



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

LARISSA DA SILVA PAES CARDOSO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA O ESTUDO DO
TRANSPORTE DE POLUENTES AUTOMOTIVOS EM SOLOS NÃO
SATURADOS**

Salvador
2006

LARISSA DA SILVA PAES CARDOSO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA O ESTUDO DO
TRANSPORTE DE POLUENTES AUTOMOTIVOS EM SOLOS NÃO
SATURADOS**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Lemos Machado

Salvador
2006

**Ao meu amor, André
Pelo incentivo, paciência e compreensão
Aos meus pais queridos, Enio e Nívea**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Sandro Lemos Machado, querido orientador, por sua dedicação e paciência demonstradas durante o período de orientação, como também pela confiança e incentivo ao longo de todo o desenvolvimento desse trabalho de pesquisa.

À André, aos meus pais, Enio e Nivea, e à San, Dinha e Peu pelo amor, carinho e incentivo a seguir nesta caminhada.

Aos grandes amigos Kleber, Fernandinha e Help, que deram mostras de companheirismo e contribuíram decisivamente para que os objetivos fossem alcançados.

À Professora Iara e ao Professor Luis Aníbal pelas discussões proveitosas, que só enriqueceram este trabalho.

Agradecimentos especiais aos Professores Erundino, Miriam e Orêncio pelas valiosas contribuições.

À todos os amigos do Geoamb, Júlio, Jeová, Leandro, Gilson, Rodrigo, Maurício, Nelson, André, Patrícia, Taís, Filipe e Fernando pela convivência maravilhosa e pela colaboração durante a realização deste trabalho.

À CAPES, que me confiou uma bolsa através desta universidade.

Ao Cenpes, pelo apoio financeiro indispensável à realização desse trabalho.

DA ETERNA PROCURA

**Só o desejo inquieto, que não passa,
Faz o encanto da coisa desejada...
E terminamos desdenhando a caça
Pela doida aventura da caçada**

Mario Quintana, 1951

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um equipamento para a determinação experimental da curva característica de sucção, e a determinação experimental da permeabilidade efetiva a fluidos imiscíveis em sistemas multifásicos (três fases), especificamente gasolina, água e ar, enfocando-se as diversas propriedades envolvidas no fluxo multifásico de fluidos em solos não saturados. Para tanto foi projetado, construído e colocado em operação, no Laboratório de Geotecnia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA, um equipamento constituído de quatro permeômetros de parede flexível, sistema de medição de vazão nas três fases, sistema de aquisição de dados automatizado, sistema de aplicação e controle de pressão em todas as fases de forma independente e sistema de aplicação de vazão constante (bomba de fluxo).

É apresentado neste trabalho uma descrição detalhada de todas as unidades componentes do equipamento desenvolvido, assim como os procedimentos adotados para a realização dos ensaios, as dificuldades encontradas e as soluções adotadas.

Visando avaliar o funcionamento do equipamento desenvolvido, foram realizados testes de pré-operação e aferição, com o solo sedimentar da formação Barreiras.

Os resultados dos testes realizados indicam que o equipamento desenvolvido e as técnicas experimentais implementadas podem se constituir em importantes ferramentas para a obtenção de dados referentes a interação e transporte da gasolina, em solos não saturados.

ABSTRACT

This work had as main objective the development of an equipment for the experimental determination of the characteristic curve of suction, and the experimental determination of the effective permeability to unmixed fluids in multiphase systems (three phases), specifically gasoline, water and air, being focused the several properties involved in the multiphase flow of fluids in unsaturated soils. For so much it was projected, built and put in operation, in the Laboratório de Geotecnia Ambiental of the Escola Politécnica of UFBA, a constituted equipment of four flexible wall permeameters, system of flow measurement in the three phases, system of acquisition of data automated, application system and pressure control in all of the phases in an independent way and system of application of constant flow (flow bomb).

It is presented in this work a detailed description of all of the component units of the developed equipment, as well as the procedures adopted for the accomplishment of the rehearsals, the found difficulties and the adopted solutions.

Seeking to evaluate the operation of the developed equipment, pré-operation tests and gauging were accomplished, with the sedimentary soil of the formation Barreiras.

The results of the accomplished tests indicate that the developed equipment and the implemented experimental techniques can be constituted important tools in the obtaining of data as the interaction and transport of the gasoline in unsaturated soils.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE QUADROS.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	7
2.1 <i>Fluxo Unifásico</i>	7
2.2 <i>Fluxo Multifásico</i>	13
2.2.1 <i>Conceituação Básica</i>	13
Tensão Interfacial.....	13
Molhabilidade.....	15
Saturação.....	15
Pressão Capilar.....	15
2.2.2 <i>Considerações Gerais</i>	18
Permeabilidade Relativa e Efetiva.....	19
2.3 <i>Fatores que Influenciam a Permeabilidade ou Condutividade Hidráulica</i>	22
2.4 <i>Determinação da Permeabilidade em Laboratório</i>	24
2.4.1 <i>Através do Ensaio de Adensamento</i>	24
2.4.2 <i>Ensaio Através de Permeômetros</i>	24
Ensaio de Carga Constante e Variável	25
2.4.3 <i>Ensaio de Vazão Constante</i>	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 <i>Elaboração do Aparato Experimental</i>	31
3.1.1 <i>Arranjo Experimental do Equipamento</i>	32
3.1.2 <i>Permeômetros</i>	33
Verificação do valor de entrada de ar do material hidrofílico e hidrofóbico utilizado no permeômetro do equipamento desenvolvido.....	37
Verificação da permeabilidade da membrana de celulose.....	40
Verificação da influência da permeabilidade da pedra porosa.....	41
Testes para verificação de vazamentos nos permeômetros.....	43
3.1.3 <i>Montagem do arranjo experimental</i>	44
3.1.4 <i>Sistema de aplicação de vazão constante</i>	49
3.1.5 <i>Sistema de aplicação de pressão</i>	50

3.1.6 Sistema de aquisição de dados automatizado.....	52
3.2 <i>Procedimentos para Realização dos Testes de Pré-Operação e Aferição do Equipamento Desenvolvido</i>	54
3.2.1 Operações Preliminares.....	54
3.2.2 Determinação Experimental da Curva Característica de Sucção.....	56
3.2.3 Determinação Experimental da Permeabilidade Efetiva.....	61
3.3 <i>Coleta de Amostras</i>	63
3.4 <i>Caracterização das Amostras de Solo</i>	65
3.5 <i>Ensaio para Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada dos Solos em Relação à Água e à Gasolina</i>	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1 <i>Caracterização das amostras de solo</i>	70
4.2 <i>Ensaio para a Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada do Solo em Relação à Água e à Gasolina</i>	72
4.2.1 Ensaio para a Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada dos Solos em Relação à Água.....	72
4.2.2 Ensaio para a Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada do Solo em Relação à Gasolina.....	73
4.3 <i>Determinação da Curva Característica de Sucção e da Curva de Condutividade Hidráulica Não Saturada</i>	75
4.4 <i>Pré-Operação e Aferição do Equipamento Desenvolvido</i>	81
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	86
5.1 <i>Conclusões Relativas ao Equipamento Desenvolvido</i>	86
5.1.1 Principais Aspectos Positivos.....	86
5.1.2 Principais Aspectos Negativos.....	87
5.2 <i>Recomendações Para o Aperfeiçoamento do Equipamento</i>	88
REFERÊNCIAS	90
APÊNDICE I	94
APÊNDICE II	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Ilustração dos sistemas subterrâneos passíveis de contaminação por vazamentos em postos de abastecimento de combustível.	2
Figura 2.1: Esquema do experimento realizado por Darcy, (DELGADO, 2001).	8
Figura 2.2: Representação das forças intermoleculares, (DELGADO, 2001).	14
Figura 2.3: Pressão capilar em função do grau de saturação, (FETTER, 1992).	17
Figura 2.4: Relação da condutividade hidráulica com a sucção matricial em processos de drenagem e embebição, (FETTER, 1992).	21
Figura 2.5: Curvas típicas de permeabilidade relativa, (FETTER, 1992).	22
Figura 2.6: Esquema do método de carga variável (as duas primeiras figuras) e de carga constante (última figura), (DELGADO, 2001).	27
Figura 2.7: Esquema do método de vazão constante, na primeira figura sistema triaxial para solos saturados (DANIEL, 1995 apud DELGADO, 2001) e sistema triaxial para solos não saturados (última figura), (OLSEN et al 1994 apud DELGADO, 2001).	29
Figura 3.1: Desenho esquemático do arranjo experimental do equipamento desenvolvido.	33
Figura 3.2: Partes constituintes do permeômetro desenvolvido.	34
Figura 3.3: Partes que compõem os permeômetros (base, tampa, suporte, cabeçote e pedestal).	35
Figura 3.4: Permeômetro desmontado com as conexões e registros.	35
Figura 3.5: Desenho esquemático do arranjo para realização dos testes na membrana de PVDF.	38
Figura 3.6: Gráfico representando a relação entre a permeabilidade real do solo e a permeabilidade medida sob a influência das placas cerâmicas.	41
Figura 3.7: Materiais filtrantes utilizados para separar as fases.	43
Figura 3.8: Realização de testes para verificação de vazamentos nos permeômetros.	44

Figura 3.9: Ocorrência de vazamento em uma das válvulas conectadas à base.	44
Figura 3.10: Arranjo experimental, sem as quatro câmaras e a bomba de fluxo.	45
Figura 3.11: Conjunto de conexões e válvulas que liga as interfaces às quatro câmaras.	46
Figura 3.12: Conjunto de conexões ligado à câmara que possibilita aplicação de pressão nas fases de forma independente.	48
Figura 3.13: Desenho esquemático mostrando as ligações dos conjuntos de conexões às entradas da câmara.	48
Figura 3.14: Bomba de fluxo utilizada no equipamento.	49
Figura 3.15: Peças da seringa fabricada.	50
Figura 3.16: Seringa fabricada montada.	50
Figura 3.17: Partes componentes do sistema de aplicação de pressão.	51
Figura 3.18: Conjunto de conexões com transdutor de pressão que será ligado à saída da seringa.	52
Figura 3.19: Painel eletrônico para possibilitar aquisição de dados, permitindo a automatização dos ensaios.	53
Figura 3.20: Tela inicial do programa desenvolvido para o acompanhamento dos ensaios.	53
Figura 3.21: Tela de manutenção e aferição do equipamento.	54
Figura 3.22: Malha retangular axi-simétrica, obtida no Seep/W, com os valores de umidade e de pressão na água (kPa)	58
Figura 3.23: Gráfico de valores de pressão em função do volume de água drenado, obtidos a partir da simulação feita no Seep/W.	59
Figura 3.24: Esquema ilustrativo do equipamento para determinação de curva característica de sucção por equilíbrio de pressão, desenvolvido por Machado e Dourado (2001).	61
Figura 3.25: Foto mostrando o local de coleta das amostras de sedimento Barreiras (Região do CIA, Salvador).	64
Figura 3.26: Foto mostrando o procedimento de coleta das amostras de	64

sedimento Barreiras.

Figura 3.27: Corpo de prova envolvido com fita de teflon.	67
Figura 3.28: Corpo de prova sendo embrulhado com filme de PVC.	67
Figura 3.29: Montagem da realização do ensaio para determinação da condutividade hidráulica saturada em relação à gasolina (observar o reservatório no alto e garrafa plástica na saída da câmara).	69
Figura 4.1: Curvas de distribuição granulométricas das amostras do solo sedimentar da formação Barreiras.	72
Figura 4.2: Curva característica de sucção da amostra de solo contida no anel 26.	77
Figura 4.3: Curva de condutividade hidráulica da amostra de solo contida no anel 26.	78
Figura 4.4: Curva característica de sucção da amostra de solo contida no anel 33.	78
Figura 4.5: Curva de condutividade hidráulica da amostra de solo contida no anel 33.	79
Figura 4.6: Curva característica de sucção da amostra de solo contida no anel A32.	79
Figura 4.7: Curva de condutividade hidráulica da amostra de solo contida no anel A32.	80
Figura 4.8: Curva característica de sucção da amostra de solo contida no anel 3B.	80
Figura 4.9: Curva de condutividade hidráulica da amostra de solo contida no anel 3B.	81
Figura 4.10: Montagem do corpo de prova utilizando filme de PVC.	82
Figura 4.11: Pressões medidas em cada fase em função do tempo de realização do ensaio.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores típicos de densidade e viscosidade de algumas substâncias (podem ser menores com o aumento da temperatura)	23
Tabela 4.1 - Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização geotécnica	71
Tabela 4.2 - Condições iniciais dos corpos de prova e média dos ensaios realizados (carga constante e carga variável) para a determinação da condutividade hidráulica saturada em relação à água	73
Tabela 4.3 - Condições iniciais dos corpos de prova e resultados dos ensaios realizados (carga constante) para a determinação da condutividade hidráulica saturada em relação à gasolina	74
Tabela 4.4 - Parâmetros de ajuste da curva característica de sucção e da função de condutividade hidráulica	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Resultados do teste para verificação da permeabilidade da membrana de celulose	39
Quadro 3.2 - Resultados do teste para verificação da permeabilidade da membrana de celulose	40

LISTA DE SÍMBOLOS

a :	Área da seção transversal da bureta [L^2]
a_v :	Coefficiente de compressibilidade do solo [$LM^{-1}T^2$]
A :	Área da seção transversal do corpo de prova [L^2]
B :	Reflete a expansão da argila e outros efeitos de dupla camada [L^2]
C :	Constante de proporcionalidade
C :	Fator de forma
C_v :	Coefficiente de adensamento [L^2T^{-1}]
d :	Diâmetro equivalente das partículas de solo [L]
dP :	Diferença de pressão entre dois pontos [$ML^{-1}T^{-2}$]
dx :	Distância entre dois pontos [L]
D :	Diâmetro do corpo de prova [L]
e :	Índice de vazios da amostra de solo
g :	Constante de aceleração da gravidade [LT^{-2}]
h :	Carga hidráulica [L]
h_i :	Espessura da camada de solo i [L]
h_1 :	Potencial hidráulico total no ponto 1 [L]
h_2 :	Potencial hidráulico total no ponto 2 [L]
i_h :	Gradiente de carga hidráulica do solo
IP :	Índice de plasticidade
k :	Coefficiente de permeabilidade do solo [LT^{-1}]
k_i :	Coefficiente de permeabilidade da camada de solo i [LT^{-1}]
$k_{sat\ i}$:	Coefficiente de permeabilidade saturada ao fluido i [LT^{-1}]
K_o :	Fator que depende da forma dos poros e da tortuosidade da trajetória da linha de fluxo
K :	Coefficiente de permeabilidade absoluta ou intrínseca [L^2]
K_r :	Coefficiente de permeabilidade relativa
K_i :	Coefficiente de permeabilidade efetiva do fluido i [L^2]

K_0 :	Condutividade hidráulica do solo saturado [LT ⁻¹]
L :	Comprimento da amostra de solo [L]
m :	Massa molar em gramas por mol
n :	Porosidade do meio
N :	Está correlacionado com o percentual de argila do solo
P_1 :	Pressão na entrada do corpo de prova [ML ⁻¹ T ⁻²]
P_2 :	Pressão na saída do corpo de prova [ML ⁻¹ T ⁻²]
P_b :	Pressão na qual o gás está submetido no ponto de medição [ML ⁻¹ T ⁻²]
P_c :	Pressão capilar [ML ⁻¹ T ⁻²]
P_{nw} :	Pressão na fase não molhante [ML ⁻¹ T ⁻²]
P_w :	Pressão na fase molhante [ML ⁻¹ T ⁻²]
\bar{P} :	Pressão média [ML ⁻¹ T ⁻²]
Q_b :	Vazão medida na pressão P_b [L ³ T ⁻¹]
Q_i :	Vazão do fluido i [L ³ T ⁻¹];
\bar{Q} :	Vazão na pressão média [L ³ T ⁻¹]
R :	Constante universal dos gases
S :	Área superficial pelo volume das partículas de solo [L ⁻¹]
S_{iw} :	Grau de saturação irreduzível da fase molhante
S_i :	Grau de saturação
$S_{r\ final}$:	Grau de saturação final
S_{rnw} :	Grau de saturação residual da fase não molhante
S_{rw} :	Grau de saturação residual da fase molhante
t :	Tempo [T]
$t_{\ final}$:	Tempo final de realização do ensaio [T]
T :	Constante de temperatura
u_a :	Pressão de ar [ML ⁻¹ T ⁻²]
u_w :	Pressão de água [ML ⁻¹ T ⁻²]
v :	Velocidade de descarga da água [LT ⁻¹]
v_x :	Velocidade de fluxo unifásico horizontal de um fluido incompressível [LT ⁻¹]

V :	Volume de água percolado [L^3]
V :	Volume do corpo de prova [L^3]
W :	Teor de umidade
W_L :	Limite de liquidez
W_P :	Limite de plasticidade
γ_d :	Peso específico seco [$ML^{-2}T^{-2}$]
γ_i :	Peso específico total [$ML^{-2}T^{-2}$]
ε :	Constante dielétrica dos fluidos
θ :	Umidade volumétrica de água
θ_r :	Umidade volumétrica residual
θ_{sat} :	Umidade volumétrica de saturação
μ :	Viscosidade dinâmica do fluido [$ML^{-1}T^{-1}$]
μ_i :	Viscosidade do fluido i [$ML^{-1}T^{-1}$]
ρ :	Densidade do fluido [ML^{-3}]
ρ_i :	Densidade do fluido i [ML^{-3}]
ψ_m :	Sucção [$ML^{-1}T^{-2}$]
ω :	Saturação efetiva do solo
Δh_i :	Diferença de energia total no fluido considerado [L]

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico desenfreado das últimas décadas e o crescimento desordenado da maioria dos aglomerados urbanos são os principais fatores que contribuem para a degradação ambiental urbana. Em vista disso, as cidades brasileiras enfrentam atualmente uma série de problemas ambientais, principalmente relativos à contaminação de solos, águas superficiais e subterrâneas, que afetam a saúde humana, reduzem a qualidade de vida da população e causam danos imediatos aos ecossistemas.

Entre os diversos tipos de contaminação que afetam o solo e que podem atingir o lençol freático, um dos mais importantes está relacionado a vazamentos durante o transporte, armazenamento e distribuição de combustíveis derivados do petróleo. Um sério agravante para esse tipo de contaminação é que na maioria dos casos, os vazamentos são percebidos somente quando o combustível surge em algum curso d'água ou fonte, tendo já causado sérios danos ambientais (OLIVEIRA, 2001).

Conforme apontado por Corseuil e Fernandes (1999), a contaminação de aquíferos causada por derramamentos de combustíveis automotivos em tanques de armazenamento tem sido uma preocupação constante em nível mundial e começa a ser discutida com maior intensidade também no Brasil. Os hidrocarbonetos monoaromáticos denominados de BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) desempenham um papel preponderante nos cenários de contaminação, pois eles são os constituintes mais solúveis da gasolina e com maior potencial de migração na água subterrânea (BARKER *et al*, 1990). Dentre os BTEX, o benzeno é o mais tóxico de todos, com padrão de potabilidade de 10 µg/l, podendo em exposições crônicas causar leucopenia (diminuição do número de leucócitos no sangue), câncer, vertigens, tremores e afetar o sistema nervoso central (PENNER, 2000). No Brasil, o padrão de potabilidade é de 5 µg/l, segundo a Portaria n° 1.469 de 29 de dezembro de 2000, do Ministério de Saúde.

Por todo o Brasil já existe algo mais de 45.000 registros de postos revendedores de gasolina (ANP, 2005), dos quais grande parte foi construída na década de 70. Como a vida útil dos tanques de armazenamento é de aproximadamente 25 anos, sua validade está próxima do final ou já se esgotou, podendo-se esperar um aumento na ocorrência de vazamentos nos postos do país (CORSEUIL e MARINS, 1997). Os fatores que contribuem para que estes vazamentos ocorram são os aspectos relativos à corrosão, falhas estruturais do tanque ou da tubulação conectada ao tanque, instalação inadequada, etc. Os principais impactos dessas ocorrências estão relacionados à contaminação de solos e de águas subterrâneas que podem ser utilizadas para abastecimento humano; confinamento de gases em áreas fechadas, podendo acarretar incêndios ou explosões; problemas de saúde à população e diversos danos ambientais. A Figura 1.1 ilustra alguns dos sistemas subterrâneos passíveis de contaminação por vazamentos em postos de abastecimento de combustível.

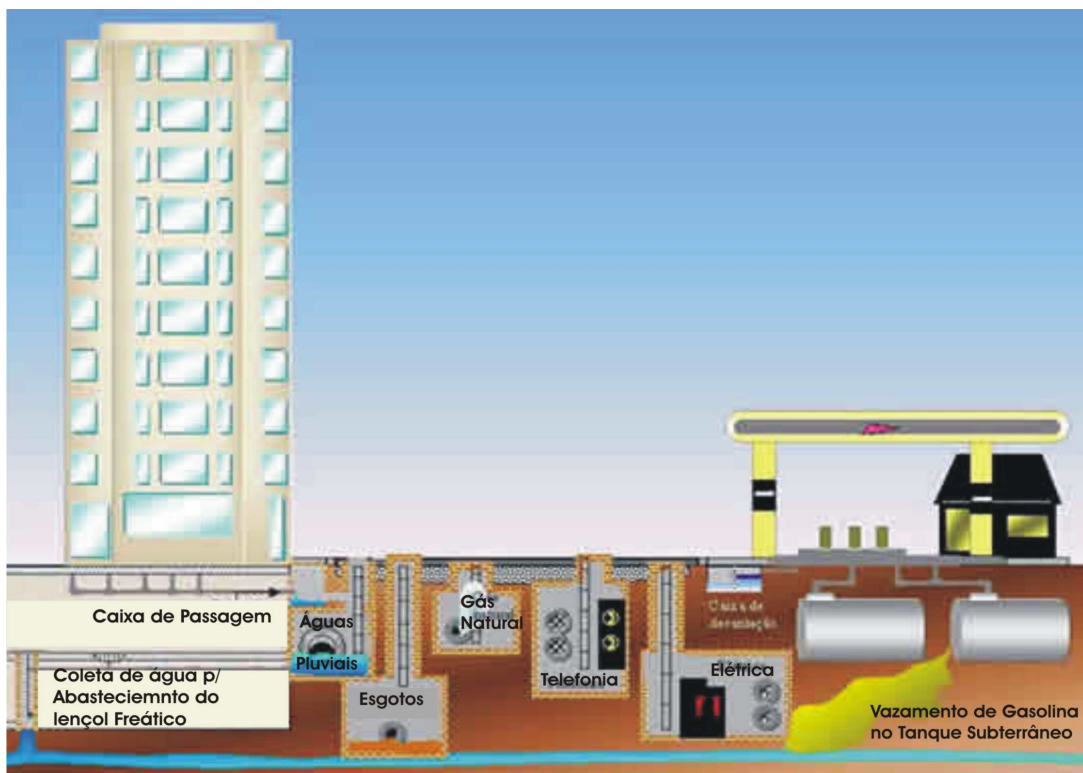


Figura 1.1: Ilustração dos sistemas subterrâneos passíveis de contaminação por vazamentos em postos de abastecimento de combustível. Fonte: CETESB, 2004.

Apesar do esforço realizado no sentido da troca dos tanques mais antigos, diante do exposto, a contaminação de solos e águas subterrâneas decorrente de vazamentos de combustível em postos de serviço tem sido cada vez mais freqüente no Brasil, principalmente nos grandes centros urbanos, onde há um número maior de postos.

Em Salvador, Guerra e Nascimento (1999) desenvolveram um trabalho, em nível de diagnóstico, na Bacia do Rio Camurujipe, para verificar o grau de comprometimento das águas do aquífero freático de Salvador causado por vazamentos em postos de gasolina. Neste trabalho foram investigados 33 postos de gasolina e garagens de ônibus, com retiradas de amostras de água, sendo que 15 dos pontos amostrados apresentaram-se contaminados com a presença de BTEX, ou seja, 46% dos pontos investigados. Diante do resultado encontrado, Guerra e Nascimento (1999) afirmam que “em muitos desses locais os pontos de amostragem estavam situados a montante dos tanques de armazenamento de combustível, com o fluxo de água subterrânea passando primeiro pelo ponto de captação de água para depois drenar os locais dos tanques de combustíveis, concluindo-se disso que o índice de contaminação deverá ser bem maior do que o que foi encontrado na pesquisa”. Confirmando-se o que já se presumia, ainda segundo os autores, os postos de combustível e as garagens de ônibus se constituem na principal fonte de poluição das águas subterrâneas da bacia, através de combustíveis e demais compostos derivados do petróleo.

No Brasil, sabe-se que a gasolina comercializada na maioria dos estados brasileiros é uma mistura de 76% de gasolina e 24% de etanol. Apesar de estudos estarem sendo desenvolvidos para avaliar o efeito potencial do etanol no aumento da solubilidade (co-solvência) dos compostos monoaromáticos (BTEX) em derramamentos de gasolina e diesel, (CORSEUIL E MARINS, 1997; CORSEUIL E FERNANDES, 1999; KAIPPER, 2003), não existem estudos que investiguem as interações destas misturas na zona vadosa, ou seja, na região do subsolo que é limitada por cima pela superfície da Terra e por baixo pelo nível de água.

Na ocorrência de vazamentos, o contaminante passará a se mover pelo solo, normalmente através da sua zona vadosa ou região não saturada, na direção

do lençol freático. São diversos os fenômenos envolvidos no transporte simultâneo de dois ou mais fluidos imiscíveis através do solo, sendo difícil idealizar a maneira de como essas substâncias se mobilizam e o que acontece no decorrer desta mobilização. Portanto, o comportamento do solo é complexo e variável, regido por uma das propriedades do solo que apresenta maior variação: a permeabilidade ou condutividade hidráulica. O coeficiente de permeabilidade de um solo pode variar amplamente a depender de diversos fatores, tais como propriedades do fluido, tamanho das partículas e esfericidade dos grãos do solo, natureza do arranjo de partículas, grau de saturação, superfície molhada, etc.

O grau de saturação em que o solo se encontra representa uma importante influência na condutividade, pois quanto maior o grau de saturação do solo em relação a um determinado fluido, maior será sua condutividade hidráulica ou sua mobilidade. Em condições saturadas todos os poros estão preenchidos com o fluido sendo, portanto, condutores. Então a continuidade e, por consequência, a condutividade hidráulica são máximas. Quando o solo fica não saturado, o fluido flui principalmente pelos menores poros, onde este se acumula e a tortuosidade é maior (SILVEIRA, 2004), resultando em menores valores de condutividade hidráulica. Vale ressaltar ainda que os poros do solo não são uniformes, ao contrário, são irregulares e tortuosos, ou seja, o fluxo de fluidos pelos poros do solo é dificultado pela existência de vários obstáculos.

Outro fator muito importante que deve ser considerado é a molhabilidade, já que a posição relativa dos fluidos no interior do solo é controlada pelas características de molhabilidade do sistema. No caso de fluxo simultâneo de três fases, existe uma hierarquia de molhabilidade. Por exemplo, num sistema água-óleo-ar, a água será a fase molhante em relação ao óleo e o óleo será a fase molhante em relação ao ar (DELGADO, 2001).

O entendimento do movimento dos fluidos contaminantes imiscíveis em meios porosos não-saturados é de fundamental importância na estimativa do tempo necessário para que o lençol freático seja atingido, no caso da ocorrência de derrames de combustível.

O escoamento da gasolina na zona vadosa envolve então um fluxo multifásico de água, ar e gasolina. O fluxo de ar na zona vadosa tem a sua importância amparada na volatilidade dos compostos que formam a gasolina. Para uma melhor compreensão dos processos envolvidos neste fluxo é necessária a determinação das propriedades hidráulicas do solo em relação aos fluidos envolvidos, e isto pode ser feito através do uso de um equipamento desenvolvido para o estudo da migração desses fluidos através do solo. Portanto, o conhecimento das características hidro-geológicas e físico-químicas dos solos e a disponibilidade de dados quanto a interação e transporte da gasolina nestes solos, favorecem a realização de diagnósticos na ocorrência de contaminação e podem posteriormente subsidiar a tomada de ações remediadoras.

Este trabalho, que se insere dentro de um programa maior de pesquisa do Laboratório de Geotecnia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA, tem como objetivo principal o desenvolvimento de um equipamento para a determinação experimental da curva característica de sucção e a determinação experimental da permeabilidade efetiva a fluidos imiscíveis em sistemas multifásicos (três fases), especificamente gasolina, água e ar, em solos típicos da região metropolitana de Salvador (areia de duna, solo sedimentar da formação Barreira, solo residual de granulito e solo residual de folhelho), enfocando-se as diversas propriedades envolvidas no fluxo multifásico de fluidos na zona vadosa. São apresentados neste trabalho resultados de testes de pré-operação e aferição obtidos com o solo sedimentar da formação Barreiras, utilizando o equipamento desenvolvido.

As etapas do trabalho experimental para se atingir o objetivo proposto nesta pesquisa consistiram em:

- a) Caracterização geotécnica do solo sedimentar da formação Barreiras utilizado nos experimentos, objetivando a obtenção de parâmetros básicos que influenciam o fluxo dos contaminantes no meio poroso não saturado;
- b) Determinação da permeabilidade saturada do solo à água e à gasolina;

- c) Determinação experimental da curva característica de sucção em relação à fase água, utilizando equipamento existente no Laboratório de Geotecnia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA, desenvolvido por Machado e Dourado (2001);
- d) Realização de testes de pré-operação e aferição com o solo sedimentar da formação Barreiras, utilizando o equipamento desenvolvido;
- e) Comparação da curva característica de sucção obtida para a fase água, fazendo uso do equipamento desenvolvido neste trabalho, com a curva característica de sucção obtida a partir do equipamento concebido por Machado e Dourado (2001).

O presente trabalho é constituído de 5 (cinco) capítulos, incluindo esta introdução (capítulo 1) e 2 apêndices.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão dos conceitos envolvidos no fluxo unifásico e no fluxo multifásico, assim como uma discussão dos métodos de ensaio para a determinação da permeabilidade.

O capítulo 3 contém uma descrição detalhada do equipamento desenvolvido, dos procedimentos adotados para a realização dos ensaios, das dificuldades encontradas e das soluções adotadas.

O capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios e dos testes realizados, assim como a discussão da interpretação dos mesmos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões alcançadas, bem como algumas recomendações para trabalhos posteriores.

No apêndice I é apresentado o projeto detalhado do permeâmetro desenvolvido para determinação experimental da curva característica de sucção e determinação experimental da permeabilidade efetiva, e, no apêndice II, encontra-se o projeto detalhado da seringa desenvolvida para o sistema de aplicação de vazão constante do equipamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Conforme dito na introdução, ao ocorrer vazamentos, o contaminante passará a se mover pelo solo, normalmente através da sua zona vadosa ou região não saturada, na direção do lençol freático. O entendimento dos processos envolvidos no transporte de contaminantes através da zona não saturada do solo é de fundamental importância na estimativa do tempo necessário para que o lençol freático seja atingido. Para um estudo refinado do fluxo multifásico (três fases) na zona vadosa, especificamente água, ar e gasolina, é necessário a determinação das propriedades hidráulicas do solo em relação aos fluidos percolantes.

2.1 Fluxo Unifásico

A equação normalmente utilizada na representação do fenômeno de fluxo de água em solos é a Lei de Darcy (equação 2.1), que foi proposta em 1856 pelo engenheiro francês Henry Darcy.

$$v = -k \times i_h \quad (2.1)$$

Onde:

v é a velocidade de descarga da água, de dimensão $[LT^{-1}]$;

k é o coeficiente de permeabilidade do solo, de dimensão $[LT^{-1}]$;

i_h é o gradiente de carga hidráulica do solo, adimensional, sendo dado pela equação 2.2, a seguir, para o caso de fluxo unidirecional.

$$i_h = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (2.2)$$

Sendo L o comprimento da amostra de solo, e h_1 e h_2 os potenciais hidráulicos totais nos pontos 1 e 2, conforme mostra a figura a seguir:

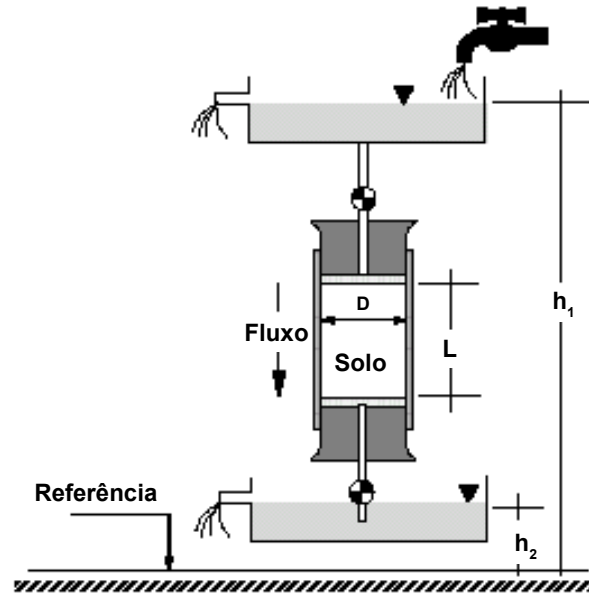


Figura 2.1: Esquema do experimento realizado por Darcy, (DELGADO, 2001).

Darcy realizou uma série de experimentos com água, mudando apenas o diâmetro das partículas de solo (d), e encontrou valores de velocidade diferentes, evidenciando que a textura do solo influencia no valor da velocidade de descarga. Repetindo o experimento de Darcy, ao fazer percolar fluidos diferentes (água e óleo, por exemplo) através de amostras iguais do mesmo material, mantendo constante o gradiente hidráulico, observa-se que os valores de velocidade encontrados, ao variar o fluido, são também diferentes. Isto significa que propriedades do fluido, tais como viscosidade dinâmica (μ) e densidade (ρ), influenciam no valor da velocidade. A partir de então, diversos autores têm proposto equações que representam novas versões da Lei de Darcy (HUBBERT, 1940 apud DELGADO, 2001). A equação 2.3, por exemplo, apresenta a velocidade de fluxo em função tanto das propriedades do fluido, quanto das propriedades do solo.

$$v = \frac{-C \times d^2 \times \rho \times g}{\mu} \times i_h \quad (2.3)$$

Sendo g a constante de aceleração da gravidade, com dimensão $[LT^{-2}]$; C uma constante adimensional de proporcionalidade que leva em consideração outras propriedades do solo, tais quais: esfericidade dos grãos, distribuição dos tamanhos dos grãos, natureza do arranjo, etc; d o diâmetro equivalente dos grãos, com dimensão $[L]$; ρ a densidade do fluido, de dimensão $[ML^{-3}]$ e μ a viscosidade dinâmica do fluido, com dimensão $[ML^{-1}T^{-1}]$.

Comparando a última expressão encontrada com a Lei de Darcy e adotando-se a equação 2.4, chega-se a equação 2.5, a qual ilustra a dependência da permeabilidade em relação às propriedades dos fluidos (viscosidade e densidade).

$$K = C \times d^2 \quad (2.4)$$

$$k = \frac{K \times \rho \times g}{\mu} \quad (2.5)$$

K é conhecido como coeficiente de permeabilidade absoluta ou intrínseca, tendo como dimensão $[L^2]$, propriedade do meio poroso em permitir o escoamento de fluidos através de seus poros e sendo supostamente função apenas do meio poroso, independente do fluido que é utilizado para sua determinação. Segundo Oliveira (2001), para meios granulares a permeabilidade intrínseca pode ser considerada uma propriedade exclusiva do meio poroso, independentemente das características do fluido, podendo ser obtida através da equação 2.5. No entanto, nas argilas não se verifica a independência da permeabilidade intrínseca com o líquido permeante, devido ao excesso de cargas elétricas na superfície do mineral e a sua grande superfície específica. Este fato foi verificado experimentalmente por alguns pesquisadores (BROWN AND THOMAS, 1984; FERNANDEZ AND QUIGLEY, 1985). O coeficiente de permeabilidade do solo, portanto, depende tanto das propriedades do solo, quanto do fluido.

Existem outras expressões teóricas na literatura que relacionam a condutividade hidráulica com as características do meio poroso, como por exemplo a expressão desenvolvida por Taylor (1948), equação 2.6 e a de Kozeny-Carman (YONG *et al*, 1992), equação 2.7:

$$k = d^2 \times \frac{\rho \times g}{\mu} \times \frac{e^3}{1+e} \times C \quad (2.6)$$

$$k = \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} \frac{1}{k_o \cdot S^2} \quad (2.7)$$

Sendo d o diâmetro equivalente das partículas do solo, C um fator de forma, adimensional, e e o índice de vazios da amostra de solo, γ_w é o peso específico do fluido [$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-2}$], μ é a viscosidade do fluido [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$], k_o é um fator que depende da forma dos poros e da tortuosidade da trajetória da linha de fluxo, S é a área superficial pelo volume das partículas de solo [L^{-1}].

Classicamente a constante dielétrica dos fluidos (fator adimensional, representada pelo símbolo ϵ) não está incorporada na formulação dos parâmetros de fluxo de líquidos nos meios porosos. Entretanto, quanto maior for a constante dielétrica dos fluidos permeando sedimentos argilosos, maior será a propensão das argilas de adsorver o líquido (OLIVEIRA, 2001). Tendo em vista a influência da constante dielétrica e sobre os valores de condutividade hidráulica em meio argiloso, Oliveira (2001) modelou, matematicamente, a função condutividade hidráulica saturada de sedimentos argilosos quando percolados por uma única fase, chegando à seguinte expressão:

$$k = \rho \frac{g}{\mu} \left(\frac{1}{5}\right) \left[\frac{n^3}{(n-1)^2}\right] \frac{B}{\epsilon^N} \quad (2.8)$$

Onde n é a porosidade do meio; o fator B , de dimensão [L^2], parece refletir os efeitos das forças de superfície da argila e outros efeitos de dupla camada, com a possível redução ou aumento efetivo do diâmetro dos poros, representando a razão entre a permeabilidade do meio percolado por um líquido

orgânico, e a permeabilidade do meio percolado por água; e o parâmetro N , expoente da constante dielétrica, que está correlacionado com o percentual de argila do solo.

A equação de Darcy deve ser rearranjada para o caso de fluidos compressíveis.

No caso particular de fluxo unifásico horizontal de um fluido incompressível, a velocidade de descarga é dependente apenas do gradiente de potencial total, sendo este expresso em termos de pressão, sendo que a lei de Darcy pode ser apresentada conforme a equação 2.9:

Da equação 2.5 tem-se que: $k = K \frac{\gamma}{\mu}$, sendo γ o peso específico do fluido incompressível $[\text{ML}^{-2}\text{T}^{-2}]$. Por outro lado, pela lei de Darcy chega-se a:

$$v = -\left(K \frac{\gamma}{\mu}\right) \frac{dh}{dx} \quad . \text{ Como } \gamma \times dh = dP \quad , \text{ então:}$$

$$v_x = \frac{-K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.9)$$

Onde: dP $[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$ é a diferença de energia por unidade de volume, resultando em diferença de pressão entre dois pontos com afastamento igual a dx $[\text{L}]$.

No caso de fluxo de gases através do solo, a lei de Darcy será válida se for modificada para levar em consideração a compressibilidade do gás. Isto é possível se o fluxo de massa ao longo do meio poroso for constante, o que ocorre em condições isotérmicas, isto é, a temperatura constante (DELGADO, 2001). Com referência à condição isotérmica, tem-se que $\rho \cdot v = \text{constante}$ e utilizando a lei dos

gases ideais $\left(P = \frac{\rho}{m} \cdot R \cdot T\right)$, onde ρ é a densidade, m é a massa molar em gramas por mol, R é a constante universal dos gases e T a constante de temperatura,

chega-se à equação 2.10, multiplicando-se a equação 2.9 por ρ . Considerou-se neste caso que $v_x = Q/A$.

$$\rho \frac{Q}{A} = \frac{-K}{\mu} \rho \frac{dP}{dx} \quad (2.10)$$

Como o fluxo de massa é assumido como estacionário, $\rho Q = \rho_b Q_b = \text{constante}$, onde Q_b é a vazão medida na pressão P_b , que é a pressão na qual o gás está submetido no dispositivo de medição de vazão. Por

outro lado, pela lei de Boyle tem-se que $\rho = \rho_b \frac{P}{P_b}$ e fazendo-se a substituição na equação 2.10, chega-se a:

$$\frac{Q_b}{A} P_b dx = \frac{-K}{\mu} P dP \quad (2.11)$$

Considerando uma amostra de solo de comprimento L , com pressões P_1 e P_2 atuando em suas extremidades, a equação 2.11 pode ser integrada:

$$Q_b = \frac{KA}{2\mu L} \frac{(P_1^2 - P_2^2)}{P_b}, \text{ sendo } P_1 > P_2 \quad (2.12)$$

Onde:

Q_b = Vazão medida na pressão P_b , de dimensão $[L^3T^{-1}]$;

K = Coeficiente de permeabilidade absoluta do meio, de dimensão $[L^2]$;

P_b = Pressão na qual o gás está submetido no ponto de medição, de dimensão $[ML^{-1}T^{-2}]$;

L = Comprimento do corpo de prova, de dimensão $[L]$;

P_1 = Pressão na entrada do corpo de prova, de dimensão $[ML^{-1}T^{-2}]$;

P_2 = Pressão na saída do corpo de prova, de dimensão $[ML^{-1}T^{-2}]$;

μ = Viscosidade do gás, de dimensão $[ML^{-1}T^{-1}]$.

Definindo-se $\bar{P} = \frac{(P_1 + P_2)}{2}$ como pressão média e \bar{Q} como a vazão na pressão média, então:

$\bar{P}\bar{Q} = P_b Q_b$, substituindo na equação 2.12, chega-se a:

$$\bar{Q} = \frac{KA}{\mu L} (P_1 - P_2) \quad (2.13)$$

Como foi demonstrado acima, a vazão dos gases ideais pode ser calculada a partir das equações 2.12 e 2.13, sendo que para esta última, a vazão deve ser definida na pressão algébrica média.

2.2 Fluxo Multifásico

São diversos os fenômenos envolvidos no transporte simultâneo de dois ou mais fluidos imiscíveis através do solo, sendo difícil idealizar a maneira como essas substâncias se mobilizam e o que acontece no decorrer desta mobilização. Portanto é interessante abordar alguns conceitos que irão contribuir para uma melhor compreensão desses fenômenos.

2.2.1 Conceituação Básica

Tensão Interfacial

Em se tratando de fluidos imiscíveis, deve-se considerar o efeito das forças que atuam na interface de contato entre os fluidos. Essas forças são na verdade forças de atração de curto alcance entre moléculas, sendo a distância limite de atuação dessas forças denominada raio de esfera da ação molecular. Deste modo, conforme se pode observar na figura 2.2, uma molécula cuja esfera de ação não esteja totalmente no interior do fluido, não se equilibra e acaba sendo atraída para o interior do fluido pela resultante dessas forças não equilibradas (LIBARDI, 1993). As forças que agem abaixo da superfície são iguais em todas as direções, porque as moléculas do fluido são igualmente atraídas por outras moléculas

circunvizinhas, ao passo que na superfície a atração das moléculas de ar pelas do fluido é muito menor (PRESA, 1998). Este não equilíbrio de forças entre as moléculas gera uma membrana contrátil virtual na superfície ativa do líquido (em se tratando de líquido e gás), pois pela ação dessas forças a superfície do líquido se contrai e adquire uma energia extra que se opõe a qualquer tentativa de distendê-la.

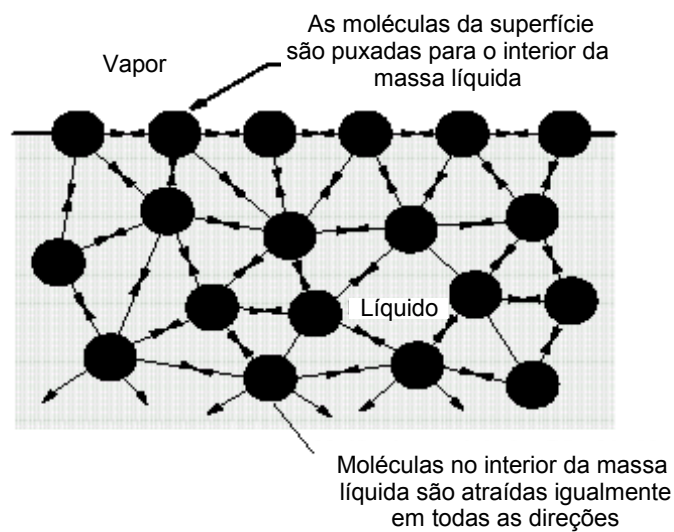


Figura 2.2: Representação das forças intermoleculares, (DELGADO, 2001).

No caso do contato de um fluido com o seu vapor saturante, a tensão interfacial é denominada de tensão superficial. A tensão superficial é uma característica do fluido a uma determinada temperatura, enquanto que a tensão interfacial depende também da substância com a qual o fluido entra em contato (DELGADO, 2001).

A tensão interfacial está diretamente relacionada com o processo capilar através da interface entre fluidos imiscíveis, e é um fator que controla a molhabilidade dos mesmos com as diversas superfícies.

Molhabilidade

A molhabilidade dos fluidos pode ser definida como sendo a tendência de um fluido deslocar um outro numa superfície sólida. A combinação de todas as forças que estão atuando na interface entre duas fases líquidas imiscíveis, na interface entre um gás e um líquido ou na interface entre o líquido e a superfície sólida é que determina qual fluido molhará a superfície sólida de forma preferencial.

Saturação

Os espaços vazios em um solo podem estar completamente ou parcialmente preenchidos por um ou mais líquidos. Quando os vazios do solo estão completamente preenchidos por um determinado líquido o solo é chamado de saturado. Por outro lado, quando os vazios do solo estão parcialmente preenchidos, o mesmo é chamado de não-saturado. Segundo Delgado (2001), o grau de saturação de um líquido no solo é a fração do volume de poros total ocupado por ele mesmo. Em se tratando de mais de dois fluidos no interior do solo, usa-se o termo razão de saturação, ou seja, cada fluido ocupará uma parcela do volume total de poros, sendo o somatório das parcelas ocupadas por cada fluido igual à unidade.

A razão de saturação de um solo por um determinado fluido é uma propriedade de extrema importância, pois outros parâmetros, tais como a permeabilidade e a pressão capilar ou sucção capilar, são normalmente apresentados em função da mesma ou em função de uma grandeza que retrate o conteúdo daquele fluido no solo.

Pressão Capilar

Quando dois fluidos imiscíveis entram em contato, ao se medir a pressão em ambos os lados da superfície de contato ou interfacial, observa-se que as mesmas não são iguais, originando uma superfície curva na interface de contato entre os fluidos e o sólido, chamada de menisco. Esta diferença de pressão entre o lado côncavo e o lado convexo é denominada de pressão capilar, sendo dada por:

$$P_c = P_{nw} - P_w \quad (2.14)$$

Onde P_c é a pressão capilar, P_{nw} a pressão na fase não molhante e P_w a pressão na fase molhante, todas as três com dimensão $[ML^{-1}T^{-2}]$. Quando a fase molhante desloca a fase não molhante, ocorre um processo de embebição ou umedecimento. Em situações em que o oposto ocorre, o processo chama-se de drenagem ou secagem.

A pressão capilar é normalmente expressada como função do grau de saturação. Conforme se pode observar na figura 2.3, esta relação de um modo geral apresenta histerese, que corresponde à diferença de trajetórias mostradas pelas curvas características obtidas pelo procedimento de secagem e umedecimento, respectivamente, para um mesmo solo (SOTO, 1999). O fenômeno de histerese pode ser atribuído à diversas causas, dentre elas, a geometria não uniforme dos poros individuais, ar aprisionado nos vazios do solo, mudanças diferenciais na estrutura do solo em decorrência de retração ou inchamento, entre outros (PRESA, 1982).

Segundo Mercer & Cohen (1990) *apud* Delgado (2001), durante o processo de drenagem os poros maiores drenam mais rapidamente, enquanto os poros menores oferecem maior resistência. Esta retenção capilar é uma das razões que pode explicar o porquê, para o mesmo grau de saturação, a pressão capilar é maior no processo de drenagem.

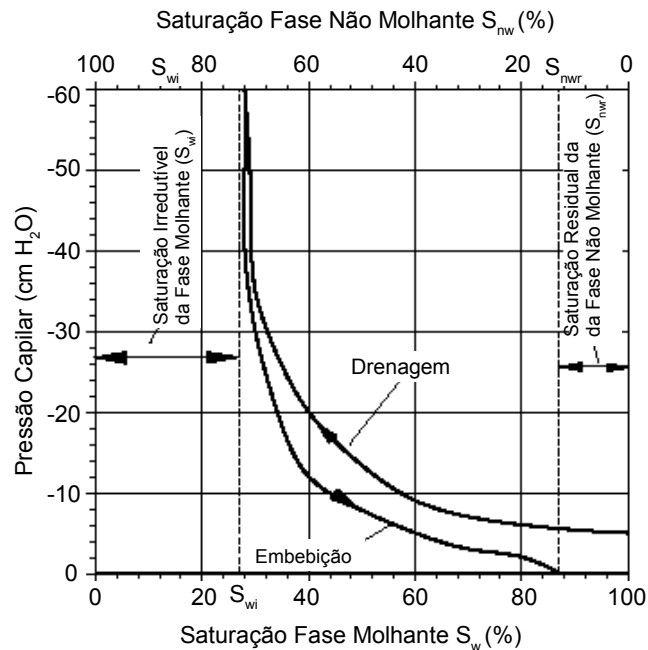


Figura 2.3: Pressão capilar em função do grau de saturação, (FETTER, 1992).

Conforme é apresentado na figura 2.3, existe um valor mínimo do grau de saturação da fase molhante no processo de drenagem e um valor mínimo do grau de saturação da fase não molhante no processo de embebição. Estes valores mínimos são denominados de saturação residual (S_{rw}) ou irreduzível (S_{wi}) da fase molhante, e saturação residual (S_{rnw}) da fase não molhante, respectivamente. A saturação residual de uma determinada fase pode ser entendida como sendo o menor valor possível assumido pela saturação de fase. Este valor mínimo de saturação ocorre devido a ação das forças capilares e de adsorção, e sua magnitude é dependente de diversos fatores, entre os quais pode-se citar distribuição granulométrica do meio poroso, mineralogia, molhabilidade, relações de viscosidade e densidade entre as fases, entre outros (DELGADO, 2001). Outros autores, embora reconheçam que a partir de certo ponto é muito difícil de retirar água do solo, levam em seus modelos a possibilidade de total drenagem do mesmo (FREDLUND *et al*, 1995).

No estado de saturação residual, a fase não molhante torna-se descontínua, sendo imobilizada na forma de bolhas oclusas ou ar aderido às partículas sólidas. O estado residual dos fluidos molhantes é conceitualmente diferente dos não molhantes, devido a que neste estado o fluido molhante é assumido como contínuo no interior do meio poroso (MERCER & COHEN, 1990 *apud* DELGADO 2001).

Ainda segundo Mercer & Cohen (1990) *apud* Delgado (2001), na área ambiental, a presença de contaminantes em estado residual no interior do solo é um problema sério e de grande interesse, devido a que os mesmos podem constituir uma fonte contínua e duradoura de contaminação.

Quando ocorre fluxo não saturado (água e ar) no solo, usa-se o termo sucção matricial, que nada mais é do que a diferença de pressão entre o ar e a água, oriunda dos fenômenos de capilaridade e de adsorção.

A Lei de Darcy, concebida para fluxo em um meio saturado, pode ser empregada para fluxo não saturado utilizando-se a curva de condutividade hidráulica não saturada, sendo o coeficiente de permeabilidade usualmente expresso em função da umidade volumétrica (SILVEIRA, 2004). Para isto, é necessário a obtenção da curva característica de sucção, que é definida como a relação entre o grau de saturação do solo e a sua sucção matricial, sendo que a sua representação gráfica é geralmente realizada colocando-se a sucção em uma escala logarítmica (gráfico semi-log). A sucção matricial pode ser definida como sendo a diferença de tensões de ar e água existentes no solo, independente dos valores absolutos destas (MACHADO, 1998). Esta hipótese fundamenta a técnica de translação de eixos de Hilf, utilizada neste trabalho.

2.2.2 Considerações Gerais

Segundo Delgado (2001), dentro da sistematização de fluidos potencialmente perigosos para a integridade da água subterrânea, os tipos de fluxos de migração têm sido separados em dois grandes grupos principais: fluxo de fluidos miscíveis com a água, e fluxo de fluidos imiscíveis com a água (NAPL, Non Aqueous

Phase Liquid). Esta subdivisão é indispensável, já que o fluxo simultâneo de dois ou mais fluidos imiscíveis produz um padrão de migração totalmente diferente daquele produzido pelo fluxo simultâneo de fluidos miscíveis, ou de solutos dissolvidos.

Em se falando de regime de escoamento dos fluidos, o fluxo pode ser permanente ou transiente. No primeiro caso, o grau de saturação do solo e o potencial energético em um ponto em relação aos fluidos permanece constante, e no segundo, o grau de saturação e o potencial energético do fluido no interior do sistema mudam com o tempo.

Pode ainda ocorrer fluxo concorrente, em que ambas as fases fluem para o mesmo sentido no interior do solo, e fluxo contracorrente, onde as fases fluem para os sentidos opostos.

Permeabilidade Relativa e Efetiva

Conforme foi definido, a permeabilidade absoluta K mede a habilidade do meio em permitir o escoamento de fluidos através de seus poros. Portanto a permeabilidade absoluta é uma característica supostamente intrínseca do meio, independente do fluido que o atravessa e de suas propriedades. Se os vazios de um meio poroso estiverem sendo ocupados por mais de um fluido, a presença de uma das fases interfere no escoamento das outras fases presentes e vice-versa. Assim, o escoamento de cada fase será influenciado tanto pelo meio (permeabilidade absoluta) quanto pela presença das outras fases (permeabilidade relativa) (MENDONÇA, 2003). A permeabilidade relativa (K_r) é uma grandeza adimensional, podendo ser definida como sendo a razão entre a permeabilidade efetiva K_i , com dimensão [L^2], correspondente a um dado grau de saturação e uma permeabilidade base, por exemplo a permeabilidade absoluta no estado saturado com relação ao fluido de interesse.

$$K_r = \frac{K_{i(S < 100\%)}}{K} \quad (2.15)$$

A permeabilidade efetiva K_i [L²] é uma medida da capacidade que o solo possui de conduzir um fluido que ocupa apenas parte do espaço poroso, estando o resto ocupado por outros fluidos imiscíveis, e difere da permeabilidade absoluta pelo fato desta última depender unicamente das propriedades do solo, e não das propriedades da fase fluida contida no interior dos vazios do solo. Esta definição implica que o meio poderá ter uma condutividade diferente, considerando-se a mesma razão de saturação, para cada fluido presente no volume de vazios restante (DELGADO, 2001).

A equação 2.15 pode ser particularizada para um fluido qualquer, fazendo-se referência ao seu coeficiente de permeabilidade. Desta forma tem-se:

$$k_r = K_r = \frac{k_{i(S < 100\%)}}{k_{sat i}} \quad (2.16)$$

O índice i das equações 2.15 e 2.16 é utilizado para se fazer referência à fase de interesse.

De um modo geral, a determinação da permeabilidade efetiva é feita em laboratório e é normalmente apresentada em função da sucção matricial, para o caso de solos não saturados, sendo chamada de condutividade hidráulica (figura 2.4), ou em função do grau de saturação. Para o caso de fluxo simultâneo de dois ou mais fluidos, os dados de permeabilidade efetiva são apresentados na forma de permeabilidade relativa, conforme é mostrado na figura 2.5.

Com a introdução do conceito de permeabilidade relativa (K_{ri}), a extensão da Lei de Darcy para o fluxo multifásico fica:

$$Q_i = \frac{K_{ri} \times K \times \rho_i \times g \times A}{\mu_i} \times \frac{\Delta h_i}{L} \quad , \quad (i=1,2, \dots, n) \quad (2.17)$$

Onde:

Q_i = Vazão do fluido i , de dimensão [L³T⁻¹];

Δh_i = Diferença de energia total no fluido considerado, de dimensão [L];

K = Coeficiente de permeabilidade absoluta do meio, de dimensão [L²];

g = Constante de aceleração da gravidade, com dimensão [LT⁻²];

μ_i = Viscosidade do fluido i , com dimensão [ML⁻¹T⁻¹];

A = Área da seção transversal do corpo de prova, com dimensão [L²];

L = Comprimento do corpo de prova, com dimensão [L];

ρ_i = Densidade do fluido i , com dimensão [ML⁻³].

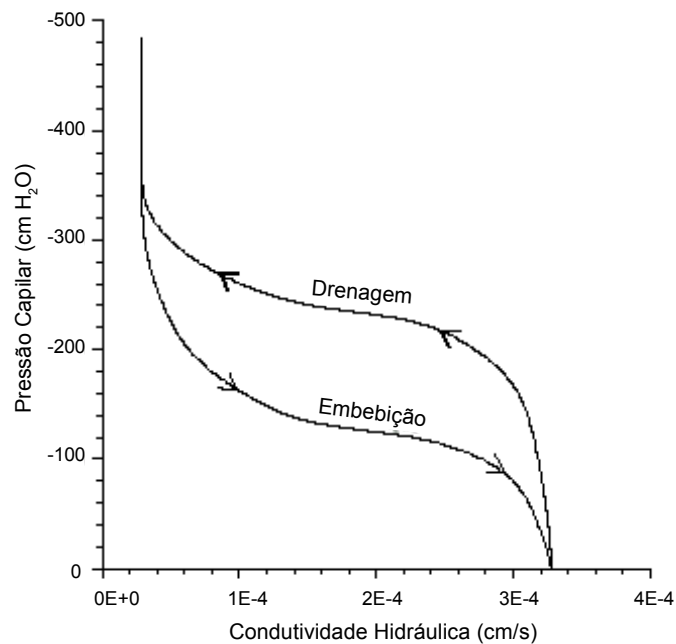


Figura 2.4: Relação da condutividade hidráulica com a sucção matricial em processos de drenagem e embebição, (FETTER, 1992).

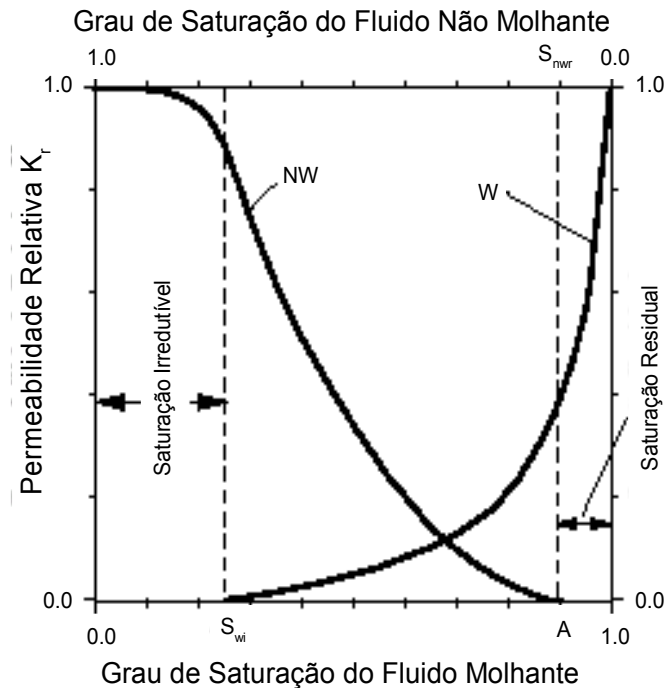


Figura 2.5: Curvas típicas de permeabilidade relativa, (FETTER, 1992).

2.3 Fatores que Influenciam a Permeabilidade ou Condutividade Hidráulica

O comportamento do solo é complexo e variável e uma das propriedades do solo que apresenta maior variação é a permeabilidade ou condutividade hidráulica. Conforme foi relatado, nos últimos anos tem havido um maior interesse no estudo não só de fluxo de água na zona não saturada, mas de outros tipos de fluidos que possam comprometer a integridade do solo e do lençol freático, caso ocorram derramamentos na superfície.

De acordo com a equação 2.3 e com o que foi relatado no texto, o coeficiente de permeabilidade de um solo não é constante, podendo variar amplamente a depender de diversos fatores, tais como propriedades do fluido, tamanho das partículas, esfericidade dos grãos de solo, natureza do arranjo das partículas, grau de saturação, superfície molhada, etc.

Por exemplo, a equação 2.3 indica que o coeficiente de permeabilidade varia diretamente com o quadrado do diâmetro das partículas, pelo fato de que quanto menor é o diâmetro das partículas que compõem o solo, menor tende a ser o diâmetro dos micro vazios que formam a rede de canais do solo, diminuindo sua condutividade hidráulica.

O grau de saturação em que o solo se encontra representa uma importante influência na condutividade. Conforme se pôde observar na figura 2.5, quanto maior o grau de saturação do solo em relação a um determinado fluido, maior será sua condutividade hidráulica ou sua mobilidade. Em condições saturadas todos os poros estão preenchidos com o fluido sendo, portanto, condutores. Então a continuidade e, por conseqüência, a condutividade hidráulica são máximas. Quando o solo fica não saturado o fluido flui principalmente pelos menores poros, onde este se acumula e a tortuosidade é maior (SILVEIRA, 2004).

Outro fator que deve ser considerado é a molhabilidade, já que a posição relativa dos fluidos no interior do solo é controlada pelas características de molhabilidade do sistema. No caso de fluxo simultâneo de três fases, existe uma hierarquia de molhabilidade. Por exemplo, num sistema água-óleo-ar, a água será a fase molhante em relação ao óleo e o óleo será a fase molhante em relação ao ar (DELGADO, 2001).

A condutividade hidráulica do solo também varia com a temperatura, devido ao fato de que, tanto a densidade quanto a viscosidade de um fluido variam com a mesma.

Tabela 2.1: Valores típicos de densidade e viscosidade de algumas substâncias (podem ser menores com o aumento da temperatura), modificado de Duarte (2003).

SUBSTÂNCIA	DENSIDADE (g/ml) a 15°	VISCOSIDADE (10⁻³ Pa.s)
Água	0,998	1,140
Gasolina	0,729	0,620
Diesel	0,827	2,700

Enfim, para um completo entendimento do fluxo e interação de diferentes substâncias com o solo, deve-se conhecer as propriedades de permeabilidade em relação a todas essas fases presentes e os fatores que a influenciam.

2.4 Determinação da Permeabilidade em Laboratório

Muitos ensaios para determinação da permeabilidade têm sido desenvolvidos com o objetivo de obter uma maior representatividade nos resultados, redução dos custos dos ensaios e o aperfeiçoamento dos aparelhos de medição, tornando-os mais práticos e de fácil utilização.

2.4.1 Através do Ensaio de Adensamento

Uma das formas de se estimar o coeficiente de permeabilidade é através do ensaio de adensamento e fazendo-se uso da teoria da consolidação unidirecional de Terzaghi, conforme é apresentado na equação 2.18.

$$k = \frac{a_v \cdot C_v \cdot \gamma_w}{1 + e_o} \quad (2.18)$$

Nesta equação, a_v é o coeficiente de compressibilidade do solo [$LM^{-1}T^2$], C_v é o seu coeficiente de adensamento [L^2T^{-1}], γ_w é o peso específico da água [$ML^{-2}T^{-2}$], e e_o é o índice de vazios inicial da amostra.

2.4.2 Ensaio Através de Permeômetros

Sendo permeômetro o nome dado à célula que contém o corpo de prova de solo para a realização dos ensaios, estes podem ser divididos em dois grupos: ensaios com permeômetro de parede rígida e ensaios com permeômetro de parede flexível.

Os equipamentos com permeômetro de parede rígida são mais simples de se construir, de fácil operação e de baixo custo, porém não é possível monitorar

as tensões que estão agindo sobre a amostra, além de existir possibilidade de haver fluxo no contato entre a parede do permeâmetro e a amostra de solo. Com todas essas limitações, não é possível simular as condições apresentadas em campo.

Já com o permeâmetro de parede flexível se pode medir as tensões que estão agindo no corpo de prova, o grau de saturação pode ser checado, além de ser possível monitorar as suas variações de volume. Apesar de ser um equipamento mais caro, é possível simular melhor as condições esperadas em campo.

É admitido que o fluxo de água nesses ensaios é governado pela Lei de Darcy, então a permeabilidade é determinada controlando-se a vazão e o gradiente hidráulico, sendo a seção transversal e o comprimento do corpo de prova conhecidos ou monitorados. Alguns dos ensaios mais usados para a determinação da condutividade hidráulica dos solos serão descritos a seguir.

Ensaio de Carga Constante e Variável

No ensaio de carga constante, a amostra é submetida a uma diferença de energia constante entre a entrada e a saída do corpo de prova, sendo a vazão gerada monitorada ao longo do tempo (figura 2.6). Conforme foi dito, é assumido que o fluxo é governado pela Lei de Darcy, sob condições de regime permanente, ou seja, a vazão medida na entrada do corpo de prova é igual à vazão medida na saída do corpo de prova. O coeficiente de permeabilidade é então calculada através da seguinte expressão:

$$k = \frac{V \times L}{A \times h \times t} \quad (2.19)$$

Onde:

V : é o volume de água percolado, com dimensão $[L^3]$;

L : é a altura do corpo de prova, com dimensão $[L]$;

A : é a área da seção transversal do corpo de prova, com dimensão $[L^2]$;

h : é a carga hidráulica, com dimensão [L];

t : é o tempo, sendo dado em segundos, [T].

Nos ensaios com metodologia de carga variável é utilizada a diferença entre as cargas em um determinado intervalo de tempo, ou seja, o nível do fluido no reservatório ligado às extremidades do corpo de prova varia ao longo do tempo de execução do ensaio e com isto a diferença de energia entre a entrada e saída da amostra. A equação para o cálculo do coeficiente de permeabilidade para o caso do ensaio de carga variável é a seguinte:

$$k = \frac{a \times L}{A \times t} \times \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (2.20)$$

Onde:

a : é a área da seção transversal da bureta, com dimensão [L²];

L : é a altura do corpo de prova, com dimensão [L];

A : é a área da seção transversal do corpo de prova, com dimensão [L²];

h_1 e h_2 : os potenciais hidráulicos totais nos pontos 1 e 2, com dimensão [L];

t : é o tempo, sendo dado em segundos, [T].

O ensaio de carga constante é mais usado em solos arenosos, enquanto que o ensaio de carga variável é mais usado em solos argilosos. Isto ocorre devido a dificuldade de monitorar o fluxo nos solos finos com o ensaio de carga constante, além do tempo de ensaio ser muito demorado. O ensaio de carga variável em solos arenosos pode provocar resultados não representativos das condições de campo, com dificuldades de se fazer leituras de nível na bureta, que decresce muito rapidamente.

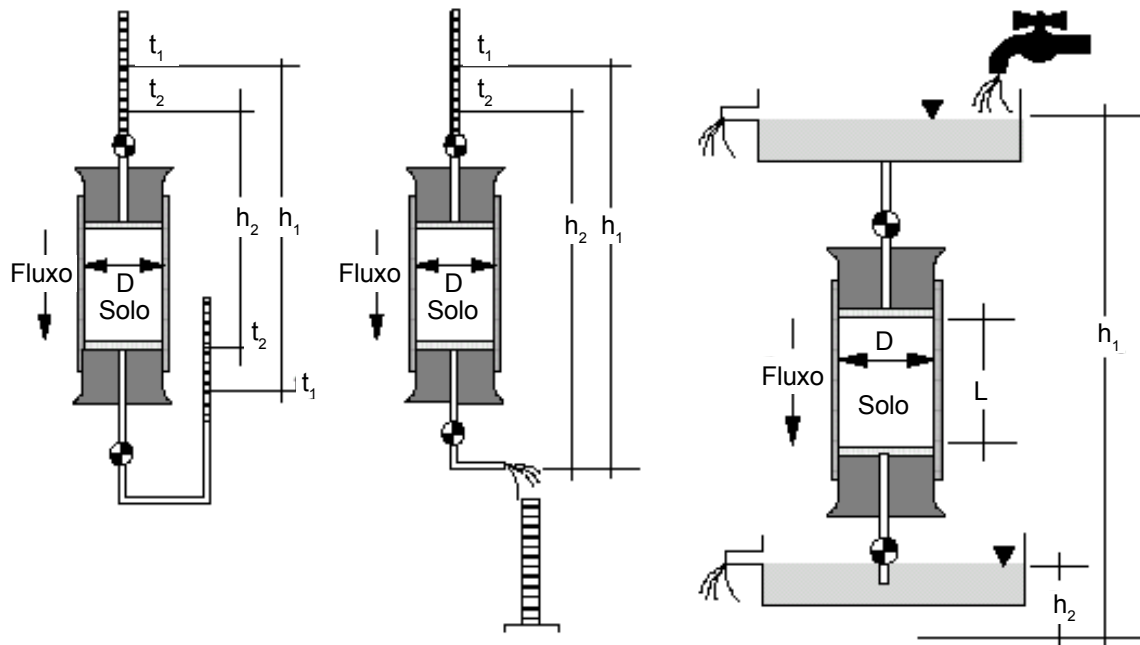


Figura 2.6: Esquema do método de carga variável (as duas primeiras figuras) e de carga constante (última figura), (DELGADO, 2001).

2.4.3 Ensaio de Vazão Constante

Esta metodologia pode ser usada com permeâmetros de parede rígida ou flexível.

O fluido é injetado ou extraído do corpo de prova numa vazão constante, fazendo uso de uma bomba de fluxo, e o gradiente gerado é monitorado através de um transdutor de pressão diferencial, ou de dois transdutores de pressão absoluta. Esta metodologia assume que o fluxo é governado pela lei de Darcy. Inicialmente é observado um fluxo transiente antes de se atingir o regime permanente, isto é, quando a diferença de pressão entre as extremidades do corpo de prova se torna constante (DELGADO, 2001).

Este método tem sido usado para a determinação da permeabilidade efetiva. Num ensaio típico, dois ou três fluidos são injetados de forma simultânea, em velocidades ou pressões constantes por períodos de tempo consideráveis, até se atingir o equilíbrio, isto é, até que se estabeleça uma condição regime

permanente (cujo critério é determinado pela condição de que a vazão de entrada é igual à vazão de saída e/ou que o gradiente gerado seja constante ao longo do tempo). Os graus de saturação, vazões e gradientes de pressão são medidos, sendo utilizada a lei de Darcy para a obtenção dos coeficientes de permeabilidade efetiva de cada fluido. De forma convencional, são obtidas relações de K_r vs. S_r numa forma escalonada, variando a razão das velocidades de injeção dos fluidos, e repetindo as medições quando o equilíbrio é atingido. As variações do grau de saturação são controladas de forma a serem monotônicas (processos de drenagem ou de embebição somente de forma a evitar a influência da história de saturação, e por conseguinte os efeitos de histerese) (DELGADO, 2001).

A principal vantagem desta metodologia surge da facilidade de se controlar pequenas vazões de forma precisa, ao invés de medi-las com as conseqüentes dificuldades experimentais, sendo possível a determinação de coeficientes de permeabilidade em gradientes hidráulicos suficientemente pequenos, garantindo desta forma mínimas deformações volumétricas do corpo de prova (DELGADO, 2001). Porém existe a desvantagem de ser um equipamento caro e não há uma metodologia estabelecida para a determinação da taxa de velocidade a ser utilizada.

Um esquema desta metodologia para a determinação da permeabilidade saturada e não saturada é apresentada na figura a seguir.

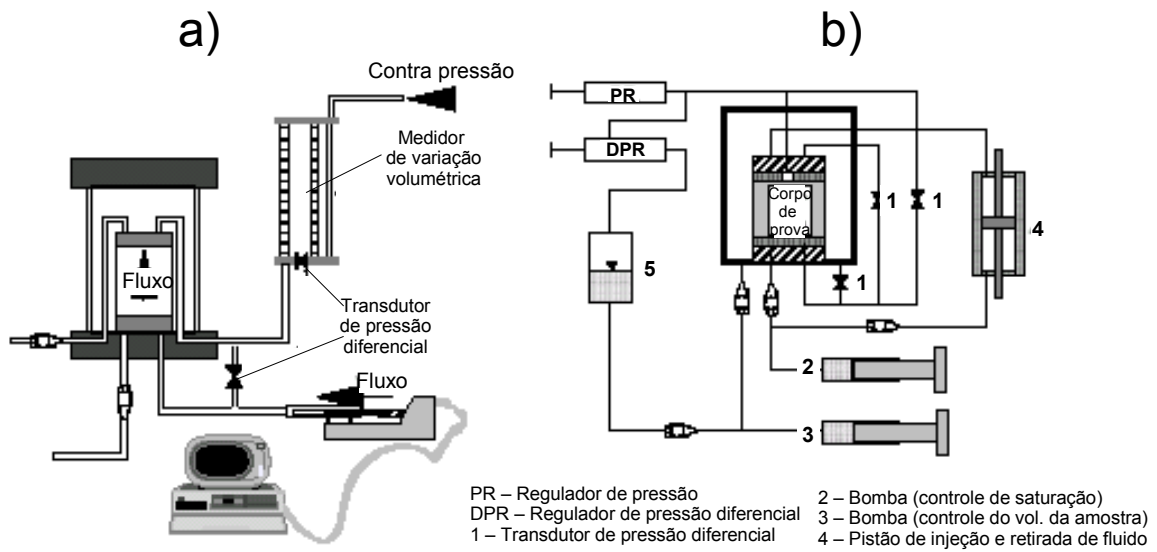


Figura 2.7: Esquema do método de vazão constante, na primeira figura sistema triaxial para solos saturados (DANIEL, 1995 apud DELGADO, 2001) e sistema triaxial para solos não saturados (última figura), (OLSEN et al 1994 apud DELGADO, 2001).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme já relatado, o plano de trabalho desta Dissertação fez parte de um projeto de pesquisa maior do Grupo de Pesquisa em Geotecnia Ambiental da Universidade Federal da Bahia (Escola Politécnica-DCTM-DEA) e da Universidade Católica do Salvador (Escola de Engenharia), financiado pela Petrobrás.

Neste capítulo são apresentados os procedimentos adotados para o desenvolvimento de um aparato experimental para a realização de ensaios para a determinação de curvas de retenção e de permeabilidade efetiva em até três fluidos imiscíveis, particularmente água, ar e gasolina. É apresentada uma descrição detalhada do equipamento desenvolvido, assim como os procedimentos para a realização dos testes de pré-operação e aferição do mesmo, utilizando amostras do solo sedimentar da formação Barreiras.

Foram amostrados também solos de mais três formações características do Recôncavo do Estado da Bahia e Região Metropolitana de Salvador, os quais serão preparados para a realização de ensaios posteriormente, já que essas atividades fazem parte de um projeto de pesquisa maior, no qual se inseriu o plano de trabalho desta Dissertação. Essas três formações características da Região Metropolitana de Salvador são:

- Sedimentos quaternários representados por areia de duna, constituintes dos cordões litorâneos da Região Metropolitana de Salvador, coletados no Bairro de Itapuã, Salvador;
- Solos residuais granulíticos oriundos da alteração do embasamento cristalino, com característica argilosa, coletados no regolito do fundo da Escola Politécnica, Salvador;

- Sedimentos da Formação Ilhas, constituídos de argilas trilaminares expansivas (massapê), coletados na cidade de Santo Amaro da Purificação, Bahia.

Os solos dessas formações apresentam características que vão desde sedimentos não coesivos (areia), sem a presença de finos, até o caso de solos especiais expansivos, de ocorrência natural no Recôncavo Baiano (solo residual de folhelho). Assim, ao final do projeto de pesquisa maior espera-se poder correlacionar os resultados obtidos com a caracterização básica de cada material, através de correlações empíricas que poderão ser de grande utilidade quando da previsão de comportamento em outros tipos de solo.

3.1 Elaboração do Aparato Experimental

Para o cumprimento dos objetivos propostos neste trabalho foi desenvolvido um aparato experimental, baseado nos trabalhos realizados anteriormente por Delgado (2001) e por Botelho (2001). Para isso utilizou-se a infraestrutura do Laboratório de Geotecnia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA. Os testes de pré-operação e aferição, com o solo sedimentar da formação Barreiras, foram realizados utilizando o equipamento desenvolvido e a avaliação dos resultados foi executada através da comparação da curva característica de sucção obtida para a água, fazendo uso do equipamento desenvolvido, com a curva característica de sucção obtida a partir do equipamento concebido por Machado e Dourado (2001).

O equipamento desenvolvido é constituído de quatro permeâmetros de parede flexível, sistema de medição de vazão nas três fases, sistema de aquisição de dados automatizado, sistema de aplicação e controle de pressão em todas as fases de forma independente e sistema de aplicação de vazão constante (bomba de fluxo).

3.1.1 Arranjo Experimental do Equipamento

Conforme já foi relatado, o equipamento desenvolvido no Laboratório da Geotecnia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA possibilita a realização de dois tipos de ensaios, sendo eles: determinação experimental da curva característica de sucção e determinação experimental da permeabilidade efetiva de fluidos imiscíveis em sistemas multifásicos (três fases), especificamente gasolina, água e ar. Para tal, montou-se um esquema geral que possibilita a realização dos ensaios de forma contínua, em até quatro amostras de solo ao mesmo tempo, conforme pode ser visto na figura 3.1. A técnica proposta tem como componentes do arranjo experimental quatro permeômetros de parede flexível, uma bomba de fluxo para controle da vazão nas amostras, transdutores de pressão absoluta ligados à base e ao topo dos corpos de prova para as medidas de pressão, painel de controle e um sistema de aquisição de dados que permite a automatização dos ensaios.

Para obtenção das curvas características de sucção, a metodologia do ensaio é baseada na sistemática proposta por Botelho *et al.* (2001), onde a bomba de fluxo possibilita determinar a curva para os dois ciclos: um retirando água a partir de corpos de prova inicialmente saturados com água (ciclo de drenagem ou secagem), e o outro usando o processo inverso, ou seja, injetando água no corpo de prova inicialmente seco (ciclo de infiltração ou umedecimento). O modelo de ensaio desenvolvido por Botelho *et al.* (2001), teve como base os trabalhos de Znidarcic *et al.* (1991) e de Ray e Morris (1995). Para o caso da gasolina foi adotado o mesmo procedimento experimental.

Na determinação experimental da permeabilidade efetiva, a metodologia de ensaio tem como base o trabalho feito por Delgado (2001), que desenvolveu um equipamento que permite a determinação simultânea da permeabilidade efetiva de duas fases, sendo estas água e ar, utilizando a técnica de vazão constante, onde uma vazão constante é injetada através de uma das extremidades da amostra e uma contrapressão de valor constante é aplicada na outra extremidade, enquanto é registrada a diferença de pressão induzida pela injeção.

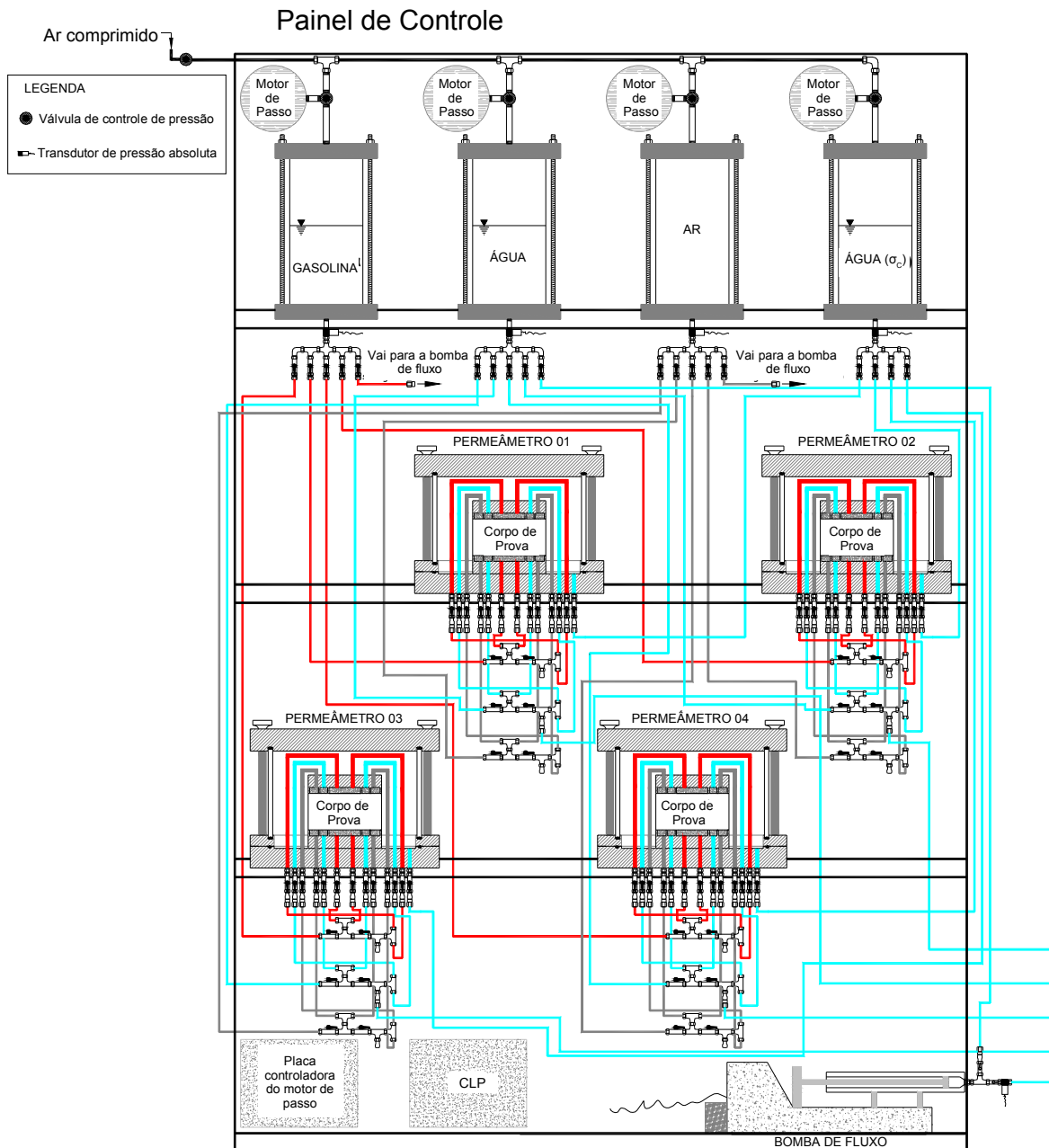


Figura 3.1: Desenho esquemático do arranjo experimental do equipamento desenvolvido.

3.1.2 Permeâmetros

Cada permeâmetro é constituído por um cilindro de acrílico, base, tampa, suporte, pedestal e cabeçote confeccionados em alumínio.

A base possui treze entradas laterais, sendo que doze delas são destinadas para aplicação, controle e medição de pressão nas diferentes fases, ficando quatro entradas para cada fase (duas ligadas ao topo do corpo de prova e duas ligadas à base do mesmo), e por último, uma entrada destinada à aplicação e controle de pressão na câmara (tensão confinante), conforme pode ser visto na figura 3.2. O pedestal, preso à base por três parafusos, e o cabeçote possuem um rebaixo circular e dois rebaixos anelares concêntricos para alojar os materiais filtrantes, conforme pode ser observado nas figuras 3.3 e 3.4. A ligação do pedestal com a base está devidamente vedada com “O’rings” de Viton, assim como a ligação do acrílico com a tampa e com o suporte. Todos os permeâmetros foram exaustivamente testados com relação à sua estanqueidade.

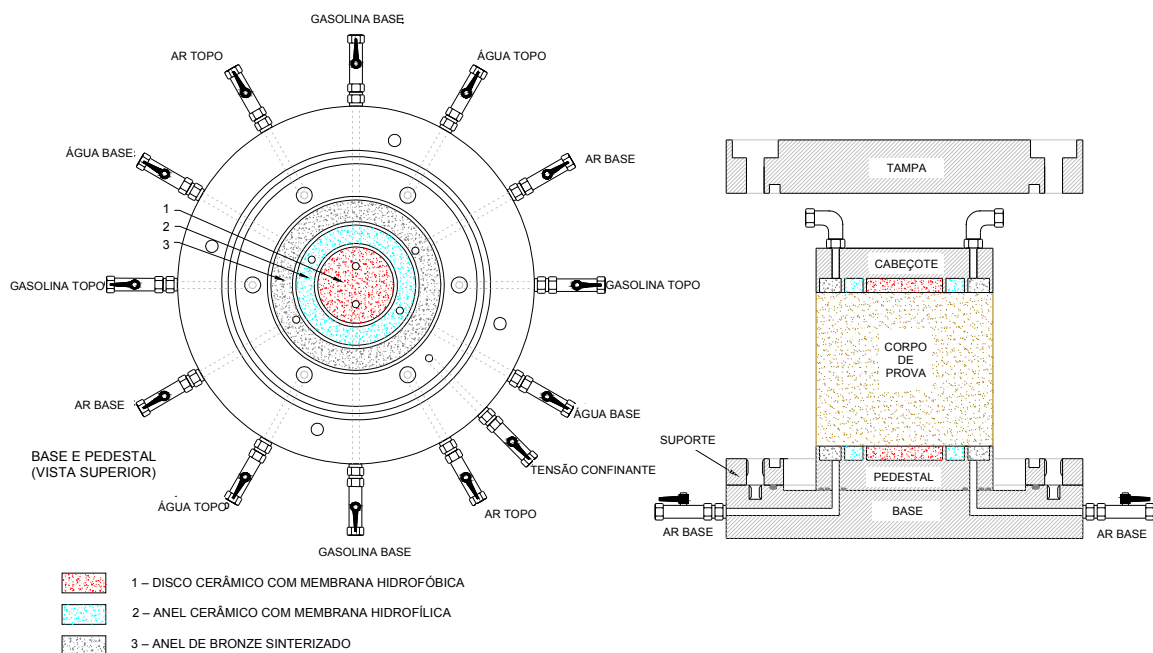


Figura 3.2: Partes constituintes do permeâmetro desenvolvido.



Figura 3.3: Partes que compõem os permeâmetros (base, tampa, suporte, cabeçote e pedestal).



Figura 3.4: Permeâmetro desmontado com as conexões e registros.

No Apêndice I, é apresentado o projeto detalhado do permeâmetro ora desenvolvido.

Para garantir a determinação simultânea da permeabilidade efetiva das três fases, foi necessário utilizar materiais que permitam a passagem exclusiva de apenas um dos fluidos, ou seja, cada material deve ser permeável a apenas uma fase e impermeável às demais. Para tanto, o equipamento teve que ser projetado de forma a manter separada a continuidade de todas as fases ao longo do tempo de realização do ensaio e para aplicação e controle independente das pressões, também em cada fluido, conforme Delgado (2001).

Seguindo essa orientação, foi realizada uma pesquisa extensiva visando encontrar materiais que satisfizessem esses pré-requisitos. Conforme visto em Demond (1988), indústrias do segmento de ciências biológicas, que atuam também na área de meio ambiente, produzem diversos filtros e membranas para tal fim. Inicialmente procurou-se o mesmo material utilizado por Demond (1988), que era permeável à gasolina e impermeável à água. Em seu trabalho, no qual é estudada a influência da pressão capilar no fluxo de duas fases líquidas, Demond (1988) utilizou um filtro de Politetrafluoretileno (PTFE ou Teflon) oleofílico e hidrofóbico, ou seja, o filtro em questão repele a água, ao mesmo tempo em que absorve bem a gasolina. Os filtros de Teflon que foram encontrados não possuíam o valor de entrada de ar desejado (pressão capilar que deve ser ultrapassada para que a fase não molhante, no caso o ar, possa penetrar no meio poroso saturado com a fase molhante, gasolina), então se optou pela utilização de membranas Durapore de PVDF (polifluoreto de vinilideno), da empresa americana Millipore. A membrana em questão é hidrofóbica, com tamanho de poro de 0,1 μm e valor de entrada de ar de aproximadamente 480 kPa, conforme especificação do fabricante. O material permeável à água e impermeável às outras duas fases, foi também a membrana de PVDF Durapore, sendo que neste caso a mesma é hidrofílica (que absorve bem a água), com valor de entrada de ar também de 480 kPa. Para a fase gasosa optou-se por utilizar um anel de bronze sinterizado de alta permeabilidade.

Inicialmente as membranas hidrofílica e hidrofóbica iriam ser coladas em filtros de bronze sinterizado fixados nas cavidades, porém após a realização de

alguns testes, descritos à seguir, o bronze sinterizado foi substituído por placas cerâmicas.

Verificação do valor de entrada de ar do material hidrofílico e hidrofóbico utilizado no permeâmetro do equipamento desenvolvido

Com o objetivo de verificar se o valor de entrada de ar era realmente o mesmo especificado pelo fabricante, foram feitos diversos testes na membrana hidrofílica. Primeiramente, a membrana foi colada através das extremidades, com cola a base de epóxi da marca Araldite, em um anel de bronze sinterizado fixado na cavidade anelar do pedestal do permeâmetro. Esta cavidade é destinada à aplicação e controle de pressão de água na base do corpo de prova. Após a fixação da membrana, a câmara foi fechada e mangueiras de nylon foram conectadas através de engates às entradas de água da base e à uma bureta graduada, conforme desenho esquemático da figura 3.5. A bureta foi preenchida com água destilada e em seguida os registros foram abertos para saturar a membrana e o disco de bronze sinterizado. Notou-se que o bronze sinterizado saturou-se rapidamente devido a alta permeabilidade que o mesmo possui. Em seguida aplicou-se pressões de ar na câmara até encontrar o valor de entrada de ar da membrana, que foi facilmente detectado pelo aparecimento de bolhas de ar nas mangueiras e na bureta. Com valores de aproximadamente 300 kPa, já se observou a presença de bolhas de ar na bureta. Este valor é inferior ao valor de entrada de ar mínimo requerido para realização dos ensaios propostos neste projeto, que deve ser de aproximadamente 500 kPa.

Acreditando-se que o valor de entrada de ar fosse aumentar, com a colocação de duas membranas de PVDF coladas no anel de bronze sinterizado, o teste foi refeito, porém não houve melhora no resultado.

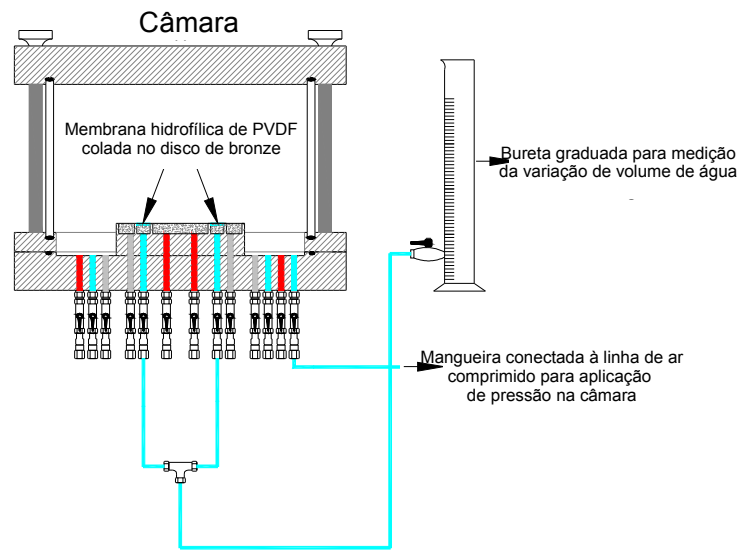


Figura 3.5: Desenho esquemático do arranjo para realização dos testes na membrana de PVDF.

Como o valor de entrada de ar dessas membranas não correspondeu ao valor especificado pelo fabricante, foram utilizadas, juntamente com as membranas hidrofílicas, uma membrana de celulose com pressão de entrada de ar de 10 MPa. Dando prosseguimento ao teste, a membrana de celulose do fabricante Soilmoisture foi colada também com adesivo epóxi, no anel de bronze sinterizado contido na cavidade anelar do pedestal do permeâmetro, e por cima da membrana de celulose colou-se a membrana de PVDF hidrofílica. Tentou-se saturar a membrana de celulose pelo mesmo procedimento descrito anteriormente, porém o tempo requerido para tal se mostrou inviável, devido ao fato que a mesma apresenta tamanhos de poros muito pequenos, com valores de permeabilidade também bastante reduzidos. Para contornar o problema optou-se primeiramente por medir a permeabilidade da membrana de celulose utilizando a metodologia de carga constante. Para saturar a membrana, encheu-se a câmara com água destilada, aplicou-se pressão de água na câmara e, em seguida, os registros foram abertos para promover a circulação de água. Após a saturação, com uma pressão constante na câmara, as leituras de tempo e variação de volume (observada na bureta) foram feitas. Os resultados encontrados são apresentados nos quadros a seguir:

TESTE PARA VERIFICAÇÃO DA PERMEABILIDADE DAS MEMBRANAS

Membrana de celulose + membrana de PVDF

$$K \text{ (cm/s)} = (V \times L) / (A \times h \times t)$$

V (volume de água)

L (altura do corpo de prova)

h (carga hidráulica)

A (área do corpo de prova)

C (fator de correção para viscosidade da água na temperatura de 27°)

L (cm)	0,01
H (cm)	3.099,00
A (cm ²)	19,63
C	0,85

Tempo (s)	V (cm ³)	K (cm/s)	K ₂₀ (cm/s)
3000	0,50	2,74E-11	2,33E-11
5820	1,00	2,82E-11	2,40E-11
9420	1,60	2,79E-11	2,37E-11
12000	1,90	2,60E-11	2,21E-11
19380	3,90	3,31E-11	2,81E-11
23400	4,60	3,23E-11	2,75E-11
	Média	2,92E-11	2,48E-11

Quadro 3.1: Resultados do teste para verificação da permeabilidade da membrana de celulose.

TESTE PARA VERIFICAÇÃO DA PERMEABILIDADE DAS MEMBRANA

Membrana de celulose + membrana de PVDF

$$K \text{ (cm/s)} = (V \times L) / (A \times h \times t)$$

V (volume de água)

L (altura do corpo de prova)

h (carga hidráulica)

A (área do corpo de prova)

C (fator de correção para viscosidade da água na temperatura de 27°)

L (cm)	0,01
H (cm)	2.066,00
A (cm ²)	19,63
C	0,85

Tempo (s)	V (cm ³)	K (cm/s)	K ₂₀ (cm/s)
1200	0,20	4,11E-11	3,49E-11
4260	0,50	2,89E-11	2,46E-11
10140	1,00	2,43E-11	2,07E-11
14760	1,40	2,34E-11	1,99E-11
18160	1,80	2,44E-11	2,08E-11
	Média	2,84E-011	2,42E-011

Quadro 3.2: Resultados do teste para verificação da permeabilidade da membrana de celulose.

Verificação da permeabilidade da membrana de celulose

De acordo com os resultados apresentados nos quadros 3.1 e 3.2, a membrana de celulose possui uma permeabilidade saturada média na ordem de grandeza de 10^{-11} cm/s, que é um valor muito baixo e conseqüentemente iria influenciar nos resultados dos ensaios de permeabilidade efetiva e no tempo necessário para determinação da curva característica de sucção. Em vista disso, optou-se por substituir os filtros de bronze sinterizado, destinados a aplicação e controle da pressão nas fases água e gasolina respectivamente, por placas cerâmicas, do fabricante Soilmoisture, com valor de entrada de ar de 500 kPa, tamanho de poro nominal de 0,5 μm e condutividade hidráulica saturada nominal de $1,21 \times 10^{-7}$ cm/s.

Verificação da influência da permeabilidade da pedra porosa

Como a condutividade hidráulica saturada das placas cerâmicas ainda é baixo em relação aos tipos de solos mais granulares, como areia por exemplo, isto provoca uma perda de carga elevada entre o solo e a placa cerâmica. Esta perda de carga influencia nos valores de permeabilidade obtidos através dos ensaios. Desta forma, só é possível determinar a permeabilidade no solo a partir de determinado valor, que é menor do que o valor de condutividade hidráulica saturada das placas cerâmicas, conforme pode ser observado no gráfico da figura 3.6 a seguir. Na elaboração desta figura foi utilizada a equação 3.1, apresentada adiante. É importante observar que a permeabilidade medida corresponde à média das permeabilidades das pedras e do solo. Isto ocorre porque os transdutores de pressão estão localizados acima e abaixo dos pedestais e cabeçotes, respectivamente, onde estão alojadas as placas cerâmicas.

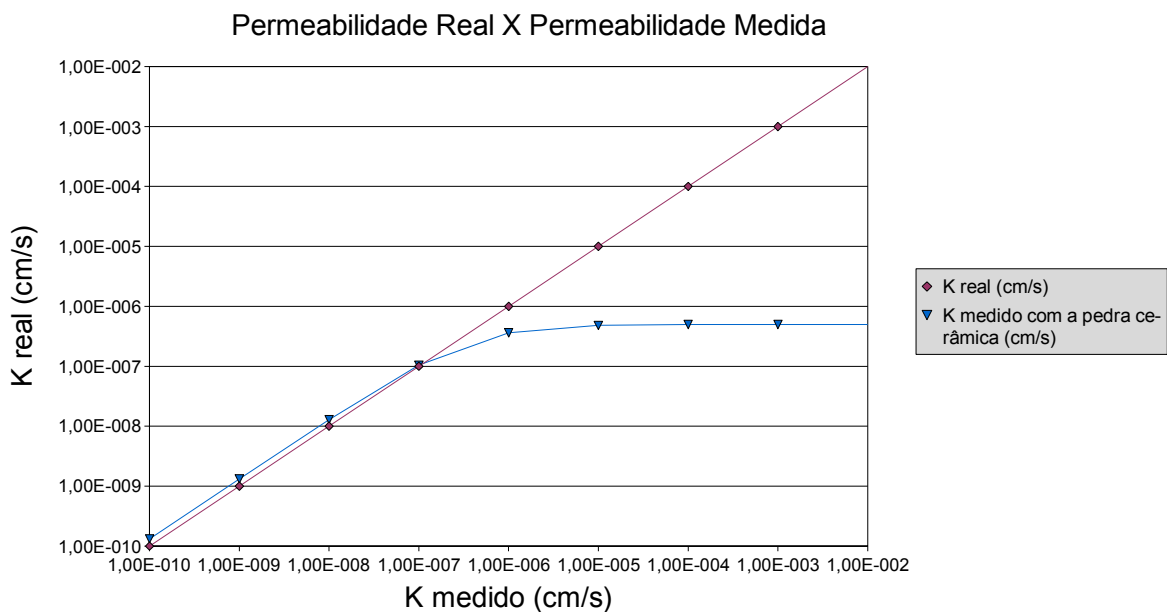


Figura 3.6: Gráfico representando a relação entre a permeabilidade real do solo e a permeabilidade medida sob a influência das placas cerâmicas.

Para quantificar de forma mais real os valores de permeabilidade do solo, sem a influência da impedância (a impedância decorre dos elementos passivos que se contrapõem ao fluxo de água no solo) das placas cerâmicas, foi utilizada neste trabalho a equação da permeabilidade média na direção vertical (equação 3.1). Sendo contínuo o escoamento, a vazão que passa através de cada camada (camada de solo e camada de cerâmica) é a mesma e a perda de carga é diferente em cada uma delas. Desde que a vazão é constante em todas as camadas e a área da seção transversal ao fluxo é a mesma, a velocidade de fluxo também será a mesma em todas as camadas. Considerando-se ainda que h_1, h_2, h_n , são a espessura de cada camada de solo e k_1, k_2, k_n , os coeficientes de permeabilidade de cada camada, a equação da permeabilidade média na direção vertical fica :

$$k_{medida} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{k_i}\right)} \quad (3.1)$$

No caso da equação 3.1, as espessuras das pedras cerâmicas tiveram que ser modificadas para compensar as diferenças nas áreas transversais.

As placas cerâmicas foram coladas nos rebaixos circular e anelar do pedestal e cabeçote das câmaras, e por cima das placas, as membranas de PVDF hidrofóbica e hidrofílica foram fixadas com adesivo epóxi, conforme figura 3.7.

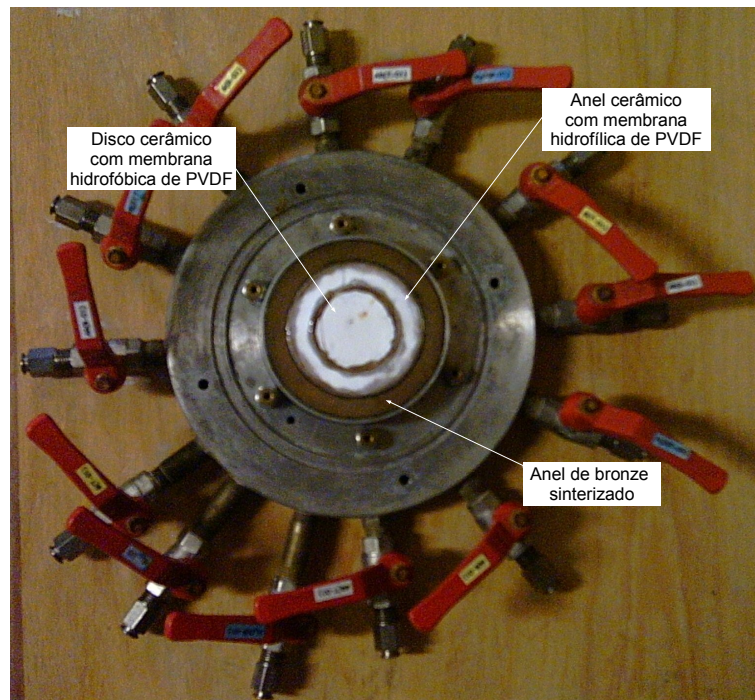


Figura 3.7: Materiais filtrantes utilizados para separar as fases.

Testes para verificação de vazamentos nos permeâmetros

Foram realizados testes para verificação de vazamentos nos permeâmetros. Os testes consistiram basicamente na aplicação de pressão de ar nas câmaras enquanto as mesmas se encontravam submersas. Os vazamentos podem ocorrer nas conexões, na ligação do pedestal com a base, ou na ligação do acrílico com a tampa e com o suporte. O local do vazamento é facilmente identificado através do surgimento de bolhas de ar. Após a identificação dos locais onde estavam ocorrendo os vazamentos, procederam-se os devidos reparos. A figura 3.8 retrata a realização do teste, e a figura 3.9 mostra ocorrência de um vazamento em uma das válvulas.



Figura 3.8: Realização de testes para verificação de vazamentos nos permeâmetros.

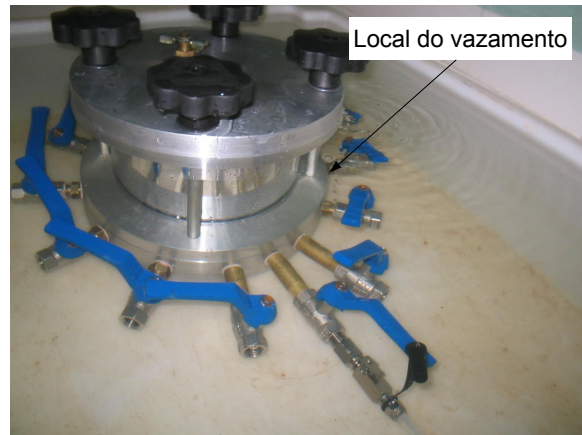
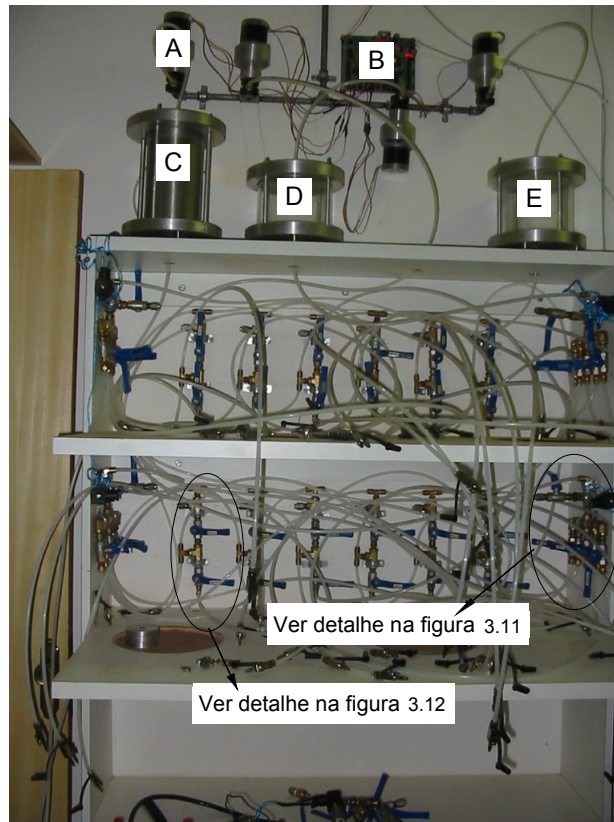


Figura 3.9: Ocorrência de vazamento em uma das válvulas conectadas à base.

3.1.3 Montagem do arranjo experimental

Conforme já relatado, na construção do sistema montou-se um esquema geral que possibilita a realização dos ensaios para determinação experimental da curva característica de sucção e determinação experimental da permeabilidade efetiva de forma contínua, em até quatro amostras de solo ao mesmo tempo. A técnica proposta tem como componentes do arranjo experimental quatro permeâmetros de parede flexível, uma bomba de fluxo para controle da vazão nas amostras, transdutores de pressão ligados à base e ao topo dos corpos de prova para as medidas de pressão, painel de controle e um sistema de aquisição de dados que permite a automatização dos ensaios. Na figura 3.10 é apresentado o arranjo experimental do equipamento desenvolvido, com suas respectivas partes constituintes.



Legenda:

A: Motor de passo com válvula reguladora de pressão;

B: Placa controladora do motor de passo;

C: Interface para gasolina;

D: Interface para água;

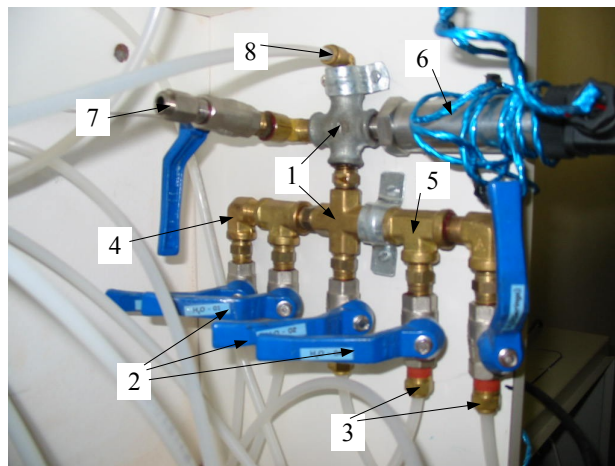
E: Interface para aplicação de pressão confinante das câmaras.

Figura 3.10: Arranjo experimental, sem as quatro câmaras e a bomba de fluxo.

O controle da pressão nas fases no topo da amostra é realizado através de uma válvula reguladora que é conectada a um motor de passo (letra A da figura 3.10). Através do sistema de ar comprimido, uma pressão de ar é aplicada e é transferida ao fluido contido nas interfaces (letras C, D e E da figura 3.10), que por sua vez encontram-se ligadas às câmaras.

Na figura 3.11 é apresentado um conjunto de conexões e válvulas que liga as interfaces às quatro câmaras. Este conjunto é constituído por duas cruzetas, seis válvulas esfera, nove niples, cinco conectores macho, dois tês, quatro cotovelos (três deles macho/fêmea e um macho tipo “push-in” do fabricante Detroit), uma entrada para engate rápido e um transdutor de pressão do tipo MKGT 1000,

fabricado pela empresa MK Controle, com capacidade de 1 MPa, compatível com gasolina ou com água e ar. No sistema existem quatro desses conjuntos, sendo que um é ligado diretamente à linha de ar comprimido e os outros três são ligados às interfaces de água, gasolina e água para controle da pressão confinante nas câmaras. Ainda na mesma figura, observa-se que o conjunto contém duas entradas (números 7 e 8) e cinco saídas, onde estão as válvulas e conectores macho. A entrada de número 7 é para encher as interfaces (letras C, D e E da figura 3.10) com seus respectivos fluidos (água ou gasolina), sem a necessidade de haver contato do operador com os mesmos. Isso é feito conectando, através de engate rápido, os reservatórios de água ou gasolina a esta entrada. Neste procedimento as válvulas presentes nas cinco saídas devem permanecer fechadas. A entrada de número 8, onde existe um cotovelo macho tipo “push-in”, é por onde é feita a ligação da interface às câmaras, que são conectadas através de quatro das cinco saídas mencionadas anteriormente. A saída que restou serve para encher as seringas com os fluidos, também sem a necessidade de haver contato do operador com os mesmos.



Legenda:

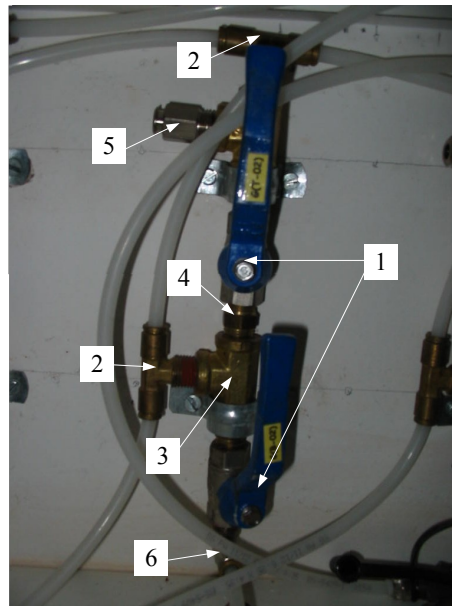
- 1: Cruzeta;
- 2: Válvula esfera;
- 3: Conector macho;
- 4: Cotovelo macho/fêmea;
- 5: Tê fêmea nas três extremidades;
- 6: Transdutor de pressão;
- 7: Entrada para engate rápido;
- 8: Cotovelo macho tipo “push-in”.

Figura 3.11: Conjunto de conexões e válvulas que liga as interfaces às quatro câmaras.

Na figura 3.12 é apresentado outro conjunto de conexões e válvulas em latão cromado que compõe o sistema. Este conjunto é formado por duas válvulas esfera, quatro tês, três niples, um cotovelo e uma entrada para engate rápido. Cada permeâmetro do sistema contém três desses conjuntos conectados através de mangueiras de nylon às suas doze entradas laterais, que são destinadas a aplicação, controle e medição de pressão das fases, ficando quatro entradas para cada fase (duas ligadas ao topo do corpo de prova e duas ligadas à base do mesmo), conforme desenho esquemático da figura 3.13.

Para a determinação da curva característica de sucção, o ensaio poderá ser feito com água ou com gasolina, bastando para isso encher as quatro seringas da bomba de fluxo com um fluido ou outro. Durante o ensaio, a bomba irá extrair água ou gasolina da base e do topo dos quatro corpos de prova, através de uma vazão constante previamente selecionada, que irá provocar paulatinamente uma diferença de pressão entre a fase líquida e gasosa. Neste caso as duas válvulas, V2 para a gasolina ou V4 para a água (essas válvulas, quando fechadas, isolam a base do topo do corpo de prova), estarão abertas (ver figura 3.13) e as válvulas V1 ou V3, que são ligadas à interface de gasolina ou água respectivamente, ficarão fechadas.

Para a determinação da permeabilidade efetiva, primeiramente serão realizados ensaios em corpos de prova contendo as fases água e ar, por exemplo. Antes do início do ensaio, para a medida da permeabilidade à água, as linhas que são ligadas aos anéis de bronze sinterizado (linhas em cinza na figura 3.13), destinadas à aplicação e controle de pressão de ar no topo e na base dos corpos de prova, devem ser preenchidas com ar sob pressão igual e as linhas ligadas ao sistema de medição e controle da pressão de água no corpo de prova deverão estar saturadas com água (linhas em azul na mesma figura). Durante esta etapa, as válvulas conectadas ao sistema de aplicação e controle de pressão da gasolina (V1 e V2) permanecerão fechadas. No decorrer do ensaio, a bomba irá injetar água no topo dos quatro corpos de prova, através de uma vazão constante previamente selecionada. A válvula 4, que isola a base em relação ao topo do corpo de prova, permanecerá fechada.



Legenda:

- 1: Válvula esfera;
- 2: Tê macho central;
- 3: Tê fêmea nas três extremidades;
- 4: Niple sextavado;
- 5: Entrada para engate rápido;
- 6: Cotovelo macho.

Figura 3.12: Conjunto de conexões ligado à câmara que possibilita aplicação de pressão nas fases de forma independente.

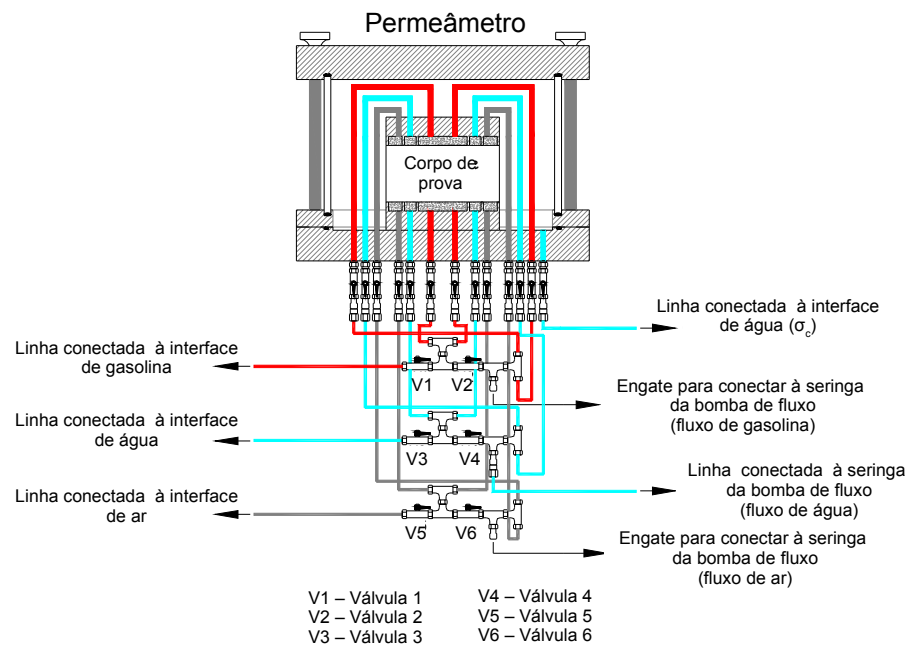


Figura 3.13: Desenho esquemático mostrando as ligações dos conjuntos de conexões às entradas da câmara.

3.1.4 Sistema de aplicação de vazão constante

O sistema de aplicação de vazão constante é constituído basicamente por uma bomba de fluxo do tipo KDS, modelo 230 (figura 3.14) que pode comportar até dez seringas (este número vai depender do diâmetro das seringas). A bomba é composta por um motor elétrico que desloca um dispositivo que empurra o embolo da seringa a uma velocidade constante. A velocidade é ajustada diretamente no próprio painel de controle da bomba e a taxa de fluxo pode variar de 0,001 $\mu\text{l/h}$ a 70,57ml/min. O volume injetado ou extraído pode ser controlado pela velocidade de injeção e pelo diâmetro da seringa utilizada. A bomba também é provida de uma interface de comunicação que possibilita o controle automático através do computador.

Para a realização dos ensaios foram fabricadas quatro seringas, uma para cada câmara, com peças de alumínio e tubo de aço inox com diâmetro interno de 25,4 mm, podendo deslocar um volume de aproximadamente 50 cm^3 . Para evitar vazamentos as peças das seringas dispõem de cavidades para o alojamento de o-rings. As figuras 3.15 e 3.16 mostram as seringas fabricadas e no Apêndice II é apresentado o projeto detalhado das seringas desenvolvidas.



Figura 3.14: Bomba de fluxo utilizada no equipamento.



Figura 3.15: Peças da seringa fabricada.

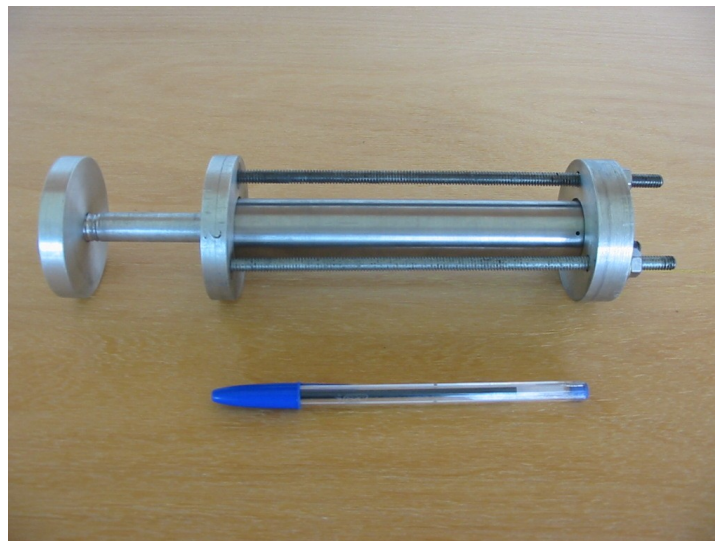


Figura 3.16: Seringa fabricada montada.

3.1.5 Sistema de aplicação de pressão

As pressões são aplicadas nas fases fazendo uso de um sistema de ar comprimido, válvulas de controle e interfaces. O controle da pressão nas fases no topo e/ou na base da amostra é realizado através de uma válvula reguladora que é conectada a um motor de passo (figura 3.17). Através do sistema de ar comprimido, uma pressão de ar é aplicada e é transferida ao fluido contido nas interfaces, que por sua vez encontram-se ligadas às câmaras. Conforme já foi relatado, existe um

transdutor de pressão, ligado à cada interface e às câmaras, e existem também transdutores de pressão ligados às quatro seringas (figura 3.18), que possibilitam o monitoramento das pressões, no topo e na base do corpo de prova, ao longo do tempo de realização dos ensaios.

De acordo com o que foi exposto, as pressões em ambas as extremidades da amostra podem ser monitoradas de forma independente, sendo que a diferença de pressão entre a base e o topo gerada no decorrer do ensaio para a determinação da permeabilidade efetiva é obtida subtraindo os valores de pressão monitorados em ambas as extremidades do corpo de prova.



Figura 3.17: Partes componentes do sistema de aplicação de pressão.

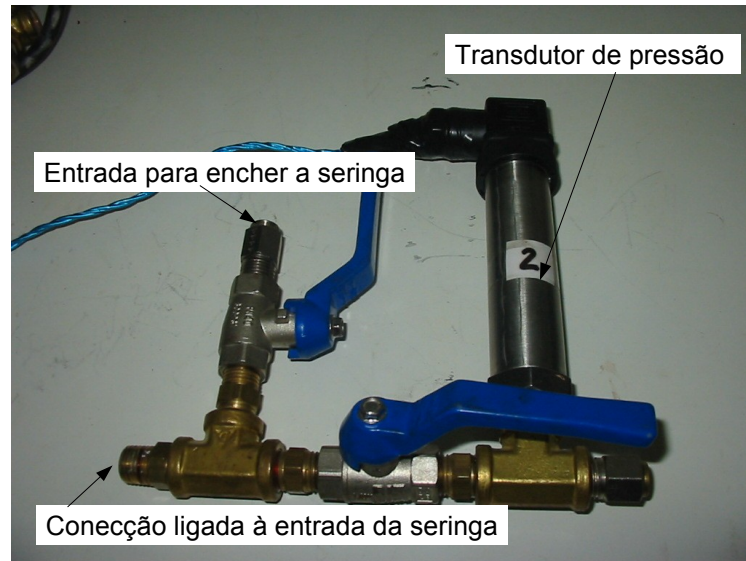


Figura 3.18: Conjunto de conexões com transdutor de pressão que será ligado à saída da seringa.

3.1.6 Sistema de aquisição de dados automatizado

O sistema de aquisição de dados permite o monitoramento contínuo das grandezas necessárias para o cálculo da permeabilidade efetiva e para a determinação da curva característica de sucção. Um painel eletrônico permite o controle e a automatização do sistema. A fase de automação foi executada com apoio de técnico especializado em sistema de automação e servo controle. A figura 3.19 apresenta uma vista do painel eletrônico que possibilita a aquisição de dados, permitindo a automatização dos ensaios e as figuras 3.20 e 3.21 apresentam as telas do programa de computador desenvolvido para o acompanhamento do ensaio.



Figura 3.19: Painel eletrônico para possibilitar aquisição de dados, permitindo a automatização dos ensaios.



Figura 3.20: Tela inicial do programa desenvolvido para o acompanhamento dos ensaios.

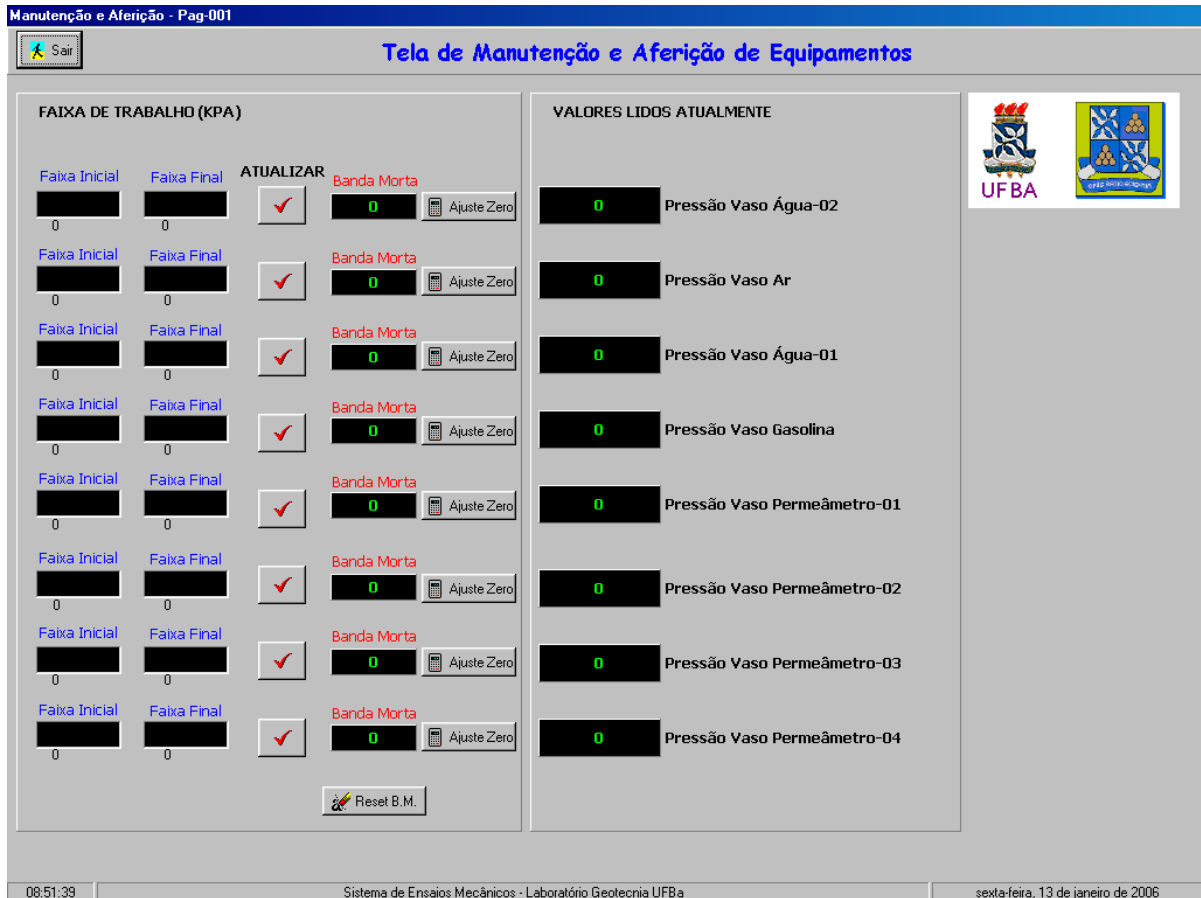


Figura 3.21: Tela de manutenção e aferição do equipamento.

3.2 Procedimentos para Realização dos Testes de Pré-Operação e Aferição do Equipamento Desenvolvido

3.2.1 Operações Preliminares

Antes da realização dos testes de pré-operação e aferição do equipamento, foi necessária a realização de algumas operações preliminares tais como: saturação das linhas, com água e gasolina, ligadas ao sistema de aplicação e controle de pressão; saturação dos anéis e dos discos cerâmicos com água e gasolina, respectivamente, colados nas cavidades do pedestal e do cabeçote e verificação da estanqueidade do sistema.

A saturação das linhas, com água e gasolina, ligadas ao sistema de aplicação e controle de pressão foi feita através da circulação dos fluidos, até a eliminação visível das bolhas de ar. Isto é feito conectando-se as mangueiras, ligadas aos reservatórios de água e de gasolina, às partes do sistema onde se verificou a presença de bolhas de ar, permitindo assim a percolação dos fluidos através das linhas, as quais devem permanecer abertas, nas extremidades, para a atmosfera durante todo o processo.

Além da saturação das linhas, foi também necessário saturar os discos cerâmicos com gasolina e os anéis cerâmicos com água. Esta saturação tem por objetivo garantir a continuidade dos fluidos entre os corpos de prova e as linhas destinadas ao controle e aplicação de pressão. A saturação das peças cerâmicas foi realizada conectando-se as linhas, já saturadas de água e gasolina, às suas respectivas entradas nas câmaras, então as peças ficam submetidas a uma carga hidráulica constante, que provoca o fluxo do fluido através das mesmas, promovendo-se assim a saturação.

Outra operação preliminar importante é a verificação da estanqueidade do sistema, já que a presença de vazamentos é um dos maiores problemas associados aos ensaios considerados neste trabalho, podendo comprometer os resultados obtidos. Apesar dos testes já realizados para verificar a presença de vazamentos, conforme apresentado na seção 3.1.2, ainda podem ocorrer vazamentos nos conjuntos de conexões, descritos na seção 3.1.3; nas conexões que ligam o cabeçote e o topo do corpo de prova às entradas da base do permeâmetro; e entre as paredes das cavidades para alojar as peças cerâmicas e as mesmas, devido a uma eventual colagem mal efetuada. Os testes para a verificação dos vazamentos foram realizados aplicando-se pressão de ar em cada trecho considerado, quando o mesmo se encontrava submerso em um tanque de água. O vazamento era facilmente detectado através do aparecimento de bolhas de ar. Após a percepção dos vazamentos, foram efetuados os devidos reparos.

3.2.2 Determinação Experimental da Curva Característica de Sucção

A curva característica de sucção no solo pode ser empregada para estimar diversos parâmetros usados para descrever o comportamento dos solos não saturados, sendo que dentre eles podemos citar a função de condutividade hidráulica.

Para o levantamento das curvas características de sucção e teste do equipamento desenvolvido, foram realizados ensaios em corpos de prova moldados a partir das amostras indeformadas do solo sedimentar da formação Barreiras. Os ensaios foram realizados nos quatro permeômetros ao mesmo tempo.

O ensaio pode ser feito com água ou com gasolina, bastando para isso encher as seringas da bomba de fluxo com um fluido ou outro.

A saturação dos corpos de prova foi realizada por percolação do fluido (água ou gasolina), feita através dos anéis de bronze sinterizado, bastando para isso conectar as linhas de água ou gasolina às válvulas ligadas aos anéis de bronze sinterizado. Isso é feito para otimizar o processo de saturação dos corpos de prova, tornando-o mais rápido, já que os anéis de bronze têm uma permeabilidade elevada. Após a saturação dos corpos de prova as linhas destinadas à aplicação e controle de pressão de ar no topo e na base dos corpos de prova foram novamente conectadas aos anéis de bronze.

Antes do início do ensaio, as linhas citadas anteriormente que foram ligadas aos anéis de bronze sinterizado, destinadas à aplicação e controle de pressão de ar no topo e na base dos corpos de prova, foram preenchidas com ar sob pressão igual, enquanto que os corpos de prova e o resto do sistema permaneceram saturados com água ou com gasolina. Para o ensaio feito com água, todas as válvulas conectadas ao sistema de aplicação e controle de pressão da gasolina (válvula 1 e 2 e válvulas da base do permeômetro ligadas ao elemento hidrofóbico) permaneceram fechadas, o contrário ocorrendo caso o ensaio seja feito com gasolina (válvula 3 e 4 e válvulas da base do permeômetro ligadas ao elemento hidrofílico), conforme pode ser observado no detalhe da figura 3.13.

Durante o ensaio, a bomba estraiu água ou gasolina da base e do topo dos corpos de prova (a válvula V1 permaneceu fechada e V2 aberta, para a gasolina ou V3 fechada e V4 aberta, no caso da água), através de uma vazão constante previamente selecionada, que provocou paulatinamente uma diferença de pressão entre a fase líquida e gasosa (ver detalhe na figura 3.13). Os transdutores registraram as pressões de cada fase de forma separada, no topo e na base das amostras. A diferença de pressão entre a fase gasosa e líquida é igual à sucção apresentada pelo corpo de prova. De forma semelhante, invertendo o fluxo na bomba, é possível obter o ramo de umedecimento da curva característica de sucção.

O volume de líquido removido no corpo de prova foi calculado multiplicando a vazão de fluxo, controlada pela bomba, pelo tempo de realização do ensaio. Então a curva característica de sucção é obtida através dos dados de diferença de pressão entre as fases x tempo decorrido, vazão de fluxo, porosidade e volume do corpo de prova. O grau de saturação em cada estágio pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$S_r = S_{rfinal} + \frac{Q \cdot (t_{final} - t)}{n \cdot V} \quad (3.2)$$

Sendo:

S_r : grau de saturação em cada estágio de realização do ensaio;

S_{rfinal} : grau de saturação final;

Q : vazão de fluxo aplicada [L^3T^{-1}];

t_{final} : tempo final de realização do ensaio [T];

t : tempo medido em cada estágio de realização do ensaio [T];

n : porosidade;

V : volume do corpo de prova [L^3].

A taxa de fluxo imposta pela bomba foi obtida através de uma simulação feita utilizando-se o aplicativo Seep/W (Geo Slope International), considerando a retirada do volume de líquido em quatro dias, por exemplo. O Seep/W é um programa de fluxo fundamentado no método dos elementos finitos. Na simulação são considerados dados de condutividade hidráulica do solo ensaiado e das pedras porosas, isto é feito para assegurar uma condição de ensaio drenado, de modo que os valores de sucção medidos durante a realização do ensaio sejam os valores de sucção do solo. Na figura 3.22 é apresentada a malha retangular axi-simétrica, obtida no Seep/W, com os valores de umidade e de pressão na água (kPa) para uma vazão de fluxo de $2,6250 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ na extremidade superior do corpo de prova e de $2,5131 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ na extremidade inferior. Para efeito desse trabalho usou-se duas malhas retangulares (uma para o corpo de prova de solo e outra para a pedra cerâmica) com quatro nós por elemento na análise do fluxo.

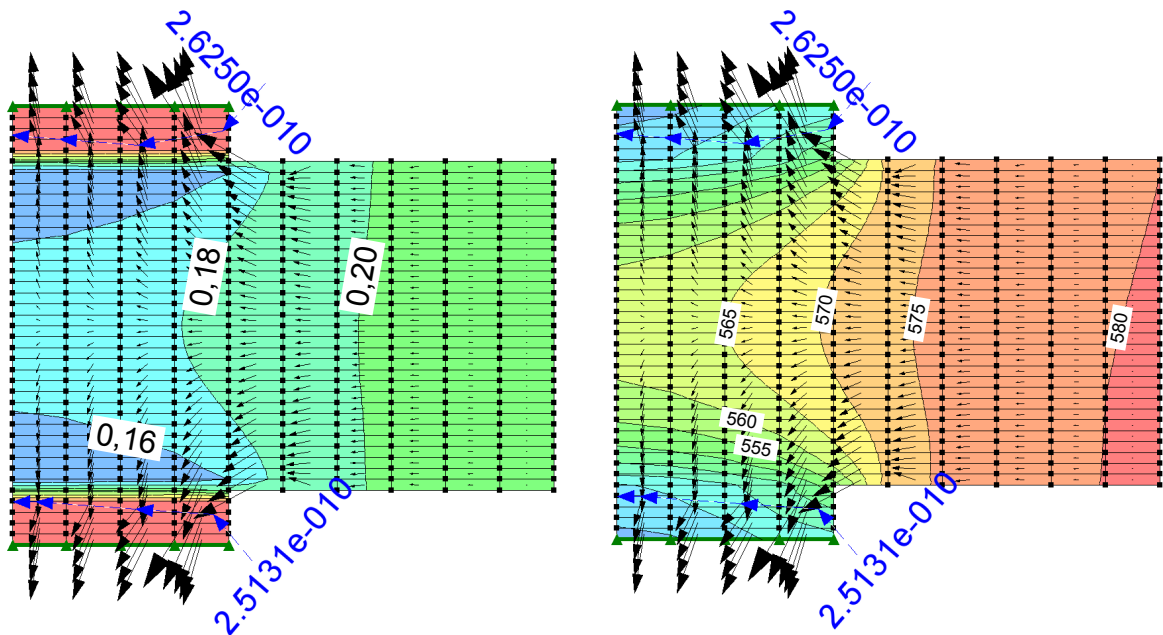


Figura 3.22: Malha retangular axi-simétrica, obtida no Seep/W, com os valores de umidade e de pressão na água (kPa)

A figura 3.23 apresenta um gráfico de valores de pressão em função do volume de água drenado, no corpo de prova e na pedra cerâmica, obtidos a partir da simulação feita no Seep/W. É possível observar que a diferença de valores de pressão no corpo de prova e na pedra cerâmica é de apenas 5 kPa, bastando apenas fazer esta correção após a realização do ensaio.

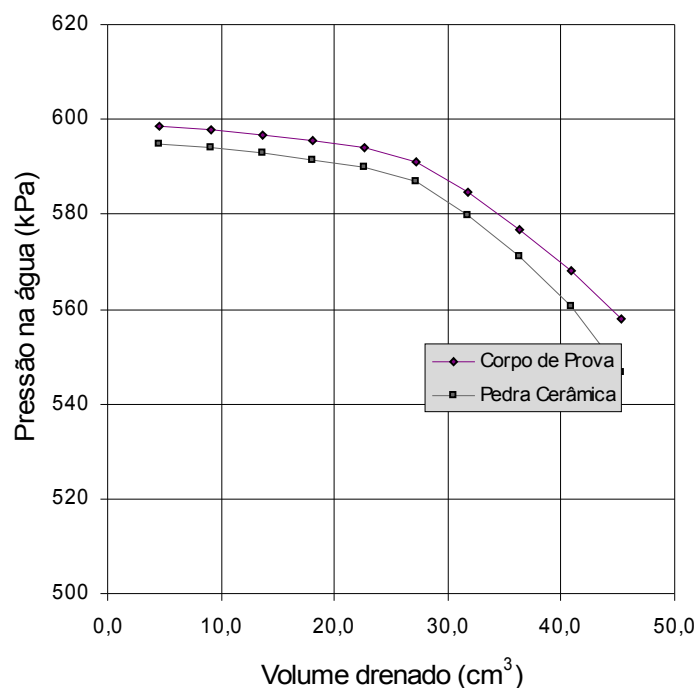


Figura 3.23: Gráfico de valores de pressão em função do volume de água drenado, obtidos a partir da simulação feita no Seep/W.

Para avaliação dos resultados obtidos nos testes realizados no equipamento, as curvas obtidas com relação à água foram comparadas com outras obtidas a partir de ensaios realizados em um outro equipamento existente no Laboratório de Geotecnia Ambiental, baseado na metodologia proposta por Fourie & Papageorgian (1995). O equipamento, desenvolvido por Machado e Dourado (2001), é constituído por câmaras de sucção, medidores de variação de volume,

sistema de drenagem e aplicação de pressão, sistemas de reversão de fluxo e um sistema de aquisição de dados, conforme ilustrado na figura 3.24.

Para a realização deste ensaio, amostras do solo, moldadas a partir do bloco indeformado, foram colocadas na câmara de sucção e saturadas. Em seguida a câmara foi fechada e a pressão de ar aplicada no topo da célula. No início, com todos os registros fechados, não houve fluxo pelo sistema, sendo registrado um aumento na pressão de água, que se estabilizou em um valor igual ao valor da pressão de ar aplicada. Após a estabilização da pressão, os registros foram abertos para permitir a drenagem de um certo volume de água do corpo de prova. Em seguida, após o fechamento dos registros, a pressão de água tornou a variar, atingindo, nos estágios subseqüentes, valores de pressão de equilíbrio decrescentes (aumento da sucção). Ao final de cada estágio se conhece a sucção na amostra e ao iniciar um novo estágio sabe-se o volume drenado, no entanto não se tem a quantidade de água existente na amostra nestas etapas. Como a amostra foi pesada e levada a estufa ao final do ensaio, pôde-se determinar o volume de água existente no último estágio de sucção. O volume de água na amostra em cada etapa, foi então determinada somando o volume de água drenado com o volume de água existente na amostra na etapa seguinte, e como o volume de água ao final do ensaio é conhecido se pôde determinar a umidade da amostra nos estágios intermediários.

As curvas características obtidas pelo método analisado foram comparadas com outras obtidas por técnicas tradicionais, apresentando boa concordância (MACHADO e DOURADO, 2001).

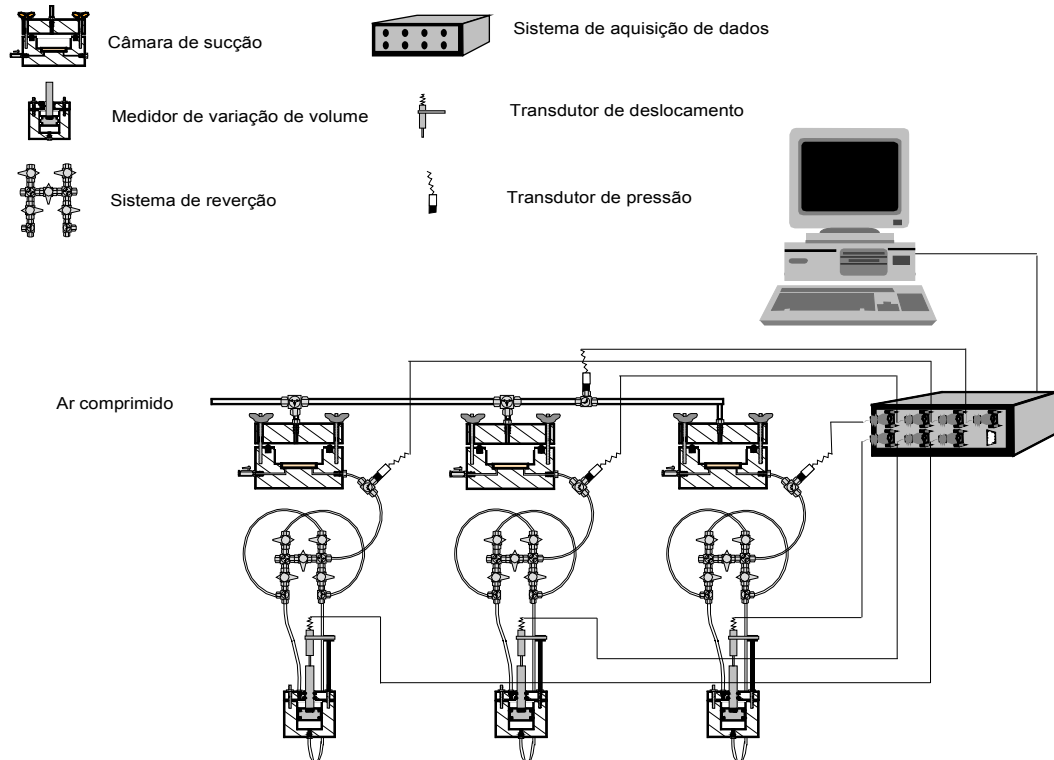


Figura 3.24: Esquema ilustrativo do equipamento para determinação de curva característica de sucção por equilíbrio de pressão, desenvolvido por Machado e Dourado (2001).

3.2.3 Determinação Experimental da Permeabilidade Efetiva

Na etapa de pré-operação, foram realizados apenas ensaios para determinação da curva característica de sucção, porém como o equipamento desenvolvido neste trabalho possibilita a determinação experimental da permeabilidade efetiva, a seguir é apresentada uma descrição da técnica experimental para a realização deste ensaio.

Os testes podem ser realizados nos quatro permeômetros ao mesmo tempo.

O ensaio pode ser feito com água ou com gasolina, bastando para isso encher as seringas da bomba de fluxo com um fluido ou outro.

A saturação dos corpos de prova é realizada por percolação do fluido (água ou gasolina), feita através dos anéis de bronze sinterizado, conforme

procedimento apresentado na seção anterior. Após a saturação dos corpos de prova as linhas destinadas à aplicação e controle de pressão de ar no topo e na base dos corpos de prova são novamente conectadas aos anéis de bronze.

Antes do início do ensaio, as linhas citadas anteriormente que são ligadas aos anéis de bronze sinterizado, destinadas à aplicação e controle de pressão de ar no topo e na base dos corpos de prova, são preenchidas com ar sob pressão igual, enquanto que os corpos de prova e o resto do sistema permanecem saturados com água ou com gasolina. Para o ensaio feito com água, todas as válvulas conectadas ao sistema de aplicação e controle de pressão da gasolina (válvula 1 e 2 e válvulas da base do permeâmetro ligadas ao elemento hidrofóbico) permanecem fechadas, o contrário ocorrendo caso o ensaio seja feito com gasolina (válvula 3 e 4 e válvulas da base do permeâmetro ligadas ao elemento hidrofílico), conforme pode ser observado no detalhe da figura 3.13.

Para a aplicação da pressão capilar, a bomba extrai água ou gasolina da base e do topo dos corpos de prova (a válvula V1 permanece fechada e V2 aberta, para a gasolina ou V3 fechada e V4 aberta, no caso da água), através de uma vazão constante previamente selecionada, que provoca uma diferença de pressão entre a fase líquida e gasosa (ver detalhe na figura 3.13). Os transdutores registram as pressões de cada fase de forma separada, no topo e na base das amostras. A diferença de pressão entre a fase gasosa e líquida é igual à sucção apresentada pelo corpo de prova.

Após se atingir o equilíbrio de pressões para cada valor de sucção, é iniciada a fase de injeção de fluido, onde a bomba de fluxo injeta água ou gasolina através do topo dos corpos de prova, com uma vazão constante previamente selecionada de modo a assegurar uma condição de ensaio drenado. A válvula 4, para o caso do ensaio realizado com água, ou a válvula 2, para a gasolina, que isolam a base em relação ao topo do corpo de prova, permanecem fechadas. As válvulas ligadas à base do corpo de prova (V1, para a fase gasolina e V3, para a fase água) ficam abertas de modo a permitir a saída do fluido injetado. Como a velocidade de injeção selecionada é muito pequena, para garantir uma condição de ensaio drenado, conforme já relatado, é assumido que o volume de fluido que entra

pelo topo do corpo de prova é o mesmo que sai pela base, ficando o grau de saturação praticamente inalterado, ao final de cada estágio, para aquele valor de sucção. No decorrer do ensaio, os transdutores registram as pressões de cada fase de forma separada, no topo e na base das amostras.

O volume de líquido extraído do corpo de prova, na fase de aplicação da pressão capilar, é calculado multiplicando a vazão de fluxo, controlada pela bomba, pelo tempo de duração desta fase. Os graus de saturação são calculados, conforme a equação 3.2, e as vazões e gradientes de pressão monitorados no decorrer do ensaio, sendo utilizada a lei de Darcy para a obtenção da permeabilidade efetiva do fluido, para aquele valor de sucção.

É válido ressaltar que a realização de um programa de ensaios extenso será efetuada posteriormente, como parte das atividades previstas no projeto de pesquisa maior, no qual o programa de trabalho desta Dissertação está inserido.

3.3 Coleta de Amostras

Na presente pesquisa houve uma etapa de trabalhos de campo, com a finalidade de coletar amostras deformadas e indeformadas do solo sedimentar da formação Barreiras. Os critérios considerados para a escolha do local de coleta foram: facilidade de acesso e distância de áreas vulneráveis a eventos de contaminação. As amostras do solo sedimentar da formação Barreiras foram coletadas na região do Centro Industrial de Aratu (CIA), Salvador.

Após a escolha do local de amostragem, foi feita a coleta de amostras deformadas e indeformadas. As amostras deformadas foram utilizadas para os ensaios de caracterização (granulometria, massa específica dos sólidos, limites de Atterberg e teor de umidade natural), enquanto que as indeformadas para os demais ensaios (determinação de curva característica de sucção, curva de condutividade hidráulica multi-fásica e ensaios para a determinação da permeabilidade saturada do solo).

As fotos das figuras 3.25 e 3.26 ilustram o local de coleta e o procedimento adotado para as amostras deformadas de sedimento Barreiras.



Figura 3.25: Foto mostrando o local de coleta das amostras de sedimento Barreiras (Região do CIA, Salvador).



Figura 3.26: Foto mostrando o procedimento de coleta das amostras de sedimento Barreiras.

Para amostras deformadas, foram coletados 600 kg de cada solo estudado. As amostras foram cuidadosamente armazenadas em sacos plásticos e devidamente identificadas.

A coleta das amostras indeformadas dos solos foi conduzida da seguinte forma:

- Após a escolha do local de amostragem a área foi limpa de qualquer elemento estranho presente na superfície;
- O terreno foi marcado com um quadrado de 30 cm de lado e escavado na forma de um prisma até a cota desejada, onde foi esculpido o bloco;
- Após a escavação, o bloco foi forrado com papel laminado, tecido poroso e parafina, com o objetivo de preservar a umidade e estrutura do solo;

- Em seguida, o bloco foi colocado em uma caixa contendo serragem para que fosse enviado ao laboratório, onde foi mantido em câmara úmida até a data de sua utilização.

Foram inicialmente esculpidos dois blocos da amostra de solo da formação Barreiras e, posteriormente, mais dois blocos foram preparados em virtude da perda de seis corpos de prova na realização dos testes de pré-operação e aferição do equipamento desenvolvido.

3.4 Caracterização das Amostras de Solo

Os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados no Laboratório de Solos da Universidade Católica do Salvador (Escola de Engenharia) que integra a equipe de trabalho do projeto maior conveniado com a Petrobrás. Os ensaios foram feitos conforme as diversas Normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) que regulamentam a execução dos mesmos.

Os ensaios de caracterização geotécnica visaram a obtenção de índices físicos que influenciam no fluxo de contaminantes no meio poroso não saturado. Dentre estes parâmetros-índices temos: massa específica dos sólidos, curva granulométrica, limites de Atterberg, teor de umidade natural, etc.

Na análise granulométrica, a partir dos valores calculados conforme o procedimento de ensaio, foi traçada a curva de distribuição granulométrica, onde no eixo das abcissas, em escala logarítmica, ficam os diâmetros equivalentes das partículas do solo e no eixo das ordenadas, os percentuais das partículas menores do que os diâmetros considerados, em escala natural (percentagem que passa).

Dando prosseguimento à caracterização geotécnica, foram ainda realizados ensaios para determinação dos limites de Atterberg, peso específico dos sólidos, peso específico do solo e umidade natural. Os demais índices físicos foram determinados indiretamente, a partir de relações matemáticas.

3.5 Ensaio para Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada dos Solos em Relação à Água e à Gasolina

Para a determinação da condutividade hidráulica saturada do solo sedimentar da formação Barreiras em relação às fases água e gasolina, foram realizados seis ensaios para a água, sendo que três ensaios foram feitos utilizando a metodologia de carga constante e os outros três com a metodologia de carga variável, e para a gasolina foram realizados três ensaios utilizando a metodologia de carga constante. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA, em permeâmetro de parede flexível (célula triaxial) existente no laboratório. Os ensaios foram realizados conforme os procedimentos descritos nas normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), sendo elas: NBR 14545 – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável e NBR 13292 – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Granulares a Carga Constante.

A partir do bloco indeformado, foram moldados os corpos de prova com aproximadamente 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. No caso dos ensaios realizados com a gasolina, como a mesma ataca a membrana de látex, fazendo com que a mesma se expanda ou até muitas vezes se rompa, os corpos de prova tiveram que ser envolvidos primeiramente com fita de teflon, e por cima da fita utilizou-se filme de PVC, com várias camadas sobrepostas, para reduzir a possibilidade de ocorrência de vazamentos, conforme pode ser visto nas figuras 3.27 e 3.28.



Figura 3.27: Corpo de prova envolvido com fita de teflon.



Figura 3.28: Corpo de prova sendo embrulhado com filme de PVC.

Inicialmente estava previsto a realização de ensaios utilizando a metodologia de carga variável para a determinação da condutividade hidráulica saturada, porém não foi possível devido a dificuldade encontrada de se fazer leituras de nível na bureta, que decrescia muito rapidamente.

Como a gasolina é um fluido que se volatiliza com extrema rapidez, para a realização dos ensaios utilizando a metodologia de carga constante foi necessário utilizar uma garrafa plástica, conectada à saída do corpo de prova, para coletar o volume percolado, conforme pode ser visto na figura 3.29.



Figura 3.29: Montagem da realização do ensaio para determinação da condutividade hidráulica saturada em relação à gasolina (observar o reservatório no alto e garrafa plástica na saída da câmara).

Com intervalos de tempo de 30 em 30 minutos durante a realização do ensaio, a garrafa plástica era desconectada do permeâmetro de parede flexível, pesada em balança de precisão e esvaziada. Posteriormente, para se obter o volume de gasolina percolado, bastava dividir a massa obtida em cada determinação pela densidade média da gasolina.

Nos ensaios de carga constante, a determinação da permeabilidade foi feita através do cálculo do coeficiente angular da reta que melhor se ajusta aos pontos obtidos a partir dos resultados do ensaio, onde no eixo das ordenadas marca-se a velocidade de fluxo referida à temperatura de 20° C e no eixo das abscissas o gradiente hidráulico.

Nos ensaios de carga variável, o valor de permeabilidade foi obtido a partir da média aritmética de pelo menos quatro determinações relativamente próximas, as quais não apresentem tendências evidentes de crescimento ou diminuição, conforme a NBR 14545.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados conforme os procedimentos descritos em Materiais e Métodos, assim como a discussão e análise dos mesmos. São abordados aqui tópicos referentes à caracterização das amostras de solo Sedimentar da Formação Barreiras; determinação da condutividade hidráulica saturada em relação à água e à gasolina, para o mesmo tipo de solo; determinação da curva característica de sucção a partir de ensaios realizados em equipamento desenvolvido por Machado e Dourado (2001); determinação experimental da curva característica de sucção a partir do equipamento desenvolvido.

4.1 Caracterização das amostras de solo

Na tabela 4.1 a seguir, é apresentado um resumo dos resultados dos ensaios de caracterização geotécnica realizados em amostras deformadas, sendo eles: ensaios de granulometria, limites de Atterberg e massa específica dos sólidos. Conforme se pode observar foram realizados nove ensaios de cada tipo.

Na figura 4.1 é apresentado um gráfico com as curvas de distribuição granulométrica para cada um dos nove registros de amostra da formação Barreiras.

Como pode ser observado na tabela 4.1, o solo foi caracterizado quanto a sua composição como uma areia argilosa com vestígio de silte. Por sua vez a classificação do solo ensaiado quanto ao índice de plasticidade (IP) indica tratar-se de um solo muito plástico. Na mesma tabela, foi calculado também a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para as nove determinações.

Tabela 4.1: Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização geotécnica.

Registro	Identificação das Amostras	Ensaio de Granulometria (%)						Limites de Alterberg			Massa Específica dos Sólidos	Classificação segundo a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas	Classificação segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)
		Pedregulho	Areia Grossa	Areia média	Areia Fina	Silte	Argila	W _L	W _P	IP	g/cm ³		
R195	Barreiras	0	23	40	8	2	27	41,2	21,8	19,40	2,655	Areia argilosa com vestígio de silte	SC
R196	Barreiras	0	21	40	10	2	27	39,6	21,3	18,30	2,690	Areia argilosa com vestígio de silte	SC
R197	Barreiras	0	20	39	9	3	29	41,4	20,6	20,80	2,681	Areia argilosa com vestígio de silte	SC
R198	Barreiras	0	21	39	10	2	28	41,3	21,0	20,30	2,661	Areia argilosa com vestígio de silte	SC
R199	Barreiras	0	19	39	9	5	26	41,1	19,3	21,80	2,668	Areia argilosa com vestígio de silte	SC
R200	Barreiras	0	21	39	9	2	30	40,2	20,0	20,20	2,660	Areia argilosa com vestígio de silte	SC
R204	Barreiras	0	20	39	14	2	25	43,1	19,7	23,40	2,684	Areia argilosa com vestígio de silte	SC
R205	Barreiras	0	20	39	14	2	25	42,0	19,1	22,90	2,684	Areia argilosa com vestígio de silte	SC
R206	Barreiras	0	20	39	11	3	26	42,2	19,6	22,60	2,672	Areia argilosa com vestígio de silte	SC
Média	Barreiras		20,56	39,22	10,44	2,56	27	41,34	20,27	21,08	2,673		
Desvio Padrão	Barreiras		1,13	0,44	2,19	1,01	1,73	1,04	0,95	1,72	0,013		
Coeficiente de Variação (%)	Barreiras		5,50	1,12	20,93	39,67	6,42	2,52	4,68	8,14	0,469		

Onde W_L é o limite de liquidez, W_P é o limite de plasticidade e IP é o índice de plasticidade, sendo dado por:

$$IP = W_L - W_P$$

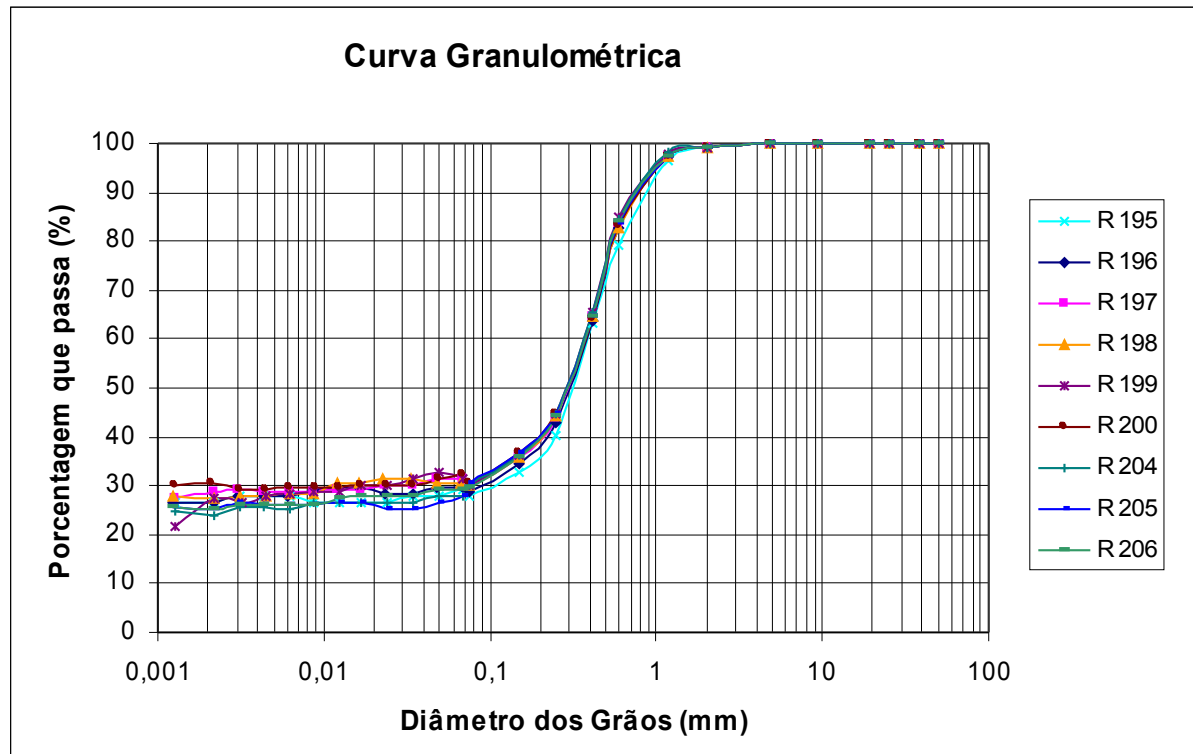


Figura 4.1: Curvas de distribuição granulométricas das amostras do solo sedimentar da formação Barreiras.

4.2 Ensaios para a Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada do Solo em Relação à Água e à Gasolina

Conforme já relatado, para a determinação da condutividade hidráulica saturada do solo em relação às fases água e gasolina, foram realizados seis ensaios para a água, sendo que três ensaios foram feitos utilizando a metodologia de carga constante e os outros três com a metodologia de carga variável, e para a gasolina foram realizados três ensaios utilizando a metodologia de carga constante.

4.2.1 Ensaios para a Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada dos Solos em Relação à Água

Na tabela 4.2 são apresentadas as condições iniciais dos três corpos de prova (AM1, AM2 e AM3), que foram moldados a partir do bloco indeformado retirado na região do CIA, Salvador.

A última linha da mesma tabela apresenta a média aritmética dos resultados dos ensaios realizados para a determinação da condutividade hidráulica saturada. Esta média refere-se ao resultado de dois ensaios: um utilizando a metodologia de carga constante e o outro de carga variável, que foram feitos em cada corpo de prova.

Tabela 4.2: Condições iniciais dos corpos de prova e média dos ensaios realizados (carga constante e carga variável) para a determinação da condutividade hidráulica saturada em relação à água.

Condições Iniciais do Corpo de Prova	AM1	AM2	AM3
Peso Total (g)	346,42	382,32	358,09
Teor de Umidade – w (%)	9,36	8,23	13,07
Grau de Saturação – S_r (%)	40,05	43,01	55,66
Altura Inicial – L (cm)	10,05	10,40	9,68
Diâmetro Inicial – D (cm)	4,94	4,95	5,04
Área Inicial – A (cm ²)	19,17	19,24	19,95
Volume Inicial – V (cm ³)	192,62	200,14	193,12
Peso Específico Total - γ_t (KN/m ³)	17,64	18,73	18,18
Peso Específico Seco - γ_d (KN/m ³)	16,45	17,69	16,42
Índice de Vazios (e)	0,62	0,51	0,63
Condutividade Hidráulica Saturada – média das duas determinações (cm/s)	3,03E-006	3,47E-006	3,04E-006

Como pode ser observado na tabela acima, o solo ensaiado possui uma condutividade hidráulica saturada média de 3,18E-006 (média aritmética dos três valores apresentados na tabela), que está em conformidade com a classificação apresentada na tabela 4.1 (areia argilosa com vestígios de silte).

4.2.2 Ensaio para a Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada do Solo em Relação à Gasolina

Na tabela 4.3 são apresentadas as condições iniciais dos corpos de prova (AM4, AM5 e AM6), que foram moldados a partir do bloco indeformado retirado na região do CIA, Salvador.

A última linha da mesma tabela apresenta os resultados dos ensaios realizados para a determinação da condutividade hidráulica saturada em relação à gasolina.

Tabela 4.3: Condições iniciais dos corpos de prova e resultados dos ensaios realizados (carga constante) para a determinação da condutividade hidráulica saturada em relação à gasolina.

Condições Iniciais do Corpo de Prova	AM4	AM5	AM6
Peso Total (g)	346,42	383,43	251,15
Teor de Umidade – w (%)	1,95	3,73	5,01
Grau de Saturação – S_r (%)	10,24	19,03	26,11
Altura Inicial – L (cm)	10,11	9,91	7,00
Diâmetro Inicial – D (cm)	4,92	5,21	4,96
Área Inicial – A (cm ²)	19,01	21,32	19,32
Volume Inicial – V (cm ³)	192,21	211,27	135,25
Peso Específico Total - γ_t (KN/m ³)	17,67	17,80	18,21
Peso Específico Seco - γ_d (KN/m ³)	17,71	17,49	17,67
Índice de Vazios (e)	0,51	0,53	0,51
Condutividade Hidráulica Saturada (cm/s)	6,22E-004	2,53E-004	1,18E-004

Conforme se pode observar na tabela 4.3, apesar do solo ensaiado ter apresentado uma condutividade hidráulica saturada média em relação à água de $3,18E-006$, observa-se que os valores obtidos de condutividade hidráulica saturada em relação à gasolina são bem mais elevados. Isso deve-se ao fato de que a gasolina além de apresentar valores de viscosidade e densidade ($0,62E-003$ Pa.s e $0,729$ g/ml, respectivamente) mais baixos do que da água, é também menos polar que a mesma ($\epsilon_{\text{água}} = 80,08$; $\epsilon_{\text{gasolina}} = 9,06$) e, conforme já relatado na seção de referencial teórico, o coeficiente de permeabilidade depende tanto das propriedades do solo, quanto do fluido.

Esses resultados apresentados anteriormente estão coerentes com a investigação realizada por Oliveira (2001), na qual a principal conclusão obtida é que a condutividade hidráulica saturada em solos constituídos de material argiloso é fortemente influenciada pelas propriedades físico-químicas dos líquidos percolantes e pelas características dos argilominerais que compõem o meio. Na pesquisa realizada por Oliveira (2001), foi medida a condutividade hidráulica saturada de cinco líquidos orgânicos, entre eles gasolina com álcool anidro, e água percolando meios compostos de areia com diversos percentuais de caulinita ou bentonita. Os líquidos utilizados, possuindo constante dielétrica variando num amplo intervalo, favorecem o entendimento de como essa propriedade afeta o fluxo saturado.

4.3 Determinação da Curva Característica de Sucção e da Curva de Condutividade Hidráulica Não Saturada

Como já foi observado, a realização desses ensaios para a determinação da curva característica de sucção visam a avaliação, através de comparação com os resultados obtidos nos testes realizados no equipamento desenvolvido. Esses ensaios foram realizados em um outro equipamento desenvolvido por Machado e Dourado (2001), no Laboratório de Geotecnia Ambiental, baseado na metodologia proposta por Fourie & Papageorgian (1995).

Conforme já relatado, a curva característica de sucção é definida como a relação entre o teor volumétrico de água (θ) e a sucção matricial ($u_a - u_w$) de um solo, sendo que a sua representação gráfica é geralmente realizada colocando-se a sucção em uma escala logarítmica (gráfico semilog).

Existem diferentes modelos propostos para ajuste da equação da curva característica, como por exemplo, as equações propostas por Van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994).

Neste trabalho foi utilizada a equação 4.1, proposta por Van Genuchten (1980), para ajuste da curva característica de sucção no solo, a partir dos dados experimentais obtidos de quatro ensaios realizados em amostras indeformadas.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_{sat} - \theta_r)}{[1 + |\alpha \cdot \psi_m|^n]^m} \quad (4.1)$$

Onde θ_r e θ_{sat} são os teores de umidade volumétricos residual e de saturação, respectivamente; ψ_m [$ML^{-1}T^{-2}$] é a sucção matricial; e α [$M^{-1}LT^2$], n e m são constantes empíricas.

Utilizando a relação $m=1-1/n$ para previsão de $K(\theta)$, Van Genuchten (1980) propõe a expressão 4.2 para previsão da função de condutividade hidráulica:

$$K(\theta) = K_0 \cdot \omega^l \left[1 - \left(1 - \omega^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (4.2)$$

Sendo ω a saturação efetiva do solo, dado pela equação 4.3; K_0 é a condutividade hidráulica do solo saturado e l é um parâmetro empírico que foi estimado por Mualem (1976) *apud* Van Genuchten (1980) como sendo aproximadamente igual a 0,5 para a maioria dos solos.

$$\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \quad (4.3)$$

As figuras de número 4.2 a 4.9 apresentam as curvas característica de sucção e de condutividade hidráulica obtidas para as amostras ensaiadas. Nestas figuras, conforme já relatado, os dados experimentais obtidos foram ajustados pelas equações 4.1 e 4.2. Os parâmetros de ajustes matemáticos encontraram-se na tabela 4.4 apresentada a seguir, sendo o α dado em kPa^{-1} .

Tabela 4.4: Parâmetros de ajuste da curva característica de sucção e da função de condutividade hidráulica.

	θ_r	θ_{sat}	m	n	α	k_{sat} (cm/s)
Anel 26	0,15	0,36	0,46	1,86	0,21	3,18E-06
Anel 33	0,13	0,34	0,34	1,51	0,16	3,18E-06
Anel A32	0,1	0,32	0,31	1,45	0,32	3,18E-06
Anel 3B	0,1	0,39	0,53	2,11	0,05	3,18E-06

De acordo com a tabela 4.4, os valores dos parâmetros de ajuste para a amostra de solo contida no anel 3B (última linha da tabela) não são tão semelhantes aos demais valores apresentados na tabela (parâmetros de ajuste obtidos para as outras três amostras de solo). Isto provavelmente ocorreu devido ao fato de que, apesar de todos os quatro anéis terem sido moldados a partir do mesmo bloco indeformado, o mesmo apresentava grumos de material mais argiloso, e o anel 3B foi moldado justamente na região do bloco que apresentava essas aglomerações de material argiloso.

Conforme se pode observar nas figuras a seguir, a equação de Van Genuchten ajustou-se muito bem aos pontos experimentais obtidos para as amostras ensaiadas. Pode-se observar que à medida que a sucção diminui, a umidade e a condutividade hidráulica aumentam, até chegar a valores máximos para a condição de saturação.

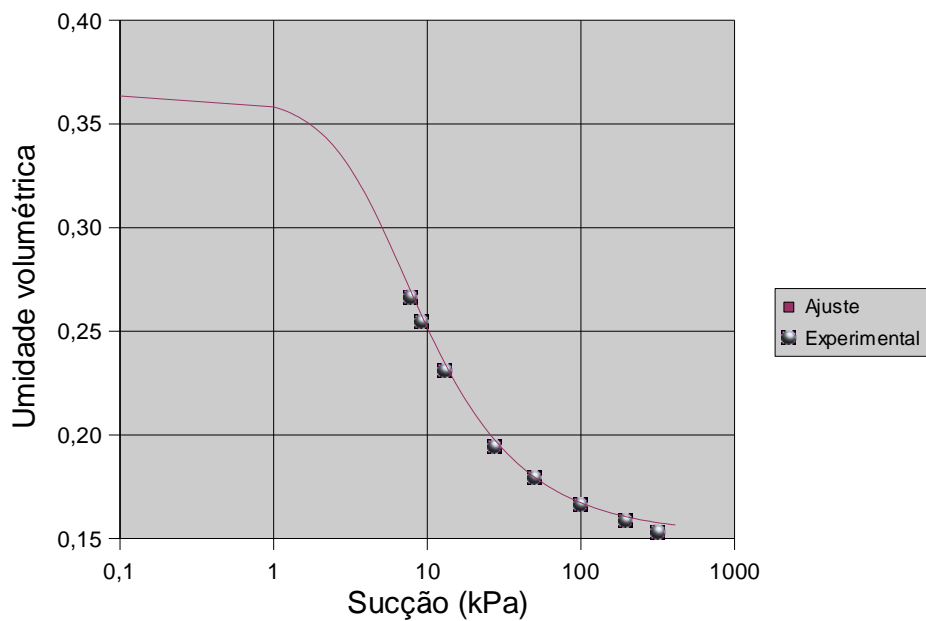


Figura 4.2: Curva característica de sucção da amostra de solo contida no anel 26.

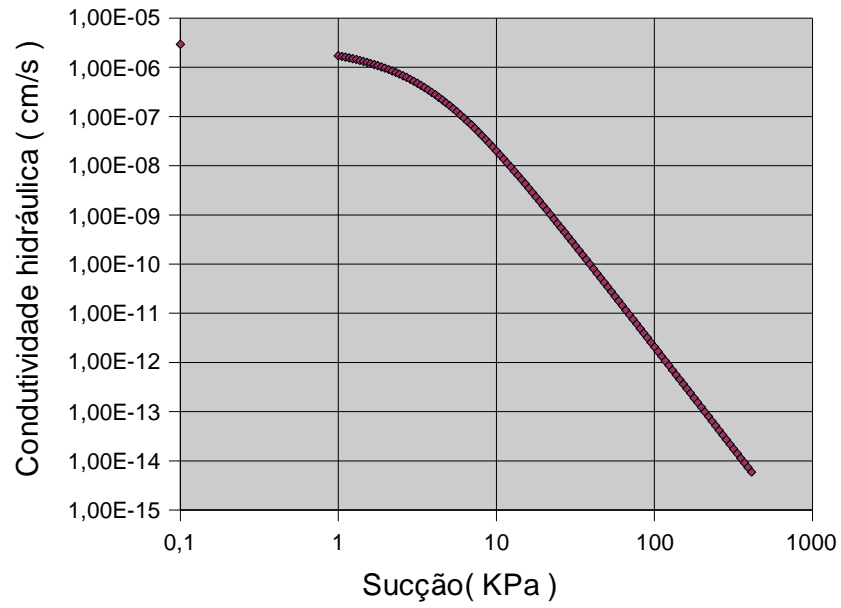


Figura 4.3: Curva de condutividade hidráulica da amostra de solo contida no anel 26.

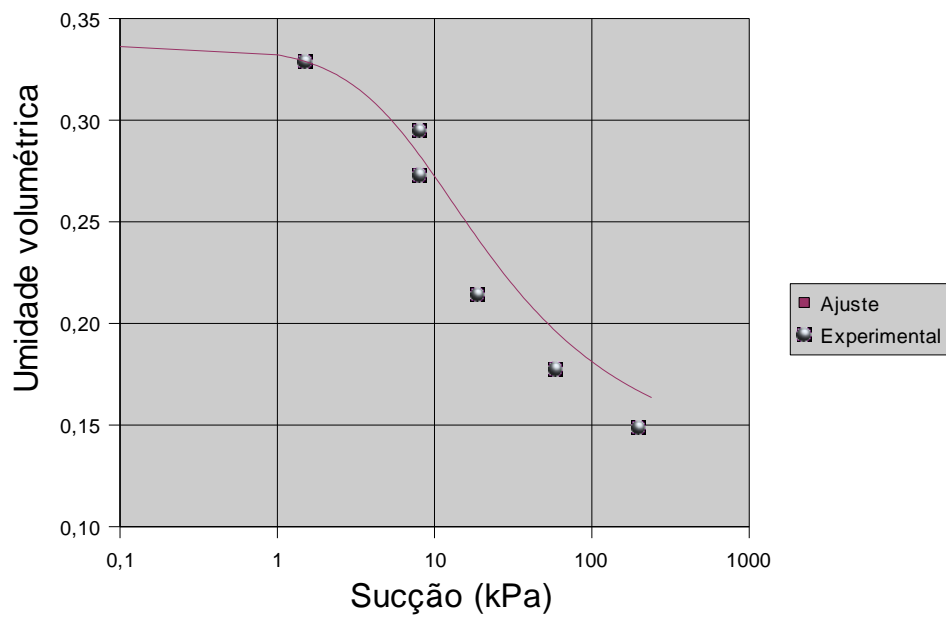


Figura 4.4: Curva característica de sucção da amostra de solo contida no anel 33.

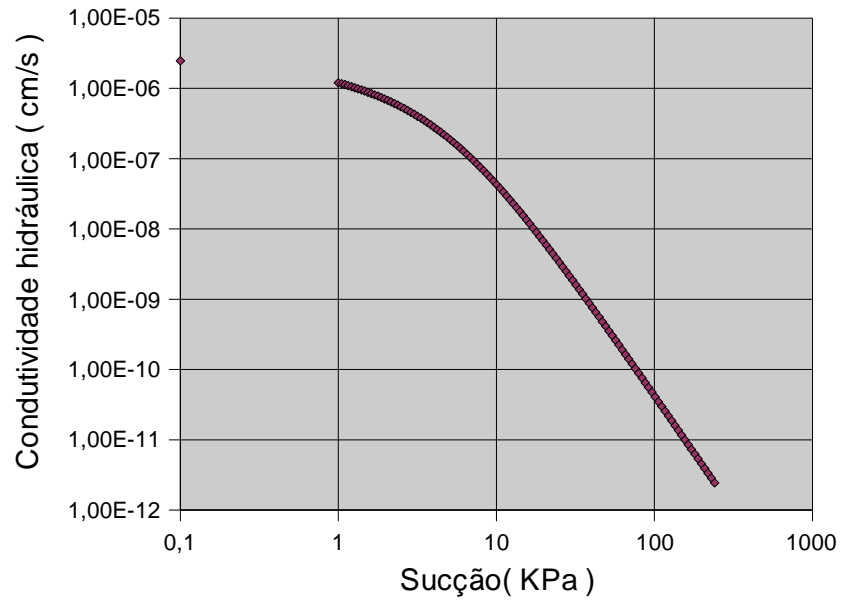


Figura 4.5: Curva de condutividade hidráulica da amostra de solo contida no anel 33.

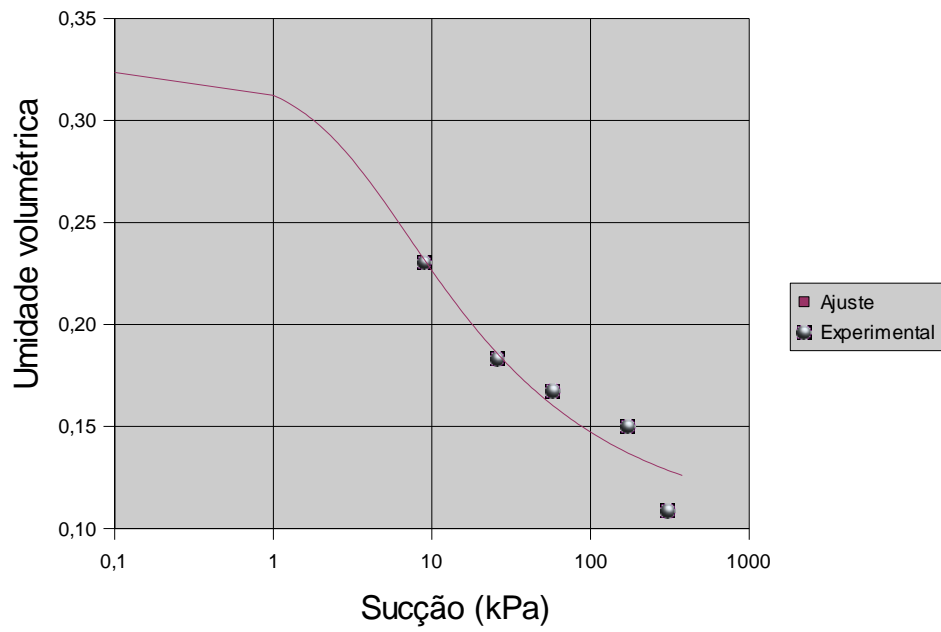


Figura 4.6: Curva característica de sucção da amostra de solo contida no anel A32.

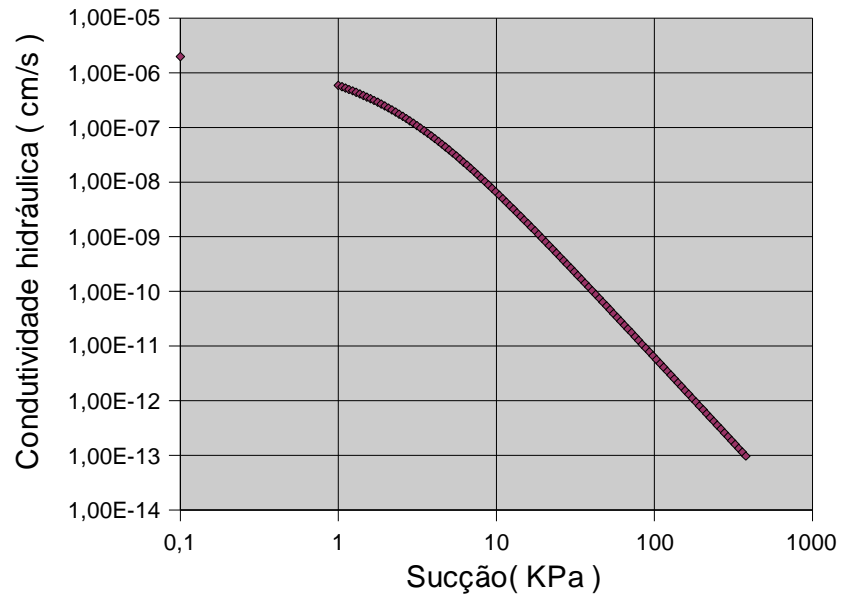


Figura 4.7: Curva de condutividade hidráulica da amostra de solo contida no anel A32.

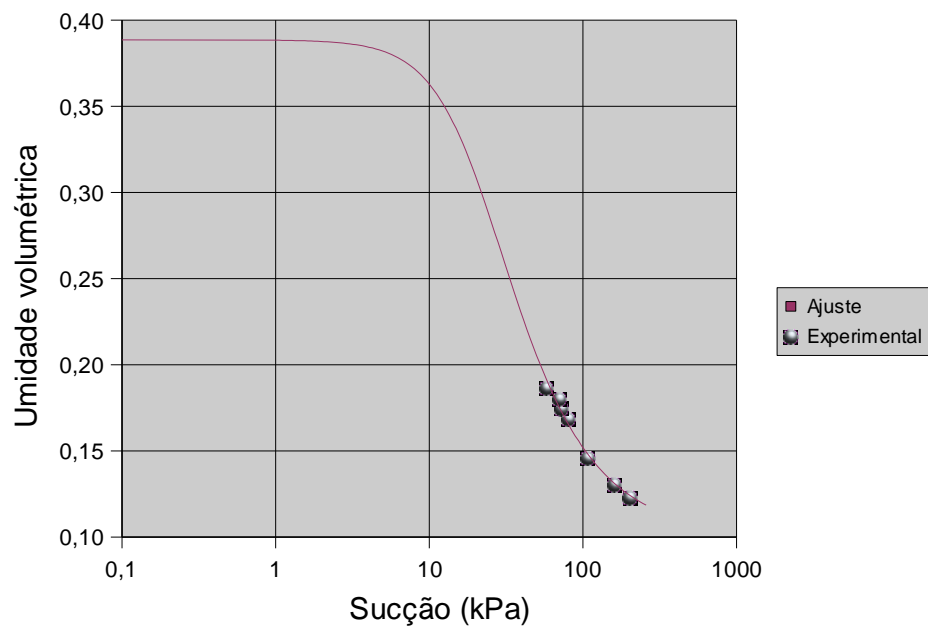


Figura 4.8: Curva característica de sucção da amostra de solo contida no anel 3B.

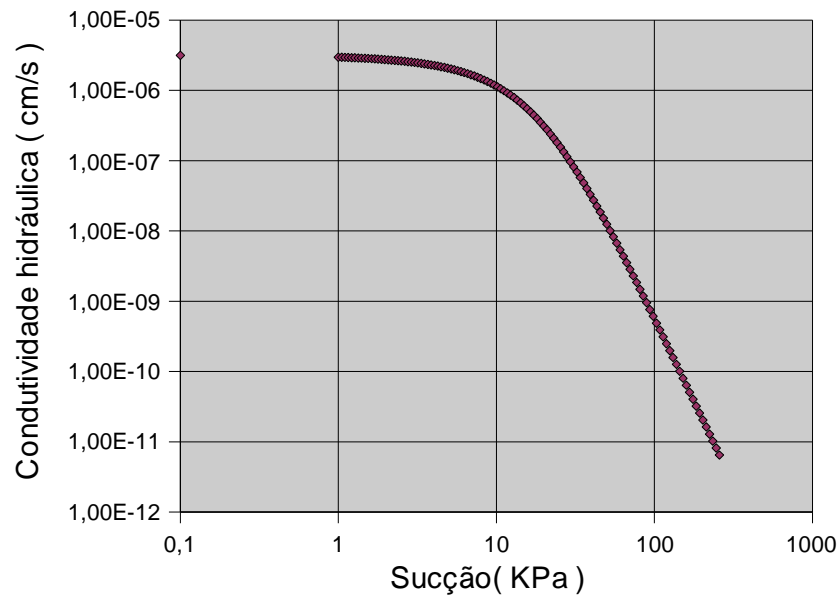


Figura 4.9: Curva de condutividade hidráulica da amostra de solo contida no anel 3B.

4.4 Pré-Operação e Aferição do Equipamento Desenvolvido

A saturação das linhas, com água e gasolina, ligadas ao sistema de aplicação e controle de pressão, foi realizada, conforme já relatado, através da circulação dos fluidos, até a eliminação visível das bolhas de ar. Neste processo não foi observado nenhum vazamento nas ligações das mangueiras com as conexões.

Acreditando-se que os vazamentos já haviam sido eliminados, corpos de prova foram montados, para a realização dos ensaios, utilizando filme de PVC, com várias camadas sobrepostas, para reduzir a possibilidade de ocorrência de vazamentos, conforme pode ser visto na figura 4.10.



Figura 4.10: Montagem do corpo de prova utilizando filme de PVC.

Após a montagem dos corpos de prova, as câmaras foram fechadas e preenchidas com água, para a aplicação da tensão confinante e saturação dos corpos de prova. Logo no início do processo de saturação dos corpos de prova, que foi feito por percolação do fluido (água ou gasolina), através dos anéis de bronze sinterizado, bastando para isso conectar as linhas de água ou gasolina às válvulas ligadas aos anéis de bronze sinterizado, e com a aplicação da tensão confinante, observou-se que estava ocorrendo fluxo de água da câmara (água para aplicação da tensão confinante) para dentro do corpo de prova. Inicialmente pensou-se que o vazamento era proveniente do filme de PVC utilizado para isolar o corpo de prova, porém após a realização de alguns testes, verificou-se que algumas conexões internas da câmara, que fazem a ligação do cabeçote com as saídas laterais da base, estavam danificadas, sem a devida vedação. As conexões, então, foram substituídas para a realização dos testes subsequentes. Neste procedimento perdeu-se seis corpos de prova.

Na saturação dos discos cerâmicos com gasolina e dos anéis cerâmicos com água, observou-se também a ocorrência de vazamentos em alguns pedestais e cabeçotes. Estes vazamentos estavam localizados entre as paredes das cavidades para alojar as peças cerâmicas e as mesmas, devido a uma colagem mal efetuada.

Isto ocorreu devido ao acabamento das peças cerâmicas que não ficou muito regular, pois as mesmas foram cortadas utilizando broca de dentista. Esta irregularidade das peças resultou, muitas vezes, em um espaço muito grande entre a parede da cavidade e a peça cerâmica para ser preenchido com o adesivo epóxi, ficando alguns vazios que eram difíceis de serem detectados visualmente.

Como ocorreram muitos vazamentos, optou-se por desgastar com a broca de dentista a região colada, gerando uma cavidade relativamente uniforme, onde se procedeu uma nova colagem, melhorando o acabamento e, conseqüentemente, eliminando os vazamentos. Isto foi feito em todos os cabeçotes e pedestais.

Após a eliminação desses vazamentos foi realizado mais um teste seguindo os procedimentos indicados nos itens 3.2.1 e 3.2.2. Na realização desse teste perdeu-se mais dois corpos de prova, devido ao rompimento do filme de PVC na região entre a extremidade superior do corpo de prova e o cabeçote do permeâmetro. Isso ocorreu porque alguns corpos de prova ficaram com o topo e base um pouco irregulares devido à moldagem mal feita. Dos dois corpos de prova restantes, um foi saturado com água, sendo que o segundo foi saturado com gasolina. O gráfico apresentado na figura 4.11 exibe o resultado obtido a partir da realização desse último teste.

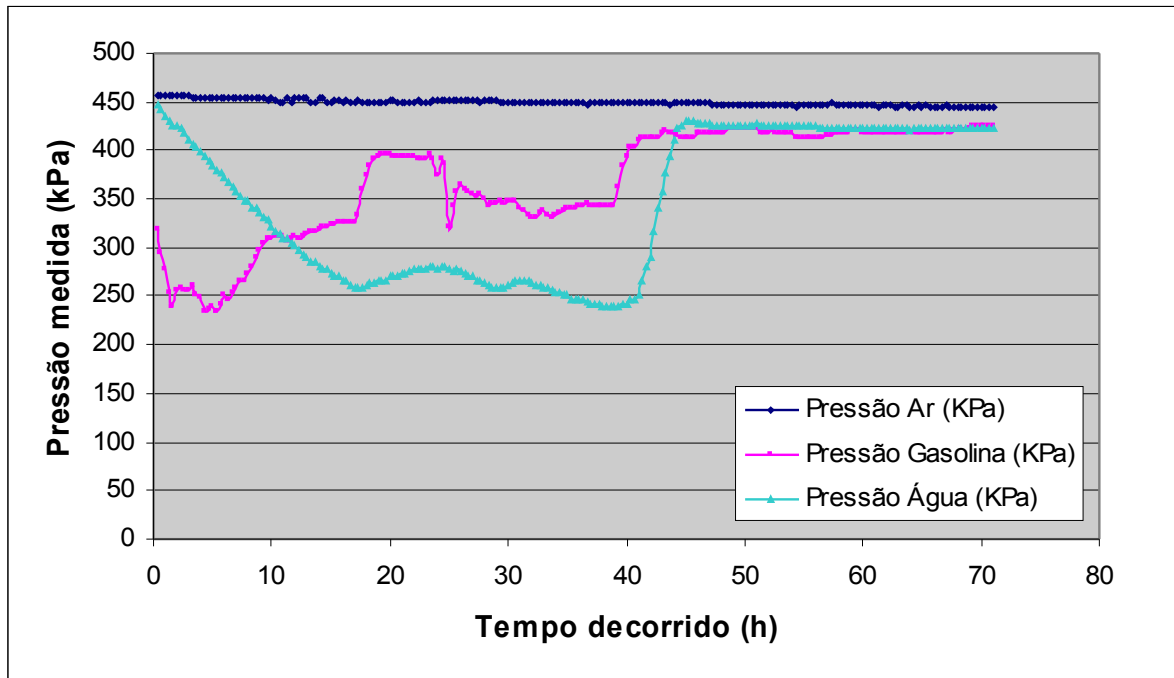


Figura 4.11: Pressões medidas em cada fase em função do tempo de realização do ensaio.

Conforme pode ser observado na figura 4.11, foi aplicada uma pressão de ar de aproximadamente 450 kPa nos dois corpos de prova. Com os quatro registros da câmara ligados às linhas de água abertos e com a mangueira da seringa conectada ao sistema, observou-se um aumento de pressão na água, até atingir o valor igual ao da pressão de ar aplicada, porém o mesmo não ocorreu no corpo de prova saturado com gasolina (a pressão na gasolina só atingiu o valor de 325 kPa). Isso aconteceu porque na hora da aplicação da pressão de ar, o registro de ligação com a interface de gasolina havia permanecido aberto, o que provocou a drenagem do fluido para a interface. O registro foi logo fechado, assim que a falha foi percebida. Após determinado tempo de realização do teste (aproximadamente 2 horas para o corpo de prova saturado com gasolina e 20 horas para o corpo de prova saturado com água), com a bomba extraíndo os fluidos dos dois corpos de prova, a pressão nos fluidos começa a subir e ficar oscilando. Isso aconteceu devido a ocorrência de vazamentos na parte interna do permeâmetro, o que foi confirmado após a finalização do teste e abertura das câmaras. A gasolina, que é um poderoso solvente, dissolveu a cola utilizada para fixar as pedras cerâmicas, provocando o vazamento. Esse processo foi mais demorado no permeâmetro que continha o

corpo de prova saturado com água, porque o volume de gasolina em contato com a cola foi menor, visto que nesse caso a gasolina só foi utilizada para saturar as pedras cerâmicas e membranas hidrofóbicas.

Com todos esses problemas ocorridos, não houve tempo hábil de se obter uma curva característica de sucção, a partir do equipamento desenvolvido nesse trabalho, para a realização de uma avaliação mais acurada, através de comparação com os resultados obtidos nos ensaios realizados no equipamento desenvolvido por Machado e Dourado (2001).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa foi desenvolvida visando o desenvolvimento de um equipamento para a determinação experimental da curva característica de sucção, e a determinação experimental da permeabilidade efetiva a fluidos imiscíveis em sistemas multifásicos (três fases), especificamente gasolina, água e ar, utilizando a metodologia de vazão constante. Para tanto foi construído, no Laboratório de Geotecnia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA, um equipamento constituído de quatro permeâmetros de parede flexível, sistema de medição de vazão nas três fases, sistema de aquisição de dados automatizado, sistema de aplicação e controle de pressão em todas as fases de forma independente e sistema de aplicação de vazão constante (bomba de fluxo). Trata-se de um equipamento de alta complexidade, o qual poderá resultar em aquisição de patente. A seguir são apresentadas as conclusões obtidas como resultado deste trabalho, assim como algumas recomendações para o aperfeiçoamento do equipamento, que serão seguidas como parte das atividades do projeto de pesquisa maior, no qual este trabalho está inserido.

5.1 Conclusões Relativas ao Equipamento Desenvolvido

5.1.1 Principais Aspectos Positivos

Os testes realizados indicam que o equipamento desenvolvido e as técnicas experimentais implementadas podem se constituir em importantes ferramentas para obtenção de dados quanto a interação e transporte da gasolina em solos não saturados.

Como o sistema de aplicação e controle de pressão em todas as fases é de forma independente, o equipamento foi projetado com a possibilidade de ser adaptado ao estudo do transporte de outros tipos de poluentes imiscíveis, em solos não saturados. Isto pode ser feito apenas trocando-se os pedestais, que são parafusados à base, e os cabeçotes por outros similares e saturando-se as pedras

cerâmicas com o contaminante de interesse, conforme o mesmo procedimento descrito neste trabalho.

O sistema de aplicação de vazão constante, que é constituído por uma bomba de fluxo, possibilita controlar pequenas vazões de forma precisa, ao invés de medí-las com as conseqüentes dificuldades experimentais, sendo possível a determinação de coeficientes de permeabilidade em gradientes hidráulicos suficientemente pequenos, garantindo desta forma mínimas deformações volumétricas do corpo de prova, conforme Delgado (2001).

Todas as ligações das mangueiras com as unidades constituintes do equipamento são feitas através de engates rápidos, com dupla vedação, sem haver a necessidade de contato do operador com os fluidos envolvidos no experimento, o que se constitui numa grande vantagem por tratar-se de fluidos altamente contaminantes e perigosos à saúde humana.

5.1.2 Principais Aspectos Negativos

O principal aspecto negativo identificado nesta pesquisa é a ocorrência de vazamentos. Devido a alta complexidade do equipamento, o mesmo dispõe de muitas entradas e saídas nos quatro permeâmetros e dezenas de conexões, o que possibilita a ocorrência desses vazamentos.

Outro aspecto negativo que deve ser considerado é a incompatibilidade da gasolina com alguns materiais utilizados como por exemplo a cola empregada para fixar as pedras cerâmicas.

Há também a desvantagem de ser um equipamento de custo elevado e de não existir uma metodologia estabelecida para a determinação da taxa de velocidade a ser utilizada na bomba de fluxo.

5.2 Recomendações Para o Aperfeiçoamento do Equipamento

Conforme já foi relatado, para obter o valor de entrada de ar necessário para a realização dos ensaios foram utilizadas placas cerâmicas com valor de entrada de ar de 500 kPa, tamanho de poro de 0,5 μm e condutividade hidráulica saturada nominal de $1,21 \times 10^{-7}$ cm/s. Como a condutividade hidráulica saturada das placas cerâmicas é baixo em relação aos tipos de solos mais granulares, como areia por exemplo, isto provoca uma perda de carga elevada entre o solo e a placa cerâmica. Esta perda de carga influencia nos valores de permeabilidade obtidos através dos ensaios, visto que só é possível determinar a permeabilidade no solo a partir de determinado valor, que é igual ou menor do que o valor de condutividade hidráulica saturada das placas cerâmicas. Isto ocorre porque os transdutores de pressão estão localizados acima e abaixo dos pedestais e cabeçotes, respectivamente, onde estão alojadas as placas cerâmicas. Esta é a principal deficiência detectada no sistema construído, em vista disso, recomenda-se, como parte das atividades do projeto de pesquisa maior, no qual este trabalho está inserido, a implementação de um sistema de medição de pressões que estão agindo no próprio corpo de prova, de forma a quantificar de forma mais real as pressões atuantes, sem a influência das placas cerâmicas. Isto pode ser feito com a utilização de micro piezômetros (tensiômetros), ligados diretamente ao corpo de prova de solo. A colocação dos micro piezômetros possibilitará a realização de ensaios em diversos tipos de solos, com características que vão desde sedimentos arenosos, sem a presença de finos, até o caso de solos expansivos, com grande teor de argila. Assim, será possível relacionar os resultados obtidos com a caracterização básica de cada material, através de relações empíricas que poderão ser de grande utilidade quando da previsão de comportamento em outros tipos de solos.

Recomenda-se também que cola utilizada para fixar as pedras cerâmicas seja substituída por outra que seja compatível com a gasolina, como por exemplo Durepox.

Os dados obtidos nos ensaios podem ser utilizados, em trabalhos posteriores, para a calibração de parâmetros em modelos numéricos, o que possibilitará a realização de diversas simulações numéricas, considerando

diferentes condições de campo (diferentes profundidades do lençol freático, tipos de solo, tipos de fonte de poluente, etc).

Os dados obtidos nas simulações numéricas das condições de campo poderão ser empregados na elaboração de um programa de micro-computador, onde, dadas algumas características básicas do solo e dos contaminantes e as condições de contorno do problema, será possível se ter uma estimativa do tempo de chegada do poluente no lençol freático, do nível de contaminação residual no solo, assim como uma indicação das melhores ações ou técnicas de remediação a serem empregadas.

REFERÊNCIAS

ANP, **Agência Nacional de Petróleo**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/postos/consulta>>. Acesso em: 9 de maio de 2005.

BARKER, J. F.; HUBBARD, L. A.; VOORO, K. A. The Influence of Methanol in Gasoline Fuels on the Formation of Dissolved Plumes, and on the Fate and Natural Remediation of Methanol and BTEX dissolved in Groundwater. In: **CALABRESE, E. J., KOSTECH, P. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater**. Volume II. Tokyo: Ed. Lewis Publishers, 1990. Chapter 7, p. 103-113.

BOTELHO, A. P. D., FILHO, W. L. O., GOMES, R. C. Determinação Experimental da Relação Sucção X Teor de Umidade Volumétrica em Solos com a Utilização de Bomba de Fluxo. In: **4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**. Porto Alegre. v.1. p.193 –307. 2001.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 1.469, de 29 de dezembro de 2000. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 22 de fevereiro de 2001, nº 38, Seção 1, pág. 39.

BROWN, K. W., THOMAS, J. C. Conductivity of Three Commercially Available Clays to Petroleum Products and Organics Solvents. **J. of Hazardous Wastes**. Volume 1, Number 4, Pp 546-553, 1984.

CETESB - **Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo**. Altura:1675 pixels. Largura 2230 pixels. 300 dpi. 157 kb. Formato JPEG. Disponível em:<http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/postos/questao_ambiental.a.sp>. Acesso:16 de dezembro de 2004.

CORSEUIL, H. X., FERNANDES, M. Efeito do Etanol no Aumento da Solubilidade de Compostos Aromáticos Presentes na Gasolina Brasileira. In: **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Vol. 4, nº 1 e 2, p. 71-75, 1999.

CORSEUIL, H. X., MARTINS, M. D. M. Contaminação de Águas Subterrâneas por Derramamentos de Gasolina: O Problema é Grave? In: **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Vol. 2, No. 2, Abril/Junho. 1997.

DELGADO, C. W.C. **Desenvolvimento de um Equipamento para o Estudo da Permeabilidade Efetiva em Meios Multifásicos**. 2001. 273 f. Tese de Doutorado Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dep. Engenharia Civil.

DEMOND, A. H. **Capillarity in two-phase liquid flow of organic contaminants in groundwater**. 1988. 210 f. Dissertation Stanford University, Department of Civil Engineering.

DUARTE, K. S. **Avaliação do Risco Relacionado à Contaminação dos Solos por Hidrocarbonetos no Distrito Federal**. 2003. 259 f. Tese de Doutorado Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF.

FERNANDEZ, F., QUIGLEY, R. W. Hydraulic Conductivity of Natural Clays Permeated with Simple Liquid Hydrocarbons. **Canadian Geotechnical Journal**. Volume 22, Pp 205-214, 1985.

FETTER, C. W. **Contaminant Hydrogeology**. Macmillan Publishing Company. 1992

FREDLUND, D. G., VANAPALLI, S. K., XING, A., PUFAHL, D. E. Predicting the Shear Strength Function for Unsaturated Soils Using the Soil Water Characteristic Curve. **Proc. of the 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils**. Paris. 1995.

FREDLUND, D. G. AND XING, A. Equations for the Soil Water Characteristic Curve. **Can. Geotechnical Journal**: 31 (4), pp. 521-532. 1994.

FOURIE, A. B. & PAPAGEORGIAN, G. A technique for the rapid determination of the soil moisture retention relationship and hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Proc. of the 1st Int. Conf. on Unsaturated soils**. Paris. 1995.

GUERRA, A. M., NASCIMENTO, S. A. de M. **Diagnóstico do Grau de Comprometimento das Águas do Aquífero Freático de Salvador Causado por Vazamentos em Postos de Gasolina – Área Piloto: Bacia do Rio Camurujipe**. 1999. 47 f. Relatório Final (Convênio: UFBA/CADCT/EMBASA). Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

KAIPPER, B. I. A. **Influência do Etanol na Solubilidade de Hidrocarbonetos Aromáticos em Aquíferos contaminados por Óleo Diesel**. 2003. 179 f. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

LIDARDI, P. L. **Potenciais de Água no Solo**. Série Didática n° 007, Departamento de Engenharia Rural, Piracicaba, São Paulo, 1993.

MACHADO, S. L. **Aplicação de Conceitos de Elastoplasticidade a Solos Não Saturados**. 1998. 361 f. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MACHADO, S. L., DOURADO, K. A. Novas técnicas para obtenção da curva característica de sucção do solo. In: **4o Simpósio Brasileiro de solos não saturados**, Porto Alegre. v.1. p.325 – 336. 2001.

MENDONÇA, A. L. **Simulação Numérica de Escoamentos Incompressíveis Bifásicos de Fluidos Não-Newtonianos e Imiscíveis em Meios Porosos Via Método dos Elementos Finitos**. 2003. 147 f. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Dep. Engenharia Civil.

OLIVEIRA, J. C. S. de. **Contaminação de Sedimentos Argilosos por Combustíveis Automotivos: Problemas de Avaliação da Permeabilidade**. 2001. 116 f. Tese de Doutorado em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

PENNER, G. C. **Estudos laboratoriais da contaminação do solo por gasolina com o uso de detetor de fotoionização**. 2000. 117 f. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PRESA, E. P. **Deformabilidad de las Arcilas Expansivas Bajo Succión Controlada**. 1982. Tesis Doctoral, E. T. S. de Ing. de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politecnica de Madrid.

PRESA, E. P. **Geotecnia Ambiental – Meios Não Saturados e Sucção nos Solos, Características e Comportamento da Água do Solo**. Apostila da Disciplina Geotecnia Ambiental. Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica – DCTM. Salvador, 1998.

RAY, R. P., MORRIS, K. B. Automated Laboratory Testing for Soil/Water Characteristic Curves. In: **Proceedings of the First International Conference in Unsaturated Soils**, UNSAT 95. Alonso e Delage (eds). v. 1. p. 547 – 552. 1995.

SILVEIRA, C. S. **Infiltração e Transporte de Solutos na Zona Não Saturada de um Solo Florestal – Parque Nacional da Tijuca RJ.** 2004. 217 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COOPE, Rio de Janeiro.

SOTO, M. A. A. **Estudo da Condutividade Hidráulica em Solos Não Saturados.** 1999. 120 f. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics.** John Willey & Sons, New York, 700 p. 1948.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equations for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**: 44, pp. 892-898. 1980.

YONG, R. N., MOHAMED, A. M. O., WARKENTIN, B. P. **Principles of Contaminant Transport in Soils.** Elsevier Science Publishers B. V. 1992.

ZNIDARCIC, D., ILLANGASEKARE, T., MANNA, M. Laboratory Testing and Parameter Estimation for Two-Phase Flow Problems. **In: Geotechnical Engineering Congress**, Mc Clean et al. (eds). ASCE Geotechnical Special Publication. N° 27, v. 2. p. 1189 – 1099. 1991.

APÊNDICE I

PROJETO DO PERMEÂMETRO DE PAREDE FLEXÍVEL

APÊNDICE II

PROJETO DA SERINGA DA BOMBA DE FLUXO