sucção total e a sucção mátrica, na base e no topo da amostra, respectivamente. A separação entre o papel filtro e a amostra, para medição da sucção total, foi mantida com uma tela de material inerte.

Nas amostras não contaminadas, Moncada (2004) mediu apenas a sucção mátrica, sem o uso de câmaras de equalização, através dos mesmos procedimentos adotados por Marinho (1994). Para a determinação dos valores de sucção mátrica e sucção total, foi utilizada a calibração de Chandler *et al.* (1992).

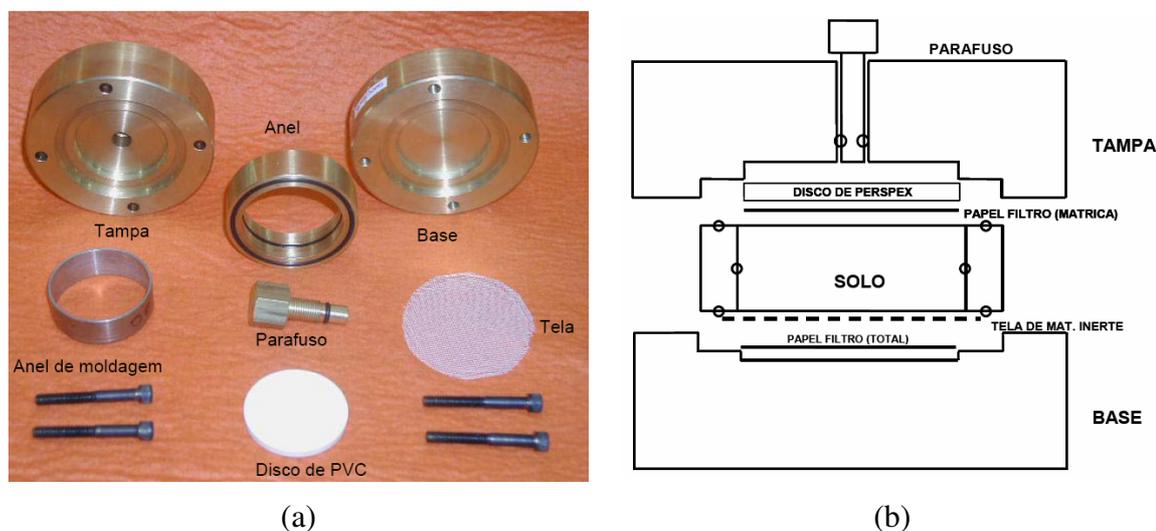


Figura 12: Câmara de equalização para medição de sucção total e mátrica: (a) câmara desmontada; (b) secção transversal (Moncada, 2004).

2.3.1 Calibração do Papel Filtro

Os papéis filtro possuem, em geral, diferentes sensibilidades de acordo com a faixa de sucção em que se está realizando a medição. Atualmente, os mais utilizados são os papéis filtro quantitativos do tipo II, como o Whatman N° 42 e o Schleicher & Schuell N° 589. Diversos estudos foram realizados com o intuito de verificar a eficiência dos diferentes papéis

disponíveis para utilização no método do papel filtro, como Sibley e Williams (1990) e Leong *et al.* (2002). Sibley e Williams (1990) verificaram a eficiência de cinco materiais absorventes, e concluíram que o Whatman N° 42 foi o papel filtro mais adequado para medidas de sucção entre 0 e 200 MPa, devido à maior estabilidade verificada nos resultados em um maior intervalo de sucções. Leong *et al.* (2002) compararam dados de calibração dos papéis Whatman N° 42 e Schleicher & Schuell N° 589. Segundo esses autores, o que possuía dados mais consistentes e com menor dispersão foi o papel Whatman N° 42.

As calibrações do papel filtro Whatman N° 42 foram realizadas por diversos autores, como Fawcett e Collis-George (1967), van Genuchten (1980), Hamblin (1981), Chandler e Gutierrez (1986), Chandler *et al.* (1992), Fredlund e Xing (1994) e Leong *et al.* (2002). A obtenção destas curvas foi possível com papéis filtro inicialmente secos, em contato com sucções conhecidas, até que ocorresse o equilíbrio. Na maioria dos casos, a curva de calibração é composta por duas equações que representam diferentes sensibilidades na resposta do papel filtro em intervalos de altas e de baixas sucções. Apesar de não haver um consenso sobre qual equação é a mais adequada, existem algumas particularidades em cada estudo.

Hamblin (1981) examinou as curvas de calibração de diferentes lotes de papéis Whatman N° 42 produzidos entre dois anos, e verificou que as mesmas eram praticamente idênticas. Na curva obtida por Chandler e Gutierrez (1986), foram inclusos os resultados de Fawcett e Collis-George (1967) e Hamblin (1981), o que confere maior confiabilidade ao estudo. Na pesquisa de Leong *et al.* (2002), os dados de sucção total foram conhecidos através da utilização de soluções de sais em dessecadores de vácuo. Já os dados de sucção mátrica, com o uso de placas de pressão. Os mesmos autores verificaram, como em alguns trabalhos anteriores, que há diferentes respostas do papel filtro para as medidas de sucção mátrica e total. Os dados de sucção total indicaram que para valores abaixo de 1000 kPa, o teor de umidade do papel filtro é menos sensível para o nível de sucção, em comparação aos dados de sucção mátrica. Acima deste valor, ambas as curvas convergem. A maioria dos estudos que determinam essa diferença para altos valores de sucção sugere que acima de determinado valor de sucção (em torno de 1000 kPa), grande parte da movimentação de água ocorre por transferência de vapor, e apenas uma pequena parte por capilaridade. Na tabela 3, a seguir, estão descritas as principais curvas de calibração para o papel filtro Whatman N° 42.

Tabela 3: Curvas de calibração do papel filtro Whatman N° 42.

Referência	Medida	Curva de calibração
van Genuchten (1980)	Sucção mátrica	$\psi = 0,051 \cdot \left[\left(\frac{248}{w} \right)^{9,615} - 1 \right]^{0,473}$
	Sucção total	$\psi = 56180 \cdot \left[\left(\frac{37}{w} \right)^{0,44} - 1 \right]^{2,361}$
Hamblin (1981)	Sucção mátrica	$\psi[kPa] = 10^{(8,022-3,683 \cdot \log w)}$
Chandler <i>et al.</i> (1992)	Sucção mátrica	$\psi[kPa] = 10^{(4,84-0,0622 \cdot w)}$ para $w \leq 47\%$
		$\psi[kPa] = 10^{(6,05-2,48 \cdot \log w)}$ para $w > 47\%$
Fredlund e Xing (1994)	Sucção mátrica	$\psi[kPa] = 0,23 \cdot \left[e^{(268/w)^{0,629}} - e \right]^{2,101}$
	Sucção total	$\psi[kPa] = 18500 \cdot \left[e^{(37/w)^{0,242}} - e \right]^{2,248}$
Leong <i>et al.</i> (2002)	Sucção mátrica	$\psi[kPa] = 10^{(2,909-0,0229 \cdot w)}$ para $w \geq 47\%$
		$\psi[kPa] = 10^{(4,945-0,0673 \cdot w)}$ para $w < 47\%$
	Sucção total	$\psi[kPa] = 10^{(8,778-0,222 \cdot w)}$ para $w \geq 26\%$
		$\psi[kPa] = 10^{(5,31-0,0879 \cdot w)}$ para $w < 26\%$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os métodos de preparação das amostras e de execução dos ensaios de laboratório realizados para o desenvolvimento do presente estudo. Entre as peculiaridades do trabalho desenvolvido, destaca-se a contaminação do solo, realizada em laboratório, com óleo diesel em diferentes dosagens, para determinação das curvas características. Quanto ao programa experimental proposto, o mesmo inclui a realização de ensaios para determinação da curva característica de sucção total, com diferentes graus de contaminação do solo, pelo método do papel filtro sem contato. A metodologia proposta possui algumas modificações em relação às técnicas utilizadas por outros pesquisadores, com o intuito de minimizar alguns problemas identificados no decorrer dos ensaios.

3.1 SOLO INVESTIGADO

O material utilizado nesta dissertação já foi amplamente caracterizado e investigado em trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Geotecnologia LAGEO/UFRGS, como em Feuerharmel (2003), Silveira (2003), Pereira (2006) e Feuerharmel (2007). Nestes estudos, o solo foi denominado Solo AV, cuja identificação será mantida neste trabalho. As informações a seguir correspondem aos aspectos mais relevantes descritos por esses autores, a respeito da localização, caracterização geológica e pedológica do material investigado.

O Solo AV é proveniente da encosta da Formação Serra Geral, pertencente à Bacia Sedimentar do Paraná, entre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Este solo foi amostrado em um local com ocorrência de colúvios, onde ocorrem as unidades geológicas denominadas Formação Botucatu e Formação Serra Geral. A Formação Botucatu é constituída por arenito de granulometria média a fina, com grãos arredondados de formação predominante quartzo-feldspática, onde estão presentes óxidos de ferro. A Formação Serra Geral é formada, no local, por rochas ácidas intercaladas com extensas camadas de rochas básicas, representadas por riolitos, dacitos e riodacitos entre espessas camadas de basalto com

textura afanítica e estrutura maciça. O arenito da Formação Botucatu, onde surge intercalado com a Formação Serra Geral, é denominado arenito *intertrapp*. Nesta região, devido a processos de intemperismo e sedimentação, formaram-se os chamados depósitos cenozóicos, caracterizados por colúvios, tálus, leques aluviais e depósitos aluvionares.

A classificação pedológica do Solo AV corresponde a um Argissolo Vermelho-Amarelo (Feuerharmel, 2007), formado pelo intemperismo do arenito Botucatu. Este tipo de solo se caracteriza por ser formado em boas condições de drenagem (não hidromórficos) e por possuir argilas de baixa atividade.

3.2 COLETA DAS AMOSTRAS

O solo em estudo foi amostrado de um colúvio localizado no sopé de uma encosta vulcânica situada no município de Timbé do Sul (SC), junto à localmente denominada Estrada do Lixão, próximo ao entroncamento com a Estrada da Rocinha. A Figura 13 mostra o local de onde foram coletadas as amostras. A massa de Solo AV corresponde a um depósito coluvionar, localizado a uma cota de aproximadamente 150 m em relação ao nível do mar, tendo como acesso a Rodovia BR-101, no município de Sombrio (SC) ou a rodovia RS-285, em São José dos Ausentes (RS).



Figura 13: Local de coleta das amostras do solo AV (colúvio de arenito).

O solo amostrado é caracterizado por sedimentos clásticos inconsolidados, sendo provavelmente um colúvio oriundo de arenito *intertrapp*. Os ensaios de caracterização já realizados nestes depósitos demonstraram que o Solo AV é um solo argilo-arenoso e encontram-se *in situ* na condição não saturada (Feuerharmel, 2003).

Para possibilitar os ensaios propostos por este estudo, o solo foi amostrado com sua estrutura deformada. Depois disso, o mesmo foi acondicionado em sacos plásticos vedados, para manter a umidade inicial de campo, e armazenado em caixas preenchidas por serragem, para o transporte até o Laboratório de Geotecnologia (LAGEO/UFRGS), onde foram realizados os demais procedimentos e os posteriores ensaios. Todos os cuidados necessários para a amostragem foram seguidos conforme preconiza a norma brasileira NBR 9604/86. Em laboratório, as amostras foram mantidas em local com pouca variação de temperatura, para minimizar a perda de umidade, até sua utilização na moldagem dos corpos de prova.

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA DO SOLO

Os ensaios de caracterização física do Solo AV foram realizados por Feuerharmel (2003), de acordo com as recomendações previstas nas normas brasileiras. Para avaliar as propriedades do solo natural, a autora realizou os ensaios de peso específico real dos grãos (γ_s), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e análise granulométrica. Neste estudo, foram executados também os ensaios de caracterização mineralógica do solo, através de difratogrametria de Raios-X, o que permitiu um melhor conhecimento a respeito do comportamento do mesmo. Esses resultados obtidos por Feuerharmel (2003) foram considerados na presente dissertação, uma vez que se trata da utilização do mesmo material.

Entretanto, como complemento da caracterização já existente para o Solo AV, foram realizados novamente os ensaios de difratogrametria de Raios-X, para constatar a presença dos mesmos minerais presentes na sua estrutura, em relação aos estudos anteriores.

3.3.1 Caracterização Física

A completa caracterização do Solo AV foi realizada na dissertação de Feuerharmel (2003), incluindo um estudo detalhado sobre a localização, caracterização geológica, pedológica e física do mesmo solo. Os ensaios de caracterização física foram executados de acordo com as normas NBR 6459/84, NBR 7180/84, NBR 6508/84 e NBR 7181/84. Os resultados estão

resumidos na tabela 4. As curvas granulométricas obtidas com e sem defloculante (hexametáfosfato de sódio) podem ser visualizadas na figura 14.

Tabela 4: Características físicas do solo estudado (Solo AV).

γ_s (kN/m ³)	LL (%)	LP (%)	IP = LL-LP (%)	Com defloculante			Sem defloculante		
				Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
28,0	56	34	22	53	15	32	0	9	91

Fonte: Feuerharmel (2003).

Os resultados apresentados confirmam que o Solo AV, em seu estado natural, possui partículas de argilas agrupadas, formando grãos de tamanho semelhante a partículas de areia ou silte. Isso pode ser constatado ao comparar os valores obtidos nos ensaios de granulometria realizados com e sem defloculante.

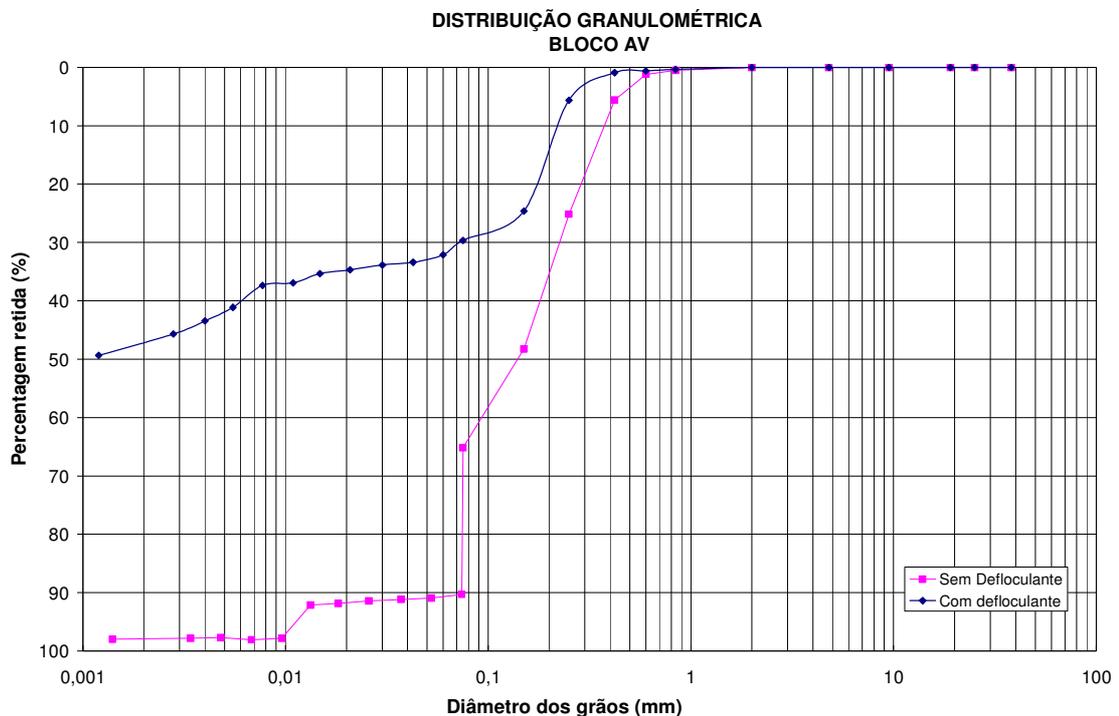


Figura 14: Curvas granulométricas do solo estudado (Feuerharmel, 2003).

3.3.2 Caracterização Mineralógica

Existem diversas maneiras de realizar a caracterização mineralógica de um solo, como por exemplo, através de: análises químicas, difração de Raios-X, microscopia eletrônica, determinação da capacidade de troca catiônica, entre outros. A escolha do método mais adequado depende fundamentalmente do tipo de solo, que pode ser definida de maneira preliminar a partir do conhecimento da formação geológica do material. No estudo de Feuerharmel (2003), o Solo AV foi caracterizado através de ensaios de difratometria de Raios-X, em amostras naturais, glicoladas e calcinadas. Seus resultados estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Características mineralógicas do solo estudado.

Tipo de Amostra	Argilominerais
Natural	Caulinita e quartzo
Glicolada	Caulinita e quartzo
Calcinada	Quartzo

Fonte: Feuerharmel (2003).

Com o intuito de verificar os minerais existentes em campo, foram realizados novamente os ensaios de difratometria de Raios-X no Laboratório de Difratometria de Raios-X do Instituto de Geociências da UFRGS, possibilitando a identificação dos grupos de argilominerais presentes no solo. Para tanto, foram analisadas amostras naturais, glicoladas e calcinadas do Solo AV. O equipamento utilizado nestas análises foi um difratômetro da marca *Siemens*, modelo *Diffraktometer D500*, com tubo de cobre, potência de 1200 Watts e velocidade do goniômetro de 1°/min.

O procedimento de preparação da amostra natural consistiu em primeiramente secar, desagregar e passar o solo na peneira de 0,075 mm (# 200). Após, aproximadamente 5 g desse material foi colocado em um copo com 250 ml de água destilada, e em seguida homogeneizado. Assim, a mistura foi submetida à sedimentação pelo período de 2 h e 30 min. Com isso, foram retirados os 3 cm superiores de água, sendo que o material ainda em suspensão nesta região representa a fração de partículas inferiores a 2 µm. Este foi centrifugado e diluído em água destilada, sendo então depositado em uma lâmina de vidro para secagem.

Para a amostra glicolada, foi realizado o mesmo procedimento anterior, porém saturou-se uma parte da amostra com etilenoglicol. Este processo visa a identificação de argilominerais expansivos, uma vez que estes adsorvem etilenoglicol entre as camadas basais, aumentando a distância interplanar basal da amostra. A amostra calcinada foi obtida com o aquecimento da amostra natural a 490°C durante duas horas. Este aquecimento elimina as moléculas de água adsorvida nos argilominerais, reduzindo ou anulando a distância interplanar basal.

Com as amostras preparadas, o ensaio foi realizado, através da execução de uma varredura das mesmas com raios X, com inclinações de 2 a 15° (escala 2 θ) e velocidade de 1°/min.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DIESEL

Para a realização dos ensaios de determinação das curvas características, foi utilizado óleo diesel na forma em que o mesmo é comercializado. As principais características deste contaminante estão apresentadas na tabela 6, a seguir.

Tabela 6: Propriedades do óleo diesel utilizado.

Propriedades do óleo diesel	Quantificação
Massa específica a 20°C (kg/m ³)	825,4
Enxofre (%)	0,0360
Água e sedimentos	Traços
Aspecto	Límpido e isento de impurezas
Cinzas (%)	0,0020

Fonte: Refinaria de Petróleo Ipiranga S.A.

Como se trata de uma substância altamente fluida, composta predominantemente por hidrocarbonetos de baixo peso molecular, existe uma facilidade de espalhamento deste composto no ambiente, em especial através da água, no caso de ocorrência de vazamentos acidentais. O óleo diesel é o combustível mais utilizado atualmente no país, sendo o mesmo transportado tanto através de rodovias, como por ferrovias e hidrovias.

3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO

Os ensaios para a caracterização química foram realizados com o intuito de avaliar as mudanças nos aspectos químicos do Solo AV, quando o mesmo é submetido à contaminação por óleo diesel. Para tanto, foram analisadas amostras com diferentes teores de contaminante, em função do teor de umidade inicial do solo (0%, 5% e 15% de óleo diesel). As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Química do Solo, pertencente ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, para as seguintes análises:

- a) Análise básica do solo: potencial hidrogeniônico (pH), presença de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC) – verificação da presença dos elementos fósforo, potássio, sódio, manganês, alumínio, cálcio, magnésio e hidrogênio, saturação de bases e saturação de alumínio, além do teor de enxofre;
- b) Condutividade elétrica;
- c) Análise de metais no solo: presença de cádmio, chumbo, cromo, níquel e zinco.

Conforme solicitado por esse laboratório, cada amostra foi preparada com massa aproximada de 500g, realizando apenas a correção do teor umidade gravimétrico para 28,5% (valor inicial do ensaio para determinação da curva característica), e, após, a respectiva contaminação com óleo diesel (5% e 15%). As amostras assim obtidas foram acondicionadas em embalagens plásticas identificadas, e não foram compactadas.

3.5.1 Análise Básica

A análise básica do solo foi realizada através da metodologia recomendada pela Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e documentada pela Faculdade de Agronomia da UFRGS. A seguir estão citados os métodos utilizados para a determinação de cada fator estudado, conforme descrito por Tedesco *et al.* (1995).

A determinação do potencial hidrogeniônico foi realizada simplesmente pela medida do pH em água (na relação solo:água de 1:1), através de um potenciômetro devidamente calibrado. Já a determinação do teor de matéria orgânica foi feita pelo método de oxidação da mesma no

solo, através de solução sulfocrômica com calor externo e determinação espectrofotométrica do cromo catiônico. A partir disso, é aplicada uma correlação entre o método colorimétrico e o de Walkley-Black.

A capacidade de troca catiônica, que indica a quantidade de íons instáveis existentes no solo, foi obtida através da soma dos teores dos cátions K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} e Mn^{2+} trocáveis existentes. Os íons de potássio e sódio, assim como os de fósforo, foram extraídos pelo método do extrator duplo ácido, através de sedimentação. Os demais elementos foram retirados através de um sal neutro (cloreto de potássio), por mecanismos de troca. Para a determinação do teor de enxofre disponível no solo, foi utilizada uma solução extratora de fosfato de cálcio, através de decantação.

3.5.2 Análise da Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica indica o teor de eletrólitos ou sais dissolvidos na solução do solo, e constitui um indicador bastante utilizado para constatar a presença de contaminantes na sua estrutura. Para a determinação de seu valor, foi utilizada a técnica do extrato de saturação, que representa o menor teor de umidade do solo que pode ser repetido com facilidade. O resultado obtido é facilmente correlacionado com os medidos na condição de umidade natural do solo (Tedesco *et al.*, 1995).

3.5.3 Análise de Metais

A análise da presença de metais (cádmio, chumbo, cromo, níquel e zinco) foi realizada através da metodologia EPA 3050 – Digestão Ácida de Sedimentos, Lodo e Solos, criada pela U.S. Environmental Protection Agency (USEPA, 1996), e utilizada, entre outras aplicações, para verificar os metais ambientalmente disponíveis no solo. Os metais analisados nesta dissertação, através dessa metodologia, foram o cádmio, o chumbo, o cromo, o cobre, o níquel e o zinco. A vantagem na utilização desse método é que o mesmo permite a determinação da totalidade do metal presente na massa bruta do solo, e não somente aquele que está biodisponível.

3.6 MICROSCOPIA ÓTICA

A estrutura interna do Solo AV foi caracterizada por meio de estudos petrográficos convencionais. Para tal finalidade, foram preparadas lâminas delgadas de amostras impregnadas e tingidas do Solo AV sem contaminante e com os teores de 2%, 5%, 10% e 15% de óleo diesel. Após, as mesmas foram visualizadas em um microscópio ótico petrográfico, onde foi possível fotomicrografar a distribuição dos poros do solo e comparar os resultados obtidos para os diferentes níveis de contaminação estudados.

3.7 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados no ensaio para determinação da curva característica foram moldados a partir do solo deformado amostrado. O solo foi inicialmente manipulado apenas com a força das mãos para que perdesse sua macroestrutura original, o que caracterizou sua condição remoldada. Após, o solo foi separado em pequenas parcelas, cada uma com quantidade suficiente para moldagem de uma amostra, e foi feito um ajuste da umidade. O teor de umidade inicial e o índice de vazios eleitos para o primeiro ponto da curva característica foram os mesmos utilizados por Feuerharmel (2007). Neste trabalho, a autora realizou ensaios para determinação da curva característica do Solo AV remoldado, sem contaminação. A escolha das mesmas condições iniciais do trabalho citado foi útil para que pudessem ser comparados ambos os resultados, para o solo com e sem contaminação.

Após ajuste da umidade, foi realizada a contaminação do solo com óleo diesel, em teores iniciais de 2%, 5%, 10% e 15%, em relação ao peso inicial de água, com exceção das amostras preparadas sem contaminante. O contaminante foi adicionado ao solo e homogeneizado com o auxílio de uma espátula. Após isso, a mistura foi moldada em anéis de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, através de compactação estática, com o auxílio de um soquete metálico. O excesso de solo foi utilizado para confirmar o teor de umidade inicial do corpo de prova recém moldado. Este solo foi dividido em duas cápsulas metálicas, sendo estas pesadas e mantidas em estufa a 100°C por no mínimo 24 h. Após este período, as cápsulas foram pesadas novamente para determinar a o peso seco e, finalmente, o teor de umidade.

3.8 DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

A curva característica permite a visualização sobre a variação da sucção com os diferentes teores de umidade que o solo pode apresentar. Apesar de ser um parâmetro essencial para o estudo dos solos não saturados, a medição de valores precisos de sucção ainda é considerada difícil. O método do papel filtro constitui uma técnica simples, de baixo custo e com uma ampla faixa de medida de sucção, entretanto diversos cuidados devem ser tomados para que seus resultados sejam satisfatórios. Este método apresenta apenas uma normalização internacional, a ASTM D 5298-94 (1998).

3.8.1 Método do Papel Filtro

O método do papel filtro foi a técnica eleita para determinar as curvas características nesta dissertação. Uma vez que a sucção a ser medida corresponde à sucção total, a metodologia utilizada foi a técnica sem contato, descrita anteriormente no Capítulo 2. Entretanto, algumas modificações foram propostas, com o objetivo de minimizar alguns problemas verificados durante a execução dos ensaios. O procedimento consiste basicamente em colocar um pedaço de papel filtro a uma pequena distância da superfície da amostra de solo, até que o equilíbrio de sucção total seja estabelecido. O valor da sucção é obtido através das curvas de calibração do papel filtro. O papel utilizado neste trabalho foi o Whatman N° 42, cuja umidade do mesmo seco ao ar é de aproximadamente 6%. Como no estudo de Marinho (1994) foi constatado que, para tempos de equilíbrio adequados, é possível utilizar curvas de calibração obtidas para sucção mátrica na obtenção de pontos para sucção total, as equações de calibração utilizadas foram as propostas por Chandler *et al.* (1992). A seguir estão apresentados os materiais necessários à execução da técnica, e, após, a proposta de procedimento de ensaio.

3.8.1.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta dissertação para medição da sucção total através da técnica do papel filtro compreendem:

- a) anéis metálicos e de PVC com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura;
- b) papel filtro Whatman N° 42;

- c) telas de PVC e anéis de borracha *O-rings*, para promover a separação entre o solo e o papel filtro;
- d) balança eletrônica da marca *Ohaus*, modelo *Adventurer AR 2140*, com resolução de 0,0001g e capacidade de 210 g, para pesagem dos papéis e das amostras ensaiadas;
- e) estufa à temperatura de 60°C para secagem do papel filtro;
- f) filme de PVC e papel alumínio para embrulhar a amostra;
- g) recipientes de vidro com tampa identificados para pesagem dos papéis filtro;
- h) tampas de cápsulas de alumínio identificadas para secagem do papel;
- i) pinça metálica para manusear o papel filtro;
- j) tesoura para corte do papel filtro e do filme de PVC;
- k) conta-gotas para umedecer as amostras;
- l) paquímetro para controlar a variação de altura e diâmetro das amostras;
- m) caixa de isopor para armazenar as amostras durante o período de equalização e reduzir a variação de temperatura.

3.8.1.2 Ensaio

O procedimento adotado nesta dissertação para o método do papel filtro foi adaptado dos estudos de Marinho (1994), para a técnica sem contato, com algumas modificações. Além disso, diversos detalhes da técnica desenvolvida por Feuerharmel (2003) foram também utilizados durante a execução do ensaio. O mesmo consistiu nos seguintes passos:

- a) Procedimentos iniciais: a primeira etapa do trabalho corresponde à moldagem das amostras, realizadas de acordo com a seção 3.7 desta dissertação. Os anéis foram protegidos na parte inferior com duas camadas de filme plástico de PVC e envolvidos nas laterais por fita isolante. Este cuidado foi providenciado para evitar a possível perda de material durante a execução do ensaio, além de evitar

que o solo se desprendesse do anel, em caso de contração do mesmo durante a trajetória de secagem. Foi realizada também a determinação dos índices físicos iniciais das amostras, como o teor de umidade, índice de vazios e pesos específicos do solo;

- b) Ensaio: o ponto de partida para as curvas características ocorreu na umidade inicial de campo verificada por Feuerharmel (2003), com o intuito de possibilitar a comparação dos resultados obtidos com as curvas determinadas no trabalho anterior. Da mesma forma que a autora citada, foram realizados ciclos de secagem e de umedecimento de modo a reproduzir as condições que podem ocorrer em campo.

Acima das amostras, foi colocado um anel *O-ring* (figura 15 (a)), seguido de uma tela de material inerte (PVC), para permitir um espaçamento entre a amostra de solo e o papel filtro, possibilitando o fluxo de vapor entre estes materiais. Sobre a tela, dois papéis filtro foram colocados, com área superior a 2 cm², tomando-se o cuidado de não permitir a sobreposição dos mesmos. Cada papel foi retirado diretamente da caixa, em equilíbrio com o ambiente, e manuseado com uma pinça metálica (figura 15 (b)). Acima dos papéis, foi colocada outra tela de PVC, para minimizar a movimentação dos mesmos sobre a amostra. Sobre a tela, foi colocado um anel metálico também com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, para manter um ambiente de fluxo de vapor. O conjunto foi envolvido inicialmente com o filme plástico (figura 15 (c)) e após com o papel alumínio. O contato entre o solo e o papel alumínio foi evitado para que não houvesse qualquer reação entre este e o contaminante. Depois de embalada, a amostra foi colocada em um saco plástico identificado e lacrado (figura 15 (d)), sendo este, após, armazenado em uma caixa de isopor durante o tempo de equalização. Esta caixa foi mantida em uma sala climatizada com temperatura de 20°C e variação máxima de 2°C.

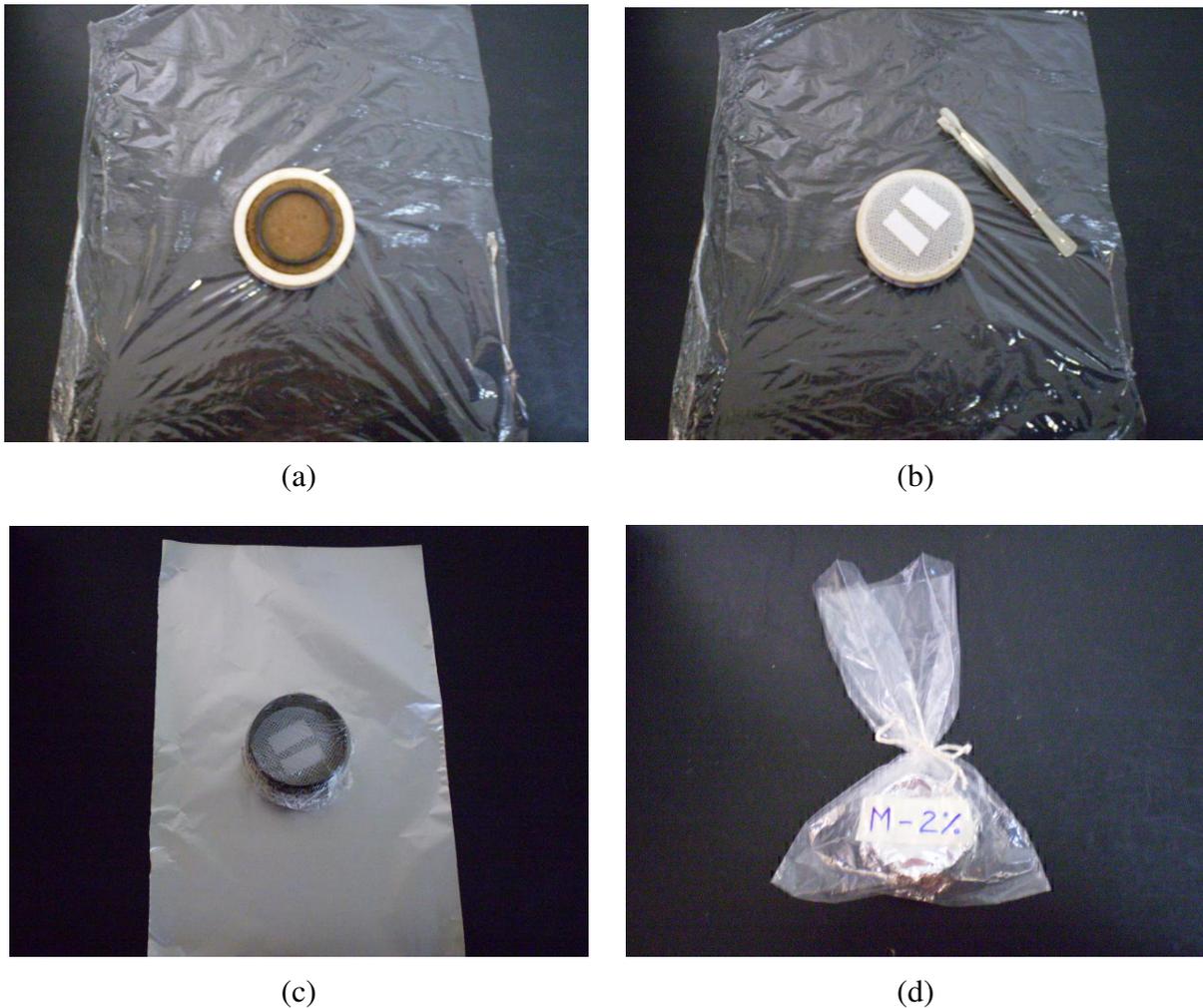


Figura 15: Etapas do fechamento das amostras para o método do papel filtro sem contato: (a) amostra de Solo AV com anel O-ring; (b) amostra com tela de PVC e papéis filtro sobrepostos ao O-ring; (c) amostra com anel metálico sobre o conjunto, envolto por filme plástico; e (d) amostra embalada e identificada.

Um esquema da configuração desta metodologia pode ser visualizado na figura 16. Os tempos de equilíbrio iniciais utilizados para medição da sucção total variaram entre 7 e 30 dias, permitindo verificar o período necessário de equalização em cada nível de sucção das amostras. Após este período, a amostra foi desembrulhada e os papéis removidos rapidamente para um recipiente de vidro com tampa. Conforme preconiza a norma ASTM D 5298-94, o tempo para esse procedimento deve ser entre 3 e 5 segundos. Os pesos úmidos da amostra de solo e dos papéis filtro foram então determinados, com o auxílio da balança com resolução de 0,0001 g. Após, cada papel foi transferido para tampas de cápsulas identificadas com o mesmo número do vidro no qual o mesmo foi pesado. Desta forma, os papéis foram levados a uma estufa com temperatura de 60°C, por no mínimo 48 horas. A justificativa do uso desta

estufa refere-se ao pouco uso da mesma no LAGEO, o que reduziu os riscos de uma interação química ou física entre os papéis e os outros materiais eventualmente colocados nessa estufa.

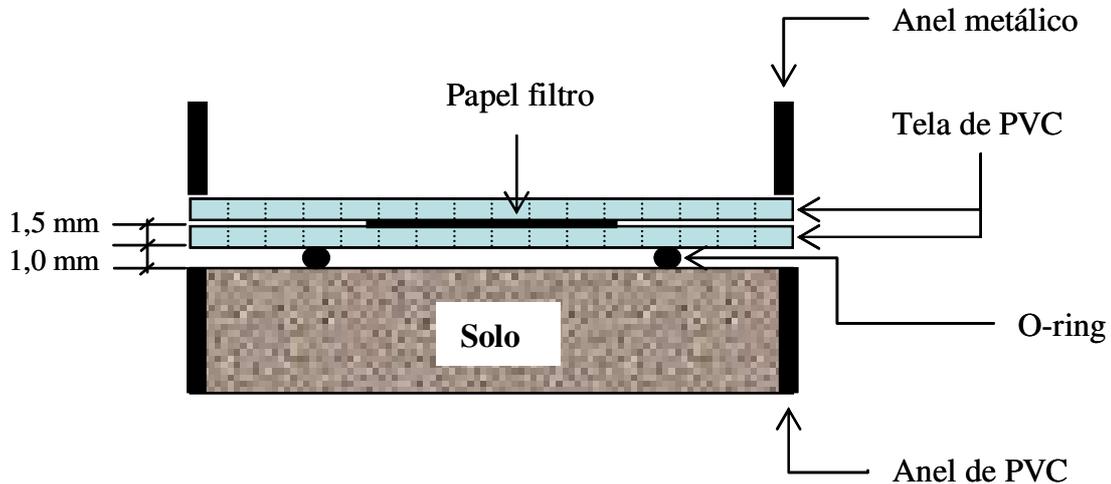


Figura 16: Esquema da metodologia proposta para a técnica sem contato do método do papel filtro.

Após a secagem, o papel foi retirado da estufa e rapidamente colocado no mesmo recipiente de vidro em que se obteve o peso úmido, para, então, determinar o peso seco na balança com resolução de 0,0001g. Neste momento, o papel filtro foi descartado e o peso do recipiente medido. Estes dados possibilitaram o cálculo do teor de umidade do papel filtro, que foi utilizado como dado de entrada na curva de calibração do papel. O resultado obtido neste procedimento foi a sucção do papel filtro, considerada igual à do solo. O teor de umidade do solo e sua respectiva sucção correspondem a um ponto na curva característica.

A obtenção do próximo ponto da trajetória de umedecimento ou de secagem foi realizada modificando-se a umidade da amostra, em aproximadamente 1% do teor de umidade anterior. Para controle desta umidade, foi adotada a hipótese de que os pesos das partículas sólidas e do contaminante não variam, sendo que qualquer alteração que ocorresse foi devida à perda ou ganho de água. As amostras em processo de umedecimento tiveram seu aumento no teor de umidade através da colocação de água destilada com o auxílio de um conta-gotas. O tempo de espera entre este processo e o fechamento da amostra foi de no mínimo 1 hora, para permitir uma maior homogeneidade entre a água inserida superficialmente e a amostra. As amostras submetidas à secagem foram abertas ao ambiente, até que o teor de umidade reduzisse em

relação ao valor medido anteriormente. Com as amostras em novas condições de umidade, foi possível repetir todo o procedimento de ensaio.

Além do procedimento descrito, foi realizado também um controle da variação volumétrica da amostra durante os ciclos realizados, para que fosse possível a realização da correção do índice de vazios e do grau de saturação das amostras, ao longo do ensaio. Este foi realizado através da medida da altura e do diâmetro das amostras no momento da abertura das mesmas, com o auxílio de um paquímetro. Entretanto, assim como no trabalho de Feuerharmel (2007), houve dificuldade na medida da variação de altura da amostra, uma vez que a mesma encontrava-se inserida no interior de um anel de PVC.

Para a obtenção das curvas características, foram moldados 22 corpos de prova. Dentre estes, 5 amostras foram preparadas em cada nível de contaminação (2%, 5%, 10% e 15%) e 2 amostras sem contaminante. Para cada porcentagem de óleo diesel, 2 amostras seguiram inicialmente a trajetória de umedecimento e 3 a trajetória de secagem. Para as amostras sem contaminante, uma seguiu trajetória de umedecimento, e a outra, de secagem. No instante em que se tornou impossível o aumento ou a redução da umidade das amostras, através dos procedimentos acima descritos, pelo excesso ou escassez de água nas mesmas, foi dado início a uma nova trajetória. Desta forma, foi possível a avaliação sobre a existência de histerese e sua quantificação.

3.9 ENSAIOS DE CONTROLE

Além dos experimentos anteriormente descritos, foram realizados também alguns ensaios complementares, denominados nesta dissertação como “ensaios de controle”, com os seguintes objetivos: (i) quantificar a possível perda de óleo da amostra para o ambiente com o tempo, através de sua evaporação; (ii) verificar a possível absorção de óleo pelo papel filtro utilizado para medição da sucção do solo.

Para tanto, foram moldadas 4 amostras com os mesmos teores de contaminação utilizados no estudo das curvas características (2%, 5%, 10% e 15% de óleo diesel, em relação à umidade inicial da amostra), porém na umidade higroscópica e com o solo destorroado. A escolha pela umidade higroscópica foi feita com o intuito de reduzir a influência da variação de umidade da amostra em contato com o ambiente de laboratório, no decorrer dos ensaios. O solo foi

também destorroado para facilitar a moldagem da amostra, uma vez que, na umidade higroscópica, o solo natural apresenta uma série de partículas agrupadas que dificultariam o manuseio da mesma.

O procedimento de ensaio foi o mesmo utilizado para o método do papel filtro, descrito no item 3.8.1, sendo que, ao abrir as amostras, as mesmas não foram submetidas a trajetórias de secagem-umedecimento, sendo somente expostas ao ambiente de laboratório, com temperatura em torno de 20°C, durante aproximadamente 1 h antes do novo fechamento. O tempo de equalização estipulado foi de no mínimo 7 dias para cada ponto.

Ao longo do monitoramento dessas amostras, foram realizados dois controles: (i) a absorção de vapor de óleo pelo papel filtro, através da simples pesagem do papel antes e após o período de equalização; e (ii) a variação de massa da própria amostra, com sua pesagem logo após a abertura para o ambiente e antes do fechamento.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental proposto nesta dissertação. Inicialmente são analisados os resultados referentes à caracterização física e química realizada tanto nas amostras sem contaminante, quanto nas amostras contaminadas por óleo diesel. Após, estão resumidas as principais características das amostras moldadas, seguidas das curvas características determinadas e suas análises. Foram feitas observações a respeito das influências geradas pelo grau de contaminação, pelo tempo de equalização e pelas trajetórias de umedecimento e secagem na obtenção dos pontos da curva característica. Por fim, foi feita uma análise dos resultados provenientes dos ensaios de controle, onde se pôde verificar a permanência da fase óleo na amostra ao longo dos ensaios, além de se certificar da possível ocorrência ou não de absorção do contaminante pelo papel filtro.

4.1 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DO SOLO

A análise físico-química do solo, com e sem óleo diesel, permite um maior entendimento sobre os processos que ocorrem devido à interação entre as diferentes fases presentes no interior da massa de solo. Com isso, é possível esclarecer e explicar como ocorrem as mudanças verificadas no comportamento do solo após ser contaminado, que podem ser visualizadas nos resultados obtidos graficamente através das curvas características.

4.1.1 Difractometria de Raios X

Para comprovar a composição mineralógica básica do Solo AV, foram realizados ensaios de difratometria de raios X no solo natural, em amostras glicoladas e calcinadas. A importância deste resultado está na confirmação dos minerais existentes, em relação aos estudos anteriores. Além disso, pode-se constatar existência ou não de argilominerais expansivos, que

poderiam influenciar de maneira negativa nos resultados dos demais ensaios. O resultado para a amostra de Solo AV, na condição natural, está expresso na figura 17.

Para comprovar os resultados, realizou-se também a mesma verificação, porém para amostras naturais, glicoladas e calcinadas, somente com a fração fina do solo (partículas menores que 2 μm). Seus resultados são apresentados na figura 18. Nos resultados apresentados, Solo AV-N corresponde à amostra natural sem tratamento químico ou térmico, Solo AV-G refere-se à amostra tratada com etilenoglicol e Solo AV-C remete à amostra calcinada a 490°C.

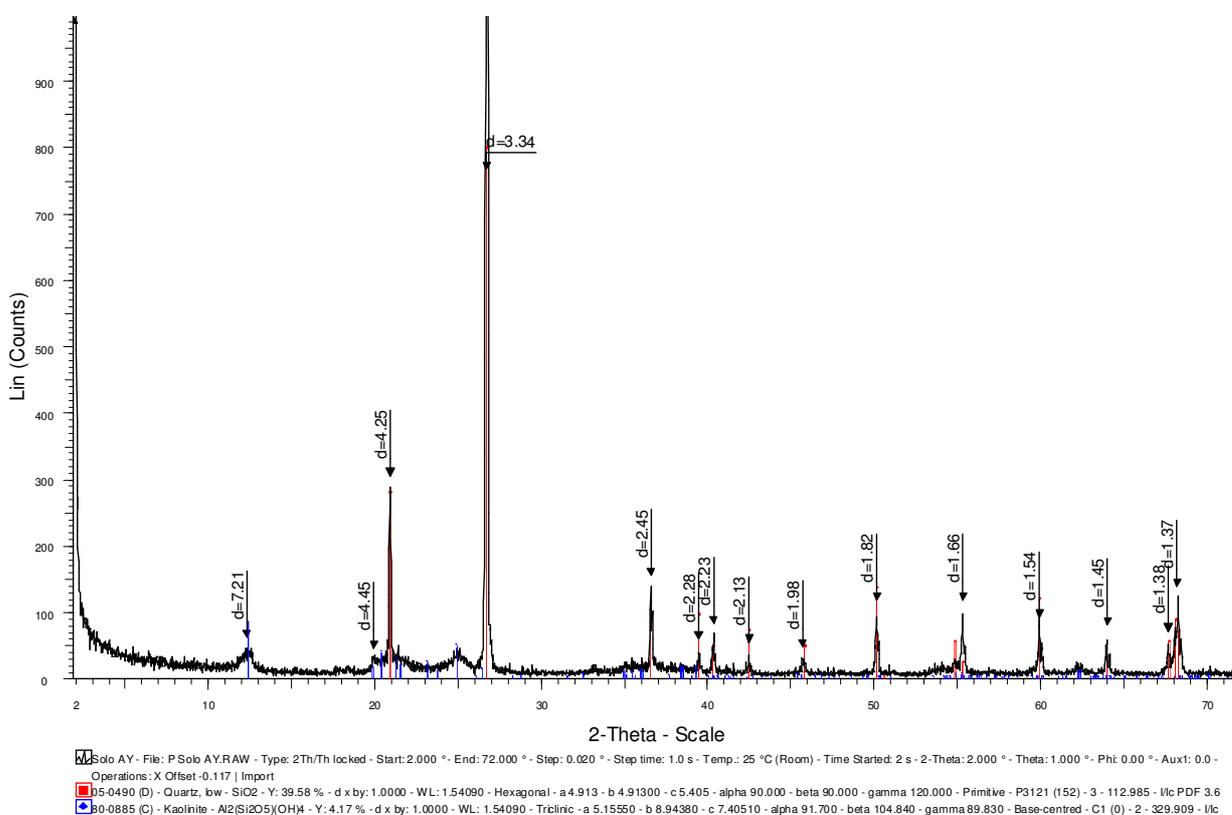


Figura 17: Resultado de difratograma de raio X para amostra de Solo AV natural.

Nos difratogramas do Solo AV natural (figuras 17 e 18), se observa a presença dominante de picos característicos de quartzo ($d = 3.34$) e caulinita ($d = 3.57$ e $d = 7.15$). Na figura 18, a ocorrência de quartzo é confirmada através dos picos com $d = 3,34$ e $d = 4,24$, que se mantêm mesmo nas amostras AV-G e AV-C. O difratograma AV-G sugere um ligeiro deslocamento para valores superiores, entretanto não há confirmação da ocorrência do mineral haloisita. A amostra AV-C revela a nítida instabilidade da caulinita quando calcinada, uma vez que há

remoção total dos picos característicos de sua ocorrência ($d = 3,57$ e $d = 7,15$), sugerindo tratar-se de espécies caoliníticas diminutas extremamente instáveis ao calor. De um modo geral, por esses resultados, pode-se afirmar que a caolinita presente no solo AV corresponde a variedades de baixa cristalinidade e dimensões pouco expressivas devido ao seu provável avançado grau de intemperismo.

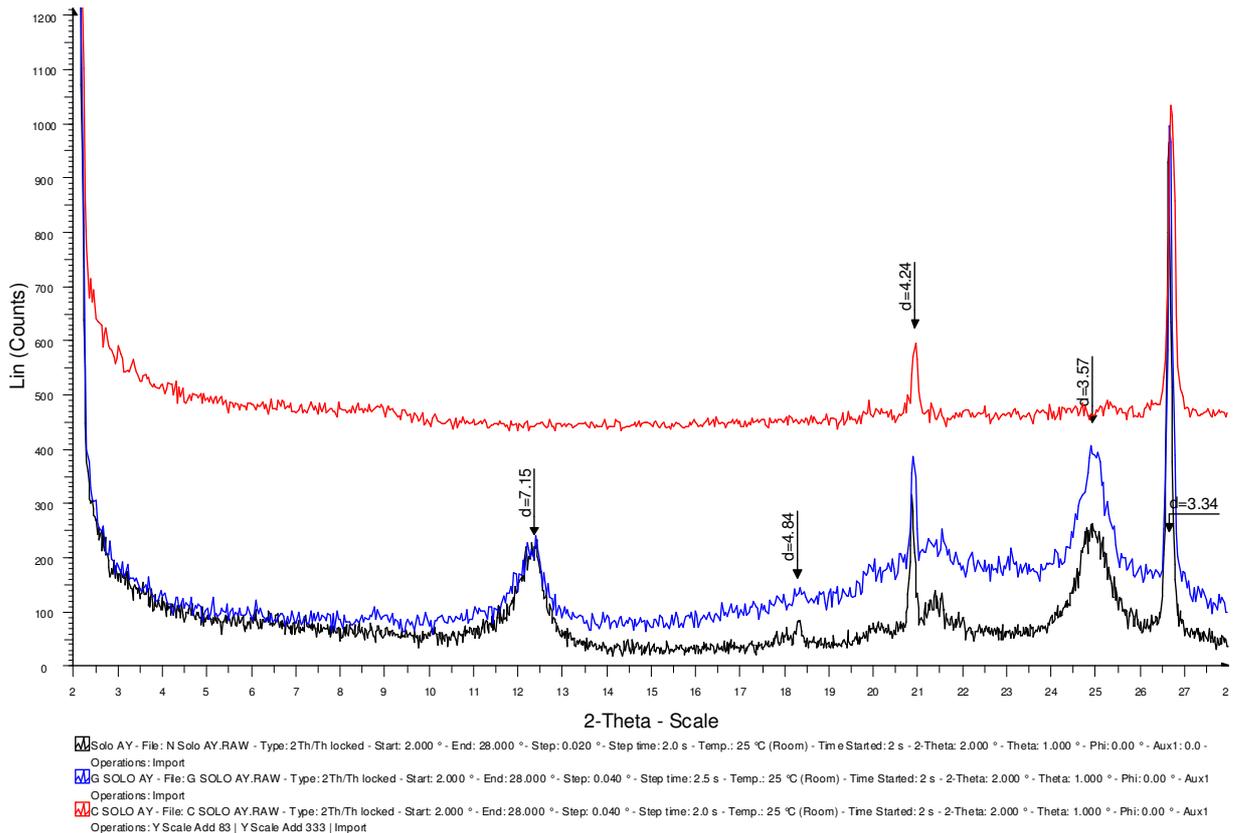


Figura 18: Resultado de difratograma de raio X para amostras da fração fina do Solo AV natural, glicolado e calcinado (partículas menores que $2\mu\text{m}$).

Fazendo um comparativo entre esses resultados e os obtidos por Feuerharmel (2003), apresentados anteriormente no Capítulo 3 (resumidos na tabela 5), pode-se afirmar que se tratam dos mesmos argilominerais identificados no Solo AV.

4.1.2 Microscopia Ótica

A microscopia eletrônica permitiu a visualização da estrutura do solo e a análise da forma, distribuição e conexão entre os poros no interior das amostras ensaiadas. Para registrar as imagens, foi utilizado um microscópio petrográfico provido de lente com capacidade para ampliar em 2,5 vezes o tamanho real da estrutura, conectado a um computador. Nas imagens captadas, as partículas maiores na cor branca correspondem às partículas de quartzo, as regiões em marrom são argilas e siltes compactados e as áreas em azul correspondem à distribuição dos poros. As amostras analisadas foram o Solo AV sem contaminante e com os teores de contaminação correspondentes a 2%, 5%, 10% e 15% de óleo diesel, moldados da mesma forma que a utilizada para o ensaio de determinação da curva característica. Foi realizada uma análise comparativa entre as imagens obtidas no centro e nas bordas de cada amostra, além de comparar as configurações apresentadas entre os diferentes níveis de contaminação, com o intuito de verificar as alterações originadas pela adição do óleo diesel. A figura 19 mostra as fotomicrografias para a amostra de Solo AV sem contaminante.

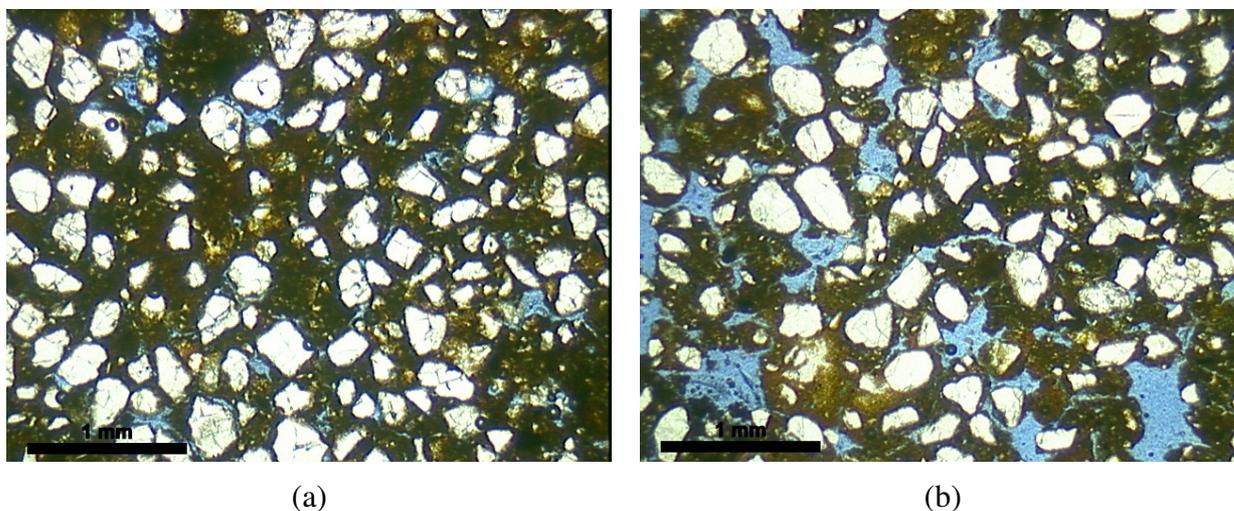


Figura 19: Resultado de fotomicrografia em uma amostra de Solo AV sem contaminante: (a) centro da amostra; e (b) borda da amostra.

A amostra de Solo AV sem contaminante apresenta, em sua parte central, macroporos relativamente equidimensionais, distribuídos de maneira uniforme, com dimensões entre 0,08 e 0,70 mm. Já nas bordas, há macroporos de dimensões maiores, na sua maioria interconectados, com dimensões variando entre 0,40 e 1,40 mm. A figura 20 mostra a mesma análise, porém para o Solo AV com 2% de óleo.

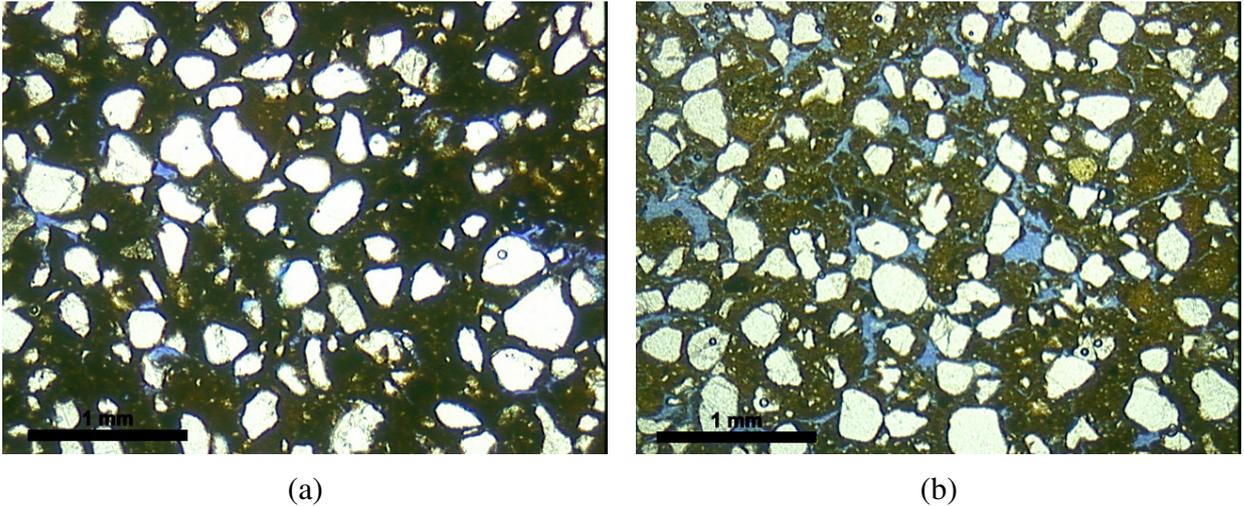


Figura 20: Resultado de fotomicrografia em uma amostra de Solo AV com 2% de óleo: (a) centro da amostra; e (b) borda da amostra.

Com a presença de 2% de óleo, os poros se apresentam mais alongados, com dimensões reduzidas e em menor quantidade, com a estrutura mais fechada, tanto no centro quanto nas bordas, em relação à amostra sem contaminante. No centro, os macroporos possuem comprimentos entre 0,07 e 0,60 mm. Nas bordas a distribuição é mais heterogênea, com comprimentos entre 0,30 e 1,00 mm. Na figura 21 estão as fotomicrografias da amostra com 5% de óleo.

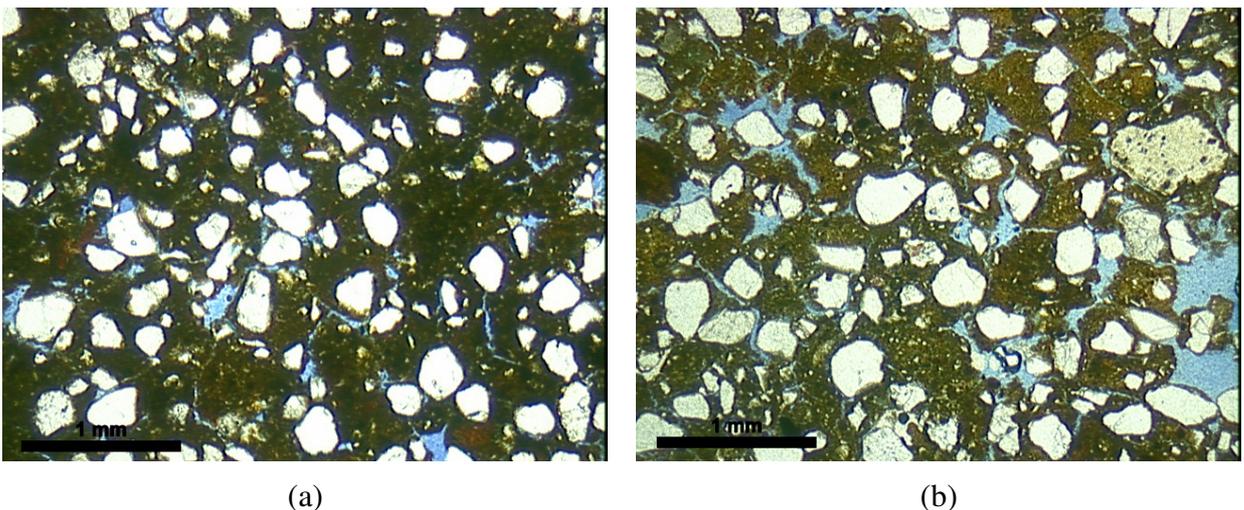


Figura 21: Resultado de fotomicrografia em uma amostra de Solo AV com 5% de óleo: (a) centro da amostra; e (b) borda da amostra.

Na amostra com 5% de contaminante, os poros permanecem com formato alongado, porém em maior quantidade em relação à amostra com 2% de óleo. Os comprimentos variam entre

0,10 e 0,60 mm no centro, e nas bordas, novamente com uma variação heterogênea, entre 0,30 e 0,90 mm. A figura 22 mostra a amostra com 10% de óleo.

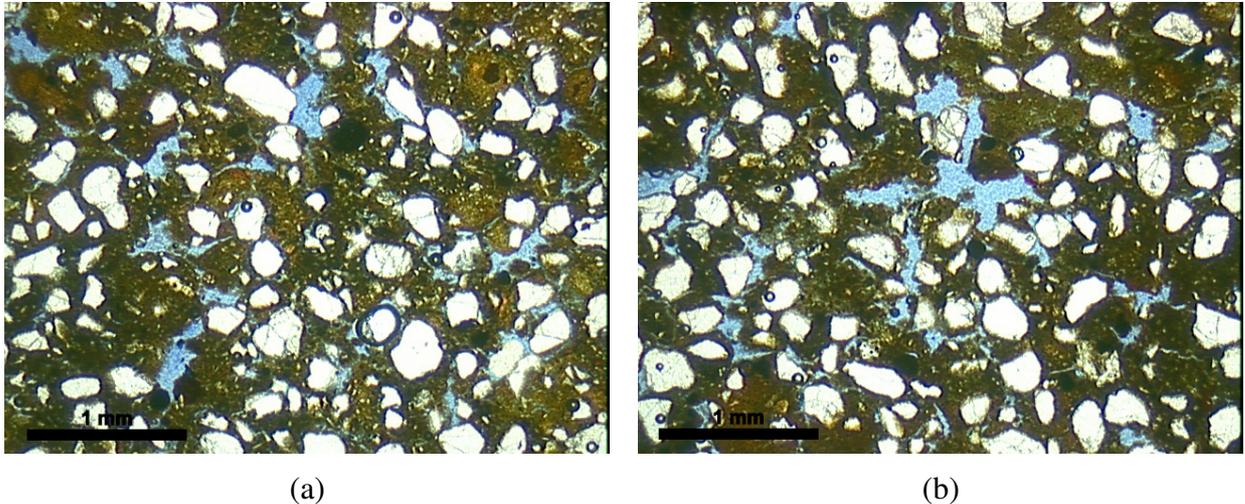


Figura 22: Resultado de fotomicrografia em uma amostra de Solo AV com 10% de óleo: (a) centro da amostra; e (b) borda da amostra.

Com uma contaminação de 10% de óleo, percebe-se que os macroporos encontram-se em maior quantidade e com tendência a tornarem-se novamente equidimensionais no centro da amostra, descaracterizando a forma alongada percebida nos teores de 2 e 5% de óleo. No centro, as dimensões desses poros estão entre 0,30 e 0,65 mm, e, nas bordas, entre 0,25 e 0,80 mm. A seguir, na figura 23, está a análise para a amostra com 15% de óleo.

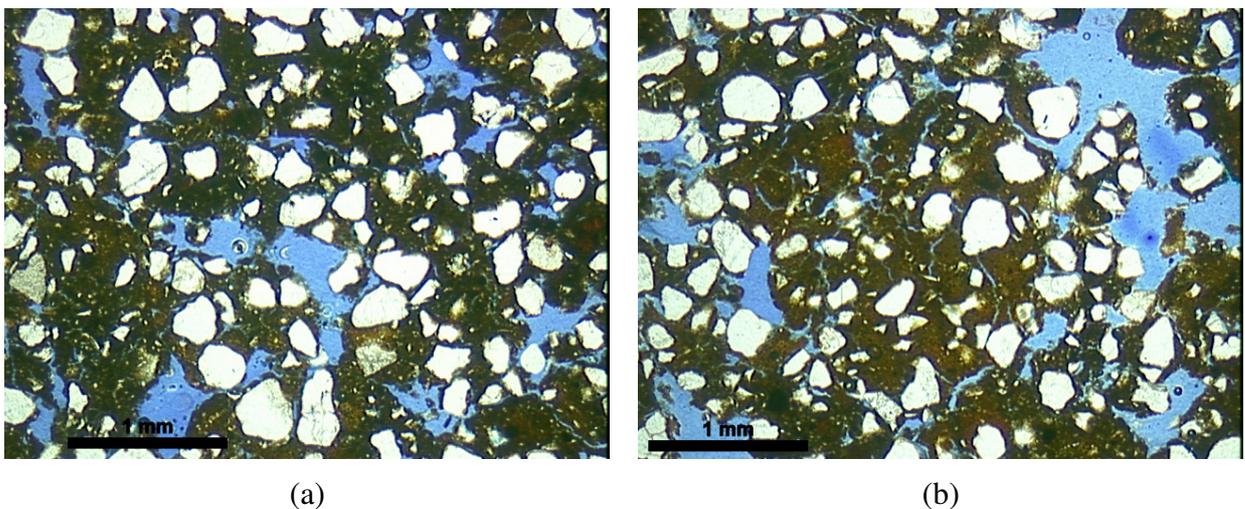


Figura 23: Resultado de fotomicrografia em uma amostra de Solo AV com 15% de óleo: (a) centro da amostra; e (b) borda da amostra.

Quando o nível de contaminação está em 15% de óleo diesel, verifica-se um considerável aumento no número e tamanho dos poros, tanto no centro, quanto na periferia da amostra. No centro, as dimensões variam entre 0,30 e 0,90 mm. Nas bordas, é possível visualizar poros maiores interligados por poros alongados, com dimensões entre 0,35 e 1,20 mm.

Fazendo uma análise das imagens que correspondem ao centro da amostra (figuras 19 a 23, letra (a)), foi possível notar que, com teores menores de óleo diesel, o contaminante tende a facilitar a compactação da massa de solo, resultando em uma amostra com poros mais alongados e a estrutura mais fechada. Entretanto, quando este teor aumenta gradativamente, o óleo começa a dificultar a compactação das partículas, e o aspecto final da amostra torna-se bastante porosa. A partir desses resultados, pode-se constatar que, com maiores teores de contaminação, o óleo excedente passa a formar uma película na superfície dos grãos de quartzo e dos grumos de argila e silte existentes antes da compactação, dificultando a aproximação dos mesmos.

Comparando-se as imagens obtidas no centro (figuras 19 a 23, letra (a)) e na borda (figuras 19 a 23, letra (b)) de cada amostra, constata-se que a condição de moldagem afeta na distribuição dos poros no interior da massa de solo. Em todos os casos, as amostras apresentam maior porosidade nas laterais em relação ao centro da estrutura. Essa configuração já era esperada, uma vez que a compactação do solo é afetada pela contenção lateral proveniente do anel de moldagem, resultando na heterogeneidade da disposição dos poros.

4.1.3 Caracterização Química

Para a caracterização de aspectos químicos do solo antes e após a contaminação, foi realizada a análise de amostras pelo Laboratório de Química do Solo da UFRGS, avaliando o potencial hidrogeniônico (pH), a presença de matéria orgânica, a capacidade de troca catiônica (CTC), a saturação de bases, a saturação de alumínio, a condutividade elétrica e a presença de elementos químicos (alumínio, cálcio, magnésio, hidrogênio, fósforo, potássio, sódio, enxofre, zinco, manganês, cádmio, chumbo, cromo e níquel). A quantificação destes itens foi realizada através de diversos métodos, descritos anteriormente no Capítulo 3. Os resultados obtidos para as amostras com 0%, 5% e 15% de contaminante estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Resultados da análise química em amostras de Solo AV com 0%, 5% e 15% de óleo diesel.

Análise	Amostra de Solo AV		
	Sem contaminante	5% óleo	15% óleo
pH (H ₂ O)	4,4	4,5	4,6
Matéria Orgânica (%)	0,4	1	1,5
CTC (cmol/dm ³)	8,5	6,5	6,4
Fósforo (mg/dm ³)	2,9	3,4	2,7
Potássio (mg/dm ³)	39	40	35
Sódio (mg/dm ³)	4	3	3
Manganês (mg/dm ³)	215	670	770
Alumínio trocável (cmol/dm ³)	2,2	1,1	1
Cálcio trocável (cmol/dm ³)	0,2	0,2	0,3
Magnésio trocável (cmol/dm ³)	0,1	0,1	0,2
Alumínio + Hidrogênio (cmol/dm ³)	7,7	4,9	4,4
% saturação da CTC - Bases	5	6	9
% saturação da CTC - Alumínio	73,5	40,4	33,4
Enxofre (mg/dm ³)	65	67	70
Condutividade elétrica (mS/cm)	69	76	77
Cádmio (mg/kg)	< 0,2	< 0,2	0,3
Chumbo (mg/kg)	19	19	18
Cromo (mg/kg)	18	20	21
Níquel (mg/kg)	11	10	10
Zinco (mg/dm ³)	0,7	0,8	0,7

Através destes resultados, pode-se perceber que diversos aspectos químicos do solo não foram alterados com a sua contaminação por óleo diesel. Entretanto, alguns parâmetros sofreram notáveis modificações, permitindo realizar as seguintes análises:

- Potencial Hidrogeniônico (pH): verificou-se um pequeno aumento do pH à medida que aumenta o teor de contaminante. As interações do solo com o contaminante reduziram levemente a sua acidez;
- Matéria Orgânica: há um notável aumento do teor de matéria orgânica no solo ao adicionar o contaminante. Isto pode ser explicado pela origem orgânica do óleo diesel e sua conseqüente degradação ao entrar em contato com o solo;
- Alumínio trocável: há uma redução de íons alumínio instáveis na massa de solo, ao adicionar o contaminante. Isto indica que o solo torna-se mais estável em relação à necessidade de ligações químicas. Este fato é decorrente das prováveis interações químicas que ocorrem entre o óleo diesel e o solo, após a contaminação do mesmo;
- Hidrogênio: há uma redução da quantidade de hidrogênio na composição do material ensaiado, devido também à ocorrência de reações químicas do contaminante com o solo. Pode-se afirmar que o hidrogênio, anteriormente disponível, é consumido nas reações, o que reduz a disponibilidade deste elemento;
- CTC: como já era esperado, há uma redução da capacidade de troca catiônica, devido às interações do contaminante com o solo, resultando em uma maior estabilidade química da fração fina do mesmo;
- Enxofre: como mostrado na caracterização química do contaminante, o óleo diesel apresenta enxofre em sua composição (Capítulo 3, no item 3.4). Isto foi comprovado nos resultados dos ensaios nas amostras contaminadas;
- Manganês: é provável que o óleo diesel utilizado possua em sua composição um teor considerável de manganês, como se pode observar pelos resultados;
- Condutividade elétrica: a condutividade elétrica do solo é um indicador bastante utilizado para verificar a contaminação do solo. Como já era esperado nos resultados, a elevação gradual dos valores de condutividade elétrica indica o aumento de contaminante no interior do solo;
- Cromo: é provável que este óleo diesel possua em sua composição um pequeno teor de cromo, devido a pouca elevação de seus teores com a contaminação.

4.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS

A curva característica representa a variação de sucção no solo de acordo com as mudanças na umidade do mesmo. Sendo assim, qualquer alteração das propriedades do solo pode acarretar em severas mudanças na trajetória dessa curva. A quantidade de água contida nos vazios do solo pode ser representada pelo teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) ou pelo grau de saturação. Nesta dissertação, as curvas características do solo estudado foram expressas pela sucção do solo *versus* grau de saturação.

Na tabela 8, estão apresentados os principais índices físicos iniciais (índice de vazios e_0 , umidade w_0 e grau de saturação S_{r0}) que serviram de base para a moldagem das amostras, assim como os valores obtidos nas amostras já moldadas. Esses foram eleitos de maneira que os corpos de prova fossem semelhantes aos utilizados para o Solo AV por Feuerharmel (2007), possibilitando comparações com os resultados deste trabalho. A umidade inicial de campo estava bastante próxima ao valor utilizado por esta autora, em torno de 28%, o que facilitou a moldagem das amostras. Além disso, a comparação entre os resultados obtidos por essa e os desta dissertação se tornam mais confiáveis, uma vez que é possível afirmar que as condições do solo em campo estavam semelhantes no momento das respectivas coletas.

As amostras moldadas foram nomeadas com uma letra seguida do grau de contaminação existente nas mesmas, em porcentagem.

Tabela 8: Índices físicos iniciais das amostras de Solo AV utilizadas para a curva característica.

Amostra	e_0	w_0 (%)	S_{r0} (%)	Trajectoria inicial
<i>Valores médios – amostras de Feuerharmel (2007)</i>	1,07	28,5	74,5	–
Sem contaminante 1	1,07	28,5	74,5	secagem
Sem contaminante 2	1,06	28,5	74,8	secagem
Sem contaminante 3	1,07	28,5	74,5	umedecimento
A – 2%	1,07	28,5	74,5	umedecimento
B – 2%	1,06	28,4	74,8	umedecimento
C – 2%	1,07	28,6	74,7	secagem

Amostra	e₀	w₀ (%)	S_{r0} (%)	Trajectoria inicial
D – 2%	1,07	28,6	74,6	secagem
E – 2%	1,07	28,5	74,5	secagem
F – 5%	1,08	28,6	73,9	umedecimento
G – 5%	1,06	28,4	74,9	umedecimento
H – 5%	1,07	28,5	74,4	secagem
I – 5%	1,07	28,5	74,3	secagem
J – 5%	1,07	28,4	74,2	secagem
K – 10%	1,07	28,6	74,6	umedecimento
L – 10%	1,07	28,4	74,3	umedecimento
M – 10%	1,07	28,5	74,4	secagem
N – 10%	1,07	28,4	74,3	secagem
O – 10%	1,07	28,5	74,4	secagem
P – 15%	1,08	28,4	73,4	umedecimento
Q – 15%	1,08	28,6	74,1	umedecimento
R – 15%	1,07	28,5	74,4	secagem
S – 15%	1,07	28,4	74,2	secagem
T – 15%	1,07	28,4	74,3	secagem
Média das amostras	1,07	28,5	74,4	–

4.2.1 Comparação entre o Método do Papel Filtro com e sem Contato

Como mencionado anteriormente, Feuerharmel (2007) determinou a curva característica do Solo AV sem contaminante, através da técnica do papel filtro com contato (sucções entre 5kPa e 30000 kPa) e do método da placa de sucção (sucções ≤ 5 kPa). Para verificar se seria possível realizar a comparação direta entre essa curva e as obtidas para o Solo AV com óleo, foram medidos pontos em amostras não contaminadas, pelo método do papel filtro sem contato proposto nesta dissertação. Os pontos obtidos, em comparação à curva determinada por Feuerharmel (2007) estão na figura 24.

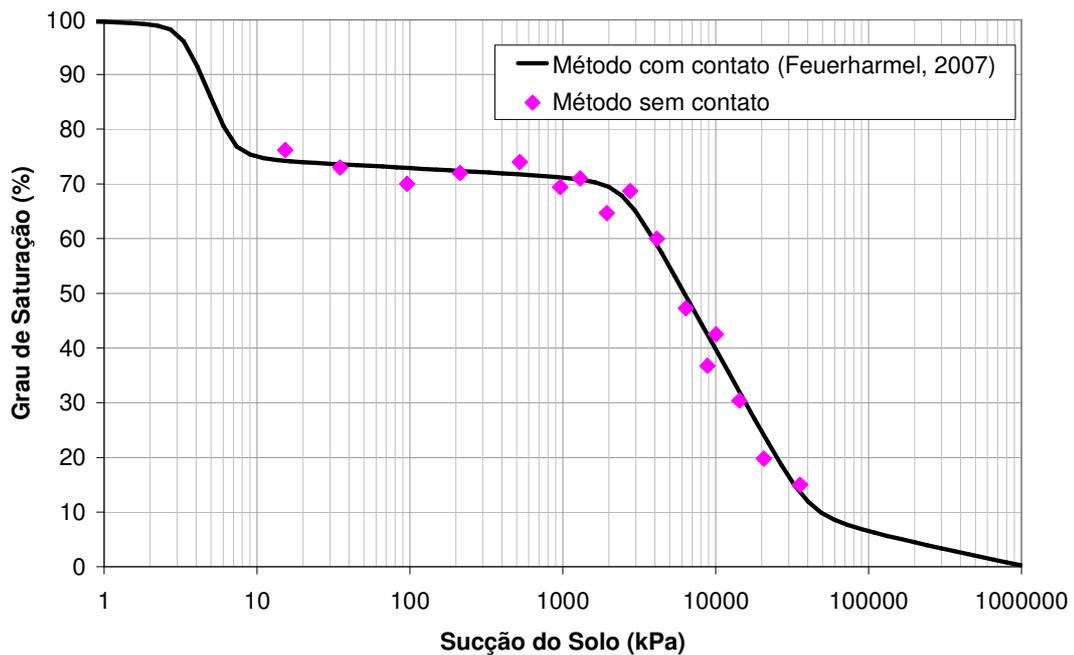


Figura 24: Pontos obtidos pelo método do papel filtro sem contato, em comparação à curva obtida por Feuerharmel (2007), pelo método com contato.

Através da análise da figura 24, percebe-se que o método do papel filtro resulta em curvas com aspecto semelhante, independente da sua forma de realização (técnica com contato ou sem contato). Com isso, pode-se concluir que é possível analisar comparativamente os resultados obtidos, sem que haja grandes divergências. Além desta afirmação, a hipótese levantada por Feuerharmel (2003), de que a sucção osmótica é desprezível para o Solo AV sem contaminação, foi confirmada a partir dos resultados apresentados na figura anterior. Com outras palavras, a sucção total pode ser considerada igual à sucção mátrica para o solo estudado, considerando sua condição natural.

4.2.2 Influência do Grau de Contaminação com Óleo Diesel

As principais equações utilizadas para ajuste de curvas características unimodais e bimodais, assim como algumas limitações destes modelos, foram apresentadas no Capítulo 2 (seção 2.1.3.2). Dentre as relações existentes, foi adotada a equação proposta por Gitirana Jr e Fredlund (2004) para representar as curvas características bimodais determinadas nesta dissertação (equações 5 e 6 do Capítulo 2). Para isso, os valores da entrada de ar e a sucção residual dos macroporos (ψ_{b1} e ψ_{res1}) e dos microporos (ψ_{b2} e ψ_{res2}) foram estimados e

ajustados graficamente, resultando nos parâmetros de entrada explicitados na tabela 9, para cada curva característica do Solo AV contaminado.

Tabela 9: Parâmetros utilizados para realizar o ajuste matemático pela equação de Gitirana Jr e Fredlund (2004).

Condição do Solo AV	Ψ_{b1} (kPa)	S_{b1}	Ψ_{res1} (kPa)	S_{res1}	Ψ_{b2} (kPa)	S_{b2}	Ψ_{res2} (kPa)	S_{res2}	a
2% de óleo diesel	8,0	0,95	14,0	0,830	550	0,820	35000	0,055	0,040
5% de óleo diesel	7,5	0,94	17,0	0,810	580	0,800	33000	0,045	0,040
10% de óleo diesel	6,0	0,92	15,0	0,810	600	0,770	32000	0,040	0,040
15% de óleo diesel	5,0	0,91	15,0	0,800	1000	0,685	29500	0,025	0,045

A figura 25 apresenta as curvas características obtidas para o Solo AV contaminado com 2%, 5%, 10% e 15% de óleo diesel, através da técnica proposta nesta dissertação. Os dados experimentais das curvas apresentaram, em geral, pequena dispersão, sendo que a maior dispersão verificada foi para a amostra de 15% de óleo. As amostras com este teor de contaminante apresentaram uma maior dificuldade na variação de umidade ao entrar em contato com o ambiente, durante todo o período de ensaio, provavelmente devido às maiores interações entre a água e o óleo diesel. Em todas as curvas, foi adicionado um ponto teórico, com sucção igual a 1.000.000 kPa e grau de saturação igual a 0 %, para facilitar o ajuste matemático dos dados.

A figura 25 mostra que o formato bimodal constatado nos ajustes de estudos anteriores para o mesmo solo é mantido (Feuerharmel, 2003 e Feuerharmel, 2007), pela existência de dois valores de entrada de ar e um patamar intermediário. O primeiro valor de entrada de ar é associado à remoção de água dos macroporos, existentes entre as partículas de argila agregadas, e o segundo valor corresponde à dessaturação dos microporos, presentes no interior desses agregados. Entre esses dois valores, ocorre uma menor variação na quantidade de água do solo, caracterizando a existência do patamar. Com este resultado, é possível afirmar que a microestrutura e a macroestrutura do solo continuam comandando a entrada e a saída de água dos poros do solo, apesar da contaminação.

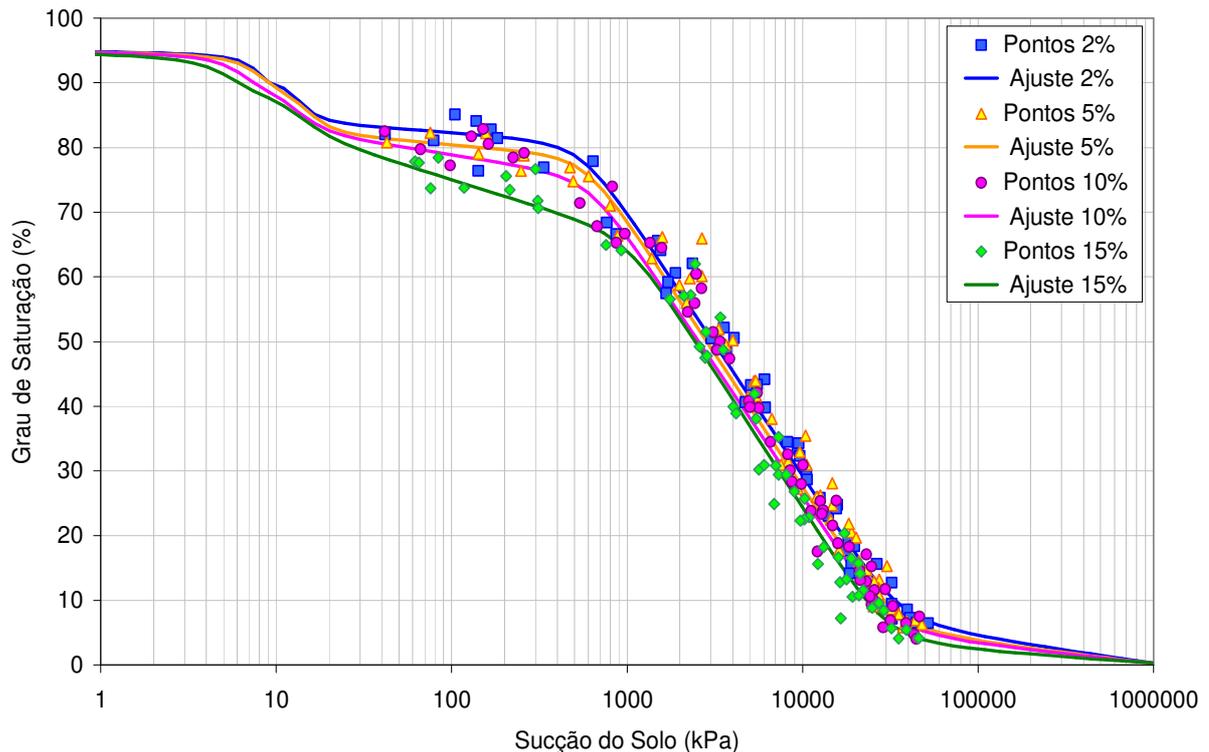


Figura 25: Curvas características obtidas com a técnica do papel filtro sem contato, para as amostras contaminadas com 2%, 5%, 10% e 15%, em função do grau de saturação.

Entre os aspectos mais relevantes que podem ser notados na análise desses resultados, ao visualizar as figuras 24 e 25, podem ser citados:

- A curva característica do solo muda seu aspecto de maneira gradual, em relação ao teor de contaminante. Pode-se verificar que a curva tende a inclinar seu patamar, tornando-se menos horizontal, quando o solo possui maior quantidade de óleo. Isso indica uma descaracterização do comportamento bimodal e uma tendência ao comportamento unimodal, quando a concentração de óleo diesel é aumentada de 2% até 15%. Este fato torna-se mais visível na curva correspondente à contaminação com 15% de óleo, onde o patamar inicia em torno de 80% de grau de saturação e termina próximo a 68%. Como este patamar, quando horizontal, está relacionado à ausência de poros com tamanho intermediário no solo, é possível afirmar que o óleo modificou a disposição dos espaços disponíveis entre os grãos. Relacionando com os resultados das fotomicrografias analisadas no item 4.1.2, comprova-se a influência do óleo diesel na estrutura do solo, sendo que esse envolve as partículas e modifica seu comportamento durante as trajetórias de secagem e umedecimento. Através de ambos

os resultados (figura 23 (a) e figura 25), pode-se afirmar que o Solo AV com 15% de contaminante tende a comportar-se de forma semelhante a um solo granular;

- Existe uma tendência à redução de sucção total com o aumento da porcentagem de óleo diesel, considerando um mesmo grau de saturação. Além disso, as modificações mais significativas ocorrem na região próxima ao patamar das curvas características, sendo que após o segundo valor de entrada de ar as curvas são praticamente coincidentes;
- A forma de ajuste utilizada, sugerida por Gitirana Jr e Fredlund (2004), resultou em uma aproximação satisfatória dos pontos obtidos no ensaio para amostras contaminadas por óleo diesel.

Além dessas análises, fez-se necessária uma comparação entre o comportamento do Solo AV no seu estado natural e após a contaminação, para uma melhor compreensão sobre as alterações sofridas devido à adição do óleo diesel. Para efeitos comparativos, foram inseridos no mesmo gráfico as curvas referentes ao solo com 2%, 5%, 10% e 15% e a curva obtida por Feuerharmel (2007), para o solo remoldado sem secagem prévia. Esta comparação pode ser visualizada na figura 26. Comparando as curvas características apresentadas nesta figura, verifica-se uma severa alteração de comportamento após a contaminação do Solo AV. Entre outros fatores, são notáveis as alterações no início da curva, assim como as mudanças na localização, na forma e na extensão compreendida pelos patamares, indicando a existência de uma modificação no comportamento de entrada e saída de água dos poros, conforme a porcentagem de óleo diesel.

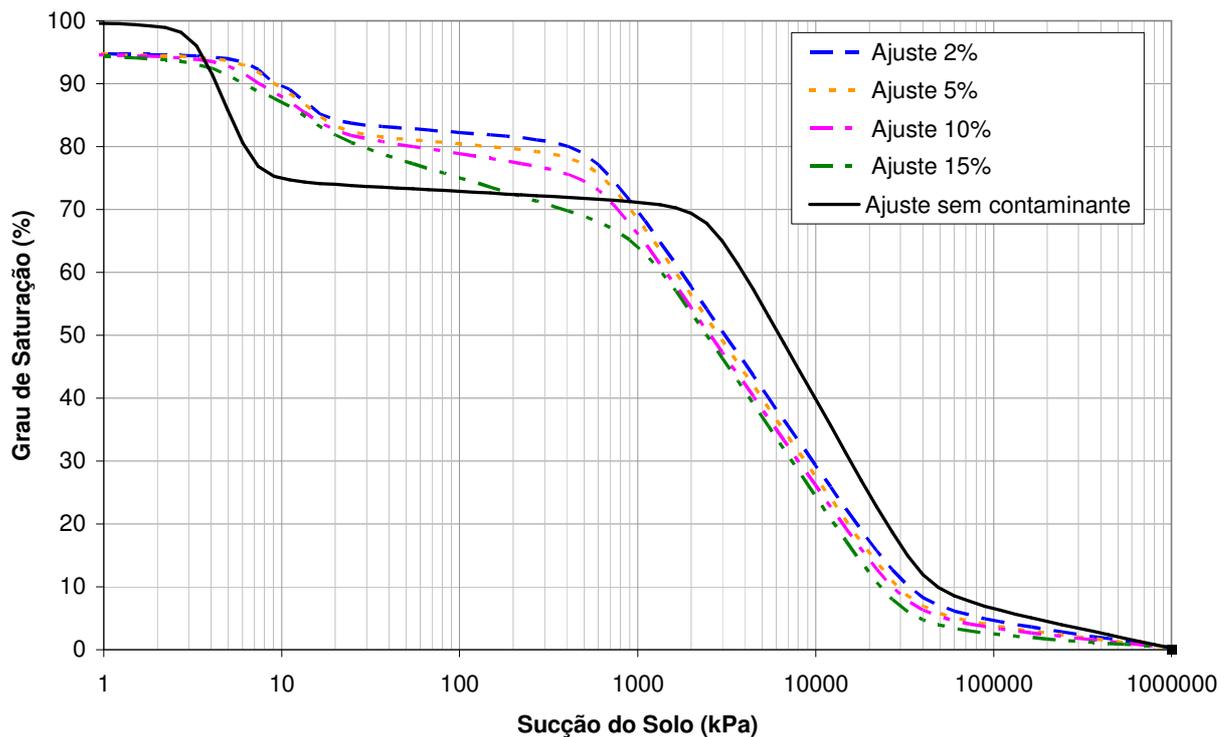


Figura 26: Curva característica para o Solo AV sem contaminação (Feuerharmel, 2007) em comparação às curvas características para o Solo AV com diferentes graus de óleo diesel.

Para as amostras contaminadas, o início dos patamares ocorre em torno de 85% de grau de saturação e 20 kPa de sucção. Já a curva do solo sem contaminante inicia em torno de 74% de grau de saturação e 10 kPa de sucção. A extensão do patamar também é diminuída com a presença de óleo, sendo que o segundo valor de entrada de ar de cada curva característica das amostras contaminadas está em torno de 500 kPa de sucção e, na curva do solo não contaminado, este mesmo valor está próximo aos 2000 kPa. Estes resultados indicam que, na presença de óleo diesel, a capacidade de retenção de água no interior da massa de solo é diminuída, na região do patamar da curva característica. Uma explicação para este fato está na modificação estrutural do solo verificada no item 4.1.2, além da maior estabilidade reativa, comprovada nos ensaios químicos analisados no item 4.1.3.

Outra observação importante é a respeito da dessaturação dos microporos, que ocorre de forma mais lenta para as amostras contaminadas. Este fato pode ser visualizado através da inclinação da curva após o segundo valor de entrada de ar, que, para a amostra sem óleo apresenta-se mais íngreme. Entretanto, acima dos 40000 kPa de sucção, a dessaturação do solo em forma de vapor de água é dada de maneira semelhante para todas as amostras.

4.2.3 Influência do Tempo de Equilíbrio

Uma vez que o procedimento adotado para o método do papel filtro proposto neste trabalho possui algumas alterações em relação aos estudos prévios, fez-se necessário uma avaliação sobre o tempo necessário para o equilíbrio de sucção entre o papel e o solo. Foram realizados ensaios com tempos de equilíbrio variando entre 7 e 30 dias. A figura 27 mostra alguns pontos obtidos para diferentes períodos de equalização, nas amostras com 2% e 5% de contaminação.

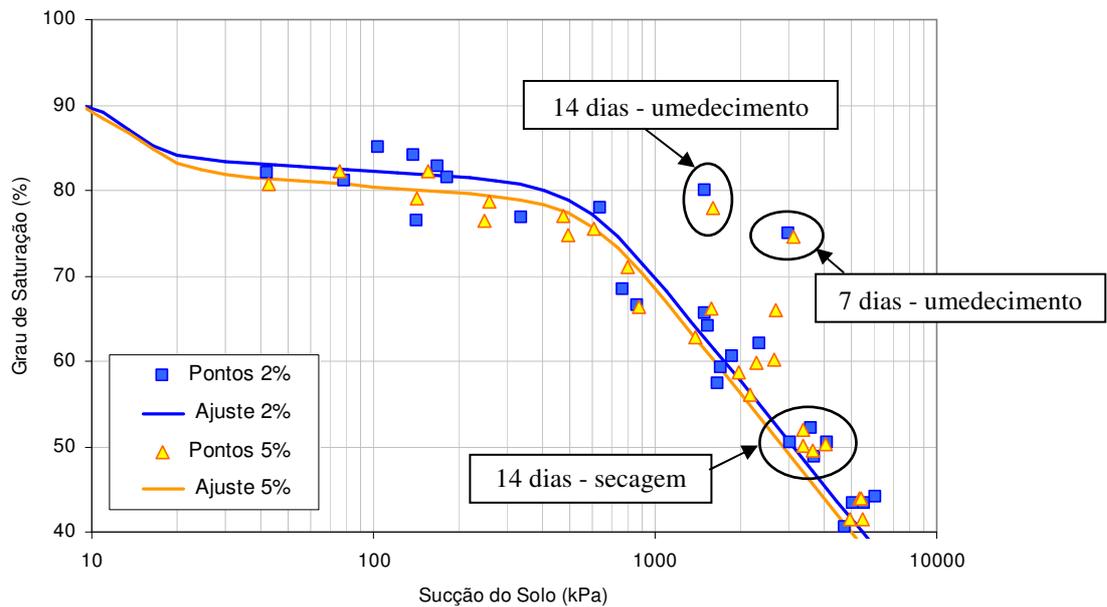


Figura 27: Influência dos tempos de equilíbrio, nas trajetórias de umedecimento das amostras com 2 e 5% de óleo diesel.

Os resultados visualizados na figura 27 indicam que os tempos de 7 e 14 dias foram insuficientes para obter o equilíbrio esperado na trajetória de umedecimento, considerando a faixa de umidade que as amostras apresentavam. Já na trajetória de secagem, com as amostras em torno de 50% de grau de saturação, o tempo de equilíbrio de 14 dias torna-se viável para a medição da sucção total. Nas amostras com menores graus de saturação, abaixo de 30%, o tempo de 9 dias mostrou-se suficiente para equalizar a sucção. Os demais pontos apresentados foram obtidos entre 21 e 30 dias, sendo que estes apresentam uma mesma tendência de comportamento. Ao longo do estudo, foi constatado que o período de 7 dias é adequado somente para valores bastante elevados de sucção, acima de 40000 kPa. Todas estas observações indicam que o tempo de equalização deve variar entre 7 e 30 dias, no decorrer das medições dos pontos, conforme o valor do grau de saturação das amostras. A tabela 10

mostra o tempo de equalização definido para cada intervalo de sucção medido, para o Solo AV submetido ao método do papel filtro sem contato.

Tabela 10: Tempos de equalização da técnica proposta, para o Solo AV, de acordo com o grau de saturação.

Sucção do solo (kPa)	Tempo de equalização
$\psi \leq 1500$	30 dias
$1500 < \psi \leq 3000$	21 dias
$3000 < \psi \leq 15000$	14 dias
$15000 < \psi \leq 40000$	9 dias
$\psi > 40000$	7 dias

Com estes resultados, nota-se que, para maiores valores de sucção, menor é o tempo requerido para que ocorra o equilíbrio entre o solo e o papel filtro. Isto ocorre porque, quando aumenta a sucção, o teor de umidade é reduzido, facilitando a equalização do sistema pelo menor volume de água envolvido. Além disso, foi verificado que os tempos definidos para a equalização não são alterados em decorrência dos níveis de contaminação estudados. Este fato revela que a presença das diferentes quantias de óleo estudadas não influenciam de forma significativa no fluxo de vapor de água ao longo do período de equilíbrio.

4.2.4 Influência das Trajetórias de Umedecimento e Secagem – Histerese

A histerese corresponde à diferença existente entre as trajetórias de umedecimento e secagem de um solo. A presença de histerese depende da história de sucção e das trajetórias de umedecimento e secagem que já foram aplicadas ao solo. No estudo de Feuerharmel (2007), as amostras de Solo AV que iniciaram com umedecimento não exibiram histerese durante o primeiro ciclo de umedecimento-secagem. Este fato mostra que o umedecimento não provocou grandes alterações na estrutura do solo, indicando que este solo possivelmente já foi submetido a essa trajetória em campo. Entretanto, as amostras que iniciaram na trajetória de secagem apresentam uma histerese pronunciada quando submetidas ao umedecimento. É provável que este comportamento tenha sido ocasionado pelas alterações estruturais irreversíveis verificadas durante o estudo, provocadas pela demasiada secagem, superior à que o solo já foi submetido em sua história de sucção. Os comportamentos descritos também foram observados para o Solo AV contaminado por óleo diesel, como é possível visualizar nas figuras 28, 29, 30 e 31.

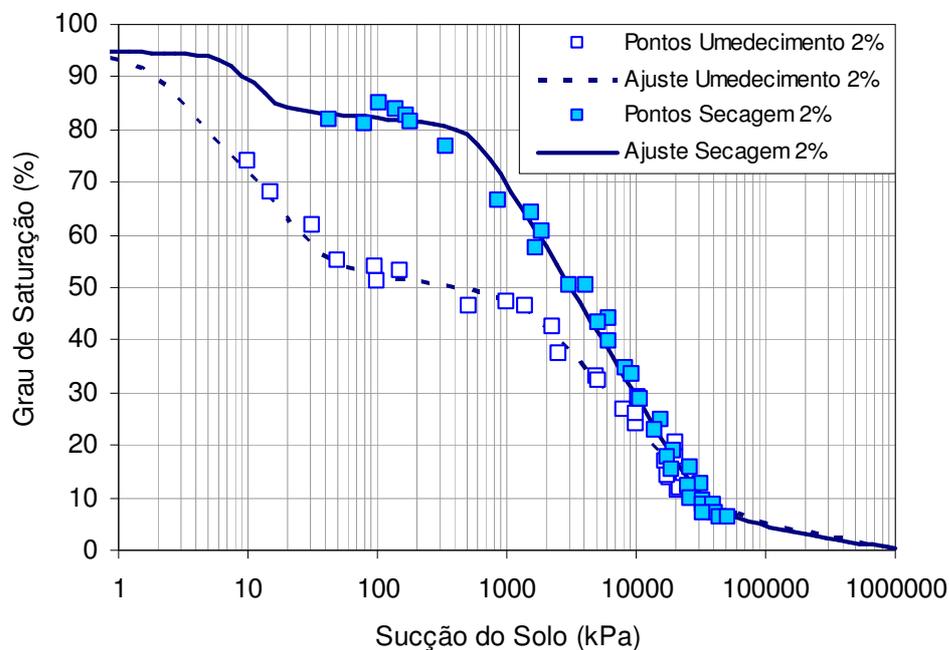


Figura 28: Histerese observada para o solo AV com 2 % de óleo.

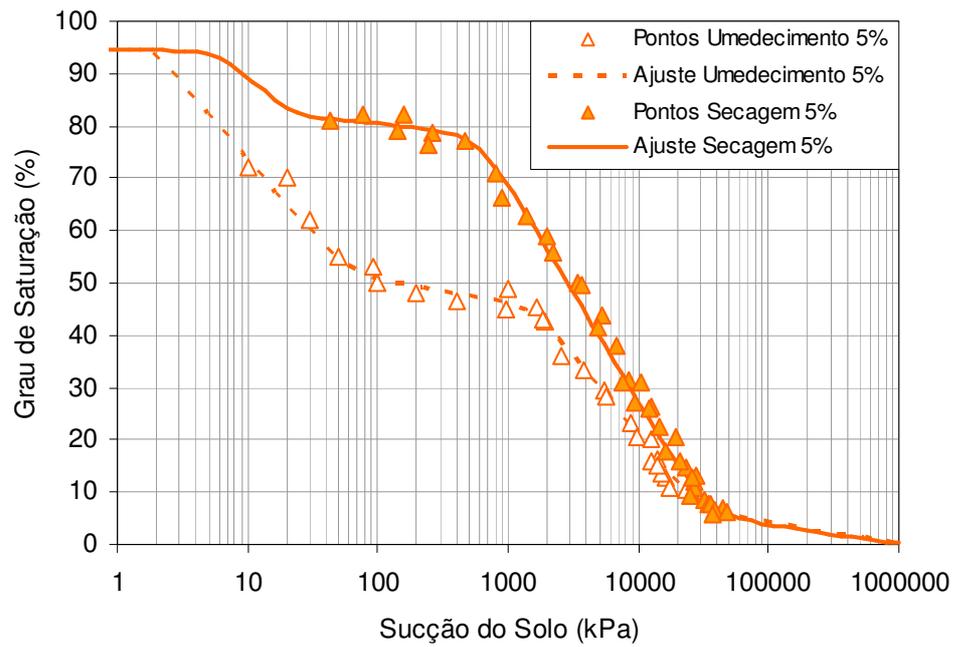


Figura 29: Histerese observada para o Solo AV com 5 % de óleo.

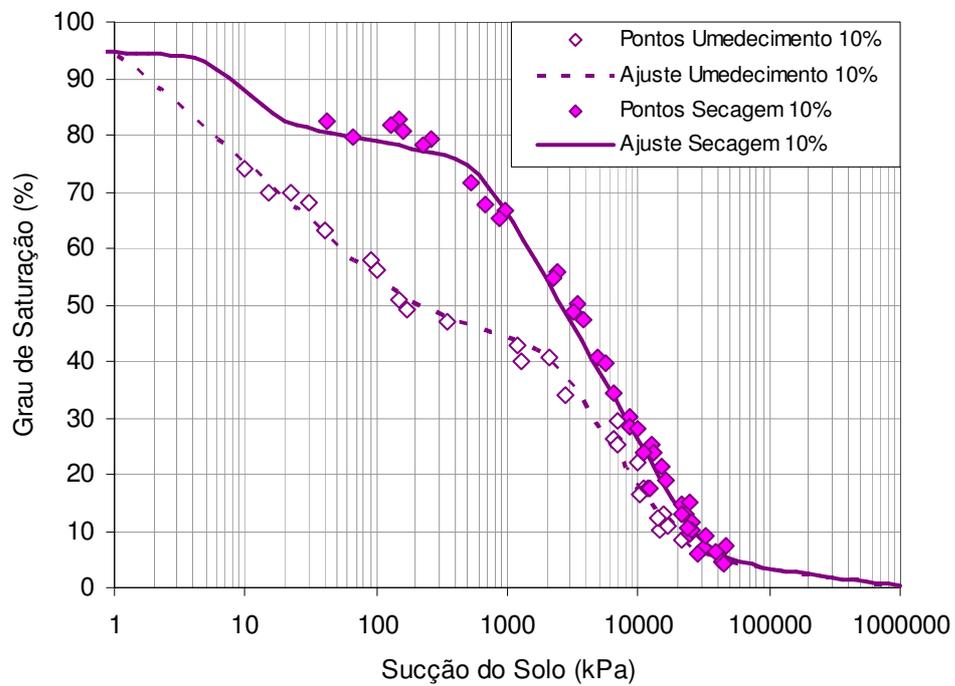


Figura 30: Histerese observada para o Solo AV com 10 % de óleo.

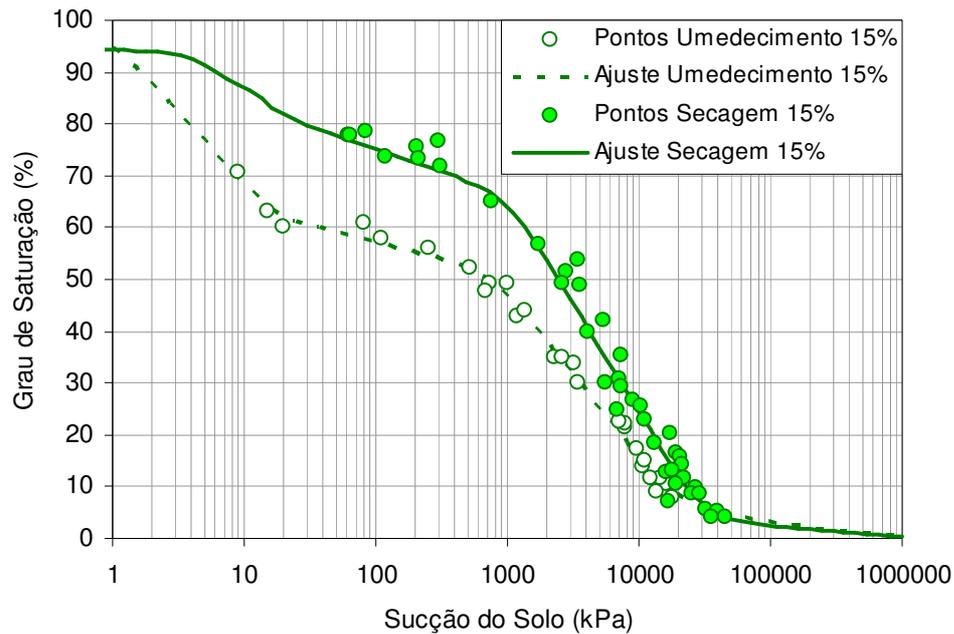


Figura 31: Histerese observada para o Solo AV com 15 % de óleo.

Através dos gráficos, é possível perceber que há uma pequena redução da histerese com o aumento do teor de contaminação. Este fato é mais notável nas histereses apresentadas pelas amostras com 10% e 15% de óleo diesel, onde as curvas características correspondentes à trajetória de umedecimento ficam mais próximas às curvas de secagem. Outro aspecto importante é que, acima de 20000 kPa de sucção, a histerese não é mais verificada, sendo as trajetórias de secagem e de umedecimento coincidentes para qualquer teor de contaminação com óleo diesel.

4.3 ENSAIOS DE CONTROLE

Além da análise realizada anteriormente, foram realizados alguns ensaios de controle para verificar se existe alguma influência da presença do óleo na absorção do papel filtro. Para isso, foram moldadas amostras remoldadas com secagem prévia, na umidade higroscópica, com os mesmos teores de óleo utilizados nos ensaios. Desta forma, pôde-se observar a eventual evaporação do óleo para o ambiente, assim como, através da aplicação do método do papel filtro sem contato nessas amostras, estudar a absorção de óleo pelo papel filtro. Estas verificações foram realizadas até que houvesse a estabilização dos valores medidos, totalizando um período de 3 meses (87 dias).

A figura 32 mostra o controle realizado da variação de massa das amostras de Solo AV contaminadas. A figura 33 apresenta o controle da evaporação do óleo presente nas mesmas amostras, em relação à porcentagem inicial de contaminante. Estes gráficos encontram-se em função do tempo de ensaio.

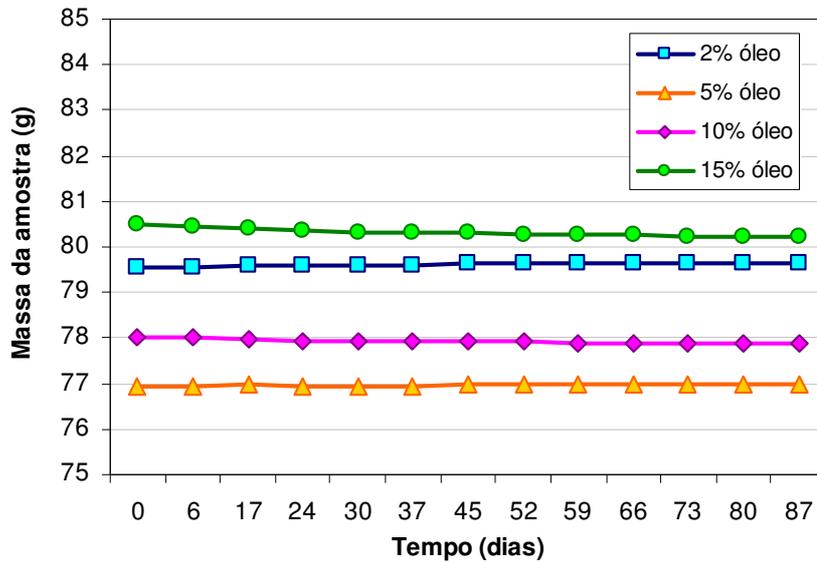


Figura 32: Controle da variação de massa das amostras de Solo AV contaminadas, em função do tempo.

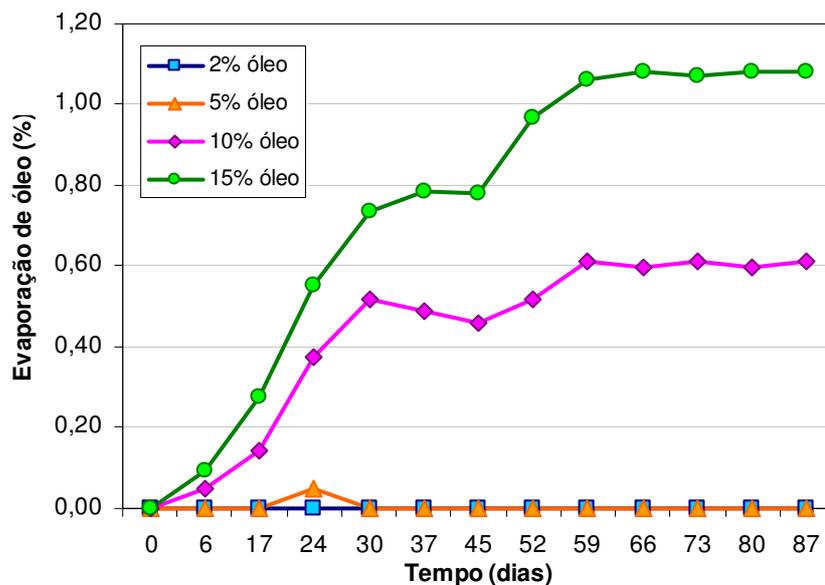


Figura 33: Controle da porcentagem de evaporação de óleo diesel das amostras de Solo AV contaminadas, em função do tempo.

Em relação à massa de solo contaminado (figura 32), as amostras com 2% e 5% de óleo diesel permaneceram inalteradas durante todo o período. A amostra com 10% de óleo sofreu uma redução de 78,02 g para 77,89 g, sugerindo uma evaporação de aproximadamente 0,13 g de contaminante. Já a amostra com 15% de óleo reduziu sua massa de 80,48 g para 80,25 g durante o período, totalizando uma evaporação em torno de 0,23 g. Fazendo a análise em termos de porcentagem (figura 33), estes valores correspondem a uma perda de 0,61% de óleo na amostra com 10% iniciais, e uma perda de 1,06% para a amostra com 15% iniciais. Além disso, nota-se que, para os teores de 10% e 15% de óleo diesel, há uma variação gradual da quantidade de óleo evaporado ao longo do tempo. O mesmo não ocorre para as amostras com 2% e 5% de contaminante, provavelmente porque o óleo, em menor quantidade, combina-se quimicamente com as partículas instáveis do solo, em sua totalidade. Quando este teor é aumentado, há uma quantidade de óleo excedente, que é volatilizada no decorrer do ensaio. Isto pode ser verificado pela maior estabilidade química, comprovada pela redução do número de cátions trocáveis (conforme item 4.1.3).

O controle da absorção de óleo pelo papel filtro está exposto na figura 34, onde o tempo de equalização das amostras foi de no mínimo 7 dias.

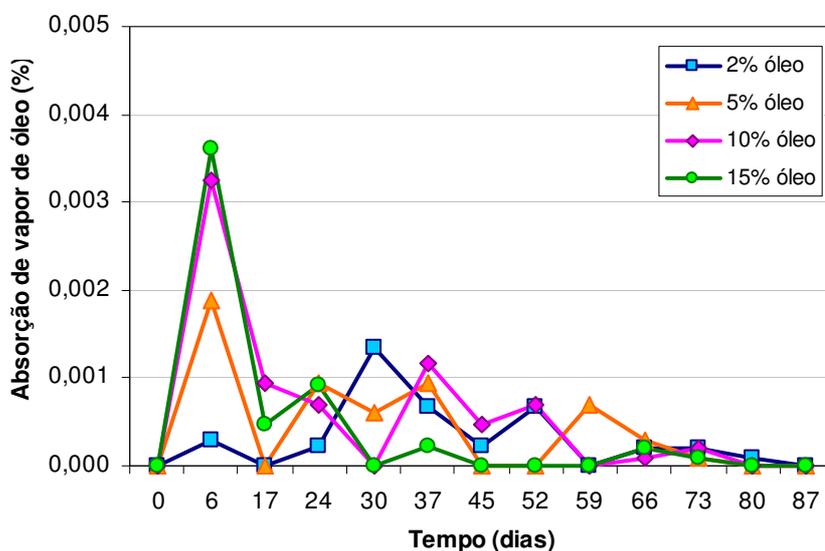


Figura 34: Controle da absorção do vapor de óleo diesel pelo papel filtro, em função do tempo.

A análise da absorção de vapor de óleo pelo papel filtro, indicada na figura 34, foi representada com a porcentagem em relação à quantidade de óleo presente no papel medida ao longo do tempo. A partir da mesma, pode-se afirmar que há uma pequena parcela inicial de

absorção de óleo, notável principalmente aos 6 dias de ensaio, que reduz ao longo do tempo, tendendo a zero em torno de 80 dias de realização do ensaio.

Como resultado destes ensaios de controle, verificou-se que é possível utilizar o método do papel filtro sem contato para o Solo AV contaminado, sem que haja necessidade de correções, pela pequena representatividade da influência negativa do óleo. Na tabela 11 está a estimativa dos prováveis teores de óleo diesel ao final do ensaio, para cada nível de contaminação inicial, obtidos através da constatação da ocorrência de evaporação do óleo.

Tabela 11: Teores iniciais e finais aproximados de óleo diesel no solo, conforme a evaporação detectada nos ensaios de controle.

Teor inicial de contaminante	Teor final de contaminante
2% de óleo diesel	2,00%
5% de óleo diesel	5,00%
10% de óleo diesel	9,39%
15% de óleo diesel	13,94%

Apesar de haver uma pequena modificação na porcentagem final do óleo diesel no interior da massa de solo, de acordo com a tabela 11, durante toda esta dissertação as amostras foram denominadas com seus teores iniciais de óleo (0%, 2%, 5%, 10% e 15% de contaminação), em relação ao teor de umidade inicial, para facilitar a identificação das mesmas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir da análise dos resultados, foi possível identificar algumas conclusões, levando em consideração os objetivos principais deste trabalho. As mesmas estão descritas neste capítulo, e, após, são apresentadas algumas sugestões para futuras pesquisas relacionadas ao tema proposto.

5.1 CONCLUSÕES

Os resultados desta dissertação permitiram a avaliação da metodologia de ensaio proposta para a determinação de curvas características em um solo contaminado com óleo diesel. A técnica utilizada foi o método do papel filtro sem contato, além de alguns ensaios para controle da evaporação do contaminante e da sua absorção pelo papel filtro. A seguir, estão descritas as principais conclusões obtidas no estudo.

- No decorrer dos ensaios, o método do papel filtro, sem contato entre a amostra e o papel, mostrou-se eficiente na medida dos valores de sucção total, para as amostras com e sem contaminação do Solo AV. Este fato foi comprovado por meio da comparação entre os resultados obtidos por Feuerharmel (2007), que utilizou a técnica do papel filtro com contato para o mesmo solo sem contaminante. Entretanto, para que houvesse a validação do método proposto, foram necessárias algumas modificações no procedimento de ensaio, como a disposição do papel filtro sobre a amostra, assim como a forma de armazenagem das amostras durante o período de equalização (Capítulo 3, item 3.8.1.2);
- Devido ao formato das curvas características resultantes, que permaneceu com aspecto bimodal para as amostras contaminadas, foi utilizado o método de ajuste proposto por Gitirana Jr e Fredlund (2004). O mesmo mostrou-se eficaz, uma vez que permitiu ajustes bastante condizentes com os pontos obtidos através da técnica do papel filtro;

- Os dados experimentais das curvas apresentaram pequena dispersão. Verificou-se que, apesar de mantido o formato bimodal, as curvas características do solo mudam seu aspecto de maneira gradual, em relação ao teor de contaminante. A curva tende a inclinar seu patamar, tornando-se menos horizontal, à medida que aumenta a quantidade de óleo. Esta transição de um comportamento bimodal para um formato unimodal revela a alteração na estrutura do solo devida à contaminação. Esta afirmação é comprovada através das fotomicrografias, que mostram o aumento da porosidade com a adição de óleo diesel. É possível afirmar que o Solo AV com 15% de contaminante tende a comportar-se de forma semelhante a um solo granular;
- As alterações mais significativas ocorrem na região próxima ao patamar das curvas características, sendo que após o segundo valor de entrada de ar as curvas são praticamente coincidentes. Entre os diferentes teores de contaminante estudados (2%, 5%, 10% e 15%), pode-se afirmar que há uma tendência a reduzir a sucção total quando a porcentagem de óleo é aumentada, considerando um mesmo grau de saturação. Além disso, o segundo valor de entrada de ar tende a aumentar com o aumento da porcentagem de contaminante;
- Comparando-se as curvas do solo contaminado com a curva obtida por Feuerharmel (2007), é possível notar que existem alterações no início da curva, além da localização e extensão dos patamares. Isto indica a modificação no comportamento de entrada e saída de água dos poros, conforme a porcentagem de óleo diesel. Na presença de contaminante, a capacidade de retenção de água no interior da massa de solo é diminuída, na região do patamar da curva característica. Isto pode ser explicado pela mudança estrutural do solo, além da maior estabilidade reativa, pela redução do valor da CTC, verificada nos ensaios de caracterização química;
- Os tempos de equalização para cada ponto das curvas características variam entre 7 e 30 dias, conforme o grau de saturação das amostras. Quanto maior o valor da sucção, menor é o tempo requerido para que ocorra o equilíbrio entre o solo e o papel filtro. Isto ocorre devido à redução do teor de umidade conforme o aumento da sucção, facilitando a equalização do sistema pelo menor volume de água envolvido. Além disso, o tempo de equalização definido para cada intervalo de sucção não é alterado com o teor de contaminação, indicando que as diferentes quantias de óleo não influenciam de forma significativa no fluxo de vapor de água;

- Da mesma forma constatada por Feuerharmel (2007), as amostras de Solo AV que iniciaram com umedecimento não exibiram histerese durante o primeiro ciclo de umedecimento-secagem, indicando que este processo não provocou alterações na estrutura do solo. Já as amostras que iniciaram na trajetória de secagem apresentam uma histerese pronunciada quando submetidas ao umedecimento. Além disso, foi possível perceber que há uma pequena redução da histerese com o aumento do teor de contaminação, principalmente nas amostras com 10% e 15% de óleo diesel. Acima de 20000 kPa de sucção, a histerese não é mais verificada, sendo as trajetórias de secagem e de umedecimento coincidentes para qualquer teor de contaminação;
- Em relação aos ensaios de controle, notou-se que houve uma perda de aproximadamente 0,61% na amostra com 10% de contaminante e 1,06% para a amostra com 15%. Esta perda não ocorre para as amostras com 2% e 5% de contaminante, provavelmente porque o óleo, em menor quantidade, combina-se quimicamente com as partículas instáveis do solo. Na análise da absorção de vapor de óleo pelo papel filtro, foi possível afirmar que há uma pequena parcela inicial de absorção de óleo, notável principalmente aos 6 dias de ensaio, que reduz ao longo do tempo, tendendo a zero em torno de 80 dias de realização do ensaio. Estes ensaios comprovaram que o óleo não interfere de forma significativa na obtenção dos pontos da curva característica, dispensando a necessidade de correções nos resultados.

A partir de todas as análises realizadas nesta dissertação, é possível afirmar que as curvas características de solos contaminados podem ser determinadas através de um método simples e de baixo custo. Isto abre caminho para a implementação dos conceitos inerentes à Mecânica dos Solos Não Saturados na resolução de diversos problemas geoambientais. Uma vez que os problemas de engenharia envolvendo solos com algum tipo de contaminação são cada vez mais frequentes, a sua avaliação mais minuciosa, levando em consideração os parâmetros relacionados à presença de sucção, podem resultar na adoção de soluções mais econômicas e eficientes. Além disso, o conhecimento prévio das alterações que o meio pode sofrer devido à presença de contaminantes, pode tornar mais ágil a tomada de decisão referente a soluções de engenharia envolvendo áreas contaminadas.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Dentro do escopo deste trabalho, outros diversos temas relacionados podem servir de base para novos estudos. Além disso, uma série de complementos para esta mesma linha de pesquisa é sugerida, de acordo com os tópicos a seguir.

- Estudar as curvas características do Solo AV submetido à contaminação por outros agentes, pelo mesmo método de ensaio proposto e fazer análises comparativas;
- Complementar as curvas obtidas com pontos provenientes de outros ensaios, como a placa de sucção (que mede valores mais baixos de sucção). Neste caso, seria necessária a instalação de uma pedra porosa não permeável ao óleo diesel;
- Realizar os ensaios propostos nesta dissertação para o Solo AV contaminado em diferentes condições de moldagem;
- Validar as curvas características determinadas por esta dissertação, através da determinação dessas mesmas curvas através de outros métodos de ensaio;
- Estudar as alterações no comportamento mecânico e hidráulico do Solo AV submetido aos mesmos graus de contaminação estudados, através de correlações com as curvas características determinadas. Após, estas previsões poderiam ser comprovadas com a realização de um programa experimental específico;
- Determinar a curva característica de outros tipos de solos com diferentes contaminantes, utilizando a técnica proposta por esta dissertação, para certificar a validade da mesma para outros materiais;
- Determinar as curvas de calibração do papel filtro para diferentes amostras com diferentes tipos de contaminantes, através da técnica de ensaio proposta. Assim, poderia ser comprovada a validade do método e da curva de calibração utilizada nesta dissertação.

REFERÊNCIAS

AGUS, S.S.; LEONG, E.C.; SCHANZ, T. (2003). Assessment of Statistical Models for Indirect Determination of Permeability Functions from Soil-Water Characteristic Curves. **Géotechnique**, Vol. 53, Nº 2, p. 279-282.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (1998). **Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper – ASTM D 5298-94**. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.09, ASTM International, West Conshohocken, PA, p. 156-161.

ANDERSON, M. G. (1983) **The Prediction of Soil Suction for Slopes in Hong Kong**. Geotechnical Control Office, Hong Kong, 244p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **NBR 6508: Grãos de Solo que passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **NBR 7180: Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **NBR 7181: Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). **NBR 9604: Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas**. Rio de Janeiro.

BASTOS, C.A.B. (1999). **Estudo Geotécnico sobre a Erodibilidade de Solos Residuais Não Saturados**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 269p.

BOLT, G.H. (1956). Physico-Chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays. **Géotechnique**, Vol. 6, p. 86-93.

BORTOLI, C.R. (1999). **Estudo Numérico-Experimental da Condutividade Hidráulica Saturada/Não Saturada de um Solo Estruturado**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 121p.

BOULDING, J.R.; BARCELONA, M.J. (1991). Geochemical Sampling of Subsurface Solids and Groundwater Characterization of Water Movement in the Saturated Zone. **Seminar Publication – Site Characterization of Subsurface Remediation**. EPA/625/4-91/026, USEPA, 268 p.

BROOKS, R.N.; COREY, A.T. (1964). Hydraulic Properties of Porous Media. Colorado State University (Fort Collins), **Hidrology Paper**, N° 3.

BUSBY, R.D.; LENHARD, R.J.; ROLSTON, D.E. (1995). An Investigation of Saturation: Capillary Pressure Relations in Two and Three-fluid Systems for Several NAPLs in Different Porous Media. **Groundwater Journal** 33, N° 4, p. 570-578.

CHANDLER, R.J.; GUTIERREZ, C.I. (1986). The Filter-Paper Method of Suction Measurement. **Géotechnique**, Vol. 36, N° 2, p. 265-268.

CHANDLER, R.J.; CRILLY, M.S.; MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). A Low-Cost Method of Assessing Clay Dessication for Low-Rise Buildings. **Proc. of the Institute of Civil Engineering**, Vol. 92, N° 2, p. 82-89.

CUI, Y.J.; ALZOGHBI, P.; LEI, L.; DELAGE, P. (2001). Mécanismes de Retention des Polluants et Comportement Mécanique des Sols. **Proc. 15th Cong. Int. de Mécanique des Sols et de Géotechnique**, Istanbul 3, p. 1959-1962.

CUI, Y.J.; DELAGE, P.; ALZOGHBI, P. (2003). Retention and Transport of a Hydrocarbon in a Silt. **Géotechnique**, Vol. 53, N° 1, p. 83-91.

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

ESCÁRIO, V.; JUCÁ, J. (1989) Strength and Deformation of Partly Saturated Soils. In: XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro. **Proceedings...**, v.1, p. 43-46.

FAWCETT, R.G; COLLIS-GEORGE, N. (1967). A Filter Paper Method for determining the Moisture Characteristics of Soil. **Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry**, N° 7, p. 162-167.

FETTER, C.W. (1999). **Contaminant Hidrology**. Macmillan Publishing Co, New York, 498p.

FEUERHARMEL, C. (2003). **Aspectos do Comportamento Não Saturado de Dois Solos Coluvionares – Gasoduto Bolívia-Brasil**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 128p.

FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W.Y.Y.; BICA, A.V.D. (2005). Determination of the Soil-Water Characteristic Curve of Undisturbed Colluvium Soils. In: International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, EXPERUS 2005, Trento (Itália), **Proceedings...**, Vol.1, p. 345-349.

FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W.Y.Y.; BICA, A.V.D. (2006). The Use of Filter-Paper and Suction-Plate Methods for Determining the Soil-Water Characteristic Curve of Undisturbed Colluvium Soils. **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 29, N° 5, p. 419-425.

FEUERHARMEL, C. (2007). **Estudo da Resistência ao Cisalhamento e da Condutividade Hidráulica de Solos Coluvionares Não Saturados da Formação Serra Geral**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 329 p.

FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R. (1977). Stress State Variables for Unsaturated Soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, Vol. 103, N° GT5, p. 447-466.

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. (1993). **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. New York, Ed. John Wiley & Sons.

FREDLUND, D.G.; XING, A. (1994). Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 31, N° 4, p. 521-532.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; HUANG, S. (1994). Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils using the Soil-Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 31, N° 4, p. 533-546.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; FREDLUND, M.D.; BARBOUR, S.L. (1996). The Relationship of Unsaturated Soil Shear Strength Function to the Soil-Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 33, N° 3, p. 440-448.

FREDLUND, M.D. (1999). **The Role of Unsaturated Soil Property Functions in the Practice of Unsaturated Soil Mechanics**. Ph D. Thesis. University of Saskatchewan, Canadá, 292 p.

GALLIPOLI, D.G.; WHEELER, S.J.; KARSTUNEN, M. (2003). Modeling the Variation of Degree of Saturation in a Deformable Unsaturated Soil. **Géotechnique**, Vol.53, N° 1, p. 105-112.

GERSCOVICH, D.M.S. (2001). Equações para Modelagem da Curva Característica Aplicadas a Solos Brasileiros. In: 4° Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, ÑSAT01, Porto Alegre, **Anais...**, Vol. 1, p. 76-92.

GITIRANA Jr., G.F.N.; FREDLUND, D.G. (2004). A Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. Technical Note, ASCE **Journal of Geotechnical and Environmental Engineering**, Vol. 130, N° 2, p. 209-213.

GRAY, D.H. (1969). Thermo-Osmotic and Thermo-Electric Coupling in Saturated Soils. Proc. Effects of Temperature and Heat on Engineering Behavior of Soils, **Highway Research Board Special Report 103**, Washington DC, p. 66-77.

HAMBLIN, A.P. (1981). Filter Paper Method for Routine Measurement of Field Water Potential. **Journal of Hydrology**, Vol. 53, Nº 3-4, p. 355-360.

HASAN, S.E. (1996). **Geology and Hazardous Waste Management**. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 387 p.

HOUSTON, S.L.; HOUSTON, W.N.; WAGNER, A.M. (1994). Laboratory Filter Paper Suction Measurements. **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 17, Nº 2, p. 185-194.

KHALILI, N.E.; KHABBAZ, M.H.A. (1998). A Unique Relationship for χ for Determination of the Shear Strength of Unsaturated Soil. Technical Note. **Géotechnique**, Vol. 48, Nº 5, p. 681-687.

LENHARD, R.J.; PARKER, J.C. (1988). Experimental Validation of the Theory of Extending Two-Phase Saturation-Pressure Relations to Three Fluid Phase Systems for Monotonic Drainage Paths. **Water Resour**: 24, Nº 3, p. 373-380.

LEONG, E.C.; HE, L.; RAHARDJO, H. (2002). Factors Affecting the Filter Paper Method for Total Suction Measurements. **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 25, Nº 3, p. 322-333.

MACHADO, S.L.; VILAR, O.M. (1998). Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados: Ensaio de Laboratório e Determinação Expedida. **Solos e Rochas**, Vol. 21 (2), p. 65-78.

MARINHO, F.A.M. (1994). **Shrinkage Behaviour of some Plastic Soils**. PhD Thesis – Imperial College, University of London, 216p.

MARINHO, F. A. M. (1997). Medição de Sucção em Solos. In: 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados – ÑSAT97, Rio de Janeiro, **Anais...** p. 373-397.

MERCER, J.W.; SPALDING, C.P. (1991). Characterization of the Vadose Zone. **Seminar Publication – Site Characterization of Subsurface Remediation**. EPA/625/4-91/026, USEPA, 268 p.

MITCHELL J.K.; GREENBERG J.A.; WITHERSPOON, P.A. (1973). Chemico-Osmotic Effects in Fine-Grained Soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, Vol. 99, Nº SM4, p. 307-322.

MONCADA, M.P.H. (2004). **Estudo em Laboratório de Características de Colapso e Transporte de Solutos Associados à Infiltração de Licor Cáustico em um Solo Laterítico**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 219p.

MUALEM, Y. (1986). Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils: Prediction and Formulas. In. **Methods of Soils Analysis. Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2nd ed. Agronomy, p. 799-823. Madison, Wis: American Society of Agronomy.

PEREIRA, A. (2006). **Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados: Análise Experimental e Teórica**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 153p.

RIDLEY, A.M. (1995). Discussion on 'Laboratory Filter Paper Suction Measurements' by Sandra L. Houston, William N. Houston, and Anne-Marie Wagner, **Geotechnical Testing Journal**, v.18(3), p. 391-396, 1995.

SHARMA, R.S.; MOHAMED, M.H.A. (2003). Patterns and Mechanisms of Migration of Light Non-Aqueous Phase Liquid in an Unsaturated Sand. **Géotechnique**, Vol. 53, N° 2, p. 225-239.

SIBLEY, J.W.; WILLIAMS, D.J. (1990). A New Filter Material for Measuring Soil Suction. **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 13, N° 4, p. 381-384.

SILVEIRA, R.M. (2003). **Propriedades Geotécnicas dos Solos Coluvionares do Gasoduto Bolívia-Brasil em Timbé do Sul (SC)**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 131p.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEM, H.; VOLKWEISS, S.J. (1995). **Análise de Solo, Plantas e outros Materiais**. Departamento de Solos – Faculdade de Agronomia, UFRGS, 2ª ed., Porto Alegre, 174p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1996). **Method 3050 B – Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils**. USEPA, Estados Unidos, 12p.

VAN GENUTCHEN, M. Th. (1980). A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science of America Journal**, Vol. 44, p. 892-898.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E. (1996). The Relationship between the Soil-Water Characteristic Curve and the Unsaturated Shear Strength of a Compacted Glacial Till. **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 19, N° 3, p. 259-268.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E. (1999). The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till. **Géotechnique**, Vol. 49, N° 2, p. 143-159.

WIEBE, B.J. (1996). **The Effect of Confining Pressure, Temperature and Suction on the Shear Strength and Stiffness of Unsaturated Buffer**. Master's Thesis – University of Manitoba, Canadá. 266 p.

WOODBURN, J.A.; LUCAS, B. (1995). New Approaches to the Laboratory and Field Measurement of Soil Suction. In: International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 1995, Paris, **Proceedings...**, Vol. 2, p. 667-671.