

Universidade de São Paulo  
Instituto de Geociências

**TRANSPORTE DE VAPORES DERIVADOS DE PETRÓLEO EM  
LATOSSOLO VERMELHO NO ESTADO DE SÃO PAULO**

Bruna Cuccurullo Pioli

Orientador: Prof. Dr. Fernando Marinho

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA**

(TF - 2015 / 07)

São Paulo  
2015

Universidade de São Paulo  
Instituto de Geociências



**TRANSPORTE DE VAPORES DERIVADOS DE PETRÓLEO EM  
LATOSSOLO VERMELHO NO ESTADO DE SÃO PAULO**

Bruna Cuccurullo Pioli

Orientador: Prof. Dr. Fernando Marinho

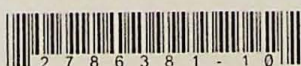
MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF - 2015/07)

São Paulo

2015

IGc-Instituto de Geociências



Transporte de vapores derivados de petróleo em solos  
vermelho no estado de São Paulo. *m26506*



TF  
P662  
BC.t



U.S. DEPARTMENT OF JUSTICE  
OFFICE OF THE INSPECTOR GENERAL

TRANSPORTATION AND INFRASTRUCTURE  
LAW ENFORCEMENT AND PUBLIC SAFETY

U.S. DEPARTMENT OF JUSTICE

OFFICE OF THE INSPECTOR GENERAL

U.S. DEPARTMENT OF JUSTICE

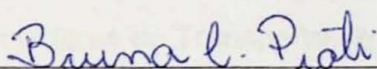
OFFICE OF THE INSPECTOR GENERAL

U.S. DEPARTMENT OF JUSTICE

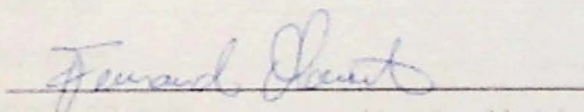
OFFICE OF THE INSPECTOR GENERAL

Universidade de São Paulo  
Instituto de Geociências

**TRANSPORTE DE VAPORES DERIVADOS DE PETRÓLEO EM  
LATOSSOLO VERMELHO NO ESTADO DE SÃO PAULO**



Bruna Cuccurullo Pioli



Orientador: Prof. Dr. Fernando Marinho

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA**

(TF - 2015/07)

São Paulo  
2015



## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE COLETA DO LATOSSOLO E CONTEXTO GEOLÓGICO.....	4
3. OBJETIVOS .....	6
4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
4.1. Zona Vadosa .....	7
4.1.1. Grau de saturação do solo.....	8
4.1.2. Movimento de água no solo.....	8
4.1.3. Condutividade hidráulica em um meio insaturado.....	9
4.1.4. Potencial hidráulico.....	10
4.2. Processos Controladores do Transporte de Substâncias no Solo.....	11
4.2.1. Advecção.....	11
4.2.2. Difusão .....	11
4.2.3. Dispersão .....	12
4.3. Sucção de Água no Solo .....	14
4.3.1. Sucção matricial .....	14
4.3.2. Sucção osmótica .....	16
4.4. Sucção e Umidade do Solo .....	17
4.4.1. Curvas de retenção da água no solo .....	18
4.4.2. Fenômeno de histerese no solo.....	19
4.4.3. Modelagem da curva de retenção.....	20
4.5. Solos Argilosos Não Saturados e o Fluxo Multifásico .....	21
4.5.1. Dinâmica de fluidos em solo argiloso não saturado .....	21
4.5.2. Fluxo Multifásico.....	24
4.6. Hidrocarbonetos Derivados de Petróleo .....	29
4.7. Latossolos Brasileiros.....	32
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	35
5.1. Coleta do Latossolo Vermelho e Caracterização- Primeira Etapa.....	35
5.1.1. Análise granulométrica .....	37
5.1.2. Limites de liquidez e plasticidade.....	38
5.1.3. Ensaio de compactação do solo .....	39
5.1.4. Determinação de espaços vazios da areia .....	39

5.2. Geração das Curvas de Retenção- Segunda Etapa .....	41
5.2.1. Colunas de solo.....	41
5.2.2. Placa de sucção .....	45
5.2.3. Placa de pressão.....	47
5.3. Colunas de Difusão- Terceira Etapa .....	49
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	52
6.1. Caracterização Geotécnica do Latossolo Vermelho.....	52
6.2. Curvas de Retenção.....	54
6.3. Colunas de Difusão .....	58
7. CONCLUSÕES.....	61
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família que constitui a base de tudo o que sou. Pelo apoio, força e dedicação de meus pais que sempre se sacrificaram por mim. Dedico este trabalho á eles.

Às minhas tias Cristina, Denise e á minha prima Fabiana pelo teto e todo o carinho em boa parte da graduação. Aos meus avós e tia Gra por toda a ajuda sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Marinho, pela preocupação, ensinamentos, compreensão e paciência ao longo do ano. Aos técnicos do Laboratório de Mecânica de Solos, Val, Antônio e Joaquim, que me ensinaram e me ajudaram em todos os ensaios realizados. Hoje considero todas as pessoas do laboratório, grandes amigos.

Ao Geol. Alexandre Maximiano que me apresentou ao projeto e por todas as suas orientações.

À turma 52, em especial aos Astenosféricos que fizeram parte de grandes momentos em toda a graduação. Aos meus veteranos preferidos Bobo, Poli e Cotoco, pela grande amizade, conselhos e risadas em todos esses últimos anos.

Ao Frota e Toscana que sempre estiveram do meu lado e tornam cada momento mais mais divertido e leve, além de todos os conselhos e amizade incondicional. Sempre terei um carinho especial por vocês.

Á Café, por toda a ajuda, amizade e conselhos. Praticamente meu anjo da guarda em São Paulo. A graduação não seria a mesma sem você.

À minha irmãzinha de outra mãe, à Sabuguinho, pela eterna amizade, pela presença em momentos muito bons e também muito ruins, por todos os conselhos e pela ajuda enorme, não só com o Trabalho de Formatura, mas também em praticamente tudo o que fiz desde que cheguei em São Paulo. Vou levar sua amizade para o resto da vida e você sempre será um pedaço da minha família.

E por fim à todas pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, seja por palavras de apoio ou puxão de orelha.



## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo do transporte de compostos orgânicos voláteis (COV) derivados de petróleo em solo típico do Estado de São Paulo. O estudo foi realizado em três etapas: a caracterização do solo, a geração de curvas de retenção de líquidos para água pura e gasolina pura e ensaios que visavam a caracterização do transporte unidirecional de vapor através do solo.

Foram utilizados dois solos: O primeiro, areia padronizada, serviu de teste para o sistema de obtenção dos parâmetros, o segundo, constituído por latossolo Vermelho para representar parte dos solos que estão sujeitos a problemas com contaminação de gasolina no estado de São Paulo. Esse solo possui características texturais que estabelecem condições apropriadas para o estudo. Sua caracterização foi realizada através de ensaios de granulometria e compactação, além da definição dos Limites de Liquidez e Plasticidade.

As curvas de retenção de líquidos foram obtidas através do método de Coluna de Solo e das técnicas de Placa de Sucção e de Pressão desenvolvidos no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP. Os resultados revelaram que água pura permanece retida nos poros em maior quantidade do que a gasolina, para o mesmo valor de sucção indicando que um eventual vazamento de gasolina induz um maior volume de gasolina para o lençol freático.

Os estudos relacionados ao transporte unidirecional de vapor (COV) foram desenvolvidos através de um método que permitiu a quantificação de amostras de vapor as quais foram transportadas no solo durante certo intervalo de tempo. As amostras de vapor foram monitoradas por um detector de fotoionização (PID - *photoionization detector*). Os ensaios foram realizados com diferentes teores de umidade do solo e com as amostras preparadas com a mesma densidade seca. Foi possível definir o papel do grau de saturação na migração do vapor na areia e no latossolo. Os estudos demonstraram que os procedimentos desenvolvidos e utilizados permitem uma caracterização do fluxo de vapor em solos, e que estudos complementares irão possibilitar uma completa compreensão do movimento de COV no solo.



## ABSTRACT

*This work aimed to study the transport of volatile organic compounds (VOCs) petroleum products in typical soil of São Paulo State. The study was conducted in three stages: the characterization of the soil, the generation of water retention curves for pure water and pure gasoline and tests aimed at characterizing the unidirectional transport steam through the soil.*

*Two soils were used: The first, standardized sand, served as a test for the parameter retrieval system, the second consisting of Red Latosol to represent part of the soil that are subject to problems with gasoline contamination in the state of São Paulo. This soil has textural characteristics which provide conditions appropriate for the study. His characterization was performed through grading and compaction tests and the definition of liquidity and plasticity limits.*

*The water retention curves were obtained through the soil column method and the suction plate techniques and pressure developed in the Laboratory of Soil Mechanics, Department of Civil Engineering at the Polytechnic School of USP. The results revealed that pure water remains trapped in the pores in greater quantities than gasoline, for the same amount of suction, what indicates that an eventual leak of gasoline induces a higher volume of gasoline into the water table.*

*Studies related to the unidirectional transport of gases have been developed using a method allowing the quantification of vapor samples which have been transported in the soil for a certain time interval. The vapor samples were monitored by a photoionization detector (PID). The experiments were performed using soils with different values of moisture and the samples prepared with the same dry density. It was possible to define the role of the degree of saturation in the vapor migration in the sand and latosol. The studies demonstrated that developed and utilized procedures permit a characterization of the vapor flux in soils and that further studies will enable a full understanding of the VOC movement in soil.*



## 1. INTRODUÇÃO

Há muito tempo se anuncia a importância da proteção ao meio ambiente, incluindo seus componentes abióticos (ar, solo/subsolo e águas subterrâneas/superficiais) e bióticos, devido à existência de contaminantes gerados a partir de atividades antrópicas, sejam eles provenientes da disposição inadequada de resíduos domiciliares, urbanos, industriais, agrícolas ou rejeitos de mineração. Outras importantes fontes de contaminação compreendem os derrames e vazamentos de combustíveis orgânicos derivados de petróleo.

Conseqüentemente, os contaminantes, por meio de sua mobilização no meio ambiente, alcançam as águas subterrâneas, comprometendo, muitas vezes, importantes reservas deste bem natural. A CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2010) aponta que o uso das águas subterrâneas para abastecimento público tem aumentado principalmente devido à sua abundância e qualidade, como também em conseqüência da deterioração da qualidade das águas superficiais, o que reforça a necessidade de se evitar a contaminação do solo que pode levar a afetar a qualidade da água subterrânea

Segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1993, a poluição ambiental é entendida como a degradação da qualidade ambiental, resultante de atividades que direta ou indiretamente:

- 1) prejudicam a saúde, segurança e o bem-estar das populações;
- 2) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- 3) afetem desfavoravelmente a biota;
- 4) afetem as condições sanitárias do meio ambiente.

Como mencionado anteriormente, um tipo específico de contaminação do solo e água subterrânea é fruto de vazamentos de produtos derivados de petróleo. A fonte de contaminação pode ser proveniente de Sistemas de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC) ou de acidentes durante o transporte, o que gera uma grande área de possível contaminação em caso de acidentes. Portanto, é fundamental entender o impacto que estas misturas têm no ambiente, pois podem contaminar as águas subterrâneas utilizadas no abastecimento para consumo humano.

Um SASC compreende as instalações de armazenamento e distribuição de combustíveis dos postos de serviço, como os tanques e tubulações subterrâneas e as bombas de abastecimento. Os vazamentos advêm, na maioria dos casos, da corrosão de elementos do SASC (tanques e tubulações), de irregularidades operacionais durante a comercialização dos combustíveis e de acidentes decorrentes

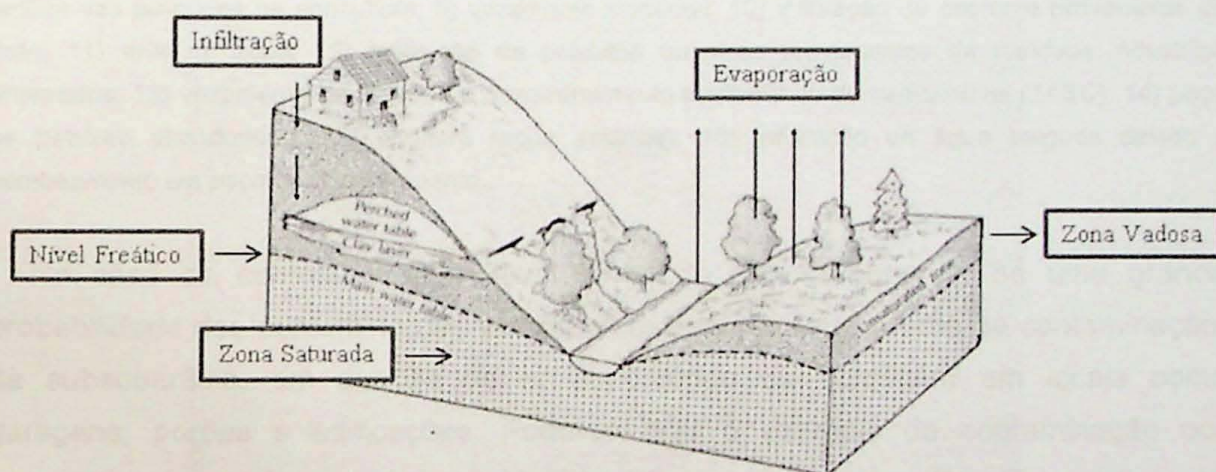


de processos geológicos-geotécnicos, como erosão e colapsividade do solo, resultando em rompimento ou deformações de dutos que conduzem os produtos.

Oliveira (1999) aponta três impactos principais decorrentes de vazamentos de combustíveis derivados de petróleo:

- 1) contaminação do solo e água subterrânea por compostos tóxicos (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), constituintes da gasolina e óleo diesel;
- 2) risco de incêndios e explosões devido à presença de combustíveis, nos estados líquido e gasoso, em garagens subterrâneas e outras obras civis;
- 3) riscos à saúde humana pela possível ingestão de água contaminada e inalação de vapores dos compostos orgânicos presentes nos combustíveis.

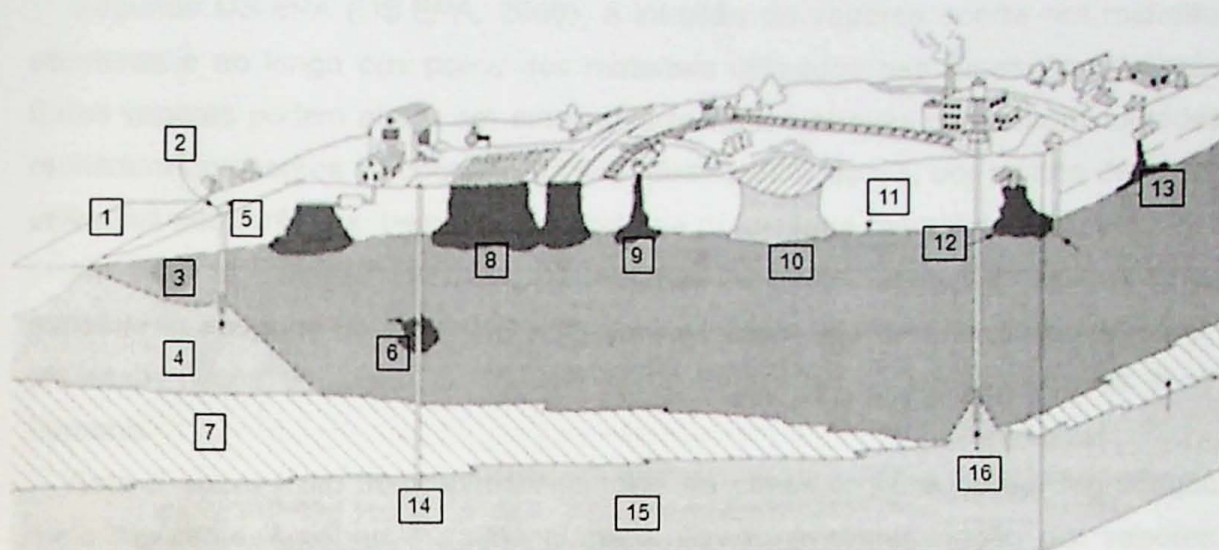
Segundo Fetter, 1999, muitas das liberações de contaminantes para a subsuperfície ocorrem dentro ou na zona do solo denominada por Cleary (1989) como zona vadosa ou zona não saturada e por Fetter (1988), como zona de aeração. A figura 1 ilustra esta região abaixo da superfície do terreno.



**Figura 1:** Esquema demonstrativo das zonas de um sistema aquífero. Retirada de Fetter (1999).

Na Figura 2 apresenta-se um modelo esquemático dos diversos mecanismos de contaminação das águas subterrâneas. Como se pode observar são muitas as fontes potenciais de contaminação. Dos problemas crescentes de contaminação do solo e da água subterrânea surgiu a necessidade de uma maior compreensão dos fenômenos envolvidos na dinâmica desses contaminantes e um aumento do interesse acadêmico pelos fenômenos que ocorrem na zona vadosa.





**Figura 2.:** Modelo esquemático de mecanismos de contaminação das águas subterrâneas (modificado de Fetter, 1999). 1) oceano; 2) poço de abastecimento; 3) água doce; 4) intrusão lateral de água salgada; 5) drenagem de tanque séptico; 6) vazamento de óleo por ruptura de revestimento do poço exploratório; 7) unidade confinante; 8) infiltração: de produtos químicos derramados em rodovias, e de pesticidas e fertilizantes aplicados na agricultura; 9) vazamento acidental; 10) infiltração de chorume proveniente de lixo; 11) nível d' água; 12) infiltração de produtos químicos provenientes de resíduos industriais enterrados; 13) vazamento de tanque de armazenamento subterrâneo de combustível (TASC); 14) poço de petróleo abandonado; 15) aquífero (água salgada); 16) infiltração de água salgada devido a bombeamento em poço de abastecimento..

No caso de contaminações provenientes de hidrocarbonetos, há uma grande probabilidade dos contaminantes volatilizarem e migrarem da fonte de contaminação, na subsuperfície, em direção ao ar atmosférico ou confinado em locais como garagens, porões e edificações. Pode-se citar o exemplo de contaminação por compostos de petróleo na área residencial Olympus, em Belém (PA) (Tancredi *et. al*, 2001), devido á vazamentos no posto Senador Lemes. O caso consiste na contaminação da zona vadosa sob a área residencial, por vapores derivados de petróleo. Por serem menos densos que a água, os vapores, espalharam-se e flutuaram sobre o topo da franja capilar, constituindo uma fase livre imiscível, passando a fluir na mesma direção do fluxo da água subterrânea (Tancredi, 2001; Ferreira e Zuquette, 1998), portanto os contaminantes migraram através do aquífero para áreas mais distantes do posto, de menor potencial hidráulico, devido à elevada mobilidade da água subterrânea (Tancredi *et. al*, 2001). Assim, a área constituiu-seem uma extensa área contaminada á céu aberto e com riscos de intrusão de vapores em espaços confinados.



Segundo US.EPA (US.EPA, 2008), a intrusão de vapores ocorre em rachaduras, aberturas e ao longo dos poros dos materiais utilizados nas fundações de prédios. Estes vapores podem entrar em ambientes fechados através de descontinuidades ou rachaduras presentes no concreto do piso destas edificações, por pontos de acesso a utilidades subterrâneas, bem como através da porosidade natural do concreto.

No caso dos hidrocarbonetos, os vapores formados, mais densos que o ar, se espalharão ao longo da superfície atingida e poderão acumular as concentrações que oferecem riscos em curto prazo, tais como explosões ou efeitos agudos à saúde humana.

Este é apenas um dos muitos exemplos de casos registrados de degradação do meio ambiente e perigo à saúde humana devido à contaminação por vapores de compostos derivados de petróleo. O presente trabalho tem como foco o estudo do transporte de vapores na zona vadosa, utilizando-se de um solo típico do Estado de São Paulo, denominado Latossolo Vermelho.

## **2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE COLETA DO LATOSSOLO E CONTEXTO GEOLÓGICO**

O solo, estudado (latossolo vermelho), foi coletado na região do município de Bauru, no estado de São Paulo, demarcada no mapa litoestratigráfico por retângulo em preto (Figura 3). Na área de coleta as litologias encontradas inserem-se no Grupo Bauru.

O Grupo Bauru é composto pelas Formações Uberaba, Vale do Rio do Peixe, Araçatuba, São José do Rio Preto, Presidente Prudente e Marília, inclui ainda os Analcimitos Taiúva, rochas vulcânicas localmente intercaladas na sequência (Fernandes, 2004). O grupo Bauru ocorre principalmente em São Paulo, no Triângulo Mineiro (MG) e norte do Paraná. Assenta-se sobre basaltos da Formação Serra Geral, do qual é separado por não-conformidade (Fernandes, 2004). De uma forma geral o Grupo Bauru é limitado pela Formação Vale do Rio do Peixe (inferior) e Marília (superior) (Lago et al., 2006), apresentando uma sequência basal lamítica, de origem lacustre, sobre a qual encontram-se arenitos finos a grossos, argilosos, avermelhados, com algumas intercalações de lamitos avermelhados (Cavaguti e Silva, 1992). A área de coleta é representada pelas Formações Marília e Vale do Rio do Peixe, as quais serão detalhadas a seguir.

A Formação Marília é composta por três membros: Serra da Galga, Ponte Alta e Echaporã (Barcelos e Suguio 1987). Os membros Serra da Galga e Ponte Alta



ocorrem apenas no Triângulo Mineiro (MG). Em São Paulo, a Formação Marília é representada apenas pelo seu Membro Echaporã, que também aflora no Triângulo Mineiro.

O Membro Echaporã ocorre na parte superior de espigões regionais, nas margens leste e norte da Bacia Bauru (demarcada no mapa geológico - figura 3), sustentando planaltos escarpados, digitiformes, mais expressivos nas regiões de Marília-Echaporã, Monte Alto (SP) e de Campina Verde (MG) (Fernandes, 2004). Tem as maiores espessuras em São Paulo, onde alcançaria até 180 m (Almeida *et al.* 1980). Segundo Fernandes, 2004 tais valores talvez sejam superestimados, pois podem incluir a Formação Vale do Rio do Peixe (sotoposta).

O Membro Echaporã tem contatos graduais e interdigitados com a Formação Vale do Rio do Peixe (p. ex. na margem esquerda do rio Bauru, Bauru, SP) e com os demais membros da Formação Marília (Fernandes, 2004). Na borda leste, em São Paulo, repousa diretamente sobre a Formação Serra Geral (basaltos). Compõe-se de arenitos finos a médios, imaturos, com frações grossas e grânulos em quantidades subordinadas, sobretudo nas zonas marginais da bacia. Formam estratos de aspecto maciço, de cores bege a rosa (pálidas) características, com cimentação e nódulos carbonáticos (Fernandes, 2004).

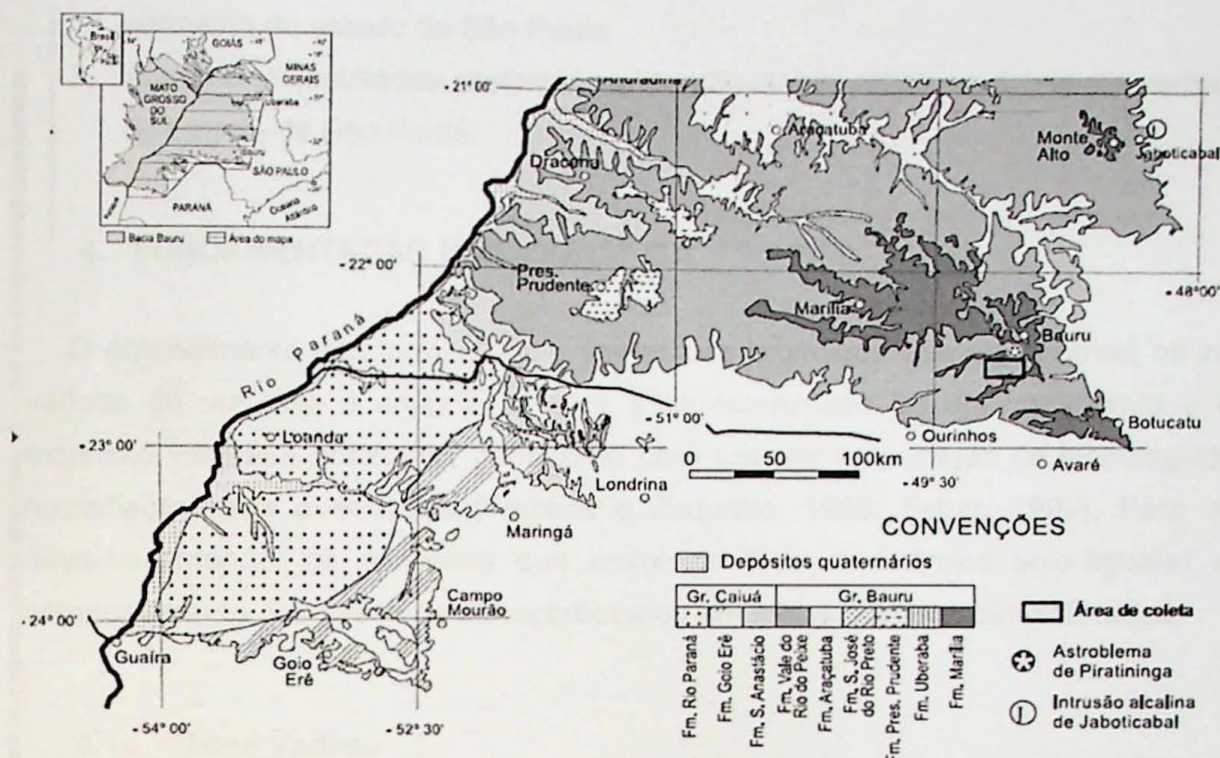
A Formação Vale do Rio do Peixe é definida por Fernandes e Coimbra, 2000 como a unidade de maior extensão da parte leste da bacia e constitui o substrato de boa parte do oeste de São Paulo e do Triângulo Mineiro, como demonstrado no mapa geológico (figura 3). Corresponde a grande parte da antiga Formação Adamantina definida por Soares *et al.* (1980) e tem espessura máxima preservada da ordem de 100 metros, medida em perfurações de poços de água subterrânea (Fernandes, 2004).

Essa formação assenta-se diretamente sobre basaltos da Formação Serra Geral, para o topo, passa gradualmente para o Membro Echaporã (Fm. Marília), e tem contato marcado por diastemas com as formações Presidente Prudente e São José do Rio Preto.

A Formação Vale do Rio do Peixe é composta por camadas de espessura submétrica e estruturação tabular típica de arenitos intercalados com siltitos ou lamitos e corresponde a depósitos essencialmente eólicos, acumulados em extensas áreas planas, na forma de lençóis de areia e campos de dunas baixas, associados com depósitos de loesse (Fernandes, 2004). Ainda segundo Fernandes, 2004, os lamitos, provavelmente, foram fixados em depressões, em corpos aquosos rasos e efêmeros, criados em períodos de elevação do nível freático.

A área de coleta será detalhada dentro do item Materiais e Métodos, em relação aos tipos de latossolos que ocorrem no local.





**Figura 3:** Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru. Retirado de Fernandes, 2004. Área de coleta do Latossolo Vermelho demarcada por retângulo em vermelho.

### 3. OBJETIVOS

O tema do presente trabalho surgiu da necessidade de estudos científicos visando o entendimento da dinâmica e transporte de contaminantes, na fase vapor, em solos brasileiros. Maiores investigações sobre o processo de movimentação de vapores na zona vadosa tem tido uma crescente demanda no mercado de gerenciamento de áreas contaminadas.

O principal objetivo deste estudo é ampliar o entendimento sobre a movimentação de compostos orgânicos voláteis (COV) derivados de petróleo ao longo da zona vadosa em latossolo do Estado de São Paulo.

Os objetivos do presente trabalho estão divididos em três aspectos que se complementam com o intuito de contribuir para a compreensão da migração de compostos orgânicos voláteis em latossolos. Desta forma tem-se os seguintes objetivos:

1. Apresentar uma metodologia para o estudo da migração de vapor em solos que permita o estudo da retenção de líquidos (água e gasolina) e a difusão de VOC.



2. Apresentar as características de retenção de água e gasolina para um latossolo vermelho do estado de São Paulo.
3. Apresentar resultados preliminares de difusão de VOC em latossolo vermelho do Estado de São Paulo.

#### **4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA**

O entendimento das formas como compostos orgânicos voláteis ocorrem na zona vadosa de um solo é importante para a caracterização de um vazamento e sua extensão vertical e horizontal, bem como para orientar a aplicação de tecnologias de remediação mais adequadas (Ferreira e Zuquette, 1998; Fetter, 1999). Para isso, deve-se entender os conceitos que envolvem toda a dinâmica solo-água-ar e o comportamento dos gases de hidrocarbonetos em meios porosos não saturados.

##### **4.1. Zona Vadosa**

A zona vadosa se refere à zona rasa de meio poroso insaturado, diretamente localizada entre a superfície do terreno e o nível freático (Heinse e Link, 2013). Apresenta uma variação de espessura de alguns centímetros, em terrenos muito úmidos, até dezenas de metros em regiões de clima árido. É caracterizada por um meio poroso (solo ou leito rochoso fraturado) parcialmente saturado por fluido úmido (e. g. água).

Entender o comportamento do contaminante na zona vadosa é um pré-requisito para uma gestão eficiente de recursos hídricos subterrâneos (Palladino *et al.*, 2005). Até o presente momento, são poucos os estudos que relacionam a quantidade de contaminantes liberados no solo (e.g. atividades agrícolas, industriais e urbanas) e a concentração resultante no aquífero. Isso é devido, primeiramente, à falta de conhecimento e escassez de dados relacionados aos processos de transporte físico, químico e biológico de contaminantes na zona vadosa. A zona vadosa é uma importante região de transição entre a superfície e as águas subterrâneas e proporciona:

- 1) Capacidade de armazenar tanto água, quanto contaminantes;
- 2) Tempo de atraso entre a liberação de contaminantes na superfície e sua afluência dentro da zona saturada;
- 3) Meio onde ocorrem os processos químicos, físicos e biológicos de transporte de fluidos (líquidos e gasosos);



- 4) Um domínio em 3-D para o transporte de gases e líquidos (Palladino *et. al.* 2005).

No presente trabalho a zona vadosa é representada por dois meios não saturados inicialmente: um solo argiloso denominado Latossolo Vermelho e uma areia fina (0,015mm).

#### 4.1.1. Grau de saturação do solo

Além de propriedades físicas do solo como porosidade ( $\eta$ ) e umidade ( $\theta$ ), o grau de saturação do solo (Reichardt; Timm, 2004) é definido como:

$$S = \theta/\eta = V_a/V_v$$

Onde,

$V_a$  = Volume de água no solo ( $L^3$ ); e

$V_v$  = Volume de vazios ou volume de poros do solo ( $L^3$ ).

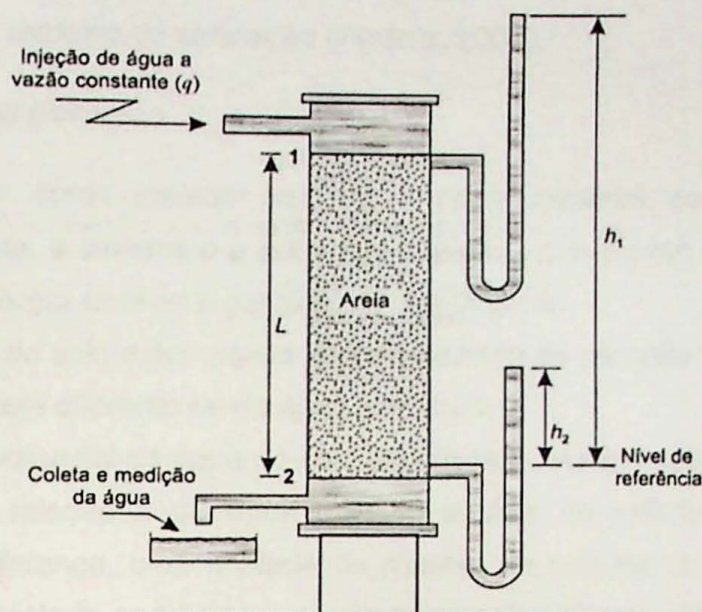
Portanto o grau de saturação de um solo indica a fração do espaço poroso que é ocupado pela água, sendo expresso através de um número adimensional ou em porcentagem (Fredlund, 1993).

O solo insaturado é um sistema multifásico, em que o grau de saturação é inferior a um (Pizarro, 2009). Segundo Fredlund e Morgenstern (1977), este sistema é constituído de quatro fases: partículas de solo, água, ar e película contráctil (interface ar – água). Ainda segundo os autores, o solo insaturado seria definido como uma mistura de duas fases em equilíbrio (películas de solo e película contráctil) e duas fases que fluem (ar e água).

#### 4.1.2. Movimento de água no solo

O movimento de água no solo é explicado de acordo com o experimento de Henry Darcy em 1856, o qual consistia em simular o transporte de água em meio poroso, através de um conduto preenchido por material granular (filtro de areia) e a medição de pressão em dois pontos determinados (pontos 1 e 2) como demonstrado no esquema da Figura 4.





**Figura 4:** Esquema do experimento de Darcy sobre o fluxo de água através de filtro de areia, retirado de Dake, 1978

Através deste ensaio, Darcy concluiu que a vazão pelo conduto era diretamente proporcional à área de sua seção transversal, à diferença de pressão entre dois pontos e inversamente proporcional ao comprimento da coluna do meio poroso (Reichardt; Timm, 2004), ou seja:

$$Q = K.A. (h_2 - h_1)/L$$

Onde,

$Q$  = vazão ( $L^3/T$ );

$K$  = constante de proporcionalidade ou condutividade hidráulica ( $L/T$ )

$A$  = área da seção transversal ( $L^2$ );

$(h_2 - h_1)$  = diferença de pressão entre os pontos 1 e 2 ( $L$ ); e

$L$  = comprimento ( $L$ ).

#### 4.1.3. Condutividade hidráulica em um meio insaturado

Segundo Pizarro, 2009, a condutividade hidráulica  $K$  definida inicialmente na Lei de Darcy como o coeficiente de proporcionalidade é um parâmetro hidrogeológico, com dimensão ( $L/T$ ), que combina as propriedades do fluido com as propriedades do meio (solo). A condutividade hidráulica é a medida da habilidade de um meio poroso de conduzir um líquido (Nielsen, 1994).

Para um solo não saturado,  $K$  é a função da umidade volumétrica  $\theta$  ou da pressão da água nos meniscos dos poros (Prevedello, 1996). Os poros ocupados pelo ar reduzem área efetiva do fluxo, aumentando a tortuosidade do fluxo remanescente,



assim a condutividade hidráulica é maior quanto maior for a umidade do solo, atingindo seu valor máximo de saturação (Pizarro, 2009).

#### 4.1.4. *Potencial hidráulico*

A água do solo, como qualquer sistema ou ponto material, contém duas formas principais de energia, a cinética e a potencial. Como o movimento da água no solo é muito lento, sua energia cinética é geralmente desprezível.

O fato da água do solo estar sujeita a certo número de campos de forças, faz com que seu potencial seja diferente do da água pura livre.

O conceito de potencial da água do solo expressa a energia potencial especificada água do solo em relação à da água em um estado de referência padrão. Para determinar essa diferença, uma unidade de massa, de volume ou de peso de água deve ser levada do estado padrão para o estado no solo (Pizarro, 2009).

Esse estado padrão é geralmente considerado como sendo o de um reservatório de água pura, sujeito à pressão atmosférica, à mesma temperatura que a água do solo e a uma dada altura constante.

Como a tendência espontânea da água no solo é assumir estados de menor potencial, conhecendo-se os potenciais da água, em diferentes pontos do solo, pode-se determinar sua tendência de movimento.

O potencial da água é composto por cinco componentes, ou seja, térmico, de pressão, gravitacional, osmótica e matricial, mas como os processos que ocorrem no solo são aproximadamente isotérmicos, a componente térmica é considerada desprezível (Pizarro, 2009). Portanto o potencial hidráulico (H) total no solo (Padoin *et al.* 2006) é dado por:

$$H = \psi_p + \psi_g + \psi_{os} + \psi_m$$

Onde,

$\psi_p$  = componente de pressão, que surge quando a pressão que age sobre a água do solo é diferente e maior que a pressão  $P_0$ , que atua sobre a água padrão. Essa pressão é positiva;

$\psi_g$  = componente gravitacional;

$\psi_{os}$  = componente osmótica, que surge porque a água no solo é uma solução de sais minerais e outros solutos e a água padrão é pura; e

$\psi_m$  = componente matricial, que é a soma de todos os outros trabalhos que abrangem a interação entre água e matriz sólida do solo, como por exemplo, o trabalho contra forças de adsorção e elétricas, o trabalho capilar e outros. Esses fenômenos levam a água a pressões menores que  $P_0$ , que age sobre a água padrão. Portanto, são pressões negativas denominadas tensões ou sucções.



## 4.2. Processos Controladores do Transporte de Substâncias no Solo

O movimento de substâncias não depende somente do fluxo no qual estão dissolvidas, mas recebe influências de muitos mecanismos aos quais estão sujeitas. Segundo Fetter, 1992, os processos físicos que controlam o transporte de substância no solo insaturado são advecção, difusão e dispersão.

### 4.2.1. Advecção

A advecção é o mecanismo de transporte causado pelo fluxo de água, pois com o deslocamento da água, as substâncias presentes na mesma se deslocam em direção das linhas de fluxo com a velocidade, em princípio, igual à velocidade média linear da água e sem alterar sua concentração na solução. Ou seja, se a água se move, as substâncias são arrastadas pelo processo de transporte físico chamado advecção de fluxo de massa ou fluxo convectivo.

A equação diferencial do transporte por advecção (Rubinstein, 2005), no caso unidimensional, é dada por:

$$\partial C / \partial t = - v_z \cdot \partial C / \partial Z$$

Onde,

C = concentração da substância

$V_z$  = velocidade da água nos poros na direção (L/T)

t = tempo (T); e

Z = coordenada vertical

### 4.2.2. Difusão

O transporte de substâncias por difusão molecular ocorre devido ao gradiente de concentração existente em um fluido, isto é, o soluto dissolvido em água desloca-se de uma área de maior concentração para uma área de menor concentração, com o objetivo de igualar a concentração em toda a massa de fluido (Pizarro, 2009). A difusão é proporcional ao gradiente de concentração, e em analogia com a primeira lei de Fick (Wendland, 2004), e é dada por:

$$J_d = - D_d \partial C / \partial Z$$



Onde,

$J_d$  = fluxo de difusão do soluto ( $M/L^2 \cdot T$ )

$D_d$  = coeficiente de difusão ( $L^2/T$ ); e

$\partial C/\partial Z$  = gradiente de concentração ( $M/L^4$ )

O sinal negativo exprime que o movimento se dá em sentido contrário ao do gradiente. Os coeficientes de difusão geralmente variam de  $1 \times 10^{-9}$  a  $2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  numa temperatura de  $25^\circ\text{C}$  (Schnoor, 1992). Esses valores não variam muito com a concentração, mas sim, com a temperatura, ou seja, chegam a reduzir-se em 50% para uma variação de  $5^\circ\text{C}$  (Stokes, 1965).

No caso que a concentração varia com o tempo, toma-se a Segunda lei de Fick (Freeze; Cherry, 1979; Fetter, 1993), ou seja:

$$\partial C/\partial t = D_d \cdot \partial^2 C/\partial z^2$$

Há dados que mostram que em solos, a difusão é consideravelmente menor em uma solução livre, principalmente quando se trata de solos de granulometria fina, devido à tortuosidade de trajetórias de fluxo (Mitchell, 1991). Neste caso, usa-se um coeficiente de difusão efetiva ( $D^*$ ) dado por:

$$D^* = \omega \cdot D_d$$

Onde,

$\omega$  = coeficiente de tortuosidade do solo (adimensional) (Bear, 1972).

$\omega$  é sempre menor que 1,0 e é determinado por meio de ensaios de laboratório.

#### 4.2.3. Dispersão

Dispersão ou transporte por mistura mecânica é o processo de diluição e redução de concentração de soluto quando o mesmo é carregado por advecção através de meio poroso (Bear, 1972). É decorrente da dispersão em canais individuais, do desenvolvimento de velocidades médias diferentes devido à variação das dimensões dos poros ao longo das linhas de fluxo e do desvio da trajetória das partículas em decorrência da tortuosidade, reentrâncias e interligações entre canais (Bear, 1972).

O coeficiente de dispersão mecânica é definido como produto entre a velocidade da água nos poros na direção  $Z$ ,  $v_z$ , e o coeficiente de dispersividade dinâmica  $\alpha$ , que



é a propriedade de um meio poroso provocar a dispersão de um traçador que nele se desloca (Bear, 1972).

A dispersão que ocorre na direção do fluxo é denominada de dispersão longitudinal e a que ocorre na direção perpendicular ao fluxo é chamada de dispersão transversal.

O processo de difusão molecular não pode ser separado da dispersão mecânica no fluxo de água pelo solo. Esses dois processos são combinados para definir um parâmetro denominado coeficiente de dispersão hidrodinâmica  $D$ . Portanto, o coeficiente de dispersão hidrodinâmica  $D$  é a soma do coeficiente de difusão ( $D_d$ ) com o coeficiente de dispersão mecânica  $D_{zz}$ . Os coeficientes de dispersão hidrodinâmica longitudinal  $D_L$  ( $L^2/T$ ) e de dispersão hidrodinâmica transversal  $D_T$  ( $L^2/T$ ) (Bear, 1972; Hagare, 2008b), quando se considera o coeficiente de difusão efetiva, são, respectivamente:

$$D_L = \alpha_L \cdot v_z + D^*$$

$$D_T = \alpha_T \cdot v_z + D^*$$

Onde,

$\alpha_L \cdot v_z$  e  $\alpha_T \cdot v_z$  = coeficientes de dispersão mecânica longitudinal e transversal, respectivamente, ( $L^2/T$ );

$\alpha_L$  e  $\alpha_T$  = coeficientes de dispersividade longitudinal e transversal ( $L$ ), respectivamente;

$v_z$  = velocidade da água nos poros da direção  $Z$  ( $L/T$ ); e

$D^*$  = coeficiente de difusão efetiva ( $D^* = \omega \cdot D_d$ ).

As expressões para as dispersividades de acordo com Scheidegger, 1963 são:

$$\alpha_L = \beta_L \cdot d$$

$$\alpha_T = \beta_T \cdot d$$

Onde,

$d$  = diâmetro médio do poro ( $L$ ); e

$\beta_L$  e  $\beta_T$  têm valores da ordem de 1,75 e 0,055, respectivamente, obtidos em laboratório e que não podem ser considerados universais.

Sendo assim, as equações para os coeficientes de dispersão hidrodinâmica, são definidos como:

$$D_L = 1,75 \cdot d \cdot v_z + D^*$$



$$D_T = 0,055.d.v_z + D^*$$

Segundo Perkins 1963, os ensaios de laboratório mostram que para velocidades baixas de fluxo, o coeficiente de dispersão hidrodinâmica é igual ao coeficiente de difusão efetivo, enquanto que, para velocidades mais altas, o coeficiente de dispersão hidrodinâmica aumenta linearmente em função da velocidade.

Quando se trata de transporte através de um solo argiloso, a difusão irá normalmente controlar o mecanismo de transporte, e a dispersão mecânica será desprezível (Rowe, 1987).

### 4.3. Sucção de Água no Solo

Sucção pode ser descrita como a energia com que um elemento poroso absorve água quando está livre para se mover. Esta avidéz por água é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo. A sucção é normalmente expressa como pressão e portanto as unidades mais utilizadas são kPa, atm e bar. Utiliza-se também carga de pressão para representar o estado de pressão da água. As tensões que controlam o comportamento dos solos não saturados, e em algumas situações também as dos solos saturados, são fortemente influenciadas pela pressão negativa na água intersticial (Marinho, 2005).

Como foi citado anteriormente, o fato da água do solo estar sujeita a certo número de campos de forças, faz com que seu potencial seja diferente do da água pura livre.

O potencial total da água no solo, portanto, é composto por quatro componentes, de pressão, gravitacional, osmótica e matricial.

Quando o potencial gravitacional e de pressão não intervêm e podem ser desprezados, o potencial total (nesse caso composto pelo potencial matricial e osmótico), equivale à soma da sucção matricial ( $S_m$ ) e sucção osmótica ( $S_{osm}$ ) e sua magnitude corresponde ao trabalho total das forças de capilaridade, absorção e osmose (Soto, 2004).

#### 4.3.1. Sucção matricial

A sucção matricial é igual à sucção total quando a água do solo é idêntica à água padrão (água pura), restando apenas o efeito da matriz do solo (capilaridade e adsorção).



Os efeitos matriciais são decorrentes das pressões geradas pelo menisco capilar e da adsorção da água por forças exercidas pelas superfícies das partículas. Estas são quantificadas em forma global devido à dificuldade de discriminá-las (Salas, 1993a).

A interface ar-água gerada pelos efeitos capilares no menisco que se forma entre as partículas de solo adjacentes pode ser representado através do chamado modelo capilar é demonstrado por Buckingham, (1907) na figura 5.

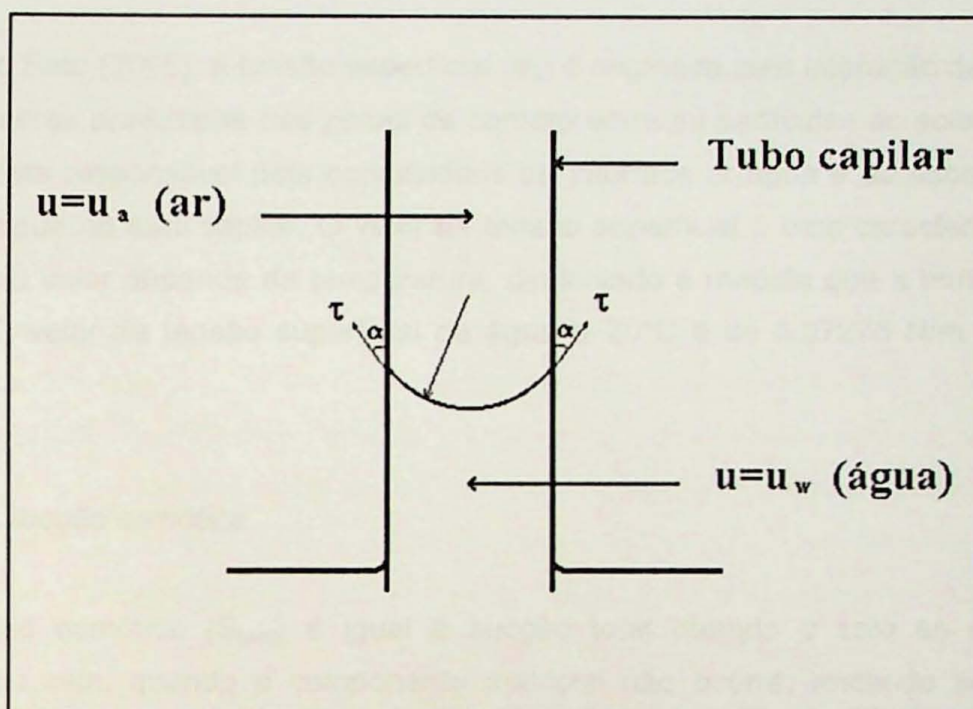


Figura 5: Modelo capilar para análise de sucção matricial (Buckingham, 1907)

Segundo Buckingham (1907), através do equilíbrio de forças na interface ar-água observa-se que a força exercida pelo ar é igual às contrárias exercidas pela água e pode ser representado da seguinte forma:

$$u_a \pi r^2 = u_w \pi r^2 + 2 \pi r \sigma_s \sin \alpha$$

Onde,

$u_a$  = pressão do ar ( $ML^{-1}T^{-2}$ )

$u_w$  = pressão da água ( $ML^{-1}T^{-2}$ )

$r$  = raio do menisco (L)

$\alpha$  = ângulo de contato entre a interface ar-água com o tubo capilar

$\sigma_s$  = tensão superficial da água ( $MT^{-2}$ )

Para um menisco perfeitamente esférico ( $\alpha = 90^\circ$ ) a expressão descrita acima fica reduzida para:



$$(u_a - u_w) = 2\sigma_s/r$$

Onde,

$(u_a - u_w)$  = sucção matricial ( $ML^{-1}T^{-2}$ )

Quando no termo  $(u_a - u_w)$  a pressão do ar ( $u_a$ ) corresponde à atmosférica, a pressão existente nas moléculas de água é proporcional à tensão superficial e ao raio do capilar.

Segundo Soto (2005), a tensão superficial ( $\sigma_s$ ) é originada pela interação das forças intermoleculares produzidas nas zonas de contato entre as partículas do solo, água e ar, sendo esta responsável pela concavidade da interface ar-água e da ascensão da coluna de água no tubo capilar. O valor da tensão superficial é uma característica do líquido e seu valor depende da temperatura, diminuindo à medida que a temperatura aumenta. O valor da tensão superficial da água a 20°C é de 0,07275 N/m (Libardi, 1995).

#### 4.3.2. Sucção osmótica

A sucção osmótica ( $S_{osm}$ ) é igual à sucção total quando o solo se encontra saturado, ou seja, quando a componente matricial não ocorre, restando apenas o efeito de concentração de solutos (Soto, 2005).

Na Figura 6, a água pura está em contato com o solo (com maior concentração de solutos) através de uma membrana semipermeável que é permeável às moléculas de água e não aos solutos. A maior concentração de água do solo causa uma atração das moléculas de água pura e consequentemente um fluxo destas através da membrana semipermeável o equilíbrio é atingido quando a pressão hidrostática é suficiente para equilibrar as forças osmóticas que produzem o fluxo das moléculas de água pura para a água do solo.

A sucção osmótica pode ser expressa pela equação de *Van't Hoff's*:

$$S_{osm} = R.T (C_s)$$

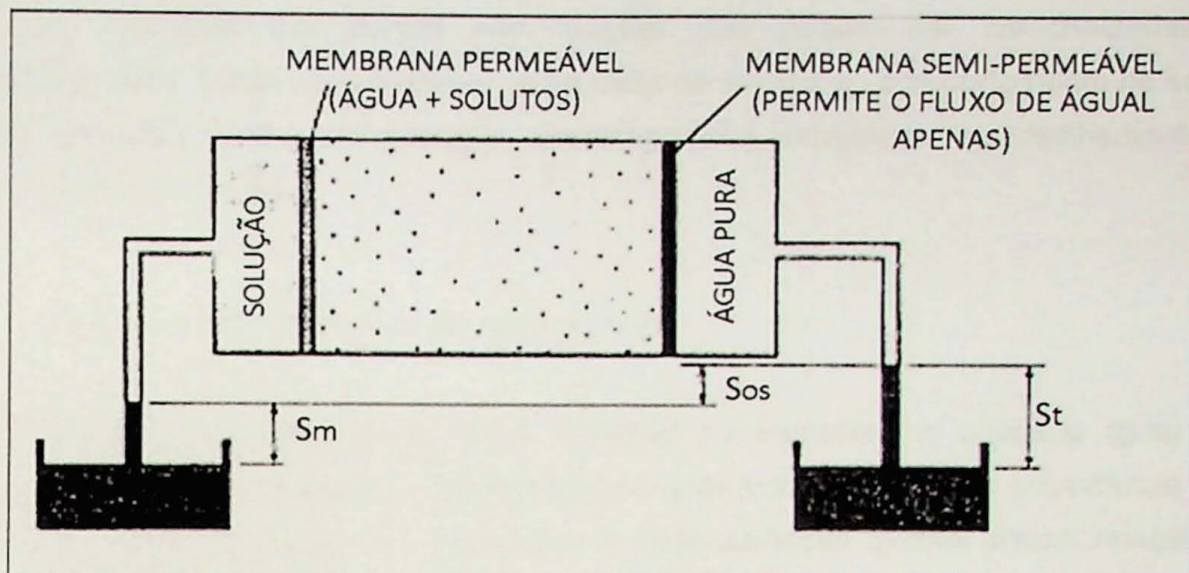
Onde,

R = constante universal dos gases (0,082.lt.atm/mol.°K);

T = temperatura absoluta em graus kelvin (°K);

$C_s$  = concentração do soluto (mol/lt).





**Figura 6:** Representação dos conceitos de sucção matricial, osmótica e total, segundo Soto, 2005.

Similarmente este componente é relacionado ao comportamento dos solos argilosos causado pela "dupla camada difusa". A dupla camada resulta da atração eletrostática das cargas negativas do argilo-mineral e a concentração de íons positivos ou cátions da solução adjacente à superfície da partícula. Disto resulta uma atração das moléculas de água livre do solo (solução) que tendem a dispersar os cátions da camada difusa com a finalidade de equilibrar a concentração (Mitchell, 1993).

Segundo Fredlund e Rahardjo, (1993), a importância da sucção osmótica na Mecânica de Solos parece estar mais relacionada aos solos dispersivos ou expansivos, embora se admita que o valor da sucção total corresponde quase integralmente ao valor da sucção matricial. Consequentemente, na prática, é usual considerar a sucção do solo como a sucção matricial.

#### 4.4. Sucção e Umidade do Solo

A relação entre o teor de umidade e a sucção do solo é uma característica do solo não saturado. Esta relação pode ser representada graficamente e descreve uma trajetória diferente em função do acréscimo ou decréscimo (processos de secagem e umedecimento respectivamente) de qualquer dos seus componentes. A esse respeito, tem-se verificado que num determinado solo, as trajetórias de secagem e umedecimento podem não coincidir para um mesmo valor de sucção manifestando-se o fenômeno denominado de histerese (Soto, 2005).



As trajetórias das curvas são funções que podem ser caracterizadas e equacionadas. Estas são utilizadas como meio de vínculo ao comportamento de solos não saturados, como por exemplo, permeabilidade, resistência ao cisalhamento e mudanças de volume.

#### 4.4.1. *Curvas de retenção da água no solo*

As relações entre sucção (total, matricial ou osmótica) e umidade (grau de saturação, teor de umidade volumétrica ou gravimétrica), são de importância na caracterização de solos não saturados. A representação gráfica dessa relação é denominada curva de retenção da água no solo (Croney e Coleman, 1960).

Segundo Fredlund *et al.* (1994), a curva de retenção da água no solo pode ser definida como a variação da sucção com a capacidade de retenção da água nos macro e micro poros no interior do solo.

Os valores correspondem ao tipo de solo, com uma densidade determinada, e a natureza dessa relação está diretamente associada à granulometria e mineralogia do solo. De uma forma geral, a geometria dos poros, a magnitude e composição mineralógica da fração fina são determinantes na posição relativa, forma e inclinação da curva.

A curva de retenção é caracterizada a partir das trajetórias típicas obtidas através de procedimentos de secagem e umedecimento. A Figura 7 mostra características das curvas de retenção, tanto obtidas por umedecimento, quanto por secagem, podendo-se verificar a histerese associada às duas formas de obtenção.

Onde,

$\theta_s$  = teor de umidade volumétrica de saturação para a curva obtida pelo processo de secagem;

$\theta'_s$  = teor de umidade volumétrica de saturação para a curva obtida pelo processo de umedecimento;

$\theta_s - \theta'_s$  = conteúdo de ar residual;

Pressão de entrada de ar – sucção correspondente ao início de entrada de ar;

$\theta_r$  = teor de umidade volumétrica residual.



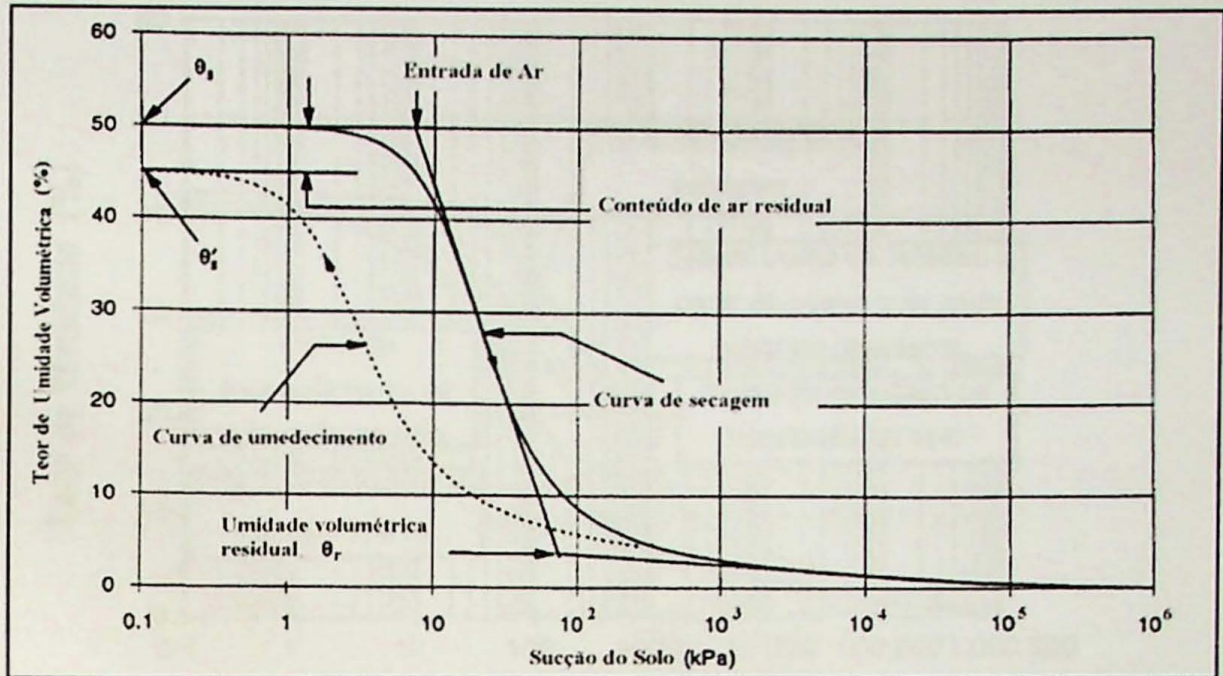


Figura 7: Elementos de uma curva de retenção segundo Fredlund *et al.* (1994).

#### 4.4.2. Fenômeno de histerese no solo

Para um mesmo solo a curva de retenção pode descrever uma trajetória diferente em função do acréscimo ou decréscimo (processos de secagem e umedecimento), de qualquer dos seus componentes (Soto, 2005). Assim, verifica-se que em um determinado solo as trajetórias de secagem e umedecimento podem não coincidir para um mesmo valor de sucção, manifestando-se o fenômeno denominado de histerese. A Figura 8, mostra a diferença das trajetórias por ambos processos.

Esse comportamento da curva de retenção afeta diretamente as condições de fluxo no solo não saturado; a natureza deste comportamento é atribuído a diferentes causas (Hillel, 1980).

- 1) O efeito de ângulo de contato do menisco de água é maior quando ocorre umedecimento e menor na fase de secagem.
- 2) Irregularidades geométricas dos poros interconectados que atingem equilíbrio em posições diferentes para ambos procedimentos, com diferentes quantidades de água.
- 3) Bolhas de ar capturadas nos vazios do solo no processo de umedecimento.
- 4) Alterações da estrutura do solo produzidas pela expansão ou contração nos solos argilosos, nos procedimentos de umedecimento e secagem respectivamente.



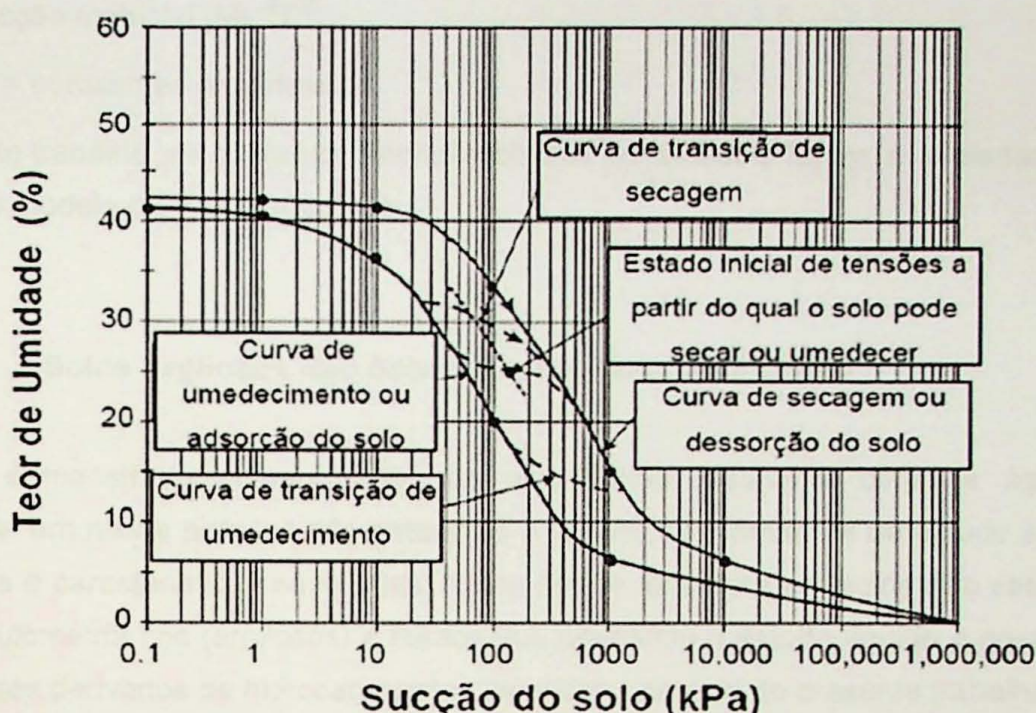


Figura 8: Histerese em curva de retenção. Retirado de Campos, 2005.

#### 4.4.3. Modelagem da curva de retenção

Vários autores propuseram modelos matemáticos relacionando o conteúdo de água com a sucção. Gerscovich (2001) testou alguns desses modelos, dentre eles o de Van Genuchten (1980), na modelagem da curva característica de sucção e para avaliar a sua aplicabilidade a alguns solos brasileiros. A autora concluiu que independente do tipo de solo, esse modelo, dentre outros, foi um dos que apresentou melhores resultados, sendo que as proposições baseadas nas frações granulométricas não indicaram um bom ajuste.

O modelo de Van Genuchten (1980) é um modelo empírico baseado em dados experimentais, baseado na fenomenologia associada ao comportamento da curva característica em função da distribuição dos poros (porosidade do solo).

A equação proposta por Van Genuchten (1980):

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

Onde,

$\theta_r$  e  $\theta_{sat}$  = teores de umidade volumétricos residual e de saturação, respectivamente;



$\psi_m$  = sucção matricial ( $ML^{-1}T^{-2}$ );

$\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  = constantes empíricas.

Neste trabalho, as curvas de retenção obtidas do latossolo foram modeladas a partir do modelo de Van Genuchten.

#### 4.5. Solos Argilosos Não Saturados e o Fluxo Multifásico

Foi demonstrado anteriormente, de uma forma resumida, como a água se comporta em meios porosos não saturados e algumas ferramentas de estudo sobre a dinâmica e características envolvidas. Neste item o foco será em solos não saturados de granulometria fina (argilosos) e fluídos que envolvam o estado líquido e gasoso de compostos derivados de hidrocarbonetos, temática principal do presente trabalho.

##### 4.5.1. Dinâmica de fluídos em solo argiloso não saturado

Em 1934, Nutting realizou uma série de experimentos de fluxo com água em permeâmetros, mudando apenas o diâmetro ( $d$ ) das partículas de solos granulares e encontrou valores de velocidade diferentes, evidenciando que a textura do solo influencia no valor da velocidade de descarga. Repetindo o experimento, ao fazer percolar fluidos diferentes (água e óleo, por exemplo) através de amostras iguais do mesmo material, mantendo constante o gradiente hidráulico, observou-se que os valores de velocidade encontrados, ao variar o fluido, são também diferentes. Isso significa que propriedades do fluido, tais como viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) e densidade ( $\rho$ ), influenciam no valor da velocidade de percolação. A partir dessa constatação, Nutting propôs que a expressão para  $k$  (permeabilidade do solo), fosse escrita da seguinte forma:

$$k = K \cdot \rho \cdot g / \mu$$

Onde  $K$  (condutividade hidráulica ou permeabilidade intrínseca) também é definida como:

$$K = C \cdot d^2$$

Sendo  $g$  a constante de aceleração da gravidade, com dimensão ( $LT^{-2}$ );  $C$  uma constante adimensional de proporcionalidade que leva em consideração as propriedades do solo tais como: esfericidade dos grãos, granulometria, natureza do



arranjo entre outros;  $d$  é o diâmetro dos grãos, com dimensão (L);  $\rho$  a densidade do fluido de dimensão ( $ML^{-3}$ ) e  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido ( $ML^{-1}T^{-1}$ ).

Existe também um grande número de expressões teóricas na literatura que relacionam a permeabilidade com as características do meio poroso, como por exemplo, a expressão desenvolvida por Taylor (1948), representada por:

$$k = D_s^2 \cdot \gamma_w / \mu \cdot (e^3 / 1 + e) \cdot C$$

Onde,

$D_s$  = diâmetro de uma esfera equivalente ao tamanho das partículas do solo (L);

$e$  = índice de espaços vazios da amostra de solo; e

$\gamma_w$  = peso específico do fluido ( $ML^{-2}T^{-2}$ )

A expressão desenvolvida por Kozeny-Carman (Bear, 1972), demonstra como a permeabilidade intrínseca é relacionada com as propriedades do solo e do fluido, apresentada a seguir:

$$K = 0,2 \cdot n^3 / (1 - n)^2 \cdot 1 / \sigma^2$$

Onde,

$n$  = porosidade do meio;

$\sigma$  = área especificada da amostra de solo com relação a um volume unitário de solo ( $L^2L^3$ ).

Para meios granulares a permeabilidade intrínseca ( $K$ ) funciona como uma propriedade exclusiva do meio poroso, independente das características do fluido (Cardoso, 2011). 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, o que faz com que os fenômenos de interação elétrica fluido/sólidos tenham grande influência na permeabilidade. Segundo Budhu *et al.* (1991), nos solos argilosos permeados por líquidos orgânicos, as propriedades dos fluidos presentes nos poros, a composição físico-química do solo e a natureza da adsorção do permeante pelas partículas do solo são fatores importantes nas variações de propriedades hidráulicas. O coeficiente de permeabilidade do solo, portanto, depende tanto das propriedades do solo, quanto do fluido (Cardoso, 2011). Esse fato foi verificado por Oliveira (2001), no estudo foi enfatizado que a polaridade dos líquidos, ou seja, a distribuição preferencial de cargas elétricas positivas e negativas da estrutura molecular gerando uma estrutura polar é de fundamental importância para o fluxo de fluidos em solos reativos. Uma medida do



grau de polaridade dos líquidos é dada pela constante dielétrica relativa dos mesmos. Segundo Halliday *et al.* (2007), a constante dielétrica relativa é um fator adimensional e sua determinação é feita quando um material dielétrico é colocado entre duas placas de um capacitor, sendo dada pelo quociente entre capacitância medida com o dielétrico e sem o dielétrico. Nos seguintes estudos citados o termo constante dielétrica foi utilizada no sentido de constante dielétrica relativa.

Alguns pesquisadores têm demonstrado que a constante dielétrica de um líquido é um parâmetro crítico que afeta a condutividade hidráulica de um solo argiloso (Fernandez e Quigley, 1985; Kaya e Fang, 2000; Oliveira 2001). Experimentos realizados por Fernandez e Quigley, 1985, mostraram que quanto maior for a constante dielétrica dos fluidos permeando sedimentos argilosos, maior será a propensão das argilas de adsorver o líquido. Consequentemente, a permeabilidade intrínseca dos solos finos varia de forma inversa à constante dielétrica do fluido (Schramm *et al.* 1986).

Para uma melhor compreensão da interação dos líquidos orgânicos com as partículas de argila é necessária a análise de parâmetros físico-químicos dos minerais de argila na presença de líquidos orgânicos. Kaya e Fang (2000) investigaram algumas propriedades físico-químicas da caulinita e da bentonita em uma série de experimentos. Foi analisada a alteração das forças atrativas e repulsivas entre as partículas minerais na presença de alguns fluidos, como água, anilina, metanol e xileno, com diferentes constantes dielétricas. Os dados obtidos mostraram que as forças atrativas e repulsivas reduzem com a diminuição da constante dielétrica do fluido contido nos poros das amostras analisadas. No entanto a diminuição da força repulsiva é maior do que da força atrativa, consequentemente, a força resultante, obtida pela diferença entre as forças, acaba resultando em uma força de atração entre as partículas do solo. Esta força resultante da atração, devido à presença do líquido orgânico com uma baixa constante dielétrica, favorece a floculação e a formação de aglomerados de forma a permitir uma passagem mais fácil para os fluidos, resultando em um aumento da condutividade hidráulica.

O entendimento sobre como essas propriedades do solo influenciam na permeabilidade de diversos fluidos contaminantes é de importante na especificação, por exemplo, de camadas de proteção mineral para impermeabilização de diques de contenção onde esses fluidos contaminantes são armazenados. Segundo Machado *et al.* (2008), são escassos os trabalhos desenvolvidos na direção de estabelecer diretrizes para a confecção dessas camadas. Ainda segundo os autores, a argila não oferece a mesma proteção ambiental para o caso dos fluidos automotivos quando se compara ao caso da água. Portanto seria interessante a realização de estudos que



buscassem a especificação de faixas de variação das feições texturais e dos limites de consistência do solo a ser utilizado de modo a se obter valores mínimos de permeabilidade aos fluidos de interesse.

#### 4.5.2. Fluxo Multifásico

Dentre os fluidos potencialmente perigosos para integridade da água subterrânea, estão aqueles cujos tipos de fluxo têm sido separados em dois grandes grupos principais: fluxo de fluidos miscíveis à água, e fluxo de fluidos imiscíveis à 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 fluxos miscíveis, ou de solutos dissolvidos (Delgado, 2001)

Quando um NAPL é colocado em contato com o solo ele tende a se comportar de quatro formas distintas: se infiltrando, se espalhando, se deslocando na direção do fluxo no topo do lençol freático ou dentro deste e migrando como material dissolvido (Sousa, 2012). A escala de tempo relativa a estes quatro processos varia muito: horas, para infiltração; dias, para o espalhamento; meses para o deslocamento na direção do fluxo e anos para o movimento do material dissolvido, de acordo com as equações baseadas na Lei de Darcy adaptadas para as características do solo e do fluido anteriormente citadas aqui. Assim, uma descrição aproximada do processo total pode ser feita a partir da modelagem de cada processo separadamente com interação na zona de interface (Oliveira, 1995 *apud* Mull, 1971).

O movimento do NAPL no solo é mais provável que aconteça de forma simultânea com água e ar (ou vapor). Neste caso, o movimento pode ser matematicamente representado pelas equações de conservação das massas, introduzidas na indústria de petróleo nos anos 60, para avaliar as técnicas de recuperação de óleo (Sousa, 2012).

O grau de saturação do solo em relação a um determinado fluido, por exemplo, proporciona o aumento na sua condutividade, que atinge o valor máximo quando todos os poros se encontram preenchidos com o fluido. Por outro lado, o solo não saturado devido à tortuosidade dos poros conduz a redução da condutividade do meio.

Portanto, no escoamento multifásico faz-se necessário a caracterização dos parâmetros de transporte em relação a todas as fases presentes, inclusive a fase gasosa, parte importante neste estudo. Isto resulta na determinação de uma grande quantidade de parâmetros experimentais, no estudo do fluxo multifásico.



O fluxo multifásico envolve vários processos que ocorrem simultaneamente no solo durante o transporte do NAPL da superfície do solo até o nível da água. Van Dam (1967) foi um dos primeiros a examinar cenários de vazamento de petróleo e formas para o controle da infiltração e migração do NAPL ao longo do lençol freático. O seu trabalho enfatizou a importância da capilaridade para a migração dos contaminantes especialmente em meios heterogêneos anisotrópicos. Usando uma analogia entre a matriz de poros e uma coleção de tubos capilares, ele discute a ascensão capilar(propriedade física que fluidos têm de subir ou descer em tubos extremamente finos) molhabilidade do fluido(tendência de um fluido deslocar um outro em uma superfície sólida) e saturação residual(quantidade de fluido que permanece nos poros após deslocamento).

Supondo que água é a fase molhante em sistemas de água subterrânea, ele usa as considerações de equilíbrio potencial para desenvolver uma expressão aproximada para o espalhamento lateral durante a migração do hidrocarboneto de petróleo no nível da água.

Por sua vez, Schwille (1984) complementou os estudos sobre o processo de migração do NAPL incorporando o fenômeno da dissolução e volatilização durante a migração do NAPL no solo e água subterrânea.

De acordo com os estudos após a ocorrência de derramamento de líquido orgânico no solo, inicialmente ele migra verticalmente através da zona não saturada, sobre ação da força gravitacional, e também apresenta espalhamento lateral devido aos efeitos de forças capilares. Com o avanço da frente úmida, ao longo da zona não saturada, ocorre o aprisionamento de orgânico nos poros do solo devido aos efeitos da tensão superficial. Além disso, algum orgânico também pode evaporar e ficar aprisionado nos poros, ampliando assim a zona de contaminação (Sousa, 2012).

Se o derramamento for substancial, poderá eventualmente alcançar a zona saturada. Neste local seu comportamento é regido pela solubilidade e densidade dos contaminantes. Se o NAPL é menos denso que a água ele irá se espalhar lateralmente ao longo da franja capilar, sendo transportado na direção do fluxo da água subterrânea no nível do lençol freático. No contato com a fase aquosa, os componentes solúveis podem formar uma pluma que irá migrar advectivamente com a água subterrânea. Se o NAPL é mais denso que a água, ao encontrar a franja capilar ele continuará se movendo verticalmente no interior do aquífero até encontrar uma camada impermeável, sobre a qual se acumulará.

Assim sendo, o conhecimento das equações que governam cada fase de um sistema de fluxo multifásico é de fundamental importância nos processos de avaliação dos cenários de contaminação por hidrocarbonetos de petróleo e nos estudos de



atenuação ou remediação das áreas contaminadas (Kueper, 1998). Dentre as fases que devem ser encontradas estão: a fase separada ou fase líquida não aquosa (NAPL); a fase dissolvida e a fase vapor, como fases móveis, além das fases adsorvidas e a fase residual. A simulação do movimento da água, do NAPL e do vapor requer, além das equações de fluxo das três fases, as equações de estado para os fluidos.

Como as investigações do comportamento de contaminação com NAPL em solos são relativamente recentes, iniciados na década de 70, muitos desses modelos desenvolveram formulações matemáticas próprias para descrever os parâmetros de transporte, a saber, a permeabilidade relativa trifásica, ou e a retenção capilar, além das fases adsorvidas e a fase residual.

Os resultados, decorrentes destes trabalhos experimentais, têm contribuído substancialmente nos problemas de modelagem matemática de fluxo multifásico em meio poroso, cuja solução envolve basicamente dois conjuntos de equações, as equações de balanço de massa, que definem a distribuição, no tempo e no espaço das concentrações das diversas fases, e a equação do balanço de momento. Essas duas equações são complementadas pelas equações constitutivas, que descrevem os parâmetros de transporte e as equações de transferência de massa, entre outros (Sousa, 2012).

As equações de balanço de massa descrevem a conservação de massa de cada fase e de cada constituinte, dentro de uma fase em particular, e como eles se movimentam e interagem dentro do meio poroso. Desta forma uma equação pode ser gerada para cada fase e para cada constituinte em particular. Cada equação é composta de termos que representam os vários componentes de transporte de massa em escala macroscópica como: acumulação, advecção, dispersão, fontes e sumidouros externos e transferência de massa entre as fases. Cada termo, por seu turno, é representado por um conjunto de parâmetros que quantificam o processo de transporte de um sistema físico em particular.

A equação do balanço de massa que descreve o fluxo multifásico e o transporte de orgânicos no meio poroso tem sua base na mecânica dos meios contínuos e na teoria de mistura, conforme discutido por Abriola (1989).

$$\nabla \cdot [\phi S_{\alpha} \rho^{\alpha} \mathbf{v}^{\alpha}] - \nabla \cdot \left[ \phi S_{\alpha} \rho^{\alpha} \mathbf{D}^{\alpha} \cdot \nabla \left( \frac{\rho_i^{\alpha}}{\rho^{\alpha}} \right) \right] + \phi S_{\alpha} r_i^{\alpha} \rho_i^{\alpha} - \rho_i^{\alpha} Q^{\alpha} - \mathcal{G}_i^{\alpha} = - \frac{\partial (\phi S_{\alpha} \rho_i^{\alpha})}{\partial t}$$

Onde as cinco componentes ( $i, \alpha$ ) relevantes são: a espécie água na fase água ( $w, W$ ); a espécie NAPL na fase água ( $n, W$ ); a espécie NAPL na fase NAPL ( $n, N$ ); a



espécie NAPL na fase gás ( $n, G$ ) e a espécie gás na fase gás ( $g, G$ ). Outros símbolos presente na equação são:

$\phi$  = porosidade do meio;

$S^\alpha$  = índice de saturação da fase  $\alpha$ ;

$\rho_i^\alpha$  = concentração em massa da espécie  $i$  na fase  $\alpha$ ;

$v^\alpha$  = velocidade média da fase  $\alpha$ ;

$D^\alpha$  = coeficiente de dispersão da fase  $\alpha$ ,

$Q^\alpha$  = fontes ou sumidouros externos de  $\alpha$ ;

$r_i^\alpha$  = coeficiente de decaimento da espécie  $i$  na fase  $\alpha$ ; e

$I_i^\alpha$  = fonte ou sumidouro de massa da espécie  $i$  na fase  $\alpha$  devido à troca de massa entre fases (isto é volatilização, dispersão, solubilização e adsorção) sendo formulada através das seguintes relações:

$$\mathcal{G}_w^W = 0$$

$$\mathcal{G}_n^W = E_n^W - E_{n/W}^G - E_{n/W}^S$$

$$\mathcal{G}_n^N = -(E_n^W + E_n^G)$$

$$\mathcal{G}_n^G = E_n^G + E_{n/W}^G$$

$$\mathcal{G}_g^G = 0$$

Onde,

$E_n^W$  = representa a transferência de massa por solubilização da espécie NAPL da fase NAPL para a fase água;

$E_{n/W}^G$  = a transferência de massa por volatilização da espécie NAPL da fase água para a fase gás;

$E_{n/W}^S$  = a transferência de massa por adsorção da espécie NAPL da fase água para a fase solo;

$E_n^G$  = a transferência de massa por volatilização da espécie NAPL da fase NAPL para a fase gás.

Na equação de balanço de massa, o termo da direita contabiliza a variação de massa da espécie  $i$  na fase  $\alpha$ ; o primeiro da esquerda, um balanço do fluxo da massa devido à advecção da fase  $\alpha$  no meio; o segundo, um balanço do fluxo da massa devido à dispersão da fase  $\alpha$ ; o terceiro, a troca de massa entre fases; o quarto representa a presença de fontes ou sumidouros externos; e o quinto, as reações de



troca de massa devido a fenômenos físico-químicos que ocorrem entre as fases  $\alpha$ , representadas pelas equações de trocas de massa (Sousa, 2012)

A partir da equação do balanço de massa e das expressões para os termos das trocas de massa apresentadas, chega-se as cinco equações que possibilitam o estudo do fluxo multifásico; sendo três de balanços de massa (Equações a, b e c), que quantificam a distribuição temporal e espacial das fases água – NAPL – gás em todo o domínio de fluxo, e duas que descrevem as distribuições temporais e espaciais de transporte do NAPL dissolvido nas fases água e gás (Equações d e e).

Fase água (a):

$$\frac{\partial(\phi S_w \rho^w)}{\partial t} + \nabla \cdot [\phi S_w \rho^w \mathbf{v}^w] = \rho^w Q^w + E_n^w - E_{n/w}^G - E_{n/w}^S$$

Fase NAPL (b):

$$\frac{\partial(\phi S_N \rho^N)}{\partial t} + \nabla \cdot [\phi S_N \rho^N \mathbf{v}^N] = \rho^N Q^N - E_n^w - E_n^G$$

Fase gás (c):

$$\frac{\partial(\phi S_G \rho^G)}{\partial t} + \nabla \cdot [\phi S_G \rho^G \mathbf{v}^G] = \rho^G Q^G + E_n^G + E_{n/w}^G$$

NAPL dissolvido na fase água (d):

$$\frac{\partial(\phi S_w \rho_n^w)}{\partial t} + \nabla \cdot [\phi S_w \rho_n^w \mathbf{v}^w] - \nabla \cdot \left[ \phi S_w \rho_n^w \mathbf{D}^w \cdot \nabla \left( \frac{\rho_n^w}{\rho^w} \right) \right] + \phi S_w \rho_n^w = \rho_n^w Q^w + \mathcal{S}_n^w$$

NAPL dissolvido na fase gás (e):

$$\frac{\partial(\phi S_G \rho_n^G)}{\partial t} + \nabla \cdot [\phi S_G \rho_n^G \mathbf{v}^G] - \nabla \cdot \left[ \phi S_G \rho_n^G \mathbf{D}^G \cdot \nabla \left( \frac{\rho_n^G}{\rho^G} \right) \right] + \phi S_G \rho_n^G = \rho_n^G Q^G + \mathcal{S}_n^G$$



Onde,

$S^W, S^N, S^G$  = saturações das fases água, NAPL e gás;

$\rho^W, \rho^N, \rho^G$  = concentrações das espécies (massa específica) nas fases água, NAPL e gás, ( $ML^{-3}$ );

$v^W, v^N, v^G$  = velocidades médias das fases água, NAPL e gás, ( $LT^{-1}$ );

$Q^W, Q^N, Q^G$  = fontes ou sumidouros das fases água, NAPL e gás por unidade de massa;

$r_n^W$  e  $r_n^G$  = coeficientes de decaimento da espécie NAPL nas fases água e gás ( $T^{-1}$ );

$In^W$  e  $In^G$  = fontes ou sumidouros de massa da espécie NAPL nas duas fases água, e

gás devido à volatilização, dispersão e adsorção ( $ML^{-3}T^{-1}$ );

$\rho_n^W$  e  $\rho_n^G$  = as concentrações em massa da espécie NAPL nas fases água, e gás ( $ML^3$ );

$D^W, D^N, D^G$  = coeficientes de dispersão das fases água, NAPL e gás ( $L^2T^{-1}$ ).

A solução das equações resultantes do balanço requisita o uso de relações constitutivas que incluem variáveis primárias e secundárias, as quais podem ser agrupadas em quatro categorias (Sousa, 2012): as que definem as propriedades dos fluidos (densidade, compressibilidade e viscosidade, etc.); as que definem o fluxo do fluido; as que definem o transporte não advectivo das espécies (normalmente difusão) e as que controlam troca de massa entre fases. Todas as variáveis foram definidas em estudos anteriores citados neste trabalho.

A natureza do contaminante também é de grande importância no entendimento do transporte dos mesmos na zona vadosa. No presente estudo a fase contaminante é representada por hidrocarbonetos derivados de petróleo, detalhados a seguir.

#### 4.6. Hidrocarbonetos Derivados de Petróleo

O petróleo é uma mistura complexa que contém vários compostos, sendo que os hidrocarbonetos representam a fração majoritária. De acordo com a sua origem, as suas composições químicas e as suas propriedades físicas variam de um campo petrolífero para outro. Devido, principalmente, à complexidade dessa mistura, normalmente o tratamento de áreas contaminadas por essas substâncias é bastante difícil e problemático. Em solos contaminados por petróleo e seus derivados, alguns contaminantes se destacam frente aos demais. Neste caso, de forma geral, os compostos de interesse que exigem maior preocupação ambiental e que, normalmente, são os principais a serem identificados e quantificados, segundo Almeida *et al.* (2010) são: benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (isômeros: orto-,



meta- e para-xileno). Esses compostos, conhecidos também como BTEX, são definidos como hidrocarbonetos monoaromáticos, cujas estruturas moleculares possuem como característica principal a presença do anel benzênico. São usados, principalmente, em solventes e em combustíveis e são os constituintes mais solúveis na fração da gasolina.

Compostos como os BTEX, constituem em um grande problema, não somente no Brasil, mas em todo o mundo. Esses compostos aromáticos são tóxicos tanto ao meio ambiente como ao ser humano, nos quais atuam como depressores do sistema nervoso central e apresentam toxicidade crônica mais significativa que os hidrocarbonetos alifáticos (também presentes no petróleo e derivados), mesmo em concentrações da ordem de  $\mu\text{g L}^{-1}$  (Watts *et al.*, 2000). O benzeno é reconhecidamente o composto mais tóxico dentre os BTEX e, por isso, pode ser apontado como o agente mais preocupante no tocante à saúde pública. Segundo a Agência Internacional de Pesquisa de Câncer (International Agency for Research on Cancer – IARC), órgão da Organização Mundial da Saúde, o benzeno se classifica no Grupo I, ou seja, é uma substância comprovadamente cancerígena.

Os hidrocarbonetos de petróleo representam um tipo de líquido não miscível em água, também chamado de NAPL (*Non Aqueous Phase Liquid*) e mais especificamente, por ser menos denso que a água ( $< 1 \text{ g/ml}$ ), sob a denominação de LNAPL (*Light Non Aqueous Phase Liquid*). Quando a densidade do líquido for maior que a da água ( $> 1 \text{ g/ml}$ ) este será um DNAPL (*Dense Non Aqueous Phase Liquid*).

Após a contaminação do solo e águas subterrâneas por hidrocarbonetos de petróleo, em decorrência de vazamento de tanque de armazenamento subterrâneo, rompimento de dutos ou outra forma que coloque o combustível em contato com o meio ambiente, o comportamento destes compostos dependerá principalmente das suas características físico químicas e da sua relação naqueles ambientes.

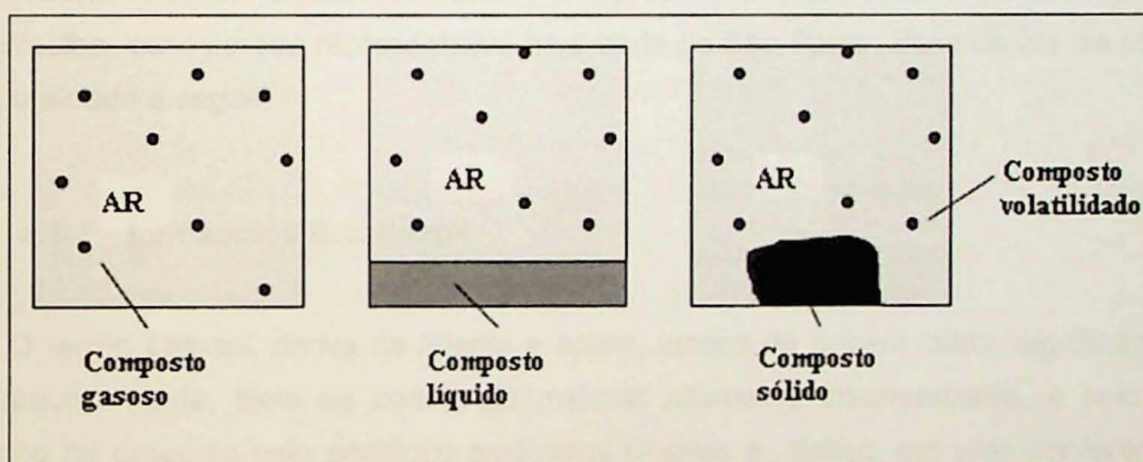
Ao serem derramados em superfície, os LNAPs, representados no presente estudo pelos hidrocarbonetos de petróleo, migram verticalmente pela zona vadosa sob a influência das forças gravitacional e capilar. Esta dispersão em subsuperfície não ocorre então de forma uniforme e homogênea, mas sim sob a forma de acumulações discretas que dependem das propriedades químicas e físicas do meio e do fluido percolante (Fetter, 1999).

Na zona vadosa a contaminação por hidrocarbonetos de petróleo se distribuirá e poderá originar um sistema com quatro fases, compreendido pelas fases vapor, adsorvida, dissolvida e livre, enquanto que na zona saturada a ausência de poros do solo preenchidos por ar não permite o acúmulo da fase vapor.



A fase vapor corresponde aos hidrocarbonetos que são volatilizados a partir das fases livre, dissolvida e adsorvida e se alojam nos vazios existentes no solo (Oliveira, 1992; Maximiano, 2001). A migração da fase vapor se dá em função das propriedades físicas e químicas do composto contaminante (como pressão de vapor, solubilidade, concentração, densidade e viscosidade) e das características do aquífero (como condutividade hidráulica, profundidade do nível estático, direção do fluxo d'água subterrâneo, porosidade), conforme Oliveira (1992).

As principais propriedades físico-químicas dos contaminantes orgânicos que controlam seus comportamentos, sejam modo de migração, a mobilidade e a partição em diferentes fases são importantes para um bom entendimento dos fenômenos. Mackay (1990) menciona que em condições normais de temperatura e pressão de superfície ou nos aquíferos, os compostos orgânicos podem se encontrar naturalmente sob forma de gás (ex: cloreto de vinil), líquida (TCE, Benzeno) ou sólida (Hexacloroetano) conforme esquematizado na Figura 9.



**Figura 9:** Estados dos compostos orgânicos nas condições normais (Mackay, 1990).

Os líquidos no meio poroso não saturado podem compreender:

- 1) água;
- 2) os solventes orgânicos completamente miscíveis podendo se misturar à água a qualquer proporção (etanol, acetona); e
- 3) os solventes orgânicos parcialmente miscíveis, em que parte pode ser solubilizada na água e o restante forma uma fase não aquosa (NAPL) (solventes clorados - PCE, TCE; os BTEX).

Há três combinações possíveis, conforme ilustra a figura 10:

- 1) água pura;
- 2) água com solventes miscíveis em solução; e
- 3) uma fase água e uma fase imiscível de NAPL distinta.



Na presença de duas fases distintas, os solventes completamente miscíveis se dividem entre a fase aquosa e de NAPL. Nessas condições ter-se-á também traços de NAPL na água e vice-versa dentro da zona vadosa.

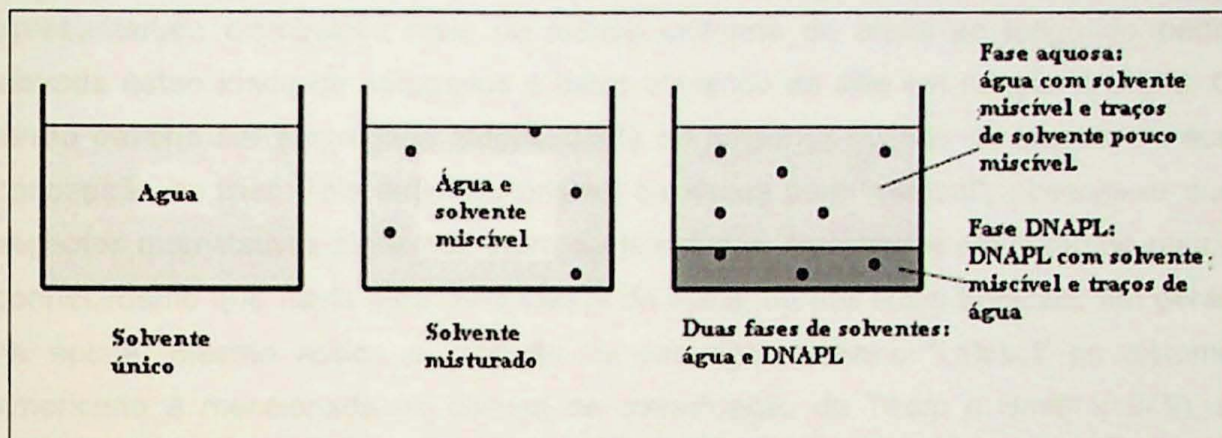


Figura 10: Combinação de tipos de solventes na zona vadosa (Mackay, 1990).

A zona vadosa, no presente trabalho compreende um solo descrito como latossolo Vermelho, considerado representativo no Estado de São Paulo. Essa classe de solos é detalhada a seguir.

#### 4.7. Latossolos Brasileiros

O termo *Latosol*, deriva de *laterite* e *solum*, ambos de origem latina, significando, respectivamente, tijolo ou conotando material altamente intemperizado, e solo. O termo foi proposto pelo pedólogo americano Charles E. Kellog, em uma conferência americana sobre classificação de solos realizada em Washington em 1949 (Lemos, 1966).

Os Latossolos, como utilizado no Brasil, guardam certa correspondência com os Oxisols e Sols Ferralitiques dos sistemas americano e francês, respectivamente. A introdução deste termo como classe de solo objetivou agrupar solos mais intemperizados das regiões tropicais, até então denominados *laterite* e *lateriticsoils*, de definição pouco precisa, genérica e confusa, onde solos distintos eram agrupados em uma mesma classe (Lemos, 1966; Cline, 1975). O conceito inicial de Latossolo (Kellog, 1949) contemplava solos cujas características encontravam-se fortemente relacionadas à intemperização e lixiviação intensas e responsáveis pelas baixas:

- 1) atividade das argilas;
- 2) capacidade de troca de cátions;



- 3) relações moleculares sílica/ alumínio ( $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Ki}$ ) e sílica/óxidos de ferro e alumínio ( $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Kr}$ ).

Além disso, os solos designados por Latossolos, além de profundos, de coloração relativamente homogênea com matizes avermelhadas e/ou amareladas, apresentariam distribuição mais ou menos uniforme de argila ao longo do perfil, elevada estabilidade de agregados e baixo conteúdo de silte em relação à argila. O termo deveria ser empregado independente da presença ou não de laterita, na sua concepção original. Pela definição original de Kellog para "Latosol", observa-se que aspectos quantitativos ainda não eram contemplados, certamente em razão do pouco conhecimento que havia para essa classe de solos, ou dos solos tropicais, em geral, na época. Mesmo assim, a intenção de empregar o termo "Latosol" no sistema americano é mencionada no esboço de classificação de Thorp e Smith (1949), e parece ter influenciado pedólogos brasileiros. Tanto é assim, que este termo foi empregado em vários trabalhos de levantamento de solos de algumas áreas do Brasil, iniciados na década de cinquenta (BRASIL, 1958, 1960 e 1962). Com o desenvolver do sistema americano de classificação de solos, os solos latossólicos foram agrupados na ordem dos "Oxisols" não sendo mais empregado o termo "Latosol" naquele sistema de classificação. Para tanto, estabeleceu-se a definição do horizonte subsuperficial óxico (*oxichorizon* - EUA, 1960, 1975, 1994), que inspirou com adequações, a criação do horizonte B latossólico (Bw) diagnóstico da classe dos Latossolos, no sistema brasileiro de classificação de solos (Camargo et al., 1987; EMBRAPA-SNLCS, 1988).

Desde sua criação no final da década de cinquenta (BRASIL, 1958; 1960), o horizonte B latossólico passou por adequações até última versão (EMBRAPA-SNLCS, 1988), descrita a seguir:

1. Apresenta espessura mínima de 50 cm, textura mais fina que franco arenosa com baixos teores de silte, de maneira que a relação silte/argila seja menor que 0,7;
2. Apresenta na fração  $< 0,05$  mm, menos de 4% de minerais primários facilmente decomponíveis, ou menos de 6% de muscovita; admite-se a presença de pequenas quantidades de argilominerais interestratificados e, ou, ilita, na fração menor que 0,005 mm (silte+ argila), porém não deve conter mais que traços de minerais do grupo das esmectitas;
3. A relação molecular  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  (Ki) deve ser menor que 2,2;
4. Não deve apresentar mais que 5% do volume ocupado por materiais pouco alterados, ainda guardando resquícios do material de origem;



5. Grande estabilidade de agregados, sendo o grau de floculação igual ou próximo de 100%, à exceção dos horizontes mais ricos em matéria orgânica ou eletropositivos;
6. Pouca diferenciação entre subhorizontes.

Baseando-se nestes critérios, na cor e nos teores de ferro do ataque sulfúrico são reconhecidos atualmente no Brasil sete tipos de Latossolos (Camargo *et al.*, 1987; Oliveira *et al.*, 1992): Ferrífero (LF), Roxo (LR), Vermelho-Escuro (LE), Vermelho-Amarelo (LV), Amarelo (LA), Bruno (LB), Vermelho-Amarelo variação Una (LU). Mais recentemente, foi discutida a criação do Latossolo Pálido (LP) (Carvalho *et al.*, 1993) cuja definição e implantação no sistema brasileiro de classificação ainda depende de mais estudos. Quando estes Latossolos apresentam horizonte A espesso e rico em matéria orgânica, fato mais comum nos LV, LB, LU, LR, LF e LV, são denominados Latossolos Húmicos (LH).

Neste trabalho o solo estudado é o denominado como Latossolo Vermelho Escuro (LE) Este tipo de solo é formado a partir de uma grande diversidade de materiais de origem, possuem coloração avermelhada com teores de ferro obtidos pelo ataque sulfúrico entre 8 e 18%. Apesar do limite mínimo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  estabelecido, vários são os solos de cor avermelhada reconhecidos, e com teores menores que 8%, indicando a necessidade de reavaliação do limite inferior de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para esta classe. Desenvolvem-se a partir de arenitos, calcários, gnaisses e mesmo de materiais retrabalhados e pré-intemperizados referentes à cobertura detrito-laterítica, entre outros materiais. Em razão disso, são de fertilidade e textura muito variadas, sendo encontrados solos distróficos, álicos e eutróficos e de textura que vai de franco arenosa a muito argilosa, constituindo-se, portanto, em uma classe relativamente heterogênea nestes aspectos.

Encontram-se amplamente distribuídos pelo território nacional com destaque para os estados do Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, Paraná, São Paulo, Mato Grosso e Rio Grande do Sul. Observa-se sua pouca ocorrência em alguns estados do norte e do nordeste (Oliveira, 1992).

De forma dominante, tendem a ocupar áreas de topografia plana ou suavemente ondulada, como aquelas dos amplos chapadões do Brasil Central, e constituem-se juntamente com os Latossolos Roxos e Vermelho Amarelos, uma das principais classes de solos utilizadas com agricultura tecnificada, destacando-se soja, trigo, milho, feijão, café etc.

Ainda que a mineralogia básica da fração argila seja constituída principalmente de caulinita, gibbsita, goethita e hematita, a proporção entre estes componentes é bastante variável, podendo ocorrer Latossolos Vermelhos extremamente



intemperizados (oxídicos), inclusive eletropositivos em subsuperfície (comuns no Planalto Central) até aqueles mais cauliniticos em outras áreas do Brasil.

## **5. MATERIAIS E MÉTODOS**

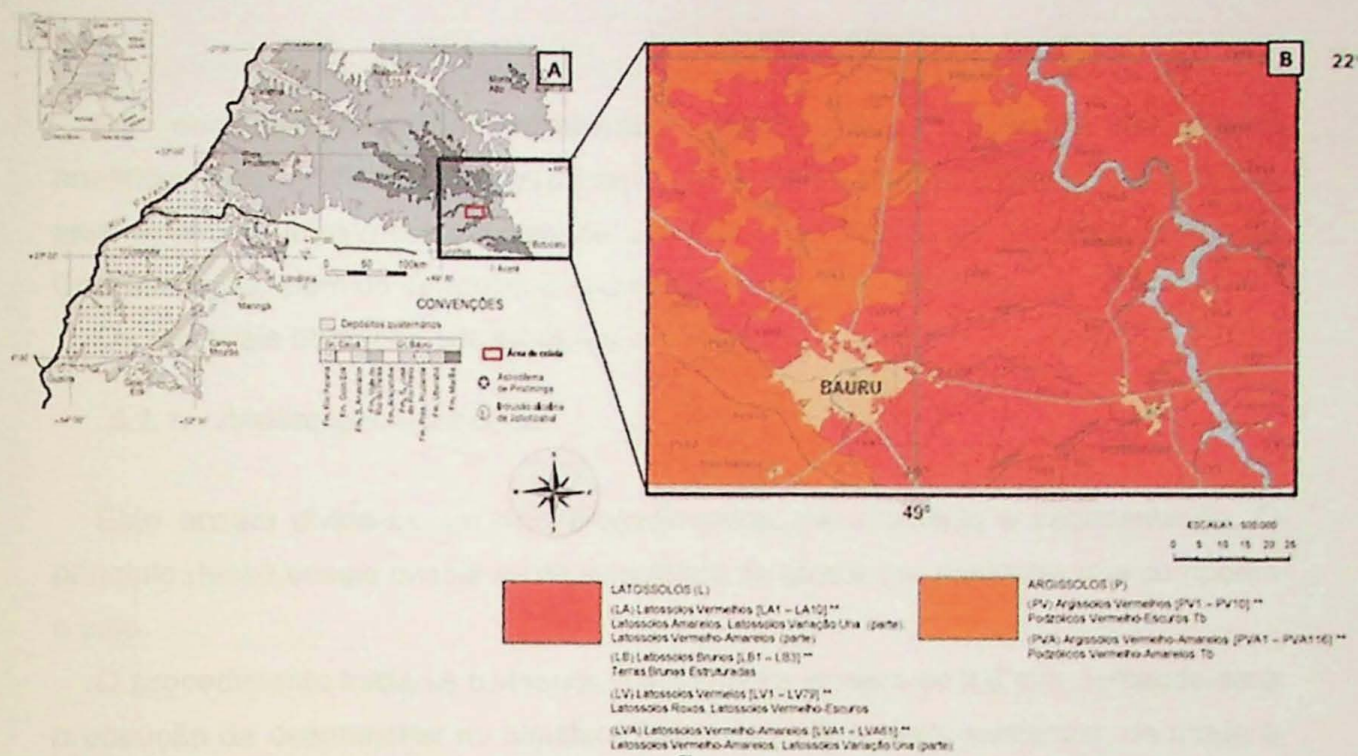
Os estudos foram desenvolvidos no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP (LMS). Os experimentos foram divididos em três etapas principais: a primeira etapa foi destinada à coleta e caracterização dos solos visando obter parâmetros geotécnicos; a segunda etapa foi destinada a avaliar as características de retenção de fluidos do solo. Nessa etapa foi montada coluna de solo com altura de 1,5 metros utilizando a Areia Normal (padrão IPT) considerando somente água e em seguida somente gasolina pura. A terceira coluna de solo foi montada, utilizando latossolo vermelho considerando somente gasolina, a curva de retenção considerando somente água, foi realizada através dos métodos da Placa de Sucção e Placa de Pressão, respectivamente.

A terceira etapa teve como objetivo avaliar o comportamento unidirecional da fase vapor de combustível em coluna de areia (Normal-IPT) e latossolo, ambas com altura de 6,5 centímetros considerando somente gasolina à umidades diversas do solo utilizado. Estes últimos ensaios foram denominados de Colunas de Difusão, pois um dos principais mecanismos de transporte observado foi o de difusão molecular.

### **5.1. Coleta do Latossolo Vermelho e Caracterização- Primeira Etapa**

A coleta do latossolo Vermelho foi realizada tendo como base o mapa pedológico do Estado de São Paulo (Oliveira *et al.* 1999). Como se pode observar na Figura 10, a área de coleta, Bauru (SP), está localizada em uma região com quantidades significativas do latossolo vermelho mapeado, descrito por Oliveira *et al.* 1999, nesta área em especial, pela unidade LV56, representada pela mancha em vermelho.

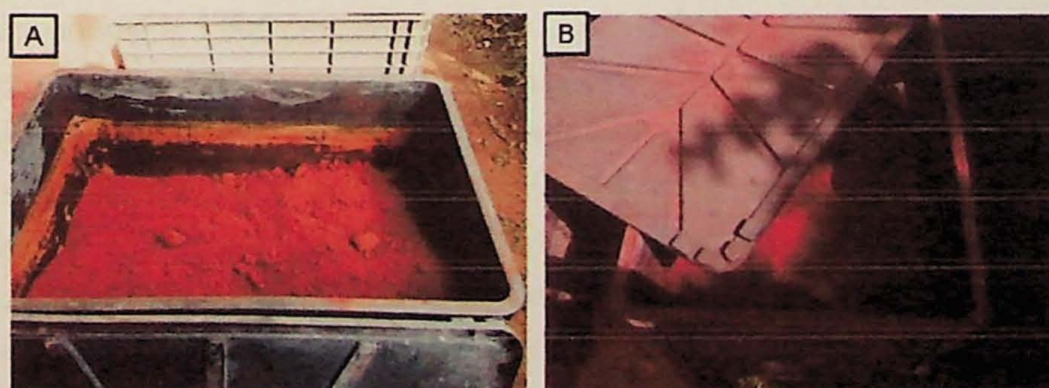




**Figura 10:** A) Mapa litoestratigráfico da parte oriental da bacia de Bauru, com destaque para a quadrícula de área de coleta, retirado de Fernandes 2004. B) A quadrícula equivalente no mapa pedológico, com destaque para o município de Bauru, retirado de Oliveira *et al.* 1999.

A unidade LV56 é descrita por Oliveira *et al.* (1999) como de textura média (argilo-arenosa) e distrófico e é identificada em grande parte ao redor do município. Dentro dessa unidade foi coletado o latossolo que foi utilizado em todos os ensaios e que representa uma zona vadosa nas simulações de contaminação por gasolina.

É importante ressaltar que o latossolo foi coletado de uma forma em que as amostras foram deformadas e que a porosidade original não foi preservada, portanto as simulações demonstram como o transporte de substâncias ocorre no solo, mas não em condições *in situ*. Devido à esse fato, o solo foi caracterizado através de ensaios de bancada a partir do momento em que foi armazenado no laboratório (Figura 11).



**Figura 11:** Latossolo armazenado. A) Antes de ser peneirado e destorroadado; B) Após ser peneirado e destorroadado.



Os ensaios realizados representam meios para a obtenção de dados analíticos, essenciais para a identificação e classificação dos solos estudados. São eles: Análise granulométrica, Limite de Liquidez e de Plasticidade do solo e Ensaio de Compactação, além da determinação dos índices de vazios da areia.

Os materiais utilizados são expostos na Figura 12.

#### *5.1.1. Análise granulométrica*

Este ensaio divide-se em dois procedimentos: peneiramento e sedimentação. O princípio desse ensaio baseia-se na velocidade de queda das partículas que compõem o solo.

O procedimento inicia-se passando o material na peneira de 2,0 mm, tomando-se a precaução de desmanchar no almofariz todos os torrões ainda existentes, de modo a assegurar a retenção, na peneira, somente dos grãos maiores que a abertura da malha. Utiliza-se a escova com cerdas metálicas para auxiliar a retirada dos grãos retidos nas malhas da peneira, procedendo da mesma forma em todos os passos que envolvam o peneiramento. A parte retida é lavada na peneira de 2,0 mm, a fim de eliminar o material fino aderente e secar em estufa a 105°C/110°C

O material obtido é transferido para um béquer de 250 cm<sup>3</sup> e misturado com auxílio de proveta, como defloculante, 125 cm<sup>3</sup> de solução de hexametáfosfato de sódio com a concentração de 45,7 g do sal por 1.000 cm<sup>3</sup> de solução. O béquer é agitado até que todo o material fique imerso e deixado em repouso, no mínimo 12 horas. Então, a mistura é vertida no copo de dispersão, removendo com água destilada, o material aderido ao béquer. Adiciona-se água destilada até que seu nível fique 5 cm abaixo das bordas do copo. Em seguida o material é submetido à ação do aparelho dispersor durante 15 minutos.

Transfere-se a dispersão para a proveta e todo o material retido no copo é removido com água destilada. A água destilada é adicionada até atingir o traço correspondente a 1.000 cm<sup>3</sup>; em seguida, agita-se frequentemente com movimentos de rotação durante 1 minuto, pelos quais a boca da proveta passe de cima para baixo e vice-versa. Imediatamente após terminada a agitação, coloca-se a proveta sobre uma mesa e é anotada a hora exata do início da sedimentação e mergulhado o densímetro na dispersão. Efetua-se as leituras do densímetro correspondentes aos tempos de sedimentação (t) de 0,5, 1 e 2 minutos. O densímetro é retirado da dispersão. São realizadas as leituras subseqüentes a 4, 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas, a contar do início da sedimentação.



Realizada a última leitura, o material é derramado da proveta na peneira de 0,075 mm, procede-se à remoção, com água, de todo o material que tenha aderido às suas paredes, e efetua-se a lavagem do material na peneira mencionada, empregando água potável à baixa pressão.

A partir desse ensaio, são geradas as proporções granulométricas do solo.

#### *5.1.2. Limites de liquidez e plasticidade*

O limite de Liquidez baseia-se no princípio de determinar o teor de umidade do solo referente à mudança do estado líquido para o estado plástico.

São colocados aproximadamente 100g de solo em uma cápsula de porcelana, adiciona-se água, formando uma massa homogênea. É espalhado 30 ml desta massa na cápsula metálica do aparelho de Casagrande, de modo que a parte central tenha 1 cm de espessura. A massa, na parte central, é cortada com um cortador próprio do aparelho. Gira-se a manivela do aparelho a uma velocidade constante e é anotado o número de golpes quando a ranhura central se fecha à espessura de 1 cm. Em seguida, mistura-se bem a massa de solo contida na cápsula metálica e repete-se a operação anterior. Se o número de golpes for  $> 18$  e  $< 32$ , pode-se retirar a amostra e calcular o teor de umidade. É pesada uma pequena amostra, de preferência próxima a ranhura, em seguida é colocada na estufa. Depois de seca é calculado o teor de umidade retida no solo.

O limite de Liquidez é representado pelo valor da percentagem de umidade retida pela amostra, correspondente a 25 golpes.

O limite de Plasticidade tem como princípio determinar o teor de umidade de um solo referente à mudança do estado plástico para o estado semi-sólido através de um ensaio mecânico.

Retira-se aproximadamente 10 a 15g da massa preparada no ensaio de limite de Liquidez. O solo é comprimido sobre uma placa de vidro até formar um bastão cilíndrico de 3 a 4mm de diâmetro. A operação é repetida várias vezes, adicionando água na massa do solo, de modo que o bastão formado comece a quebrar quando atingir o diâmetro desejado.

Em seguida calcula-se o teor de umidade dos bastões formados. O limite de Plasticidade é representado pela média dos valores das percentagens de umidade das três ou mais determinações.

O índice de Plasticidade é calculado a partir da subtração dos valores de limite de Liquidez e limite de Plasticidade.



### 5.1.3. Ensaio de compactação do solo

É possível constatar que a adição de água a um solo seco facilita sua compactação, ou seja, cada vez que se adiciona água ao solo pouco úmido, a densidade final do material compactado aumenta. Porém isso não ocorre indefinidamente, o acréscimo de água tem esse efeito enquanto não se alcança um certo teor de umidade, denominado como umidade ótima. Quando a adição de água conduz a umidades superiores a esse teor, passe-se a verificar o efeito contrário (a densidade do material compactado tende a se reduzir com o acréscimo de umidade).

Portanto o ensaio de compactação tem basicamente dois objetivos: determinar a umidade ótima do solo, para uma dada energia de compactação e determinar o peso específico aparente seco máximo associado à umidade ótima.

O procedimento inicia-se com a preparação da amostra. Esta deve ser previamente seca ao ar e destorroada. Inicia-se o ensaio, acrescentando-se água até que o solo fique com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima.

Uma porção do solo é colocada num cilindro padrão (10cm de diâmetro, altura de 12,73cm, volume de 1.000cm<sup>3</sup>) e submetida a 26 golpes de um soquete com massa de 2,5Kg e caindo de 30,5cm. A porção do solo compactado deve ocupar cerca de um terço da altura do cilindro. O processo é repetido mais duas vezes, atingindo-se uma altura um pouco superior à do cilindro, o que é possibilitado por um anel complementar. Acerta-se o volume raspando o excesso.

Determina-se a massa específica do corpo de prova obtido. Com uma amostra de seu interior, determina-se a umidade. Com estes dois valores, calcula-se a densidade seca. A amostra é destorroada, a umidade aumentada (cerca de 2%), nova compactação é feita, e novo par de valores umidade-densidade seca é obtido. A operação é repetida até que se perceba que a densidade, depois de ter subido, já tenha caído em duas ou três operações sucessivas.

### 5.1.4. Determinação de espaços vazios da areia

Essa determinação corresponde à relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos em um determinado solo. Embora possa variar, teoricamente, de 0 a  $\infty$ , o menor valor encontrado em campo para o índice de vazios é de 0.25 (para uma areia muito compacta com finos) e o maior de 15 (para uma argila altamente compressível por exemplo).



O índice de vazios não é uma propriedade do solo, podendo variar e estando relacionado à compactação do mesmo, porém não podendo o índice de vazios por si só definir qual o grau de compactação de um solo, uma vez que dois solos com mesmo índice de vazios podem apresentar compactações distintas (Nunes, 2014).

Entretanto, para melhor caracterização a partir do índice de vazios natural (ou induzido-*enat* da amostra) é necessária sua identificação dentro de um espectro melhor definido, sendo esses delimitados pelos índices de vazios máximo ( $e_{máx}$ ) e índice de vazios mínimo ( $e_{mín}$ ), que se correlacionam respectivamente ao estado mais fofo e o mais compacto do solo.

Os índices de vazios máximo e mínimo podem ser obtidos em laboratório através de procedimentos experimentais. É despejada vagarosamente a areia em um recipiente (cápsula de ensaio de Proctor) com auxílio de um funil a pequena altura de queda em espiral partindo-se das extremidades para o centro preparando-se a amostra em seu estado mais fofo, possibilitando a determinação de seu peso específico e cálculo do índice de vazios máximo ( $e_{máx}$ ). Esse método foi sugerido por Souza Pinto (2006). O estado mais compacto segundo sugestão do mesmo autor, foi realizado vibrando-se a areia no molde com uma sobrecarga sobre a mesma e calculando seu respectivo índice de vazios mínimo ( $e_{mín}$ ).



**Figura 12:** Exemplos de alguns materiais utilizados durante a preparação de amostras e ensaios de caracterização. **A-** Latossolo vermelho sendo peneirado; **B-** Latossolo Vermelho sendo destorreado; **C-** amostra no copo de dispersão, submetido à ação do aparelho dispersor (análise granulométrica); **D-** amostra na proveta+água destilada e densímetro mergulhado em água destilada (análise granulométrica); **E-** areia IPT em cápsula de alumínio, após a retirada da estufa (determinação das umidades dos corpos de prova da coluna areia+água); **F-** segmentos individuais de PVC anterior à coluna areia+gasolina.



## 5.2. Geração das Curvas de Retenção- Segunda Etapa

Para a obtenção da curva de retenção dos dois solos utilizados (Areia Normal-IPT e o Latossolo Vermelho), foram realizados os métodos de montagem de coluna de solo para a areia+água; areia+gasolina e latossolo+gasolina e, também, as técnicas da placa de sucção e placa de pressão para a geração da curva de retenção para latossolo+água.

### 5.2.1. Colunas de solo

Para a areia foram montadas duas colunas de 1,5 metros de altura por 15 cm de diâmetro. As colunas foram preenchidas por areia normal com 65% de densidade relativa e na base de cada coluna Foi simulado um nível d'água constante. Após a estabilização com o nível d'água, foi observada a ascensão capilar (franja capilar) na coluna. A coluna areia+água foi saturada com água sem permitir a drenagem pela base. Em seguida foi permitida a drenagem da água coletando-se o volume drenado. O tempo de drenagem foi de aproximadamente 4 dias, quando não se verificou mais saída de água na base. Quando o equilíbrio foi atingido, foram coletadas amostras a cada 15 cm ao longo da coluna para medição da umidade por meio da pesagem da amostra úmida, secagem e posterior pesagem da amostra seca. Na porção inferior da coluna foram coletadas amostras a cada 10 cm para detalhar melhor o perfil de umidade.

O procedimento acima também foi executado para a coluna areia + gasolina. A gasolina pura do tipo A foi fornecida pela empresa Tecnohidro Consultoria e Engenharia Ambiental e armazenada em barris com capacidade de 50 litros como demonstrados na Figura 13.



**Figura 13:** Gasolina armazenada em barris com capacidade de 50 litros.



As colunas foram montadas em segmentos de PVC rígido. Todas as peças possuem no topo e na base placas de PVC para a conexão e vedação entre elas. A vedação é feita com anéis de borracha (*O-rings*) com vaselina, que são pressionados por meio de parafusos contra as placas de PVC. As colunas foram instaladas em uma estrutura metálica desenvolvida para essa finalidade. Na base foram feitos drenos para a coleta de fluido percolado pelas colunas.

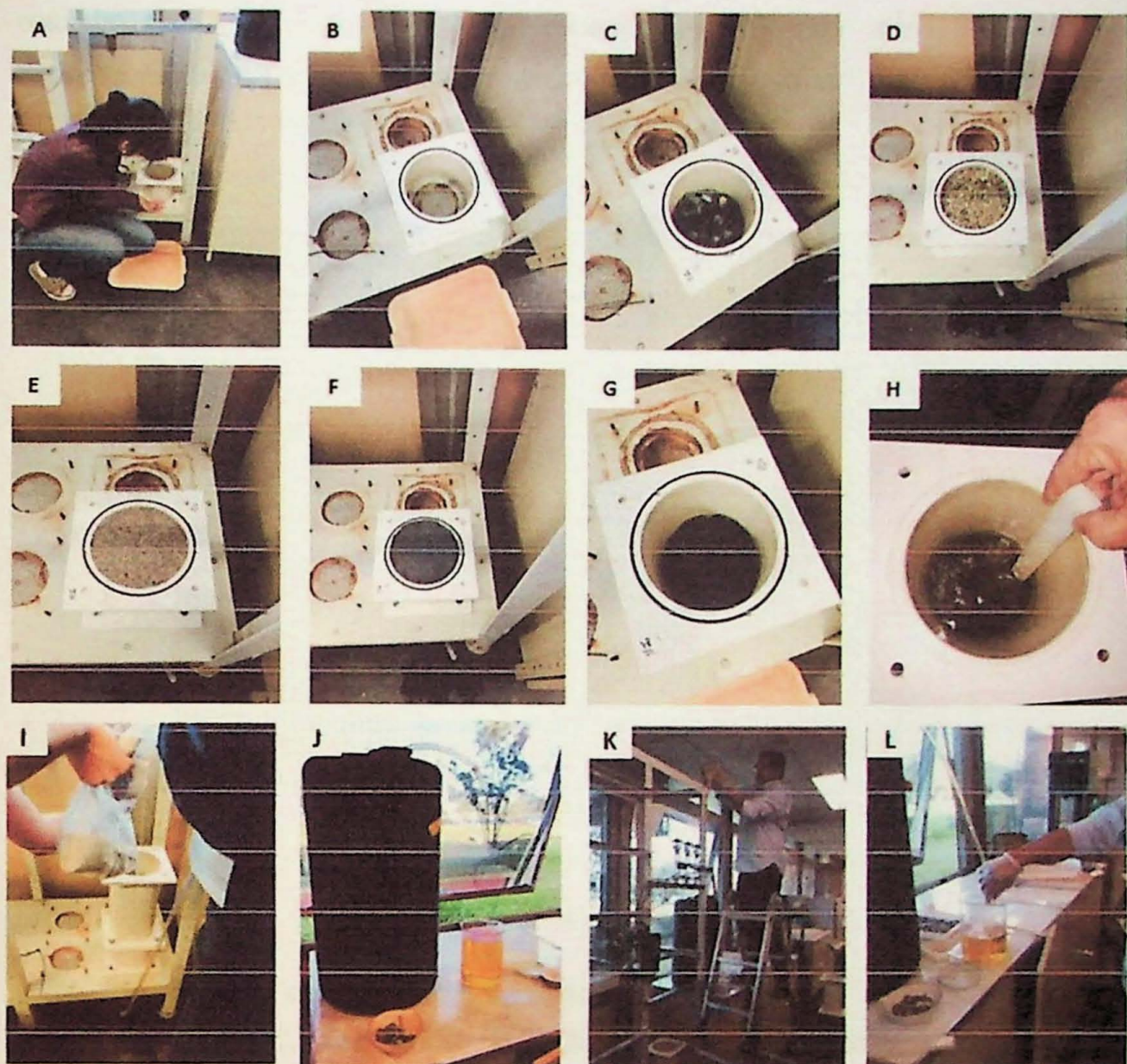
A coluna é montada em partes, concomitante ao preenchimento do solo (areia IPT ou latossolo vermelho). Na estrutura metálica monta-se a base, segmento de PVC de 10 cm de altura parafusado ao primeiro segmento (30 cm de altura). O dreno localizado abaixo da estrutura foi erguido até o topo e preso ao metal, dessa forma, a saturação do solo se deu de baixo para cima. Nessa entrada colocou-se um funil para a saturação do solo (areia IPT, ou latossolo vermelho) com o fluido (água pura ou gasolina).

A base de 10 cm é preenchida por brita, areia de granulometria grossa com cascalhos, areia de granulometria média e areia fina, nesta ordem de baixo para cima, e acima é colocado um segmento de bidim (filtro para sistema de drenagem).

Somente após a construção desse pequeno filtro, coloca-se a primeira quantidade de solo (areia IPT, ou latossolo vermelho) pesada.

A Areia IPT foi pesada de acordo com a quantidade calculada a partir dos índices de espaços vazios (máximo e mínimo), para que atingisse uma densidade equivalente a 65% do grau de compactação relativa. Foi calculado que para cada 10 cm da coluna, devia-se preencher com 2756 kg de areia. As fases de montagem da coluna areia + água e areia + gasolina, estão ilustradas na Figura 14.



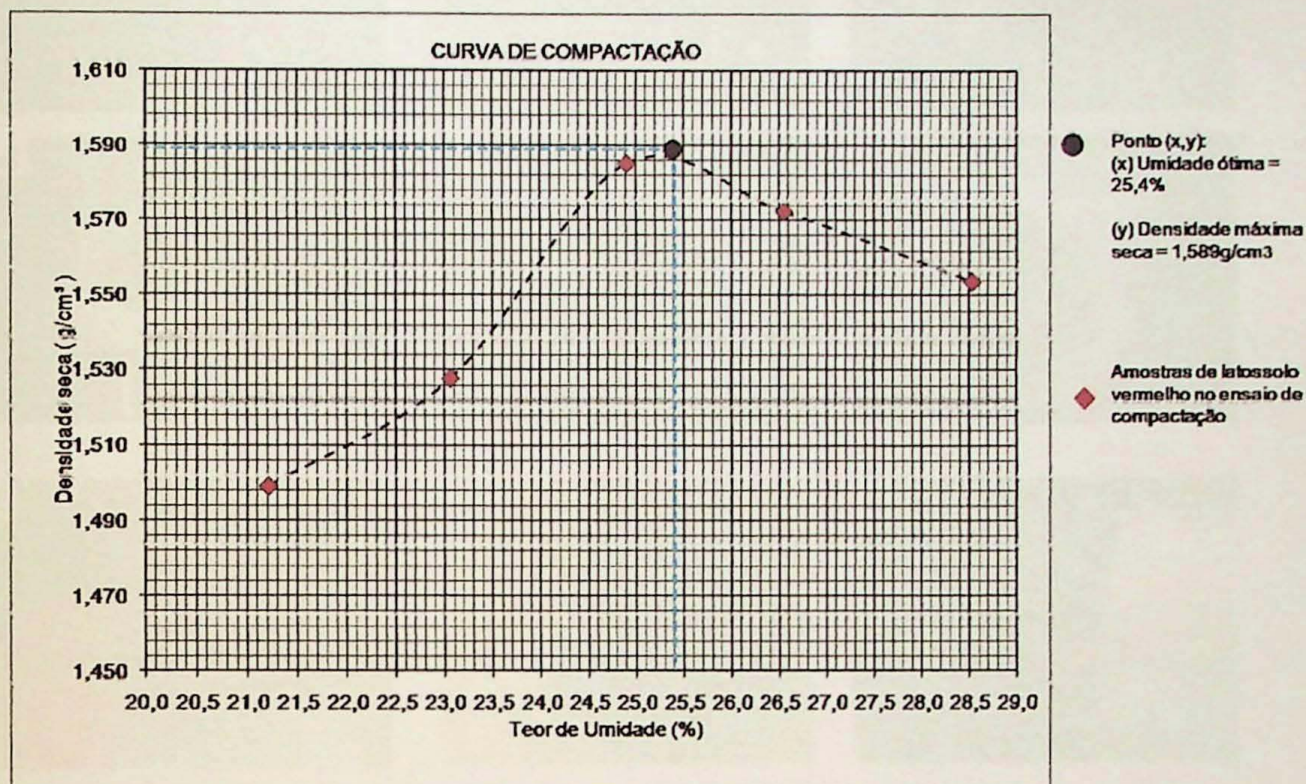


**Figura 14.** Esquema das fases de montagem das colunas com areia normal IPT + gasolina (mesmo método empregado para a montagem da coluna de areia+água). A- Instalação da base (10 cm) de PVC; B- Colocação do *O-ring* de vasilina para a vedação; C- Depositada brita para a base do filtro; D- Acima da brita é colocada areia de granulometria grossa com cascalhos e logo a cima, a areia de granulometria média.; E- Representa a granulometria final do filtro criado, areia fina; F- Acima do filtro são colocados uma renda metálica e bidim cortado de acordo com o diâmetro do segmento de PVC; G- é conectado com parafusos o primeiro segmento de 30 cm; H- A coluna é saturada por gasolina através de um dreno preso no topo base metálica, assim o material é saturado de baixo para cima; I- inicia-se a deposição de areia fina IPT (2756 kg a cada 10 cm de altura); J- A gasolina é armazenada em galões de 50 litros e transferidas para o béquer de 2 litros; K- Do béquer a gasolina é despejada no dreno preso no topo repetindo-se a deposição de areia e conectando-se novos segmentos; L- A gasolina é retirada do galão através de uma mangueira pela diferença de pressão causada por leve sucção na outra extremidade (fora do galão).

Para a montagem da coluna latossolo+ gasolina, foi necessário o cálculo de solo a partir de seu ensaio de compactação. Para padronizar os ensaios foi determinado que a densidade relativa do solo a ser utilizada, seria a de 80% do grau de compactação



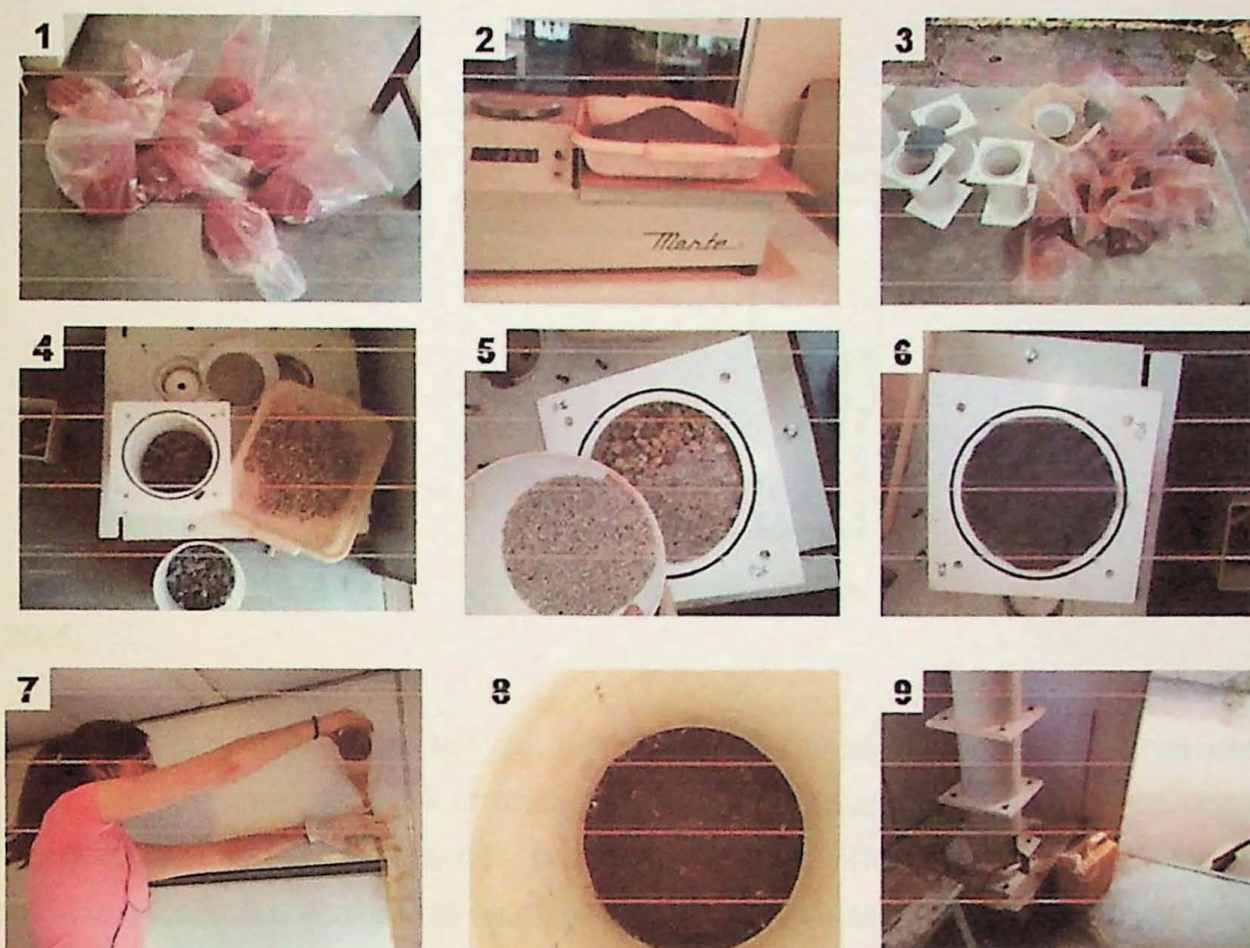
máximo, ou seja, a densidade utilizada foi 80% da densidade máxima seca ( $1,2712\text{g/cm}^3$ ) obtida pelo ensaio de compactação do solo ( $1,589\text{g/cm}^3$ ). Na Figura 15, é demonstrado curva de compactação do solo.



**Figura 15:** Curva de compactação do solo

A partir dessa densidade foi calculado que, para cada 10cm de altura dos segmentos de PVC, eram necessários 2353g de latossolo. Essa última coluna foi montada de acordo como mesmo método descrito para as outras duas colunas (areia+água; areia+gasolina), porém não foi montada dentro do Laboratório de Mecânica de Solos, devido à grande quantidade de gasolina utilizada para a saturação do solo (50 litros). Foi utilizada uma pequena instalação, ao ar livre, nos arredores do laboratório, com revestimento térmico apropriado. A drenagem da coluna, assim como foi realizado nas colunas anteriores, teve duração de 6 dias. As etapas são demonstradas na Figura 16:





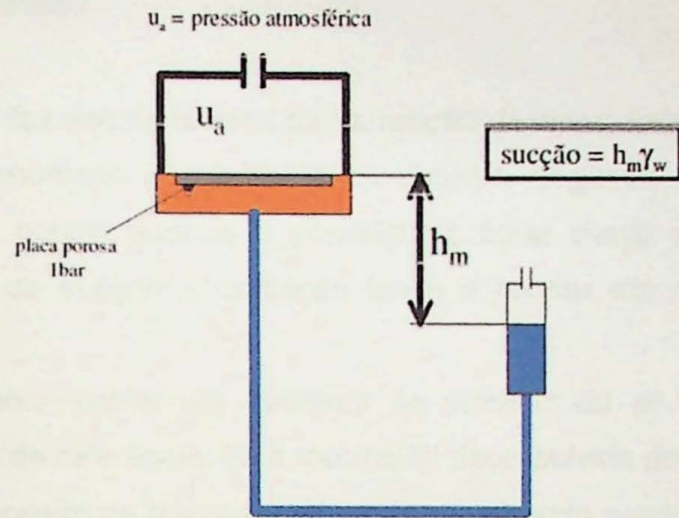
**Figura 16:** Montagem da coluna latossolo+gasolina. 1) Sacos com 2353g de latossolo; 2) Pesagem do solo; 3) Materiais utilizados na montagem; 4) Materiais utilizados no filtro; 5) Finalização da montagem do filtro; 6) Colocação do bidim; 7) Gasolina inserida no funil para a saturação do solo de baixo para cima na coluna; 8) Solo saturado; 9) Drenagem da coluna.

A partir dessa coluna obteve-se a curva de retenção da gasolina no latossolo vermelho, para a obtenção da curva de retenção de água no latossolo, foram utilizadas as técnicas de placa de sucção e placa de pressão, descritas a seguir.

### 5.2.2. Placa de sucção

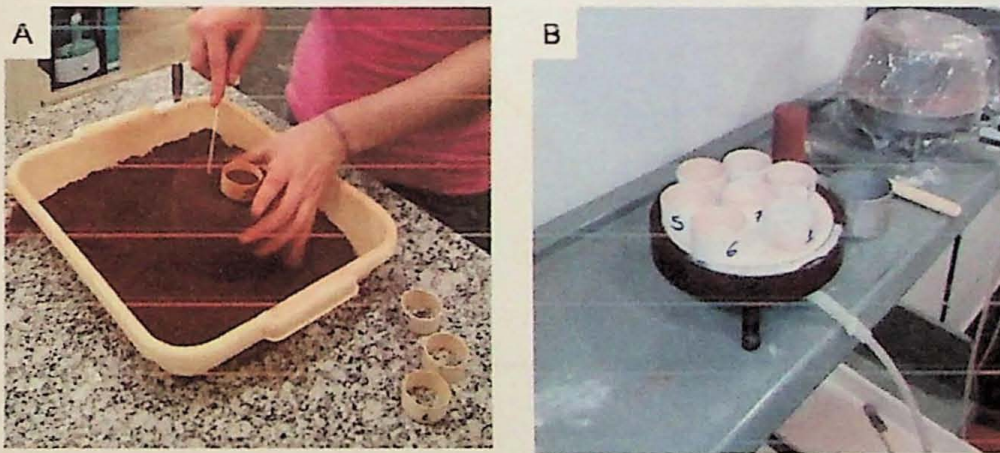
A placa de sucção tem seu uso mais adequado quando se deseja imporsucções até aproximadamente 80kPa. O sistema da placa de sucção é ilustrado na Figura 17. Quando uma diferença entre o reservatório e a pedra porosa é imposta, tem-se uma pressão relativa na pedra abaixo da pressão atmosférica. Esta diferença de altura (hm) é a carga de depressão imposta. Ao multiplicar esta carga pelo peso específico da água tem-se a sucção induzida na pedra porosa e em consequência no solo (Marinho, 2005).





**Figura 17:** Esquema demonstrativo da técnica de placa de sucção, retirado de Marinho (2005).

Para a realização desta técnica, o solo foi compactado no proctor, como descrito no ensaio de compactação, à umidade ótima (25,4%). As amostras de solo, colocadas na pedra porosa foram moldadas, em pequenos segmentos de PVC com dimensões de 3 cm de altura e 4cm de diâmetro, como demonstrado na Figura 18.



**Figura 18:** Técnica da placa de sucção. **A)** Molde dos pequenos corpos de prova nos segmentos de PVC; **B)** Segmentos de PVC dispostos em cima da placa de sucção.

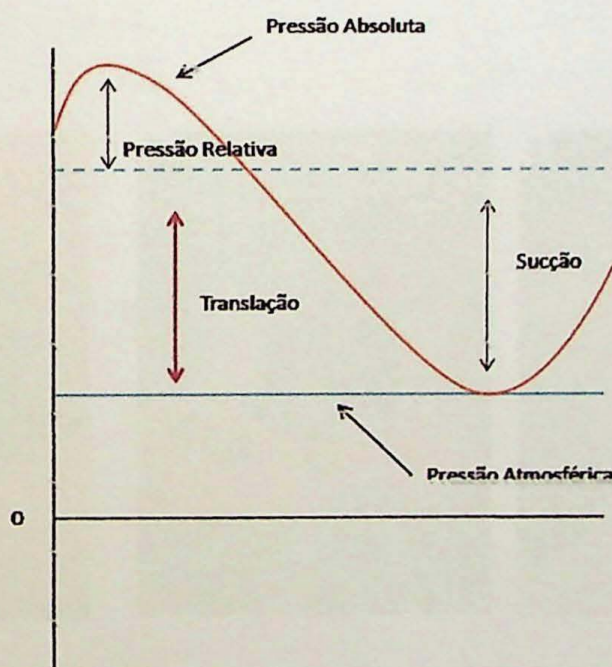
O valor máximo possível de ser aplicado é limitado à ocorrência de cavitação no sistema, que em geral é de 80kPa. Na prática, a limitação é por conta das condições de laboratório que nem sempre permitem a aplicação de diferenças de altura superiores a 4m (Marinho, 2005). Portanto, valores acima de 30kPa, foram obtidos pela técnica da placa de pressão para os mesmos corpos de prova.



### 5.2.3. Placa de pressão

A placa de pressão faz uso da técnica da translação de eixos. Esta técnica objetiva evitar que ocorra o fenômeno da cavitação no sistema. Segundo Marinho (2005), a cavitação geralmente ocorre quando a pressão na água chega próxima ao zero absoluto. Em termos de sucção a cavitação tende a ocorrer em níveis de sucção próximos a 80kPa.

A translação de eixo impõe um aumento na pressão do ar que causa uma translação da pressão de referência. Esta técnica foi desenvolvida por Hilf em 1956. A Figura 19 ilustra o processo de translação de eixos mostrando a pressão atmosférica referencial e a pressão de ar dentro do sistema da placa de pressão. A translação induz um distanciamento relativo da pressão medida em relação ao zero absoluto. O procedimento é equivalente a uma mudança de planeta, onde a pressão atmosférica local seria maior, e a água se manteria com pressão acima do zero absoluto local (Marinho, 2005).



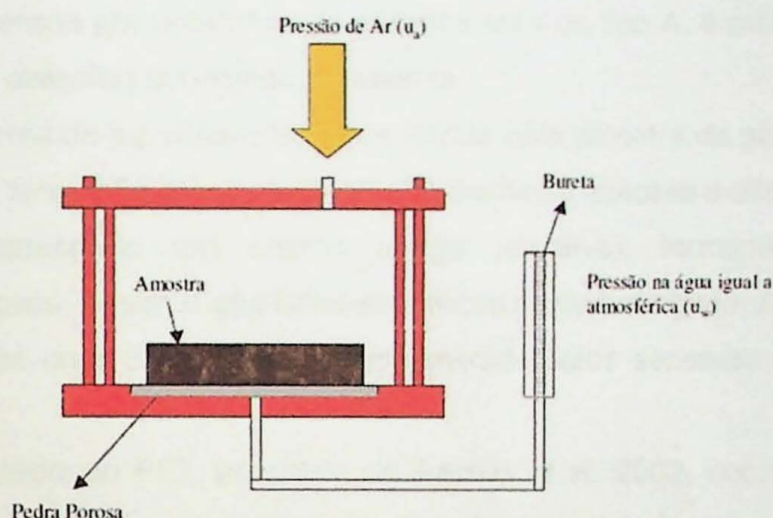
**Figura 19:** Esquema do processo de translação de eixos, retirado de Marinho, 2005.

A técnica da translação de eixos pode ser aplicada em vários tipos de equipamentos utilizados na geotecnia tais como: edômetro, triaxial, cisalhamento direto ou apenas num sistema que objetive determinar a curva de retenção. No LMS foi desenvolvido um equipamento para a aplicação da técnica da translação de eixo com o objetivo de determinar a curva de retenção de água. Na Figura 20 é apresentado o sistema utilizado no LMS, onde se detalha as diversas partes que o compõem. Salienta-se que a sucção aplicada é a diferença entre a pressão do ar e da água (ua –

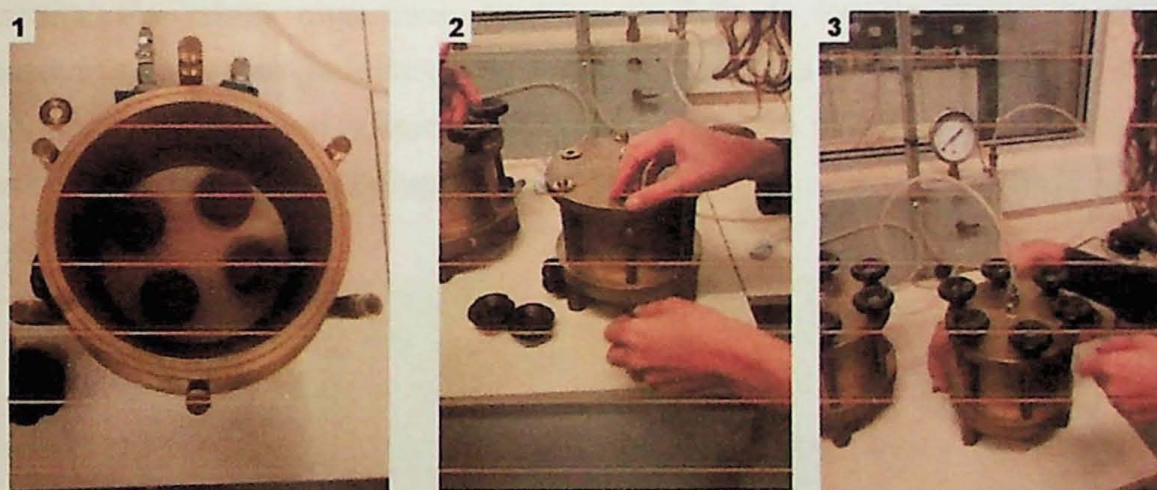


uw). No caso do sistema ilustrado na Figura 20, a pressão na água é a atmosférica. No entanto, a técnica permite que outro valor de pressão na água seja aplicado.

O sistema desenvolvido pelo LMS é representado na Figura 21.



**Figura 20:** Esquema demonstrativo da placa de pressão.



**Figura 21:** Sistema de placa de pressão desenvolvido pelo LMS. 1) Corpos de prova dentro da placa; 2) Montagem do sistema; 3) Sistema fechado.

Na técnica de placa de pressão, foram aplicadas pressões de 30 Kpa, 50Kpa, 100Kpa, 200Kpa, 300 Kpa, 400 Kpa e 500Kpa, com intervalos de três dias a cada mudança, respectivamente.

Após a geração das curvas de retenção, foram realizados ensaios com a finalidade de estudar o transporte unidirecional do vapor, através de colunas de solo com segmento PVC menores em relação às anteriores.

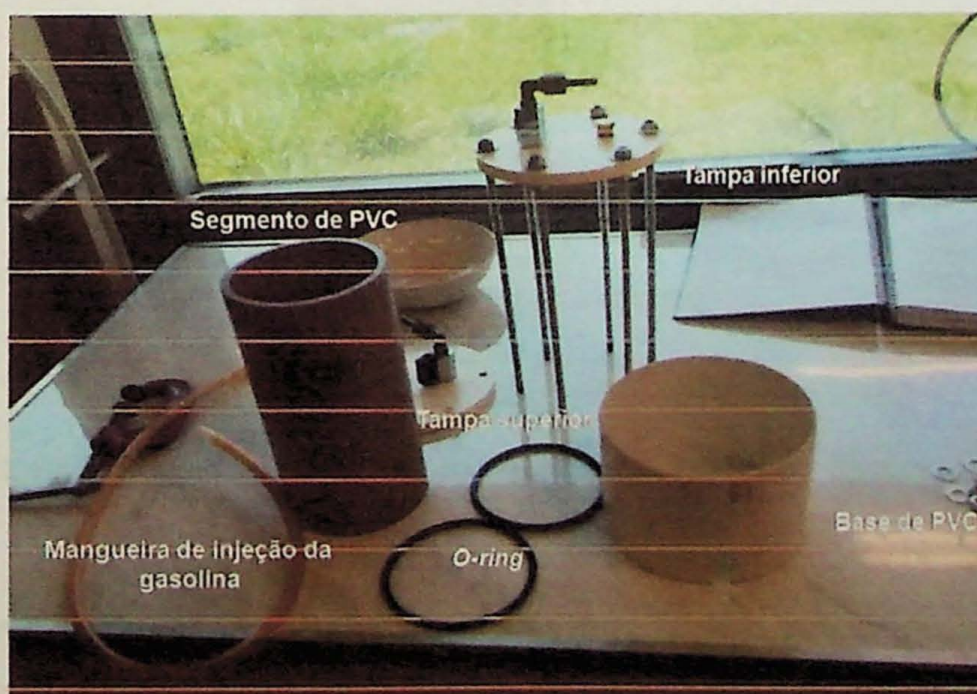


### 5.3. Colunas de Difusão- Terceira Etapa

Para o estudo do transporte de compostos orgânicos voláteis (COV) derivados de petróleo, foi utilizado um método adaptado de Aachib *et al.* 2002, onde a quantidade de voláteis (ppm) liberada por uma fonte de gasolina pura do tipo A, é medida por um PID (*photoionization detector*) conectado ao sistema.

O PID usa uma fonte de luz ultravioleta para ionizar uma amostra de gás e detectar sua concentração. A ionização ocorre quando uma molécula absorve a alta energia da luz ultravioleta, expulsando um elétron (carga negativa), formando um íon positivamente carregado. Assim o gás torna-se eletricamente carregado. As partículas carregadas produzem uma corrente, facilmente medida pelos sensores elétricos do PID.

O sistema conectado ao PID, adaptado de Aachib *et al.* 2002, consiste em um segmento de PVC, fechado na base por uma tampa vedada com um *o-ring*. Internamente, o segmento, possui uma peneira, também de PVC, abaixo desta, há um espaço de aproximadamente 4 cm terminando na tampa, onde há uma válvula do lado externo. Nesta válvula é conectada uma mangueira de silicone por onde é inserida a gasolina. Foi criada uma base, também de PVC, de formato circular de mesmo diâmetro que a tampa inferior do sistema, para que houvesse espaço para a mangueira, enquanto o sistema estivesse apoiado em uma superfície. A figura 22 demonstra as peças de montagem do sistema.



**Figura 22:** Peças utilizadas para a montagem do sistema adaptado de Aachib *et al.* 2002

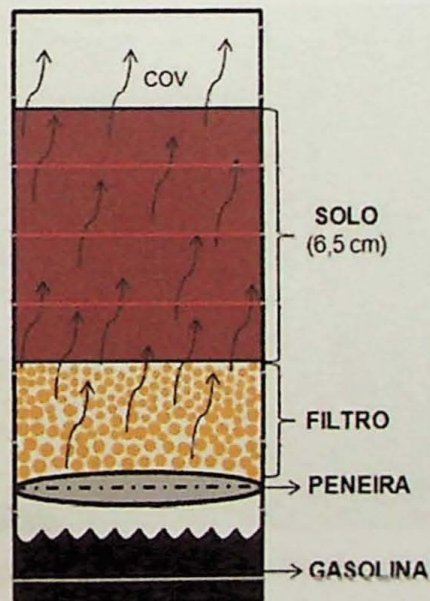


Acima da peneira foi montado um filtro. Primeiramente para a areia (Normal-IPT), o filtro consistiu em uma tela com abertura menor que 0,015 mm (granulometria da areia) colocada acima da peneira. Para o latossolo, o filtro consistiu em três camadas de areia com granulometrias diferentes (grossa, média, fina, dispostos de baixo para cima).

Após a instalação do filtro é colocada uma quantidade do material a ser estudado (areia ou latossolo). A quantidade de areia foi calculada de acordo com seu índice de vazios, com 65% do grau de compactidade relativa, assim como foi realizado para a coluna de solo com areia anteriormente. A quantidade de latossolo foi calculada a partir de seu ensaio de compactação, utilizando uma densidade igual à 80% da densidade máxima seca, assim como foi descrito para a coluna de solo com latossolo anteriormente.

Foi determinado que a altura a ser preenchida pelo material seria de 6,5 cm, por simples questão de padronização dos ensaios, já que o segmento de PVC utilizado possui altura de 9,5 cm. Portanto foi calculada uma massa seca de areia de 765 g e para o latossolo, de 604,23 g.

Para maior clareza da disposição de camadas dentro do segmento de PVC, foi montado um esquema, exibido na Figura 23.



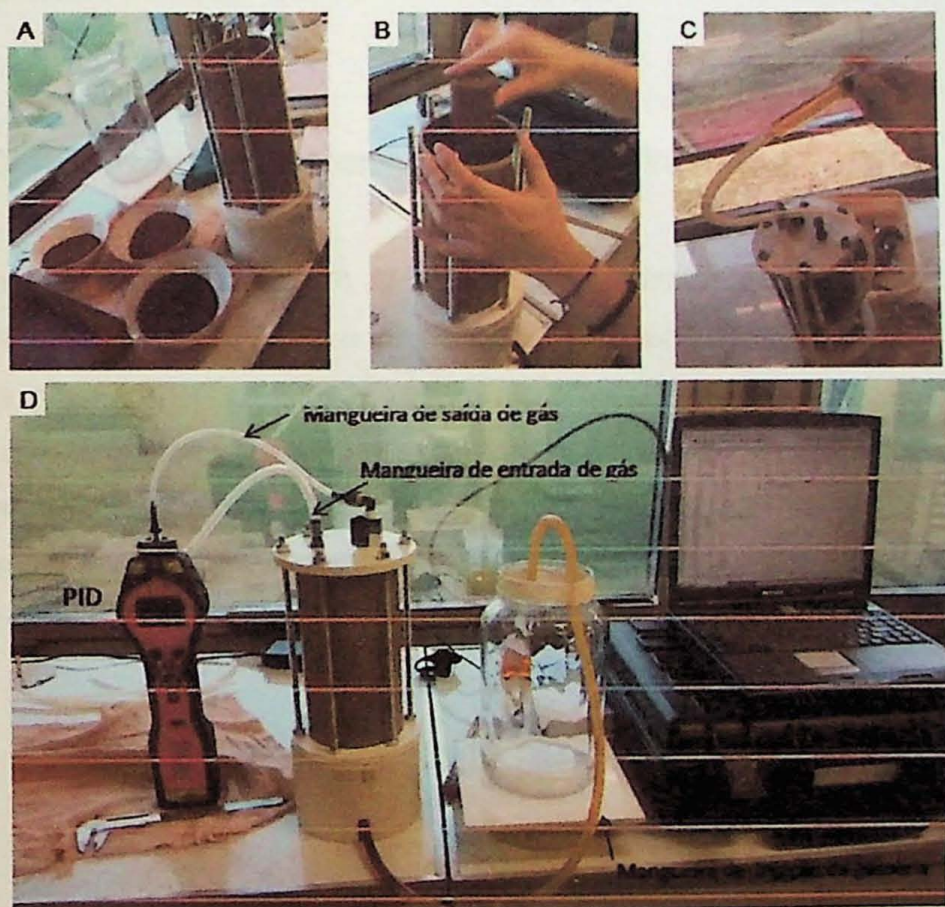
**Figura 23:** Esquema da disposição das camadas dentro do segmento de PVC, utilizando o latossolo.

Foram realizadas cinco colunas de difusão com os materiais à umidades ( $w$ ) diferentes. Três de areia Normal-IPT ( $w = 0\%$ ;  $w = 10\%$ ;  $w = 20\%$ ) e duas de latossolo vermelho ( $w = 2,19\%$  - seco ao ar;  $w = 25,4\%$  - umidade ótima), com o propósito de avaliar o comportamento do vapor, também, na presença de água.



Após preparado e compactado o solo dentro do segmento de PVC, às diferentes umidades e na densidade calculada, o sistema é fechado com a tampa superior (demonstrada na Figura 22) vedada com o *o-ring*. A tampa superior possui duas válvulas conectadas em uma extremidade de mangueiras de silicone. A outra extremidade das mangueiras, é conectada em duas entradas do PID para a entrada e saída de vapor do sistema, pois o PID aplica uma leve sucção ao realizar as medições, portanto, para manter o sistema em equilíbrio, o vapor sugado é devolvido ao sistema pela segunda mangueira, como demonstrado na Figura 24.

As leituras no PID foram realizadas em intervalos de 10, 20 e 30 segundos na primeira hora de ensaio e nas seguintes de 5 em 5 minutos. Os ensaios duraram em torno de 3 a 5 horas.



**Figura 24:** Etapas de montagem das colunas de difusão. **A)** Base montada e solo pesado; **B)** Solo sendo compactado dentro do segmento de PVC; **C)** Injeção da gasolina na mangueira inferior; **D)** Sistema completo.

Como o segmento de PVC foi reutilizado, os primeiros 30 minutos de ensaio eram monitorados sem a injeção de gasolina. Esta etapa foi realizada, para avaliar a contaminação do segmento a cada ensaio.



A partir desses ensaios, foram geradas curvas de concentração (ppm) de COV vs tempo (segundos), relacionadas às curvas de retenção e às características dos materiais estudados.

Os resultados obtidos após as três etapas de estudos em laboratório são descritos a seguir.

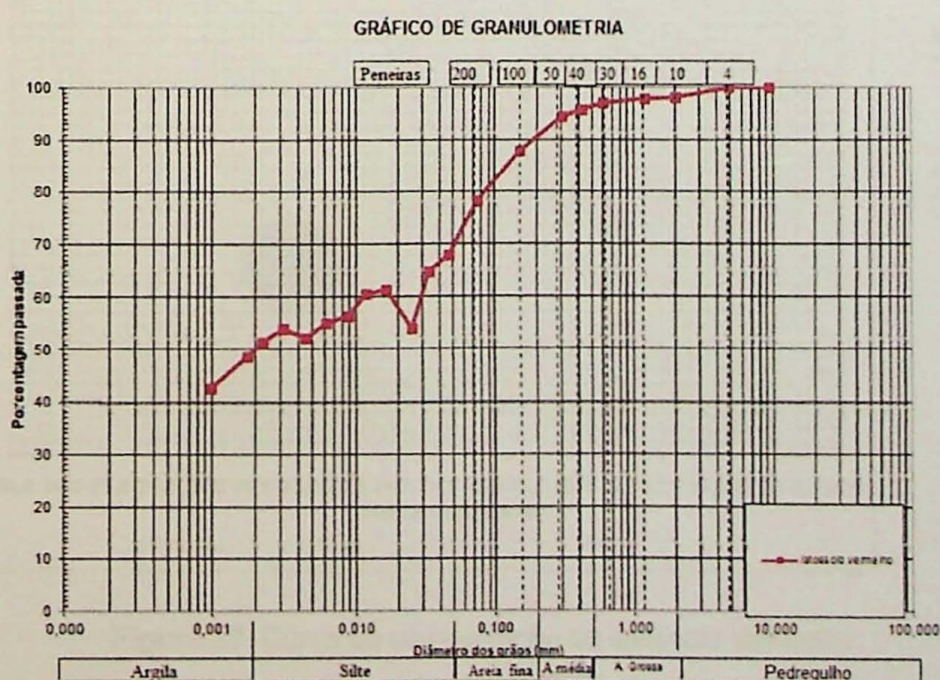
## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As três etapas de ensaios em laboratório forneceram, além da caracterização do solo estudado, interpretações de como se comportam: a água pura, a gasolina pura tipo A (estado líquido) e os compostos orgânicos voláteis derivados de petróleo; em dois tipos de meios porosos: a areia fina nos padrões IPT e o latossolo vermelho.

### 6.1. Caracterização Geotécnica do Latossolo Vermelho

A caracterização do Latossolo Vermelho foi realizada através dos ensaios de granulometria, limites de Liquidez e Plasticidade e ensaio de compactação do solo.

A análise granulométrica do latossolo Vermelho o caracteriza como um solo de textura argilosa, contendo aproximadamente 50% de argila. Há um pico observado na curva que talvez possa ser justificado pela mudança de método, de sedimentação para o peneiramento. A curva está ilustrada na Figura 25.



**Figura 25:** Curva granulométrica gerada para o latossolo Vermelho



Já de acordo com os resultados dos limites de Liquidez e de Plasticidade, foi gerada a carta de plasticidade e atividade ilustrada na Figura 26. Os cálculos estão demonstrados na Planilha 1 no item Anexos.

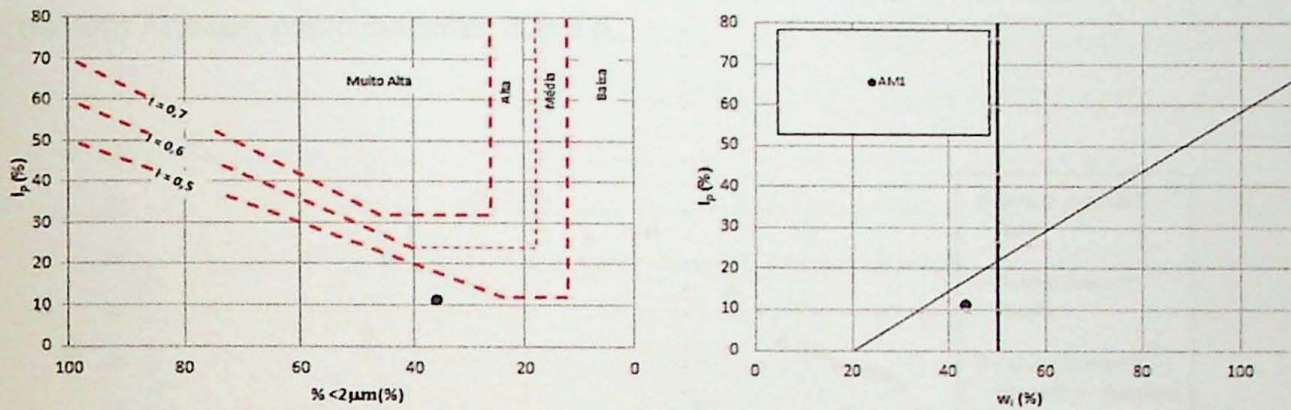


Figura 26: Carta de plasticidade e atividade respectivamente.

Na Figura 27 apresenta-se a curva de compactação. Neste ensaio foi obtida uma umidade ótima de 25,4% e densidade máxima seca de 1,589g/cm<sup>3</sup>. Ou seja, a adição de água a partir de 25,4% de umidade causa a diminuição da densidade do material compactado, atingindo valores abaixo de 1,589g/cm<sup>3</sup>. Os cálculos e dados gerados seguem na planilha 2 no item Anexos.

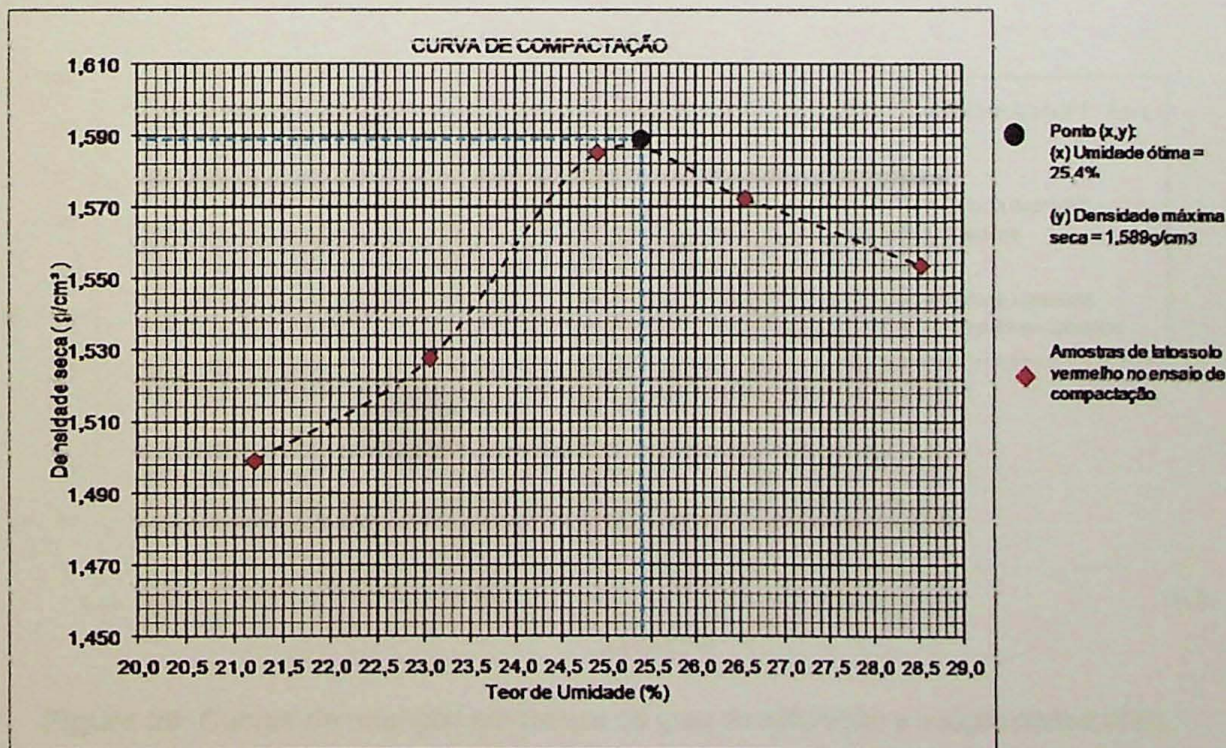
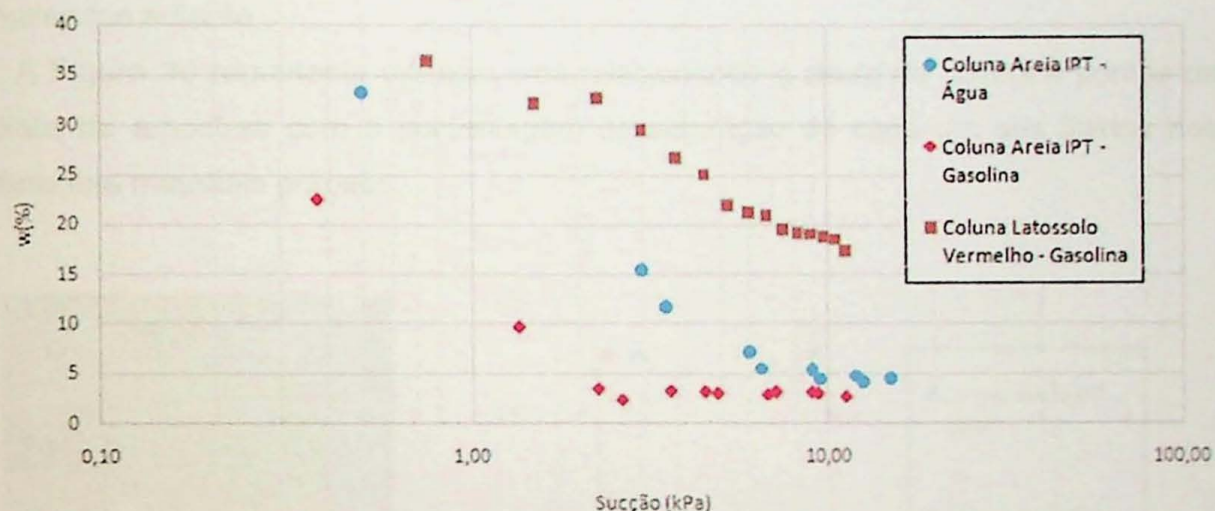


Figura 27: Curva de compactação do latossolo Vermelho

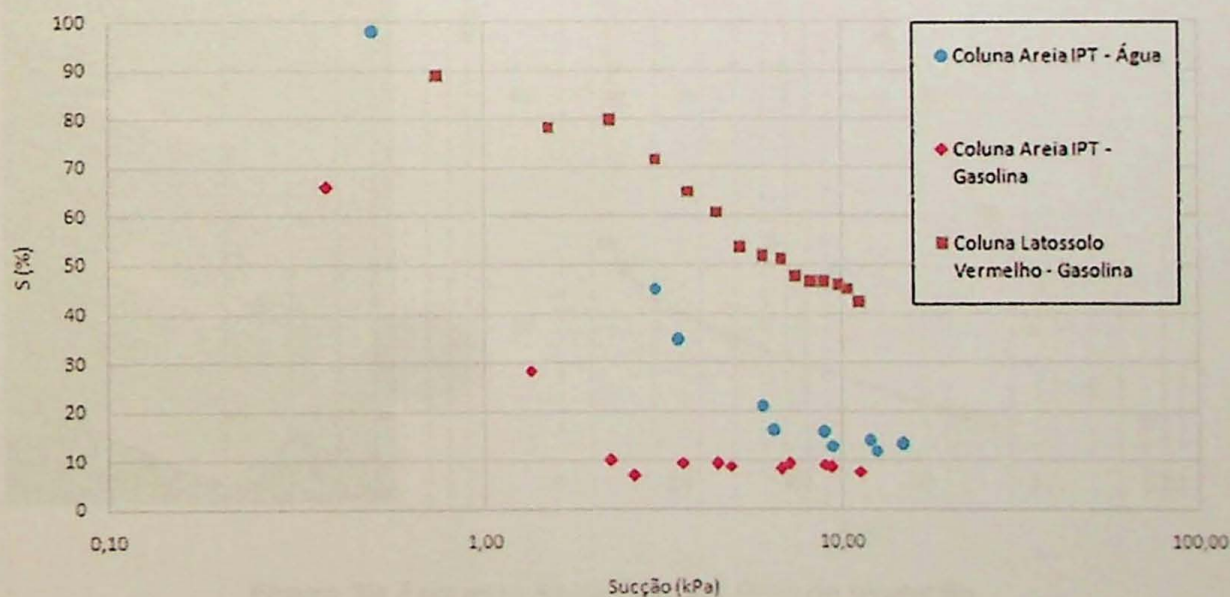


## 6.2. Curvas de Retenção

As curvas de retenção geradas pelo método da Coluna de Solo estão representadas na Figura 28 em termos de teor de umidade e sucção e na Figura 29 em termos de grau de saturação e sucção. As planilhas utilizadas são demonstradas no item Anexos, como planilhas 3 ,4 e 5.



**Figura 28:** Curvas de retenção em termos de teor gravimétrico de umidade e sucção para a areia (gasolina e água) e latossolo vermelho (gasolina).



**Figura 29:** Curvas de retenção em termos de grau de saturação e sucção para a areia (gasolina e água) e latossolo (gasolina).



Observa-se dos resultados que a entrada de ar é reduzida quando o líquido é a gasolina. Isto se deve a baixa tensão superficial da gasolina em relação a água. A areia já demonstra um baixo valor de entrada de ar para a água. Sendo inferior a 1 kPa. Isto representa uma altura de coluna de água da ordem de 10 cm, que pode ser associado a uma ascensão capilar do mesmo valor. Tendo em vista as características mais plásticas do latossolo, o ensaio em coluna não foi realizado com água, optando-se pelo ensaio pelo método da placa de sucção e placa de pressão apresentados e analisados adiante.

A Figura 30 representa um esquema relacionando a altura da coluna e pontos da coleta de amostras com a porcentagem de saturação de cada um dos fluidos nos diferentes materiais porosos.

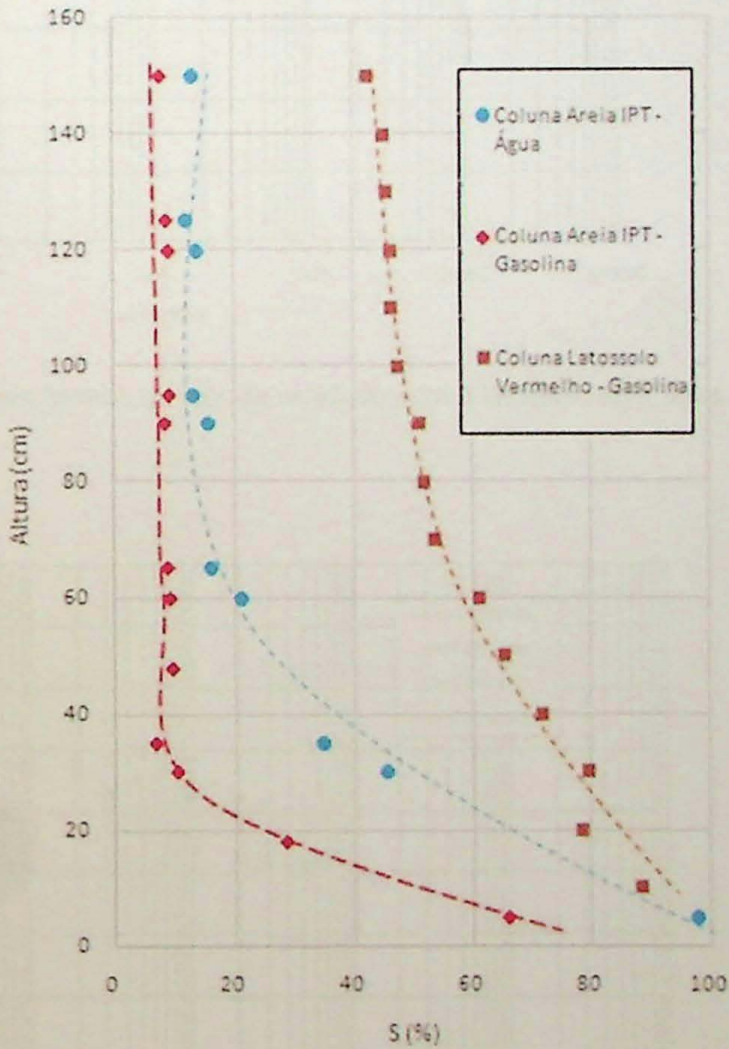
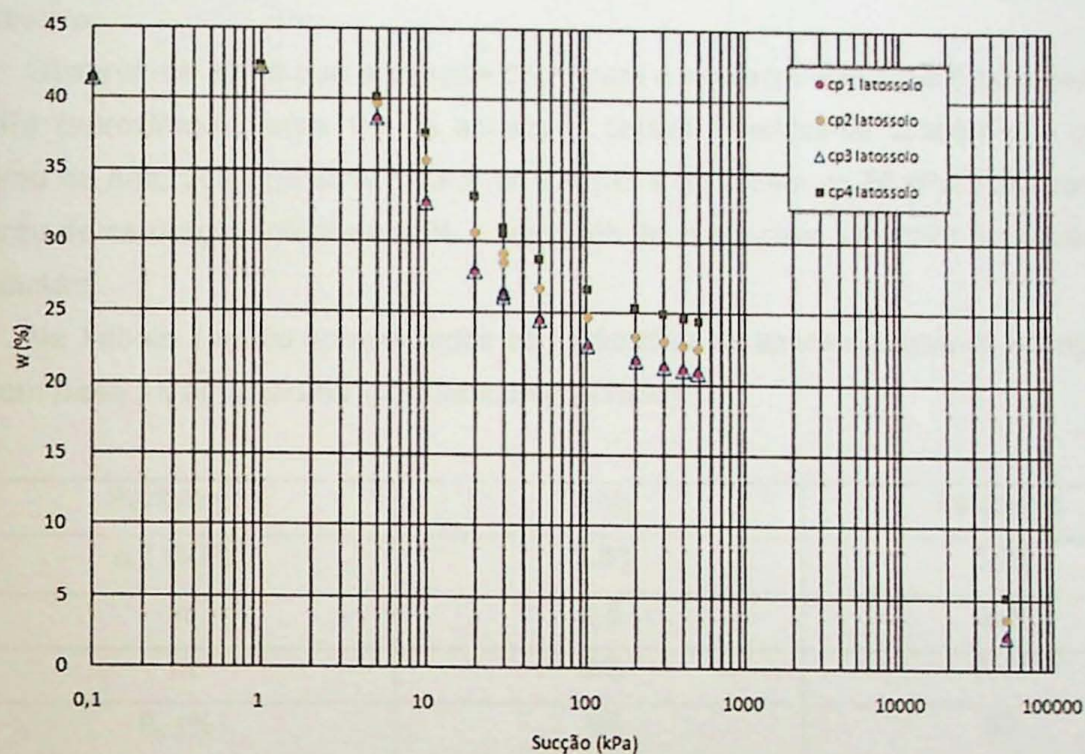


Figura 30: Esquema Altura Coluna x Grau de saturação

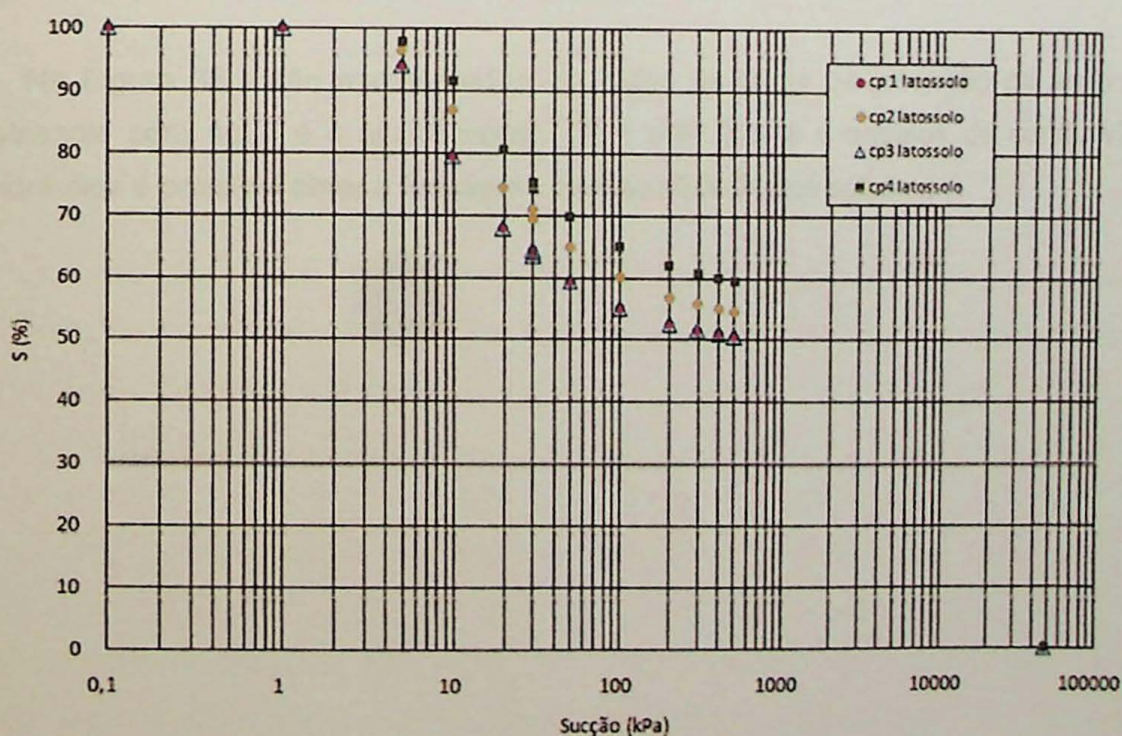
Por meio das técnicas da Placa de Sucção e Placa de Pressão, foram ensaiados quatro corpos de prova compactados de modo s e definir as curvas de retenção para



uma faixa maior de valores de sucção, tendo em vista a característica mais plástica do material. Foram utilizados quatro corpos de prova para melhor ajuste da curva, como demonstrado na Figura 31 (em termos de teor de umidade gravimétrico) e na Figura 32 (em termos de grau de saturação).



**Figura 31:** Curvas de retenção em termos de teor de umidade para o latossolo com água.



**Figura 32:** Curvas de retenção em termos de grau de saturação para o latossolo com água.



Como se pode observar, o latossolo possui maior capacidade de retenção de fluidos do que a areia ensaiada. A água pura permanece retida nos poros em maior quantidade do que a gasolina, para o mesmo valor de sucção. Isto significa que um eventual vazamento de gasolina induz um maior volume de gasolina para o lençol freático.

Observa-se ainda que a entrada de ar para o latossolo com água é da ordem de 10 kPa (aproximadamente 1m de ascensão capilar). Verifica-se também que para um grau de saturação de 80% o valor de sucção é da ordem de 20 kPa. Para valores de grau de saturação inferior a 80% a migração de vapor deve ser maior por advecção ou difusão.

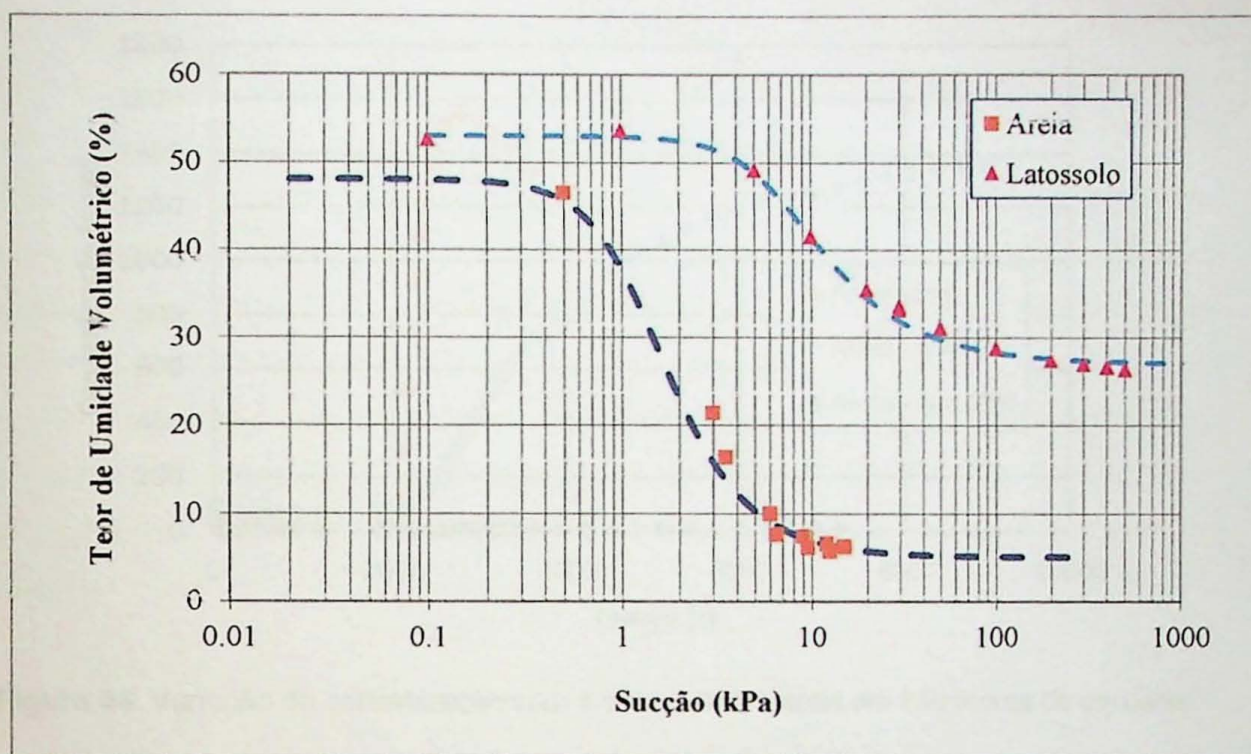
Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros de ajuste da curva de retenção feito com base na equação de Van Genuchten (1980).

Parâmetro	Areia	Latossolo
$\alpha$ (1/kPa)	0.81	0.15
n	2.5	2.5
m	0.6	0.44
$\theta_s$ (%)	48	53
$\theta_r$ (%)	5	27

**Tabela 1:** Parâmetros para o ajuste da curva de retenção de acordo com o modelo de Van Genuchten (1980).

Na Figura 33 estão apresentados os dados da curva de retenção da areia e do latossolo com água e o ajuste obtido. Com este ajuste e ensaios de condutividade hidráulica é possível obter a função de permeabilidade dos solos.





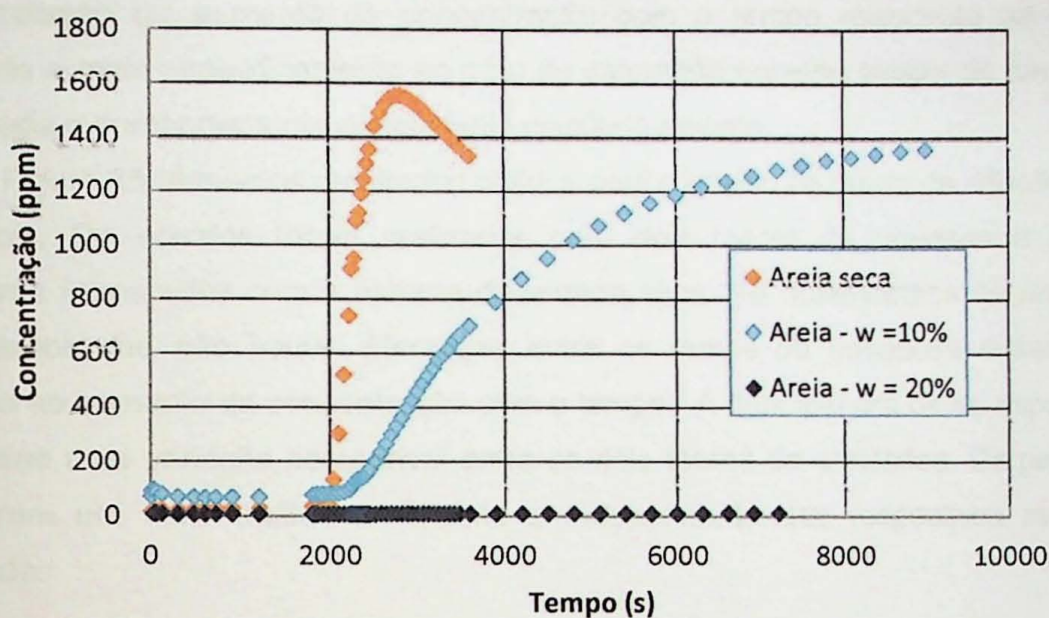
**Figura 33:** Curvas de retenção de água e os ajustes pelo modelo de Van Genuchten (1980).

### 6.3. Colunas de Difusão

A coluna de difusão foi o método utilizado para a avaliação do comportamento e transporte unidirecional de COV, através dos meios porosos estudados neste trabalho. Embora o nome dado ao experimento esteja relacionado com o fenômeno da difusão, tendo em vista a baixa pressão de vapor do COV é possível que parte do fluxo seja devido à advecção. Não foi possível separar estes dois fenômenos nesta fase dos estudos. Os estudos foram semelhantes do ponto de vista conceitual aos experimentos realizados por Cabral *et al.* (2000), Aachib *et al.* (2002, 2004).

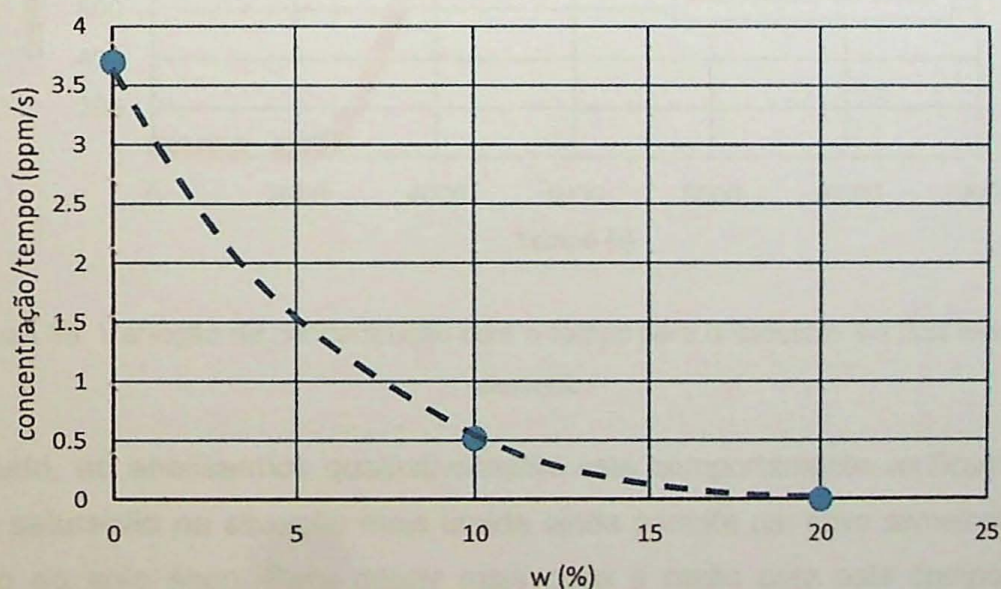
Os resultados dos ensaios realizados com a areia objetivaram avaliar o comportamento do experimento já que a areia apresenta um comportamento que sugere uma maior dessaturação para baixos valores de sucção e ao mesmo tempo uma fácil saturação. Estes dois extremos permitiram definir bem a relação entre a movimentação do vapor de acordo com o teor de umidade. Na Figura 34 estão apresentados os resultados dos ensaios com a areia. A areia foi moldada na condição seca, com 10% e com 20% de teor de umidade gravimétrico. Observa-se que o gradiente de aumento de concentração na parte superior do sistema, após o solo, é maior para a areia seca e praticamente nulo para a areia com 20% de teor de umidade.





**Figura 34:** Variação da concentração com o tempo para a areia em três teores de umidade.

Ao determinarmos o gradiente máximo de aumento de concentração com o tempo em função do teor de umidade observa-se uma variação bem definida com o teor de umidade como pode ser observado na Figura 35.



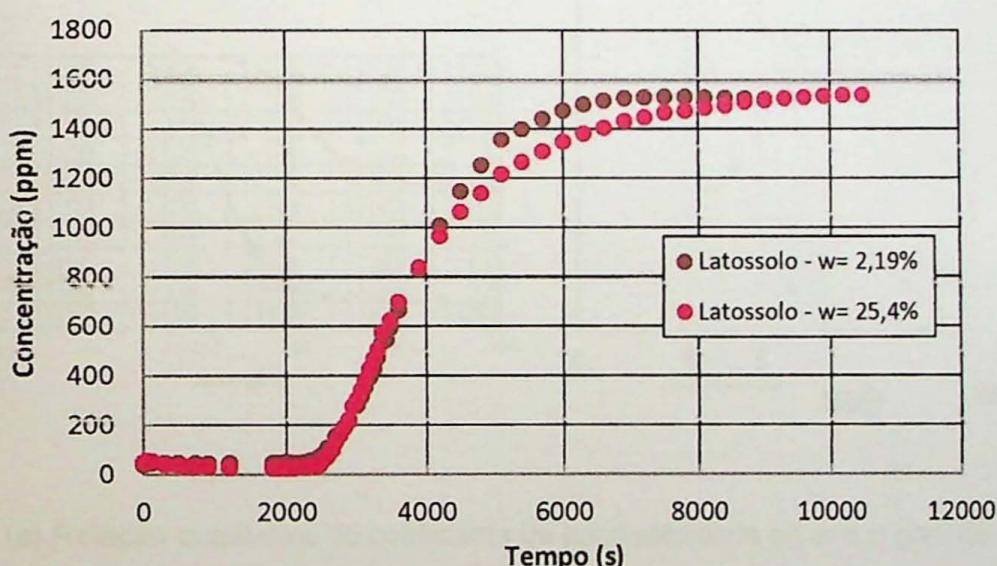
**Figura 35:** Variação da concentração de COV em relação ao tempo vs umidade

Como mencionado a baixa pressão de vapor da gasolina gera o desenvolvimento de um gradiente de pressão que induz um fluxo advectivo. Embora não seja possível, neste experimento, separar os dois efeitos, os resultados servem para identificar os limites de passagem de vapor em função do teor de umidade na areia. Ou seja, mantendo-se a areia saturada, a passagem de COV é restrita.



A relação do aumento da concentração com o tempo associada ao teor de umidade e mais especificamente ao grau de saturação permitiu avaliar de forma mais adequada o comportamento do latossolo discutido adiante.

Na Figura 36 têm-se os resultados obtidos com o ensaio na célula de difusão para o latossolo. Os ensaios foram realizados com dois teores de umidade e com as amostras preparadas com a mesma densidade seca. Ao observarmos os resultados verificamos que não houve diferenças entre os teores de umidades ensaios com relação ao aumento da concentração com o tempo. A princípio era de se esperar que houvesse uma variação perceptível entre os dois teores de umidades. Os resultados indicaram um fluxo muito semelhante e independente dos respectivos teores de umidade.

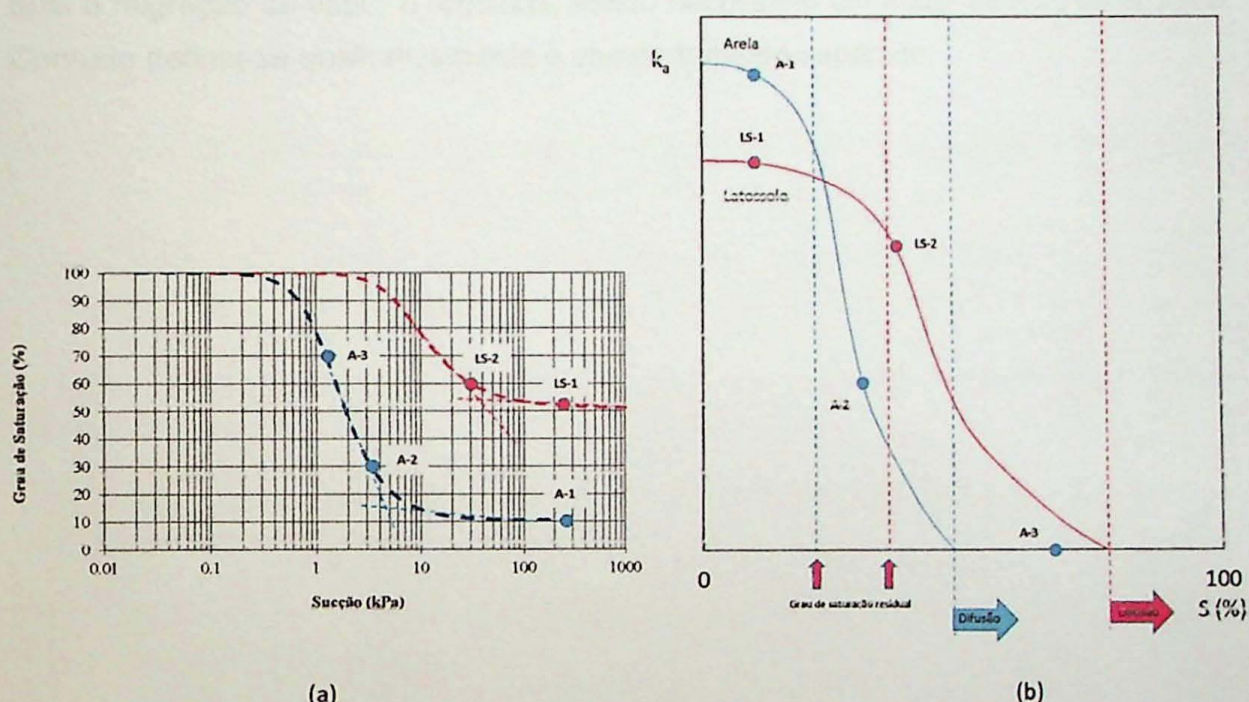


**Figura 36:** Variação da concentração com o tempo para o latossolo em dois teores de umidade.

Contudo, ao analisarmos qualitativamente este comportamento verificamos que o grau de saturação na situação mais úmida ainda permite um fluxo semelhante ao da condição do solo seco. Para deixar mais clara a razão para este comportamento, vejamos, na Figura 37 a relação entre a permeabilidade ao ar de um solo em função do grau de saturação. Na Figura 37a tem-se como deve variar o coeficiente de permeabilidade ao ar ou vapor com o grau de saturação. Para definir este comportamento tomou-se como base os dados apresentados por Kuang, X. e Jiao, J. J. (2011). Na curva de retenção da Figura 37 estão indicados os pontos onde foram ensaiados os solos, tanto a areia como o latossolo. O grau de saturação de cada solo varia de acordo com suas características e forma de preparação. Ao separarmos os pontos ensaiados de acordo com a posição do grau de saturação residual pode-se posicionar e relativizar os coeficientes de permeabilidade de cada solo, de acordo com



o indicado na Figura 37b. A areia embora mais permeável ao ar quando seca perde mais rapidamente sua facilidade de conduzir o vapor do que o solo mais argiloso que inicialmente possui uma menor permeabilidade. Os pontos LS1 e LS2 do latossolo têm maior semelhança. Portanto, a condução do vapor entre estes dois pontos justifica-se serem muito semelhantes. No caso da areia os três pontos ensaiados permitiram cobrir toda a faixa de comportamento. Esta hipótese deve ser confirmada com ensaios com graus de saturação maior.



**Figura 37** – (a) Relação qualitativa do coeficiente de permeabilidade ao ar e o grau de saturação para a areia e latossolo; (b) Curvas de retenção da areia e latossolo.

Embora tenha sido possível se apresentar as considerações anteriores, são necessários mais ensaios para se definir melhor o comportamento do latossolo.

## 7. CONCLUSÕES

Os ensaios de coluna se mostraram um procedimento adequado e eficiente para a definição da capacidade de retenção de líquidos. Salienta-se, no entanto, que o procedimento para ensaios com gasolina é bastante trabalhoso e exige cuidados especiais tendo em vista os volumes de gasolina necessários.

As curvas de retenção obtidas com a placa de sucção e placa de pressão apresentaram resultados satisfatórios tendo em vista a consistência dos dados em relação ao comportamento geral esperado.



As curvas de retenção de água do latossolo permitiram definir o valor de entrada de ar do solo e assim possibilitar uma avaliação do controle de migração de vapor em função do grau de saturação do solo. Este parâmetro pode servir como controle de migração de vapor na zona vadosa.

A variação da migração de vapor em função do teor de umidade ou grau de saturação foi estabelecido para a areia.

No caso do latossolo não foi possível definir o valor de teor de umidade a partir do qual a migração de vapor é reduzida, sendo necessário um maior número de ensaios. Contudo definiu-se qualitativamente o comportamento esperado.



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aachib, M., Aubertin, M., and Mbonimpa, M. 2002. Laboratory measurements and predictive equations for gas diffusion coefficient of unsaturated soils. Proceedings of the 55th Canadian Geotechnical Conference and 3rd joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, Niagara Falls, Ont. Edited by A.R.P.D. Stolle and J.J. Crauder. Canadian Geotechnical Society, Richmond, B.C. p. 163–171.
- Aachib, M., Mbonimpa, M., and Aubertin, M. 2004. Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media, with applications to soil covers. *Water, Air, and Soil Pollution*, 156(1–4): p. 163–193.
- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1980. MB-30 NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez.
- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1982. MB-31 NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.
- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1984. MB-32 NBR 6508: Solo – Análise Granulométrica
- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1986. NBR 6457: Solo – Ensaio de Compactação.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas 1993 – Glossário de Poluição das Águas- NBR 9896. Rio de Janeiro.
- Abriola, L. M. 1989. Modeling multiphase migration of organic chemical in groundwater systems: A review and assessments. *Environmental Health Perspectives*, v. 83, p.117-143,
- Almeida M.A.; Stein D.P.; Melo M.S.; Bistrichi C.A.; Ponçano W.L.; Hasui Y.; Almeida F.F.M. 1980. Geologia do Oeste Paulista e áreas fronteiriças dos Estados de Mato Grosso do Sul e Paraná. In: SBG, *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia*, 31, Camboriú, 5. p.2799-2812.
- Barcelos J.H. & Suguio K. 1987. Correlação e extensão das unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru definida em território paulista, nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná. In: SBG/Núcleo SP, *Simpósio Regional de Geologia*, 6, Rio Claro, Atas, 1. p.313-321.
- Bear, 1972 BEAR, J. Dynamics of fluids in porous media. Dover Publications, Inc. N. Y., p.764, 1972.
- BRASIL. 1958. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio de Janeiro e Distrito Federal. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas, Comissão de Solos. SNPA, Boletim 11. 350p.



- BRASIL. 1960. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas, Comissão de Solos. SNPA, Boletim 12. p.634.
- BRASIL. 1962. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas. Comissão de Solos. Levantamento de reconhecimento de solos da região sob influência do reservatório de Furnas. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas. SNPA, Boletim 13. p. 462
- Buckingham, E. 1907. Studies on the movement of soil moisture. U.S. dept. Agr. Bur. Soils, Bul., 38.
- Budhu, M.; Geise Jr, R. F.; Campbell, G.; Baumgrass, L. 1991. The permeability of soils with organic fluids. Canadian geotechnical Journal, n. 28, p.140-147.
- Cabral, A. Racine, I, Burnotte, F & Lefebvre, G (2000). Diffusion of oxygen through a pulp and paper residue barrier. Can. Geotech. J. Vol. 37. Pp. 201-217.
- Camargo, M.N.; Klamt, E.; Kauffman, J.H. e EMBRAPA - SNLCS. 1988. Classificação de solos usada em levantamento pedológico no Brasil. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 12(1): p.11-33.
- Cardoso, L. S. P. 2011. Estudo do transporte de poluentes orgânicos automotivos em solos. Tese de Doutorado, Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente- Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia. p.149.
- Carvalho Filho, A.; Fraga, A.G.F.; Motta, P.E.; Oliveira, V.A. 1993. Guia de excursão de pedologia. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 24, Goiânia, n.p. (mimeogr.)
- Cavaguti, N; Silva F.P.. 1992. Gestão dos recursos hídricos subterrâneos na cidade de Bauru – SP, face às características hidrogeológicas especiais da região. Anais do VII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Belo Horizonte, MG, p. 74–79.
- Cleary, R. W. 1989. Águas subterrâneas. In: Engenharia Hidrológica. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos,. vol. 2, cap. 5, p. 292-404. (Coleção ABRH).
- Cline, M. 1975. Origin of the term Latosol. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39:162.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) .2010. Relação de áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo. p.14.
- Croney, D.; Coleman, J.D. 1960. Pore pressure and suction in soil. Conference on Pore Pressure and Suction in Soils. London, Proceedings. p. 31-37.
- Dake, L. P. 1978. Fundamentals of Reservoir Engineering. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam.



- Darcy, H. 1856. Les Fontaines Publiques de La Ville de Dijon- Appendice D. Paris: Dalmont, p.647
- Delgado, C. W. C. 2001. Desenvolvimento de um Equipamento para o estudo da Permeabilidade Efetiva em Meios Multifásicos. Tese de Doutorado Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dep. Engenharia Civil.
- Fernandes, L.A. 2004. Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1:1.000.000. Boletim Paranaense de Geociências, 55, p. 53-66.
- Fernandez, F.; Quigley, R. M. 1985. Hydraulic Conditivity of Natural Clays Permeated with Simple Liquid Hydrocarbons. Canadian Geotechnical Jounal, v. 22, p. 205-214.
- Ferreira, J.; Zuquette, L. V. 1998. Considerações sobre as interações entre contaminantes constituídos de hidrocarbonetos e os componentes do meio físico. Geociências, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 527-557.
- Fetter, C. W. 1988. Applied hydrogeology. 2nd ed. New York: Macmillan Publishing
- Fetter, C. W. 1992. Contaminant Hydrogeology. New Jersey: Prentice Hall. p. 317.
- Fetter, C. W. 1999. Contaminant hydrogeology. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall.
- Fredlund, D. G.; Morgenstern, N.R. 1977. Stress state variables for unsaturated soils. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, New York, v. 103, n. 5, p. 447-466
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. New York, John Wiley and Sons. p.1-6.
- Fredlund, D.G.;Xing, A. e Huang, S. 1994. Predicting the permeability functions for insaturated soil using the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, v.31, n° 4, p. 533.
- Freeze, A. L.; Cherry, J. A. 1979. Groundwater. Englewood Cliffs: Prentice Hall,.
- Genuchten, M.T. van. 1980. A closed –form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Pittsburgh, n. 44, p. 892-898.
- Gerscovich (2001 GERSCOVICH, D. M. S.; GUEDES, M. N. Avaliação das relações de condutividade hidráulica em solos brasileiros não saturados. 5° Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, p. 249-254, 2004.
- Halliday, D. ; Resnick, R. Walker, J. 2007 .Fundamentos de Física: Eletromagnetismo – v. 3. Editora: LTC, sétima edição.
- Heinse R.; Link T. E.. 2013. Vadose Zone Processes: A Compendium for teaching Interdisciplinary Modeling. Universities Council on Water Resources Journal of Contemporary Water Research and Education Issue 152, p. 22-31.



- Hillel, 1980 Hillel, D. 1971. Soil water-Physical principles and processes. New York, p.413.
- Kaya, A.; Fang, H. Y. 2000. The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine grained soils. Canadian Geotechnical Journal, p. 943-950.
- Kellog, C.E. 1949. Preliminary suggestions for the classification and nomenclature of great soil groups in tropical and equatorial regions. Common. Bur. Soil Sci. Tech. Comm., 46: 76-85.
- Ker, J. C. 1995. Mineralogia, sorção e desorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, MG, p. 181.
- Kuang, X.; Jiao, J. J. 2011. A new model for predicting relative non wetting phase permeability from soil water retention curves. Water Resources Research, Vol. 47. p.1-7.
- Kueper, L. K.; Ilangasekare, T. H. 1998. Numerical simulation of NAPL flow in the subsurface. Computational Geosciences, v. 3, p. 171-189.
- Lago, A.L. ; Elis, V.R.; Giachetti, H.L. 2006. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. Rev. Bras. Geof. vol.24 n.3. São Paulo.
- Lemos, R.C. 1966. Latolização. Processos de formação dos grandes grupos de solos. ETA. Projeto Purdue 55. URMG - Universidade de Purdue. Escola Superior de Agricultura. Viçosa - MG. p. 21.
- Libardi, P.L. 1995. Dinâmica da Água no Solo. Edição do Autor, ESALQ, Depto. De Física e meteorologia, Piracicaba, p. 497.
- Machado, S. L.; Dourado, K. A. 2008. Novas técnicas para obtenção da curva característica de sucção do solo. 4º Simpósio de Brasileiro de Solos Não Saturados. Porto Alegre, v. 1.
- MacKay, D.G. 1990. Errors, ambiguity, and awareness in language perception and production. In B Baars (Ed.), The psychology of error: a window on the mind. New York: Plenum.
- Manoel Filho, J. 1997.. Ocorrência das águas subterrâneas. In: FEITOSA. F. A.. C.; Manoel Filho, J. (Coord.) Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM; LABHIDUFPE, cap 2.
- Marinho, F. A. M. 2005. Os solos não saturados, aspectos teóricos, experimentais e aplicados. Tese de Livre-Docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Maximiano, A. M. S. 2001. Determinação de níveis aceitáveis no ambiente para hidrocarbonetos utilizando o procedimento de ações corretivas baseadas no risco (RBCA). Aplicação para a cidade de São Paulo. São Paulo, 2001. Dissertação de



- Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Mitchell, J. K. 1991. Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice. *Geotechnique*, Canada, v. 41, n. 3, p. 299-340.
- Nutting, P. G. 1930 Physical Analysis of oil Sands. *Bull. Amer. Ass. Petr. Geol.*, v.14, p. 1337-1549,
- Oliveira, E. 1992. Contaminação de aquíferos por hidrocarbonetos provenientes de vazamento de tanques de armazenamento subterrâneo. São Paulo. Dissertação de Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Oliveira, J. C. S. 2001. Contaminação de Sedimentos Argilosos por Combustíveis Automotivos: Problemas de Avaliação da Permeabilidade. Tese de Doutorado em Geologia, Instituto de geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- OLIVEIRA, J. C. S. 2001. Contaminação dos solos argilosos por líquidos orgânicos: problema de avaliação da permeabilidade. Tese de Doutorado em Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. p. 205.
- Oliveira, J.B.; Camargo, M.N.; Rossi, M. & Calderano Filho, B. 1999. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida. Campinas, Instituto Agrônomo/EMBRAPA Solos. Campinas. p. 64. Inclui mapas
- Oliveira, J.B.; Jacomine, P.K.T.; Camargo, M.N. 1992. Classes gerais de solos do Brasil - guia auxiliar para seu reconhecimento. Jaboticabal, FUNEP, p. 201.
- Oliveira, L. I. 1999. Postos distribuidores de combustíveis em Belo Horizonte: Caracterização do problema ambiental em potencial. Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Padoin, E. L.; Borges, P. A. P.; Dill, S. L.; Borges, R. S. 2006. Análise do deslocamento da água em solos saturados e paralelização de seus métodos computacionais. Resumos do Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Feira de Protótipos, 21.
- Perkins, T. K.; Johnston, O. C. 1963. A Review of Diffusion and Dispersion in Porous Media. *Society of Petroleum Engineering Journal*, London, v.3, n. 1, p. 70-84.
- Potter, T. L.; Simmons, K. E. 1998. Composition of petroleum mixtures. Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series. Massachusetts: Amherst Scientific Publishers, v. 2.
- Prevedello, C. L. 1996. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba: Salesward-Discovery, p. 446



- Reichardt K; Timm L.C., 2004. Solo, Planta e Atmosfera – Conceitos, Processos e Aplicações. Barueri –SP: Editora Manoele Ltda, p.478.
- Rowe, R. K. 1987. Pollutant transport barrier. Geotechnical practice for waste Disposal. Special Geotechnical Publication, ASCE, New York, n. 13, p. 159-181.
- Scheidegger, A. 1963. A Physics of Flow through Porous Media. Toronto, Canada: University of Toronto Press, p. 313.
- Schnoor, J. L. 1992. Environment Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air and Soil. New York: John Wiley And Sons, Inc. p. 436.
- Schramm, M.; Warrick, A. W.; Fuller, W. H. 1986. Permeability of soils to four organic liquids and water. Hazardous Waste and Hazardous Materials, v. 3. n. 1, p. 21-27.
- Schwille, F. 1984. Migration of organic fluids immiscible with water in the unsaturated zone. In: Pollutants in porous media. The Unsaturated Zone Between Soil Surface and Groundwater. B. Yaron, G. Dagan e J. Goldshmid. Springer-Verlag (Org.). Berlin p. 27-48.
- Soares P.C.; Landim P.M.B.; Fúlfaro V.J.; Sobreiro Neto A.F. 1980. Ensaio de caracterização do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. Rev. Bras. Geociências, 10(3). p.177-185.
- Soto, M. A. Vilar, O. M. 2004. Geometria fractal na determinação da curva de retenção de água no solo. V Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados.
- Tancredi, A., C., F., N., S.; Tagliarini, E., M; Oliveira, W. 2001. Diagnóstico Ambiental Fase II – Contaminação por Hidrocarbonetos – Área do Residencial Olympus. PETEM, Belém, Rel., p. 27.
- Taylor, D. W. 1948. Fundamentals of soil mechanics. John Wiley and Sons, New York, p.700
- Thorp, J. & Smith, G.D. 1949. Higher categories of soil classification: order, suborder and great soil groups. Soil Sci., 67: p.177-226.
- Van Dam, J. 1967. The migration of hydrocarbons in a water-bearing stratum. In: the Joint Problems of the Oil and Water Industries Ed. P. Hepple. Elsevier, New York, p. 55-96.
- Watts, R.J.; Haller, D.R.; Jones, A.P. & Teel, A.L. 2000. A foundation for the risk-based treatment of gasoline contaminated soils using modified Fenton's reactions. J. Hazard. Mater., 76:73-89, 2000.
- Wendland E. 2004. Contribuição à simulação de processos em meios porosos. Tese de Livre Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. p.270.



## ANEXO 1- PLANILHAS DE CÁLCULOS

### CARTA DE PLASTICIDADE E ATIVIDADE DO LATOSSOLO

linha A	Atividade	0,5	0,6	0,7				
LL	IP							
20	0							
30	7,3					IP	%<2m	
40	14,6					0,5	12	24
50	21,9						50	100
180	116,8					0,6	24	40
							60	100
linha B	Van Der Merwe					0,7	32	46
							70	100
0	50	%<2m	IP	%<2m	IP	%<2m	IP	
60	50	12	90	18	90	26	90	
100	50	12	12	18	24	26	32	
		24	12	40	24	46	32	

**Planilha 1-** carta de Plasticidade e Atividade do solo

### COMPACTAÇÃO DE SOLOS ENERGIA NORMAL

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	Modificada	26 golpes			3 camadas	
Molde Nº	8	8	8	8	8	8
Peso do Solo+Molde ( g )	4234	4297	4397	4407	4414	4414
Peso do Molde ( g )	2417	2417	2417	2417	2417	2417
Volume do Molde ( cm <sup>3</sup> )	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Peso do Solo ( g )	1817	1880	1980	1990	1997	1997
Densidade Úmida ( g/cm <sup>3</sup> )	1,817	1,880	1,980	1,990	1,997	1,997
Cápsula Nº	68	203	127	62	13	13
Cáps+Solo Úmido ( g )	104,74	110,76	83,53	91	74,03	74,03
Cáps+Solo Seco ( g )	94,84	96,1	74,50	81,66	65,86	65,86
Peso da Cápsula ( g )	48,16	32,52	38,24	46,49	37,23	37,23
Peso da Água ( g )	9,90	14,66	9,03	9,34	8,17	8,17
Peso do Solo Seco ( g )	46,68	63,58	36,26	35,17	28,63	28,63
Teor de Umidade(%)	21,21	23,06	24,90	26,56	28,54	28,54
Densidade Seca ( g/cm <sup>3</sup> )	1,499	1,528	1,585	1,572	1,554	1,554

**Planilha 2-** Valores de energia de compactação do solo.



### COLUNA AREIA+ ÁGUA -CURVAS DE RETENÇÃO

Método	Data	Altura (cm)	Sucção (kPa)	CP úmido (g)	CP seco (g)	w (%)	$\theta$ (%)	S (%)
Coluna Areia IPT - Água	24/11/2014	150	15,00	48,25	46,19	4,46	6,23	13,11
	26/11/2014	125	12,50	93,52	89,86	4,07	5,69	11,97
	27/11/2014	120	12,00	73,4	70,11	4,69	6,55	13,79
	28/11/2014	95	9,50	57,9	55,46	4,40	6,14	12,93
	01/11/2014	90	9,00	73,61	69,91	5,29	7,39	15,56
	02/11/2014	65	6,50	63,29	60,03	5,43	7,58	15,96
	03/11/2014	60	6,00	79,42	74,14	7,12	9,94	20,93
	04/11/2014	35	3,50	85,36	76,38	11,76	16,42	34,56
	05/11/2014	30	3,00	84,72	73,43	15,38	21,47	45,19
	06/11/2014	5	0,50	106,98	80,24	33,33	46,53	97,95
e =	0,905							
G =	2,66							
$\rho_d$ =	1,40	(g/cm3)						
$\rho_{líquido}$ =	1	(g/cm3)						

**Planilha 3 – Coluna de solo, areia + água**

### COLUNA AREIA + GASOLINA- CURVAS DE RETENÇÃO

Método	Data	Altura (cm)	Sucção (kPa)	CP úmido (g)	CP seco (g)	w (%)	$\theta$ (%)	S (%)
Coluna Areia IPT - Gasolina		150	11,25	97,71	95,2	2,64	3,68	7,75
		125	9,38	97,58	94,78	2,95	4,13	8,68
		120	9,00	91,57	88,82	3,10	4,32	9,10
		95	7,13	82,82	80,3	3,14	4,38	9,22
		90	6,75	108,97	105,97	2,83	3,95	8,32
		65	4,88	122,32	118,78	2,98	4,16	8,76
		60	4,50	127,57	123,68	3,15	4,39	9,24
		48	3,60	112,73	109,23	3,20	4,47	9,42
		35	2,63	105,72	103,33	2,31	3,23	6,80
		30	2,25	103,66	100,22	3,43	4,79	10,09
		18	1,35	94,33	86,02	9,66	13,49	28,39
		5	0,38	112	91,45	22,47	31,38	66,05
e =	0,905							
G =	2,66							
$\rho_d$ =	1,40	(g/cm3)						
$\rho_{líquido}$ =	0,75	(g/cm3)						

**Planilha 4 - Coluna de solo, areia + gasolina**



# COLUNA LATOSSOLO + GASOLINA – CURVAS DE RETENÇÃO

Método	Data	Altura (cm)	Sucção (kPa)	CP úmido (g)	CP seco (g)	w (%)	θ (%)	S (%)
Coluna Latossolo Vermelho - Gasolina		150	11,25	45	38,34	17,37	22,08	42,29
		140	10,50	86,7	73,13	18,56	23,59	45,18
		130	9,75	98,74	83,14	18,76	23,85	45,68
		120	9,00	94,39	79,27	19,07	24,25	46,44
		110	8,25	112,44	94,41	19,10	24,28	46,50
		100	7,50	116,08	97,16	19,47	24,75	47,41
		90	6,75	83,55	69,1	20,91	26,58	50,91
		80	6,00	105,28	86,85	21,22	26,98	51,67
		70	5,25	87,42	71,71	21,91	27,85	53,34
		60	4,50	82,26	65,79	25,03	31,82	60,95
		50	3,75	93,87	74,05	26,77	34,02	65,17
		40	3,00	94,65	73,1	29,48	37,48	71,78
		30	2,25	105,18	79,26	32,70	41,57	79,62
		20	1,50	132,34	100,1	32,21	40,94	78,42
		10	0,75	134,24	98,41	36,41	46,28	88,65

e = 1,092511

G = 2,66

$\rho_d = 1,27$  (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_{líquido} = 0,75$  (g/cm<sup>3</sup>)

Planilha 5 - Coluna de solo, Latossolo + gasolina



CAIXA DE DOAÇÃO - CASH - CAIXA DE DOAÇÃO

DATA	VALOR	DESCRIÇÃO	ASSINATURA	ASSINATURA
10/01	100,00	Doação de...		
15/01	50,00	Doação de...		
20/01	20,00	Doação de...		
25/01	30,00	Doação de...		
30/01	10,00	Doação de...		
05/02	40,00	Doação de...		
10/02	60,00	Doação de...		
15/02	20,00	Doação de...		
20/02	30,00	Doação de...		
25/02	10,00	Doação de...		
30/02	40,00	Doação de...		
05/03	50,00	Doação de...		
10/03	20,00	Doação de...		
15/03	30,00	Doação de...		
20/03	10,00	Doação de...		
25/03	40,00	Doação de...		
30/03	50,00	Doação de...		
05/04	20,00	Doação de...		
10/04	30,00	Doação de...		
15/04	10,00	Doação de...		
20/04	40,00	Doação de...		
25/04	50,00	Doação de...		
30/04	20,00	Doação de...		
05/05	30,00	Doação de...		
10/05	10,00	Doação de...		
15/05	40,00	Doação de...		
20/05	50,00	Doação de...		
25/05	20,00	Doação de...		
30/05	30,00	Doação de...		
05/06	10,00	Doação de...		
10/06	40,00	Doação de...		
15/06	50,00	Doação de...		
20/06	20,00	Doação de...		
25/06	30,00	Doação de...		
30/06	10,00	Doação de...		
05/07	40,00	Doação de...		
10/07	50,00	Doação de...		
15/07	20,00	Doação de...		
20/07	30,00	Doação de...		
25/07	10,00	Doação de...		
30/07	40,00	Doação de...		
05/08	50,00	Doação de...		
10/08	20,00	Doação de...		
15/08	30,00	Doação de...		
20/08	10,00	Doação de...		
25/08	40,00	Doação de...		
30/08	50,00	Doação de...		
05/09	20,00	Doação de...		
10/09	30,00	Doação de...		
15/09	10,00	Doação de...		
20/09	40,00	Doação de...		
25/09	50,00	Doação de...		
30/09	20,00	Doação de...		
05/10	30,00	Doação de...		
10/10	10,00	Doação de...		
15/10	40,00	Doação de...		
20/10	50,00	Doação de...		
25/10	20,00	Doação de...		
30/10	30,00	Doação de...		
05/11	10,00	Doação de...		
10/11	40,00	Doação de...		
15/11	50,00	Doação de...		
20/11	20,00	Doação de...		
25/11	30,00	Doação de...		
30/11	10,00	Doação de...		
05/12	40,00	Doação de...		
10/12	50,00	Doação de...		
15/12	20,00	Doação de...		
20/12	30,00	Doação de...		
25/12	10,00	Doação de...		
30/12	40,00	Doação de...		
05/01	50,00	Doação de...		
10/01	20,00	Doação de...		
15/01	30,00	Doação de...		
20/01	10,00	Doação de...		
25/01	40,00	Doação de...		
30/01	50,00	Doação de...		
05/02	20,00	Doação de...		
10/02	30,00	Doação de...		
15/02	10,00	Doação de...		
20/02	40,00	Doação de...		
25/02	50,00	Doação de...		
30/02	20,00	Doação de...		
05/03	30,00	Doação de...		
10/03	10,00	Doação de...		
15/03	40,00	Doação de...		
20/03	50,00	Doação de...		
25/03	20,00	Doação de...		
30/03	30,00	Doação de...		
05/04	10,00	Doação de...		
10/04	40,00	Doação de...		
15/04	50,00	Doação de...		
20/04	20,00	Doação de...		
25/04	30,00	Doação de...		
30/04	10,00	Doação de...		
05/05	40,00	Doação de...		
10/05	50,00	Doação de...		
15/05	20,00	Doação de...		
20/05	30,00	Doação de...		
25/05	10,00	Doação de...		
30/05	40,00	Doação de...		
05/06	50,00	Doação de...		
10/06	20,00	Doação de...		
15/06	30,00	Doação de...		
20/06	10,00	Doação de...		
25/06	40,00	Doação de...		
30/06	50,00	Doação de...		
05/07	20,00	Doação de...		
10/07	30,00	Doação de...		
15/07	10,00	Doação de...		
20/07	40,00	Doação de...		
25/07	50,00	Doação de...		
30/07	20,00	Doação de...		
05/08	30,00	Doação de...		
10/08	10,00	Doação de...		
15/08	40,00	Doação de...		
20/08	50,00	Doação de...		
25/08	20,00	Doação de...		
30/08	30,00	Doação de...		
05/09	10,00	Doação de...		
10/09	40,00	Doação de...		
15/09	50,00	Doação de...		
20/09	20,00	Doação de...		
25/09	30,00	Doação de...		
30/09	10,00	Doação de...		
05/10	40,00	Doação de...		
10/10	50,00	Doação de...		
15/10	20,00	Doação de...		
20/10	30,00	Doação de...		
25/10	10,00	Doação de...		
30/10	40,00	Doação de...		
05/11	50,00	Doação de...		
10/11	20,00	Doação de...		
15/11	30,00	Doação de...		
20/11	10,00	Doação de...		
25/11	40,00	Doação de...		
30/11	50,00	Doação de...		
05/12	20,00	Doação de...		
10/12	30,00	Doação de...		
15/12	10,00	Doação de...		
20/12	40,00	Doação de...		
25/12	50,00	Doação de...		
30/12	20,00	Doação de...		

Prezado(a) Senhor(a),

DOAÇÃO \_\_\_\_\_  
 IGC/USP



